

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI CÜRUF ATIKLARININ BETON
ÜRETİMİNDE KULLANIMI**

Kimya Müh. Eyüp EREN

FBE Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Kimya Mühendisliği Programında

Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

I. Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sabriye PİŞKİN

II. Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Emek Möröydor DERUN

İSTANBUL 2009

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI CÜRUF ATIKLARININ BETON
ÜRETİMİNDE KULLANIMI

Kimya Müh. Eyüp EREN

FBE Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Kimya Mühendisliği Programında

Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

I. Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sabriye PİŞKİN

II. Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Emek Möröydor DERUN

Juri Üyeleri : Prof.Dr. Ahmet Ekerim (YTÜ)

: Doç. Dr. Nabi Yüzer (YTÜ)

İSTANBUL 2009

İÇİNDEKİLER.....	Sayfa
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ.....	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. BETON.....	3
2.1 Tanım ve Genel Bilgiler	3
2.2 Betonların Sınıflandırılması	4
2.3 Sertleşmiş Betonların Bazı Özellikleri	5
3. BETONU OLUŞTURAN MADDELER	8
3.1 Agregas	9
3.1.1 Tanım.....	9
3.1.2 Sınıflama.....	9
3.1.3 Agregalardan Numune Alma.....	11
3.2 Çimento	12
3.2.1 Portland Çimentosu Üretimi.....	12
3.2.2 Çimento Bileşenleri	14
3.2.3 Çimentoların Özellikleri.....	16
3.2.3.1 Portland Çimentosunun Kimyasal Özellikleri.....	17
3.3 Beton Karma Suları	19
3.4 Beton Katkı Maddeleri	22
3.4.1 Katkı Kullanımı	23
3.4.2 Kimyasal Katkılar.....	24
3.4.3 Beton Katkılarının Özellikleri	25
3.5 Mineral Katkılar	30
3.5.1 Puzolanlar	30
3.5.1.1 Uçucu Külün Yapısı.....	34
3.5.1.2 Kimyasal Yapısı	34
3.5.1.3 Fiziksel Özellikler	35

3.5.1.4	Tane Şekli.....	36
3.5.1.5	İncelik.....	36
3.5.1.6	Yoğunluk.....	37
3.5.1.7	Uçucu Külün Betondaki Kimyasal Aktivitesi.....	37
3.5.2	Renk katkıları	38
4.	CÜRUF	39
4.1	Cürufaların Tanımlanması ve Sınıflandırılması	39
4.2	Cürufaların Kullanım Alanları	42
4.2.1	Cürufaların Çimento Üretiminde Kullanımı	42
4.2.2	Çimento Endüstrisinde Kullanılacak Cürufun Üretimi	42
4.2.3	Cürufaların Beton Üretiminde Agrega Olarak Kullanımı	45
4.2.4	Çelikhane Cürufları Kullanım Alanları	46
5.	DAHA ÖNCE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....	48
5.1	Ereğli Demir Çelik Fabrikası Cürufunun Asfalt Betonunda Agrega Olarak Kullanılması	48
5.2	Çelikhane Cürufu ve Kırılmış Kireçtaşı Agregası Betonlarının Özelliklerinin Karşılaştırması.....	54
6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	58
6.1	Dona Dayanıklılık (Magnezyum Sülfat Deneyi).....	58
6.1.1	Gerekli Malzemeler	59
6.1.2	Deneyin Yapılışı.....	59
6.1.3	Deney Sonuçları	62
6.2	Asitte Çözünebilir Sülfat İçeriği.....	62
6.2.1	Gerekli Malzemeler	62
6.2.2	Deneyin Yapılışı.....	64
6.2.3	Deney Sonucu.....	65
6.3	Toplam Kükürt İçeriği	66
6.3.1	Gerekli Malzemeler	66
6.3.2	Deneyin Yapılışı.....	67
6.3.3	Deney Sonucu.....	68
6.4	Suda Çözünebilir Klorür İçeriği	68
6.4.1	Gerekli Malzemeler	68

6.4.2	Deneyin Yapılışı	69
6.4.3	Deney Sonucu	70
6.5	Humus İçeriği	71
6.5.1	Gerekli Malzemeler	71
6.5.2	Deneyin Yapılışı	71
6.5.3	Deney Sonucu	72
6.6	Hafif Kirletici Miktarı Tayini	72
6.6.1	Gerekli Malzemeler	72
6.6.2	Deneyin Yapılışı	72
6.6.3	Deney Sonucu	73
6.7	Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini (Granülometri, Elek Analizi)	74
6.7.1	Gerekli Malzemeler	77
6.7.2	Deneyin Yapılışı	77
6.7.3	Deney Sonucu	78
6.8	Yassılık İndeksi Deneyi	82
6.8.1	Gerekli Malzemeler	82
6.8.2	Deneyin Yapılışı	83
6.8.3	Deney Sonucu	84
6.9	Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranı Tayini	85
6.9.1	Gerekli Malzemeler	85
6.9.2	Deneyin Yapılışı	85
6.9.3	Deney Sonucu	87
6.10	XRF ve XRD Deneyleri	88
7.	BETON ÜRETİMİ	92
7.1	Kullanılan Malzemeler	92
7.1.1	Uçucu Kül	92
7.1.2	Çimento	93
7.1.3	Kimyasal Katkı	93
7.1.4	Kırma taş (1 no ve 2 no)	95
7.1.5	Doğal Kum	97
7.1.6	Beton Karma Suyu	99

7.2	Beton Üretim Reçetesi ve Karışım Oranları.....	100
7.3	Beton Basınç Dayanımları.....	101
8.	SONUÇLAR.....	107
	KAYNAKLAR.....	109

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1. Çimento hamuru, harç ve betonun genel tanımları (Özkul, 1999).....	4
Çizelge 2.2. Tipik bir betonun çeşitli özellikleri	7
Çizelge 3.1 TS EN 197-1'e göre çimento tipleri	15
Çizelge 3.2 Çimentoların dayanım sınıfları	16
Çizelge 3.3 Çimentoların fiziksel özellikleri	17
Çizelge 3.4 Portland çimentosundaki oksitlerin yaklaşık sınırları	17
Çizelge 3.5 Bir portland çimentosundaki karma oksit oranları	18
Çizelge 3.6 Karma suyu kabul şartları	21
Çizelge 3.7 Karma suyu en yüksek klor içeriği	21
Çizelge 3.8 Kirlenme için sınır değerler	22
Çizelge 3.9 Kimyasal katkı tipi	27
Çizelge 3.10 1998 yılında Türkiye'deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin bazı fiziksel özellikleri	32
Çizelge 3.11 1998 yılında Türkiye'deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları	33
Çizelge 3.12 TS EN 450'de getirilen diğer sınırlandırmalar ve sınır değerleri	34
Çizelge 3.13 Betonda kullanılabilecek renklendirici katkılara örnekler	38
Çizelge 4.1 Yüksek fırın cürufalarının kimyasal bileşimlerine ait örnekler	44
Çizelge 5.1. Kalker ve Cüruf Agregalarının Gradasyonu	49
Çizelge 5.2 Kalker ve cüruf agregalarının fiziksel özellikleri	49
Çizelge 5.3 E.D.Ç.F. çelikhane cürufunun kimyasal analizi	50
Çizelge 5.4 AC 75-100'un fiziksel özellikleri	50
Çizelge 5.5 Marshall dizayn değerleri	51
Çizelge 5.6. E.D.Ç.F. cürufu ve kalker numunelerinin rijitlik modülü değerleri.....	52
Çizelge 5.7. E.D.Ç.F. Cürufu ve Kalker numunelerinin sünme sertliği modülü değerleri.	53
Çizelge 5.8. Kireç taşı ve çelikhane cürufu agregası özellikleri	55
Çizelge 5.9 Çelikhane cürufu ve kireç taşı cürufu agregası betonları için agrega gradasyonu	56
Çizelge 5.10 Çelikhane cürufu ve kireçtaşı agregaları için beton karışım dizaynı parametreleri	56
Çizelge 5.11. Değişen yüzdelerde çelikhane cürufu agregası ve kırılmış kireç taşı agregası kullanılarak üretilen beton numunelerine ait deney sonuçları.....	57

Çizelge 6.1 Kardemir Demir Çelik Fabrikası cürufu elek analizi sonucu.....	79
Çizelge 6.2 İ.D.Ç.F. demir çelik fabrikası elek analizi sonucu	80
Çizelge 6.3 En büyük yassılık indeks değerlerine göre kategoriler	82
Çizelge 6.4 K.D.Ç.F cürufu yassılık indeksi sonucu.....	84
Çizelge 6.5 K.D.Ç.F. ait cürufun birim ağırlığı.....	87
Çizelge 6.6 İ.D.Ç.F. cürufu birim ağırlığı	88
Çizelge 6.7 Kardemir demir çelik fabrikasına ait cürufun XRF sonuçları.....	89
Çizelge 7.1 Uçucu kül mekanik ve fiziksel deneyler raporu	92
Çizelge 7.2 Uçucu kül kimyasal analiz raporu	92
Çizelge 7.3 Çimento kimyasal analizi	93
Çizelge 7.4. Çimento fiziksel analizi.....	93
Çizelge 7.5 Kimyasal katkı analizi	94
Çizelge 7.6 Kırma taş 1 ve 2 numaralı agregaların yassılık indeksi sonuçları.....	95
Çizelge 7.7 Kırma kum numunesinin alkali silika reaktifliği boy uzaması sonuçları.....	96
Çizelge 7.8 Kırma kum numunesinin kuruma çekmesi deneyi sonuçları	97
Çizelge 7.9 Kırma kum numunesi kimyasal analiz sonuçları	97
Çizelge 7.10 Doğal kum malzemesi alkali silika reaktifliği boy uzaması sonuçları.....	98
Çizelge 7.11 Doğal kum malzemesi kimyasal analiz sonuçları	98
Çizelge 7.12 Beton karma suyu analiz raporu	99
Çizelge 7.13 C20 sınıfı beton üretimi için kullanılmış 1 numaralı beton karışım oranları	100
Çizelge 7.14 C30 sınıfı beton üretimi için kullanılmış 2 numaralı beton karışım oranları	100
Çizelge 7.15 Cüruf malzemesi kullanılarak uygulanan beton üretim reçetesi, 3 numaralı karışım	100
Çizelge 7.16 Cüruf malzemesi kullanılarak uygulanan beton üretim reçetesi, 4 numaralı karışım	101
Çizelge 7.17 1 numaralı karışım beton basınç dayanımı sonuçları	102
Çizelge 7.18 2 numaralı karışım beton basınç dayanımı sonuçları	104
Çizelge 7.19 3 numaralı karışım beton basınç dayanımı sonuçları	105
Çizelge 7.20 4 numaralı karışım beton basınç dayanımı sonuçları	106

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil. 3.1 Portland çimentosu betonunu oluşturan malzemelerin hacimce oranları.....	8
Şekil 3.2 Beton mikserinde hazır beton görüntüsü.....	8
Şekil 3.3. Kırılmış doğal agrega, çakıl	9
Şekil 3.4 Kırılmış doğal agrega (mıcır ve kırma taş tozu) ve doğal kum.....	11
Şekil 3.5 Dörde bölerek numune alma, çeyrekleme.....	12
Şekil 3.6 Çimento Üretim Prosesi	13
Şekil 3.7 C3S'nin elektron mikroskobu altında görünüşü.....	18
Şekil 3.8 Karışım suyunu azaltıcı katkıları kullanılarak beton özelliklerinde sağlanacak olumlu gelişmeler	29
Şekil 3.9 4000 kez büyütülmüş uçucu kül.....	36
Şekil 3.10 2000 kez büyütülmüş uçucu kül	36
Şekil 4.1 Kardemir Demir Çelik Fabrikası Depolarında Bekletilen Cüruf Atıkları.....	40
Şekil 4.2 Kardemir demir çelik fabrikası depolarında bekletilen cüruf atıkları	41
Şekil 4.3 Kardemir demir çelik fabrikası kırma eleme tesisi	41
Şekil 4.4 Tipik bir cüruf peletleştiricisinin şeması.....	43
Şekil 6.1 Donma çözünme deneyi paralel deney düzenekleri.....	61
Şekil 6.2 Donma çözünme deney düzeneği.....	61
Şekil 6.3 Distile su cihazı	63
Şekil 6.4 Teraziler	63
Şekil 6.5 Asitte çözünebilir sülfat içeriği deneyi baryum sülfat çökeleği görüntüsü.....	65
Şekil 6.6 Kül fırını.....	66
Şekil 6.7 Suda çözünebilir klorür deneyi titrasyon düzeneği	69
Şekil 6.8 Referans granülometri eğrileri, $D_{max}=16$ mm	74
Şekil 6.9 Referans granülometri eğrileri, $D_{max}=31.5$ mm	75
Şekil 6.10 0.25mm ile 31.5mm arası göz açıklıklı elekler	76
Şekil 6.11 Kare göz açıklıklı elekler	76
Şekil 6.12 K.D.Ç.F. cürufu elek analizi grafiği.....	81
Şekil 6.13 İ.D.Ç.F. cürufu elek analizi grafiği	81
Şekil 6.14 Silindir çubuklu yassılık elekleri.....	83
Şekil 6.15 Özgül ağırlığın belirlenmesi.....	85

Şekil 6.16 Tane yoğunluğu ve su emme oranı deneyi düzeneği	86
Şekil 6.17 Kardemir Cürufu XRD deney sonucu	90
Şekil 7.1 Kırma kum alkali silika reaktifliği uzama oranı – gün grafiği	96
Şekil 7.2 Doğal kum alkali silika reaktifliği uzama oranı – gün grafiği	98
Şekil 7.3 Kür havuzu resmi	101
Şekil 7.4 Beton test presi	102
Şekil 7.5 1 numaralı karışım gün – yük grafiği	103
Şekil 7.6 1 numaralı karışım gün – basınç dayanımı grafiği	103
Şekil 7.7 2 numaralı karışım gün – yük grafiği	104
Şekil 7.8 2 numaralı karışım gün – basınç dayanımı grafiği	104
Şekil 7.9 3 numaralı karışım gün – yük grafiği	105
Şekil 7.10 3 numaralı karışım gün – basınç dayanımı grafiği	105
Şekil 7.11 4 numaralı karışım gün – yük grafiği	106
Şekil 7.12 4 numaralı karışım gün – basınç dayanımı grafiği	106

ÖNSÖZ

Yürüdüğüm zorlu yolda beni hiç yalnız bırakmayan, desteğini, sabrını ve bilgisini hiç esirgemeyen, tez danışmanım ve değerli hocam Prof. Dr. Sabriye Pişkin'e

Çalışmalarım sırasında bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan 2. tez danışmanım sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Emek Möröydor Derun'a,

Deneysel çalışmalarım sırasındaki yardımları dolayısıyla T.H.B.B. Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına,

Gösterdiği sevgi, destek ve yardımları için arkadaşım Müzeyyen Ayaz'a

Gösterdikleri sevgi, destek ve üstün sabır için aileme, ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

FARKLI CÜRUF ATIKLARININ BETON ÜRETİMİNDE KULLANIMI

ÖZET

Bu çalışmada demir çelik fabrikalarında oluşan cürufun hazır beton üretiminde agrega yapı malzemesi olarak doğal kırma taş malzemeleri yerine kullanımı incelenmiştir..

İskenderun Demir Çelik Fabrikası'ndan ve Kardemir Demir Çelik Fabrikası'ndan çelikhane fırın cürufları elde edilmiştir. Cüruf malzemelerinin betonda kullanılabilirliğine dair ilgili standart ve mevzuatlara uygun olarak deneyler yapılmıştır. Bu amaçla alınan cüruf numunelerine kimyasal olarak asitte çözünabilir sülfat içeriği, suda çözünabilir klorür içeriği, toplam kükürt içeriği, humus içeriği, hafif kirletici miktarı içeriği ve dona dayanıklılık deneyleri ile birlikte XRF ve XRD analizleri yapılmıştır. Alınan numunelere aynı zamanda fiziksel ve mekanik deneyler olarak tane yoğunluğu ve su emme oranı, elek analizi ve yassılık indeksi deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre cüruf malzemelerinin betonda kullanılabilirlikleri incelenmiştir.

Kardemir Demir Çelik Fabrikası cüruf malzemesi ile beton üretimi yapılmış ve sonuçlar eşit karışım dizaynı ile ancak cüruf malzemesi yerinedoğal kırma taş malzemesi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Üretilen beton numuneleri 7 ve 28 gün kür şartlarında bekletilmiş ve beton basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

Ayrıca uçucu kül kullanılarak çimento miktarı düşürülmesi ile ekonomik olarak uygun, cüruf malzemeli agrega içeren yüksek dayanımlı beton üretimi üzerine çalışılmıştır.

THE USE OF SLAG WASTES TO PRODUCE CONCRETE

ABSTRACT

In this project, the usage of the slag wastes, that are formed during iron and steel productions, as aggregate in concrete production instead of natural stones are studied.

Steel slags are obtained from Iskenderun Demir Celik Fabric and Kardemir Demir Çelik Fabric. The required tests are accomplished according to standard test methods for the usability of steel slags. In this purpose, acid soluble sulfates, water soluble chlorides, total sulfur content, humus content, light weight contaminants and freeze thaw resistance tests and also XRF and XRD analyses are accomplished. As for the physical and mechanical tests, particle density and water absorption, particle size distribution and flatness index tests are accomplished. The usability of slags to be used in concrete as aggregate is studied according to the test results.

Kardemir Demir Celik Fabric steel slag is used to produce concrete and results are compared with reference concrete produced with natural coarse aggregate. After 7 and 28 days of curing process, compressive strengths of concretes are tested.

Fly ash is also used with steel slag to reduce the cement content in concrete to produce and economically reasonable high strength concrete.

Keywords : Slag, steel slag, aggregate, concrete production, ready mixed concrete, fly ash

1. GİRİŞ

Sanayi devriminden bu yana gelişen endüstri ile beraber oluşan atıklar çevre ve insan sağlığı için büyük bir sorun oluşturmaktadır. Üretim süreçlerinde oluşan atıkların geri kazanımına dair çalışmalar ve projeler ise bu sebeple büyük önem arz etmektedir. Sadece Ereğli Demir Çelik fabrikasında yılda 300000- 350000 ton çelikhane cürufu açığa çıkmakta ve bunların büyük bir kısmı kullanılamamakta ve atık sahalarında depolanmaktadır.

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 kullanılabilmektedir. Ancak özellikle çelikhane cürufları olmak üzere, oluşan cüruf atıklarının büyük bir bölümüne puzolanik özellik kazandırılmamaktadır ve cüruf ürünleri atık sahalarında depolanmaktadır.

Çelikhane cüruf atıklarının yapı malzemelerinde değerlendirilmesi üzerine ülkemizde bundan önce yapılmış bir çalışma, 2005 yılında Fırat Üniversitesi İnşaat Fakültesi Bölümü'nde Taner Alataş, Ekrem Tolga Somunkıran ve Perviz Ahmedzade tarafından gerçekleştirilmiştir. Yaptıkları çalışma ile Ereğli Demir Çelik Fabrikası cürufunu asfalt betonunda agrega olarak kullanımını incelemişlerdir. Çalışmada Marshall briketleri üzerinde Marshall stabilite, indirekt çekme rijitlik modülü ve statik yüklemeli sünme sertliği deneyleri yapmışlar; aynı deneyleri Adapazarı Taşkırsığı taş ocağından alınan kalker kökenli malzeme ile tekrarlayarak elde edilen verileri karşılaştırmışlardır. Sonuçta Ereğli Demir Çelik Fabrikası çelikhane cüruflarının kaplamanın optimum bitüm oranına ve diğer fiziksel özelliklerine etkisini incelemişler ve cürufun asfalt agregası olarak kullanıma elverişli olduğu sonucuna varmışlardır. Ancak cüruf malzemesinin hazır beton üretiminde ve beton yol uygulamalarında agrega olarak kullanımının uygunluğunu değerlendirmemişlerdir.

Konu ile ilgili dünyada yapılmış bir çalışma 2002 yılında M. Maslehuddin, Alfarabi M. Sharif, M. Shameem, M. Ibrahim ve M.S. Barry tarafından Suidi Arabistan'da King Fahd Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada iri çelikhane cürufu ve kırılmış kireç taşı agregası betonlarının özellikleri karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda iri cüruf agregaları ile üretilen hazır betonun dayanım performanslarının doğal kireç taşı agregası ile üretilen betona göre daha iyi sonuçlar verdiği bulunmuştur. Ancak çalışmada cürufların agrega olarak kullanılabilirliği üzerine EN 12620 standardına göre

uygunluk deneyleri yapmamışlar ve cürufları deney sonuçlarına göre kategorize etmemişlerdir.

Cüruf malzemesinin beton agregası olarak uygunluğuna karar verilebilmek için TS 706 EN 12620 “Beton Agregaları” standardına göre incelenmesi ve standartta belirtilen deneylerin yapılıp kullanılan malzemenin karakterizasyonun yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada İskenderun Demir Çelik Fabrikası çelikhane cürufunun ve Kardemir Demir Çelik Fabrikası cürufunun hazır beton beton üretiminde agrega yapı malzemesi olarak doğal kırma taş malzemeleri yerine kullanımı incelenmiştir.

Cüruf malzemelerinin betonda kullanılabilirliğine dair ilgili standart ve mevzuatlara uygun olarak TS EN 1367-2 standardına göre magnezyum sülfat deneyi (dona dayanıklılık deneyi), TS EN 1744-1 standardının 12. 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 gönderilen malzemelere 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), TS EN 933-3 standardına göre yassılık indeksi deneyi ve TS EN 1097-6 standardına göre tane yoğunluğu ve su emme oranı deneyi yapılmıştır.

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

Elde edilen sonuçlara göre Kardemir Demir Çelik Fabrikası’ndan elde edilen cüruf malzemesi ile Karabük - Safranbolu’da Güzay Beton firmasında beton üretimi yapılmıştır.

Doğal kırma taş malzemeleri ile ve cüruf malzemeleri ile ayrı ayrı beton üretimi yapılmıştır. Üretilen betondan küp numuneler alınmıştır. Kür havuzlarında bekletilen küp numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları mukayese edilmiştir. Ayrıca uçucu kül kullanılarak çimento miktarı düşürülmüş ve cüruf malzemeli agrega içeren hazır beton üretimi ile beton üretimi daha ekonomik hale getirilebilmesi üzerine çalışılmıştır.

2. BETON

2.1 Tanım ve Genel Bilgiler

Beton kum, çakıl veya kırma taş ve çimento ile suyun gerektiğinde bazı katkı maddelerinin belirli oranlarda homojen olarak karıştırılması ile elde edilen, başlangıçta plastik kıvamda olup zamanla çimentonun hidratasyonu sebebiyle katılaşp, istenilen şekli alarak sertleşen kompozit bir yapı malzemesidir. Burada kum, iri agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurarak betonun kompazitesini artırır. Çakıl veya kırma taş taneleri betonun bir nevi iskeletini oluşturur. Çimento, kum ve iri agrega tanelerini birbirine bağlar. Ekonomik olması, şekil verilebilme kolaylığı, fiziksel ve kimyasal dış etkilere karşı dayanıklılığı ile günümüzün en yaygın kullanılan taşıyıcı yapı malzemesi betondur (Erdoğan, Kocataşkın, 1991).

Beton çağdaş toplumların temelini oluşturan malzemelerin en önemlilerinden biridir. Çevremize baktığımızda, binalar, yollar, köprüler, barajlar, santraller, istinat duvarları, su depoları, limanlar, hava alanları, kent mobilyaları ve benzeri yapıların betondan yapıldığını görürüz. Günümüzde, dünyada her yıl yaklaşık 5,5 milyar ton beton üretilmektedir. Bu miktar dünya nüfusuna bölündüğünde kişi başına 1000 kg beton üretildiği ortaya çıkar.

Beton agregaları, minerallerden oluşmuş taneli malzemelerdir. Kum, çakıl ve kırma taş, normal ağırlıklı beton yapımında en çok kullanılan agrega cinsleridir. Türk standartlarının tanımlamasına göre, elendiğinde 4,0 mm kare göz açıklıklı elekten geçebilen boyutlardaki agregaya ince agrega ve bu elek üzerinde kalan agregaya, iri agrega denilmektedir.

Betonun yaygın kullanılan bir yapı malzemesi olmasının nedeni diğer birçok yapı malzemesine göre, daha kolay şekil verilebilir, ekonomik, dayanıklı, üretiminde daha az enerji tüketen, her yerde üretilebilir ve estetik özellikleridir.

Taze haldeyken plastik bir kıvama sahip olması betona istenilen herhangi bir şeklin verilmesini sağlar. Diğer bir deyişle, taze beton sertleştiğinde içine konulduğu kalıbın şeklini almış olur. Böylece, kirişler, kolonlar, karmaşık şekilli hiperbolik kabuklar, döşemeler, kazıklar, kütle betonları v.b. yapmak mümkün olur. Beton üretiminde büyük ölçüde yerel malzemeler kullanılır. Bu husus maliyetinin diğer yapı malzemelerine oranla düşük olmasındaki en önemli noktalardan biridir. İyi bir beton dayanıklı bir yapı malzemesidir. Uygun bir şekilde tasarlanmış, üretilmiş, yerleştirilmiş, sıkıştırılmış ve bakımı yapılmışsa uzun yıllar her hangi bir bakım, onarım gerektirmeden hizmetini sürdürür. Betonu bir hazır beton santralinde olduğu kadar ülkenin en ücra bir köşesinde de kalite kontrolüne özen

göstermek koşuluyla üretmek mümkündür. 1 m³ alüminyum, çelik ve cam üretimi için, sırasıyla, yaklaşık 360 GJ, 300 GJ ve 50 GJ enerji harcanırken, aynı miktardaki bir beton için yaklaşık 3,5 GJ enerjiye gereksinim vardır. Enerji maliyetlerindeki hızlı artış göz önünde bulundurulduğunda, betonun bu özelliğinin önemi de anlaşılır. Beton, aynı zamanda, birçok estetik olanaklara sahip bir malzemedir. İstenilen şekil, renk ve yüzey özelliklerini vererek değişik görüntüler elde etmek mümkündür.

Betonun birçok olumlu özelliğinin yanı sıra, elbette ki, bazı olumsuz özellikleri de bulunmaktadır. Ancak, bunların üstesinden gelebilmek için beton üreticiye ve kullanıcıya birçok olanak sağlar. Çelik donatı kullanılarak düşük çekme dayanımı dezavantajının azaltılması, çeşitli kimyasal katkı maddeleri kullanılarak çeşitli özelliklerinin daha da iyileştirilmesi bu olanaklara örnek olarak verilebilir.

Beton çimento, ince agreg, kaba agreg, su ve gerektiğinde çeşitli kimyasal ve/veya mineral katkıları içeren bir kompozit malzemedir. Çoğu zaman, konuyla ilgisi olmayan sıradan insanlar, hatalı bir biçimde, çimento harcı ve çimento hamurunu da beton olarak nitelendirmektedirler. Bu üç malzemenin, genel hatlarıyla, tanımı Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Çimento hamuru, harç ve betonun genel tanımları (Özkul, 1999)

Malzeme	Bileşimi
Çimento hamuru	Çimento + Su
Harç	İnce agreg + Çimento hamuru
Beton	Kaba agreg + İnce agreg + Çimento hamuru

İyi bir betonda tüm ince agreg tanelerinin çimento hamuruyla; tüm kaba agreg tanelerinin de harçla bütünüyle kaplanmış olması gerekir. Bu sistem içindeki bağlayıcı malzeme olan çimentonun suyla reaksiyonu (hidratasyon) sonucunda beton dayanım kazanır.

2.2 Betonların Sınıflandırılması

Betonlar birim ağırlıklarına göre üç ana gruba ayrılırlar. Yaklaşık 2400 kg/m³ ağırlığında olan betonlar normal beton olarak isimlendirilir ve taşıyıcı amaçlarla en çok kullanılan beton türüdür. Hafif betonlar, birim ağırlıkları 2000 kg/m³’den az olan betonlardır. Yalıtım amaçlı olarak veya dayanım ağırlık oranının yüksek olması gereken koşullarda kullanılırlar.

Radyasyon kalkanı olarak kullanılacak betonlarda bazı özel agregalar kullanılarak ağırlık artırılır. Birim ağırlığı 2600 kg/m^3 'den yüksek olan bu betonlar ağır beton olarak adlandırılır.

Öte yandan, dünyanın birçok ülkesinde birbirinden farklılıklar gösteren sınıflandırmalar yapılmasına karşın, betonları basınç dayanımlarına göre de üç ana gruba ayırmak mümkündür:

- Düşük dayanımlı betonlar: Basınç dayanımları 20 N/mm^2 'nin altında olan betonlar.
- Normal dayanımlı betonlar: Basınç dayanımları $20\text{-}40 \text{ N/mm}^2$ olan betonlar.
- Yüksek dayanımlı betonlar: Basınç dayanımları 40 N/mm^2 'den fazla olan betonlar.

2.3 Sertleşmiş Betonların Bazı Özellikleri

Malzemenin seçiminde, uygulanacak olan yüklere karşı malzemenin gösterdiği direnç göz önünde bulundurulması gereken en önemli hususlardan birisidir. Birim deformasyon (birim boydaki deformasyon) malzemenin uygulanan yükler altındaki şekil değiştirmesini; gerilme (birim alana uygulanan yük) ise yükün şiddetinin belirtilmesinde kullanılan terimlerdir. Gerilmenin malzeme üzerindeki uygulanış biçimine göre basınç, çekme, eğilme, kesme, burulma gibi çeşitleri bulunur. Malzemelerin gerilme - birim deformasyon ilişkileri, genellikle, dayanım, elastisite modülü, süneklik (veya gevreklik) ve tokluk (enerji emme kapasitesi) cinsinden ifade edilir.

Dayanım malzemenin kırılma olmadan alabileceği en yüksek gerilme olarak tanımlanır. Beton basınç yükleri altında daha iyi davranış gösterdiğinden, betonun dayanımından söz edildiğinde, diğer dayanımlar belirtilmemişse, basınç dayanımı anlaşılır. Betonun dayanımı çimento hidratasyonunun bir fonksiyonu olduğundan ve bu işlem de zamana bağlı olduğundan, dayanım belirtilirken çoğunlukla betonun yaşıyla birlikte söylenir. Mühendisler hesaplarında daha çok betonun 28 günlük basınç dayanımını esas alırlar. Dayanım, standart ortam koşullarında (sıcaklık ve nem) tutulan, standart boyutlardaki numuneler ve standart deney yöntemleri kullanılarak belirlenir. Daha önce belirtildiği gibi, birçok yapıda normal dayanımlı (28 günlük basınç dayanımı $20\text{-}40 \text{ N/mm}^2$) betonlar kullanılır. Son yıllarda, beton teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak, 120 N/mm^2 basınç dayanımına sahip olan betonları ticari olarak üretmek mümkün olmuştur.

Betonun çekme dayanımı ve eğilme dayanımı basınç dayanımının, sırasıyla, yaklaşık %10'u ve %15'i kadardır. Basınç dayanımıyla bunlar arasındaki bu önemli fark betonun heterojen ve oldukça karmaşık bir yapıya sahip olmasından kaynaklanır.

Çelik gibi birçok malzemede gerilme-birim deformasyon ilişkisi iki ana bölüme ayrılır. Başlangıçta, gerilme ve birim deformasyon birbirleriyle doğrusal orantılıdır ve yük kaldırıldığında malzeme eski şeklini alır. Bu davranışa elastik davranış ve bu bölgedeki deformasyona da elastik deformasyon adı verilir. Elastisite modülü elastik davranış bölgesindeki gerilmeyle ona karşı gelen elastik birim deformasyonun oranıdır. Basınç yükleri altında betonun elastisite modülü $14000-40000 \text{ N/mm}^2$ arasındadır. Söz konusu değerin bilinmesi yapı tasarımında malzemenin kalıcı deformasyon göstermeden alabileceği en fazla gerilmenin hesaplanmasında kullanılır.

Bazı malzemeler için gerilme-birim deformasyon ilişkisi yükleme süresinden etkilenmez. Ancak, aralarında betonun da bulunduğu diğer bazı malzemelerde, bu ilişki yükleme süresine bağımlı olabilir. Örneğin, bir beton numunesi dayanımının çok altında bir gerilmeye yeterince uzun süre maruz kaldığında kalıcı deformasyon gösterir. Sürekli yük altında malzemenin şekil değişmesine sünme denir.

Betonda, hiç yük uygulanmamışken bile, ortam rutubeti ve sıcaklığına bağlı olarak, deformasyonlar görülebilir. Taze haldeyken içerdiği suyun ortam rutubetine bırakıldığında buharlaşma yoluyla kaybolması betonun rötre denilen büzülmesine neden olur. Büyük kütleler halinde dökülen betonlarda (örneğin, beton barajlardaki kütle betonları) yüzeyinin soğuması, iç kısımlarının sıcak kalması nedeniyle ısıl rötre meydana gelebilir. Rötre beton açısından kritik bir olgudur. Engellendiğinde, çekme gerilmeleri yaratır. Betonun çekme dayanımının düşük olduğu göz önünde bulundurulursa, bu çekme gerilmeleri çatlakların oluşmasına neden olur.

Yukarıda özetlenen özelliklerin yanı sıra, malzeme seçiminde dikkate alınması gereken ve zaman zaman en az diğerleri kadar önemli olan bir husus da dayanıklılıktır. Dayanıklılık, bir malzemenin çevre koşullarına karşı direnci olarak tanımlanabilir. Genel olarak, geçirimsizliği az olan, yoğun betonlar diğerlerine oranla daha dayanıklıdır.

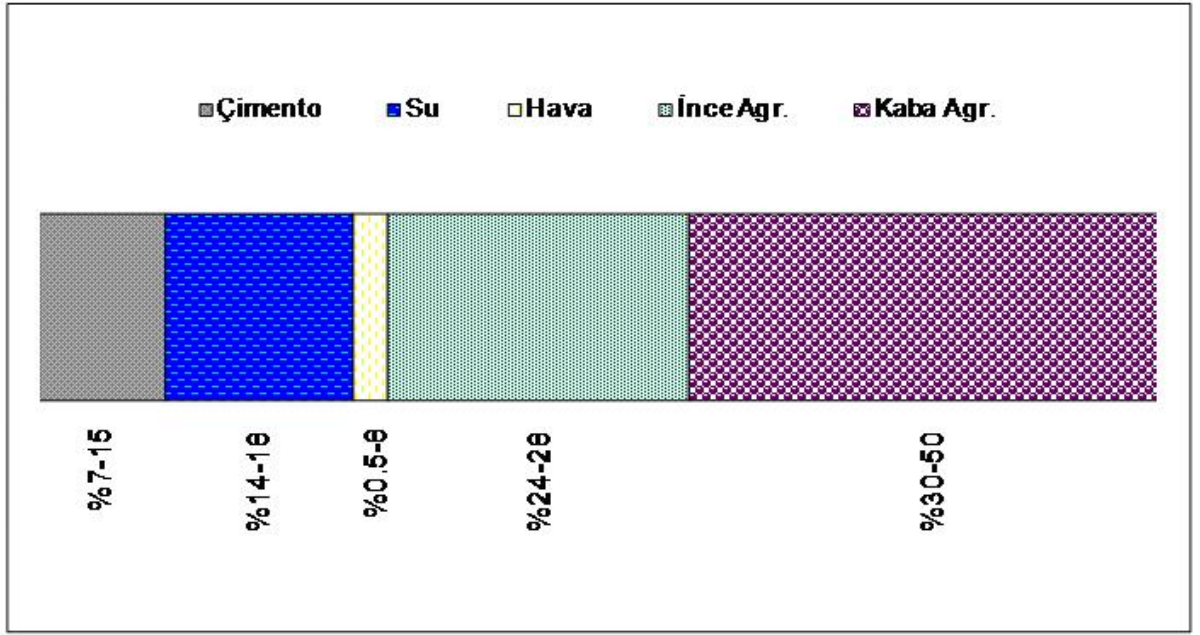
Burada ana hatlarıyla tanımlanmış olan özellikler ileriki bölümlerde daha ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Yapılarda kullandığımız tipik bir betonun çeşitli özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Tipik bir betonun çeşitli özellikleri (Özkuş, 1999)

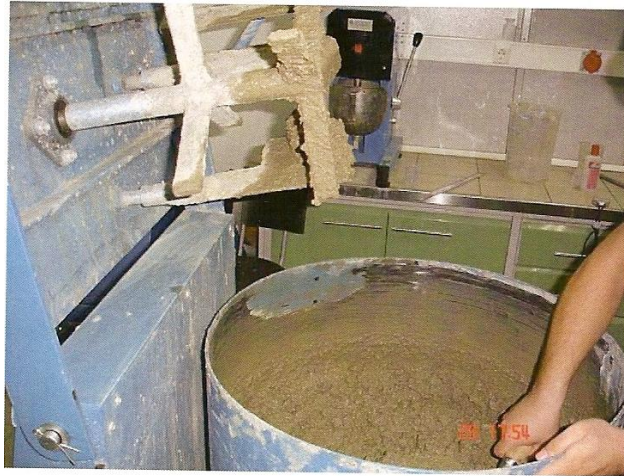
Basınç dayanımı	30 N/mm ²
Çekme dayanımı	5 N/mm ²
Eğilme dayanımı	5 N/mm ²
Elastisite Modülü	25000 N/mm ²
Poisson oranı	0.17
Isıl genleşme katsayısı	10x10 ⁻⁶ /°C
Yoğunluk	2300 kg/m ³

3. BETONU OLUŞTURAN MADDELER

Beton, esas itibariyle, ince agrega, kaba agrega, çimento ve sudan oluşur. Söz konusu bu dört malzeme betonun iki bileşenini meydana getirirler. Çimento ve su birlikte çimento hamurunu; ince ve kaba agregalar da agrega bileşenini oluşturur. Bunların yanı sıra, betonda bir miktar da hava bulunur. Ayrıca, gerektiğinde, betonun belirli özelliklerini değiştirmek (örneğin, priz süresini kısaltmak veya uzatmak, işlenebilirliği artırmak, su gereksinmesini azaltmak, v.b) amacıyla, çeşitli mineral ve kimyasal katkıları da kullanılabilir. Şekil 3.1’de bir portland çimentosu betonunda bulunan malzemelerin hacimsel miktarları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil. 3.1 Portland çimentosu betonunu oluşturan malzemelerin hacimce oranları (Özkul, 1999)



Şekil 3.2 Beton mikserinde hazır beton görüntüsü

3.1 Agreg

3.1.1 Tanım

Agrega, betonda kullanıma uygun taneli mineral malzemedir. Agregalar, doğal, yapay veya daha önce yapıda kullanılmış malzemelerden tekrar kazanım yoluyla elde edilmiş olabilir.

3.1.2 Sınıflama

Agregalar elde ediliş şekline bağlı olarak üç grupta toplanabilir:

a) Doğal agrega (Doğal taş agregası)

Doğal agrega; nehirlerden, denizlerden, çöllerden, eski göl, dere yataklarından ve taş ocaklarından kırılmamış veya kırılmış olarak elde edilen agregadır.



Şekil 3.3. Kırılmış doğal agrega, çakıl

b) Yapay agrega (Sanayi ürünü agrega)

Yapay agrega; yüksek fırın cürufu taşı, izabe cürufu veya yüksek fırın cüruf kumu gibi sanayi ürünü olan kırılmamış veya kırılmış agregadır.

c) Geri kazanılmış agrega

Geri kazanılmış agregası; daha önce yapıda kullanılmış ve işlemten geçirilerek yeniden elde edilen agregadır.

Öte yandan agregalar tane boyutlarına göre aşağıda gösterildiğı gibi sınıflandırılırlar.

a) İnce agregalar

İnce agregası, taneleri 4 mm kare gözlü elekten geçen agregadır.

- Kum: Kırılmamış tanelerden meydana gelen ince agregadır.
- Kırma Kum: Kırılmış tanelerden oluşan ince agregadır.
- Yapay Kum: Sanayi ürünü olan kırılmış veya kırılmamış ince agregadır.

b) İri agregalar

İri agregası taneleri 4 mm kare gözlü elek üzerinde kalan agregadır.

- Çakıl: Kırılmamış doğal durumdaki tanelerden oluşan iri agregadır.
- Kırma taş (Mıcır): Kırılmış tanelerden oluşan iri agregadır.
- Yapay Taş: Sanayi ürünü olan kırılmış veya kırılmamış iri agregadır.

c) Dolgu malzemesi (Filler)

Çoğunluğu, 0,063 mm göz aralıklı elekten geçen ve tamamı 0,25 mm'den daha küçük boyuta sahip ince malzemedir. Filler, özellikle taze betonun ayrışmasını önleyen yani kohezyonu yüksek beton üretimine olanak veren bir malzeme çeşididir.

İyi nitelikteki bir agregası temiz, sert ve sağlam olmalı, bunların yanında suyun etkisiyle yumuşamamalı, dağılmamalı, çimentoların bileşenleriyle zararlı bileşikler meydana getirmemeli ve donatının korozyona karşı korunmasını tehlikeye düşürmemelidir (TS 706 EN 12620, 2003).



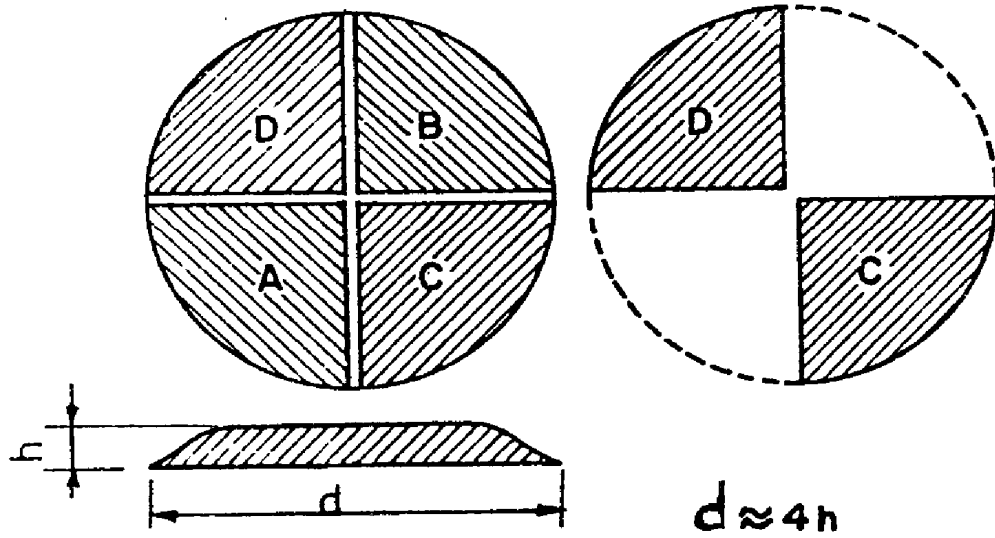
Şekil 3.4 Kırılmış doğal agrega (mıcır ve kırma taş tozu) ve doğal kum (Özku, 1999)

3.1.3 Agregalardan Numune Alma

Bir agrega yığınının numune alınırken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, numunenin agrega yığınını temsil edebilmesidir. Ters durumda yanlış sonuçlara varılır. Bir şantiyede depolanmış agrega yığınının alınacak örnekler, yığının tepe ve etek kısımlarından değil orta kısımlarından farklı noktalardan alınmalıdır. Toplanan örnekler daha sonra homojen bir şekilde karıştırılmalıdır. Elde edilen toplam örneğin tek bir deney için istenen miktara kadar küçültülmesi gerekir. Hangi deney isteniyorsa, o deneyle ilgili standartta tek deney için gerekli en az deney numunesi miktarları en büyük tane büyüklüğüne bağlı olarak belirtilir.

Örneğin, en büyük tane boyutu 16 mm olan bir agregada birim ağırlık tayini 5 kg agrega kullanılarak gerçekleştirilmelidir.

Deney numuneleri, toplam numuneyi dörde bölerek Şekil 3.5'teki çeyrekleme yöntemi veya bölgeç kullanarak elde edilir. Bu yöntemlerden biri tek deney için gerekli en az miktar elde edinceye kadar sürekli uygulanır. Sonuçta elde edilen numune üzerinde istenilen deney gerçekleştirilir (TS 707, 1980).



Şekil 3.5 Dörde bölerek numune alma, çeyrekleme (Özkul, 1999)

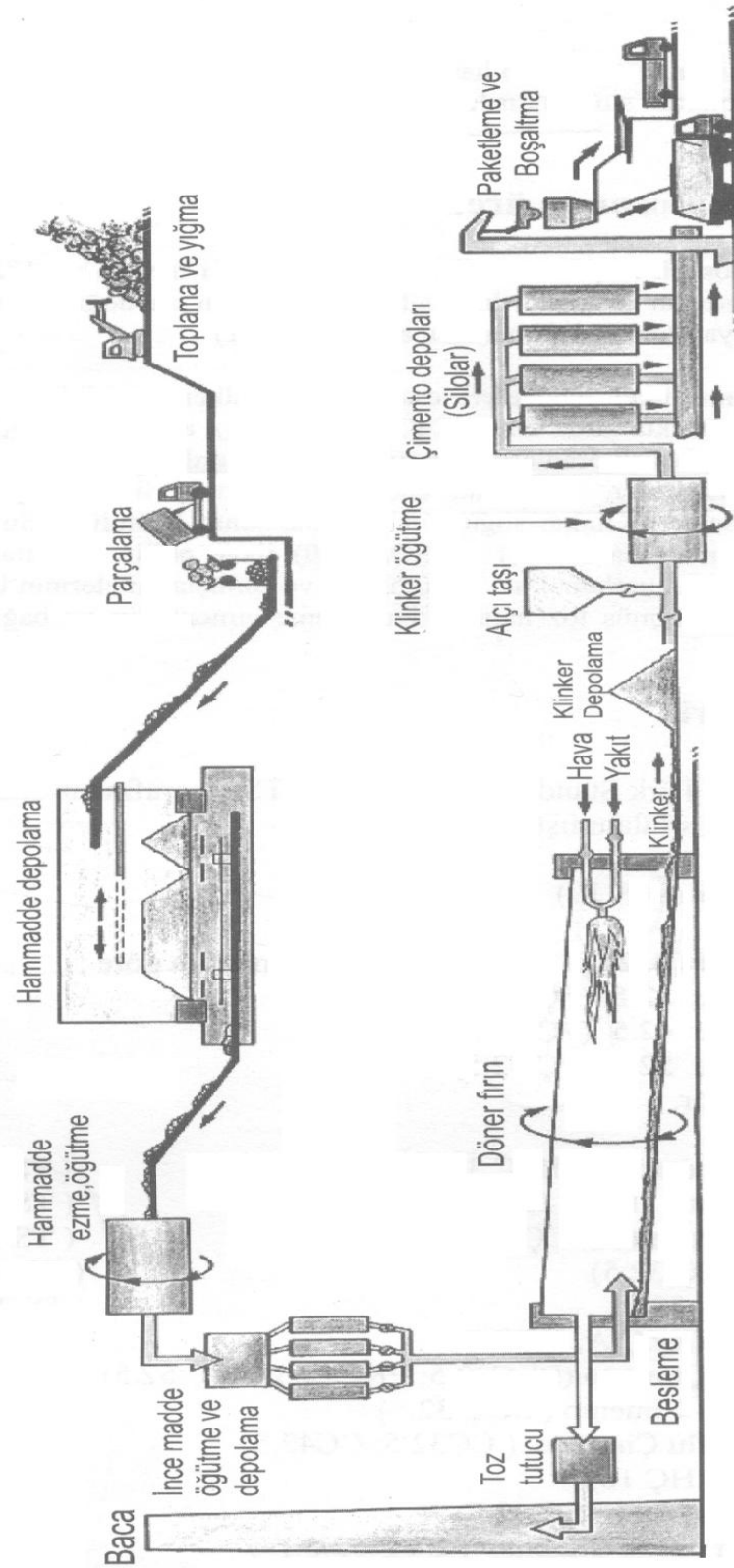
3.2 Çimento

Çimentolar su ile reaksiyon sonucu hem havada ve hem de su altında katılaştıkları ve sertleştikleri için hidrolik bağlayıcılar olarak sınıflandırılırlar. Çimento ile su arasındaki kimyasal reaksiyona "hidratasyon" denir.

3.2.1 Portland Çimentosu Üretimi

Portland Çimentosu, Joseph Aspdin isimli bir duvarcı ustası tarafından 1824 yılında bulundu. Bu çimento ile üretilen betonun rengi Portland adasında bulunan bir doğal taşın rengine benzediğinden dolayı ürettiği çimentoya Portland Çimentosu adını verdi. (Kosmatka, 1995)

Portland çimentolarının ilkel maddeleri esas olarak kalker ve kildir. Portland çimentolarının üretiminde, önce uygun miktarlarda kireç (CaO), silis (SiO_2), alümin (Al_2O_3) ve demir Oksit (Fe_2O_3) ihtiva eden hammaddeler belirli oranlarda karıştırılarak fırınlarda $1450\text{ }^\circ\text{C}$ veya $1650\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar pişirilirlir. Fırından çıkan gri renkteki findık veya ceviz büyüklüğündeki malzemeye "klinker" denir. Klinker soğutulur ve daha sonra öğütülür. Bu öğütme işlemi sırasında klinkere %3 - %5 oranlarında alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ilave edilir. Alçıtaşı ilave etmenin nedeni çimentonun priz sürelerini ayarlamaktır. Öğütülmüş ve sonuçta tanelerinin boyutlarını büyük oranda 90 mikronun altına düşürülmüş toz halindeki malzeme çimentodur ve bağlayıcı madde özelliğini kazanmıştır.



Şekil 3.6 Çimento Üretim Prosesi (Özkul, 1999)

3.2.2 Çimento Bileşenleri

Çizelge 3.1’de de gösterilen TS EN 197-1’deki değişik çimento tiplerine göre çimentonun bileşen malzemeleri şu şekildedir:

- Ana bileşen, örn. Portland çimentosu klinkeri;
- İkinci ana bileşen, örn. uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kalker, silis dumanı;
- Minör ilave bileşen, örn. uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kalker, doğal puzzolan;
- Priz ayarlayıcı, örn. kalsiyum sülfat;
- Kimyasal katkıları, örn. pigmentler, hava sürükleyici katkıları.

İkinci ana bileşeni belirten harfler şu şekildedir:

S, yüksek fırın cürufu;

D, silis dumanı;

P, doğal puzzolan;

Q, doğal kalsine puzzolan;

V, silissi uçucu kül;

W, kalkersi uçucu kül;

T, pişmiş şist;

M, üsttekilerden ikisi veya daha fazlası.

Çizelge 3.1 TS EN 197-1'e göre çimento tipleri (TS EN 197-1, 2000)

Eski TS	İşaretleme	Çimento	TS EN 197-1 İşaretleme	Klinker İçeriği, %
TS 19	PÇ	Portland Çimento	CEM I	% 95-100 Klinker
TS 12139	PCÇ	Portland-Cürüflu Çimento	CEM II/A-S	% 80-94 Klinker + % 6-20 Cüruf
			CEM II/B-S	% 65-79 Klinker + % 21-35 Cüruf
TS 12141	PSFÇ	Portland-Silis Çimento	CEM II/A-D	% 90-94 Klinker + % 6-10 Silis Dumanı
TS 10156 TS 26	KÇ TÇ	Portland-Puzolanlı Çimento	CEM II/A-P	% 80-94 Klinker + % 6-20 D.Puzolan
			CEM II/B-P	% 65-79 Klinker + % 21-35 D.Puzolan
			CEM II/A-Q	% 80-94 Klinker + % 6-20 DK.Puzolan
			CEM II/B-Q	% 65-79 Klinker + % 21-35 DK.Puzolan
TS 640	UKÇ	Portland-Uçucu Küllü Çimento	CEM II/A-V	% 80-94 Klinker + % 6-20 SU.Kül
			CEM II/B-V	% 65-79 Klinker + % 21-35 SU.Kül
			CEM II/A-W	% 80-94 Klinker + % 6-20 KU.Kül
			CEM II/B-W	% 65-79 Klinker + % 21-35 KU.Kül
TS 10156	KÇ	Portland-Pişmiş Şistli Çimento	CEM II/A-T	% 80-94 Klinker + % 6-20 P.Şist
			CEM II/B-T	% 65-79 Klinker + % 21-35 P.Şist
TS 12140	PLÇ	Portland-Kalkerli Çimento	CEM II/A-L	% 80-94 Klinker + % 6-20 L.Kalker
			CEM II/B-L	% 65-79 Klinker + % 21-35 L.Kalker
			CEM II/A-LL	% 80-94 Klinker + % 6-20 LL.Kalker
			CEM II/B-LL	% 65-79 Klinker + % 21-35 LL.Kalker
TS 12143	PKÇ	Portland-Kompoze Çimento	CEM II/A-M	% 80-94 Klinker + % 6-20 Katkılar
			CEM II/B-M	% 65-79 Klinker + % 21-35 Katkılar
TS 20	CÇ	Yüksek Fırın Cürüflu Çimento	CEM III/A	% 35-64 Klinker + % 36-65 Cüruf
			CEM III/B	% 20-34 Klinker + % 66-80 Cüruf
			CEM III/C	% 5-19 Klinker + % 81-95 Cüruf
TS 12144	PZÇ	Puzolanik Çimento	CEM IV/A	% 65-89 Klinker + % 11-35 S.Dumanı, Puzolan,U.Kül
			CEM IV/B	% 45-64 Klinker + % 36-55 S.Dumanı, Puzolan,U.Kül
TS 12142	KZÇ	Kompoze Çimento	CEM V/A	% 40-64 Klinker + % 18-30 Cüruf + % 18-30 Puzolan,SU.Kül
			CEM V/B	% 20-28 Klinker + % 31-50 Cüruf + % 31-50 Puzolan,SU.Kül

3.2.3 Çimentoların Özellikleri

Çimento Dayanım Sınıfları

Çimentoların standart dayanımı, EN 196-1'e göre tayin edilen 28 günlük basınç dayanımıdır ve N/mm^2 (MPa) olarak gösterilir. Üç standart dayanım sınıfı belirlenmiştir ve her biri Çizelge 3.2'de de gösterilen $20 N/mm^2$ bir "uygunluk aralığı" içindedir. Bu limitler mutlak değil, karakteristiktir. Yani, deney sonuçlarının % 5'i, $2,5 N/mm^2$ 'den fazla olmamak şartıyla, alt limitin altında ve % 10'u üst limitin üstünde olabilir. En düşük karakteristik değer, dayanım sınıfını tanımlamaktadır. Çimentoların ayrıca 2 ve 7 günlük deneyler ile erken dayanım alt-sınıflarına da bakılmaktadır.

Çizelge 3.2 Çimentoların dayanım sınıfları (TS EN 197-1, 2000)

Basınç Dayanımı, N/mm^2 (MPa)				
Dayanım Sınıfı	Erken Dayanım		Standard Dayanım	
	2 Günlük	7 Günlük	28 Günlük	
32,5 N	—	$\geq 16,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R	$\geq 10,0$	—		
42,5 N	$\geq 10,0$	—	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 R	$\geq 20,0$			
52,5 N	$\geq 20,0$	—	$\geq 52,5$	—
52,5 R	$\geq 30,0$			

Çimentoların Diğer Özellikleri

TS EN 197-1'e göre çimentoların, dayanımın yanı sıra bazı fiziksel ve kimyasal özelliklere de sahip olması gerekmektedir. Çimentoların fiziksel özellikleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Çimentoların fiziksel özellikleri (TS EN 197-1, 2000)

Standard Dayanım Sınıfları	32,5	42,5	52,5
Priz Başlama Süresi*	≥ 75 dakika	≥ 60 dakika	≥ 45 dakika
Genleşme*	≤ 10 mm	≤ 10 mm	≤ 10 mm
* Deneyler TS EN 196-3'e göre yapılır.			

Portland çimentosunun ilkel maddelerinin içerdiği esas oksitlerin yüzdeleri Çizelge 3.4. gösterilmiştir. (Neville, 1993)

3.2.3.1 Portland Çimentosunun Kimyasal Özellikleri

Çizelge 3.4 Portland çimentosundaki oksitlerin yaklaşık sınırları (Neville, 1993)

Oksit	%
CaO	60 -67
SiO ₂	17 -25
Al ₂ O ₃	3 - 8
Fe ₂ O ₃	0,5 - 6,0

Fırında portland çimento klinkerinin üretimi sırasında; kalsiyum oksit, hammaddelerin diğer oksitleri ile birleşerek karma oksit denilen bileşikleri meydana getirirler. Portland çimentosunun yaklaşık % 90'ını dört ana karma oksit oluşturur. Bunların kimyasal formülleri ve kısaltılmış gösterimleri aşağıda verilmiştir.

3 CaO.SiO₂..... = C₃S (Trikalsiyum Silikat)

2CaO.SiO₂..... = C₂S (Dikalsiyum Silikat)

3CaO.Al₂O₃..... = C₃A (Trikalsiyum Alüminat)

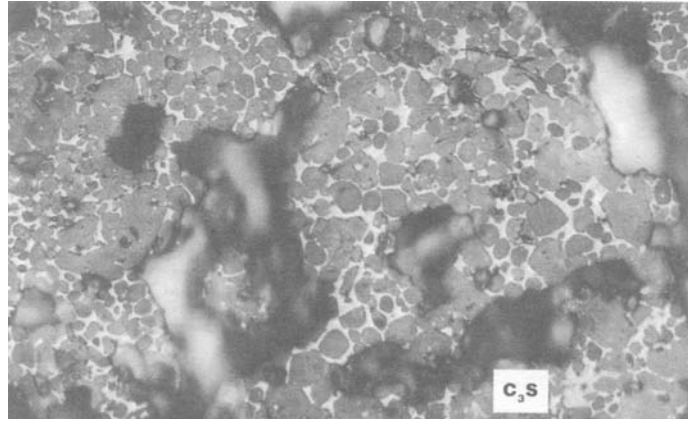
4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃..... = C₄AF (Tetrakalsiyum Alümino Ferrit)

Çizelge 3.5’de tipik bir portland çimentosunda bulunan karma oksitlerin yüzdeleri gösterilmiştir.

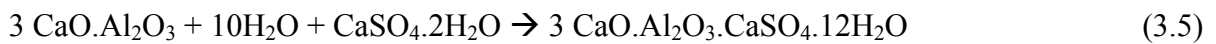
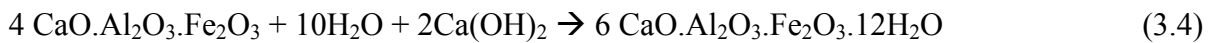
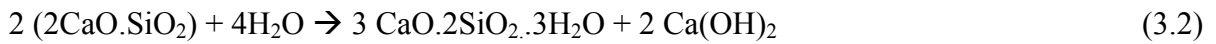
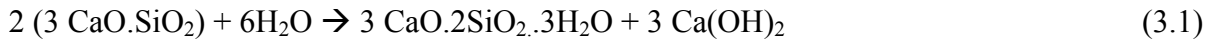
Çizelge 3.5 Bir portland çimentosundaki karma oksit oranları (Özkul, 1999)

Karma Oksit	%
C ₃ S	54.1
C ₂ S	16.6
C ₃ A	10.8
C ₄ AF	9.1

Çimentonun suyla temas etmesiyle birlikte, yukarıda açıklanan 4 ana bileşenin esas hidratasyon reaksiyonları (3.1), (3.2), (3.3), (3.4), (3.5) şekilde gerçekleşir.



Şekil 3.7 C3S’nin elektron mikroskobu altında görünüşü (Özkul, 1999)



Yukarıdaki hidratasyon reaksiyonları sonucu oluşan hidrate çimentonun yaklaşık % 50 sini tobermorit jeli, %25 ini ise kalsiyum hidroksit oluşturur. Hidrate çimentonun dayanımı ve

diğer özellikleri esas tobermorit jeline bağlı iken, kalsiyum hidroksit hidrate çimentosunun zayıf unsuru olarak çıkar.

Dört karma oksitin belli başlı özellikleri aşağıda belirtilmektedir.

C₃S : Hızlı bir şekilde sertleşir, esas olarak priz başlangıç süresini ve erken yaşlardaki dayanımı etkiler. C₃S yüzdesi arttıkça, çimentonun ilk yaşlardaki dayanımı da daha yüksek olur.

C₂S : Sertleşmesi yavaştır ve büyük oranda bir haftadan daha büyük yaşlardaki dayanım artışı üzerine etkilidir.

C₃A : Bu bileşiğin erken yaşlardaki dayanım gelişimi üzerine etkisi çok azdır. Klinkerin öğütülmesi sırasında katılan alçıtaşı C₃A'nın hidratasyon hızını yavaşlatır. Alçıtaşı ilave edilmemiş C₃A'lı bir çimento hızlı bir şekilde katılaşır. C₃A yüzdesi düşük çimentolar özellikle sülfat ihtiva eden su ve zemine karşı dayanıklıdırlar.

C₄AF : Klinkerleşme sıcaklığını düşürerek çimento üretimine yararlı olur. C₄AF oldukça süratli bir şekilde hidrate olmasına rağmen dayanım kazanımında etkisi çok azdır.

3.3 Beton Karma Suları

Beton karışım sularının genel olarak “içilebilir” nitelikte olması aranır. 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, rötreyi, dayanıklılığı da olumsuz etkileyebilir, betonda çiçeklenmeye neden olabilir. Bu nedenle, fazla miktarda askıda katı madde, erimiş tuzlar veya diğer katılar ve organik madde içeren sular karışım suyu olarak kullanılmamalıdır. Karışım suyunda bulunabilecek safsızlıkların kabul edilebilir sınırları Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Deniz suyunun beton karışım suyu olarak kullanılabilir olup olmadığı konusu hakkında geçmişte çok tartışmalar yapılmıştır. İçerdiği çeşitli tuzlar nedeniyle (NaCl, CaCl₂ ve benzeri) deniz suyu betonun priz süresini kısaltıcı ve erken dayanımını bir miktar yükseltici bir etki gösterebilir. Ancak, deniz suyunda bulunan sülfat iyonları (MgSO₄, CaSO₄) dayanıklılığı ve 28 günden sonraki dayanımları olumsuz etkiler. Bunlardan daha önemli bir husus da deniz suyunun betonarme donatılarının paslanmasına neden olmasıdır. Ayrıca,

betonda çiçeklenmeye neden olarak çirkin bir görüntü oluşturabilir. Dolayısıyla, deniz suyunun beton karışım suyu olarak kullanılması, gereken önlemlerin mutlaka alındığı kaçınılmaz durumlar dışında, önerilmemektedir.

Çimentonun hidratasyonu için gerekli su miktarı yaklaşık çimento ağırlığının %25'i civarındadır. Oysa betonda kullanılan karışım suyu miktarı çoğunlukla bunun üstündedir. Betonda kullanılacak su miktarı arzu edilen işlenebilmeyi sağlamak için gerekli olan en az miktar olmalıdır. Aksi halde, betonun dayanım ve dayanıklılık özellikleri olumsuz etkilenir.

Beton karışımında kullanılacak bir suyun uygun olup olmadığının belirlenmesi için söz konusu su ve kontrol maksadıyla saf su kullanılarak hazırlanacak betonların priz süresi, dayanım (ve varsa aranılan diğer özellikler) bakımından karşılaştırmasını yapmak en iyi yöntemdir. Örneğin, İngiltere'de şüpheli suyla üretilen betonun priz süresinin kontrol betonununkinden en fazla 30 dakika daha uzun olmasına; dayanım açısından da en fazla %20 daha az olmasına izin verilmektedir. Amerika Birleşik Devletlerinde kullanılan birçok şartnamede ise içme suyu ile yapılan kontrol betonlarına göre şüpheli suyla yapılan betonların 7 ve 28 günlük dayanımlarının kontrol betonununkinin en az %90'ı kadar olması istenmektedir.

TS EN 206'ya göre karma suyu TS EN 1008'e uygun olmalıdır. Standartta verilen Çizelge 3.6, Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8'deki şartları sağlamalıdır.

Çizelge 3.6 Karma suyu kabul şartları (TS EN 1008, 2003)

Özellik	Kabul Şartı
Deterjanlar	Herhangi bir köpük iki dakika içerisinde kaybolmalı
Renk	Geri kazanılan suların dışında rengi açık sarıdan daha açık olmalı
Askıdaki katı madde miktarı	Geri kazanılan suların dışında 4ml'den az olmalı
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

Kimyasal Özellikler

- Klorür içeriği

Klorür içeriği TS EN 206-1 Madde 5.2.7. seçilen değerleri geçmediğinin gösterilmesi halinde aşağıdaki değerleri geçebilir.

Çizelge 3.7 Karma suyu en yüksek klor içeriği (TS EN 1008, 2003)

Karışım Suyunun Kullanılacağı betonun Cinsi	En Yüksek Klorür İçeriği mg/lt
Öngermeli veya şerbet	500
İçerisinde donatı veya diğer metal bulunan	1000
İçerisinde donatı veya diğer metal bulunmayan beton	4500

- Sülfatlar : 2000mg/l'yi geçmemelidir.
- Alkali : ASR'ye karşı önlem alınmadıkça 1500mg/l'yi geçmemelidir.
- Zararlı Kirlenme : Öncelikle şekerler, fosfatlar , nitratlar , kurşun ve çinko için deneyler yapılabilir. Fakat bunların varlığında priz süresine etkisi ve miktarı belirlenmelidir.

Çizelge 3.8 Kirlenme için sınır değerler (TS EN 1008, 2003)

Madde	En Fazla Miktar(mg/l)
Şekerler	100
Fosfat Pb ₂ O ₅	100
Nitrat NO ₃	500
Kurşun Pb ₂	100
Çinko Zn ₂	100

Priz süresine etkisi

Saf su ile uygunluğu araştırılan su üzerinde yapılan karşılaştırmalı deneylerde elde edilen priz başlangıç süresi bir saatten daha az olmamalı ve en fazla %25 sapma göstermelidir. Priz bitiş süresi 12 saatten daha uzun olmamalı ve en fazla %25 sapma göstermelidir. 7 günlük basınç dayanımından %90'dan da düşük olmamalıdır. (TS EN 1008, 2003)

3.4 Beton Katkı Maddeleri

Katkılar, çimento, agrega ve suyun dışında, betonun taze veya sertleşmiş haldeki özelliklerin istenen şekilde değiştirmek üzere, karıştırma işleminden hemen önce veya karıştırma işlemi sırasında betona katılan malzemelerin genel adıdır. Katkılar, kimyasal katkılar, hava katkılar ve mineral katkılar olmak üzere, üç ana gruba ayrılırlar. Ayrıca, bunların dışında, özel beton üretiminde kullanılan diğer bazı katkılar da bulunur. Bu iki ana grupta çok sayıda değişik katkılar toplanmıştır. Katkı çeşitlerinin çok olmasının arkasında yatan gerçek, betonun hemen hemen tüm özelliklerinin, değişik ölçeklerde, bu katkılar tarafından değiştirilebilmesidir.

3.4.1 Katkı Kullanımı

Katkıların kullanımında unutulmaması gereken en önemli husus bunların bir çeşit “ilaç” olmadıklarıdır. Katkılar betonun taze veya sertleşmiş haldeki özelliklerini istenilen düzeyde geliştirmek için kullanılırlar. Kötü üretilmiş bir betonu katkı kullanarak iyi beton haline getirmek mümkün değildir. Önce iyi beton üretilmesi gerçekleştirilmeli ve ancak aranan özellikler bu yolla sağlanamıyorsa katkı kullanımı yoluna gidilmelidir. Katkı kullanılırken aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilmesi olası bazı olumsuzlukları ortadan kaldıracaktır:

- Katkının ulusal veya tanınmış uluslararası standartlara uygun olması gerekir. Katkı üreticisi veya satıcısı söz konusu malzemesiyle ilgili olarak aşağıdaki noktaları belirten açıklayıcı teknik dokümanlar hazırlamalıdır:
 - (a) betonda etkili olduğu ana özelliği;
 - (b) olumlu veya olumsuz yan etkilerini;
 - (c) fiziksel özelliklerini;
 - (d) aktif bileşeninin konsantrasyonunu;
 - (e) klor, sülfat, sülfid, fosfat, nitrat, şeker gibi beton ve betonarmeye olası zararlı etkileri olan maddeleri içerip içermediğini;
 - (f) pH derecesini;
 - (g) varsa, kullanıcı sağlığı açısından zararlarını ve alınması gerekli önlemleri;
 - (h) depolama koşullarını ve raf ömrünü;
 - (i) beton karışımında kullanım şeklini;
 - (j) en az ve en çok kullanım miktarları
- Kullanım sırasında üreticinin önerilerini takip etmek gerekmele birlikte, katkıların etkinliğini aşağıdaki koşulların etkilediği bilinmelidir:
 - (a) çimentonun kompozisyonu;
 - (b) agrega özellikleri;
 - (c) beton karışım oranları;
 - (d) kullanılan diğer katkılar;

- (e) beton karıştırma süresi;
 - (f) katkının karışıma eklenme zamanı;
 - (g) taze betonun sıcaklığı
 - (h) beton bakım koşulları.
- Bu nedenle katkıların her zaman şantiye ve/veya beton tesisi koşullarında ve buralarda kullanılan beton malzemeleriyle denenmelerinde yarar vardır.
 - Özellikle kimyasal katkılar, çimento miktarının %0,1'ine varan, çok az miktarlarda kullanıldıklarından, tartım işlerinin doğru ve güvenilir olarak yapılması sağlanmalıdır. Aksi takdirde, istenilen sonuç elde edilmez veya zararlı etkiler ortaya çıkabilir.
 - Katkılar betonun birden fazla özeliğini etkileyebilir. Bu durum, özellikle ikincil etkiler zararlı ise, göz önünde bulundurulmalıdır.

3.4.2 Kimyasal Katkılar

TS EN 206'da kimyasal katkılar "Taze veya sertleşmiş betonun bazı özelliklerini değiştirmek üzere, karıştırma işlemi esnasında betona, çimento kütleline oranla az miktarlarda ilâve edilen malzeme" olarak tanımlanmaktadır. Bu tanım inert veya pozolonik mineral katkıları içermemektedir. (silis dumanı gibi). Fakat bu maddeler kimyasal katkının içinde bulunabilir.

Kimyasal katkıların beton yapıların durabilitesi ve maliyetlerine katkıda bulunduğu artık herkesçe kabul edilmektedir. Kimyasal katkıların geliştirdiği özellikler betonun işlenebilirliği ve sıkıştırılmasında sağlanan kolaylıklar, sertleşmiş betonun geçirgenliğini azalma ve donma çözülme dayanımını artırma olarak sayılabilir.

Kimyasal katkıların özellikleri TS EN 934-Kimyasal Katkılar – Beton, Harç ve Şerbet için standart serisinde belirlenmiştir. TS EN 934-2 aşağıdaki tiplerde katkıları içerir :

- Su azaltıcı / akışkanlaştırıcı katkılar
- Yüksek oranda su azaltıcı / süper akışkanlaştırıcı katkılar
- Su tutucu katkı
- Hava sürükleyici katkı
- Priz hızlandırıcı katkı

- Priz geciktirici katkı
- Su geçirimsizlik katkısı
- Priz geciktirici/su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkılar
- Priz geciktirici /yüksek oranda su azaltıcı /süper akışkanlaştırıcı katkılar
- Priz hızlandırıcı / su azaltıcı / akışkanlaştırıcı katkılar

Kullanımda olan diğer tip katkıları TS EN 934-2 içermemektedir, fakat bu katkılar TS EN 206-1'a göre uygunluğun sağlanması şartıyla kullanılabilir.

TS EN 934-2'nin kapsamadığı katkı tipleri aşağıdaki gibidir:

- Korozyon önleyiciler
- Rötire engelleyiciler
- Su altı beton katkıları
- Prekast beton katkıları

3.4.3 Beton Katkılarının Özellikleri

Yüksek dayanımlı betonlar gibi özel betonların dışında maksimum dozaj TS EN 206 tarafından çimento kütlesine göre 50g/kg olarak sınırlandırılmıştır. 2g/kg'dan daha düşük dozajlarda kimyasal katkı suya karıştırılarak eklenmelidir.

Beton katkılarının performansı TS EN 934-2 tarafından tek fonksiyonlu katkıların ana fonksiyonlarına ve çift etkili katkıların ana ve ikincil fonksiyonlarına göre kontrol edilir. Bu performans şartları Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Bu genel performansın şartlarına ek olarak tüm kimyasal katkılara uygulanan genel şartlar bulunmaktadır. Bunlar;

- Priz süresine etkisi
- Basınç dayanımına etkisi
- Betonun hava içeriğine etkisi
- Suda çözünebilen klorür miktarı

- Na₂O eşdeğeri alkali miktarı

Kimyasal katkıların performansı referans betona göre belirlenir. Deney karışımı (kimyasal katkılı) kontrol karışımıyla (katkısız) kıyaslanır. Klor ve alkali içerikleri de ölçülerek beyan edilir.

Betonda bulunabilecek maksimum klorür içeriği TS EN 206-1’de belirlenmiştir ve kimyasal katkıların bu miktara katkısı hesaplanabilir. TS EN 934-2 maksimum klorürü içeriğini %0,1 veya üreticinin beyanıyla sınırlandırmıştır.

Maksimum alkali madde içeriği TS EN 934-2’ye göre üretici tarafından her kimyasal katkı için beyan edilmelidir.

Çizelge 3.9 Kimyasal katkı tipi (TS EN 934-2, 2002)

Kimyasal Katkı Tipi	Performans Şartı	TS EN 934-2'deki değeri
Su azaltıcı / akışkanlaştırıcı katkıları	Eşit kıvamda su azalması	Azalma $\geq$ %5
Yüksek oranda su azaltıcı / süper akışkanlaştırıcı katkıları	Eşit kıvamda su azalması Eşit su/çimento oranında kıvam artışı	Azalma $\geq$ %12 Çökme artışı $\geq$ 120mm
Su tutucu katkı	Kusmada azalma	Azalma $\geq$ %50
Su geçirimsizlik katkısı	Kapiler emmede azalma	Kütlece azalma $\geq$ %50
Hava sürükleyici katkı	Sertleşmiş betonda hava boşluğu özellikleri	Açıklık faktörü $\leq$ 0.200 μ m
Priz hızlandırıcı katkı	İlk priz süresinde azalma	Azalma $\geq$ %40 5°C'de
Sertleşmeyi hızlandırıcı katkı	1. gündeki basınç dayanımı 2. gündeki basınç dayanımı	Artış $\geq$ %20 20°C'de Artış $\geq$ %30 5°C'de
Priz geciktirici katkı	İlk priz alma ve priz bitiş sürelerinde artış	Priz alma artış $\geq$ 90 dakika Priz bitiş artış $\leq$ 360 dakika
Priz geciktirici/ su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkıları	Eşit kıvamda su azalması İlk priz alma ve priz bitiş sürelerinde artış	Azalma $\geq$ %5 Priz alma artış $\geq$ 90 dakika Priz bitiş artış $\leq$ 360 dakika
Priz geciktirici/ yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkıları	Eşit kıvamda su azalması Eşit su/çimento oranında kıvam artışı İlk priz alma ve priz bitiş sürelerinde artış	Azalma $\geq$ %12 Çökme artışı $\geq$ 120mm Priz alma artış $\geq$ 90 dakika Priz bitiş artış $\leq$ 360 dakika
Priz hızlandırıcı/ su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkıları	Eşit kıvamda su azalması İlk priz alma süresinde azalma	Azalma $\geq$ %5 Azalma $\geq$ 30 dakika 20°C'de Ve $\geq$ %40 5 °C'de

Priz süresini hızlandırıcı katkılar

Sonlama, kalıp sökme gibi işlemlerinin daha kısa sürede gerçekleştirilmesi; erken yüksek dayanım elde edilmesi ve soğuk havalarda beton dökülmesi gibi amaçlarla kullanılırlar. Hızlandırıcı etkilerini çimentoların ana bileşenlerinden olan C_3S 'in hidratasyon hızını artırarak gösterirler.

Hızlandırıcı katkılar kullanıldığında betonun taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma gibi işlemleri için gereken sürenin de kısılacağı unutulmamalıdır. Dolayısıyla, söz konusu işlemler için iyi bir zaman programlaması gerekir.

Bazı priz süresini hızlandırıcı katkılar klor iyonları içerir. Klor betonarme donatılarının paslanmasını hızlandırdığından bu tür katkıları kullanmak zararlı olabilir.

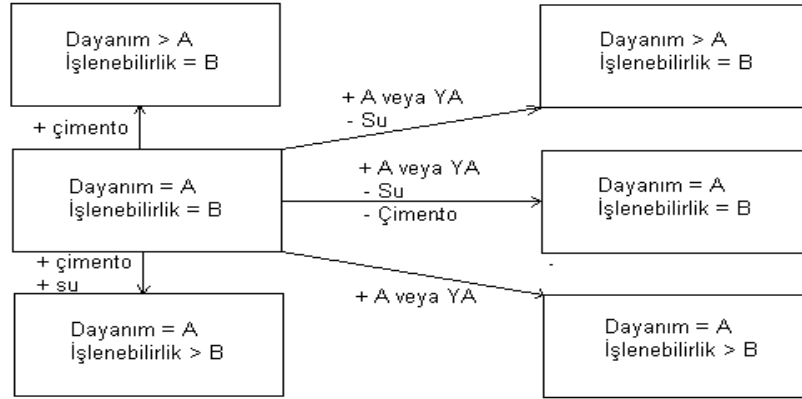
Priz süresini geciktirici katkılar

Sıcak havalarda beton dökülmesi; beton karıştırma ve yerleştirme işlemleri arasındaki sürenin uzun olduğu durumlarda; kütle betonlarında peş peşe iki döküm arasında soğuk derz oluşmasını önlemek amacıyla ve döşemelerde kalıp deformasyonlarından meydana gelebilecek beton çatlaklarını önlemek gibi maksatlarla kullanılırlar. Geciktirici etkilerini çimentoların ana bileşenlerinden olan C_3S 'in hidratasyon hızını azaltarak gösterirler. Geciktirici etkileri kullanılan katkı miktarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu miktar belli bir kritik değerden fazla olduğu takdirde, C_3S hidratasyonu tamamıyla durur ve beton hiç bir zaman sertleşmez. Dolayısıyla, priz geciktirici katkılar üreticinin belirttiği en çok miktarın üzerinde kullanılmamalıdır.

Karışım suyunu azaltıcı katkılar

Adlarından da anlaşılacağı gibi, bu katkılar belirli bir işlenebilme değeri için betona gerekli olan karışım suyu miktarını azaltırlar. Bu özellikleriyle çeşitli avantajlar sağlarlar: İstenilen beton çökme değerini daha az miktarda suyla elde ederek, sabit bir çimento miktarı için, su/çimento oranını düşürürler. Böylece, dayanımın artmasını, geçirimliliğin azalmasını ve dayanıklılığın artmasını sağlarlar. Öte yandan, su/çimento oranını sabit tutarak, kullanılan çimento miktarını azaltmak suretiyle, sabit bir işlenebilirlik elde edilebilir. Betondaki çimento miktarının azaltılması ekonomik gerekçelerle yapılabileceği gibi, hidratasyon ısısının azaltılması gibi teknik gerekçelerle de yapılabilir. Son olarak, taze betonun yerleştirilmesini kolaylaştırmak için, hem su/çimento oranı hem de çimento miktarı sabit tutularak daha yüksek çökme değeri elde edilebilir.

Karışım suyunu azaltıcı katkıların bu etkileri şematik olarak Şekil 3.8’da gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Karışım suyunu azaltıcı katkıların kullanılarak beton özelliklerinde sağlanacak olumlu gelişmeler (Özkul, 1999)

Şekilde görüldüğü gibi, su azaltıcı katkı kullanılmayan betonlarda, işlenebilirliği sabit tutup dayanımı artırmak gerektiğinde daha fazla çimento; dayanımı sabit tutup işlenebilirliği artırmak gerektiğinde ise hem daha fazla çimento hem de daha fazla su kullanmak gerekmektedir. Buna karşılık, su azaltıcı katkı kullanıldığında, sabit işlenebilirlikteki bir betonun dayanımı karışım suyu azaldığından, artar. Sabit bir dayanım ve sabit bir işlenebilirlikteki beton daha az su ve daha az çimento kullanarak elde edilir. Sabit bir dayanım için, karışım oranlarında bir değişiklik yapmadan, yalnızca su azaltıcı katkı kullanarak işlenebilirlik artırılır.

Karışım suyunu azaltıcı katkıları, aynı zamanda, akışkanlaştırıcı ve yüksek akışkanlaştırıcı katkıları olarak da adlandırılırlar. Akışkanlaştırıcı katkıları beton karışım suyunu %5-10 civarında, yüksek akışkanlaştırıcı katkıları ise %12 ve daha fazla oranda azaltırlar.

Hava sürükleyici katkıları

Betonun suya doygun olduğu veya doygunluk derecesine yakın olduğu durumlarda tekrarlı donma-çözülme altında önemli bir dezavantajı ortaya çıkar. Böyle bir ortamda beton kısa bir sürede dağılabilir. Dolayısıyla, donma-çözülme etkisi, gerekli önlem alınmadığı takdirde, betonun yol kaplamaları, barajlar, temeller gibi yerlerde kullanılmasını güçleştirir.

Bilindiği gibi, su donduğunda hacimce genişir. Betonda gözeneklerde ve kılcal boşluklarda bulunan su da donduğunda genişerek bu boşlukların ve gözeneklerin duvarlarına gerilmeler uygular ve mikro çatlaklar oluşmasına neden olur. Hava sürükleyici katkıları kullanıldığında betonda meydana gelen, birbirinden bağımsız hava kabarcıkları bu içsel gerilmelere karşı bir tür yastık vazifesi görür.

Hava sürükleyici katkıları, karışım işlemi sırasında betonda yaklaşık 0,2 mm boyutlarında birbirinden bağımsız hava kabarcıkları oluştururlar. Bu hava kabarcıkları priz tamamlandıktan sonra da beton içinde kararlı bir yapıda kalırlar. Betonun donma-çözülme direncini artırmak için hacimce %4-8 hava içermesi önerilir.

Normal betonlarla kıyaslandığında, hava sürüklenmiş betonların

- Donma-çözülme direnci daha yüksektir;
- Buz çözücü tuzların zararlı etkilerine karşı direnci daha yüksektir;
- İşlenebilirliği daha yüksektir;
- Aynı su-çimento oranında, dayanımı sürüklenmiş hava miktarının her %1'i için %4-6 daha düşüktür;
- Birim ağırlığı daha düşüktür;
- Terlemesi daha azdır.

Hava sürükleyici katkı kullanımı sonucunda betonda sağlanan hava miktarı birçok parametre tarafından etkilenir. Sabit bir hava sürükleyici katkı miktarı için, taze betonun çökmesi (kıvamı), su-çimento oranı ve ince agrega miktarı fazlalaştıkça betonda sürüklenmiş hava miktarı da artar. Öte yandan, kumdaki ince madde miktarı, ortam sıcaklığı, çimentonun inceliğinin artması ve karıştırma süresinin uzaması hava miktarında azalmaya yol açar. (TS EN 934-2, 2002)

3.5 Mineral Katkılar

3.5.1 Puzolanlar

Betonda kullanılan en yaygın mineral katkıları puzolanik malzemelerdir. Puzolanik malzemeler kendi başlarına bağlayıcı özelliği bulunmayan, ancak ince öğütülmüş halde ve rutubetli ortamda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girip bağlayıcı özelliğe sahip bileşenler

meydana getiren silisli veya silisli ve alüminli malzemelerdir. Bims, çeşitli volkanik küller ve tüfler doğal puzolanlardır. Termik santrallerin atıklarından olan ve elektro filtrelerde toplanarak daha sonra santral dışına atılan uçucu küller; silikon metal ve alaşım endüstrisi atığı olan silis dumanı ise yapay puzolanlara örnek olarak gösterilebilir. Puzolanik malzemelerin betonda kullanımı, esas itibariyle, çimentonun hidratasyonu sonucunda önemli miktarlarda ortaya çıkan ve gerek dayanım gerekse dayanıklılık açısından betona her hangi bir olumlu etkisi söz konusu olmayan, kalsiyum hidroksitin bu malzemelerle reaksiyona girerek daha fazla miktarda bağlayıcı özellik gösteren bileşenler oluşturması temeline dayanır. Genel olarak bakıldığında, puzolanların çeşitli beton özelliklerine etkileri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Karışım suyu ihtiyacında artma söz konusudur. Ancak bazı uçucu küller azalmaya neden olabilir.
- İşlenebilme artar, ayrışma ve terleme azalır.
- Donma-çözülme direnci erken yaşlarda azalır.
- Dayanım kazanma hızı azalır. Geç yaşlardaki dayanımlar yüksek olur.
- Alkali-agrega reaksiyonu riski azalır.
- Hidratasyon ısısı azalır.
- Rötre genellikle artar.
- Sülfat direnci artar.

Bütün katkılarda olduğu gibi, puzolanların kullanılacağı durumlarda da mutlaka gerçek kullanım koşullarına uygun denemeler yapılması gerekir. Her puzolanik malzemenin beton özelliklerine etkileri bir diğerinden farklı olduğu gibi, aynı kaynaktan değişik zamanlarda alınan puzolanların dahi özelliklerinde değişiklikler olması kaçınılmazdır. Puzolanların, beton özellikleri üzerindeki etkileri yukarıda genel hatlarıyla belirtilmişti. Bu etkiler, puzolanların kimyasal, mineralojik kompozisyonlarına, inceliklerine, birlikte kullanıldıkları çimentonun özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Örneğin, uçucu küllerin özellikleri elde edildikleri kömürün cinsine ve içerdiği safsızlıklara, termik santraldeki yakma sıcaklığına, kül toplama sistemleri gibi birçok parametreye bağlıdır. Bu özelliklerdeki farklılıklar da kullanıldıkları betona olan etkilerinde değişikliklere yol açar.

Türkiye’deki 11 termik santralden elde edilen uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları ve çeşitli fiziksel özellikleri 1998 yılında Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği’nde yapılan deney ve analizler sonunda belirlenmiştir. Birbirlerinden farklılıklarına ve dolayısıyla kullanılacakları durumlarda neden özen gösterilmesi gerektiğine dikkat çekmek üzere söz konusu deney ve analiz sonuçları Çizelge 3.10 ve 3.11’de gösterilmiştir. Çizelge 3.12’de TS EN 450 “Uçucu Kül- Betonda Kullanılan – Tarifler Özellikler Kalite Kontrolü” standardı sınırlarıyla birlikte, özetlenmiştir.

Çizelge 3.10 1998 yılında Türkiye’deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin bazı fiziksel özellikleri (Özkuş, 1999)

Uçucu Kül	Özgöl Ağırlık	İncelik (Blaine) (cm²/g)	Puzolanik Aktivite (%)	TS 639 sınırı (%)
Afşin-Elbistan	2.72	2704	50.6	
Çatalağzı	2.02	2897	54.7	
Çayırhan	2.28	2754	61.0	
Kangal	2.50	1343	34.3	
Kemerköy	2.33	1764	46.6	≥ 70.0
Orhaneli	2.30	4475	91.9	
Seyitömer	2.10	2371	27.5	
Soma	2.25	4550	84.5	
Tunçbilek	2.08	3019	66.3	
Yatağan	2.44	2131	62.5	
Yeniköy	2.92	1818	33.5	

Çizelge 3.11 1998 yılında Türkiye’deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları (Özkul, 1999)

Uçucu Kül	Oksit (%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	S+A+F	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	KK
Afşin-Elbistan	17.1	8.96	3.85	29.9	49.17	1.73	14.78	0.44	0.20	3.30
Çatalağzı	59.36	25.78	5.78	90.92	2.01	0.60	0.13	3.82	0.44	1.59
Çayırhan	47.08	17.42	8.34	72.84	13.98	1.86	4.65	1.81	2.45	1.77
Kangal	38.34	16.69	5.11	60.14	27.62	1.60	4.44	1.29	0.61	3.79
Kemerköy	23.22	12.90	4.56	40.77	43.64	1.62	11.08	1.19	0.32	1.05
Orhaneli	44.98	19.57	8.11	72.66	16.55	2.07	5.73	1.41	0.21	0.88
Seyitömer	53.14	20.77	11.36	85.27	4.44	1.19	0.55	1.56	0.75	5.79
Soma	48.48	23.94	5.49	77.91	14.19	0.74	3.77	1.59	0.57	0.98
Tunçbilek	58.59	21.89	9.31	89.79	4.43	1.41	0.41	1.81	0.24	1.39
Yatağan	49.24	21.75	6.67	77.46	15.64	0.83	2.11	2.42	0.56	0.44
Yeniköy	21.86	9.55	3.60	35.00	46.25	1.69	14.46	1.01	0.26	0.86
TS EN 450 sınırları	-	-	-	≥ 70.0	-	< 5.0	< 3.0	-	-	< 10.0

Çizelge 3.12 TS EN 450’de getirilen diğer sınırlandırmalar ve sınır değerleri
(TS EN 450, 1998)

Aktivite endeksi	%75 (en az)
Kızdırma kaybı	%7 kütlece (en fazla)
Klorür miktarı	%0.1 kütlece (en fazla)
SO ₃	%3 (en fazla)
Serbest CaO	%1(2,5 Genleşme deneyi yapılması kaydıyla)
0.045 mm Elek üstü	%40 kütlece (en fazla)
0.045 mm Elek üstü	Ortalamanın +-%10 aralığında kalmalıdır
Le Chatelier Genleşme	10 mm (en fazla)
Uçucu kül için belirlenen yoğunluktan	+150 kg/m ³ sapabilir

3.5.1.1 Uçucu Külün Yapısı

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.

3.5.1.2 Kimyasal Yapısı

Uçucu küller genel olarak daha önce bahsedildiği üzere C tipi ve F tipi olarak ikiye ayrılır. Uçucu küllerin ana bileşenleri olarak SiO₂ (%35-60) , Al₂O₃(%10-%30), Fe₂O₃(%4-%20) ve CaO(%1-%35)’yu sayabiliriz. F tipi uçucu kül olarak adlandırılabilmesi için ilk üç bileşenin toplamı en az %70 olması gerekmektedir. C tipinde ise en az %50 olmalıdır. C tipinde genel olarak %20’nin üzerinde CaO bulunmaktadır.

CaO’nun kaynağı kömürde bulunan CaCO₃ ve CaSO₄’lardır. Yüksek kalorili kömürlerde bu yanmayan bileşenlerden çok az oranlarda bulunduğundan CaO oranı çok düşük olmaktadır. SO₃’ın kaynağı da CaSO₄.H₂O’dan kaynaklanmakta ve SO₂ olarak bacadan atılırken alkalilerle reaksiyona girip uçucu külün yapısına katılmaktadır.

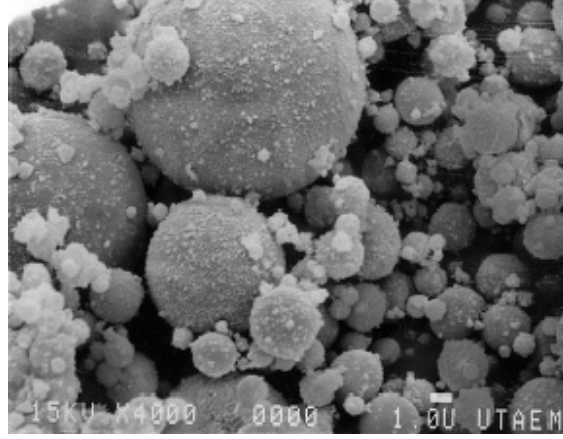
Uçucu küldeki karbon genel olarak yanmamış kömürden ve kömürün yapısındaki diğer organik bileşenlerden kaynaklanmaktadır. Uçucu küldeki karbon miktarının kızdırma kaybındaki miktara eşit olduğu düşünülür. Kızdırma kaybı hidrat veya karbonatların yıkımıyla açığa çıkan CO₂ ve H₂O'yu da içerir. C tipi uçucu küllerin kızdırma kaybı F tipi küllerden daha azdır. F tipi uçucu küllerde bu oran %20'lere ulaşabilir. Betonda kullanılan uçucu küller genel olarak %6'nın altında kızdırma kaybına sahiptir. ASTM C618, gerekli performans şartlarını sağlamak koşulu ile %12 oranına kadar kullanılabilmesine izin vermektedir.

Kristal yapıdaki CaO - bazen serbest kireç olarak da adlandırılır - birçok kalker yapılı uçucu külde bulunur ve genleşme çatlamlarında sorumlu tutulur. Fakat Ca(OH)₂ yapısında olan sönmüş kireç genleşmelere neden olmaz. Düşük sıcaklıklarda yakılmış CaO kolayca hidrate olur ve betonda sorunlara neden olmaz. Fakat yüksek sıcaklıklarda yakılmış CaO beton sertleştikten sonra yavaşça hidrate olur. Eğer yüksek sıcaklıklarda yakılmış serbest kireç mevcutsa uzun dönemde zararlı çatlaklar meydana gelebilir.

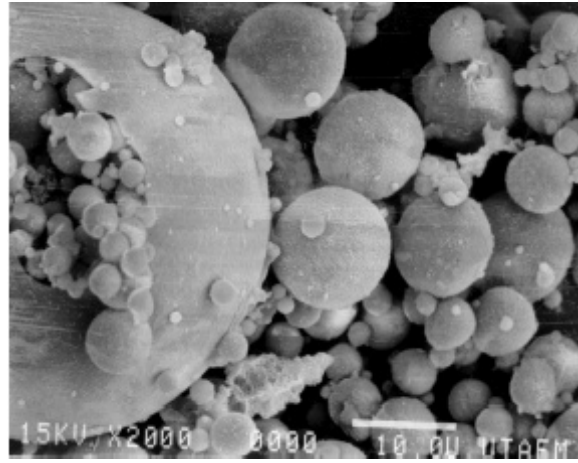
EN 451'de verilen metotla tayin edilen serbest kalsiyum oksit muhtevası kütlece %1'den daha büyük olmamalıdır. Kütlece %1'den daha çok, fakat %2,5'den daha az serbest kalsiyum oksit muhtevasına sahip uçucu kül; TS EN 450 Madde 4.3.3.'de belirtilen genleşme özelliğini sağlaması şartıyla kabul edilebilir.

3.5.1.3 Fiziksel Özellikler

Uçucu külün şekil, incelik, tane büyüklüğü dağılımı ve yoğunluğu taze betonun özelliklerini, dayanım gelişimini ve sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılığını etkiler. Bunun ana nedeni tanelerinin beton karışımının su ihtiyacı üzerine etkisidir. Ayrıca farklı uçucu kül kaynaklarından gelen küller farklı renklere sahiptirler. Kullanılan uçucu külün rengi ve miktarı betonun rengini etkiler. Betonun rengi özellikle mimari olarak devamlı aynı bir rengin sağlanması gereken brüt betonlarda önem taşır. Ayrıca uçucu küllerde renk değişimi, uçucu külün özelliklerinde değişiklikler olduğuna işaret eder (Yakma koşulları, kömür kaynağı, karbon miktarı, demir miktarı gibi).



Şekil 3.9 4000 kez büyütülmüş uçucu kül (Özkul, 1999)



Şekil 3.10 2000 kez büyütülmüş uçucu kül (Özkul, 1999)

3.5.1.4 Tane Şekli

Tane şekli ve büyüklüğü, kömürün homojenliğine, yakmadan önceki öğütülme işlemine, ısı ve oksijen seviyesine, yakım homojenliğine ve filtre sistemine bağlıdır. Uçucu kül tanelerinin çoğu camsı, boşluksuz veya boşluklu, küresel yapıdadırlar. Boşluklu yapıdaki taneler çok boşluklu olduklarında şeffaf, az boşluklu olduklarında opak olurlar. Şekilleri küresel veya uzunsudur. Uçucu külün çimentoyla birlikte öğütülmesi dayanıma olumlu etkide bulunur. Uçucu külün aşırı ince öğütülmesi su ihtiyacını artırır.

3.5.1.5 İncelik

Uçucu küldeki taneler 1 mm ile 1 mm arasındadır. Eski termik santrallerde mekanik separatörlerle toplanan küller modern termik santrallerde toplananlardan daha iridir. ASTM C 618'e göre 45 mm elekten elendiğinde %34, TS EN 450'ye göre %40'dan fazla elek üstü

malzeme olmamalıdır. Bu elek deneyi sonucu genel olarak bir termik santral için, kömür kaynağı, öğütme ve yakma işlemleri değişmedikçe sabit kalır. Uçucu külün inceliğinin, betondaki performansına etkisi vardır. İnceliğin artmasıyla performans artar. C tipi ve F tipi uçucu küllerde 10 mm altındaki tanelerin yüksek oranda olması dayanımda pozitif etki sağlamaktadır. Uçucu küllerin özgül yüzeyleri 1800-5000 cm²/gr arasında değişmektedir.

3.5.1.6 Yoğunluk

Boşluksuz uçucu küllerin yoğunlukları 1,97 – 3,02 kg/dm³ arasında değişir. Genel olarak 2,2.-2,8 kg/dm³ arasındadır. Boşluklu yapıdaki uçucu küller suda yüzebilme özelliğine sahiptirler. Yüksek yoğunluk ince yapıda tanelerden oluştuğunu belirtir. İçinde demir yoğun olanlar daha ağır, karbon yoğun olanlar ise daha hafif olurlar. C tipi uçucu küller daha az içi boş küresel yapıda tane içerir, bu nedenle yoğunlukları daha yüksektir, 2,4 –2,8 kg/dm³ arasında değişir. Kuru uçucu külün gevşek birim ağırlığı yaklaşık olarak 800 kg/m³ tür.

3.5.1.7 Uçucu Külün Betondaki Kimyasal Aktivitesi

Uçucu külün kalsiyum hidroksit ve betondaki alkalilerle reaksiyona girmesiyle oluşan ana ürün portland çimentosunun ana hidratasyon ürünüyle (CSH jeli) aynıdır. F tipi uçucu küllerin reaksiyonuyla oluşan ürünler portland çimentosu ürünlerinden daha yoğundur. Uçucu kül reaksiyonlarını, camsı yapının yıkılıp çözülmesini, hidroksit iyonları ve portland çimentosunun reaksiyonuyla açığa çıkan ısı sağlar. Bu reaksiyonlarda uçucu külün kısmen çimentoya ikame edilmesiyle açığa çıkan ısı azalır. Betonun birim hacminde için portland çimentosu miktarı sabit tutulup uçucu kül eklendiğinde açığa çıkan ısı artar.

Genel olarak uçucu külün reaksiyonu iki adımda gerçekleşir. İlk adımda reaksiyon alkali hidroksitlerle, sonrasında kalsiyum hidroksitle gerçekleşir.

Bu reaksiyonları etkileyen faktörler;

- Uçucu kül ve portland çimentosunun kimyasal yapısı,
- Reaksiyon sisteminin alkali hidroksit yoğunluğu,
- Uçucu kül taneciklerinin biçimi,
- Çimentonun ve uçucu külün inceliği,
- Hidratasyon reaksiyonundaki ısı gelişimidir.

Uçucu küllerin kendi aralarında sınıflandırılmasıyla betondaki performansının tahmini oldukça zordur. Uçucu kül işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin değerlendirileceği deneme karışımlarından sonra kabul edilmelidir.

3.5.2 Renk katkıları

Betona çeşitli renkler vermek için kullanılan katkılar genellikle saf minerallerdir. Bunlar kullanılırken betonun diğer özelliklerine zararlı olup olmadıkları kesinlikle kontrol edilmelidir. Renklendirici katkıların kullanım miktarı genellikle çimento miktarının %10'unu geçmez. Betona çeşitli renkler vermek için kullanılabilecek renklendirici katılara örnekler Çizelge 3.13'de verilmiştir (Özkuş, 1999).

Çizelge 3.13 Betonda kullanılabilecek renklendirici katılara örnekler (Özkuş, 1999)

Renk	Katkı
Siyah	Siyah demir oksit, karbon siyahı
Kırmızı	Kırmızı demir oksit
Kahverengi	Kahverengi demir oksit
Mavi	Kobalt mavisi, ultramarin mavisi, ftalosiyanın
Yeşil	Krom oksit, yeşil ftalosiyanın
Krem rengi	Sarı demir oksit
Beyaz	Beyaz çimento

4. CÜRUF

4.1 Cürufların Tanımlanması ve Sınıflandırılması

Cüruf, demir ve çelik üretim proseslerinden oluşan bir üründür. Üretim sonucu oluşan bir atık olarak varsayılabileceği gibi birçok kullanımı bakımından değerli bir malzeme olarak düşünülmektedir. Genel olarak 2 tip cüruf vardır. Bunlar demir içeren cüruflar ve demir içermeyen cüruflar olarak sınıflandırılır.

Demir içeren cüruflar, metalurjik prosesler sonucu elde edilen silika veya alumino-silikat içeren ürünlerdir. Demir içeren cüruflar yüksek fırın cürufu ve çelikhane fırın cürufu olarak sınıflandırılır. Yüksek fırın cüruflarının ise eriyik haldeki cürufa uygulanan soğutma prosesine göre farklı sınıfları vardır. Bunlar, havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu (air cooled slag), peletlenmiş cüruf (pelletized slag), suyla taneleştirilen cüruf (granulated blast furnace slag) gibidir.

ASTM standart enstitüsü yüksek fırın cürufunu yüksek fırında demir ile eş zamanlı olarak eriyik halde elde edilen ve temel olarak kalsiyum ve diğer bazların silikat ve alumino silikatlardan oluşan ve metalik olmayan bir ürün olarak tanımlar. Yüksek fırın cürufu demir cevheri veya demir peletleri, kok ve kireç veya dolomitin yüksek fırında birlikte ergitilmesi ile oluşur.

Çelikhane fırın cürufunu ASTM standart enstitüsü, 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.

Metal içermeyen cüruflar, bakır, nikel ve kurşun cüruflarıdır. Bakır ve nikel cürufları piro metalurjik prosesler sonucu konsantre sülfidlerden ayrıştırılan yan ürünlerdir.

Çelik üretim prosesi süresinde çelik üretiminin yaklaşık %10 ile %15'i arası cüruf oluşumu meydana gelir. Bu oluşum sadece Ereğli Demir Çelik Fabrikasında yılda 300000 ton cüruf oluşumuna neden olur. Bu atıkların bir kısmı çimento endüstrisi gibi alanlarda kullanılabilir iken büyük bir bölümü kullanılamamakta ve depolarda bekletilmektedir. Oluşan bu cüruflar Tehlikeli Atık Yönetmeliğine göre tehlikelidir ve çevreye atılması yasaktır.

Şekil 4.1 ve 4.2'de Kardemir Demir Çelik Fabrikası Depolarında Bekletilen Cüruf Atıkları gösterilmiştir. Cüruf atıklarının betonda agrega olarak kullanımı için oluşan cürufların havada

soğutulmasını takiben kırma ve eleme ünitelerinden geçmesi gerekmektedir. Kırılan cüruf malzemeleri içeriğindeki demirin uzaklaştırılması için magnetik eleklerden geçirilmeli ve içeriğinde demirden uzaklaştırılmalıdır. Kırma ve eleme için kurulacak tesis, öğütme yapılacak malzemenin miktarına göre maliyeti artar. Şekil 4.2’de Kardemir Demir Çelik Fabrikası kırma ve eleme tesisinin resmi bulunmaktadır.



Şekil 4.1 Kardemir Demir Çelik Fabrikası Depolarında Bekletilen Cüruf Atıkları



Şekil 4.2 Kardemir demir çelik fabrikası depolarında bekletilen cüruf atıkları



Şekil 4.3 Kardemir demir çelik fabrikası kırma eleme tesisi

4.2 Cürufların Kullanım Alanları

4.2.1 Cürufların Çimento Üretiminde Kullanımı

Yüksek fırınlarda demir üretiminde bir yan ürün olarak meydana gelen cürufun bağlayıcı madde teknolojisi açısından önemi 1863 yıllarında Langen'in cürufu çimento üretiminde mineral katkı olarak kullanması ile ortaya çıkmıştır (Schröder, 1969). Ancak detaylı araştırmalar ve cüruf üretiminde niteliğin geliştirilmesi sonucu malzemenin daha etkin ve yüksek oranda kullanımı 1970'li yıllarda farklı düzeye varabilmiştir.

Günümüzde özellikle beton ve betonarme deniz yapılarının vazgeçilmez bir bağlayıcısı olan yüksek fırın cürufu (YFC), ara maddeleri Portland çimentosu (PÇ) olan kompoze çimentoların katkı malzemesi olmaktan çıkmıştır. Her ne kadar YFC, Portland çimentosu ile karıştırılarak kullanılıyorsa da asıl bağlayıcı kendisidir., %70 YFC ile üretilen bir bağlayıcıda PÇ'nin fonksiyonu YFC'nin hidratasyonu için gerekli aktivasyonu sağlamaktır (Akman, 2007).

4.2.2 Çimento Endüstrisinde Kullanılacak Cürufun Üretimi

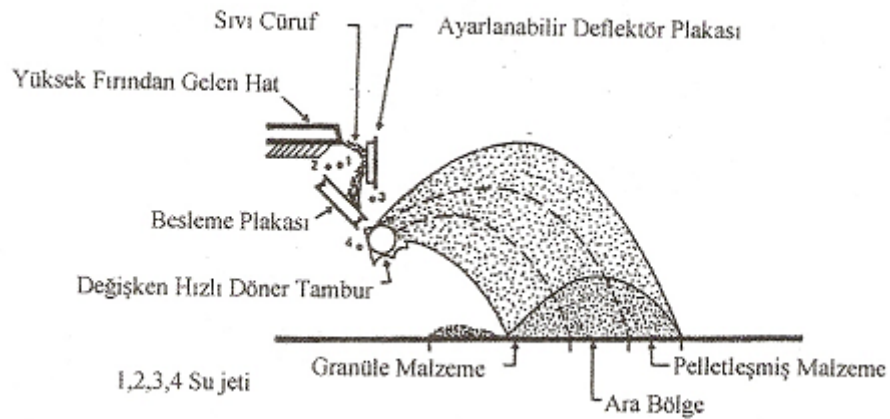
Demir üretiminin ilk yıllarında sadece dolgu malzemesi olarak kullanılması düşünülen cüruf sıcak ve sıvı halde iken bir çukur içindeki suya atılarak yavaşça soğutulmaya ve katılaşmaya bırakılıyordu. Daha sonra katılaşmış cüruf kırılıyordu. Bu sisteme "havada soğutulmuş cüruf" deniliyordu ve 1980'li yıllara kadar da bu uygulama sürdürüldü (Emerg, 1978). Ayrıca nispeten az miktarda suyla soğutulan cüruf, suyun buharlaşması sonucunda boşluklu bir yapıya dönüştürülerek, hafif agrega (cüruf köpüğü) de elde edilmiştir.

YFC'nin değerli bir bağlayıcı olduğu anlaşılnca sistemlerde önemli gelişmeler yapıldı. Bunlardan ilki "suyla taneleştirilen cüruf (Lea, 1971, Spellman, 1982) (Granulated blast furnace slag) adıyla anılır. Bu teknikle ergimiş haldeki cürufa su darbeleri püskürtülerek parçalanıyor ve hemen ardından suya daldırılıyor. Cürufun hızla soğutulması, hidrolik bağlayıcılık kazanmasında en önemli faktör olan amorf (camsı) yapıda kalmasını sağlar; yavaş soğuma kristalleşmeye yol açacağından bağlayıcılık niteliği kaybolur. Ancak bu yöntemde de kullanılan su kontamine olur; özellikle çözünen kükürdün etkisi, sülfürik aside dönüşerek çevresel sorun yaratır. Ayrıca, ufalanma ve öğütme aşamasında malzemenin kuru olmasından dolayı oldukça yüksek bir enerji harcaması gereklidir.

YFC üretiminde daha rasyonel olduğu varsayılan peletleme uygulaması İngiltere ve Almanya'da 1909, Rusya'da 1950 yıllarında yapılmış, Kanada ve A.B.D.'de ise 1970'den itibaren gerçekleştirilmiştir (Kholin, 1962).

Peletleme sürecinde yüksek fırından ergimiş durumda çıkan YFC önce püskürtme su jetleri ile genişletilir, sonra döner bir tambura düşürülür, tambur üzerindeki kanatlar düşen YFC'larını yaklaşık 15 m. uzaklığa fırlatır, yüzey gerilimi sayesinde YFC parçaları peletleşir. Şekil 4.4'de bu teknik şematik olarak gösterilmiştir (Spellman, 1982).

Bu sistemle, çukurda katılma sürecinde yayılan zararlı gazlardan kurtulunmakta, gazlar camlaşmış pelet tanecikleri içinde hapsolmaktadır. Tanelerin soğuması diğer sistemlere oranla daha hızlı olduğundan ufalama işlemine (granülasyon) daha çabuk geçilmektedir. Mamafih, taneciklerin absorpsiyonun zayıflaması ve iyi bir termik iletkenliğe sahip olmaları sınırlı bir kristalleşmeye neden olmaktadır. Püskürtme su jetlerinin şiddetlenmesi ve tambur dönme hızının yükselmesi camlaşma (vitrification) oranını arttırmaktadır. Ayrıca, peletlerdeki rutubetin düşüklüğü kurutma için gerekli enerjiyi de azaltmaktadır. Elde edilen YFC boşluklu ve cam yapısı yüksek olduğundan bağlayıcılık niteliği gelişmekte ve kısa sürede dayanım artışında, daha az Portland çimento kullanımına imkân vermektedir. YFC yapımında bir miktar kristalin varlığı hidratasyon sürecinde nüve (çekirdek) etkisi yaratarak hidratasyonu da başlatmak, sürdürmek ve Portland çimento katkısının aktivasyon işlevini kolaylaştırmak açısından yararlı sayılır.



Şekil 4.4 Tipik bir cüruf peletleştiricisinin şeması (Akman, 2007)

Yüksek fırın cüruflarının kimyasal bileşimi ve hidrolisite özellikleri

YFC'lerin kimyasal bileşimleri demir cevherlerinin YFC'lerin kimyasal bileşimleri demir cevherlerinin gayri saflıklarının ve ergitici maddenin kimyasal yapılarının fonksiyonu olarak

farklılıklar gösterir. Ayrıca, yüksek fırındaki sıcaklık ve YFC üretim teknikleri de bu bileşim üzerinde etkilidirler.

YFC'lerin bağlayıcılık niteliği kimyasal bileşime bağlı olmakla beraber, mineralojik bileşim ve özellikle camlaşma (vitrification) derecesi, öğütme inceliği ve aktivasyon süreci de hidrolisite üzerinde etkili olurlar.

Çizelge 4.1'de Kanada, A.B.D.'de ve ülkemizdeki YFC'lerin kimyasal bileşimlerine ait değerler sunulmuştur. (Meusel, 1983, Hooton,1983)

Çizelge 4.1 Yüksek fırın cürufalarının kimyasal bileşimlerine ait örnekler (Akman, 2007)

Bileşenler	NewCem. A.B.D.	Hamilton Ontario Kanada	Karabük (A. Güner)	Karabük (Ö. Çakır)
CaO	41.60	40.04	34.6	33.48
SiO ₂	33.17	37.08	36.3	41.43
Al ₂ O ₃	10.80	8.76	17.1	10.28
MgO	12.50	11.52	5.63	6.05
Fe ₂ O ₃	0.63	1.92	0.89	3.48
S	0.54	1.99	0.13	1.64
Na ₂ O	0.35	0.36	-	0.41
K ₂ O	0.50	0.44	-	1.72
MnO	-	0.72	-	-
TiO	-	0.28	-	-

Çizelge 4.1'deki YFC'lerin tümü sadece granüle, ufalanmış YFC'lerdir. Kimyasal bileşim camlaşma derecesi üzerindeki etkinliği yanında hidratasyon sürecindeki ana faktör olan eriyiktik (solubilité) niteliğini de denetler. Bu denetleme CaO/SiO₂ oranı ile ilgilidir. Bu oranın yüksek olması eriyikliği artırır, ancak camlaşma bazı suda söndürme (trampaj) süreçlerinde güçleşir. CaO/SiO₂ oranı 1'den küçükse YFC asit, büyükse alkali olarak tanımlanır. Asit YFC'lerin hidrolisite (hidrolik bağlayıcılık) reaktifliği yönünden yetersiz olduğu kabul edilir. Mamafih, Al₂O₃ ve MgO miktarlarında artış bu sakıncayı ortadan

kaldırmaktadır. Hatta Kondo Al_2O_3 'ün artması ile YFC camlarının daha aktifleştğini ve yüksek oranda $Ca(OH)_2$ ile aktive edildiklerinde dayanımlarının yükseldiğini bulmuştur (Kondo, 1962).

YFC kimyasal yapılarında MgO miktarlarının yüksekliği dikkati çekmektedir. Portland çimentolarında hacim sabitliği açısından MgO miktarı %5 ile sınırlıdır. YFC'lerde ise bu miktar %10'lar mertebesinde gözüküyor. Bu oranın %20'ye vardığı durumlar da mevcut. Aslında brüsite $Mg(OH)_2$ 'ye, dönüşen MgO'nun varlığı geçirimsizlik açısından yararlı olabilir, nitekim Çin'de yapılan bazı uygulamalarda normal Portland çimentolu betonlara özellikle MgO katılarak barajlardaki su sızıntılarının önlendiği saptanmıştır (Du, 2006).

YFC kimyasal birleşimin kontrolü ne yazık ki YFC tüketicilerinin denetleyebileceği ve ayarlama girişiminde bulunabilecekleri bir durum değildir; demir üretimi sırasında meydana çıkan YFC'yi kabul etmekten başka bir çözüm yoktur. Bununla beraber pek çok araştırmacı ve kurum kimyasal oranlara göre elde edilebilecek hidrolisite nitelikleri arasında bağlantılar kurmak amacıyla indeksler geliştirmişlerdir. Bunları 3 genel yaklaşım düzeyinde gruplandırmak mümkündür.

$$M_1 = CaO/SiO_2 \quad (4.1)$$

$$M_2 = (CaO + MgO)/SiO_2 \quad (4.2)$$

$$M_3 = (CaO + MgO)/(SiO_2 + Al_2O_3) \quad (4.3)$$

Sayıları 13'ü aşan bu indekslere örnek olarak De Langavant indeksi verilmekle yetinildi.

$$M_{Lang} = 20 + CaO + Al_2O_3 + 0.5MgO - 2SiO_2 \quad (4.4)$$

$$M_{Lang} < 12 \text{ (YFC orta derecede iyi)} \quad (4.5)$$

$$12 < M_{Lang} < 16 \text{ (YFC iyi)} \quad (4.6)$$

$$M_{Lang} > 16 \text{ (Çok iyi)} \quad (4.7)$$

Bu indekslere dayanarak kesin bir yargıya varmak pek olası değildir.

4.2.3 Cürufların Beton Üretiminde Agrega Olarak Kullanımı

Çelikhane cürufu, çelik üretimi esnasında içerisindeki safsızlıkların oksidasyonu sonucu oluşan oksit ve silikatların kompleks bir kimyasal yapıya sahip, metalik olmayan yan ürünü olarak tanımlanmaktadır.

Bazik oksijen proseslerinde sıcak maden, hurda ve cüruf yapıcılar (kireç, dolomitik kireç) konvertöre beslenir. Konvertör içerisine daldırılan bir lans aracılığı ile yüksek basınçta oksijen gazı beslenir. Oksijen, şarjdaki empüriterlerle birleşir. Bu empüriteler karbon (karbon monoksit olarak), Si, Mn, P ve bir miktar Fe'dir (sıvı oksitler halinde). Kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan bu oksitlerden sıvı halde olanlar kireç ve dolomitik kireç ile birleşerek cürufu oluştururlar. İşlem bittiğinde sıvı çelik bir potaya dökülürken, oluşan cüruf sıvı halde, yaklaşık olarak 1100 – 1500⁰C de özel cüruf potalarına boşaltılarak taşınmakta ve stok sahalarında soğumaya bırakılmaktadır. Bir ton çelik üretiminde yaklaşık olarak 100-150 kg (%10-%15) cüruf oluşmaktadır.

Çelikhane cüruflarının yaklaşık yarısı kireç (CaO) olup geri kalanı sıcak maden ve hurdadaki elementlerin oksitlerinden meydana gelmektedir. Yaklaşık olarak %15 - %20 FeO içermektedirler.

Fiziksel olarak çelik cürufları, koyu gri renkte tane şekli köşeli ve yüzeyi pürüzlü bir görünüşe sahiptirler. Yüksek fırın cürufuna kıyasla çok sert ve dayanıklıdır. Özgül ağırlıkları ise %20 - %25 daha büyüktür (Sönmez, 2003).

4.2.4 Çelikhane Cürufları Kullanım Alanları

Dünyada çelikhane cüruflarının değerlendirilmesi amacıyla yapılan birçok bilimsel araştırma mevcuttur. Bu araştırmalar sonucunda çelikhane cüruflarının özellikle karayollarında ve demiryollarında, çimento sanayinde, tarımda ve cüruf yünü imalatında, konvansiyonel malzemelerin yerine kullanılabilir. (Sönmez, 2003)

Günümüzde çelikhane cüruflarının farklı uygulama alanlarında maksimum miktarlarda kullanılması için yoğun çabalar sarf edilmektedir.

Temel ve temel altı malzemesi, toprak seti, dolgu, anayol 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 kullanılabilir. (Sönmez, 2003)

Ülkemizde sadece Ereğli Demir Çelik Fabrikasında yılda yaklaşık olarak 300000 – 350000 ton çelikhane cürufu açığa çıkmaktadır. Bu oluşan atığın bir kısmı dolgu malzemesi olarak

kullanılmakta, bir kısmı çimento üretiminde puzolonik katkı malzemesi olarak kullanılmakta, büyük bir kısmı ise kullanılamamaktadır.

Çelikhane cürufları karayollarında asfalt agregası olarak kullanılabilmekte, demiryollarında balast malzemesi olarak kullanılabilmekte, beton üretiminde agregası yerine kullanımına uygun özellikleri taşıyıp taşımadığı için ise karakterizasyon çalışmaları yapılmış ve bu çalışmaların cürufların belirtilen uygulama alanlarında olumlu sonuçlar verebileceği düşüncesini doğurmuştur.

Kullanım koşulları her bir ülke ve cüruf üretim tesisinin özel koşullarına göre değişebilmektedir (Kandahl, 1982, Rossini, 1995, Ramirez, 1992).

Morisson R. 1974 yılında Batı Virjinya’da yaptığı çalışmada, katı yakıtlı kazanlardan çıkan cürufu, dere malzemesinin karıştırılarak ince tabakalı asfalt kaplamalarda kullanımının uygun olduğu sonucunu ortaya koymuştur. Boyutları 12,7 mm ile 50,8 mm arasında olan %50 oranında katı yakıtlı kazan cürufu, %39 dere kumu, %3 uçucu kül ve %8 oranında asfalt çimentosu kullanılarak hazırlanan karışımın, ağır kamyon trafiğinin olmadığı yerlerde 10 seneden daha uzun süre yapısal değişikliğe uğramadan hizmet edebildiği gözlenmiştir (Morrisson, 1974). Noureldin S. ve McDaniel R. Yaptıkları çalışmada 6 değişik agregası karışımı hazırlanmış, bu karışımlarda toplam agregası içindeki doğal kum %0-60, çelik cürufu %100-40 oranlarında kullanılmıştır. Bu çalışmada, en düşük bitüm oranı %73 çelik cürufu - %27 doğal kum karışımında elde edilmiştir. Yine bu karışımda en yüksek Marshall stabilite, indirekt çekme ve rijitlik modülü değerlerine ulaşılmıştır (Noureldin, 1990).

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

5. DAHA ÖNCE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

5.1 Ereğli Demir Çelik Fabrikası Cürufunun Asfalt Betonunda Agregası Olarak Kullanılması

Bu çalışma, 2005 yılında Taner Alataş, Ekrem Tolga Somunkıran ve Perviz Ahmedzade tarafından Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Fakültesi Bölümü Elazığ'da yapılmıştır.

Bu çalışmada, bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan kalker agregasının yerine demir çelik üretiminde yan ürün olarak açığa çıkan Ereğli Demir Çelik Fabrikası (E.D.Ç.F.) çelikhane cürufunun kullanılabilirliği araştırılmıştır. Atıl olarak stok sahalarında depolandığı için ekonomik açıdan faydalanılamadığı gibi, çevre kirliliğine de sebep olan demir çelik cürufunun asfalt betonunda kullanılarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Binder tabakası için verilen Tip II gradasyonu ortalama limitlerine göre E.D.Ç.F. çelikhane cürufu ile hazırlanmış Marshall briketleri üzerinde Marshall stabilite, indirekt çekme rijitlik modülü ve statik yüklemeli sünme sertliği deneyleri yapılmış; aynı deneyler Adapazarı Taşkırsığı taş ocağından alınan kalker kökenli malzeme ile tekrarlanarak elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Sonuçta E.D.Ç.F. çelikhane cüruflarının kaplamanın optimum bitüm oranına ve diğer fiziksel özelliklerine etkisi incelenmiş ve cürufun agrega olarak kullanıma elverişli olduğu sonucuna varılmıştır.

Deneylerde, agrega malzemesi olarak Adapazarı Taşkırsığı taşocağından temin edilen kalker ve Demir çelik üretiminde yan ürün olarak açığa çıkan E.D.Ç.F. çelikhane cürufu kullanılmıştır. Agregaların gradasyonu Çizelge 5.1.'de, fiziksel özellikleri ise Çizelge 5.2.'de verilmiştir. Agregaların gradasyonunda Binder Tabakası için verilen Tip II gradasyonu ortalamaları kullanılmıştır (Akihiko, 1994). Ayrıca Erdemir cüruf sahalarından alınan numunelerin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 5.3.'te verilmiştir.

Çizelge 5.1. Kalker ve Cüruf Agregalarının Gradasyonu (KGM, 2000)

Elek boyutu (mm)	% geçen	Şartname limitleri
25	100	100
19	90	80-100
12,5	72	63-81
9,5	63	54-72
4,75	49	40-58
2,00	36,5	28-45
0,425	19,5	14-25
0,180	12	8-16
0,075	4,5	2-7

Çizelge 5.2 Kalker ve cüruf agregalarının fiziksel özellikleri (Alataş, 2005)

Özellikler	Agrega Tipi					
	Kaba > 4,75 mm (ASTM C-127)		İnce 4,75-0,075 mm (ASTM C-128)		Filler <0,075 mm (ASTM D-854)	
	Kalker	Cüruf	Kalker	Cüruf	Kalker	Cüruf
Los Angeles aşınma kaybı, %	29	20	-	-	-	-
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık, %	3,74	8,56	-	-	-	-
Yassılık indeksi, %	6,71	15,5	-	-	-	-
Absorpsiyon yüzdesi, %	0,583	0,95	0,07	0,83	-	-
Özgül ağırlık, gr/cm ³	2,801	3,017	2,780	2,879	2,760	2,783

Bu deneysel çalışmada, bağlayıcı olarak AC 75-100 asfalt çimentosu kullanılmıştır. AC 75-100 asfalt çimentosunun fiziksel özellikleri Çizelge 5.4.'de verilmiştir.

Çizelge 5.3 E.D.Ç.F. çelikhane cürufunun kimyasal analizi (Alataş, 2005)

Element	Yüzde, %
CaO	47 - 55
CaO Serbest	6,5
SiO ₂	7,5 - 15
Al ₂ O ₃	1,2 - 1,7
MgO	1,3 - 1,5
Toplam Fe	20 - 26
Toplam Mn	3,5 - 5,3
Na ₂ O	-
K ₂ O	-
S	-
CaO / SiO ₂	3,7 - 6,25

Çizelge 5.4 AC 75-100'un fiziksel özellikleri (Alataş, 2005)

Özellikler	Test Sonuçları	Standartlar
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	1,035	TS 1087
Düktilite (cm)	> 100	TS 119
Penetrasyon (0,1mm) 25 ^o C'de, 100gr, 5sn	84	TS 118
4 ^o C'de, 100gr, 5sn	18	
Yumuşama noktası (°C)	46	TS 120
Parlama noktası (°C)	304	TS 123
Fraas kırılma noktası (°C)	-27,1	TS EN 12593
Kinematik viskozite, 135 ^o C, mm ² /sn	354	TS 1093
Penetrasyon indeksi (PI)	-1,00	-
Penetrasyon viskozite sayısı (PVN)	-0,6	-

Deneysel çalışmada, Karayolları Genel Müdürlüğü Fenni Şartnamesinde Binder Tabakası için verilen Tip II gradasyonu ortalama limitlerine göre E.D.Ç.F. çelikخانه cürufu ile hazırlanmış Marshall briketleri üzerinde Marshall stabilite, indirekt çekme rijitlik modülü ve statik yüklemeli sünme sertliği deneyleri yapılmış; aynı deneyler Adapazarı Taşkısığı taş ocağından alınan kalker kökenli malzeme ile tekrarlanarak elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

Marshall Metodu

Marshall metodu kullanılarak Çizelge 5.1.'de verilen agrega gradasyonu için iki farklı agrega grubunda optimum bitüm muhtevası araştırılmıştır. Bunun için %4, 4,5, 5, 5.5 bitüm muhtevelarında hazırlanan üçer adet Marshall numuneleri Marshall test aygıtında (Ele Test-E) test edilerek denenmiş ve her agrega cinsi için optimum bitüm muhtevası bulunmuştur (KGM, 1990, Keçeciler, 1988). Optimum bitüm oranlarında hazırlanan numunelerin Marshall değerleri Çizelge 5.5.'de verilmiştir.

Çizelge 5.5 Marshall dizayn değerleri (Alataş, 2005)

Agrega grubu	W_a (%)	W_b (%)	D_p (gr/cm ³)	D_t (gr/cm ³)	V_h (%)	VMA (%)	V_f (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)
Kalker	4,9	4,67	2,420	2,571	5,859	17,485	66,389	3,96	1173,2
Cüruf	5,1	4,83	2,546	2,680	5,14	17,877	70,816	2,99	1469,0
Şartname limitleri (KGM, 1990)					4-6	-	65-75	2-4	min 750

W_a : Karışımındaki bağlayıcı oranı (agreganın ağırlıkça %'si olarak).

W_b : Bağlayıcı miktarı (karışımın ağırlıkça %'si olarak).

D_p : Sıkıştırılmış numunenin hacim özgül ağırlığı (gr/cm³).

D_t : Sıkıştırılmış numunenin teorik özgül ağırlığı (gr/cm³).

V_h : Sıkıştırılmış karışımındaki boşluk oranı (%).

VMA: Sıkıştırılmış karışımındaki agregalar arası boşluk (%).

V_f : sıkıştırılmış karışımındaki bağlayıcı ile dolu boşluk (%).

İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi

İndirekt çekme rijitlik modülü deneyi, dinamik yükler karşısında bitümlü karışımların rijitliğini tespit etmek amacıyla yapılmaktadır. Rijitlik modülü yüzey kaplamalarının en önemli performans karakteristiğidir. Rijitlik modülü, bitümlü kaplamalarda yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Rijitlik modülü, kaplamanın altında trafik etkisiyle meydana gelen ve yorulma çatlaklarına neden olan çekme gerilmelerini ve basınç gerilmesinin neden olduğu kalıcı deformasyonları kontrol eder. Tek eksenli yükleme altındaki rijitlik modülü genel olarak maksimum gerilmenin maksimum birim şekil değiştirmeye oranıdır. Bu çalışmada, indirekt çekme rijitlik modülü deneyi, Universal Testing Machine (UTM-5P) aletiyle yapılmıştır. Deney için hazırlanan Marshall numuneleri tek eksenli yüklemenin yapılacağı yükleme aparatına yerleştirilir ve sensörler bağlanır. Taşıt hızları göz önünde bulundurularak yük artış süresi belirlenir. Karışımın tahmini poisson oranı (0,35), hedef deformasyon (7µm) ve yük artış süreleri bilgisaya veri olarak girilir ve deney başlatılır. Deney, 20°C’de periyodu 3000 ms yükleme zamanı 126 ms olan 5 darbe esas alınarak deformasyon kontrollü olarak düzenlenmiş ve rijitlik modülünün (S_m) hesaplanmasında (5.1) denklemi kullanılmıştır (Rilem Report,1988; BSI DD 213, 1993).

$$S_m = P \times (\mu + 0,27) / D \times t \quad (5.1)$$

S_m : Rijitlik modülü (Mpa)

P: Maksimum yük (N)

t: Numune kalınlığı (mm)

D: Yatay deformasyon (mm)

μ : Poisson oranı (deneylerde 0,35 alınmıştır)

Çizelge 5.6. E.D.Ç.F. cürufu ve kalker numunelerinin rijitlik modülü değerleri (Alataş, 2005)

Agrega Cinsi	Rijitlik modülü S_m (Mpa)
Kalker	1180
Cüruf	3558

En yüksek rijitlik modülü değerine cürufu numunelerde ulaşılmıştır. Optimum bitüm oranlarında hazırlanan numunelerin Marshall değerleri tespit edildikten sonra, aynı oranlarda

hazırlanan diğer numuneler de indirekt çekme rijitlik modülü deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.6.'da verilmiştir.

Statik Yükleme Sünme Sertliği Deneyi

Bitümlü sıcak karışımların statik yükler altında dayanımlarını tespit etmek amacıyla bu deney yapılmaktadır. Statik yükleme sünme sertliği (SYSS) deneyi, karışımların tekerlik izi deformasyonuna karşı dayanımı hakkında fikir vermektedir. Standart deney sıcaklığı 40°C olmasına karşın aşırı sıcak bölgeler göz önünde bulundurularak daha yüksek sıcaklıklarda da yapılabilir. Bu çalışmada, SYSS deneyi, Universal Testing Machine (UTM-5P) aletiyle yapılmıştır. Deney için hazırlanan Marshall numuneleri 3 saat deney sıcaklığında bekletilir. Bu sürenin sonunda numuneler SYSS deney aletine yerleştirilir ve sensörler bağlanır. Deneyde ilk olarak arazideki gerilmeleri yansıtmak amacıyla 10 dakika boyunca 10 kPa'lık yük ile önyüklemeye yapılır. Bu sürenin sonunda otomatik olarak deney başlar ve 1 saat boyunca sürekli olarak 100 kPa'lık yük uygulanır. Oluşan deformasyon miktarına göre sünme sertliği modülünün (E_c) hesaplanmasında (5.2) denkliği kullanılmıştır (BSI DD 185, 1990).

$$E_c = \sigma / \epsilon_c \quad (5.2)$$

Statik yükleme sünme sertliği (SYSS) deneyi, optimum bitüm oranlarında hazırlanan kalkerli ve cürufllu numuneler üzerinde 40°C deney sıcaklığında yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.7.'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. E.D.Ç.F. Cürufu ve Kalker numunelerinin sünme sertliği modülü değerleri.
(Alataş, 2005)

Agrega Cinsi	Sünme sertliği modülü E_c (Mpa)
Kalker	40,12
Cüruf	49,10

En yüksek sünme sertliği modülü değerine cürufllu numunelerinde ulaşılmıştır.

Kalkerli ve cürufllu numuneler üzerinde yapılan Marshall stabilite deneylerinden elde edilen değerler şartname limitleri içinde kalmıştır. Cürufllu numunelerden elde edilen stabilite değerleri, kalker numunelerine göre daha yüksek; akma değerleri ise daha düşük olarak tespit edilmiştir.

İndirekt çekme rijitlik modülü ve statik yüklemeli sünme sertliği modülü sonuçlarında da, Marshall deneyi sonuçlarına paralel olarak en yüksek rijitlik modülü ve sünme sertliği modülü değerlerine cürufllu numunelerinde ulaşılmıştır.

Cürufllu numunelerin kalkerli numunelere göre iyi performans göstermesi, agrega olarak cürufun kalkere göre daha dayanıklı olmasıdır. Aynı zamanda cüruf malzemesinin yüzeyi kalkere göre daha gözenekli ve pürüzlü olduğundan, sıcak karışım içerisinde agregalar ile bitüm arasındaki adezyon cürufufla daha yüksek olmaktadır. Bundan dolayı, cürufllu numunelerde daha düşük akma değeri elde edilmiştir.

Karayolu üst yapısında kullanılan agregalar yola etki eden yüklerin oluşturduğu gerilmelere karşı önemli rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalar ve alınan sonuçlar, E.D.Ç.F. çelikhane cürufunun bitümlü sıcak karışımlarının performansını kapsamlı olarak düzelttiğini ve bir agrega malzemesi olarak karayolu üstyapısında kullanılabilirliğini göstermiştir.

Ülkemizde demir çelik endüstrisinden gelen yan ürünlerin geri kazanımı ve atıkların çevreyle uyumlu bir şekilde değerlendirilmesi konusunda çalışmalar yapılmalıdır. Diğer ülkelerde olduğu gibi bu tür konularda üretim yapan şirketler ve araştırmacılar birlikte çalışmalı, geliştirilecek uygulama alanları devletimiz tarafından yasalarla desteklenmelidir. Atık malzemenin yeniden üretimde değerlendirilmesi hem ekonomik hem de çevreci bir yaklaşım olacaktır.

5.2 Çelikhane Cürufu ve Kırılmış Kireçtaşı Agregası Betonlarının Özelliklerinin Karşılaştırması

Bu çalışma 2002 yılında M. Maslehuddin, Alfarabi M. Sharif, M. Shameem, M. Ibrahim ve M.S. Barry tarafından Suidi Arabistan'da King Fahd Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde gerçekleştirilmiştir.

Çelik cürufu elektrik ark ocaklarında çelik peletlerinin oksidasyonu sürecinde bir yan ürün olarak oluşur. Bu yan ürün temel olarak kalsiyum karbonatlardan oluşur ve asfalt ve betonda kullanılmak üzere daha küçük parçalara kırılır. Yapılmış bu çalışmada, çelikhane cürufu agregasının mekanik özellikleri ve dayanıklılık karakteristikleri, kireç taşı agregası ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Çelikhane cürufu ve kireçtaşı agregası betonlarının dayanıklılık performansları, su geçirimsizliği deneyi, dalga hızı, boyutsal stabilite ve takviye korozyonu olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar çelikhane cürufu agregalı betonun, kireçtaşı ile üretilen betona göre dayanıklılıklarının daha iyi olduğunu göstermiştir. Benzer olarak,

çelikhane cürufu agregalı betonun kireç taşı ile üretilen betona göre birim ağırlığı gibi bazı fiziksel özelliklerinin de daha iyi sonuçlar verdiği bulunmuştur.

Çalışmada beton karışımları çelikhane cürufu ve kireç taşı agregaları ile belli oranlarda karıştırılarak sağlanmıştır. Betonda kullanılan çimento oranı m^3 başına 400 kg'dır ve su/çimento oranı 0,4 olarak kabul edilmiştir. Çelikhane cürufu agregası beton karışımları hazırlanırken, çelikhane cürufu agregasının kütlece ağırlığının toplam agrega ağırlığına oranları 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65 olarak kullanılarak yapılmıştır. Bu agrega oranları, çelikhane cürufu agregalı sertleşmiş betonun özelliklerinde, iri agrega miktarlarının önemini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Kırılmış kireç taşı agregası ile üretilen betonda, kullanılan iri kırma taş miktarının toplam agrega miktarına oranı 0.6 olarak kullanılmıştır. Beton üretiminde ayrıca $2,43Mg/m^3$ tane yoğunluğuna ve 0,57 su emme oranına sahip doğal kum kullanılmıştır.

Çizelge 5.8'de çelikhane cürufu agregasının ve kırılmış kireç taşı agregasının kimyasal bileşen analizini göstermektedir. Çizelge 5.9, beton üretiminde kullanılan toplam agrega gradasyonunu göstermektedir. Çizelge 5.10, çelikhane cürufu agregası ve kireç taşı agregası için karışım dizaynı parametrelerini göstermektedir.

Beton numunelerinden birim ağırlığı, basınç dayanımı, su absorpsiyonu ve gerilme dayanımları deneylerini yapabilmek için 75 mm çapında ve 150 mm uzunluğunda kaplara numuneler alınmıştır. Beton basınç dayanımı ASTM C 39'a göre 28 günlük dayanım kırım deneyleri yapılmıştır. ASTM C 496 ve ASTM C 642'ye göre gerilme dayanımı ve su absorpsiyonu deneyleri yapılmıştır. ASTM C 78 ve ASTM C 597'ye göre bükülme dayanımı ve dalga hızı deneyleri yapılmıştır.

Çizelge 5.8. Kireç taşı ve çelikhane cürufu agregası özellikleri (Maslehuddin, 2002)

	Çelikhane Fırın Cürufu Agregası	Kireç Taşı agregası
Fiziksel Özellikler		
Tane Yoğunluğu (Mg/m^3)	2,54	3,51
Su Absorpsiyonu (%)	2,2	0,85
Aşınmaya Karşı Direnç (%)	24,2	11,6
Kimyasal Kompozisyon		
$CaCO_3$	95	10
SiO_2	5	1
Fe_2O_3	0	89

Çizelge 5.9 Çelikhane cürufu ve kireç taşı cürufu agregası betonları için agrega gradasyonu (Maslehuddin, 2002)

Gözenek Aralığı (mm)	Yüzde Geçen	
	İri Agregası	İnce Agregası
19.0	100	
12.5	90	
9.5	40	
4.75	15	
2.36	0	
1.18		100
0.6		86
0.425		64
0.3		43
0.15		18
0.075		1

Çizelge 5.10 Çelikhane cürufu ve kireçtaşı agregaları için beton karışım dizaynı parametreleri (Maslehuddin, 2002)

Parametre	Çelik Cürufu Agregası Beton	Kireç Taşı Agregası Beton
Çimento içeriği kg /m ³	400	400
Su/ çimento oranı	0.4	0.4
İri agreganın toplam agregaya oranı	0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65	0.6
Maks. agrega büyüklüğü, mm	12.5	12.5

2002 yılında yapılmış bu çalışmada elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.11. Değişen yüzdelerde çelikhane cürufu agregası ve kırılmış kireç taşı agregası kullanılarak üretilen beton numunelerine ait deney sonuçları (Maslehuddin, 2002)

Özellik	Kırılmış Kireç Taşı Agregası (%60)	Çelikhane Fırın Cürufu				
		45%	50%	55%	60%	65%
Birim Ağırlık, kg/m ³	2330	2436	2523	2653	2736	2769
Basınç Dayanımı, MPa	39.7	31.4	37.7	37.6	41.6	42.7
Bükülme Dayanımı, MPa	3.96	3.47	3.61	3.69	3.81	4.21
Gerilme Dayanımı, MPa	6.33	5.79	6.06	6.11	6.26	6.35
Absorpsiyon, %	5.33	4.51	4.33	3.89	3.71	3.64
Hava boşluğu hacmi, %	13.6	13.58	11.87	11.69	11.12	10.04
Dalga hızı, km/s	4.55	4.6	4.62	4.64	4.78	4.94

Çalışma sonucu olarak kireçtaşı agregası yerine çelikhane cürufu kullanılması durumunda basınç dayanımlarının ve betonun fiziksel dayanıklılık özelliklerinin artış gösterdiği bulunmuştur (Maslehuddin, 2002)

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

İskenderun Demir Çelik Fabrikası'na ait çelikhane cürufu ile Karabük Safranbolu'da bulunan Kardemir Demir Çelik Fabrikası'na ait çelikhane cürufu atıklarından deneysel çalışmaların ön safhası için 50'şer kg numune alınmıştır. Cüruf malzemelerin hazır beton üretiminde agrega olarak kullanımı amacıyla TS 706 EN 12620 "Beton Agregaları" standardı referans kabul edilmiş ve buna göre gönderilen malzemelerin beton üretiminde kullanımının uygun olup olmayacağı ile ilgili gerekli deneyler yapılmıştır.

Bu amaçla gönderilen cüruf malzemelerine standarda belirtilmiş kimyasal deneylerden TS EN 1367-2 standardına göre magnezyum sülfat deneyi (dona dayanıklılık deneyi), TS EN 1744-1 standardının 12. maddesine göre asitte çözünabilir sülfat içeriği deneyi, TS EN 1744-1 standardının 11. Maddesine göre toplam kükürt içeriği deneyi, TS EN 1744-1 standardının 7. Maddesine göre suda çözünabilir 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 gönderilen malzemelere kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi amacıyla XRF ve XRD deneyleri yapılmıştır.

Cüruf malzemelerine yapılan fiziksel ve mekanik deneyler olarak TS EN 933-1 standardına göre elek analizi (granülometri), TS EN 933-3 standardına göre yassılık indeksi deneyi ve TS EN 1097-6 standardına göre tane yoğunluğu ve su emme oranı deneyi yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre gönderilen cüruf malzemelerinin TS 706 EN 12620 "Beton Agregaları" standardına göre uygunluğu değerlendirilmiş ve deney sonuçlarına göre kategorizasyon yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar Yıldız Teknik Üniversitesi ve Türkiye Hazır Beton Birliği Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

6.1 Dona Dayanıklılık (Magnezyum Sülfat Deneyi)

Soğuk iklimlerde üretilen betonun donma etkisiyle yüzeyinin soyulmaması ve bir bütün olarak betonun parçalanmaması istenir. Betonun dona dayanıklılığında agrega önemli rol oynar. Bu nedenle donma etkisinde kalacak betonlarda kullanılacak agreganın da dona dayanıklı olması istenir. Agreganın dona dayanıklılığı esas olarak don deneyleri ile

belirlenir. Agrega üzerine uygulanan don deneyiyle agreganın sağlamlığı hakkında da dolaylı olarak bilgi edinilir.

TS 706 EN 12620 standardına göre agregalara dona dayanıklılık deneyi yapılmalıdır. Dona dayanıklılık deneyi MS kategorilerine göre kıyaslanarak bölgelere göre uygunluklarına karar verilir. Deney TS EN 1367-2 magnezyum sülfat deneyine göre yapılır. Ancak, kuşkulu durumlarda kırma taş veya kum-çakıl agregaları üzerinde don deneyleri gerçekleştirilir.

6.1.1 Gerekli Malzemeler

Deney için gerekli malzemeler, deney elekleri (10 ve 14 mm gözenek çapında), terazi , pirinç veya paslanmaz telden sepetler, etüv, desikatör, termometre, doymuş magnezyum sülfat çözeltisi ve damıtık sudur.

6.1.2 Deneyin Yapılışı

Her deney numunesi $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 'lık etüvde (24 ± 1) saat boyunca kurutulur ve desikatörde laboratuvar sıcaklığına getirilir.

Her deney numunesi 10 mm ve 14 mm göz açıklıklı eleklerle elenir, elek altı ve elek üstü atılarak yaklaşık 500 gramlık bir kütlede numune elde edinceye kadar elenir.

Her bir deney numunesi damıtık suyla tozlarından arıncaya kadar yıkanır, süzülür ve belirtildiği gibi etüvde kurutulur.

Sadece tane büyüklüğü aralığı 10 mm ve 14 mm olan malzemenin kullanılmasını sağlamak için eleme işlemi tekrarlanır.

Her deney numunesinden $(420\pm 0,1)$ gram $(430\pm 0,1)$ gram aralığında deney numuneleri tartılır ve kütleleri kayıt edilir (M1). Deney numuneleri işaretlenmiş iki tel sepete aktarılır. Takip eden bütün çalışma safhalarında ortaya çıkabilecek malzeme sıçramalarını en aza indirmek için sepetlerin sallanmasından sakınılmalıdır.

Her sepetteki agreganın 20 mm'lik çözelti ile kaplanacak şekilde $(17\pm 0,5)$ saat boyunca doymuş magnezyum sülfat çözeltisi kap içerisine daldırılır. Her sepet ile yığılmış tuz depolanmaları ve kap kenarları arasında en azından 20 mm açıklık bulunmalıdır. Deneyin her aşamasında sepetlerden herhangi bir tanenin kaybolmamasına özel dikkat gösterilmelidir. Buharlaşma ve kirlenmeden sakınmak için kabın kapağı kapatılmalıdır.

Daldırma işleminden sonra her sepet çözeltiden çıkartılarak $(2\pm0,25)$ saat boyunca suyu süzülür takiben kap kapatılır. Her bir sepet Madde 8.2.'deki gibi kurutulur ve $(5\pm0,25)$ saat boyunca laboratuvar sıcaklığına erişmesi için soğutulur.

Bir sonraki daldırma işleminde, kabın tabanında toplanan tuz çökeltileri önce çözülür ve çözelti iyice karıştırılarak 30 dakika süre ile beklemeye bırakılır. Kaptaki çözeltinin yoğunluğu kontrol edilir. Yoğunluk belirlenmiş aralığın dışında ise çözelti hazırlanmış doygun taze $MgSO_4$ çözeltiyle değiştirilir. Daldırma işlemi esnasında kayaç tanelerinin aşırı şekilde etrafa sıçraması durumunda çözeltinin ölçülen yoğunluğu, süspansiyon halindeki ince taneler veya iyon değiştirme etkilerinden dolayı tam olmayabilir. Bu şartlar altında çözelti taze bir çözelti ile değiştirilir.

Çalışma periyodu (48 ± 2) saat süre ile 5 defa uygulanmalıdır.

İşlemlerin 5 defa tekrar edilmesinden sonra agrega soğutulur, her bir sepetteki agrega magnezyum sülfattan temizlenene kadar musluk suyuyla yıkanır.

Her deney numunesi kurutulur. Deney numunesi 10 mm'lik eleklerle elle elenir ve agrega elek üstü kütlesi (M_2) 0,1 gram doğrulukla kaydedilir. Deney sonucu 6.1 denkliği kullanılarak hesaplanır.

$$MS = \frac{100(M_1 - M_2)}{M_1} \quad (6.1)$$

M_1 : Deney numunesinin ilk kütlesi, ± 0.1 gram doğrulukla.

M_2 : Deneyden sonra 10 mm.lik elekte kalan agreganın nihai kütlesi, $\pm 0,1$ gram doğrulukla.

Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de donma çözünme deney düzenekleri resimleri gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Donma çözünme deneyi paralel deney düzenekleri



Şekil 6.2 Donma çözünme deney düzeneği

6.1.3 Deney Sonuçları

Kardemir Demir Çelik Fabrikası cürufu için:

M_1 : 300 gr

M_2 : 288,6 gr

MS : %3,8

İskenderun Demir Çelik Fabrikası cürufu için:

M_1 : 629 gr

M_2 : 611 gr

MS : % 2,8

Her iki cüruf malzemesi de TS 706 EN 12620 standardına göre MS₁₈ kategorisine girmektedir.

6.2 Asitte Çözünebilir Sülfat İçeriği

Agregalarda sülfat içeriğinin yüksek olması durumunda betonda etrenjit oluşumu adı verilen bir reaksiyon oluşur. Bu oluşum betonun zamanla genişmesi ve çatlama gibi problemlerin oluşumuna sebebiyet verir. Ayrıca sülfat içeriğinin yüksek olması çelik donatılı betonlarda korozyona sebebiyet verebilir. Beton agregalarında TS 706 EN 12620 standardına göre kükürtlü içeriklere Asitte Çözünebilir Sülfat deneyi ve Toplam Kükürt içeriği deneyleri yapılarak karar verilir. Asitte çözünebilir sülfat içeriği deneyi TS EN 1744-1 standardına göre yapılır. Deney sonucuna, TS 706 EN 12620 “Beton Agregaları” standardına göre kategori verilir.

6.2.1 Gerekli Malzemeler

Deney için gerekli malzemeler, terazi, havan, tokmak, kül fırını, 0,125 mm elek, kroze, etüv, cam malzemeler, kül içermeyen filtre kağıdı, hidroklorik asit çözeltisi, baryum klorür çözeltisi ve distile sudur. Deneylerde kullanılan distile suyu üretmek için kullanılmış cihaz Şekil 6.3’de gösterilmiştir. Şekil 6.4’de kullanılan teraziler gösterilmiştir.



Şekil 6.3 Distile su cihazı



Şekil 6.4 Teraziler

6.2.2 Deneyin Yapılışı

Deney numunesi azaltılır. Kademeli olarak kırılır, alt numune azaltılır. Sonra, 0,125 mm göz açıklığı olan deney eleğinden geçen yaklaşık 20 g'lık bir kütle elde edilene kadar öğütmeye ve azaltmaya devam edilir. Deney numunesi parçası olarak bu maddeden yaklaşık 2 g alınır. Eğer bu işlem sırasında kurutma gerekirse, sıcaklık, sülfidlerin oksitlenmemesi $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 'yi geçmemelidir.

Deney numunesi parçası (m1), 0,1 mg yaklaşımla tartılır; 250 ml'lik bir behere konarak, 90 ml soğuk su ilâve edilir. Karışım kuvvetlice karıştırılırken, 10 ml derişik hidroklorik asit ilâve edilir. Çözelti hafif ısıtılır ve yassı uçlu bir cam karıştırma çubuğu ile katılar dağıtılır. Çözelti, 15 dakika kaynama noktasının hemen altında tutulur.

Kalıntı, 400 ml'lik bir behere orta dereceli süzgeç kâğıdından süzülür. Sıcak su ile iyice yıkanır. Yıkamalarda gümüş nitrat deneyiyle klorür iyonlarının bulunmadığı kontrol edilir.

Hacim yaklaşık 250 ml'ye ayarlanır. Kaynama durumuna getirilir ve 5 dakika kaynatılır. Çözeltinin berraklığı kontrol edilir, değilse, deney yeni bir deney numunesi parçası ile tekrarlanır. Kaynama noktasına gelen çözelti kuvvetlice karıştırılırken, damla damla kaynama noktasının hemen altına ısıtılmış 10 ml baryum klorür çözeltisi ilâve edilir. Baryum klorür ilavesini takiben beyaz renkte baryum sülfat çökeleği oluşur. Şekil 6.5'de asitte çözünebilir sülfat içeriği deneyinde oluşan baryum sülfat çökeleği gösterilmiştir.

Kaynama noktasının biraz altında 30 dakika daha tutulduktan sonra ılık bir yerde bir gece bırakılır. Çökelek iyi dereceli süzgeç kâğıdı olan bir cam huniye aktarılır ve süzülür. Her iki durumda da çökelek birkaç kere sıcak suyla klorür iyonu kalmayıncaya kadar yıkanır.

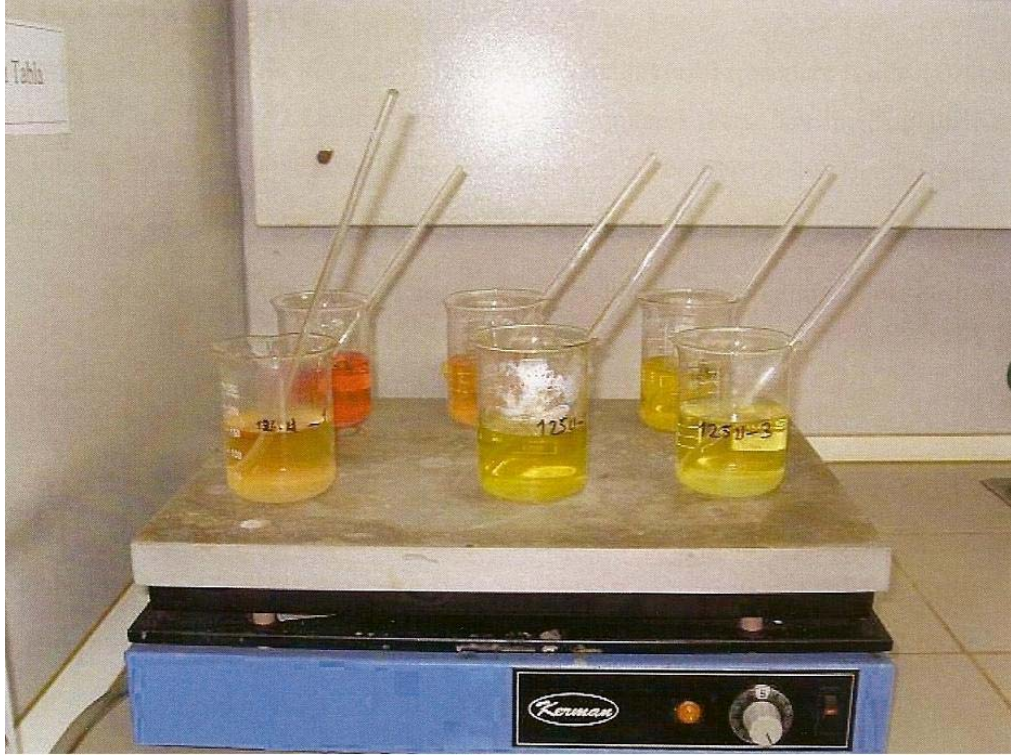
Filtre kâğıdı elektrikli fırında $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 'de yaklaşık 30 dakika kurutulur, $(925\pm 25)^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa kademeli yükseltilerek, kütle kaybı olmayıncaya kadar tutulur, bu sıcaklıkta 15 dakika tutmak yeterlidir.

Kroze desikatörde soğutulur ve 0,1 mg yaklaşımla tartılır. Krozenin kütleindeki artıştan çökeleğin kütlesi m2 hesaplanır. Deney sonucu (6.2) denkliği kullanılarak hesaplanır.

$$\text{Asitte Çözünebilir Sülfat İçeriği (\%SO}_3\text{)} : (m1/m2) \times 34,3 \quad (6.2)$$

m1 : çökeleğin kütlesi (g)

m2 : deney numunesi parçasının kütlesi (g)



Şekil 6.5 Asitte çözünebilir sülfat içeriği deneyi baryum sülfat çökeleği görüntüsü

6.2.3 Deney Sonucu

Kardemir Demir Çelik fabrikası cürufu:

$$m1 : 14,9563 - 14,9470 = 0,0093 \text{ gr}$$

$$m2 : 2,0097 \text{ gr}$$

Asitte çözünebilir sülfat içeriği : % 0,159 (%SO₃)

İskenderun Demir Çelik fabrikası cürufu:

$$m1 : 13,2274 - 13,2229 = 0,0045 \text{ gr}$$

$$m2 : 2,0164 \text{ gr}$$

Asitte çözünebilir sülfat içeriği : % 0,077 (%SO₃)

Her iki cüruf malzemesi de TS 706 EN 12620 standardına göre AS_{0,2} kategorisine girmektedir.

6.3 Toplam Kükürt İçeriği

Beton agregalarında TS 706 EN 12620 standardına göre kükürtlü içeriklere Asitte Çözünebilir Sülfat deneyi ve Toplam Kükürt içeriği deneyleri yapılarak karar verilir. Toplam Kükürt İçeriği deneyi TS EN 1744-1 standardına göre yapılır. TS 706 EN 12620 “Beton Agregaları” standardı cüruf agregaları için %2 toplam kükürt sınır değeri belirtmiştir.

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.

6.3.1 Gerekli Malzemeler

Deney için gerekli malzemeler, terazi, havan, tokmak, kül fırını, 0,125 mm elek, kroze, etüv, cam malzemeler, kül içermeyen filtre kağıdı, hidroklorik asit çözeltisi, baryum klorür, brom, nitrik asit çözeltisi ve distile sudur. Şekil 6.6’da kullanılan kül fırını resmi gösterilmiştir.



Şekil 6.6 Kül fırını

6.3.2 Deneyin Yapılışı

Deney numunesi azaltılır. Kademeli olarak kırılır, alt numune azaltılır. Sonra, 0,125 mm göz açıklığı olan deney eleğinden geçen yaklaşık 20 g'lık bir kütle elde edilene kadar öğütmeye ve azaltmaya devam edilir. Deney numunesi parçası olarak bu maddeden yaklaşık 1 g alınır. Eğer bu işlem sırasında kurutma gerekirse, sıcaklık, sülfidlerin oksitlenmemesi $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 'yi geçmemelidir.

Deney numunesi parçası (m1) 0,1 mg yaklaşımla tartılır ve huniyle geniş ağızlı bir erlene aktarılır. Çeker ocakta erlene 3 ml su ve 1 ml brom ilâve edilir. Karışım, istenmeyen topaklaşma oluşumunu engellemek için hafifçe 1 dakika çalkalanır. Sonra, huniyle yavaşça 15 ml kükürtsüz, derişik nitrik asit ilâve edilir. Karışım 1 saat tutulur ve aralıklı olarak jel, bir cam çubuk ile dağıtılır, bu amaçla çubuk erlenin içinde bırakılır. 30 ml su ilâve edilir ve karışım bir ısıtıcı üzerinde, yoğun kahverengi dumanlar kesilene kadar hafifçe kaynatılır. 5 ml derişik hidroklorik asit ve 10 ml su ilâve edilir. Karışım kaynatılarak küçük bir hacme azaltılır. İlâve etme ve karışımı küçük hacme kaynatarak azaltma işlemi tekrar edilir. Erlen muhtevası, 250 ml'lik bir behere aktarılır ve beherdeki toplam hacim yaklaşık 100 ml olana kadar erlen yıkanır.

Az bir miktar süzgeç kâğıdı hamuru ilâve edilerek beherin içindekiler hemen hemen kaynama durumuna getirilir, çözeltiye amonyak ilâve edilerek alkali olması sağlanır, alkalilik metil kırmızısı indikatörü kullanılarak veya bir pH metre yardımıyla kontrol edilir. 30 saniye kaynama derecesinin biraz altına kadar kaynatılır. Hafif vakum ile süzülür (orta gözenekli bir süzgeç kâğıdı kullanarak) ve biraz sıcak distile su ile yıkanır, süzüntüler muhafaza edilir. Süzgeç kâğıdı behere alınır ve 70 ml sıcak su ilâve edilmiş 5 ml derişik hidroklorik asit ile tekrar çözülür. Kaynatma, çöktürme, süzme ve yıkama işlemleri yukarıdaki gibi yapılır. Çökelek ayrılır. Birleştirilmiş süzüntüler asitlendirilir ve 1 ml derişik hidroklorik asit ile yıkanır (hepsi yaklaşık 220 ml olmalıdır). Kaynama noktasına getirilip, 5 dakika kaynatılır, eş zamanlı olarak kaynama noktasındaki çözelti kuvvetlice sallanır, damla damla 10 ml baryum klorür çözeltisi eklenip kaynama noktasının biraz altına kadar ısıtılır.

Süzüntü Madde 6.3.2'de belirtildiği gibi olgunlaştırılır, süzülür ve yakılır. 0,1 mg yaklaşımla tartılır ve çökeleğin kütlesi (m2) hesaplanır. Deney sonucu 6.3 denkliği kullanılarak hesaplanır.

$$\text{Toplam Kükürt İçeriği (\%S)} : (m1/m2) \times 13,74 \quad (6.3)$$

m1 : çökeleğin kütlesi (g)

m2 : deney numunesi parçasının kütlesi (g)

6.3.3 Deney Sonucu

Kardemir Demir Çelik fabrikası cürufu:

$$m1 : 15,9628 - 15,9555 = 0,0073 \text{ gr}$$

$$m2 : 1,0003 \text{ gr}$$

Toplam kükürt içeriği (%S) : % 0,10

İskenderun Demir Çelik fabrikası cürufu:

$$m1 : 14,2812 - 14,2776 = 0,0036 \text{ gr}$$

$$m2 : 0,9956 \text{ gr}$$

Toplam kükürt içeriği (%S) : %0,05

TS 706 EN 12620 standardına göre cüruf agregalarında bulunan toplam kükürt içeriği %2'yi geçmemelidir. Alınan cüruf malzemeleri toplam kükürt içeriği bakımından sınır değerlerin oldukça altındadır.

6.4 Suda Çözünebilir Klorür İçeriği

Agregalarda suda çözünebilir klorür içeriği TS 706 EN 12620 standardında belirtildiği gibi TS EN 1744-1 standardı 7. maddesinde belirtilen deney metoduna göre yapılmalıdır. Agregalarda klorür içeriği çelik donatılı yapılarda korozyona sebebiyet verdiği için oldukça önemlidir. TS EN 206 beton standardında üretilen beton ürününün toplam klor miktarı ve toplam klor sınıfı belirlenmelidir. 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 kullanılamayacağı anlaşılır.

6.4.1 Gerekli Malzemeler

Deney için gerekli malzemeler, etüv, terazi, mekanik çalkalayıcı, büret, nitrik asit çözeltisi, amonyum demir III sülfat indikatör çözeltisi, amonyum tiyosiyanat çözeltisi, gümüş nitrat çözeltisi ve cam malzemelerdir. Şekil 6.7'de kullanılan titrasyon düzeneği resmi gösterilmiştir.



Şekil 6.7 Suda çözünebilir klorür deneyi titrasyon düzeneği

6.4.2 Deneyin Yapılışı

Deney numunesi 110 ± 5 °C'ye kadar kurutularak sabit tartıma getirilir.

Her biri yaklaşık $(2 \pm 0,3)$ kg iri agregalı veya her biri yaklaşık (500 ± 75) g olan ince agregalı deney numunesi parçası elde edilir.

İri agregalar ve hafif agregalar için 5 litre kapasiteli iki geniş ağızlı cam, plâstik veya metal şişe ve ince agregalar için 2 litre kapasiteli iki şişe kullanılır. Her bir şişe tartılır ve kütleleri 1 g yaklaşımla kaydedilir. Elde edilen deney numunesi parçaları şişelere konulur. Şişeler ve içindekiler tartılır, kütleleri 1 g yaklaşımla kaydedilir. Her bir şişedeki agrega kütlesi farktan hesaplanır. Her bir şişeye deney numunesi parçasının kütlesine eşit kütlede su ilâve edilir. Hafif agregalar için 1 litre su ilâve edilir.

Şişeler, 60 dakika boyunca bir çalkalayıcıda karıştırılır. Sonra, ekstraktlar kuru, orta gözenekli süzgeç kâğıdından temiz kuru bir beherde en azından 100 ml berrak veya yarı berrak bir süzüntü toplanıncaya kadar süzülür. 100 ml süzölmüş ekstrakt, 100 ml'lik bir pipetle alınır ve

250 ml'lik bir erlene aktarılır. Erlene 5 ml nitrik asit ilâvesini takiben bir büret ile bütün klorürler çökene kadar gümüş nitrat çözeltisi ve biraz fazlası ilâve edilir.

2 ml 3, 5, 5 - trimetilhekzan-1-ol ilâve edilir, tapa takılır ve çökelek oluşması için erlen kuvvetle çalkalanır.

Tapa çözelti kaybetmekten sakınarak, dikkatlice çıkarılır ve su ile çalkalanır, yıkama suyu çözeltide toplanır.

5 ml amonyum demir III sülfat indikatör çözeltisi ilâvesini takiben ayarlı tiyosiyanat çözeltisi bir büretle ilk kalıcı renk değişimi, yani yarı berrak beyaz renk mat kahverengiye dönüşüncüye kadar ilâve edilir. Çözelti, ayarlama için kullanıldığı zamanki gibi aynı renkte olur. İlâve edilen tiyosiyanat çözeltisinin hacmi V_6 , kaydedilir. İkinci deney numunesi ekstraktı için de aynı işlemler tekrarlanır. Her ekstraktın tayinlerinin sayısı bir olarak sabittir. Deney sonuçları, iki ekstraktın tayinlerinin sonucunun ortalaması olarak verilir. Deney sonucu (6.4) denkliği kullanılarak hesaplanır.

$$C = 0,003546 W [V_5 - (10 \times C_T \times V_6)] \quad (6.4)$$

Burada;

V_5 : gümüş nitrat çözeltisinin hacmi, ml

V_6 : ilâve 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.

6.4.3 Deney Sonucu

Kardemir Demir Çelik fabrikası cürufu:

V_5 : 5 ml

V_6 : 4,90 ml

C_T : 0,1 mol/L

W : 2

Suda çözünebilir klorür içeriği : % 0,0007

İskenderun Demir Çelik fabrikası cürufu:

V_5 : 5 ml

V_6 : 4,55 ml

C_T : 0,1 mol/L

W : 2

Suda çözünebilir klorür içeriği : % 0,0035

TS 706 EN 12620 standardında agreganın klorür içeriği betonda toplam klor hesabında kullanılması için %0,01'i geçmemelidir. Her iki cüruf malzemesinin de suda çözünebilir klorür içeriği %0,01 sınır değerinin altında bulunmuştur.

6.5 Humus İçeriği

Humus, hayvansal ve bitkisel atıkların toprakta çürümesiyle oluşmuş organik bir maddedir. Humus muhtevası, bir deney numunesi parçası sodyum hidroksit çözeltisinde çalkalandığında oluşan renkten tayin edilir. Çimentonun sertleşmesine ve pirizlenmesine etki eden bir organik bileşendir. Deney TS EN 1744-1 standardı madde 15.1'e göre yapılmıştır.

6.5.1 Gerekli Malzemeler

Deney için gerekli malzemeler, %3'lük sodyum hidroksit çözeltisi, cam malzemeler, etüv ve elek (4 mm)'dir.

6.5.2 Deneyin Yapılışı

Deney numunesi Tepsiye etüvde $110\pm5^\circ\text{C}$ yerine $55\pm5^\circ\text{C}$ 'de kurutulur. Numune 4 mm göz açıklı elekten elenir ve elek üstünde kalan kısım alınarak, eleğin altına geçecek şekilde kırılır ve elek altına geçen önceki malzemeye birleştirilir.

Bir cam şişeye, 80 mm yüksekliğe kadar %3'lük NaOH çözeltisi konulur. Takiben çözelti ve agrega yüksekliği 120 mm oluncaya kadar deney numunesi parçası eklenir. Hava kabarcıklarının çıkması için şişe çalkalanır. Şişenin tapası kapatılır ve 1 dakika kuvvetli çalkalanır ve beklemeye bırakılır. 24 saat sonra, benzer şişeye de bulunan standart renk çözeltisi ile çözeltinin rengi mukayese edilir. Standart renk çözeltisi koyu kahve renkli bir çözeltidir.

Deney sonucu, çözeltinin renginin standart renkten açık veya koyu olması şeklinde belirtilir.

6.5.3 Deney Sonucu

Kardemir Demir Çelik fabrikası cürufu:

Oluşan renk standart renkten açıktır.

İskenderun Demir Çelik fabrikası cürufu:

Oluşan renk standart renkten açıktır.

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. Her iki cüruf malzemesi de humus içeriği bakımından uygun bulunmuştur.

6.6 Hafif Kirletici Miktarı Tayini

Bu deney, ince agregadaki hafif taneciklerin kütlece yüzdesini tahmin etmek için bir metottur. Metot, linyit ve kömür gibi, harç ve beton yüzeylerinde lekelenme ve çıkıntı yapabilen maddeleri tayin eder.

Gerekirse, metot büyük deney numunesi parçalarının kullanılmasıyla, iri agregaların kullanılmasına da uyarlanabilir. Deney, TS EN 1744-1 standardı madde 14.2'ye göre yapılır.

6.6.1 Gerekli Malzemeler

Deney için gerekli malzemeler, 0,300 mm kepçe elek, 2 gr/cm³ yoğunluğa sahip doygun çinko klorür çözeltisi, kaplar ve etüvdür.

6.6.2 Deneyin Yapılışı

Laboratuvar numunesindeki ince agreganın miktarı en az 5 kg olmalıdır. Bu, (350±5) g kütleinde bir deney numunesi parçası üretmek için azaltılmalıdır. Deney numunesi parçası bir tepsi üzerine yayılır ve 110±5°C'deki etüve konur. Kuru kumun (m₂) kütlesi 0,1 g yaklaşımla kaydedilir. Agregası 300 µm göz açıklıklı eleklerle daha ince olan kısımdan ayrılır.

Yaklaşık 1 L çinko klorür çözeltisi veya sodyum politungstat 2 litrelik behere boşaltılır ve çözeltinin içine agregası ilâve edilir. Agregası yığını bir cam çubukla hafifçe karıştırılır. Bu, hafif taneciklerin yığından ayrılarak çözeltinin yüzeyine çıkmasına yardım eder. Yüzen tanecikler

cam çubukla hafif karıştırılarak taneciklerden hava kabarcıkları ayrılması sağlanır. Bu taneciklerin agrega yığına batmasına yardımcı olur.

Çözeltilinin berraklaşan kısmı, ikinci bir 2 l'lik behere 250 µm göz açıklıklı elekten geçebilecek şekilde dekante edilir. Bunu yaparken, yüzen taneciklerin geçmesine ve elekte toplanmasına müsaade edilir. Eleğe hiç agrega geçmemesi sağlanır. İlk beherdeki çözeltiye dönülür ve agrega yığını tekrar karıştırılır. Hâlâ çözeltilide yüzen tanecikler varsa, tekrar elekten dekante edilerek geçirilir ve bu işlem, bütün yüzen tanecikler elekte toplanana kadar tekrarlanır.

Elek ve üzerindeki tanecikler, çinko klorür veya sodyum politungstat uzaklaştırılınca kadar su ile yıkanır. Elek ve içindekiler (40±5)°C'de (20±4) saat kurutulur. Sonra içindekiler hafif hafif vurularak bir buharlaştırma kapsülüne aktarılır ve kurutma (110±5)°C'de (4±0,25) saatte tamamlanır. Kapsül soğutulur ve hafif tanecikler (m₂), 0,1 g yaklaşımla tartılır.

Agregadaki hafif taneciklerin yüzdesi, m_{LPC} kütlece yüzde olarak (6.5) denkliği kullanılarak hesaplanır.

$$m_{LPC} = m_2/m_1 \times 100 (\%) \quad (6.5)$$

Burada;

m₁ : etüvde kurutulmuş deney numunesi parçasının kütlesi, g

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

6.6.3 Deney Sonucu

Kardemir Demir Çelik fabrikası cürufu:

m₂ : 0,009 g

m₁ : 350,4 g

Hafif kirletici miktarı : % 0,003

İskenderun Demir Çelik fabrikası cürufu:

m₂ : 0,011 g

m₁ : 350,8 g

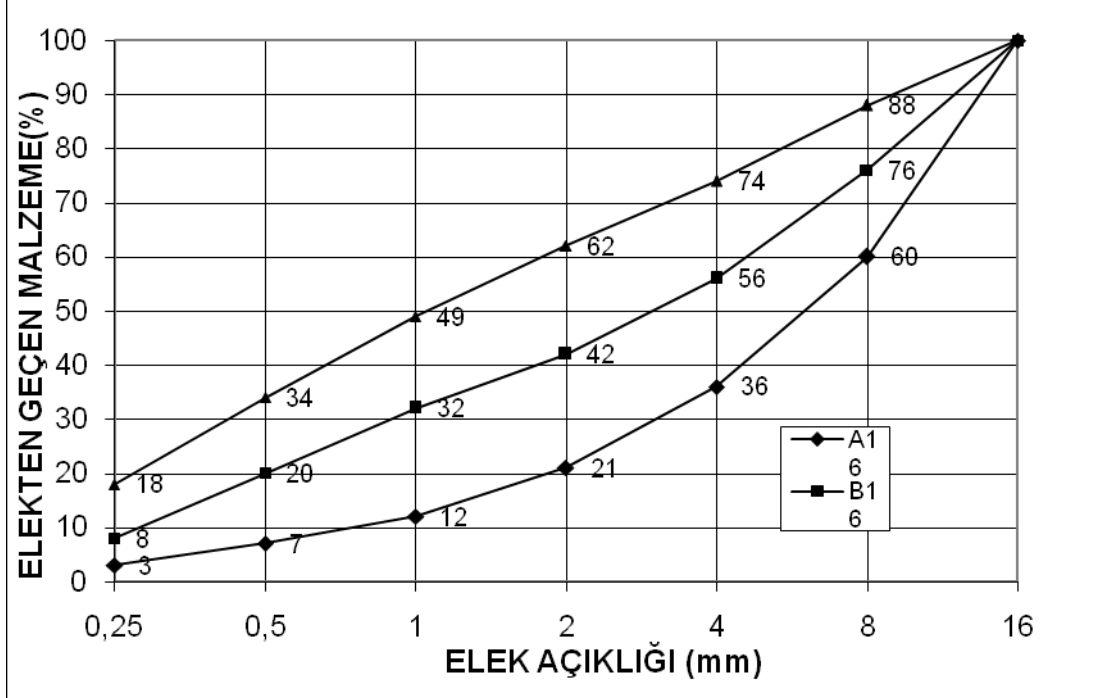
Hafif kirletici miktarı : % 0,003

TS 706 EN 12620 standardına göre hafif kirletici miktarı normal olarak ince agregalarda %0,5', iri agregalarda %0,1'i geçmemelidir. Ancak betonun yüzeyinin önemli olduğu durumlarda ince agreganın %0,25'ini ve iri agreganın %0,05'ini geçmemelidir. İri agregalar olarak kabul edilen alınan her iki cüruf malzemesinin de hafif kirletici miktarı sınır değerlerin altında bulunmuştur.

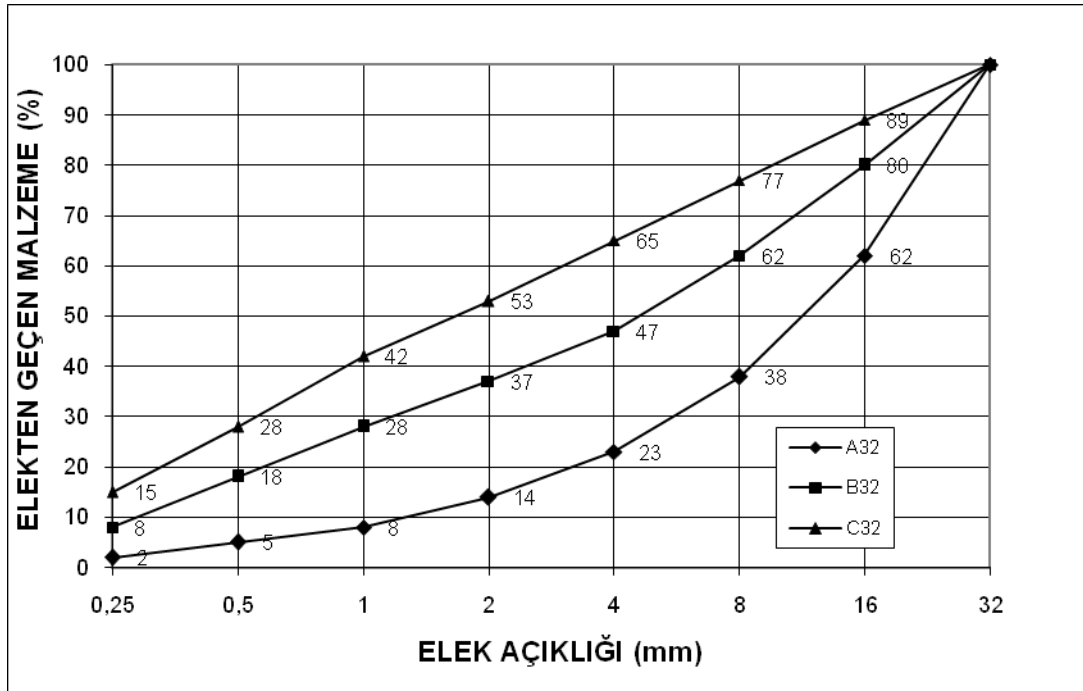
6.7 Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini (Granülometri, Elek Analizi)

Bir agregada belirli boyutlardaki tanelerin dağılımını gösteren eğriye granülometri eğrisi denilir. Agreganın granülometri eğrisi elek analizi deneyi ile belirlenir. TS 706 EN 12620 göz önüne alındığında elek analizi deneyinde kare 3 ayrı temel elek setinden elekler kullanılır. Bir agregaya yığını üzerinde elek analizi deneyinin nasıl yapılacağı TS EN 933-1 de belirtilmektedir.

Beton üretiminde kullanılacak karışım agregasının granülometrisi "ideal granülometri eğrileri" ile uyushmalı veya "ideal bölgeler" dediğimiz bölgeler içinde kalmalıdır. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de sırasıyla maksimum tane boyutu 16 mm ve 31.5 mm için ideal bölgeler gösterilmektedir.



Şekil 6.8 Referans granülometri eğrileri, Dmax=16 mm (Özkul, 1999)



Şekil 6.9 Referans granülometri eğrileri, Dmax=31.5 mm (Özkul, 1999)

Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'a bakıldığında, 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 kalmasının istenmesinin en önemli nedenlerden biri kompasesinin yüksek olmasıdır. Dolayısıyla kompasesi yükselen betonun dayanımı da büyük değer alacaktır. Diğer taraftan kompasesi yüksek agreganın kullanılmasıyla tanelerin, arasını doldurmak için daha az çimento gerekecek, böylece daha ekonomik beton üretilmiş olacaktır. Ancak, genellikle uygulamada kullanılan çimento hamurunun miktarı agrega tanelerinin arasındaki boşlukların hacminden daha büyük olmaktadır.



Şekil 6.10 0.25mm ile 31.5mm arası göz açıklıklı elekler



Şekil 6.11 Kare göz açıklıklı elekler

Agrega karışım granülometrisinin ideal bölge içinde kalmasıyla su yönünden de optimum bir çözüm sağlanmaktadır. Çünkü agreg a tanelerini ıslatmak için gerekli su agreganın

granülometrik bileşimiyle yakından ilişkilidir. Sonuçta ideal bölge koşulunu sağlayan granülometriye sahip bir agrega, işlenebilme yönünden de bir sorun yaratmayacaktır.

Bir agreganın granülometri eğrisi aşağıdaki özellikleri gösterir:

- 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 yığınının o iki elek arasında kalan malzeme % sini verir.
- Eğer eğride yatay bir çizgi varsa, bu yatay çizgiye karşı gelen elekler arasında tane yok demektir. Bu tür bir granülometriye sahip olan agregalara "kesikli (süreksiz)" granülometrilili agregalar denilir.

Bir beton üretiminde iri agreganın en büyük tane boyutunun (D_{maks}) seçimi de önemlidir. D_{maks} 'ı büyük agregada genel olarak iri taneler fazla miktarda bulunur. D_{maks} 'ı büyük agreganın kullanılması betonun kompaktitesini artırır. Aynı zamanda aynı işlenebilme için daha az su kullanılmasını olanaklı kılar. Böylece pratikte üretilen normal betonlar yüksek dayanımlı ve daha ekonomik olacaktır.

Ancak yapının donatı durumu D_{maks} 'ın büyük seçilmesini önleyebilir. Örneğin, elemanları küçük kesitli ve çok sık donatının kullanıldığı bir yapıda üretilen betonda D_{maks} 'ı küçük seçmek zorunlu olur. Bu nedenle bir beton üretilirken D_{maks} 'ın yapı koşullarının izin verdiği en büyük değerini almak gerekir.

6.7.1 Gerekli Malzemeler

Deney için gerekli malzemeler, deney elekleri, tava, etüv, terazi ve yıkama ekipmanıdır.

6.7.2 Deneyin Yapılışı

Deney kısmı, $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ 'de sıcaklıkta sabit kütleye kadar kurutulur. Soğumaya bırakılır, tartılır ve kütlesi M_1 olarak kayıt edilir.

Deney kısmı bir kaba yerleştirilir ve üzeri örtölünceye kadar yeterli miktarda su ilave edilir. 63 µm göz açıklıklı eleğin üzerinde kalan malzeme 1 saat'lik aralıklarla birbirini takip eden iki tartım arasındaki kütle farkı $\pm \% 0,1$ 'de toleransla sabit oluncaya kadar (110 ± 5) C'da kurutulur, daha sonra soğutulur, tartılır ve kütlesi M_2 olarak kaydedilir.

Yıkanmış ve kurutulmuş malzeme (veya doğrudan kuru numune) elek takımına dökülür. Elek takımı, yukarıdan aşağıya elek göz açıklıkları düzenli bir biçimde azalacak şekilde birbirine geçirilmiş ve düzenlenmiş elekler, tava ve kapaktan ibarettir.

Tava ve kapak kullanılarak malzeme kaybına meydan vermeden elek takımı el veya makina ile sarsılır. Daha sonra sırayla büyük göz açıklıklı elekten başlamak üzere altına tava ve üzerine kapak konularak her bir elek takımdan ayrılarak, elle tek tek eleme işlemine devam edilir.

Her eleği geçen malzeme elek setinde bulunan bir sonraki elek üzerine konularak işleme devam edilir.

En büyük göz açıklığına sahip elek üzerinde kalan fraksiyon tartılır, kütlesi $\% 1$ hassasiyette R_1 olarak kayıt edilir.

Altındaki elekte kalan fraksiyon için aynı işleme devam edilir. Bu fraksiyon kütlesi R_2 olarak kayıt edilir. Elek takımındaki bütün eleklerde aynı işleme devam edilerek her bir elek fraksiyonunun kütlesini $R_3, R_4 \dots R_i$ olarak tartma işlemine devam edilir. Tavada elenmiş fraksiyon varsa tartılır ve kütlesi P olarak kayıt edilir.

Değişik kütleler eleme deney formuna kayıt edilir. Bunun için bir örnek Ek C'de verilmiştir. Her bir elek fraksiyonunun kütlesi (R_i), orijinal kuru kütlenin (M_1) yüzdesi olarak hesaplanır. 63 mikrometreye kadar her bir elekten geçen orijinal kuru kütlenin kümülatif yüzdesi hesaplanır.

6.7.3 Deney Sonucu

Kardemir Demir Çelik Fabrikasından elde edilen cüruf malzemesinin elek analizi sonuçları Çizelge 6.1'deki gibidir.

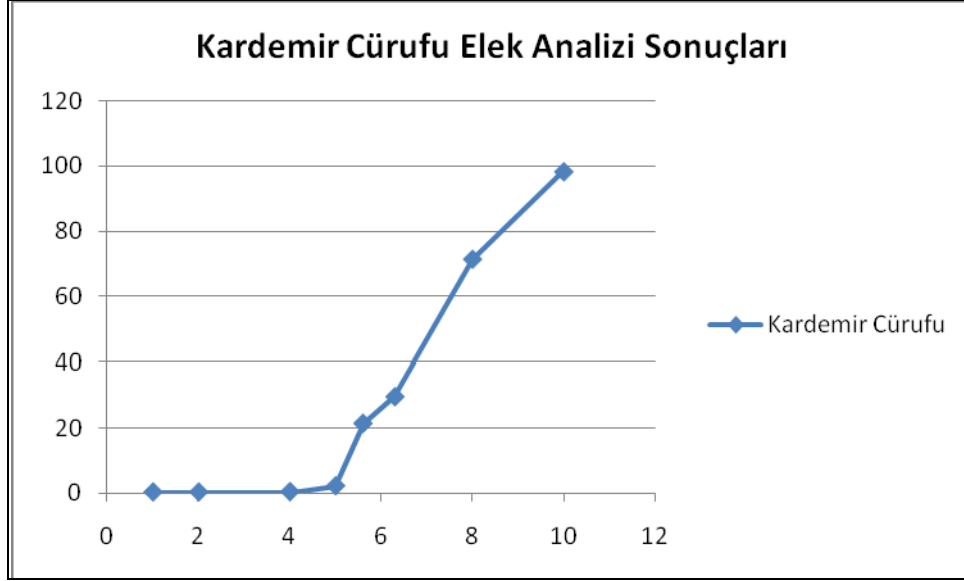
Çizelge 6.1 Kardemir Demir Çelik Fabrikası cürufu elek analizi sonucu

Elek (mm)	Elek Üzerinde Kalan Ağırlık(g)	Elek Üzerinde Kalan Toplam Ağırlık(g)	Elek Üzerinde Kalan Toplam Ağırlık (%)	Elek Altında Kalan (%)
1	2	(3)=Σ(2)	4=(3)/M ₁	(5)=100-(4)
31,5	-	-	-	-
25	-	-	-	-
22,4	-	-	-	-
20	-	-	-	-
16	-	-	-	-
12,5	-	-	-	-
11,2	-	-	-	-
10	16,1	16,1	1,6	98,4
8	269,4	285,5	28,5	71,5
6,3	418,5	704,0	70,4	29,6
5,6	82,2	786,2	78,6	21,4
5	192,1	978,3	97,8	2,2
4	17,4	995,7	99,6	0,4
2	1,6	997,3	99,7	0,3
1	0,2	997,5	99,7	0,3
0,5	-	-	-	-
0,25	-	-	-	-
0,125	-	-	-	-
0,063	-	-	-	-

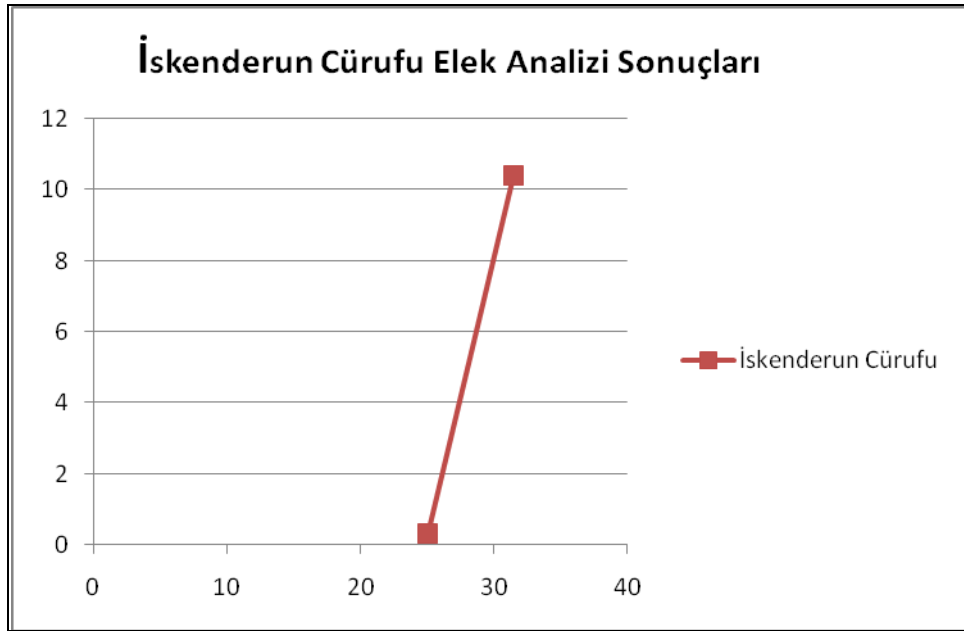
İskenderun Demir Çelik Fabrikası'ndan elde edilen cüruf malzemesinin elek analizi sonuçları Çizelge 6.2. deki gibidir.

Çizelge 6.2 İ.D.Ç.F. demir çelik fabrikası elek analizi sonucu

Elek (mm)	Elek Üzerinde Kalan Ağırlık(g)	Elek Üzerinde Kalan Toplam Ağırlık(g)	Elek Üzerinde Kalan Toplam Ağırlık (%)	Elek Altında Kalan (%)
1	2	(3)=Σ(2)	4=(3)/M ₁	(5)=100-(4)
31,5	895,7	895,7	89,6	10,4
25	100,9	996,6	99,7	0,3
22,4	-	-	-	-
20	-	-	-	-
16	-	-	-	-
12,5	-	-	-	-
11,2	-	-	-	-
10	-	-	-	-
8	-	-	-	-
6,3	-	-	-	-
5,6	-	-	-	-
5	-	-	-	-
4	-	-	-	-
2	-	-	-	-
1	-	-	-	-
0,5	-	-	-	-
0,25	-	-	-	-
0,125	-	-	-	-
0,063	-	-	-	-



Şekil 6.12 K.D.Ç.F. cürufu elek analizi grafiği



Şekil 6.13 İ.D.Ç.F. cürufu elek analizi grafiği

Şekil 6.10 ve Şekil 6.11 referans granulometri eğrisi betonda kullanılan toplam agrega miktarına göre 0-31,5 mm arasında malzemelere göre hazırlanmıştır. Şekil 6.12’de Kardemir Demir Çelik Fabrikasına ait cüruf malzemesinin betonda agrega olarak kullanılması için maks. 31,5 mm’ye göre referans granulometri eğrisi değerleri sağlanabilmektedir. Ancak İskenderun Demir Çelik Fabrikası cürufu, kırma ve eleme işlemlerinden geçirilmemiştir ve

malzeme boyutları maks 31,5 mm için referans granülometri eğrisine (Şekil 6.11) göre beton üretimine uygun değildir.

6.8 Yassılık İndeksi Deneyi

İri agregaların şekli, EN 933-3'te belirtilen yassılık indeksi cinsinden tayin edilmelidir. Yassılık indeksi, iri agregaların tane şeklinin tayininde referans deney olarak kullanılmalıdır. Yassılık indeksi, belirli bir uygulama veya nihai kullanıma göre, Çizelge 6.3'de belirtilen ilgili kategoriye göre beyan edilmelidir.

Çizelge 6.3 En büyük yassılık indeks değerlerine göre kategoriler (TS 706 EN 12620, 2000)

Yassılık İndeksi	Kategori FI
≤ 15	FI ₁₅
≤ 20	FI ₂₀
≤ 35	FI ₃₅
≤ 50	FI ₅₀
> 50	FI _{Beyan}
Serbest	FI _{NR}

6.8.1 Gerekli Malzemeler

Deney için gerekli malzemeler, elek seti (80-63-50-40-31,5-25-20-16-12.5-10-8-6.3 -5 ve 4 mm) , silindir çubuklu yassılık elekleri seti, terazi ve etüvdür. Şekil 6.14'de kullanılan silindir çubuklu yassılık elekleri gösterilmiştir.



Şekil 6.14 Silindir çubuklu yassılık elekleri

6.8.2 Deneyin Yapılışı

Deney kısmı $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$.da sabit kütleye gelinceye kadar kurutulur, soğutulur, tartılır ve kütlesi M_0 olarak kayıt edilir.

Deney kısmı, belirtilen elekler kullanılarak TS 3530 EN 933-1'e uygun olarak elenir. 4 mm'lik elekten geçen ve en büyük elekte kalan taneler tartılır ve işlem dışı bırakılır. Elekler arasındaki her tane büyüklüğü fraksiyonu d_i/D_i deki bütün taneler tartılır ve ayrı ayrı muhafaza edilir.

Elde edilen her tane büyüklüğü fraksiyonu d_i/D_i uygun çubuklu elekten elenir. Bu eleme işlemi elle gerçekleştirilmeli ve elek üzerinde kalan malzemenin kütlesi 1 dakikalık eleme işlemi sonrasında % 1'den daha fazla değişmiyorsa işlem tamamlanmış olarak kabul edilmelidir. Çubuklu elekten geçen her tane büyüklüğü fraksiyonundaki malzeme tartılır. Toplam yassılık indeksi (FI), (6.6) denkliği kullanılarak hesaplanır.

$$FI = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad (6.6)$$

Burada;

M_1 : Her tane büyüklüğü fraksiyonundaki tanelerin toplam kütlesi, g

M_2 : Her tane büyüklüğü fraksiyonunun çubuklar arası açıklığı $D_i/2$ olan çubuklu eleklerden geçen tanelerinin toplam kütlesi, g

6.8.3 Deney Sonucu

Kardemir Demir Çelik Fabrikası'na ait cürufun yassılık indeksi deney sonucu Çizelge 6.4'de verilmiştir.

Çizelge 6.4 K.D.Ç.F cürufu yassılık indeksi sonucu

Tane Büyüklüğü (D-d)mm	Elek arası numune kütlesi (gr) R _i	Çubuklu elek açıklığı (mm)	Çubuklu elekten geçen malzeme kütlesi(gr)m _i	Kısmi yassılık indeksi F _i = (m _i /R _i)
25-31,5	-	16	-	-
20-25	-	12,5	-	-
16-20	-	10	-	-
12,5-16	-	8	-	-
10-12,5	16,1	6,3	3,3	0,2
8-10	269,4	5	28,8	0,107
6,3-8	418,5	4	27,1	0,065
5-6,3	274,3	3,15	17,3	0,063
4-5	17,4	2,5	1,4	0,08
M ₁ =ΣR _i = 995,7		M ₂ =Σm _i = 77,9		
FI= [M ₂ / M ₁]*100= %7,8				

İskerderun cürufu malzemesi boyutları maksimum tane büyüklüğü 31,5 mm'den büyük olduğu için yassılık indeksi deneyi yapılamamıştır. Kardemir Demir Çelik fabrikası cürufu TS 706 EN 12620 standardına göre FI_{15} kategorisine girmektedir.

6.9 Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranı Tayini

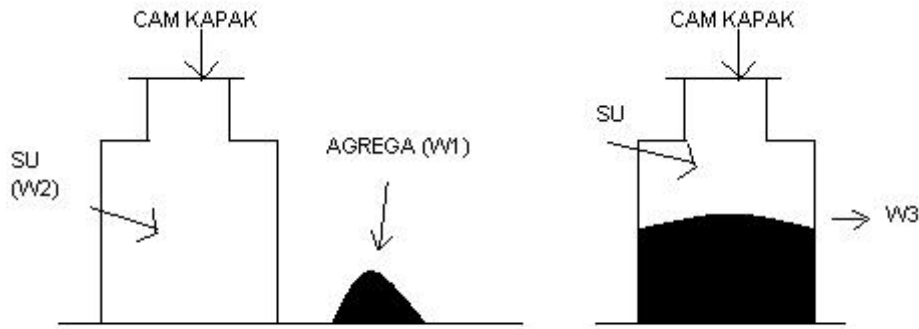
Özgöl ağırlık, agregatanelerinin işgal ettiği mutlak birim hacmin ağırlığıdır. Bu değerin hesabında taneler arasındaki boşluk dikkate alınmaz. Deney TS EN 1097-6 deney standardına göre yapılır.

6.9.1 Gerekli Malzemeler

Deney için gerekli malzemeler, terazi, su banyosu, etüv, deney elekleri, tepsiler, kuru yumuşak bezler, yıkama donanımı ve kronometredir.

6.9.2 Deneyin Yapılışı

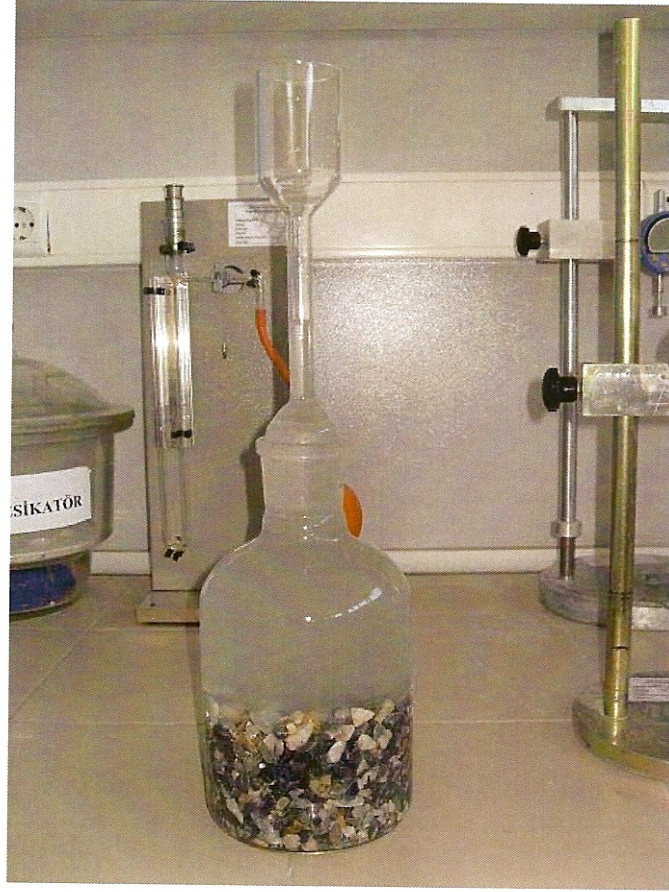
Şekil 6.15'de bir agregaya ait özgül ağırlığının belirlenme yöntemi gösterilmiştir. A şeklinde agregat deney numunesi ile ağzı cam kapakla kapatılmış içi su dolu ölçü kabı birlikte tartılmaktadır. B şeklinde ise agregat numunesi ölçü kabı içine konulduktan sonra tartı yapılmaktadır.



Şekil 6.15 Özgül ağırlığın belirlenmesi (Özkul, 1999)

İki tartı arasındaki fark ölçü kabından taşan suyun ağırlığını yani agregat deney numunesinin tanelerinin toplam hacmini verir. Bu durumda özgül ağırlık (6.7) denkliği kullanılarak hesaplanır.

Şekil 6.16'da tane yoğunluğuna bakılan kırma taş numunesi gösterilmiştir.



Şekil 6.16 Tane yoğunluğu ve su emme oranı deneyi düzeneği

$$\delta_a = w_1 / (w_1 + w_2 - w_3) \quad (6.7)$$

Burada,

δ_a = Agreganın özgül ağırlığı

w_1 = Numune ağırlığı

w_2 : Su ile dolu ölçü kabı ağırlığı

w_3 = İçine numune konmuş, su dolu kabın ağırlığıdır.

Su yoğunluğunun hesaba katılması ile (6.8), (6.9), (6.10), (6.11) formülleri elde edilir.

$$\text{Görünür Yoğunluk} = Bx[M_4 / (M_4 - (M_2 - M_3))] \quad (6.8)$$

$$\text{Kuru Yoğunluk} = Bx[M_4 / (M_1 - (M_2 - M_3))] \quad (6.9)$$

$$\text{YKSD* Yoğunluk} = Bx[M_1 / (M_1 - (M_2 - M_3))] \quad (6.10)$$

$$\text{Su Emme \% si} = 100 \times (M_1 - M_4) / M_4 \quad (6.11)$$

Burada;

B : suyun yoğunluğu

M₃ : piknometre+su ağırlığı

M₂ : Piknometre+su +YKSD malzeme ağırlığı

M₁ : YKSD malzeme ağırlığı

M₄ : Kuru malzeme ağırlığı

Normal beton agregalarının özgül ağırlığı genellikle 2.50 - 2.90 kg/dm³ değerleri arasındadır.

Beton karışım hesabını yapabilmek için üretimde kullanılacak agregaların özgül ağırlıklarını bilmek gerekir. Öte yandan bir agreganın özgül ağırlığı, malzemenin cinsine bağlıdır.

6.9.3 Deney Sonucu

Çizelge 6.5 K.D.Ç.F. ait cürufun birim ağırlığı

Piknometre+Su Ağırlığı	M ₃	2764,1	2764,1
Piknometre+Su +YKSD malzeme ağırlığı	M ₂	3820,5	4035,5
YKSD malzeme ağırlığı	M ₁	1516,7	1820,5
Kuru malzeme ağırlığı	M ₄	1472,2	1772,8
B (suyun yoğunluğu)		0,9982	0,9982
Görünür Yoğunluk	$B \times [M_4 / (M_4 - (M_2 - M_3))]$	3,53	3,53
Kuru Yoğunluk	$B \times [M_4 / (M_1 - (M_2 - M_3))]$	3,20	3,22
YKSD Yoğunluk	$B \times [M_1 / (M_1 - (M_2 - M_3))]$	3,30	3,30
Su Emme % si	$100 \times (M_1 - M_4) / M_4$	3,0	2,7

Çizelge 6.6 İ.D.Ç.F. cürufu birim ağırlığı

Piknometre+Su Ağırlığı	M_3	2764,1
Piknometre+Su +YKSD malzeme ağırlığı	M_2	3244,7
YKSD malzeme ağırlığı	M_1	778,6
Kuru malzeme ağırlığı	M_4	770,9
B		0,9982
Görünür Yoğunluk	$Bx[M_4/[M_4 - (M_2 - M_3)]]$	2,65
Kuru Yoğunluk	$Bx[M_4/[M_1 - (M_2 - M_3)]]$	2,58
YKSD Yoğunluk	$Bx[M_1/[M_1 - (M_2 - M_3)]]$	2,61
Su Emme % si	$100 \times (M_1 - M_4) / M_4$	1,0

Kardemir Demir Çelik Fabrikası'na ait cüruf malzemesinin görünür yoğunluğu 3.53 Mg/m^3 ve İskenderun Demir Çelik Fabrikası'na ait cüruf malzemesinin görünür yoğunluğu 2.65 Mg/m^3 bulunmuştur. TS 706 EN 12620 standardı birim ağırlığı 2 Mg/m^3 'den fazla olan agregaları kapsamaktadır. Yoğunluk değerinin fazla olması üretilen betonun da birim ağırlığını artıracaktır. İskenderun ve Kardemir fabrikalarından alınmış cüruf malzemeleri arasındaki yoğunluk farkı cürufların üretim prosesleri arasındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Kardemir Demir Çelik fabrikası cüruf atığını üretimin ardından kırma ve eleme tesisleri ile işlemektedir.

6.10 XRF ve XRD Deneyleri

Kullanılan cüruf malzemelerinin kimyasal içeriklerinin belirlenmesi ve tanımlamalarının yapılması için XRF ve XRD cihazları kullanılarak deneyler yapılmıştır.

XRF cihazı olarak Panalytical marka Minipal 4 modeli cihaz kullanılmıştır.

XRF cihazı ile toz malzemeler içeriğindeki kimyasal bileşim oksitleri halinde kütlece % olarak bulunabilir. Deneyin yapılabilmesi için toz malzemelerin kırma ve öğütme cihazı ile malzeme boyutlarının çok ince hale getirilmesi ve baskı cihazı ile peletlenmesi gerekir. Bunun

için Kardemir Demir elik fabrikasından alınmış cüruf malzemesi öncelikle toz malzeme haline getirilmiş ve kırma ve öğütme cihazında peletleme için uygun hale getirilmiştir. Peletlenmiş Kardemir Demir elik fabrikası cüruf malzemesinin XRF deney sonuçları izelge 6.7’de verilmiştir.

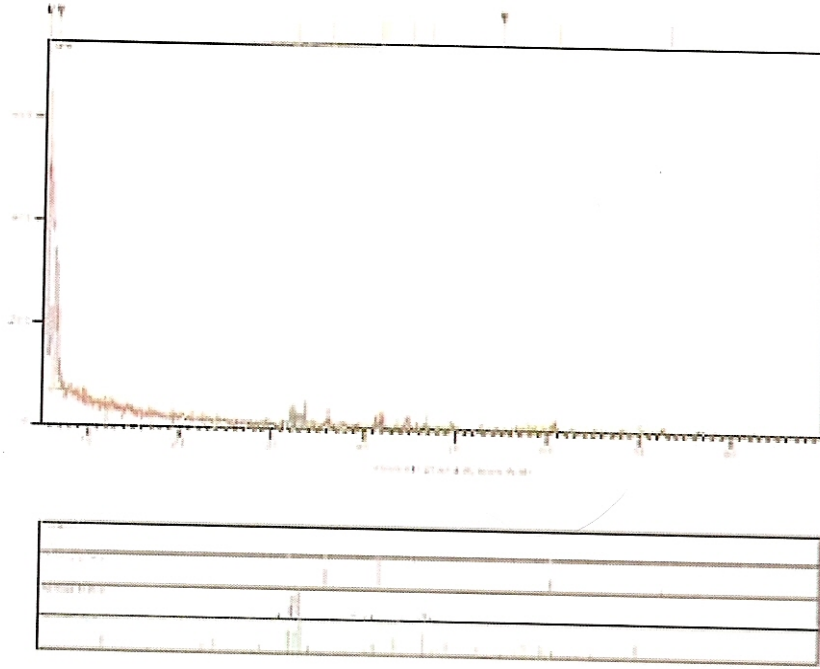
XRD cihazı olarak Xpert Pro Philips XRD cihazı kullanılmıştır.

XRD cihazı ile toz malzemelerin içeriğinde bağlı yapıda bulunan kimyasal bileşenler belirlenebilir. XRD deneyi sonucu oluşan pikler bilgisayar programında tanımlanmış kimyasal bileşenlere göre kıyaslanır ve piklere karşılık malzemenin içeriğinde bulunan yapılar belirlenir. Bu amaçla Kardemir Demir elik fabrikası cüruf malzemesi toz haline getirilmiş ve öğütülmüştür. Kardemir cürufuna ait XRD deney sonuçları Şekil 6.17’de belirtilmiştir.

İskenderun’dan alınmış cüruf malzemesine, malzemenin sertliği nedeni ile istenilen boyutlara kırılmamasından dolayı XRF ve XRD deneyleri yapılamamıştır.

Çizelge 6.7 Kardemir demir elik fabrikasına ait cürufun XRF sonuçları

Bileşen	%
MgO	1,3
Al ₂ O ₃	1,4
SiO ₂	11,8
SO ₃	0,16
CaO	35,38
TiO ₂	0,28
MnO	3,05
Fe ₂ O ₃	46,6



Pattern List

Ref.Code	Compound Name	Chem. Formula	Score	Scale Fac.
01-073-2143	Iron Oxide	Fe ₂ O ₃	63	0.050
00-033-0303	Calcium Silicate	Ca ₂ Si O ₄	12	0.033
00-011-0675	Calcium Iron Oxide	Ca ₂ Fe ₂ O ₅	15	0.057

Candidate List

Ref.Code	Compound Name	Chem. Formula	Score	Scale Fac.
01-060-2464	Zeolite Y	Yb15.94 Na10.18 (..	50	0.412
01-074-2368	Lead Titanium Sulf..	Pb1.18 S5.18 Ti2	50	0.828
00-050-2192	Chitopentaoose capr..	C200 H363 N5 O38	50	6.811
00-046-1603	cetyltrimethylammo..	C19 H42 Br N	48	10.375
00-050-0511	Silicon Oxide	Si O ₂	47	20.153
01-084-0582	Silver Aluminum Si..	Ag55.4 Al55.5 Si13..	42	0.492
00-051-1592	Silicon Oxide	Si O ₂	42	15.464
01-084-0580	Silver Aluminum Si..	Ag54.5 Al55.5 Si13..	41	0.412
00-049-0931	Hydrogen Aluminum ..	H Al Si289 O580	41	16.357
01-074-2394	Faujasite-Na	Na18.24 Ca11.74 Ca..	40	0.412
01-084-0581	Silver Aluminum Si..	Ag63.7 Al63.7 Si12..	40	0.495
01-089-2109	Vermiculite (C6 H1..	(Mg2.36 Fe.48 Al...	39	0.992
01-079-1885	Zeolite X	Ag82.40 Si96 Al96 ..	38	0.506
00-050-2191	Chitotetraose stea..	C276 H522 N4 O31	38	2.024
00-041-1883	Di-(SGM-hydroxo)bi..	C36 H70 Ce2 O26 S4	37	0.946
00-049-0932	Silicon Titanium O..	Si11.4 Ti O24.8	37	21.015
01-084-0584	Faujasite (Ag-exch..	Ag50.8 Al55.5 Si13..	37	0.495
01-089-6297	Zeolite X (Cd, (Na2..	Cd57.3 (O H)22.6..	36	0.498
01-084-0586	Faujasite (Ag-exch..	Ag79.7 Al86 Si106 ..	33	0.506
01-073-2313	Faujasite high sil..	Al60.352 Si139 O37..	31	0.403

Şekil 6.17 Kardemir Cürufu XRD deney sonucu

Kardemir Demir Çelik Fabrikası cürufunun XRF ve XRD deney sonuçlarına göre cüruf malzemesi yüksek oranda demir, kalsiyum ve silisyum içermektedir. Ayrıca bileşiminde düşük oranlarda magnezyum, alüminyum, mangan ve titanyum ve sülfat bulunmaktadır. Ana

bileşenler olan demir oksit, kalsiyum oksit ve silisyum dioksit, XRD deney sonuçlarına göre, demir oksit halinde olduğu gibi kalsiyuma bağlı silikatlar ve kalsiyuma bağlı demir oksitler halindedir. Bu bileşenlere ise beton üretiminde ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca demirin sert yapısından dolayı beton üretiminde dayanım performanslarının yüksek çıkması beklenir.

7. BETON ÜRETİMİ

Beton üretimi, Kardemir Demir Çelik Fabrikası'na ait demir cürufu malzemesi kullanılarak Karabük – Safranbolu Güzay Beton firmasında yapılmıştır.

Uçucu kül, kimyasal katkı, çimento, 1 numara kırma taş, 2 numara kırma taş ve doğal kum malzemeleri kullanılarak beton üretimi yapılmıştır. Aynı malzemeler aynı miktarlarda ancak doğal kırma taş malzemeleri yerine cüruf malzemesi kullanılarak işlemler tekrarlanmış ve karşılaştırma yapılmıştır.

7.1 Kullanılan Malzemeler

7.1.1 Uçucu Kül

Deney sonuçları Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2'deki gibidir.

Çizelge 7.1 Uçucu kül mekanik ve fiziksel deneyler raporu

Deney Adı	Standard	Sonuç	Kategori
Tane yoğunluğu	TS EN 196-6:2000 TS EN 450-1:2006	1,90 Mg/m ³	-
İncelik tayini yaş eleme metodu (45µ)	TS EN 451-2:2000 TS EN 450-1:2006	% 51,7	-

Çizelge 7.2 Uçucu kül kimyasal analiz raporu

Deney Adı	Standard	Sonuç	Kategori
Klorür Tayini (% Cl)	TS EN 196-21:2002 TS EN 450-1:2006	% 0,007	-
Kükürt trioksit tayini (Sülfat miktarı) (% SO ₃)	TS EN 196-2:2002 TS EN 450-1:2006	% 0,36	-
Serbest kireç tayini (%CaO)	TS EN 451-1:2000 TS EN 450-1:2006	% 0,054	-
Kızdırma kaybı (%)	TS EN 196-2:2002 TS EN 450-1:2006	% 0,62	Kategori A

7.1.2 Çimento

Beton üretiminde Karçimsa firmasına CEM II/A-S 42,5 N çimento kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal analiz sonuçları Çizelge 7.3 ve Çizelge 7.4'deki gibidir.

Çizelge 7.3 Çimento kimyasal analizi (Karçimsa Deney Raporu, 2008)

Kimyasal Analiz	Standart Değeri (TS EN 197-1)	Analiz Sonuçları
Kükürt Trioksit (% SO ₃)	≤ 3,5	2,43
Klorür (% Cl)	≤ 0,1	0,0177

Çizelge 7.4. Çimento fiziksel analizi (Karçimsa Deney Raporu, 2008)

Fiziksel Deneyler	Standart Değeri (TS EN 197-1)	Analiz Sonuçları
Priz Süresi Başlangıç (Saat – dk)	≥ 1:00	02:55
Priz Süresi Son (Saat – dk)		03:45
Toplam Hacim Genleşmesi (mm) (La Chatelier Deneyi)	≤ 10	0,0
Özgül Yüzey (cm ² /gr)		4651
Basınç Mukavemeti – 2 gün (MPa)	≥ 10	20,2
Basınç Mukavemeti – 28 gün (MPa)	42,5-62,5	49,3

7.1.3 Kimyasal Katkı

Kimyasal katkı olarak Sikament MR 50 W orta akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır. Kullanılan kimyasal katkının analiz raporu Çizelge 7.5'deki gibidir.

Çizelge 7.5 Kimyasal katkı analizi (Sika Deney Raporu, 2008)

Özellik	Test Metodu	Sonuçlar	Standart Değerler	EN 934 – 2’nin standart değerleri
Homojenlik	Görsel	Homojen	Homojen	Kullanıldığında homojen. Ayırışma üretici tarafından beyan edilen değeri aşmamalıdır.
Renk	Görsel	Kahverengi	Kahverengi	Üretim ve üreticinin verdiği tarife uygun
Bağıl yoğunluk	ISO 758	1,1781	1,16-1,20	$d > 1,1$ ise, $d \pm 0,03$, $d < 1,1$ ise $d \pm 0,02$ (d üreticinin beyan ettiği yoğunluk değeri)
Katı madde muhtevası (%)	EN 480-8	35,12	33,4 -37,0	$T > \%20$ için, $0,95T < X < 1,05T$, $T < \%20$ için, $0,90T < X < 1,10T$, T, üreticinin beyan ettiği değer, X: deney sonucu
pH (%10’luk çözelti)	TS 6365 EN 1262	8,44	7-11	Üreticinin beyan ettiği değer ± 1 veya üreticinin beyan ettiği aralık içinde
Suda Çözünebilir klorür içeriği (%)	EN 480-10	0,0771	Maks 0.1	Kütlece en çok %0,1
Alkali Yüzdesi	EN 480-12	2,79	Maks 4,00	Üreticinin beyan ettiği en yüksek değer altında

7.1.4 Kırma taş (1 no ve 2 no)

Çizelge 7.6'da yassılık indeksi deney sonuçları, Çizelge 7.7'de alkali silika reaktifliği deney sonuçları, Çizelge 7.8'de kuruma çekmesi deney sonuçları ve Çizelge 7.9'da kimyasal analiz sonuçları verilmiştir.

Çizelge 7.6 Kırma taş 1 ve 2 numaralı agregaların yassılık indeksi sonuçları

Deney Adı	Numune Tanımı	Standard	Sonuç	Kategori
Yassılık İndeksi	4-11,2 mm kırma taş agregası	TS EN 933-3 : 1999	% 13,2	FI ₁₅
Yassılık İndeksi	8-22 mm kırma taş agregası	TS EN 933-3 : 1999	% 13,8	FI ₁₅

Alkali Silika Reaktifliği

Alkali silika reaktifliği, agregalardaki aktif silis ile çimento, beton karma suları ve kimyasal katkılardan gelen sodyum ve potasyumun reaksiyonuna denir. Bu reaksiyon zamanla ortaya çıkar ve betonun genişip çatlamasına sebep olur. Bu sebeple hem agregaların alkali silir reaksiyonu açısından tehlikeli olup olmadığının deneyinin yapılması hem de çimento, beton karma suları ve kimyasal katkıların toplam alkali miktarlarının deneylerinin yapılması gerekmektedir. Alkali silis reaktifliği ölçümü için genel olarak 2 temel deney metodu vardır. Bunlar fiziksel ve kimyasal olarak ölçülür. Kimyasal metot agrega içindeki aktif silisi ve alkalinite düşmeyi esas alarak ASTM C 289 standardına göre yapılır. Fiziksel metotta ise agrega kullanılarak harç çubukları hazırlanır. Bu harç çubukları 15 gün 1M NaOH çözeltisi içerisinde 80⁰C'de bekletilir. Referans çubukları ile komperatör saati kullanılarak boy uzamaları ölçülür.

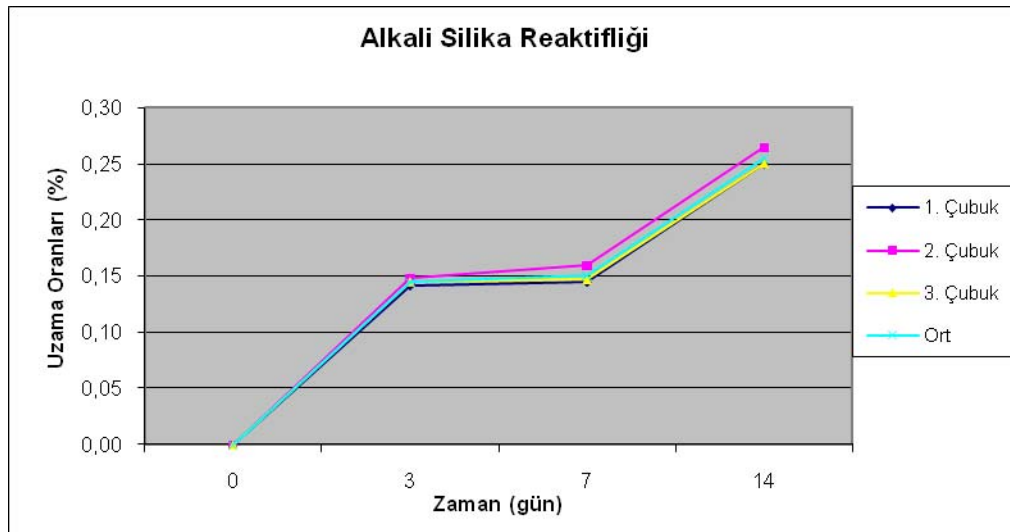
İlgili Standard : ASTM C 1260-07

Numune Tanımı : 0-4 mm agrega

Çimento Alkali Miktarı : %0,52

Çizelge 7.7 Kırma kum numunesinin alkali silika reaktifliği boy uzaması sonuçları

Zaman (Gün)	1.Çubuk Uzama Oranı (%)	2.Çubuk Uzama Oranı (%)	3.Çubuk Uzama Oranı (%)	Ortalama Uzama Oranı (%)
3	0,14	0,15	0,15	0,14
7	0,14	0,16	0,15	0,15
14	0,25	0,26	0,25	0,25



Şekil 7.1 Kırma kum alkali silika reaktifliği uzama oranı – gün grafiği

Kuruma Çekmesi Deneyi

İlgili Standard : TS EN 1367-4:1999

Numune Tanımı : 0-4 mm , 4-11,2 mm , 8-22 mm kırma taş agregası

Çizelge 7.8 Kırma kum numunesinin kuruma çekmesi deneyi sonuçları

Numune No	Kuruma Çekmesi (%)
1	0,015
2	0,013
3	0,014
Ort	0,014

Çizelge 7.9 Kırma kum numunesi kimyasal analiz sonuçları

Deney Adı	Numune Tanımı	Standard	Sonuç	Kategori
Asitte çözünebilen sülfat içeriği (% SO ₃)	0-4 mm kırma taş agregası	TS EN 1744-1:2000	0,032 (% SO ₃)	AS _{0,2}
Suda çözünebilir klorür tuzları (% Cl ⁻)	0-4 mm kırma taş agregası	TS EN 1744-1:2000	0,002 (% Cl ⁻)	-
Magnezyum Sülfat Deneyi (Donma Çözünme Deneyi)	8-22 mm kırma taş agregası	TS EN 1367-2:1999	1,8 (%)	MS ₁₈
Magnezyum Sülfat Deneyi (Donma Çözünme Deneyi)	4-11,2 mm kırma taş agregası	TS EN 1367-2:1999	3,3 (%)	MS ₁₈

7.1.5 Doğal Kum

Çizelge 7.10’da alkali silika reaktifliği deney sonuçları, Çizelge 7.11’de kimyasal analiz sonuçları verilmiştir.

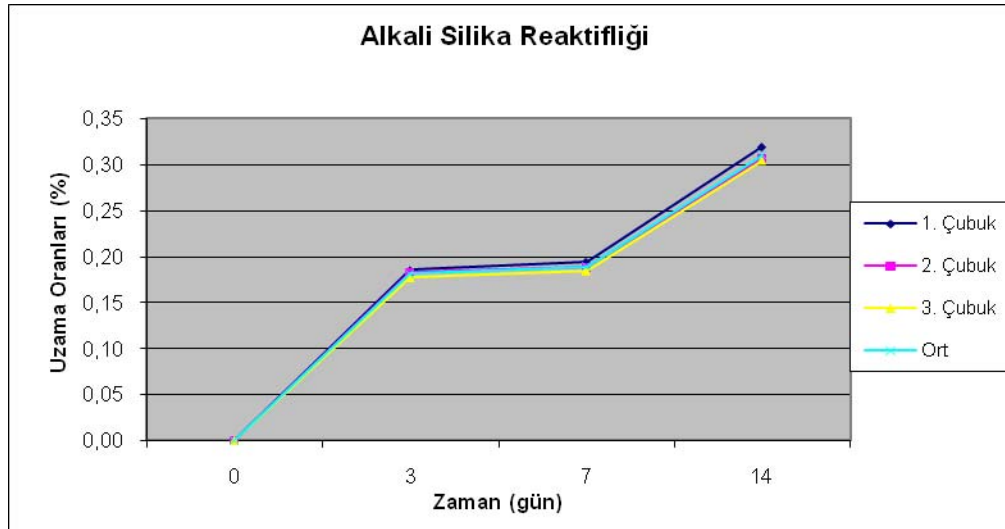
İlgili Standard : ASTM C 1260-07

Numune Tanımı : 0-4 mm agrega

Çimento Alkali Miktarı : % 0,52

Çizelge 7.10 Doğal kum malzemesi alkali silika reaktifliği boy uzaması sonuçları

Zaman (Gün)	1.Çubuk Uzama Oranı (%)	2.Çubuk Uzama Oranı (%)	3.Çubuk Uzama Oranı (%)	Ortalama Uzama Oranı (%)
3	0,18	0,18	0,18	0,18
7	0,19	0,19	0,18	0,19
14	0,32	0,31	0,30	0,31



Şekil 7.2 Doğal kum alkali silika reaktifliği uzama oranı – gün grafiği

Çizelge 7.11 Doğal kum malzemesi kimyasal analiz sonuçları

Deney Adı	Numune Tanımı	Standard	Sonuç	Kategori
Asitte çözünebilen sülfat içeriği (% SO ₃)	0-4 mm kırma taş agregası	TS EN 1744-1:2000	0,076 (% SO ₃)	AS _{0,2}
Suda çözünebilir klorür tuzları (% Cl ⁻)	0-4 mm kırma taş agregası	TS EN 1744-1:2000	0,0005 (% Cl ⁻)	-
Magnezyum Sülfat Deneyi (Donma Çözünme Deneyi)	4-11,2 mm , 8-22 mm kırma taş agregası	TS EN 1367-2:1999	2,6 (%)	MS ₁₈

7.1.6 Beton Karma Suyu

Deney sonuçları Çizelge 7.12’de belirtilmiştir.

Çizelge 7.12 Beton karma suyu analiz raporu

Deney Adı	Numune Tanımı	Standard	Sonuç
Sülfat Muhtevası (SO_4^{2-})	Beton Karma Suyu	EPA 9038 : 1986	85 ppm (mg/L)
Klorür Muhtevası (Cl^-)	Beton Karma Suyu	TS EN 196-21 : 2002 Bölüm : 4	18 ppm (mg/L)
Sodyum Oksit (Na_2O) Miktarı	Beton Karma Suyu	TS EN 196-21 : 2002 Bölüm : 7	245 ppm (mg/L)
Potasyum Oksit (K_2O) Miktarı	Beton Karma Suyu	TS EN 196-21 : 2002 Bölüm : 7	7 ppm (mg/L)
Toplam Alkali Muhtevası	Beton Karma Suyu	TS EN 196-21 : 2002 Bölüm : 7	250 ppm (mg/L)
pH değeri	Beton Karma Suyu	TS EN 1008 : 2003 Bölüm 6.1.1	8,1
Koku	Beton Karma Suyu	TS EN 1008 : 2003 Bölüm 6.1.1	Yok
Renk	Beton Karma Suyu	TS EN 1008 : 2003 Bölüm 6.1.1	Berrak
Askıda Katı Madde İçeriği	Beton Karma Suyu	TS EN 1008 : 2003 Bölüm 6.1.1	<4 ml (çökelti miktarı 4ml’den azdır.)
Deterjanlar	Beton Karma Suyu	TS EN 1008 : 2003 Bölüm 6.1.1	Yok
Sıvı ve Katı Yağlar	Beton Karma Suyu	TS EN 1008 : 2003 Bölüm 6.1.2	Yok
Organik Madde	Beton Karma Suyu	TS EN 1008 : 2003	Oluşan renk standart renkten açıktır.
Kurşun (Pb^{2+})	Beton Karma Suyu	TS EN 1008 : 2003	<0,1 ppm (mg/L)
Fosfat (P_2O_5)	Beton Karma Suyu	TS EN 1008 : 2003	<1,5 ppm (mg/L)
Çinko (Zn^{2+})	Beton Karma Suyu	TS EN 1008 : 2003	<10 ppm (mg/L)
Nitrat (NO_3^-)	Beton Karma Suyu	EPA 9038 : 1986	<0,1 ppm (mg/L)

7.2 Beton Üretim Reçetesi ve Karışım Oranları

Beton üretimleri Karabük Safranbolu Güzay Beton firmasında Kardemir Demir Çelik firmasına ait cüruf malzemesi kullanılarak yapılmıştır.

Beton üretimlerinde dört farklı karışım uygulanmıştır. 1 numaralı karışım C20 beton üretimi için firmanın kendi reçetesi (Çizelge 7.13) kullanılmıştır. 2 numaralı karışım C30 beton üretimi için firmanın kendi reçetesi (Çizelge 7.14) kullanılmıştır. 3 numaralı karışım C20 üretiminde kullanılan aynı oranlar, kırma taş yerine cüruf malzemesi kullanılarak denenmiştir (Çizelge 7.15). 4 numaralı karışım C30 üretiminde kullanılan aynı oranlar, kırma taş yerine cüruf malzemesi kullanılarak denenmiştir (Çizelge 7.16).

Çizelge 7.13 C20 sınıfı beton üretimi için kullanılmış 1 numaralı beton karışım oranları

Çimento	Su	Doğal Kum	0-6 mm kırma taş	6-11 mm kırma taş	11-22 mm kırma taş	Kimyasal Katkı
260 kg	175 kg	850 kg	280 kg	300 kg	540 kg	2,9

Çizelge 7.14 C30 sınıfı beton üretimi için kullanılmış 2 numaralı beton karışım oranları

Çimento	Uçucu Kül	Su	Doğal Kum	0-6 mm kırma taş	6-11 mm kırma taş	11-22 mm kırma taş	Kimyasal Katkı
320 kg	60 kg	190 kg	770 kg	250 kg	235 kg	545 kg	3,9

Çizelge 7.15 Cüruf malzemesi kullanılarak uygulanan beton üretim reçetesi, 3 numaralı karışım

Çimento	Su	Doğal Kum	Cüruf	Kimyasal Katkı
260 kg	175 kg	1130 kg	840 kg	2,9

Çizelge 7.16 Cüruf malzemesi kullanılarak uygulanan beton üretim reçetesi, 4 numaralı karışım

Çimento	Uçucu Kül	Su	Doğal Kum	Cüruf	Kimyasal Katkı
320 kg	60 kg	190 kg	1020 kg	780 kg	2,9

7.3 Beton Basınç Dayanımları

Karışımların beton basınç dayanımı deneyleri TS EN 12390-4 standardına göre yapılmıştır. Alınan küp numunelerin boyutları 15x15x15 cm³'dür. Beton test presi yükleme hızı 15 kN/s ve malzeme kesit alanları 22500 mm²'dir.

Şekil 7.3'de beton basınç dayanımlarına bakılması için küp numunelerin bekletildiği 20 °C'ye ayarlı kür havuzunun resmi bulunmaktadır. Şekil 7.4'de beton basınç dayanımı kırımalarının yapıldığı beton test presi bulunmaktadır.



Şekil 7.3 Kür havuzu resmi

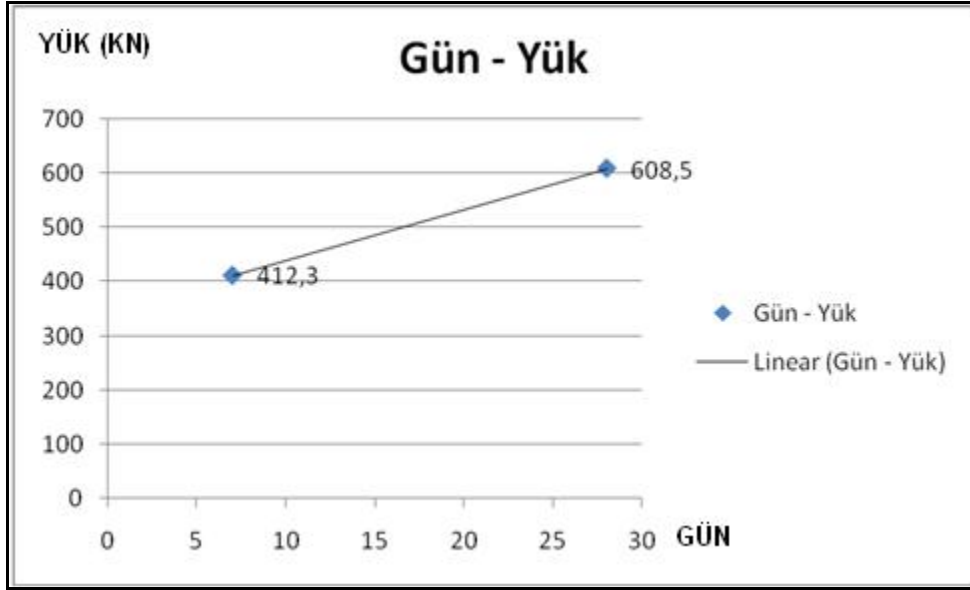


Şekil 7.4 Beton test presi

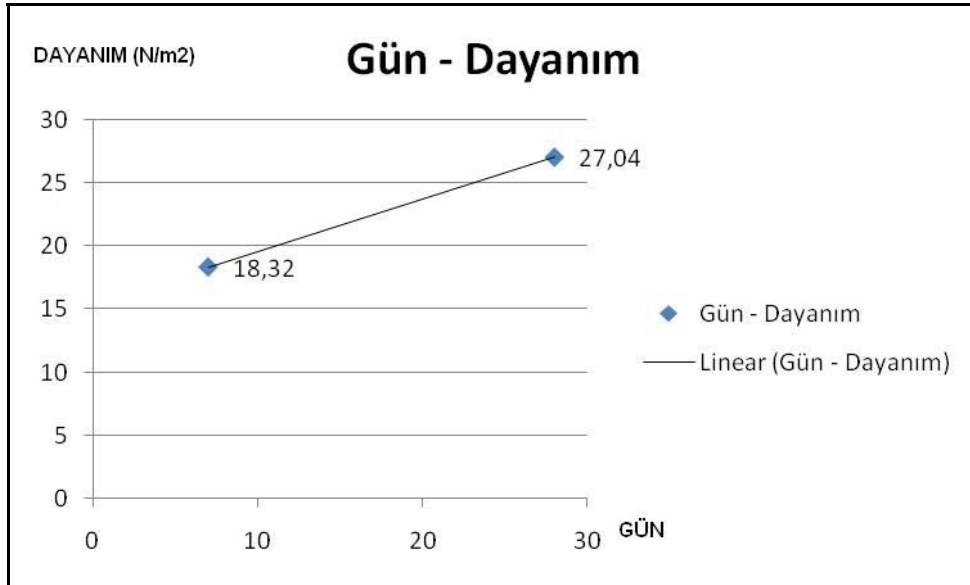
Çizelge 7.17, Çizelge 7.18, Çizelge 7.19, Çizelge 7.20, sırasıyla 1 numaralı, 2 numaralı, 3 numaralı ve 4 numaralı karışımların beton basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir.

Çizelge 7.17 1 numaralı karışım beton basınç dayanımı sonuçları

Kırım günü	Küp boyutu (cm)	Kesit Alanı (mm ²)	Yükleme Hızı (kN/sn)	Yük (KN)	Dayanım (N/mm ²)
7	15x15x15	22500	15	412,3	18,32
28	15x15x15	22500	15	608,5	27,04



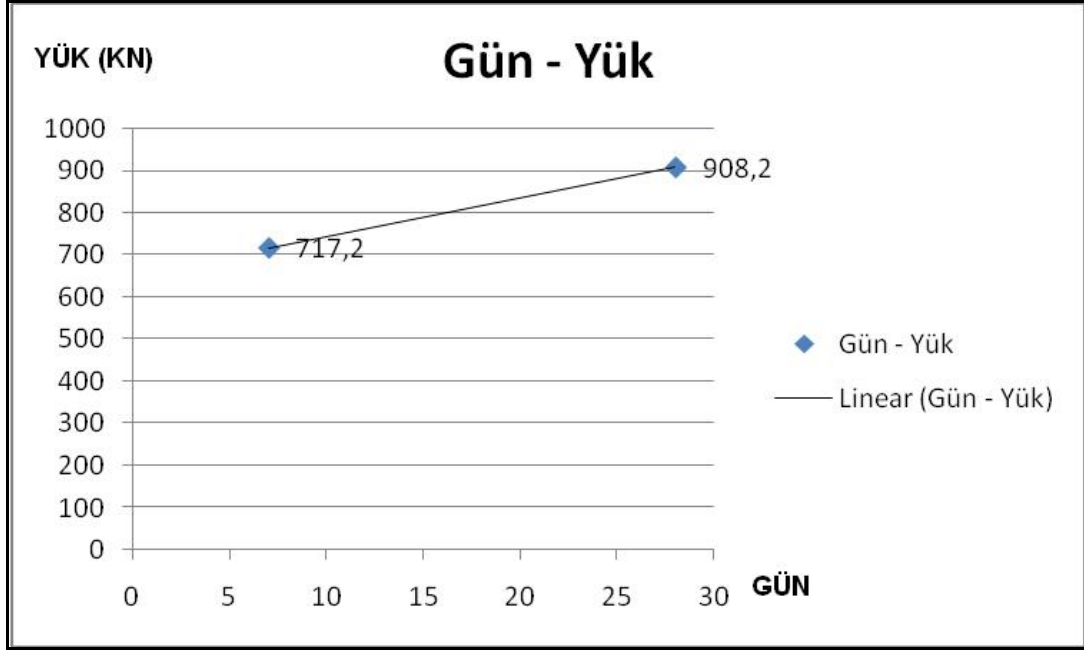
Şekil 7.5 1 numaralı karışım gün – yük grafiği



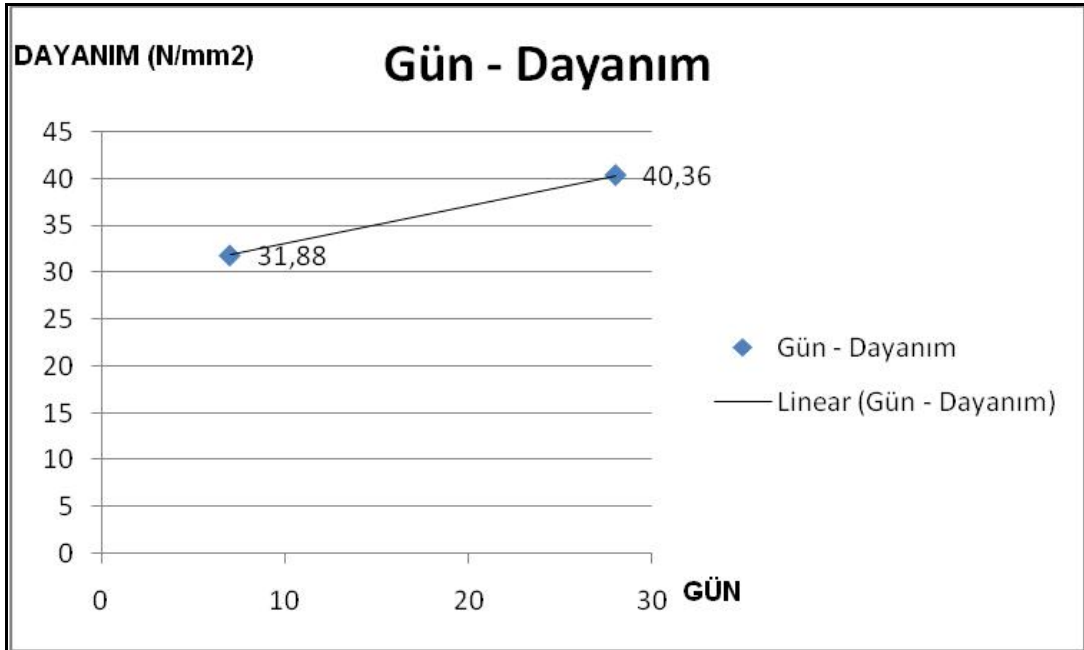
Şekil 7.6 1 numaralı karışım gün – basınç dayanımı grafiği

Çizelge 7.18 2 numaralı karışım beton basınç dayanımı sonuçları

Kırım günü	Küp boyutu (cm)	Kesit Alanı (mm ²)	Yüklemeye Hızı (kN/sn)	Yük (KN)	Dayanım (N/mm ²)
7	15x15x15	22500	15	717,2	31,88
28	15x15x15	22500	15	908,2	40,36



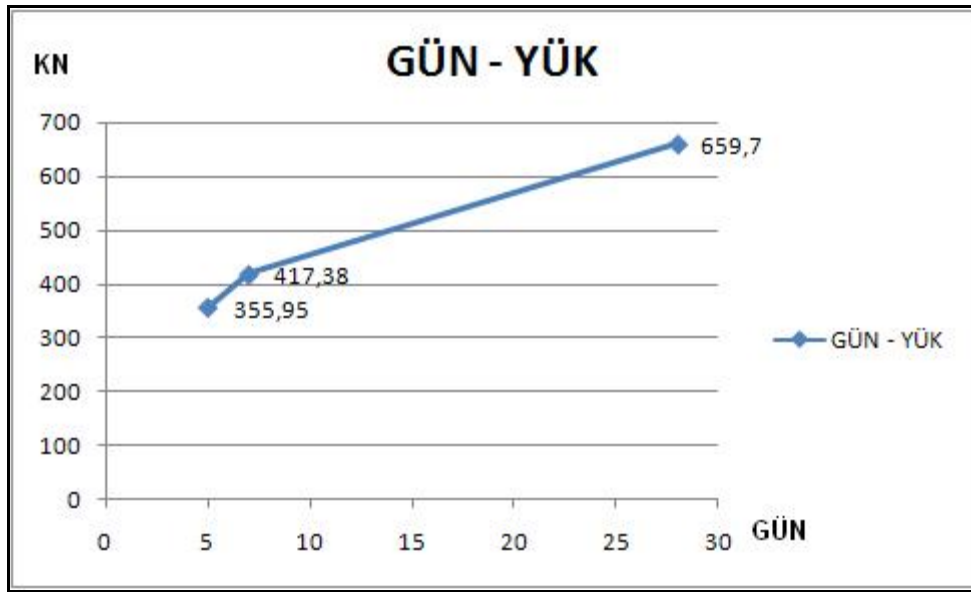
Şekil 7.7 2 numaralı karışım gün – yük grafiği



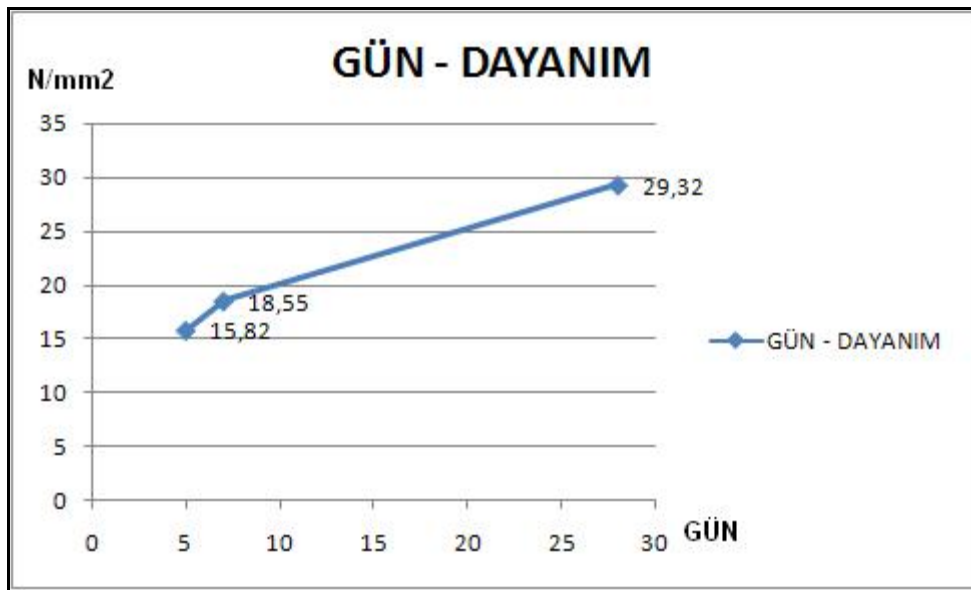
Şekil 7.8 2 numaralı karışım gün – basınç dayanımı grafiği

Çizelge 7.19 3 numaralı karışım beton basınç dayanımı sonuçları

Kırım günü	Küp boyutu (cm)	Kesit Alanı (mm ²)	Yüklem Hızı (kN/sn)	Yük (KN)	Dayanım (N/mm ²)
5	15x15x15	22500	15	355,95	15,82
7	15x15x15	22500	15	417,38	18,55
28	15x15x15	22500	15	659,70	29,32



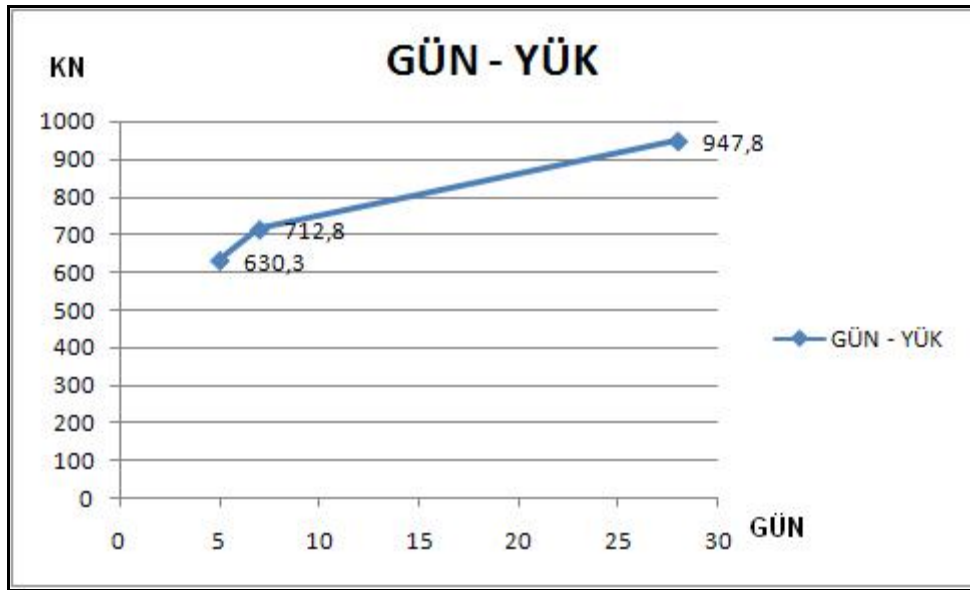
Şekil 7.9 3 numaralı karışım gün – yük grafiği



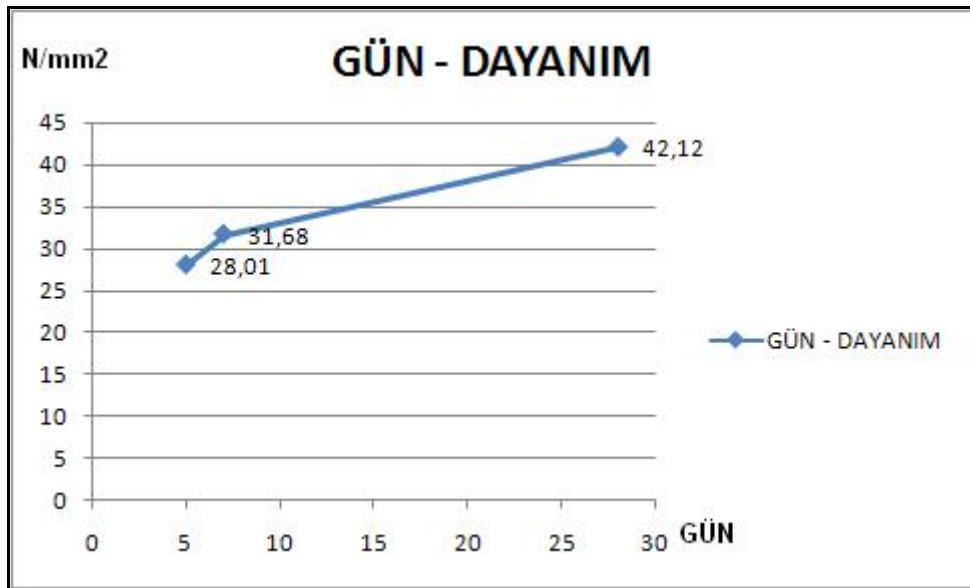
Şekil 7.10 3 numaralı karışım gün – basınç dayanımı grafiği

Çizelge 7.20 4 numaralı karışım beton basınç dayanımı sonuçları

Kırım günü	Küp boyutu (cm)	Kesit Alanı (mm ²)	Yüklem Hızı (kN/sn)	Yük (KN)	Dayanım (N/mm ²)
5	15x15x15	22500	15	630,3	28,01
7	15x15x15	22500	15	712,8	31,68
28	15x15x15	22500	15	947,8	42,12



Şekil 7.11 4 numaralı karışım gün – yük grafiği



Şekil 7.12 4 numaralı karışım gün – basınç dayanımı grafiği

8. SONUÇLAR

Cüruf malzemelerine TS 706 EN 12620 “Beton Agregaları” standardına göre agrega deneyleri yapılmış ve kimyasal içerikleri bakımından standarda göre uygunsuzluk gözlemlenmemiştir.

Doğal kırma taş ile üretilen C20 sınıfı betonun 28 günlük basınç dayanımı, eşit karışım oranlarında Karabük Kardemir çelikhane cürufu kullanılarak üretilen betonun 28 günlük basınç dayanımına göre %7 daha azdır. C20 sınıfı beton üretiminde çelikhane cürufunun hazır beton üretiminde agrega olarak kullanımı, kırma taşa göre basınç dayanımlarını artırmıştır.

Doğal kırma taş ve uçucu kül ile üretilen C30 sınıfı betonun 28 günlük basınç dayanımı, eşit karışım oranlarında Kardemir çelikhane cürufu kullanılarak üretilen betonun 28 günlük basınç dayanımına göre %4,2 azdır. C 30 sınıfı beton üretiminde çelikhane cürufunun hazır beton üretiminde agrega olarak kullanımı, kırma taşa göre basınç dayanımlarını artırmıştır.

C20 ya da C30 beton, çelikhane cürufu kullanılarak daha az çimento ile üretilebilir. Beton üretim maliyeti düşürülebilir.

C30 sınıfı beton üretiminde uçucu kül ile çelikhane cürufu birlikte kullanılmış ve çimento sarfiyatı azaltılmıştır. Bu uygulama ile beton üretim maliyeti daha da düşürülmüştür.

İ.D.Ç.F. ve K.D.Ç.F. kaynaklı her iki cüruf malzemesine de donma çözünme deneyleri yapılmış ve her iki cüruf malzemesi de TS 706 EN 12620 standardına göre MS₁₈ kategorisine girmiştir.

İ.D.Ç.F. ve K.D.Ç.F. kaynaklı her iki cüruf malzemesine de asitte çözünebilir sülfat deneyi yapılmış ve her iki cüruf malzemesi de TS 706 EN 12620 standardına göre AS_{0,2} kategorisine girmiştir.

Deney yapılan cüruf malzemelerinin toplam kükürt içeriği TS 706 EN 12620 standardına göre sınır değerler içindedir.

Deney yapılan cüruf malzemelerinin suda çözünebilir klorür içeriği deney sonuçları %0,01’in altında bulunmuştur. Bu nedenle deney sonuçları, TS 706 EN 12620 standardına belirtildiği gibi betonun toplam klor hesabında kullanılabilir.

Deney yapılan cüruf malzemelerinin TS EN 1744-1 deney standardının 15.1. maddesine göre humus içermediği tespit edilmiştir.

Deney yapılan cüruf malzemelerinin hafif kirletici miktarı deney sonuçları TS 706 EN 12620 standardına göre sınır değerler içinde bulunmuştur.

Her iki cüruf malzemesine de elek analizi deneyi yapılmıştır. İskenderun Demir Çelik Fabrikası cürufunun malzeme boyutları maks 31,5 mm için referans granülometri eğrisine göre hazır beton üretimine uygun değildir. Kardemir Demir Çelik Fabrikası cüruf malzemesi maks 31,5 mm'lik referans granülometri eğrisi değerlerini sağlamaktadır.

Kardemir Demir Çelik Fabrikası'na ait cüruf malzemesine yassılık indeksi deneyi yapılmış ve deney sonucu TS 706 EN 12620 standardına göre FI15 kategorisine girmiştir.

Kardemir Demir Çelik Fabrikası'na ait cüruf malzemesinin görünür yoğunluğu $3,53 \text{ Mg/m}^3$ ve İskenderun Demir Çelik Fabrikası'na ait cüruf malzemesinin görünür yoğunluğu $2,65 \text{ Mg/m}^3$ bulunmuştur.

Kardemir Demir Çelik Fabrikası cürufunun XRF ve XRD deney sonuçlarına göre cüruf malzemesi yüksek oranda demir, kalsiyum ve silisyum içermektedir. Ayrıca bileşiminde düşük oranlarda magnezyum, alüminyum, mangan ve titanyum ve sülfat bulunmaktadır. Ana bileşenler olan demir oksit, kalsiyum oksit ve silisyum dioksit, XRD deney sonuçlarına göre, demir oksit halinde olduğu gibi kalsiyuma bağlı silikatlar ve kalsiyuma bağlı demir oksitler halindedir. Bu bileşenlere ise beton üretiminde ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca demirin sert yapısından dolayı beton üretiminde dayanım performanslarının yüksek çıkması beklenir.

Üretilen betonun uzun dönemde ne gibi sonuçları olabileceği üzerine çalışılmamıştır. Saha çalışmaları ile cüruf agregası içeren betonların çevresel şartlara göre zamanla etkileri incelenmesi gerekir.

KAYNAKLAR

Akihiko, Y., 1994, Properties of Concrete Using Ground Granulated Blast Furnace Slag as Additive for Concrete. J. Soc. Mat. Sci., Japan, v. 43, No. 491, Aug., 943-948

Akman, M.S. 1990. Yapı Malzemeleri, İTÜ İnşaat Fak. Matbaası

Alataş T., Somunkıran E.T., Ahmedzade P., 2005, Ereğli Demir Çelik Fabrikası Cürufunun Asfalt Betonunda Agrega Olarak Kullanılması, F.Ü. Mühendislik Fak. İnşaat Müh. Böl. Elazığ

Bituminous Binders and Mixes, 1998, Rilem Report 17.

BSI British Standards Institution., 1993, Method for The Determination Of The Indirect Tensile Stiffness Modulus Of Bituminous Mixtures. Draft For Development DD-213

BSI British Standards Institution, 1990, Method for The Determination Of Creep Stiffness Of Bituminous Aggregate Mixtures Subject To Unconfined Uniaxial Loading. Draft For Development DD-185.

Du C., 2006, Betonda MgO, Barajlar için Yeni Bir Beton Tesadüfen Keşfedildi, TÇMB, V10 : 53-59

Erdoğan, T. Y., 2003. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş Yayını.

Erdoğan, K. 1999. Taze Betonun Özellikleri ve Kalite Kontrolü, TÇMB Seminer Notları, Ankara

Emerg J.J, 1978, Kinds of Iron Ore, Mining and Processing of Ore, Encyclopedia Americana, V15 : 447-450, 453-456

Hooton R.D., Emery J.J., 1983, Glass Content Determination and Strength Development Predictions for Vitrified Blast Furnace Slag, V2: 943-962

Kandahl, P. S. and Hoffman, G. L., 1982, The Use of Steel Slag as Bituminous Concrete Fine Aggregate. Final Report, Research Project No. 79-26, Pennsylvania Department of Transportation, in Cooperation with U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.

Keçeciler, A. F. ve Gümrükçüoğlu, A., 1988, Bitümlü Malzemeler Laboratuvar El Kitabı, K.G.M., Araş. Dairesi Başk., Yayın No:239, Ankara

- Kocataşkın, F., 1991. Betonun Dünü Bugünü Yarını, 2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton, Kardeşler Matbaası: 23-42
- Kholin I.I., Royak, S.M., 1962, Blast Furnace Slag Cement in the USSR, Proc. 4th Inter. Symp. On the Chemistry of Cement, V2: 1057-1065
- KGM., 2000, Yollar Fenni Şartnamesi, Teknik Araş. Dairesi Başk., Yayın No:170/2, Ankara.
- KGM., 1990, Asfalt Betonu Karışım Dizayn Metotları, Teknik Araş. Dairesi Başk., Ankara.
- Kondo, R., 1962, Discussions of Blast Furnace Slags and Slag Cements, Proc. 4th Intern. Symp. On the Chemistry of Cement, V2: 973-975
- Lea, F.M., 1971, The Chemistry of Cement and Concrete, 3rd ed., NY
- Maslehuddin M., Alfarabi M. Sharif, M. Shameem, M. Ibrahim, M.S. Barry, 2002, Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes, King Fahd University, Suudi Arabia
- Mindess, S. ve Young, J.F. 1981. Concrete, Prentice-Hall Inc., New Jersey
- Mausel J.W., Rose J.H., 1983, Production of Granulated Blast Furnace Slag at Sparrows Point and Workability and Strength Potential of Concrete Incorporating the Slag, V2 : 867-890
- Akman M.S., 2007, Yüksek Fırın Cürufunun Beton Teknolojisindeki Yeri, Sika Teknik Bülten 2007/1 : 4-15
- Morrison, Y., 1974. Applications of Boiler Slag, Presented at the Regional Seminar on Ash Utilization, St. Louis, Missouri, by the American Coal Ash Association.
- Noureldin, A. Sam, and McDaniel, Rebecca S., 1990, Evaluation of Surfaces Mixtures of Steel Slag and Asphalt. Transportation Research Record 1296.
- Neville, A.M., 1993, Properties of Concrete, Third Edition, Longman Scientific and Technical,.
- Ogden, James, 1981, Handbook of Concrete Technology and Masonry Construction, Research and Education Assoc., New York
- Özdoğanlar, O., 1979, Şantiyeler İçin Beton Teknolojisi, T.C. Bay. Bak. Yapı İşl. Gn. Md. Yayın No. 79/1, Ankara.

- Özkul H., Taşdemir M.A., Tokyay M., Uyan M., 1999, Her Yönüyle Beton, THBB, 1999
- Postacıoğlu, B., 1987, Beton, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul.
- Rossini-Lake, L., Jiang, J. J. and Curtis, C., 1995, Reclaimed Steel Slag Pavements for Use as Aggregates - Highway 10 Test Sections. Interim Report, Ministry of Transportation, Ontario.
- Ramirez, T.L., 1992, Steel Slag Aggregates in Bituminous Mixtures, Final Report.
- Rixom, M.R. ve Mailvaganam, N.P. 1986, Chemical Admixtures for Concrete, E&FN Spon, Londra.
- Schröder,F., 1969, Slags and slag cements, Proc 5h Intern. Symp. On Chemistry of Cement,V4 : 149-199, Tokyo
- Spellman L.U., 1982, Granulated Blast Furnace Slag as a Mineral Admixture, Concrete International, V4 : 66-71
- S.H. Kosmatka and W.C. Panarese, 1995, "Design and Control of Concrete Mixtures", Sixth Canadian Edition, Canadian Portland Cement Association.
- Sönmez, B., Baş. E., Günay, E., 2003, Erdemir Çelikخانه Cürufklarının Asfalt Betonu Agregası ve Demiryolu Balast Malzemesi Olarak Kullanılması İmkanları, Erdemir Ereğli
- Türk Standartları Enstitüsü, 2003, TS 706 EN 12620, Beton Agregaları.
- Türk Standartları Enstitüsü, 1980, TS 707, Beton Agregalarından Numune Alma ve Deney Numunesi Hazırlama Yöntemi.
- Türk Standartları Enstitüsü, 2002, TS EN 197, Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, Özellikler Ve Uygunluk Kriterleri
- Türk Standartları Enstitüsü, 2002, TS EN 934-2, Kimyasal katkılar - Beton, Harç Ve Şerbet İçin - Bölüm 2 : Beton katkıları - Tarifler, Özellikler, Uygunluk, İşaretleme Ve Etiketleme
- Türk Standartları Enstitüsü, 2003, TS EN 1008, Beton - Karma Suyu - Numune Alma, Deneyler Ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları
- Türk Standartları Enstitüsü, 2000, TS EN 1744-1, Agregaların Kimyasal Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 1: Kimyasal Analiz
- Türk Standartları Enstitüsü, 2002, TS EN 12390-4, Beton Basınç Dayanımı

Türk Standartları Enstitüsü, 2002, TS EN 1097-6, Agregaların Mekanik Ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 6: Tane Yoğunluğu Ve Su Emme Oranının Tayini

Türk Standartları Enstitüsü, 1999, TS 3530 EN 933-1, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini - Eleme Metodu

Türk Standartları Enstitüsü, 1999, TS 9582 EN 933-3, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 3: Tane Şekli Tayini - Yassılık Endeksi

Türk Standartları Enstitüsü, 1999, TS EN 1367-2, Agregaların Termal Ve Bozunma Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 2: Magnezyum Sülfat Deneyi

Taylor, W.H.; Concrete Technology and Practice, McGraw-Hill, New York, 1977.

Troxell, G.E., Davis, H.E. ve Kelly, J.W., Composition and Properties of Concrete, McGraw-Hill, New York, 1968.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 24.08.1983

Doğum yeri İstanbul

Lise 1997 - 2001 Mecidiyeköy Süper Lisesi

Lisans 2001 - 2006 Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak. Kimya Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2006-Devam ediyor Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı kurumlar

2006- Devam ediyor Türkiye Hazır Beton Birliği Yapı Malzemeleri Laboratuvarı