

156757

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN BETON
DURABİLİTESİNE ETKİSİ**

İnşaat Mühendisi Gökay EĞİLMEZ

**FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Fevziye AKÖZ

İstanbul, 2004

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	2
1.2 Kapsam	3
2. KONU İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER	4
2.1 Beton	4
2.1.1 Agrega	4
2.1.2 Çimento (Portland Çimentosu) ve Özellikleri	5
2.1.3 Beton Karma Suyu	9
2.1.4 Kimyasal Katkı Maddeleri	9
2.1.5 Puzolanlar ve Özellikleri	10
2.2 Yüksek Fırın Cürufu (YFC)	14
2.2.1 Yüksek Fırın Cürufunun Özellikleri	14
2.2.2 Yüksek Fırın Cürufunun Bağlayıcı Madde Olarak Kullanılma Koşulları	17
2.2.3 Cüruf Çimentoları	19
2.2.4 Yüksek Fırın Cürufu Çimentoların Hidratasyonu	20
2.2.5 Cürufu Çimentolar ile Üretilen Betonların Özellikleri	21
2.2.6 Yüksek Fırın Cürufunun İnşaat Sektöründe Kullanım Alanları	23
2.3 Beton Karışımı ve Taze Beton Özellikleri	23
2.4 Betonun Yerleştirilmesi ve Bakımı	24
2.5 Sertleşmiş Beton Özellikleri	26
2.5.1 Betonun Fiziksel Özellikleri	26
2.5.1.1 Birim Ağırlık	26

2.5.1.2	Geçirimsizlik.....	26
2.5.2	Betonun Mekanik Özellikleri.....	28
2.5.2.1	Basınç Dayanımı.....	28
2.5.2.2	Çekme Dayanımı	31
2.5.3	Betonda YFC Kullanımının Mekanik Özelliklere Etkisi.....	33
2.6	Durabilite (Dayanıklılık)	35
2.6.1	Çiçeklenme	36
2.6.2	Alkali Agregas Reaksiyonu.....	36
2.6.3	Sülfat Etkisi	39
2.6.4	Asit Etkisi	42
2.6.5	Beton İçindeki Çeliğin Korozyonu.....	43
2.6.6	Karbonatlaşma	45
2.6.7	Islanma-Kuruma Etkisi.....	46
2.6.8	Betonda Klorür Etkisi.....	47
3.	DENEYSEL ÇALIŞMA.....	52
3.1	Üretimde Kullanılan Malzemeler	52
3.1.1	Agregalar	53
3.1.2	Çimento	54
3.1.3	Yüksek Fırın Cürufu.....	55
3.1.4	Süperakışkanlaştırıcı.....	55
3.1.5	Magnezyum Klorür Tuzu	55
3.2	Numune Üretimi	56
3.2.1	Beton Üretimi	56
3.2.2	Taze Betonda Yapılan Deneyler.....	56
3.2.2.1	Birim Ağırlık Deneyi ve Betondaki Hava Miktarı Tayini.....	57
3.2.2.2	Çökme Deneyi.....	57
3.2.3	Numunelerin Kodlanması.....	58
3.3	Numunelerin Kürü ve Eskitme Süreci.....	58
3.4	Kontrol Deneyleri	59
3.4.1	Ağırlık ve Ultrases Ölçümü.....	59
3.4.2	Basınç Deneyi.....	60
3.4.3	Yarma deneyi.....	60
3.4.4	Karbonatlaşma Derinliğinin Belirlenmesi	61
3.4.5	CI Tayini	62
3.4.6	Permeabilite Deneyi	64
4.	DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ve İRDELENMESİ	66
4.1	Taze Beton Özelliklerinin Değerlendirilmesi.....	66
4.2	Sertleşmiş Beton Özelliklerinin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi	69
4.2.1	Basınç Dayanımı.....	69

4.2.2	Yarma Dayanımı.....	72
4.2.3	Karbonatlaşma Derinliği.....	74
4.2.4	Farklı Derinliklerdeki Klorür Konsantrasyonları	74
4.2.5	Penetrasyon Derinliği	78
5.	SONUÇLAR.....	82
KAYNAKLAR.....		84
EKLER		87
Ek Çizelge 1 Çeşitli Günlere Ait Ortalama Beton Birim Ağırlıkları (kg/dm ³)		88
Ek Çizelge 2 Çeşitli Günlere Ait Ortalama Beton Ses Geçiş Hızları (km/sn)		89
ÖZGEÇMİŞ.....		90



SİMGE LİSTESİ

C_f	Serbest klorür miktarı
C_t	Toplam klorür miktarı
f_{cc}	Betonun basınç dayanımı
f_{cs}	Betonun yarma dayanımı
g	Yer çekimi ivmesi
N	Gümüş nitrat normalitesi
P_{cs}	Yarma deneyinde kırma yükü
v	Ses geçiş hızı
$V_{\text{Ç}}$	Çözelti hacmi
α_A	Çözelti için harcanan gümüş nitrat miktarı
α_B	Destile su için harcanan gümüş nitrat miktarı
α_f	Betonun çekme dayanımı için katsayı
β	Birim ağırlık
γ	Özgül ağırlık



KISALTMA LİSTESİ

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society For Testing Materials
BS	British Standards
TS	Türk Standartları



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Cürufun camsı yapısının şematik açıklaması (Tokyay ve Erdoğan, 2002).....	16
Şekil 2.2 Betonun basınç dayanımına kür koşullarının etkisi (Ersoy, 1987)	25
Şekil 2.3 Çeşitli oranlarda ÖYFC içeren betonun oda sıcaklığında basınç dayanımı gelişimi (Neville, 2000)	34
Şekil 2.4 Çeşitli yaşlardaki harç dayanımına kütlece yerdeğiştirmeli ÖYFC nun etkisi (Neville, 2000)	34
Şekil 2.5 Cürufu çimentolarla Portland çimentolarının alkali-agrega genleşmeleri bakımından karşılaştırılması (Tokyay ve Erdoğan, 2002).....	39
Şekil 2.6 Betonarmede donatının korozyonu	44
Şekil 2.7 Betonda karbonatlaşma olayı (Yüzer, 1998).....	45
Şekil 2.8 48 hafta sonunda çeşitli çimentolar için klor penetrasyonları (Tokyay ve Erdoğan, 2002)	50
Şekil 3.1 Agregalara ait granülometri eğrileri.....	53
Şekil 3.2 Numunelerde Ses Geçiş Hızının Ölçülmesi	60
Şekil 3.3 Yarma deney düzeneği	61
Şekil 3.4 Beton numunelerde klorür tayini için toz numune alınan derinlikler	62
Şekil 3.5 Permeabilite deney düzeneği.....	64
Şekil 4.1 Taze beton birim ağırlığının YFC oranıyla değişimi	67
Şekil 4.2 Taze betondaki hava miktarının YFC oranıyla değişimi.....	67
Şekil 4.3 Çökme miktarının zamanla değişimi.....	68
Şekil 4.4 İki saat sonundaki çökme kaybının YFC oranıyla değişimi	68
Şekil 4.5 Basınç dayanımına farklı çevrimlerdeki betonun CI konsantrasyon etkisi.....	70
Şekil 4.6 Farklı çevrimlerdeki betonun basınç dayanımına YFC oranının etkisi.....	71
Şekil 4.7 Yarma dayanımına farklı çevrimlerdeki betonun CI konsantrasyon etkisi.....	72
Şekil 4.8 Farklı çevrimlerdeki betonun basınç dayanımına YFC oranının etkisi.....	73
Şekil 4.9 0-10 mm derinliğinde serbest klorür konsantrasyonu - çevrim sayısı ilişkisi.....	75
Şekil 4.10 0-10 mm derinliğinde serbest klorür konsantrasyonu - çevrim sayısı ilişkisi.....	76
Şekil 4.11 1 çevrim tüm numunelerin derinliğe serbest CI konsantrasyon değişimi.....	77
Şekil 4.12 3 çevrim tüm numunelerin derinliğe bağlı serbest CI konsantrasyon değişimi.....	78
Şekil 4.13 6 çevrim tüm numunelerin derinliğe bağlı serbest CI konsantrasyon değişimi.....	79
Şekil 4.14 Maksimum su işleme derinliğinin çevrim sayısına göre değişimi	80
Şekil 4.15 Minimum su işleme derinliğinin çevrim sayısına göre değişimi	81

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Çimentonun Karmaoksitleri	6
Çizelge 2.2 Çimento klinkerinin ve mineral katkıların kimyasal kompozisyonu (Odler vd., 2002).....	15
Çizelge 2.3 Çimento içindeki cüruf oranı ile hidrasyon ısısı arasındaki ilişki (Taşdemir vd., 2000).....	22
Çizelge 2.4 Normal portland çimentosu ve cürufllu çimento için dayanım kazanma hızı (Taşdemir vd., 2000).....	22
Çizelge 2.5 Zemin suyu ve toprakta bulunan sülfat yoğunluklarının betona etkisi	41
Çizelge 2.6 %4,4 Konsantrasyonlu Na ₂ SO ₄ 'a dayanıklılık deney sonuçlarına cüruftaki alümina içeriğinin etkisi (Taşdemir vd., 2000).....	42
Çizelge 2.7 Asitli ortamda beton (Taşdemir vd., 2000)	43
Çizelge 2.8 Türkiye denizlerindeki Cl ⁻ iyon konsantrasyonu (Akman, 1992).....	47
Çizelge 2.9 Çeşitli deniz sularındaki Cl ⁻ iyon konsantrasyonu (Tokyay, 1997)	47
Çizelge 2.10 Klorür iyonları geçişinin bağıl değeri (Taşdemir vd., 2000).....	49
Çizelge 2.11 1 yıl deniz suyunda bekleyen numunelerin boy uzamaları (Tokyay ve Erdoğan, 2002)	51
Çizelge 3.1 Üretimde kullanılan agregaların fiziksel özellikleri.....	53
Çizelge 3.2 Çimentonun ve YFC' nin kimyasal analizi	54
Çizelge 3.3 Çimentonun ve yüksek fırın cürufunun mekanik deney sonuçları.....	54
Çizelge 3.4 Katkı maddesinin özellikleri	55
Çizelge 3.5 MgCl ₂ tuzunun özellikleri	55
Çizelge 3.6 1 m ³ taze beton için gerekli olan gerçek malzeme miktarları	56
Çizelge 3.7 Taze beton birim ağırlıkları ve hava miktarı tayini.....	57
Çizelge 3.8 Çökme deneyi sonuçları ve iki saat sonunda çökme kaybı.....	57
Çizelge 3.9 Numune kodlarının açıklamaları	58
Çizelge 3.10 Karbonatlaşma derinlikleri (mm)	62
Çizelge 3.11 Farklı derinliklerdeki Cl ⁻ konsantrasyonları (mg/l).....	63
Çizelge 3.12 Basınç ve yarma dayanımları ile penetrasyon derinlikleri	65

ÖNSÖZ

Yapı Malzemelerinde yapmış olduğum yüksek lisans tezinde yüksek fırın cürufu, betonda yüksek fırın cürufu kullanımı ve bu malzemenin betonda ıslanma-kuruma ile birlikte klorür etkisine ilişkin çeşitli teorik ve deneysel çalışmalar yaparak beton üzerindeki etkilerini inceleme imkanı buldum.

Bu çalışmamda bana yardımcı olan, tez danışmanım Prof. Dr. Fevziye AKÖZ 'e,

Ayrıca Y. Doç. Dr. Nabi Yüzer 'e, Araş. Gör. Özgür ÇAKIR 'a, Araş. Gör. Nihat KABAY 'a, Araş. Gör. Ahmet Beşer KIZILKANAT 'a, Süleyman Özkan KOCA 'ya, Murat DANIŞ 'a, İlker BUDAK 'a,

Yapı Malzemeleri Laboratuvarı Çalışanlarına,

Yapı Laboratuvarı Çalışanlarına,

Çevre Mühendisliği Laboratuvarı Çalışanlarına,

Yapmış oldukları malzeme temini ve hizmet desteklerinden dolayı AkçanSA Çimento 'ya, Danış Beton 'a, Tepe İnşaat 'a, Sika 'ya, Karabük Demir-Çelik Fabrikalarına ve LaFarge 'a ve Çalışmalarım boyunca verdikleri desteklerden dolayı aileme sonsuz teşekkür ederim.

ÖZET

Yapının ve malzemelerin, zamanın ve çevrenin, zararlı etkilerine karşı koyma direnci “durabilite” olarak adlandırılır. Günümüzün en önemli yapı malzemesi olan beton, zararlı etkiler nedeni ile, öngörülenden daha kısa sürede işlevini yitirecek hale gelmektedir. Bu olayların önlenmesi için dayanıklı beton üretilmelidir.

Değişik endüstri kollarının yan ürünü veya atığı olan bazı maddeler, içerdikleri aktif silika ve alümin nedeniyle betonda çimento yerine kullanılabilir. Puzolan olarak adlandırılan bu malzemeler, beton üretiminde ekonomi sağlamakta, atık olması nedeniyle çevre kirliliğini önlemekte ve kullanıldığı betona ek nitelikler kazandırabilmektedir. Demir-çelik endüstrisinin atık ürünü olan yüksek fırın cürufu, su ile hızlı bir şekilde soğutulursa amorf halde kalmakta ve en az çimento inceliğinde öğütülürse bağlayıcı nitelik kazanmaktadır.

Yüksek fırın cürufunun betonun durabilitesine etkisini araştırmak amacı ile düzenlenen deneysel çalışmada, beton üretiminde agrega cinsi ve granülometrisi sabit tutulmuş, öğütülmüş yüksek fırın cürufu; %0 (katkısız – C0), %30 (C3) ve %60 (C6) oranlarında çimento ile yer değiştirmeli olarak katılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,49 olan üç farklı beton ile 120 adet 100*200 mm silindir numune, 60 adet 150*150*150 mm küp numune üretilmiştir. Bu betonlarda yaklaşık 20 cm ‘lik çökme, %0,5 oranındaki modifiye polikarboksilat esaslı katkı maddesi ile sağlanmıştır. Numuneler, kalıptan çıkarıldıktan sonra 28. gün sonuna kadar kirece doygun suda, 28 gün sonunda, 14 gün klorür konsantrasyonları 0 (su – S), 10000 (M1) ve 40000 (M4) mg/l olan magnezyum klorür çözeltisinde, 14 gün de laboratuvar ortamında havada bekletilmiştir. Bu süreç 1 ıslanma-kuruma çevrimi olarak adlandırılmış, her seriye 0(şahit), 1, 3 ve 6 çevrim uygulanmıştır. Silindir numunelerde basınç ve yarma, küp numunelerde permeabilite deneyleri yapılmıştır. Bu numunelerin ayrıca karbonatlaşma derinliği ve farklı derinliklerinde serbest klorür konsantrasyonu belirlenmiştir.

Deney sonuçlarından yüksek fırın cürufu betonlardan, C6 serisinin ve şahitin basınç dayanımı zamanla artmış, C3 serisinde önemli değişim gözlenmemiştir. Basınç dayanımına çözeltilerdeki klorür konsantrasyonunun önemli bir etkisi olmamıştır. Yarmada çekme dayanımı, klorür konsantrasyonu ve çevrim sayısı ile tam ilişkili olmasa da zamanla artış eğilimi göstermiştir. Penetrasyon derinliği, çevrim sayısına ve çözeltilerdeki klorür konsantrasyonlarından etkilenmezken, artan yüksek fırın cürufu oranı ile artmıştır. 6 çevrimden itibaren yüksek fırın cürufu katkılı serilerde karbonatlaşma başlamış ve yüksek fırın cürufu oranının artması ile artmıştır. Beton numunelerden elde edilen toz numunelerde yapılan serbest klorür tayininde 0-10 mm arasındaki yüzey bölgede klorür varlığı saptanmış ve daha derin bölgelere klorür iyonlarının 6 çevrim sonunda henüz varamadığı belirlenmiştir. Betona yüksek fırın cürufu katılması 6 çevrim sonunda klorür konsantrasyonu azaltmıştır. Yüzey bölgelerinde serbest klorür miktarı çevrim sayısının artması ile artmıştır.

Anahtar kelimeler: Beton, durabilite, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, magnezyum klorür çözeltisi, ıslanma-kuruma çevrimi.

ABSTRACT

The resistance of the structures and materials against the aggressive effects of time and environment is called as “durability”. Concrete, the most widespread construction material, loses its functions earlier than the assumed period due to such aggressive effects. For the purpose of preventing these effects, concrete should be durable.

Some materials, which are by-products or wastes of various industries, may be used instead of cement within the concrete due to the active silica and alumine they contain. These materials called as pozzolan provide economy in concrete production, add further qualities into concrete while saving the environment as in fact they are wastes.

In the experimental study to research blast furnace slags on the durability of concrete, the aggregate type and gradation in concrete production was kept constant while ground blast furnace slags: 0% (no additive – C0), 30% (C3) and 60% (C6) were added alternatively with cement. Using three different concretes with water/binder ratio of 0.49, 120 cylindrical samples having dimensions of 100*200 mm, 60 cube samples having dimensions of 150*150*150 mm were produced. About 20 cm of slump in these concretes was provided by 0.5% additive based on modified polycarboxilate. After demolding the samples, they were stored for 28 days in lime-saturated water, and at the end of 28 days, the samples were exposed to magnesium chloride solution with chloride concentrations of 0 (water – S), 10000 (M1) and 40000 (M4) mg/l for 14 days, and in the laboratory conditions for 14 days. This process was named as 1 wetting–drying cycle and each series was exposed to 0 (control), 1, 3 and 6 cycles. The cylindrical samples were subjected to compressive and tensile splitting tests while cubic samples were subjected to permeability tests. Also carbonation depth and free chloride concentrations at different depths were determined.

According to the results, of the blast furnace slag concretes, compressive strength of the C6 series and control samples increased by time while no significant variation was observed in the C3 series. The compressive strength was not influenced by the chloride concentrations of the solutions. Although the tensile splitting strength is not entirely related to chloride concentration and the number of cycles, it had a tendency to increase by time. Penetration depth was not influenced by the number of cycles and the chloride concentrations in the solutions, while it increased by increasing blast furnace slag ratio. After 6 cycles, the series with blast furnace slag, began carbonating and increased by the increasing blast furnace slag ratio. In the process of determining the free chloride in the dust samples obtained from the concrete samples, chloride was found between 0 to 10 mm while chloride could not penetrate in the deeper zones after 6 cycles. Adding blast furnace slag to the concrete caused reduction in the chloride concentration after 6 cycles. The amount of free chloride increased by the increasing number of cycles on the surface.

Keywords: Concrete, durability, ground granulated blast furnace slag, magnesium chloride solution, wetting-drying cycle.

1. GİRİŞ

Yapı malzemelerinin ve yapıların işlevlerini, servis ömrü boyunca, çeşitli fiziksel ve kimyasal etkilere karşı, sahip oldukları nitelikleri kaybetmeden yerine getirebilmesi **durabilite**, **dayanıklılık** veya **kalııcılık** olarak adlandırılır.

Betonarme yapılar genellikle 100 yılı aşacak bir sürede servis verebilecek şekilde projelendirilir. Beton teknolojisi kurallarına uygun şekilde dizayn edilmiş, üretilmiş, sıkıştırılmış, kür edilmiş, geçirimsiz beton çok dayanıklı bir yapı malzemesidir. Beton hizmet süresi boyunca, doğa koşullarından, betonun kullanıldığı ortamdan veya betondaki malzemeler arasındaki reaksiyonlardan kaynaklanan, bünyesinde yıpranmaya yol açabilen birçok kimyasal ve fiziksel etkenle karşılaşmaktadır (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002). Betonun uzun süreli dayanımı fiziksel ve kimyasal parametrelere bağlıdır. Sülfatlı ve/veya klorürlü çözeltilerin etkisine karşı direncinin yüksek olması, su ve gazlara karşı sızdırmaz ve geçirimsiz olması betonda aranan önemli özelliklerdir (Osborne, 1999).

Puzolanlar kendi başlarına bağlayıcılık özeliği olmayan veya çok az olan, doğal yapıları veya öğütülme sonucu çok ince taneli olduklarında ve rutubetli ortamlarda kireç ile reaksiyona girdiklerinde bağlayıcı özellikteki bileşenlerin oluşmasını sağlayan silisli veya silis alüminli malzemelerdir. Puzolanlar maliyeti yüksek portland çimentosu klinkerinden tasarruf edilmesini sağlarken, beton özelliklerini iyileştirici yönde etkiler göstermektedir. Puzolanlı betonlar erken yaşlarda açığa çıkan hidrasyon ısısını azaltırken, sertleşmiş betonda durabilite özelliklerini iyileştirmektedir (Akyüz ve Pekmezci, 2002).

Endüstriyel kaynaklardan ortaya çıkan atıkların bünyelerindeki zararlı maddelerle çevreye olumsuz yönde etki yaptıkları bilinmektedir. Bu nedenle bu atıkların ortadan kaldırılması veya kullanılabilir hale getirilmesi oldukça önemlidir. Ülkemizde demir - çelik, bakır, ferrokrom, gübre, termik santraller gibi sanayi alanlarından elde edilen önemli miktarda toz, kül, cüruf gibi atık malzemeler ortaya çıkmaktadır. Bunların inşaat sektörünün değişik alanlarında ilave ve ikame malzeme olarak veya kendi başına kullanılmasının mühendislikte yeni boyutlar

meydana getireceği ve doğal sınırlı kaynakların hızlı tüketimini önleyeceği söylenebilir. Ayrıca bu atıkların değerlendirilmesi çevre problemine belli bir ölçüde çözüm getireceği gibi, daha ekonomik ve daha iyi özelliklere sahip malzemelerin üretimine de imkan sağlayacaktır (Gül ve Geçten, 1993). Halen endüstriyel ve evsel atık sularla yaklaşık bir milyon değişik kirleticinin tabii sulara verildiği tahmin edilmektedir. Bunlardan ağır metal kirliliği madencilik endüstrisinde uygulanan proseslerde ortaya çıkan artıklardan ileri gelmektedir. Cevher artıkları ve cüruflar atmosferik etkileşimlerle çözünerek toksik metalleri suya ve toprağa verirler. Bu kirleticiler organik kirleticilerin aksine, su ekosistemindeki tabii proseslerde elimine olmamaktadır (Yıldırım, 1993).

Demir-çelik endüstrisinin atık malzemesi olan yüksek fırın cürufu, fırından eriyik halde çıkmakta, yavaş soğutulduğunda kristal yapıya dönerek bağlayıcı nitelik kazanamamakta, su ile hızlı bir şekilde soğutulursa hidrolik bağlayıcı özelliği ortaya çıkmakta, betonda çimento klinkerinin veya çimentonun bir bölümünün yerine kullanılabilir. Yüksek fırın cürufunun içerisinde bulunan serbest silis ve alümin, su ile birlikte kireçle reaksiyona girer, çimento hamuruna bağlayıcılık kazandıran kalsiyum silikat hidrate oluşturur. Betona üretim aşamasında yüksek fırın cürufu ilave edilmesi, çimentonun hidratasyonu sonucu açığa çıkan serbest kirecin silikat hidrateye dönüşmesini sağladığından betonda çatlak oluşumunu önlemekte dolayısı ile dayanıklılığı arttırmaktadır. Düşük hidratasyon ısı, gerek kütle betonları gerekse sıcak iklimlerde betonun dökümlerinde oluşması muhtemel termik rötreyi en aza indirerek beton dayanıklılığını arttırmaktadır (Çakır, 2000). Yüksek fırın cürufu, kimyasal etkilere karşı dayanıklı olması ve betonun hidratasyon ısısını düşürmesi nedeni ile beton üretiminde kullanılabilir.

1.1 Amaç

Bu çalışmada, yüksek fırın cürufunun, belirli oranlarda betona üretim esnasında, çimento ile yer değiştirmeli olarak katılması durumunda, zararlı ortamların betonda meydana getirebileceği değişimlerin araştırılması amaçlanmıştır. Zararlı ortamın sertleşmiş beton özelliklerine etkisi mekanik, fiziksel ve kimyasal deneylerle araştırılmıştır.

1.2 Kapsam

Yüksek fırın cürufunun betonun dayanıklılığına etkisini araştırmak için, 350 kg/m³ dozlu beton üretiminde agrega cinsi ve granülometrisi, çimento cinsi ve bağlayıcı miktarı, su/bağlayıcı oranı sabit tutulmuş, çimentoya ağırlığının %30 'u ve %60 'ı oranlarındaki yüksek fırın cürufu, betona yerdeğıştirmeli (C3, C6) olarak katılmıştır. Her üretimde 2 saat süreyle 15 dakika arayla çökme deneyi yapılarak taze betonun işlenebilme özelliği araştırılmıştır. 28. güne kadar standart şekilde kür edilen numuneler, bu günden itibaren magnezyum klorür çözeltilerinde ve havada, ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmıştır. 28., 28+28. (1 çevrim), 28+84. (3 çevrim), 28+168. (6 çevrim) günlerde basınç dayanımı, yarma dayanımı gibi mekanik özelliklerin belirlendiği deneyler ile su işleme derinliğinin belirlendiği permeabilite deneyi yapılmıştır. Ayrıca iki parçaya ayrılan yarma deneyi numunelerinde karbonatlaşma derinliği tayini ve çeşitli derinliklerinden tozlar alınarak serbest klorür tayini yapılmıştır.

28 günlük numunelerde basınç dayanımı, yüksek fırın cürufu oranı arttıkça azalmıştır. Cüruf katılmamış serinin basınç dayanımındaki değişim, çevrim sayısına ve klorür konsantrasyonuna göre kararlı değildir. Yarma dayanımlarındaki değişim, yüksek fırın cürufu oranına, çözeltilerdeki klorür konsantrasyonlarına ve çevrim sayısına göre kararlılık göstermemiştir. Karbonatlaşma yüksek fırın cürufu katkılı serilerde 6 çevrimden itibaren başlamıştır. Klorürün sadece beton yüzeyinden 0-10 mm derinliğe kadar nüfuz ettiği, daha derinlere gidemediği görülmüştür. Beton yüzeyindeki serbest klorür miktarı çevrim sayısı ve çözeltilerdeki klorür konsantrasyonundan etkilenmemiştir. Penetrasyon derinliği çevrim sayısı ve çözelti konsantrasyonu bakımından kararlılık gözlenmemiştir. Penetrasyon derinliği tüm serilerde standartta verilen 30 mm lik sınır değerin altında kalmıştır.

2. KONU İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

Beton, inşaat mühendisliği alanında yüzyılımızın en önemli yapı malzemesidir. Betondan, işlenebilir olması, mukavemetinin yüksek olması ve dış etkilere karşı dayanıklı olması gibi nitelikler beklenir. Basınç dayanımı, betonun kalitesi hakkında genel bir fikir verir ancak bazı durumlarda geçirimsizlik ve dayanıklılık daha önemli özellik olabilmektedir (Çakır, 2000).

Bu bölümde beton, betonda puzolan olarak kullanılan yüksek fırın cürufu ve betonun dayanıklılığını etkileyen faktörlerden kısaca bahsedilecektir.

2.1 Beton

Beton, kum, çakıl (kırmataş, hafif agrega v.b.) gibi daneli malzemelerin, bağlayıcı malzeme olarak çimento ve su ile gerektiğinde bazı kimyasal ve mineral katkı maddelerinin birlikte karıştırılmasıyla elde edilen bir yapı malzemesidir. Bu malzemeler belirli oranlarda karıştırıldığında, kalıplarda istenilen biçimi alabilecek plastik kıvamda bir malzeme elde edilir. Su ile karıştırılan çimento bağlayıcı özellik kazanır. Çimento ve suyun oluşturduğu malzemeye “çimento hamuru” denir. Çimento hamurunun işlevi, agrega danelerinin yüzeylerini kaplamak, agregalar arasındaki boşlukları doldurmak ve agrega tanelerini bir arada tutacak tarzda bağlayıcılık sağlamaktır. Çimento hamuru, başlangıçta şekil verilebilir plastik bir malzemedir ancak çimentonun suyla temasıyla başlayan ve devam eden kimyasal reaksiyonların etkisiyle çimento hamuru plastiklik özeliği zaman ilerledikçe azalmaktadır. Böylece birkaç saat içinde çimento hamuru katılaşır ve sertleşmektedir. Betonun diğer yapı malzemelerine üstün kılan en önemli özelliklerinden biri, istenilen biçimin verilebilmesini sağlayan plastik kıvamıdır. Beton karıştırılıp kalıba döküldükten kısa bir süre sonra katılaşır ve zamanla dayanım kazanır. Aşağıda betonu oluşturan malzemelerden ve bazı beton özelliklerinden bahsedilecektir (Özışık, 2000; Ersoy ve Özcebe, 2001; Erdoğan, 2003).

2.1.1 Agrega

Agregalar, beton yapımında çimento ve su ile birlikte kullanılan, kum, çakıl, kırmataş gibi

mineral kökenli taneli malzemelerdir. Beton haminin yaklaşık %75'i agrega tarafından oluşturulmaktadır. Agrega çimento ile kimyasal reaksiyon yapmamalıdır. Çimento hamuru ile agrega arasındaki “aderans” adındaki bağlantı fiziksel ve mekanik karakterlidir. Agrega betonun teknik özelliklerine önemli katkılarda bulunmaktadır. Agreganın sağladığı teknik yararlar aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir (Çakır, 2000; Erdoğan, 2003).

- Agrega taneleri, çimento hamurunun zamana bağlı olarak gösterebileceği hacim değişikliğinin serbestçe yer alabilmesini belirli ölçüde engellemektedir (Erdoğan, 2003).
- Agregalar, genelde, sert ve dayanımının oldukça yüksek olması beton dayanımına da katkıda bulunmaktadır. Sert ve dayanıklı agregalar, betonun aşınmaya karşı veya çevreden gelebilecek diğer yıpratıcı etkenlere karşı daha dayanıklı olabilmesine yardımcı olmaktadır (Erdoğan, 2003).

2.1.2 Çimento (Portland Çimentosu) ve Özellikleri

Portland Çimentosu, belirli oranlarda kalker ve kil taşları karışımının yüksek sıcaklıkta yaklaşık 1400-1500 C pişirildikten sonra ortaya çıkan ve klinker olarak adlandırılan malzemeye jips katılıp birlikte öğütülmesiyle elde edilen gri renkli, hidrolik bağlayıcı özellikli bir malzemedir. Çimento ve su karıştırıldığı andan itibaren bu iki malzeme arasında “hidratasyon” olarak adlandırılan kimyasal reaksiyonlar başlamakta ve devam etmektedir. Çimento hamurunun katılaşma göstererek şekil verilemez duruma gelmesine “priz alma” denilmektedir (Ersoy ve Özcebe, 2001; Erdoğan, 2003).

Yüksek sıcaklıkta, kalkerin ve kilin ayrışması sonucunda CaO, silis (SiO_2), alümin (Al_2O_3) ve demiroksit (Fe_2O_3) meydana gelir. Bu maddeler sıcaklığın daha büyük değerleri altında aralarında birleşerek çimentoya bağlayıcı madde özelliğini kazandıran silikatları ve alüminatları meydana getirir (Postacıoğlu, 1986).

Hammadde karışımının döner fırında pişirilmesi sonucunda ortaya çıkan ve klinkerin yapısını oluşturan karma oksitler Çizelge 2.1 'de gösterilmektedir (Erdoğan, 2003).

Çizelge 2.1 Çimento Karmaksitleri

Karmaoksitler	Çimento Kimyasına Göre Sembolü
Dikalsiyum silikat, 2CaO.SiO_2	C_2S
Trikalsiyum silikat, 3CaO.SiO_2	C_3S
Trikalsiyum alüminat, $3\text{CaO.Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Tetrakalsiyum alüminoferrit, $4\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Çimento ve su birleştirilir birleştirilmez, her karma oksit su ile ayrı reaksiyona girmekte ve hidrasyon sonunda her karma oksit tarafından değişik hidrasyon ürünleri oluşmaktadır. Bu reaksiyonların etkisiyle çimento hamuru katılaşmakta (priz almakta) ve sertleşmektedir (dayanım kazanmaktadır). Çimento hamurunun özellikleri, kimyasal reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan değişik özelliklerdeki hidrasyon ürünlerinin çimento hamurunun içerisinde ne oranda yer almış olduklarına göre belirlenmektedir (Erdoğan, 2003).

Çimento klinker halinde iken reaksiyon yapmaz. Çimentonun kimyasal reaksiyona girmesi için çok ince bir şekilde öğütülmesi gerekir. Hidrasyon zamanla devam eden bir reaksiyondur. Çimentonun karma bileşenlerinin su ile yaptıkları reaksiyon kısa zamanda sona eren bir reaksiyon değil, senelerce devam eden bir olaydır (Postacıoğlu, 1986).

Kalsiyum Silikatların Hidratasyonu:

Trikalsiyum silikat (C_3S) ve dikalsiyum silikat (C_2S) ile su (H) arasındaki reaksiyon, (2.1) ve (2.2) denklemleriyle gösterilmiştir.



C_3S hidrasyonu sonucunda ortaya çıkan kalsiyum hidroksit miktarı (CH), C_2S ' in hidrasyonu sonucunda ortaya çıkandan daha fazladır. Çimento hamurunun kazandığı dayanım C_3S ve C_2S karmaoksitlerin hidrasyonu ile ortaya çıkan C-S-H jellerinin miktarına bağlıdır. Hidrasyon olayı devam ettikçe, C-S-H jellerinin üretimi de devam etmekte ve çimento hamurunun dayanımı

artmaktadır. C_3S karmaoksitlerin hidratasyonu ilk zamanlarda C_2S karmaoksitlerin hidratasyonundan daha hızlı yer aldığı için, çimentodaki dayanım artışına C_3S 'nin ilk zamanlardaki katkısı daha çoktur (Erdoğan, 2003).

Kalsiyum Alüminatların Hidratasyonu

C_3A ve su arasındaki reaksiyonlar çok hızlı olmakta kalsiyum-alümino-hidratlar oluşmaktadır.



Yukarıdaki (2.3) denkleminde gösterilen kalsiyum-alümino-hidratlar kararlı değildir ve kısa sürede kararlı formdaki kübik hidrogarnet (C_3AH_6) durumuna dönüşmektedir (Erdoğan, 2003).

C_3A ile su arasındaki reaksiyonlar çok büyük miktarda ısı açığa çıkartacak tarzda ve büyük bir hızla olduğundan, çimento hamuru hemen katılaştığı gibi, önemli bir dayanım da kazanamamaktadır. Ani priz denilen bu olayı önlemek için, çimento üretimi esnasında, klinkere bir miktar (%3-6) alçıtaşı katılmakta ve bu iki malzeme birlikte öğütülmektedir. Çimentonun yapısında yer alan $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (alçıtaşı), C_3A ve su ile birlikte reaksiyona girmekte, böylece reaksiyon hızını yavaşlatmaktadır (Erdoğan, 2003).

C_3A , su ve alçıtaşı arasında aşağıdaki reaksiyonlar yer alabilmektedir:



Yukarıdaki denklemlerden görülebileceği gibi, C_3A , su ve alçıtaşının reaksiyonları ile çimento hamurunun içerisinde hem bir miktar $C_4A\check{S}H_{12}$, hem de $C_6A\check{S}_3H_{32}$ ürünleri oluşabilmektedir. Plaka şeklindeki yarı-kararlı özellikteki $C_4A\check{S}H_{12}$, (kalsiyum-alümino-monosülfohidrat) ürünü, bünyesine 12 molekül su alarak oluşmaktadır. Bu kristalin oluşması, çimento hamurunun içerisinde bir miktar genişmeye yol açmaktadır. Yani, daha fazla sülfatın bulunduğu ortamda $C_6A\check{S}_3H_{32}$ durumuna dönüşebilmektedirler:



$C_6A\check{S}_3H_{32}$, “kalsiyum-alümino-trisülfohidrat” “Candlot tuzu” veya “etrenjit” olarak anılmaktadır. Hekzagonal kesitli ve çubuk şekilli etrenjit kristalleri oldukça karardır. Bünyesinde 32 molekül su bulduran etrenjitin oluşması, çimento hamurunun içerisinde çok büyük genleşmelerin yer almasına yol açmaktadır. Çimento hamurunun içerisinde ne miktarda etrenjit oluşabileceği, ortamdaki sülfat miktarı ile ilgilidir. Çimento hamuru (veya beton) sertleşmiş durumdayken bile, içeriye sülfatlı sulardan veya sülfatlı topraklardan bir miktar sülfat sızması, çimento hamurundaki yarı kararlı durumdaki $C_4A\check{S}H_{12}$ kristallerinin $C_6A\check{S}_3H_{32}$ kristallerine dönüşmesine ve çok büyük genleşmelere yol açmakta, sertleşmiş çimento hamurunun çatlamasına neden olmaktadır (Erdoğan, 2003).

Kalsiyum Alümina Feritlerin Hidratasyonu:

Tetrakalsiyum alümina ferrit'in hidratasyonu, hidratasyon hızı daha küçük olmak üzere, C_3A nın hidratasyonu gibidir. Hidratasyon reaksiyonu sonunda alçı miktarının belirli miktarda olmaması halinde sülfö-ferrit'ler elde edilir. Bunlar sülfö-alüminatlarda alümin yerine Fe_2O_3 in konulmasıyla $C_4F\check{S}H_{12}$ ve $C_6F\check{S}_3H_{32}$ elde edilir (Postacıoğlu, 1986).

Çimentonun Priz Alma Sürelerinin Tanımı

Çimentonun su ile birleştirildiği an ile çimento hamurunun katılaşarak plastik özelliğini kaybettiği an arasındaki süre, “priz alma süresi” olarak tanımlanmaktadır. Priz alma süresi, “priz başlama süresi” ve “priz sona erme süresi” olarak ayrı ifade edilmektedir. Priz başlama süresi, çimentoyla suyun birleştirildiği an ile çimento hamurunun fiziksel değişiklik göstererek katılaşmaya başladığı an arasında geçen süredir. Priz sona erme süresi, çimento ve suyun birleştirildiği an ile çimento hamurunun katılaştığı (sertleşmenin başladığı) an arasındaki süredir (Erdoğan, 2003).

Portland Çimentosunun İnceliği

Fırından çıkan klinkerin öğütölmesi sonunda çimentoyu oluşturan ve boyutları 90 µm den küçük

olan taneler elde edilir. Klinker tanelerinin boyutları ne kadar küçükse çimentonun inceliği o kadar fazladır. Şu halde inceliği yüksek olan bir çimentoyu meydana getiren taneler çok küçük boyutlara sahip bulunmaktadır. (Postacıoğlu, 1986)

Çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonlar, çimento tanelerinin yüzeyinden başlamaktadır. Belli ağırlıktaki “klinker + alçıtaşı” ne kadar ince taneli olarak öğütülürse, elde edilen çimento tanelerinin yüzeylerinin toplamı o kadar artmaktadır. Böyle bir durumda, su ile temas eden tanelerin yüzeyi daha fazla olmakta, kimyasal reaksiyonlar daha hızlı ve daha iyi gelişebilmektedir. O nedenle, çimentonun yeterli inceliğe sahip olması gerekmektedir. Kalın tanelerden oluşan çimento daha yavaş hidrasyon yapmakta, hidrasyon ürünleri daha yavaş hızda elde edilmekte, çimento hamurunun kazanması beklenen dayanım daha geç elde edilmektedir (Erdoğan, 2003).

2.1.3 Beton Karma Suyu

Betonu oluşturan maddelerden biri de beton karma işleminde kullanılan sudur, içilebilen su beton üretiminde rahatlıkla kullanılabilir. Beton malzemelerin karılmasında kullanılan karışım suyunun iki önemli görevi vardır. Birincisi çimento ile birleşerek hidrasyonu gerçekleştirmek ikincisi de betonun karılması esnasında agrega ve çimento tanelerinin yüzeylerini ıslatarak üretilen taze betonda istenilen işlenebilmeyi sağlamak. Beton da kullanılacak karma suyu asit karakterli olmamalı, sülfat (SO_3^-) içeriğini 2 g/l değerinden az olmalı, su içinde bulunan bazı anyon ve katyonlardan ve ayrıca organik maddelerden kaçınılmalıdır. Şeker, nişasta gibi maddeler de prizi geciktirici etkisinden dolayı sorun yarattığından bu hususta dikkatli olunmalıdır (Çakır, 2000; Erdoğan, 2003).

2.1.4 Kimyasal Katkı Maddeleri

Beton karışımında kullanılan temel malzemelere, karıştırılmadan önce veya karıştırılma esnasında betonun bazı özelliklerini değiştirerek performansı arttırabilmek, ve/veya betonun daha ekonomik olmasını sağlamak için beton karışımı içine katılan malzemeye “beton katkı maddesi” denir. Bunlar organik veya inorganik kökenli kimyasal maddelerdir. Katkı maddeleri

su, agrega ve çimento dışında betona çok düşük miktarlarda çimento ağırlığının %5 'inden daha az olmak üzere üretim sırasında katılır. Katkı maddelerinin özellikleri kullanılmadan önce dikkatle incelenmeli ve uygulama bilinçli bir şekilde yapılmalıdır, çünkü bazı katkı maddeleri betonun belirli bir özelliğini istenen biçimde değiştirirken; diğer bir özelliğini olumsuz yönde etkileyebilir (Çakır, 2000; Erdoğan, 2003).

Betonda kullanılan ve reolojik özellikleri etkileyen katkı maddeleri akışkanlaştırıcı plastifiyanlar ve su tutuculuğu arttıran plastifiyanlar olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Bunlardan başka, priz ve sertleşmeyi etkileyen katkı maddeleri, hava içeriğini değiştiren katkıları, betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini arttıran katkı maddeleri, betonun kimyasal etkilere dayanıklılığını etkileyen katkı maddeleri ve betona ek özellikler kazandıran katkı maddeleri de vardır (Çakır, 2000).

2.1.5 Puzolanlar ve Özellikleri

Yalnız başına kullanıldığında bağlayıcı malzeme olmayan fakat kireç veya çimento ile karıştırıldığında su ile yaptığı reaksiyon sonunda bağlayıcı malzeme özelliğini kazanan maddelere puzolan malzeme denilmektedir. Puzolan malzemelerin içinde fazla miktarda huzmeler halde silis ve alümin bulunmaktadır. Bu maddelerin kireçle yapmış olduğu reaksiyon sonunda puzolan bağlayıcılık özelliğini kazanmaktadır. Bir puzolanla portland çimentosu karıştırıldığında çimentonun hidratasyonu sonunda meydana gelen Ca(OH)_2 ile SiO_2 ve Al_2O_3 arasında meydana gelen reaksiyon sonunda puzolan yine bağlayıcılık özelliğine sahip olabilir. Bu reaksiyonlar sonunda Ca(OH)_2 tespit edilir, çözülmez hale getirilir (Postacıoğlu, 1986).

Konu ile ilgili yapılan çalışmalar, asit karaktere sahip olan puzolanların, başka bir deyimle Al_2O_3 + SiO_2 toplamının, kuvvetli bir baz olan Ca(OH)_2 ye ilişkisinin büyük olduğunu göstermiştir. Bir puzolanın reaksiyon sonunda tespit ettiği kireç miktarı ne kadar fazla ise reaktivitesi o kadar büyüktür veya puzolanik özeliği o kadar yüksektir ve bu özellik en fazla puzolanın özgül alanına bağlı bulunmaktadır. Şu halde bir maddenin puzolanik özeliğini arttırmak için onu çok ince bir şekilde öğütmek gerekmektedir. Puzolanik özeliğe etkileyen diğer bir faktör puzolanın içerdiği

reaktif maddeler amorf veya camsı ve zeolitik fazda bulunan Al_2O_3 ile SiO_2 dir. Kristal yapıdaki alümin ile silisin reaktif özellikleri yoktur. Diğer taraftan puzolanik özellik Al_2O_3 ile SiO_2 kireçle yaptığı reaksiyon sonunda meydana geldiğinden bir puzolanda (CaO) nun az miktarda. Bulunması gerekmektedir. Bu açıklamalara göre puzolan denilen maddelerde SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 fazla miktarda bulunmalı CaO az miktarda yer almalıdır. A.S.T.M. in (C618-72) no lu standardına göre bir puzolanda

$$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > 0,70 \quad (2.7)$$

koşulu gerçekleşmelidir. Diğer taraftan CaO miktarı da % 4 ü geçmemelidir. Yalnız burada hemen belirtilecek bir husus vardır ki o da yukarıda ki koşulun sağlanmasının bir maddenin puzolan olduğunu göstermemesidir. Zira puzolanda silis ve alümin reaktif halde bulunması içerdiği SiO_2 ve Al_2O_3 amorf yapıya sahip değilse o maddenin puzolanik özeliği göstermesi beklenemez. Şu halde kimyasal analiz sonuçlarının olumlu olması halinde ayrıca yapılacak kimyasal veya mekanik deneyler ile maddenin puzolanik özeliğinin varlığı kanıtlanmalıdır (Postacıoğlu, 1986).

Puzolan Malzemelerin Sınıflandırılması

Puzolanlar, doğal ve yapay puzolanlar olmak üzere iki genel gruba ayrılmaktadır:

Doğal Puzolanlar : Doğada bulunan volkanik küller, volkanik tüfler, volkanik camlar, ısıtılmış görmüş killer ve şeyller ve diatomlu topraklar bu grup içerisindeki puzolanlardır.

Volkanik Orijinli Puzolanlar: Volkanik püskürme sırasında silisli ve alüminli malzemelerden oluşan eriyik durumdaki magma, yüzeye lav olarak çıkarak çok çabuk soğuma gösterdiği takdirde, camsı (amorf) yapıya sahip olmaktadır. Püskürme esnasında gazların da bulunması, malzemenin gözenekli yapıya ve çok büyük yüzey alanına sahip olmasına neden olmaktadır. Yüzey alanının büyük olması ve düzensiz yerleşim göstermelerinden ötürü, alüminli silisler, sulu ortamda kalsiyum iyonlarıyla kolayca reaksiyona girebilmektedir. Volkanik püskürmenin çok hızlı yer alması, malzemenin daha amorf yapıya ve daha yüksek puzolanik aktiviteye sahip

olmasına yol açmaktadır (Erdoğan, 2003).

Pişirilmiş kil ve şeyl: Büyük miktarda silis ve alüminden oluşan kil ve şeyl mineralleri kristal yapıya sahiptirler. Doğal yapıları itibariyle puzolanik özellik göstermemektedirler. Ancak, bir-iki saat kadar 700-900 °C civarında sıcaklığa tabi tutulduklarında, bu malzemelerin düzenli kristal yapısı bozulmakta ve yarı amorf veya düzensiz alümino silisli bir yapı elde edilmektedir. Böylece, puzolanik malzeme durumuna gelmektedirler (Erdoğan, 2003).

Diatomlu Topraklar: Diatomlar, silisli hücelere sahip olan mikroskopik büyüklükteki tek hücreli su bitkileridir. Diatomlu topraklarda, bu organik kalıntılardan kaynaklanan ve amorf yapıda olan büyük miktarda silis bulunabilmektedir. Bazı diatomlu topraklar öğütülmeden veya öğütüldükten sonra puzolanik katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu tür toprakların 760-1000 °C sıcaklığa kadar pişirildikten sonra ince taneli duruma getirilmeleri, puzolanik aktivitelerini artırmaktadır (Erdoğan, 2003).

Yapay Puzolanlar: Endüstri ürünlerinin üretiminde atık veya yan ürün olarak elde edilen malzemelerdir.

Uçucu Küller: Termik santrallerde, %80 i 75 µm den daha ince öğütülerek kullanılan pulverize kömür, havayla birlikte, buhar üretici kazanları ısıtmak amacıyla, yakıt olarak püskürtülmektedir. Pulverize kömürün yanmasıyla çok ince boyutlara sahip kül tanecikleri ortaya çıkmakta ve yakıt gazlarıyla beraber “uçarak” bacadan dışarı çıkmak üzere hareket etmektedirler. Bu küllere “uçucu kül” denilmektedir. Bacadan dışarıya çıkacak küller birtakım elektrostatik veya elektromekanik yöntemler vasıtasıyla tutulmakta ve kül toplayıcı silolara gönderilmektedir (Erdoğan, 2003).

Silis Dumanı: Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretiminde, yüksek saflıktaki kuvars, elektrik fırınlarında yaklaşık 2000°C sıcaklıkta kömür yardımıyla indirgenmeye tabi tutulmaktadır. Bu üretim esnasında ortaya çıkan SiO gazının hızla soğuyup, yoğunlaşmasıyla elde edilen ve %85-%98 kadar amorf yapıda silis içeren, çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye “silis dumanı” adı verilmektedir. Silis dumanı, çok miktarda, ince taneli amorf

yapıda SiO_2 içerdiğinden, mükemmel bir puzolanik malzemedir. İlk zamanlardaki ve nihai dayanımı oldukça yüksek betonların elde edilmesinde kullanılmaktadır. Silis dumanının çok ince tanelerden oluşmuş olması, taze betonun kıvamını ve işlenebilirliğini azaltmakta, su ihtiyacını artırmaktadır (Erdoğan 2003).

Yüksek Fırın Cürufu: Demir elde edebilmek için, demir cevherleri, yakıt olarak kok kömürünün kullanıldığı, “yüksek fırın” olarak adlandırılan fırınlarda 1600°C sıcaklığa kadar kalkertaşı ile birlikte ısıtılır. Yüksek sıcaklığın etkisiyle, kok kömürünün karbonu ile demir oksitteki oksijen birleşerek karbon monoksit ve karbon dioksit gazları oluşturarak fırını terk etmektedir. Geride, eriyik durumda demir ve eriyik durumda olan CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , MnO , S gibi yabancı maddeler topluluğu kalmaktadır. Elde edilen yabancı maddeler topluluğu “yüksek fırın cürufu” olarak adlandırılmaktadır (Erdoğan, 2003). Yüksek fırın cürufu ile ilgili geniş bilgi Bölüm 2.2 de verilecektir.

Puzolanik Malzemelerin Aktivitesi:

Puzolanların kompozisyonu büyük ölçüde silis ve alüminden oluşmaktadır. Puzolanlara, puzolanik özellik kazandıran silisin amorf yapısı ve miktarıdır. Amorf silise çözülen silis de denir. İnce taneli durumdaki puzolanlar, söndürülmüş kireç ve su ile birleştirildiğinde, bu malzemeler arasında bir takım kimyasal reaksiyonlar yer almaktadır. Kalsiyum hidroksit, silis ve su arasındaki reaksiyonlar, aynen portland çimentosunun hidratasyonunda olduğu gibi, hidrolik bağlayıcılık özeliğine sahip kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerinin oluşmasına yol açmaktadır (Biricik, 1995; Erdoğan, 2003).

Puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireçle ve su ile ne ölçüde reaksiyona girebileceği, ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği, “puzolanik aktivite” olarak tanımlanmaktadır. Puzolanik malzemenin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için, yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda “silis + alümin + demir oksit” içermesi gerekmektedir. Puzolanik aktivite, puzolanik malzemeyle yapılan deneyler sonucunda tayin edilmektedir (Erdoğan, 2003).

2.2 Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Demir cevherleri, doğada, bu malzemelerin esasını oluşturan demir oksit bileşenlerinin yanı sıra küçük bir miktar silis, alümin, kükürt, fosfor, mangan gibi yabancı maddelerle birlikte bulunmaktadır. Cevher içerisindeki demirin elde edilebilmesi için, cevherin, içerdiği yabancı maddelerden arındırılması ve demir oksitin ayrıştırılarak içerisindeki oksijenin açığa çıkartılması gerekmektedir. Bu işlemleri yerine getirebilmek amacıyla, demir cevherleri, yüksek fırın adı verilen fırınlarda yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılıp, erimeye tabi tutulmaktadır. Bu fırınlarda yakıt olarak kok kömürü kullanılmaktadır. Cevherin yabancı maddelerden arıtılması işleminde yardımcı bir hammadde (flux) olarak, bir miktar kalker taşı da demir cevheri ile birlikte ısıtılma işlemine tabi tutulmaktadır. Demir cevheri, kalker taşı ve kok kömürü, fırının üst ucundan sürekli olarak beslenmektedir.

Yüksek fırındaki sıcaklık etkisiyle, kok kömürünün karbonu, cevherin demir oksidindeki oksijenle birleşerek karbon monoksit ve karbondioksit gazları oluşturup fırını terk ederken, geride, eriyik durumdaki demir ile birlikte, yine eriyik durumdaki, kireç, kok kömürünün külü, silis, alümin ve diğer yabancı maddelerden oluşan ve “cüruf” adı verilen malzeme kalmaktadır. Eriyik malzemeler fırının alt ucunda toplanmaktadır. Yoğunlukları farklı olduğundan, eriyik malzemelerin alt bölümünü demir ve üst bölümünü cüruf oluşturmaktadır. Eriyik durumdaki demir ve cüruf, fırının alt ucundan ayrı ayrı çıkışlarla dışarı alınmaktadır (Erdoğan, 1995).

2.2.1 Yüksek Fırın Cürufunun Özellikleri

Yüksek fırından çıktığında yaklaşık 1400–1600°C da eriyik durumunda bulunan cüruf havada, yavaş soğutulmaya bırakıldığında gri, kristal yapılı, taş gibi bir malzeme haline dönüşmektedir; kontrollü miktarda su ile soğutularak bu işlem esnasında içerisinde buhar hapsolmesi sağlanan cüruf genişletilmiş veya köpürtülmüş duruma getirilmekte ve bu tür cüruflar ponza taşları gibi hafif ve gözenekli yapıya sahip olmaktadır; bol suda aniden soğutulma işlemine tabi tutulan cüruflar ise granüle duruma getirilmekte ve bu tür cüruflarda camsı (amorf) yapı oluşmaktadır.

Demir üretiminde cevher, kömür ve kireç yüksek fırının üst kısmına konur, bu maddeler fırın

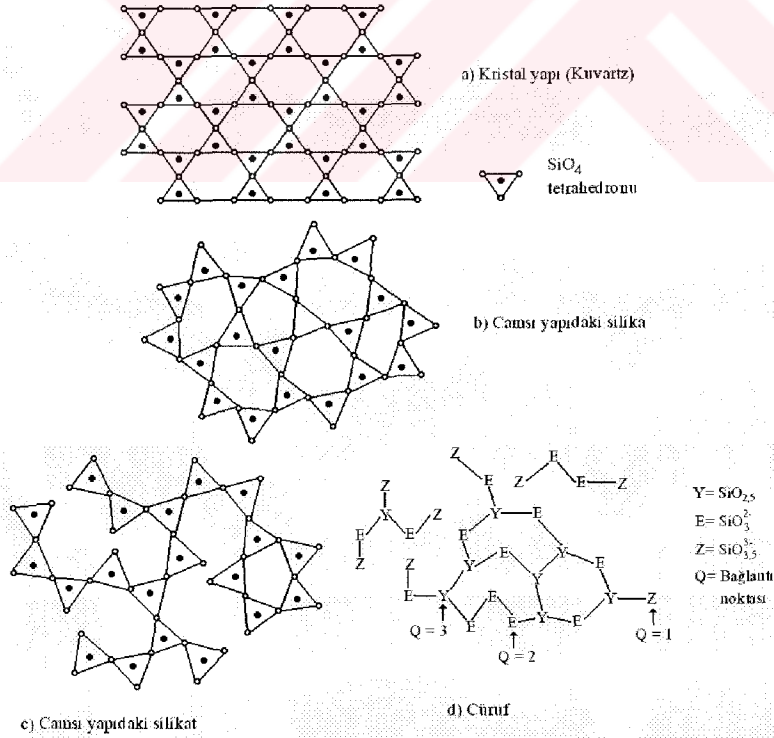
sıcaklığına bağlı olarak ısınır, yavaş yavaş aşağıya doğru hareket eder ve ergime bölgesine ulaşır. Fırının alt kısmında sıvı halde yoğunluğu daha düşük olması nedeni ile bunun üstünde yer alan cüruf veya letiyedir. Cürufun içinde demir üretiminde kullanılan cevherin birleşimine ve uygulanan üretim sistemine bağlı olarak %42-48 oranında CaO (kireç), %26-34 oranında SiO₂, (silis), %12-20 oranında Al₂O₃ (alümin), %5 oranında MgO ve %1 oranında alkali maddeler bulunur. Bunlar, çimentoyu da oluşturan maddelerdir, bu nedenle cürufu, çimento üretiminin ilkel maddesi olan kilin yerine kullanmak mümkündür. Cüruf ayrıca beton üretiminde agrega olarak kullanılmakta, özellikle yol yapımında çok iyi sonuçlar elde edilmektedir. Bu madde ayrıca kireç, çimento gibi bir bağlayıcı ile karıştırılarak hidrolik bağlayıcı gibi de kullanılmaktadır. Cürufun çimentoya karıştırılması ilk defa 1863 'de Almanya'da Langen tarafından gerçekleştirilmiş, çimento üretiminde kullanılması ancak 1934 senesinde Fransa'da resmen kabul edilmiştir (Çakır ve Aköz, 2001).

Silisli ve alüminli yapıya sahip olan yüksek fırın cürufları granüle cüruf olarak amorf yapıya sahip şekilde üretildiklerinden, ince taneli duruma getirildiklerinde puzolanik özellik göstermekte; kalsiyum hidroksit ve su ile bir araya getirildiklerinde hidrasyon sonucu bağlayıcı özelliğe sahiptir. Çizelge 2.2 den de görülebileceği gibi yüksek fırın cürufları, diğer endüstri artığı yapay puzolanlardan farklı olarak, içerdikleri kireçten dolayı, çok fazla olmasa da, kendi başlarına bir miktar bağlayıcılık özelliğine sahip malzemelerdir (Erdoğan, 1993).

Çizelge 2.2 Çimento klinkerinin ve mineral katkıların kimyasal kompozisyonu (Odler vd., 2002)

	Çimento Klinkeri	Uçucu Kül	YFC	Silis Dumanı
CaO	64-65	1-20	30-50	
SiO ₂	20-22	10-50	25-45	90-98
Al ₂ O ₃	4-7	10-30	5-13	çok az
Fe ₂ O ₃	3-5	1-15	<1	çok az
MgO	1-4	1-4	1-20	
SO ₃	0,3-1,5	0-5	<3	
Na ₂ O	0,1-1,5	0-4	<2	çok az
K ₂ O	0,1-1,5	0-3	<2	çok az

Yüksek fırın cürufunun camsı yapısını önce kristal yapıdaki silika olan kuartzın yapısından yola çıkarak açıklamak mümkündür (Şekil 2.1). Şekil 2.1a da kuartzın SiO_4 tetrahedronlarından oluşan düzgün kristal yapısı şematik olarak gösterilmiştir. Bu yapıyı oluşturan tetrahedronların her köşesi birer başka tetrahedronla ortaktır. Camsı silikada, yukarıda belirtilen yapı, tetrahedronların düzgün ve birbirini düzenli olarak tekrarlayan şekilde dizilmesinin bazı Si-O-Si bağlarının kırılması ve araya bazı metal katyonlarının girmesi nedeniyle bozulmuştur (Şekil 2.1b). Kristal yapıdaki her tetrahedronun dört köşede birer tetrahedrona komşu olması durumu camsı silikat yapısında 1-4 komşu tetrahedron bulunması haline dönüşmüştür (Şekil 2.1c). Artık, üç boyutlu bir kafes yapıdan söz etmek mümkün değildir. Son olarak Şekil 2.1d 'de görülen camsı cüruf yapısında ise bazı Si konumları diğer atomlar tarafından işgal edilmiştir. Örneğin, Si^{4+} yerine Al^{3+} nın gelmesi bir SiO_2 'nin bir AlO_2 ile yer değiştirmesi anlamına gelmektedir. Bu durumda, nötr olan elektriksel yük eksi hale dönüşür. Nötr yapıyı sağlayabilmek için de araya magnezyum ve kalsiyum katyonları girer. (Tokyay ve Erdoğan, 2002).



Şekil 2.1 Cürufun camsı yapısının şematik açıklaması (Tokyay ve Erdoğan, 2002)

Granüle yüksek fırın cürufunun kendi başlarına suyla reaksiyonu, Portland Çimentolarının hidratasyonu ile kıyaslandığında, oldukça yavaş gelişir. Cürufun hidratasyonu cürufun su içinde kısmi olarak erimesiyle C-S-H, hidrate alüminatlar ve hidrate siliko alüminatların çökmesi olarak tanımlanabilir. Cüruf hidratasyonunun başlangıç aşamasında silikat iyonları eriyiğe geçer, daha sonra, ilk C-S-H çökmesinin ardından, eriyiğin kireç konsantrasyonu artar ve son olarak da alümina konsantrasyonunda, hidrate alüminat kristallerinin oluşumuna kadar, artış görülür. Yüksek fırın cürufu hamurlarındaki hidrate fazların belirlenmesine yönelik bir çalışmada CaO-SiO₂-Al₂O₃-H₂O dördü sisteminde C-S-H, C₂ASH ve C₄AH₁₃₋₁₉ bileşenlerinin oluştuğu belirlenmiştir (Tokyay ve Erdoğan, 2002).

2.2.2 Yüksek Fırın Cürufunun Bağlayıcı Madde Olarak Kullanılma Koşulları

Bir yüksek fırın cürufunun bağlayıcı madde olarak kullanılabilmesi için bazı koşulların yerine getirilmesi gerektiği açıktır. Bu koşullar, kimyasal ve iç yapı bakımından öngörülen koşullar ve incelik bakımından gerekli özellikler olarak üç grup altında toplanabilir. Herhangi bir cürufun çimento üretiminde kullanılabilmesi için kimyasal bakımdan gerekli koşullarla ilgili olarak birçok öneriler ileri sürülmüştür. Bunlardan bir tanesi TS 20 'de verilen 2.10 bağıntısıdır.

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} \geq 1 \quad (2.10)$$

Bu bağıntıda, SiO₂, cüruftaki çözülen silis miktarını, CaO, MgO ve Al₂O₃ sırasıyla cürufun içerdiği kireç, magnezi ve alümin miktarlarını yüzde cinsinden göstermektedir. **Bu** kriter kesin olmayıp ülkelere göre değişmektedir. Örneğin, Japonya'daki 1,4 'den, Almanya'da ise 1,6 'dan büyük olması koşulu aranmaktadır. Amerikan standardında ise 2.11 bağıntısı yer almaktadır.

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \frac{1}{2} \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \frac{2}{3} \text{Al}_2\text{O}_3} > 1 \quad (2.11)$$

Cürufta alüminyum ve magnezyum katyonlarının oynadığı rol göz önüne alınarak 2.12 bağıntısındaki (k_i) faktörü ileri sürülmektedir.

$$k_i = \frac{M_c O_6}{M_c O_4} \quad (2.12)$$

Bu bağıntıda, M_c simgesi ile, Al ve Mg katyonlarını gösterilmektedir. Yapılan araştırmalarda k faktörü 0,35 civarında değer alırsa cüruf, bağlayıcı madde olarak en yüksek mukavemetine ulaşmaktadır. Yukarıdaki ifadede 6 ve 4 indisleri, Al ve Mg metallerinin koordinasyon valansıdır. Bu konuda her ülkede değişik kriterler önerilmiş olsa da bunlar, birbirinden pek farklı değildir. Burada önemli olan, cürufun kimyasal bileşim bakımından gerekli koşulu sağlayıp sağlamadığının araştırılmasıdır. Koşul sağlanıyor ise cürufun bağlayıcı madde olabileceği anlaşılır ve aşağıda belirtilen özelliklere sahip olup olmadığının araştırılması yoluna gidilir.

Cürufun içerdiği maddeler ancak amorf veya camı yapıda ise bağlayıcı madde özelliğine sahiptir. Yüksek fırından çıkan ve yaklaşık 1500°C derece sıcaklıktaki cüruf kendi haline soğumaya bırakıldığı takdirde kristal yapıli cisimler meydana gelir. Bu durumdaki cüruf, herhangi bir şekilde bağlayıcı madde özelliği göstermez. Cürufun amorf veya camı yapıya sahip olması durumunda iç yapısı çok kararsızdır, dolayısı ile kimyasal bakımdan daha kuvvetli ve enerjik bir şekilde reaksiyon yapma özelliğine sahiptir. Bu da, cürufa bağlayıcı madde özelliği kazandırır, ancak cürufun en iyi şekilde camlaştırılması, en reaktif cürufun meydana getirildiği anlamına gelmez. Yapılan incelemeler kararsızlığı arttıran değişik kusurların bağlayıcılığı arttırdığını ortaya koymuştur. Özellikle cüruf tanelerinin yüzeyindeki kusurlar, bağlayıcı madde özelliğinin en yararlı bölgeleridir. Diğer taraftan X ışınları yardımıyla yapılan araştırmalarda, cürufta bir takım mikro-homojensizlik bölgelerinin bulunduğu anlaşılmıştır. Bu bölgelerin boyutlarının küçülmesi bağlayıcılık özelliğini artırır.

Yüksek sıcaklıkta sıvı halde olan cürufun ani şekilde soğutulması, yüksek fırından ince huzmeler halinde çıkarılan cürufun su dolu geniş havzalara sevk edilmesiyle sağlanır. Cürufa su verilmesi denilen bu işlem sonunda boyutları 1-5 mm arasında olan tanelerden ibaret bir cisim elde edilir. Su verilmesi işlemi mümkün olduğu kadar az su kullanılarak gerçekleştirilmelidir. Ancak bu şekilde cürufun bağlayıcılık özelliği en iyi duruma getirilmiş olur. Yapılan incelemeler 1 ton

cüruf için yaklaşık 1 ton suyun kullanılmasının yeterli olduğunu göstermektedir.

İyi koşullar altında su verilmiş cürufun bağlayıcı madde olarak kullanılabilmesi için en az çimento inceliğinde öğütülmesi gerekmektedir. Bu işlem farklı şekillerde yapılabilir. Su verilmiş cüruf, klinkere karıştırılıp uygun miktarda alçıtaşı ilavesiyle birlikte öğütülebilir. Diğer bir yöntem ise su verilmiş cürufun önce öğütülmesi, sonra çimentoya karıştırılmasıdır. Bu sayede cürufun, portland çimentosu klinkerinden daha ince olması ve üretilen çimentonun daha yüksek özelliklere sahip olması sağlanmıştır.

Sonuç olarak bir yüksek fırın cürufunun bağlayıcı madde olarak kullanılabilmesi için, cürufun kimyasal bileşimi kriterlere uygun olmalı, cürufta yer alan silis ve alümin büyük ölçüde amorf bir yapıya sahip olmalı, başka bir deyişle, kristal yapıli elemanlar %30 dan fazla bulunmamalı, cüruf çimento inceliğinde öğütülebilmelidir (Çakır, 2000).

2.2.3 Cüruf Çimentoları

Cürufa karıştırılan bağlayıcı maddelerin türünü ve miktarını değiştirmek suretiyle muhtelif cins cüruf çimentoları elde edilmektedir (Postacıoğlu, 1986).

Kireç Esaslı Cüruf Çimentoları:

Bu çimentolar ağırlıkça % 70 den fazla cüruf ve % 30 dan az yağlı kireçten oluşmaktadır. Fransa 'da üretilen bu bağlayıcı maddenin 7 ve 28 günlük ortalama basınç mukavemetleri sırasıyla 100 kgf/cm² ve 160 kgf/cm² olmaktadır. Bu bağlayıcı maddenin aynı zamanda kimyasal etkilere karşı büyük bir dayanıklılığı vardır (Postacıoğlu, 1986).

Sülfatlı Cüruf Çimentosu:

Bu cüruf çimentosu granüle yüksek fırın cürufu ile içinde en az %5 kükürt trioksit (SO₃) bulunmasını sağlayacak miktarda kalsiyum sülfat ile katalizör olarak az miktarda portland çimentosu klinkerinin birlikte öğütülmesiyle elde edilmektedir. Bu tür çimentonun başlıca üstünlüğü iyi bir mekanik dayanıma sahip olduğu gibi kimyasal etkilere karşı büyük bir dayanıklılık göstermektedir (Postacıoğlu, 1986).

Yüksek Fırın Cürüflu Çimento:

Yüksek fırın cürüflu çimentolar portland çimentosu klinkeri ile granüle yüksek fırın cürufunun değişik oranlarda birlikte öğütülmesiyle meydana gelmektedir. Bu oranlar değişik ülkelerde çimento tipine bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir. Ülkemizde TS EN 197-1 standardında belirlenmiş cürüflu çimentolar ve bileşim miktarları kütlece (%) cinsinden Çizelge 2.3 de verilmiştir.

Çizelge 2.3 Cürüflu çimento türleri

Tipler	Kısaltma	Klinker	YFC	Minör İlave
Portland - Cürüflu Çimento	CEM II/A-S	80-94	6-20	0-5
	CEM II/B-S	65-79	21-35	0-5
Yüksek Fırın Cürüflu Çimento	CEM III/A	35-64	36-65	0-5
	CEM III/B	20-34	66-80	0-5
	CEM III/C	5-19	81-95	0-5

2.2.4 Yüksek Fırın Cürüflu Çimentoların Hidratasyonu

Cüruf çimentolarının hidratasyonu çok karmaşık bir olaydır ve henüz tam anlamıyla açıklığa kavuşmuş değildir. Böyle olmakla beraber yapılan araştırmalar olayın şu şekilde gelişme gösterdiğini ortaya koymaktadır. Cürüflu çimento su ile karşılaşınca karışımdaki portland çimentosunun hidratasyonu sonucu C-S-H ve Ca(OH)_2 oluşur, (OH) elemanları camsı cürufun içine girerek, zaten kararsız olan, mevcut sistemin elektrostatik dengesini bozar, cürufun ayrışmasına neden olur. Böylelikle serbest kirecin cüruftaki elemanlarla birleşmesine yol açılmış olur. Bu reaksiyonu tüm SO_4^{2-} iyonlarının tükenmesi izler, bu şekilde etrenjit kristalleri meydana gelir, bunlar da zamanla monosülfoalüminatlara dönüşür.

Cüruf çimentolarının hidratasyonu sonunda çok az miktarda serbest kireç meydana gelmekte, hatta bazı özel hallerde hidratasyon sonunda hiç kireç oluşmamaktadır. Bu durum, sertleşmiş cüruf çimentolarında serbest kirecin çok az miktarda bulunması ve kimyasal mukavemetin artması anlamına gelir. Hatta Fransa'da Copla bu konuda daha ileri giderek %80 cüruf içeren

çimentoları, hiç bir deneye tabi tutulmadan, deniz suyunun etkisine dayanıklı bir bağlayıcı madde olarak kabul etmektedir. Cüruf çimentolarda cüruf ile karıştırılacak portland çimentosunun trikalsiyum alüminat oranının (C_3A) %8'den giden büyük olması, trikalsiyum silikat oranının (C_3S) de % 60-70 arasında bulunması gerekir. Cüruf çimentolarında hidrasyon olayı, SO_4^{2-} iyonlarının tüketilmesi nedeni ile portland çimentosuna göre çok daha yavaş ilerlemektedir.

Cüruf çimentolarında hidrasyon olayının gelişmesi puzolanlı çimentolardan farklı olmakla birlikte hidrasyon olayında çok büyük benzerlikler vardır, bu nedenle cüruf çimentolarının, puzolanlı çimentoların bütün üstünlüklerine ve sakıncalı durumlarına sahip oldukları söylenebilir. Bu arada cüruf çimentolarının kuru havalarda ve düşük sıcaklıklarda kullanılmasının bazı zararlara yol açabileceği göz önünde tutularak bu gibi hallerde gerekli önlemlerin alınması gerektiği de belirtilmelidir (Çakır, 2000).

2.2.5 Cüruf Çimentolar ile Üretilen Betonların Özellikleri

Cüruf çimentoların fiziksel özellikleri ele alındığında yüksek fırın cüruf çimentolar portland çimentolarına göre daha açık renklidir. Özgül ağırlığı portland çimentolarına göre daha düşüktür. Priz süreleri, rötre, sünme ve donatıya aderansı özellikleri bakımından yüksek fırın cüruf çimento ile portland çimentoları arasında önemli farklılık yoktur. Yüksek Fırın Cüruf çimentolarının hidrasyon ısıları, klinker ve YFC kompozisyonu ve miktarlarıyla orantılı olarak değişmekle beraber daha düşüktür (Tokyay ve Erdoğan, 2002). Aşağıda yüksek fırın cüruf çimento kullanılarak üretilmiş betonların, taze ve sertleşmiş beton özelliklerinde meydana gelen değişimler kısaca açıklanmıştır.

Taze Beton:

Betonda yüksek fırın cürufu kullanımı taze beton özelliklerini etkiler. Uygulamada genellikle cüruf çimentolarda üretilen betonlarda PÇ betonuna göre aynı kohezyonu sağlayacak şekilde su içeriğinde bir miktar azalma olur. Cüruf çimentoların priz süresi normal portland

çimentolarına göre daha fazla olup YFC oranındaki artma ile bu süre artar. Bu özellikle büyük kütle betonu dökümünde soğuk derzden kaçınmak için önemlidir. Portland çimentosu ve YFC'nun kimyasal bileşenleri benzer olmakla birlikte bellibaşlı oksitleri farklıdır. YFC harçları erken yaşlarda portland çimentosu harçlarına göre daha düşük dayanıma sahip olmalarına karşın 28. günde YFC'nun inceliğine de bağlı olarak hemen hemen eşit ve hatta bir miktar daha yüksek dayanım vermektedir (Taşdemir vd., 2000).

Sertleşmiş Beton:

Cürüflü çimentoların düşük hidratasyon ısısına sahip oldukları bilinmektedir. Çünkü kimyasal reaksiyonlar uzun zaman alır. Çimento içindeki cüruf oranı ile hidratasyon ısısı arasındaki ilişki Çizelge 2.3'de görülmektedir.

Çizelge 2.3 Çimento içindeki cüruf oranı ile hidratasyon ısısı arasındaki ilişki
(Taşdemir vd., 2000)

% Cüruf	0	30	40	50	70	90
7 günlük (kj/kg)	360	325	305	255	200	125
28 günlük (kj/kg)	400	395	360	325	260	185

Cürüflü çimentoların mukavemet kazanma hızı normal portland çimentolarınkinden daha yavaştır. İki cins çimentoya ait bir karşılaştırma Çizelge 2.4 'de verilmektedir.

Çizelge 2.4 Normal portland çimentosu ve cürüflü çimento için dayanım kazanma hızı
(Taşdemir vd., 2000)

Çimento Tipi	360. gündekinin yüzdesi olarak dayanım			
	7. günde	28. günde	90. günde	360. günde
PÇ	49	74	88	100
CÇ	37	64	81	100

2.2.6 Yüksek Fırın Cürufunun İnşaat Sektöründe Kullanım Alanları

Yüksek fırın cürufu beton üretiminde çeşitli şekillerde kullanılabilir.

Katkılı Çimento ve Beton Üretiminde Kullanımı:

Öğütülmüş durumda puzolanik özellik gösteren granüle yüksek fırın cüruflarının bağlayıcılık özelliğinden; portland çimentosu üretilirken bir miktar çimento yerine yüksek fırın cürufu kullanılması veya betonun üretim aşamasında kullanılan çimentonun azaltılıp yerine yüksek fırın cürufu kullanılmasıyla yararlanabilmektedir (Onat 1998).

Hafif Beton Agregası Olarak Kullanımı:

Sıvı haldeki cürufa belirli miktarda su, buhar ve hava püskürtülerek gözenekli bir yapıya sahip olan geliştirilmiş yüksek fırın cürufunun özgül ağırlığı normal agreganınkinden daha düşüktür. Özgül ağırlığı $1100-2200 \text{ kg/cm}^3$ dür. Ayrıca ısı izolasyonu, işleme kolaylığı ile ateşe ve donmaya karşı yüksek dayanıklılık özellikleri bulunmaktadır. Bu avantajlar sayesinde yapı türüne bağlı olarak toplam maliyette %10-15 oranında tasarruf sağlayabilmektedir (Onat, 1998).

Yol Malzemesi ve Asfalt Betonu Agregası Olarak Kullanımı:

Havada soğutulmuş cüruflar ve diğer cüruflar kireç içerikleri nedeniyle temel stabilizasyonunda, dolguda, yol temel altı ve temel malzemesi olarak ve asfalt beton agregası, buzlanmada kaymayı önleyici kum, demiryolu balastı gibi birçok yerde kullanılmaktadır (Onat, 1998).

2.3 Beton Karışımı ve Taze Beton Özellikleri

Betonda aranılan özelliklerin elde edilebilmesi için karışımdaki kum, çakıl, çimento ve su oranının amaca uygun olarak belirlenmesi gerekir. Betonda aranılan en önemli özellik, genellikle basınç dayanımıdır. Basınç dayanımı diğer birçok özelliği de etkilediğinden, karışımın seçiminde en önemli faktör olarak görülür. Belirli bir basınç dayanımını sağlayacak karışımda yerinde yerleştirilip, sıkıştırılmış 1 m^3 beton bileşiminde bulunan çimentonun ağırlık olarak miktarı “dozaj” olarak adlandırılır. Betonarmede kullanılan betonların dozajı genelde $250-400 \text{ kg/m}^3$ arasında değişir. Geçirimsizlik ve donatıyı paslanmadan korumak için, çimento dozajının belirli

bir düzeyden az olmaması gerekir. Beton dayanımı sadece dozajı ile değil, su/çimento oranı ile de değişir ancak, bu oran istenilen dayanıma göre ayarlanırken, elde edilecek karışımın ekonomik ve işlenebilir kıvamda olmasına da özen gösterilmelidir.

Beton karışım hesapları iki aşamada gerçekleştirilir. Birinci aşamada, örnek beton karışımı teorik yolla hesaplanır. İkinci aşamada ise örnek beton üretilir ve bu betonun taze halde işlenebilmeyi, sertleşmiş halde mukavemeti sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir. İstenilen sonuç elde edilmiş ise üretime geçilir, edilmemiş ise gerekli düzeltmeler yapılır ve üretim için kesin değerler bulunur (Çakır, 2000).

Taze betonun, “kolayca karılabilmesi, segregasyon yapmadan taşınabilmesi, kalıba yerleştirme sırasında kohezyonunu ve homojenliğini kaybetmemesi, ve kalıplarda kolaylıkla yayılabilmesi” gibi özelliklerinin tümü kısaca işlenebilme olarak ifade edilmektedir (Postacıoğlu, 1987; Erdoğan, 2003). İşlenebilme, çimento cinsi ve miktarı, karma suyu miktarı ve agrega granülometrisinden ve şeklinden etkilenmektedir. Betonda mineral katkıları kullanılması karma suyu ihtiyacını artırmakta ancak, betonun daha akışkan olmasını sağlamakta, işlenebilirliği artırmaktadır (Erdoğan, 2003).

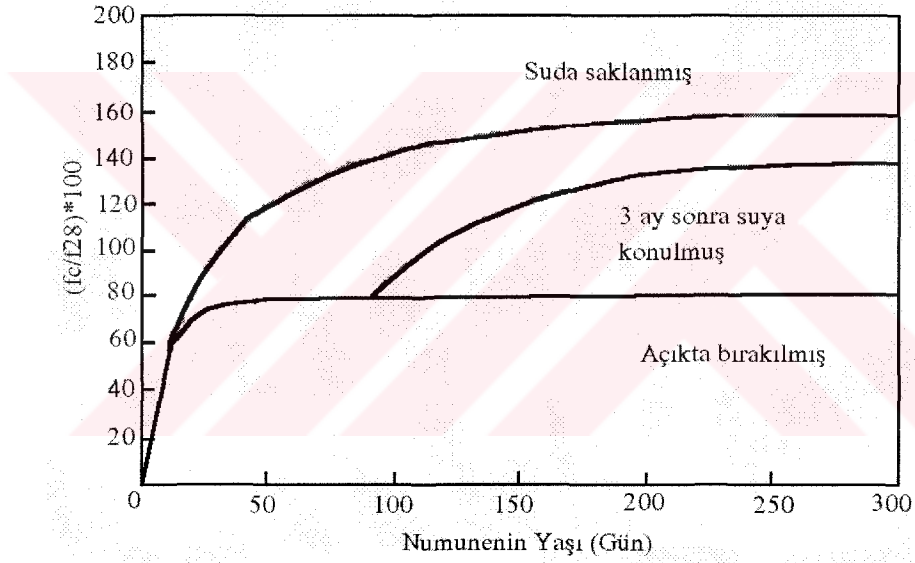
"Birim ağırlık, bir birim hacim içerisinde yer alan taze betonun ağırlığını belirtmektedir. Betonun birim ağırlığının düşük veya yüksek olması, betonu oluşturan malzemelerin özelliklerine ve beton içerisinde yer alan boşluk miktarına bağlı olmaktadır (Erdoğan, 2003).

2.4 Betonun Yerleştirilmesi ve Bakımı

Taze beton, prize başlamadan önce yerine dökülmeli, kalıplara yerleştirildikten sonra vibratör ile sıkıştırılmalıdır. Betonun karıştırılması, taşınması ve yerleştirilmesi sırasında malzemede ayrışma olmamasına dikkat edilmelidir. Ayrışım en fazla betonun gerektiği gibi taşınmadığı durumlarda oluşur ve sertleşmiş betonun gözenekli olması ile sonuçlanır.

Beton zamanla dayanım kazanan bir malzemedir. Bileşimindeki suyun bir bölümü belirli sürede hidrasyon için kullanılır. Bu suyun buharlaşarak kaybolması, hidrasyon için gereken suyun

yok olması ve dolayısıyla betonun gereken dayanım kazanamaması ile sonuçlanır. Bu nedenle taze betonun bakımı, karışımın hazırlanması kadar önemlidir ve beton dayanımını önemli ölçüde etkiler. Kusursuz bir karışımla hazırlanmış beton, iyi bakılmadığı takdirde öngörülen dayanıma erişemez. Betonun içinde bulunduğu ortamdaki nemin ne denli önemli olduğu Şekil 2.2 den açıkça görülmektedir. 7 gün suda saklandıktan sonra açık havada bırakılmış bir grup numune, 10 ay sürekli suda saklanmış grubun dayanımının ancak yarısına erişebilmektedir. Standartlar (TS-1247 ve TS-1248) rutubet ve sıcaklık faktörlerini dikkate alarak deney numunelerinin deney gününe kadar 20°C de su içinde saklanmasını öngörmektedirler. Bu süre içinde ortamın sıcaklık ve neminin gerekli sınırlar içinde bulundurulmasına "taze betonun bakımı" veya "kür" denir.



Şekil 2.2 Betonun basınç dayanımına kür koşullarının etkisi (Ersoy, 1987)

Beton, yedi günde, betonarme hesaplarında öngörülen 28 günlük dayanımının yaklaşık %70' ine ulaşır. Betonun dayanımı, özellikle ilk hafta içinde bulunduğu ortamın nem oranı ve sıcaklığı önemli ölçüde etkiler.

Betonun normal prizini yapması için en uygun sıcaklık 15 ile 25°C ler arasındadır. Yüksek sıcaklık betonun prizini hızlandırır. Bu durumda gerekli nem sağlanmazsa, betonda büzülme (rötre) çatlakları oluşur. Beton yüzeyini etkileyen kuru rüzgar büzülme çatlaklarının oluşmasını

hızlandıracağından, taze betonun yüzeyi örtülerek bu tür etkilerden korunmalıdır. Priz için ideal ortam, nemli bir ortamdır. Bu nedenle kür yapılırken beton yüzeyleri sürekli ıslatılmalı ve özellikle geniş yüzeylerde buharlaşmanın önlenmesi için yüzey örtülmelidir. Düşük sıcaklıkta priz yavaşlar. Sıcaklığın $+4^{\circ}\text{C}$ den düşük olduğu durumlarda önlem almadan beton dökülmemelidir. Alınacak önlemler, su ve agregayı ısıtmak veya özel katkı maddeleri kullanmaktır (Çakır, 2000).

2.5 Sertleşmiş Beton Özellikleri

Beton, homojen olmayan gevrek bir malzemedir. Kendine özgü davranışı zaman ve yük geçmişine bağlıdır. Bu bölümde betonun basınç ve çekme dayanımı tanıtılacaktır.

2.5.1 Betonun Fiziksel Özellikleri

2.5.1.1 Birim Ağırlık

Gerekli koşullara uyularak üretilen betonun birim ağırlığı $2200- 2400 \text{ kg/m}^3$ arasında değişir. Taze betonun birim ağırlığı, sertleşmiş beton birim ağırlığından daha büyüktür. Bu durum, beton içindeki suyun buharlaşma yolu ile betondan ayrılmasından kaynaklanmaktadır. Birim ağırlığı ve özgül ağırlığı normal olan agregaları kullanarak elde edilen betonların birim ağırlığının yukarıda verilen değerlerden küçük olması beton içinde fazla miktarda boşluk bulunduğunu gösterir. Böyle bir betonun mukavemetinin yüksek olması beklenemez (Postacıoğlu, 1987).

2.5.1.2 Geçirimsizlik

Beton yüzeyi ile temas eden sıvı ve gazlar, hava veya su basıncının yarattığı farklılıklar, nemlilik farklılıkları ve betonun içerisindeki sıvıların farklı konsantrasyonlarından doğan osmosis olaylarından betonun içerisine girerek akış gösterebilmektedirler. Sıvıların ve gazların, betonun içerisinde akış gösterebilmelerine imkan tanıyan bir özellik olan "geçirimsizlik", betonda yer alan boşlukların birbiriyle bağlantılı olması nedeniyle gerçekleşebilmektedir. Geçirimsiz betonların içerisine sızan sular ve bu sulardaki yabancı maddeler, betonda bazı kimyasal ve fiziksel olaylara yol açmaktadır:

- Hidratasyonu sonucu oluşmuş ve sertleşmiş çimento hamurunda bulunan kalsiyum hidroksit, dışarıdan sızan suların etkisiyle çözünmekte, betondaki boşluk miktarını arttırmaktadır. Kalsiyum hidroksitli ve tuzlu suyun buharlaşmasıyla, beton yüzeyinde beyaz lekeler halinde kalsiyum karbonat ve tuz birikintileri yer almaktadır.
- Betonun içerisine sızan sularda bulunan sülfatlar ve asitler, betonun içerisinde genleşme yaratan ürünlerin oluşmasına yol açmaktadır.
- Beton içine sızan su, oksijen ve klor, betonun içerisindeki donatıların korozyonuna neden olmakta ve kesitte küçülmelere sebep olmaktadır. Donatıların üzerinde yer alan korozyon ürünleri, betonun içerisinde genleşme yaratmaktadır.
- Kapiler boşlukları suyla dolu duruma gelen betonlarda, boşluklardaki suyun donması sonucunda çok büyük genleşmeler oluşmaktadır.

Kısacası, betonun boşluklu olması, sertleşmiş betonun içerisine dışarıdan su girmesine, bu suyun akış göstererek daha iç bölgelere ulaşmasına, ve sonuç olarak, betonun yıpranıp hasar görmesine neden olmaktadır.

Beton depolar ve barajların yapımında kullanılan betonlar başta olmak üzere, içerisinde su veya başka bir sıvı bulunduran bütün betonların, mümkün olabildiği kadar "geçirimsiz" olmaları gerekmektedir (Erdoğan, 2003).

Genel olarak çimento hamurunun dayanımının artmasıyla birlikte geçirimsizliği azalır. Çünkü dayanım jelin içinde bulunabilen boşlukların fonksiyonudur. Sertleşmiş çimento hamurunun kuruması ise geçirimsizliğini artırır. Bu durum kuruma büzülmesi nedeniyle oluşan mikro çatlaklarla açıklanabilir (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

Diğer değişkenlerin aynı tutulması halinde, yüksek çimento dozajları veya düşük su/çimento oranlarının geçirimsizliği azalttığı bilinmektedir. Çimentonun özellikleri de betonun geçirimsizliğini etkilemektedir. Örneğin aynı su/çimento oranı için, kaba çimentolar ince çimentolara kıyasla daha geçirgen yapı oluşturmaktadır. Çimentonun kimyasal bileşimi ise zamana bağlı olarak hidratasyon olayını etkilemektedir. Bu nedenle hidratasyonunu tamamlamış

bir betonda, diğerk koşulların aynı kalması halinde çimento türü gözeneklilik ve permeabilite değerlerini değıştirmemektedir. Diğerk koşulların aynı kalması ve aynı çimentonun kullanılması halinde ise, agreganın türüne bağılı olarak betonun geçirimliliğı değışir. Agreganın geçirimsiz olması, akım alanını azaltır. Akım yollarının agrega çevresinden geçip uzaması nedeniyle betonun geçirimliliğı azalır (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

2.5.2 Betonun Mekanik Özellikleri

2.5.2.1 Basınç Dayanımı

Beton, diğerk birçok gevrek yapı malzemesi gibi, basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı düşük bir malzemedir. Betonun çok düşük olan çekme dayanımı hesaplarda genellikle dikkate alınmadığından, üzerinde durulan en önemli özelliğı, basınç dayanımıdır. Betonun standart basınç dayanımı, suda saklanmış 28 günlük, çapı 150 mm, boyu 300 mm olan silindir beton numunelerinin, aksenal basınç altındaki dayanımı olarak tanımlanır. Gerilme cinsinden ifade edilen dayanım, kırılma yükünün, silindirin alanına bölünmesiyle elde edilir. Basınç dayanımının belirlenmesi ile betonun niteliğı hakkında genel bir değıerlendirme yapılabilir. Basınç dayanımı, betonun tüm olumlu nitelikleri ile paralellik gösterir. Yüksek dayanımlı beton doludur, serttir, su geçirmez, dış etkilere dayanır, aşınmaz. Basınç dayanımı, pek çok faktörün etkisi altındadır. Basınç dayanımı etkileyen faktörler arasında çimentonun cinsi, dozajı ve dayanımı; karma suyunun miktarı; kür koşulları; yükleme hızı; basınç deneyi yapılan beton numunenin şekil ve boyut etkisi vardır (Ersoy ve Özcebe, 2001; Çakır, 2000).

Çimento ile ilgili faktörler:

Çimentonun cinsi ve miktarı basınç dayanımında etkilidir. Betonun daha yüksek dayanımlı olmasında çimentonun yüksek dayanımlı olmasının etkisi büyüktür. Çimento dozajının yüksek olması mukavemeti arttırır, ancak dayanımı etkileyen faktör sadece dozaj değıil aynı zamanda su/çimento oranıdır (Çakır, 2000). Ayrıca çimento kimyasal kompozisyonu ve inceliğı hidratasyon hızını etkilemekte, bu da çimento hamurunun dayanım kazanma hızını ve miktarını da etkilemektedir (Erdoğan, 2003).

Karma suyu ile ilgili faktörler:

Karma suyunun gerekenden az veya çok fazla olması mukavemeti büyük ölçüde düşürür. Suyun esas görevi çimentonun hidratasyonunu sağlamaktır. Hidratasyon için gerekli olan su, çimento ağırlığının %14'ü, hidratasyon ve jel yapı için gerekli olan su %25 'i civarındadır. Betona işlenebilme için katılan su nedeniyle bu oran (s/ç) % 40 'a ulaşır. Katılan fazla suyun bir kısmı buharlaşır ve beton içinde kılcal boşlukların oluşmasına neden olur (Çakır, 2000).

Betonda kullanılan karma suyu bulanan yabancı maddeler beton dayanımını olumsuz yönde etkileyebilir. Geliştirilen özel çimentolar ve yeni nesil süper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılarak beton üretiminde su/bağlayıcı oranını daha da düşürmek mümkündür.

Kür koşulları:

Katılma ve sertleşme aşamasındaki betona, çevrenin sıcaklık ve rutubet etkisi çok fazladır. Bu aşamadaki betonun bulunduğu ortamın rutubetini (%100) tutmak kaydıyla, sıcaklık 60°C nin üzerine çıkarılarak mukavemet artışı hızlandırılabilir. Bağıl nemin %50 nin altına düşmesi durumunda, betondaki suyun buharlaşması, hidratasyon için gerekli suyun kalmaması problemini ortaya çıkarır. Özellikle sertleşmenin ilk günlerinde hidratasyon daha çok ve hızlı olduğundan sıcaklık artışı ve rüzgar hızının etkisi ile su kaybı daha da önem kazanır.

Numune geometrisi ve boyutları:

Basınç dayanımı silindir veya küp geometrik şeklindeki numunelerde saptanır. Küp numunelerden elde edilen basınç dayanımları, silindir numunelerden elde edilenlerden daha fazla olmaktadır. Bunun nedenleri;

- Deney presi başlıkları ile numunelerin alt ve üst yüzeyleri arasında oluşan sürtünme kuvveti, farklı boyutlu numuneler üzerinde farklı etki yaratmaktadır. Boy/çap oranı 2.0 olan silindir numunelerin alt ve üst uçlarına yakın kısımları kayma kuvvetleri etkisi altında bulunurken ve üniform dağılımlı gerilme göstermezken, numune boyunun ortalarına doğru olan bir bölümünde kayma kuvvetlerinin etkisi kaybolmakta, bu bölümdeki gerilme dağılımı üniform

olmaktadır. K p numunelerde, boy/genişlik oranı 1.0' dır. Küp numuneler deney presinin başlıkları ile numunelerin alt ve üst yüzeyleri arasındaki sürtünme etkisinden kurtulamamaktadır.

- Silindir kalıplara yerleştirilen beton dikey ekseninde yerleştirilmekte ve yerleştirildiği ekseninde kırılmaya tabi tutulmaktadır. Oysa, k p kalıplara dikey ekseninde yerleştirilen beton, numunenin yana  vrilmesiyle, betonun yerleştirilmiş olduğu eksenine 90 derece dik bir ekseninde kırılmaya tabi tutulmaktadır.

Numune boyutlarının küçülmesiyle de daha yüksek basın   dayanım değerleri elde edilir. Bunun nedenleri;

- Daha küçük boyutlu numuneler, daha hızlı kurumakta ve daha hızlı dayanım kazanmaktadır. O nedenle, ilk haftalarda, hatta ilk bir iki ay i çerisinde deneye tabi tutulan numunelerde, daha küçük boyutlu olanlar, daha yüksek dayanım göstermektedir. Betonun yaşı ilerledik  e, değerlişik boyutlu numuneler arasındaki dayanım farkı azalmaktadır.
- Beton numunelerin alt ve üst yüzeyleri ile deney presinin başlıklarının yüzeyleri arasındaki sürtünme nedeniyle numunelerin u  larına yakın bölümlerindeki kayma kuvvetlerinin etkisi numunenin kesit alanına göre farklı olmaktadır. Küçük boyutlu numunelerde deney presinin başlıkları ile temas eden beton yüzeyi, büyük boyutlu numunelere göre daha k   kttir.
- Numune boyutlarının büyümesi, istatistiksel olarak, numunede bulunabilecek mikro çatlakların veya diğer hatalı bölümlerin miktarını da artırmaktadır. O nedenle, daha küçük boyutlu numuneler üzerinde yapılan deneylerde, daha yüksek basın   dayanımı değerleri elde edilmektedir (Erdoğan, 2003).

Bu belirtilen özelliklerin dışında beton dayanımı, taze betonun karılma süresine, taşınmasına, yerleştirilmesine, sıkıştırılmasına bağlıdır.

2.5.2.2 Çekme Dayanımı

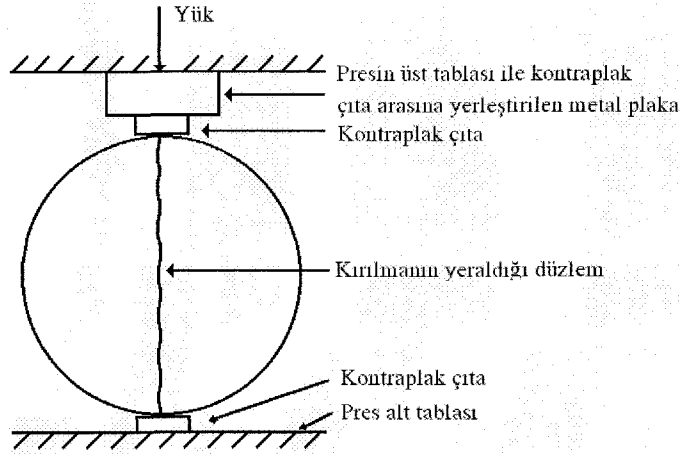
Betonun çekme dayanımı, "betonda çekme etkisi yaratacak kuvvetlerin neden olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı, betonun gösterebileceği direnme kabiliyeti" olarak tanımlanmaktadır. Genellikle, yapıdaki betona doğrudan çekme kuvveti uygulanmamaktadır. Ancak, beton elemanların üzerlerine gelen basınç ve/veya eğilme kuvvetleri betonun içerisinde dolaylı olarak çekme kuvvetlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Betonda büzülme olması durumunda yer alacak şekil değiştirmelerin agrega taneleri ve betondaki donatı tarafından engellenerek serbestçe yer almaması nedeniyle de betonun içerisinde çekme kuvvetleri oluşmaktadır (Erdoğan, 2003).

Yarmada Çekme Dayanımı:

Bu deney yönteminde genellikle silindir şekilli beton numuneler kullanılmaktadır. Küp şekilli beton numunelerin kullanılabilmesi de mümkündür. Deneyin uygulanmasında, Şekil 2.4 den görülebileceği gibi, numune, deney presinin üzerine, numune eksenini presin alt tablasına paralel olacak tarzda yatırılmaktadır. Numunenin yan yüzünün alt ve üst kısımlarına 25 mm eninde ve yaklaşık 3 mm kalınlığında kontrplak çitalar yerleştirilmektedir. Deney presi vasıtasıyla uygulanan basınç yükü numune kırılıncaya kadar devam ettirilmekte ve kırılma yükü (P) ölçülmektedir. Böyle bir yükleme altında, silindir numunenin kırılma tarzı, numunenin ortadan yarılarak iki parçaya ayrılması şeklinde gerçekleşmektedir (Erdoğan, 2003). Bu durumda betonun çekme mukavemeti, aşağıdaki bağıntıyla bulunur.

$$f_{cs} = \frac{2 * P_{cs}}{\pi * d * l} \quad (2.8)$$

Yukarıdaki (2.8) bağıntısında f_{cs} , yarma dayanımı (N/mm^2), P_{cs} , kırma yükü (kN), d, silindir çapı (mm), l, silindir boyu (mm)' dir (Çakır, 2000).



Şekil 2.6 Yarma deneyi uygulama düzeni (Erdoğan, 2003)

Konu ile ilgili çalışmalarda ve standartlarda betonun çekme dayanımının, aşağıdaki bağıntıda da görüldüğü gibi basınç dayanımının karekökü ile doğru orantılı olduğu ortaya konulmuştur.

$$f_{cs} = \alpha_f \sqrt{f_{cc}} \quad (2.9)$$

Yukarıdaki (2.9) bağıntısında f_{cs} , beton yarma dayanımını, f_{cc} , beton basınç dayanımını, α_f , beton çekme dayanımı için katsayıyı (TS:0.53; ACI:0.59) göstermektedir .

Eğilme deneyi

Çekme mukavemetinin bulunmasında uygulanan dolaylı bir diğer metotta, prizma şeklindeki beton numunelerinin eğilme deneyine tabi tutulmasıdır. Eğilme zorlaması sonunda meydana gelen çekme gerilmeleri, uygulanan kuvvetle birlikte artar, gerilmeler çekme mukavemetine eşit olunca numune kırılır. Numunenin kırılmasına neden olan eğilme momenti (M_k), prizmanın mukavemet momenti W ise bu deney sonunda bulunan betonun eğilme mukavemeti f_{cf} aşağıdaki 2.10 bağıntısından hesaplanır:

$$f_e = \frac{M_k}{W} \quad (2.10)$$

Bu deney genel olarak bir kenarı a olan kare kesitli prizmalar üzerinde yapılır, bu durumda $W = a^3/6$ değerine eşittir. f_{cf} ile gerçek çekme mukavemeti f_{ct} arasında aşağıdaki bağıntı

kurulabilir.

$$f_{ct}=0,6 f_{cf} \quad (2.11)$$

Dolaysız çekme deneyi ise kare kesitli veya dairesel kesitli beton numunelere eksenel kuvvet uygulanmak sureti ile yapılır. Bu deneyde, özel metal başlıkları beton prizmanın son bulan yüzeylerine özel yapıştırıcılar yardımı ile sabitlenerek yapılır. Eksenel bir P kuvvetinin uygulanması halinde prizma eksenine dik kesitlerde P/A_0' a eşit çekme gerilmeleri oluşur. P kuvvetinin değeri arttırılarak çekme gerilmeleri gittikçe büyük değerler alır. Kuvvet bir P_k değerine ulaştığında prizma ikiye ayrılarak kırılır. Bu durumda betonun gerçek çekme mukavemeti f_{ct} , P_k/A_0 değerine eşit olur. Çekme mukavemetine ulaşıldığında betonun yaptığı uzama oranı 8×10^{-5} ile 11×10^{-5} arasında değişen çok küçük değerler almaktadır. Çekme mukavemetinin zamanla artışı uzun sürmez, 90 günde bunun en son değerine ulaştığı kabul edilir (Postacıoğlu, 1986).

Herhangi bir yönetmelikte deney türü belirtilmeden salt çekme dayanımından bahsediliyorsa, bunu "eksenel çekme dayanımı" olarak anlamak gerekir. Aşağıda bazı önemli yönetmeliklerde öngörülen çekme dayanımları verilmiştir. Betonlarda f_{cc} , basınç dayanımı, f_{ct} , eksenel çekme dayanımını ve f_{ctf} ise eğilmede çekme dayanımını ifade etmektedir, dayanımlar kgf/cm^2 olarak alınmalıdır.

$$\text{ACI} \quad f_{ctf} = 2.0 \sqrt{f_{cc}} \quad (2.12)$$

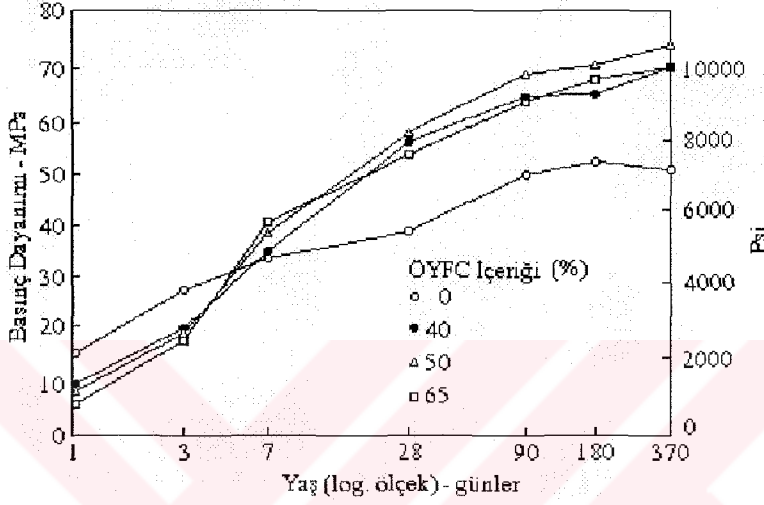
$$\text{CEB} \quad f_{ct} = 2.16 * \alpha * \sqrt[3]{f_{cc}^2} \quad \alpha = 0,21 - 0,225 \quad (2.13)$$

$$\text{TS-500} \quad f_{ct} = 1.1 \sqrt{f_c} \quad (2.14)$$

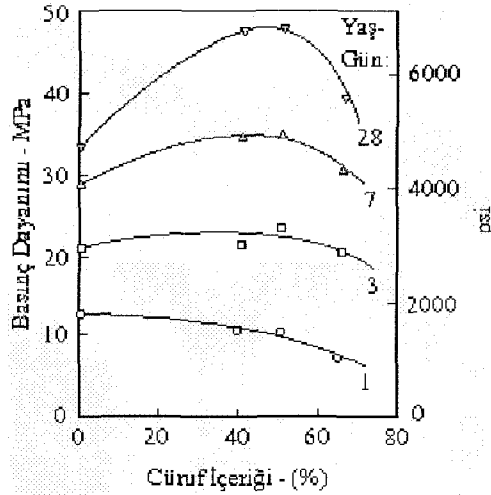
2.5.3 Betonda YFC Kullanımının Mekanik Özelliklere Etkisi

Mekanik özellikler ele alındığında, cürüflü çimentoların dayanım kazanma hızı erken yaşlarda portland çimentolarına göre daha düşüktür. Ancak bunu ileriki yaşlarda telafi etmektedir. Yapılan araştırmalarda birbirlerine çok yakın incelikteki bir portland çimentosuyla, %65 cüruf

içeren bir cürüflü çimento karşılaştırıldığında erken yaşlarda portland çimentosunun, ileri yaşlarda ise cürüflü çimentonun daha yüksek dayanımlara sahip olduğu görülmüştür. Erken yaşlardaki dayanımın yükseltilmesi cürufun daha ince öğütülmesiyle elde edilebilmektedir. Yüksek fırın cürufunun katılma oranına göre beton ve harç dayanımında meydana gelen değişiklikler Şekil 2.3 ve Şekil 2.4 te gösterilmiştir (Neville, 2000).



Şekil 2.3 Çeşitli oranlarda ÖYFC içeren betonun oda sıcaklığında basınç dayanımı gelişimi (Neville, 2000)



Şekil 2.4 Çeşitli yaşlardaki harç dayanımına kütlece yerdeğistirmeli ÖYFC nun etkisi (Neville, 2000)

2.6 Durabilite (Dayanıklılık)

Yapı malzemelerinin ve yapıların işlevlerini, servis ömrü boyunca, çeşitli fiziksel ve kimyasal etkilere karşı, sahip oldukları nitelikleri kaybetmeden yerine getirebilmesi durabilite, dayanıklılık veya kalıcılık olarak adlandırılır (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

Beton hizmet süresi boyunca, bünyesindeki yıpranmaya yol açabilen birçok kimyasal ve fiziksel etkenle karşılaşmaktadır. Bu etkenler, doğa koşullarından, betonun kullanıldığı ortamdan veya betondaki malzemeler arasındaki reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır. Betonun içerisine sızan su, karbon dioksit, oksijen, sülfat, asit ve klor gibi maddeler, betonda kimyasal olayların yer almasına neden olmaktadır. Suyun beton içinde taşınımı, beton içerisindeki boşlukların türüne, çapına, dağılımına ve mikro veya makro boyuttaki çatlakların varlığına bağlıdır. Bu nedenle beton bünyesinde boşlukların dağılımının kontrol edilmesi ve çatlakların oluşumunun engellenmesi kalıcılığın sağlanabilmesi için gereklidir (Aköz ve Çakır, 2003). Islanma-kuruma, donma-çözülme ve aşınma gibi nedenler betonun yıpratıcı fiziksel olaylardır. Bu kimyasal ve fiziksel olaylar sonucunda, beton daha boşluklu bir hal almakta, içindeki donatılar paslanabilmektedir ve betonda çok büyük gerilmeler oluşabilmektedir (Erdoğan, 2003).

Yapıların tasarımında, betonun hedeflenen dayanımdan daha düşük dayanıma sahip olmaması istenmektedir. Ancak, betonun, hizmet gördüğü süre boyunca karşılaştığı kimyasal ve fiziksel olaylar karşısında yeterli direnci gösterebilmesi, yani, yeterince dayanıklı olması, en az, betonun dayanımı kadar, hatta çoğu zaman beton dayanımından daha da önemlidir (Erdoğan, 2003).

Beton dayanıklılığı, “hava koşullarından, sülfatlı veya asitli sulardan, ve/veya betonun kullanıldığı ortam koşullarından kaynaklanan yıpratıcı kimyasal ve fiziksel olaylar karşısında, betonun hizmet süresi boyunca gösterebileceği direnme kabiliyeti “ olarak tanımlanmaktadır (Erdoğan, 2003).

Bu bölümde, betonun dayanıklılığını olumsuz olarak etkileyen bazı önemli kimyasal ve fiziksel olaylar ele alınmaktadır. Beton veya betonarme elemanların zamanla bozulmalarına çeşitli iç veya dış etkenler neden olur. Bu etkenler fiziksel, kimyasal, biyolojik veya mekanik kökenli

olabilir. Dış etkiler arasında; sülfat etkisi, donma-çözülme, aşınma, karbonatlaşma, bazı asit ve tuz etkileri sayılabilir. Hasarın şiddeti bu dış etkilerin derecesi ve betonun kalitesine bağlı olarak değişmektedir. Ancak çok şiddetli etkiler altında korunmadığı takdirde, çok kaliteli beton elemanlar da harap olabilir. İç etkiler arasında; alkali-agrega reaksiyonu, gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF), agrega ve çimento harcının termal özellikleri arasındaki farklılıklar gibi etkiler sayılabilir (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002; Erdoğan, 2003).

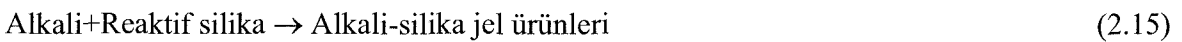
2.6.1 Çiçeklenme

Çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit suya dayanıklı değildir ve hemen çözünür. Beton içine çeşitli nedenlerle üretim esnasında veya sonradan tuzlar yer alabilmektedir. Betonun içerisine sızan suların etkisiyle, çözünen kalsiyum hidroksit ve tuzları içeren su, kapiler boşluklarda yer alan fiziksel olaylar (kapiler hareketle) betonun yüzeyine doğru hareket etmektedirler. Beton yüzeyine çıkan suyun buharlaşması sonucunda da, suyun içerisinde bulunan kalsiyum hidroksit ve tuzlar, beton yüzeyinde 3-4 mm ila 10-15 mm kalınlığında ince bir çökelti tabakası oluşturmaktadırlar. Kalsiyum hidroksit, havadaki karbon dioksitle temas ederek kalsiyum karbonat haline dönüşmektedir. Çökeltinin büyük bir kısmı CaCO_3 tarafından olduğundan, çökelti tabakası beyaz renkte bir görünümündedir. Betonun içerisindeki kalsiyum hidroksit ile tuzların çözünmesi ve betonun yüzeyine çıkması sonucunda, beton yüzeyinde kristaller halinde ince bir beyaz tabaka oluşturması olayına, "çiçeklenme" denilmektedir. Nemli ortamın çiçeklenme olayına büyük etkisi olmaktadır. Betonun içerisine sızan su miktarının az olmasını sağlayabilmek için, beton, mümkün olabildiği kadar boşluksuz olmalı, yapılar tasarlanırken su sızmasını önleyecek önlemler göz önünde tutulmuş olmalıdır. Betondaki kalsiyum hidroksit ve tuz miktarının nispeten az olabilmesini sağlayabilmek için ise uygun özellikteki çimento kullanılmalıdır. İnce taneli puzolanik katkı maddeleri kullanılmalıdır. Agregaya yıkanmış olmalı, içerisinde tuz ve yabancı maddeler bulunmamalıdır (Erdoğan, 2003).

2.6.2 Alkali Agregası Reaksiyonu

Betonarme yapılarda mekanik etkiler dışında bozulma süreçlerini kontrol eden ortamdaki su

veya nem, zararlı maddeleri beton içine taşır, kimyasal reaksiyonların başlamasına ve sürmesine neden olur. Suyun beton içinde taşınımı, boşlukların türüne, çapına, dağılımına, mikro veya makro boyuttaki çatlakların varlığına bağlıdır. Bu nedenle, kalıcılığın sağlanabilmesi için beton bünyesinde boşlukların dağılımının kontrol edilmesi ve çatlak oluşumunun engellenmesi gerekir. Betonda çatlamlara neden olan alkali-agrega reaksiyonu (AAR) sonucu oluşan alkali-silikat-hidrate jeli 2.15 bağıntısında ifade edildiği gibi çimento hamurundan su emerek şişer, mikro çatlaklar oluşur ve yaygınlaşır. Betonun su emmesi artar, artan jel oluşumu çatlakları büyütür, özellikle agrega çimento arayüz bağıni zedeleyerek betonun parçalanmasına yol açar. Yapılan araştırmalar sonucunda bazalt, andezit, dasit, riyolit gibi volkanik kayalar ile kumtaşı ve tüflerin hasar verici kayalar olduğu belirtilmiştir. Bunlardan silisli agregalarda alkali silika reaksiyonu (ASR), kalsitik dolomitlerde ve dolomitik kireçtaşlarında alkali karbonat reaksiyonu (ACR) olmak üzere iki tip reaksiyondan bahsedilir. ACR'de oluşan genleşme, genellikle ASR'de oluşan genleşmeden çok daha azdır. Betonun alkalitesi arttıkça ASR potansiyeli de artar çünkü alkali hidroksit çözültisi, reaktif agregalarla kolayca reaksiyona girer. Yüksek konsantrasyonlu alkali çözültisinin etkisinde silikanın kararlı formları bile güçlü silika bağlarının kopması nedeni ile reaksiyona girebilir. İçinde aktif silika bulunan ve ASR'ye yol açan agregaların kullanılması zorunlu ise, bağlayıcı maddeye bir miktar puzolan malzeme ilave edilerek reaksiyon hızı azaltılabilir. Genleşmeye neden olan ASR'nin oluşabilmesi için agregadaki reaktif silika formlarından başka, çimentoda yeterli miktarda Na_2O , K_2O gibi alkalilerin bulunması ve ortamın nemli olması gerekir. Bu koşullardan herhangi biri olmazsa ASR nedeni ile genleşme, dolayısı ile çatlak oluşmayacaktır. ASR basitçe iki aşamada gösterilebilir.



Oluşan jelin karakteristik bileşimi henüz tam olarak belirlenememiştir ancak silisyum, sodyum, potasyum, kalsiyum ve magnezyum içerdiği sanılmaktadır. Bazı kaynaklarda XRD analizinde bu ürünün zeolite benzediği ve kimyasal bileşiminin $(\text{NaAlSiO}_4)_{12} \cdot 27\text{H}_2\text{O}$ veya $\text{Ca}(\text{Al}-$

SiO_4) $12.27\text{H}_2\text{O}$ olduğu, jel ve kristal ürünlerinin agrega harç arayüzünde ve hava boşluklarında meydana geldiği belirtilmiştir. ASR, yüksek pH değerlerinde ortaya çıkar, çünkü reaktif silika ancak pH'ı yüksek çözeltide çözünür. Betonda boşluk suyunun pH değeri çimentonun alkali içeriğine bağlıdır ve çimentonun alkali miktarı arttıkça artar. Betonda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dengesinin kurulduğu her noktada pH değeri en az 12.5'tur. Bu değer, alkali oranı yüksek çimento kullanıldığında 13.5 değerine ulaşabilir. Yüksek veya düşük alkali içeren çimentoların pH değerleri arasındaki 1.0 derecelik fark, hidroksit iyonu konsantrasyonunda 10 kat artışa işaret eder. Reaktif agregalar ile düşük alkali içeren çimentoların kullanılması gereğinin temelinde bu neden yatmaktadır.

Çimentonun içindeki alkali oksitler, çimento hammaddelerinden kil veya kireçtaşından, özellikle de kilden kaynaklanır. Klinkerdeki alkaliler, alkali sülfat, alkali alüminat, alkali silikat formundadır. Alkaliler özellikle klinkerdeki S_3 ile birleşirler. Çimento, su ile karıştırılınca alkali sülfatlar sıvı fazına hızla çözünürler, ortamın hidroksit yoğunluğu artar. Reaksiyonun oluşabilmesi için çimentodaki alkali içeriğinin 1.3 bağıntısı ile hesaplanan Na_2O eşdeğerinin %0.6 değerini aşması gerekir. Ancak beton özelliklerine etki eden toplam alkaliler değil, arayer sıvısında çözünebilen alkali iyonlarıdır. Alkali iyonlarının etkisi birbirinden farklıdır.

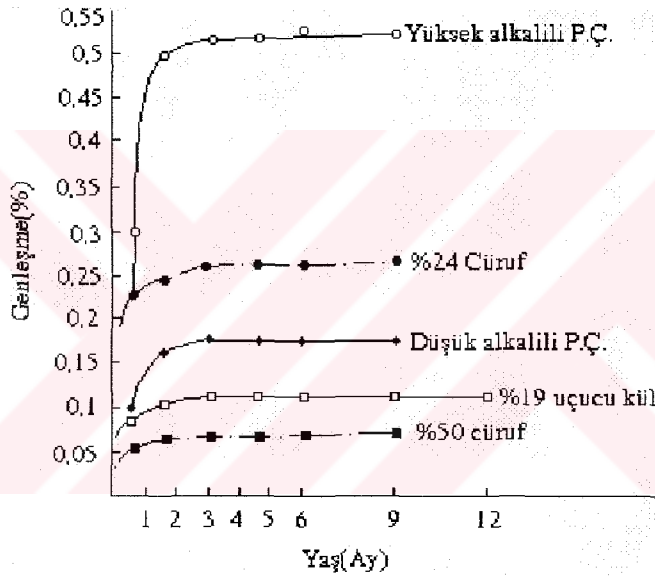
$$(\text{Na}_2\text{O})_e = \text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{K}_2\text{O} \quad (2.17)$$

Alkaliler, beton bünyesine çimentodan başka, agrega, karışım suyu, beton katkı maddeleri, beton kür suyu, buz çözücü tuzlar, zemin suyu, deniz suyu, ve endüstriyel atık sular vb. aracılığı ile de girebilir.

YFC'nun diğer önemli bir yararı da alkali-agrega reaksiyonuna karşı önemli etkisidir. Cürufu çimento %0,6'dan daha az alkali içeren portland çimentosuna alternatif bir çimento olarak kullanılabilir. Alkali-silika reaksiyonu agregalar alkali etkisinde kalırsa olur. YFC'nun çimentonun bir bölümü ile yer değiştirilerek kullanılması alkali miktarını azaltabilir. Alkali-silika reaksiyonundan ileri gelen hasar riskini azaltmak için önerilen çok sayıda alternatif çözüm

vardır. Bunlar: Betonun alkali içeriğinin sınırlandırılmasını, YFC veya uçucu kül kullanımını, düşük alkalili çimento kullanımını, reaktif olmayan agrega kullanımını içerir (Taşdemir vd., 2000).

Cürüflü çimentolar kullanılarak yapılan çok sayıda araştırma cüruf miktarının artmasıyla alkali-agrega reaksiyonunun neden olduğu genleşmelerin azaldığını göstermiştir. Yüksek miktarda alkali içeren bir portland çimentosunu %24 ve %50 oranlarıyla GYFC ile ikame edilmesi sonucunda ulaşılan alkali-agrega reaksiyonu genleşmeleri karşılaştırmalı olarak Şekil 2.5 'de verilmiştir.



Şekil 2.5 Cürüflü çimentolarla Portland çimentolarının alkali-agrega genleşmeleri bakımından karşılaştırılması (Tokyay ve Erdoğan, 2002)

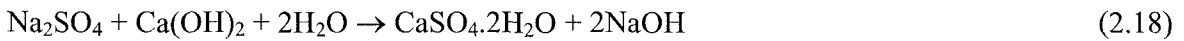
2.6.3 Sülfat Etkisi

Yeraltı sularında, bazı killi topraklarda ve cürüflü doldurulmuş arazilerde yüksek miktarlarda sodyum sülfat, kalsiyum sülfat, magnezyum sülfat ve potasyum sülfat gibi tuzlar bulunabilmektedir. Deniz suyunda da önemli miktarda sülfat yer almaktadır (Erdoğan, 2003).

Sertleşmiş betonun içerisine dışarıdan sızan sularla birlikte giren sülfatlar, çimentonun bazı bileşenleri ile reaksiyona girerek betonun zamanla bozulmasına neden olur. Bu etki sülfat

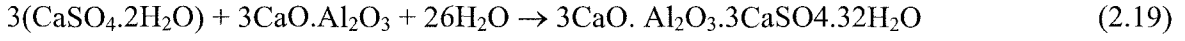
iyonlarının, sertleşmiş betondaki alüminli ve kalsiyumlu bileşenlerle kimyasal reaksiyona girmesi, etrenjit ve alçıtaşı oluşturması ile gerçekleşir. Reaksiyon ürünleri betonda genleşme yaratarak çatlaklara ve dağılmaya yol açar, agrega çimento aderansının etkilenmesiyle betonun mukavemeti düşer. Sülfatların betonda yarattığı yıpratıcı etki, "sülfat etkisi" olarak adlandırılmaktadır. Sülfat etkisine maruz betonun karakteristik görünümü, özellikle köşe ve kenarlardan başlayarak tüm kütleyle yayılan beyaz lekeler, çatlaklar ve dökülmelerdir. Betonun kolayca ufalanabildiği ve yumuşadığı görülür (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002; Erdoğan, 2003).

Sülfat etkisine bağlı olarak betonun yıpranması, donatı korozyonundan sonra ikinci sırada öneme haiz durabilite sorununu teşkil etmektedir. Bu tip yıpranma çoğunlukla deniz suyuna ve/veya sülfat içeren yeraltı sularına maruz beton yapılarda dikkat çekmektedir. Sülfatlar bu ortamlarda sodyum sülfat (Na_2SO_4), magnezyum sülfat (MgSO_4) ve kalsiyum sülfat (CaSO_4) bileşiminde bulunurlar. Bu tuzların çözünürlükleri oldukça yüksek olup konsantrasyonları 1000 ppm eşik değerini aşması halinde durabilite açısından beton için zarar teşkil ettikleri iddia edilmektedir. Yıpranma mekanizması hidrate olmuş çimento hamuru ile sülfat iyonları arasında meydana gelen kimyasal etkileşime endeksli olup zamana bağlı kompleks bir olaydır. Sülfat etkisinin zamana bağlı bir olay olarak nitelendirilmesinin nedeni sülfat iyonlarının beton içine difüzyonunun nispeten düşük hızlarda gerçekleşmesine atfedilmektedir. Sülfat etkisi sonucu meydana gelen ve beton için potansiyel zarar teşkil eden üç temel reaksiyon vardır. Bu reaksiyonlar hemen hemen aynı anda meydana gelen alçıtaşı ve etrenjit oluşumu ile C-S-H jelinin ayrışmasına sebebiyet veren reaksiyonlardır. Sülfat etkisi sonucu meydana gelen genleşme genellikle sülfatların $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve hidrate olmuş C_3A ile reaksiyona girmesiyle oluşan alçıtaşı ve etrenjit oluşumu ile ilgilidir. Sülfat iyonları betona nüfuz ettiklerinde öncelikle çimentonun hidratasyon ürünlerinden $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerler. Bu reaksiyon sonucunda, alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) meydana gelir.



Alçıtaşının kendisinin yarattığı hacim artışına ilaveten asıl önemli etkisi C_3A ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) ile doğrudan reaksiyona girerek sülfat içeriği bakımından zengin ancak çözünürlüğü olmayan bir

yapı gösteren etrenjit oluşumuna neden olmasıyla ortaya çıkar.



Bu şekilde meydana gelen etrenjit, bünyesinde mevcut yüksek oranda su nedeniyle çimento hamurunun genişlemesine ve dolayısıyla betonun çatlamasına neden olur (Erdoğdu ve Karataş, 2003).

Sülfat etkisinin şiddeti, toprakta ve suda bulunan sülfat iyonunun konsantrasyonuna bağlıdır. Çizelge 2.5 de ACI 201 standardında sülfat etkisi açısından yapılmış sınıflama gösterilmiştir.

Çizelge 2.5 Zemin suyu ve toprakta bulunan sülfat yoğunluklarının betona etkisi

Etki derecesi	Zeminde Suda çözünen sülfat (SO_4^{-2}) (%)	Suda SO_4^{-2} mg/lt
İhmal edilebilir	0.00 – 0.10	0 - 150
Orta	0.10 – 0.20	150 - 1500
Şiddetli	0.20 – 2.00	1500 - 10000
Çok Şiddetli	2.00 ve üstü	10000 ve üstü

Bu değerler beton ile sürekli temas eden durgun sular için geçerlidir. Su basıncının artması, ıslanma-kuruma olması gibi etkiler etkinlik derecesini artırır. Sülfat etkisini azaltabilmek için beton geçirimsiz olmalı ve üretiminde uygun nitelikte çimento ve/veya puzolan kullanılmalıdır. (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002; Erdoğan, 2003).

MgSO_4 , CaSO_4 ve Na_2SO_4 eriyiklerinin kullanıldığı bir araştırmada 130 değişik çimento kullanılmış ve yüksek fırın cüruflarının, miktarlarıyla orantılı olarak, sülfat direncini artırdığı belirlenmiştir (Tokyay ve Erdoğdu, 2002). Çizelge 2.6'da daha az Al_2O_3 içeren cürufların kullanımının yararlarını göstermektedir. Yüksek oranda C_3A içeren PÇ'nun sülfata direnci zayıftır. Al_2O_3 içeriği %11,5'in altında iken orta veya mükemmel sülfata dayanım elde edilir. Bunun için çimentonun %60'lık bir bölümünün cürufla yer değiştirmesi yeterli olmaktadır.

Çizelge 2.6 %4,4 Konsantrasyonlu Na₂SO₄'a dayanıklılık deney sonuçlarına cüruftaki alümina içeriğinin etkisi (Taşdemir vd., 2000)

Portland çimentosu		Yüksek fırın cürufu		Sülfata dayanıklılık yönünden değerlendirme
Tipi	C ₃ A, %	Oran	Al ₂ O ₃ , %	
Yüksek C ₃ A PÇ	14	0		çok zayıf
		60	14,7	zayıf/çok iyi
		70	14,7	çok iyi
		60	11,5	çok iyi
		60	9,3	çok iyi/mükemmel
		70	9,3	mükemmel
		60	7,5	mükemmel

2.6.4 Asit Etkisi

Akarsular, kar suları, organik atık taşıyan sistemler, bazı yer altı suları ile birçok değişik endüstri kollarından değişik türde asitler olabilmektedir. Beton içine sızan asit içeren sular, betonun genişleşip hasar görmesine yol açan kimyasal olaylara neden olmaktadır. Asitlerin betonda yarattığı yıpratıcı etki "asit etkisi" olarak adlandırılmaktadır (Erdoğan, 2003).

Asit etkisi sonucunda, sertleşmiş betonun içerisindeki kalsiyum hidroksit ve kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerinde çözünme yer almaktadır. Beton yüzeyinde yumuşak ince bir tabaka oluşmakta, beton daha gözenekli duruma gelmekte, dayanımı ve dayanıklılığı daha az olmaktadır (Erdoğan, 2003).

Asitler iyon değişimi ile çimento hamuru bileşenlerinden çözünebilen veya çözünmeyen kalsiyum tuzları meydana getirirler. Asitlerin sertleşmiş beton üzerindeki etkisi, kalsiyum bileşenlerini (Ca(OH)₂, CSH ve CAH), etkileyen asidin kalsiyum tuzlarına dönüştürmesi şeklinde gelişir. Kalsiyum tuzları suda yavaş veya hızlı çözündüklerinden, çimento harcı belirli zaman sürecinde çözülür ve beton harap olur. Dolayısıyla reaksiyonun hızı oluşan tuzun çözünebilirliğine bağlıdır (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

Asit reaksiyonlarının hızı ve şiddeti; asit tipine, etkilenme süresine, asit yoğunluğuna göre değişir. Ancak en önemli etken oluşan kalsiyum tuzunun çözünürlüğüdür. Çözünürlük arttıkça,

su ile taşınan maddeler zararı arttırmaktadır. Reaksiyonların gelişimine bağlı olarak sertleşmiş betonun yüzeyinden başlamak suretiyle bünyesinde yumuşama ve gözenekler oluşur (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

Asidin bütün portland çimentolarına önemli etkisi vardır. Asit etkisinin derecesi asidin pH'ı gibi bir çok faktöre bağlıdır. Cürüflü çimento ile üretilen betonlar Çizelge 2.7 de gösterildiği gibi 3,5 ile 5,5 pH derecesine sahip ortamda asit etkisine karşı yararlı olabilir. Bununla birlikte 3,5'un altındaki pH değerleri için ek koruma önlemleri gereklidir

Çizelge 2.7 Asitli ortamda beton (Taşdemir vd., 2000)

pH değeri	Beton için gerekenler
5,5'un üzeri	Özel önleme gereksinim yoktur
3,5-5,5	YFC betonu kullanılması gerekli
3,5'un altı	Ek koruma gerekli

2.6.5 Beton İçindeki Çeliğin Korozyonu

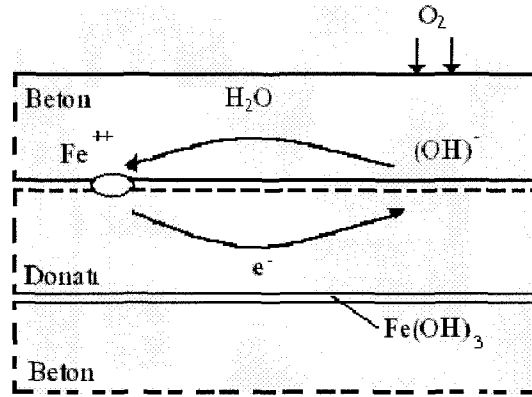
Donatının korozyonu, aderansın zayıflamasına, hatta ileri durumlarda yok olmasına neden olduğu için, betonarme elemanların maksimum dayanımını ve yapının servis ömrünü doğrudan etkiler. Donatıdaki korozyon ürününün neden olduğu hacim artışı, donatı ile beton arayüzündeki boşlukları doldurarak belirli bir değere kadar aderans dayanımında bir artışa neden olur, ileri aşamada korozyon ürünündeki hacim artışı, betonda çatlak oluşumuna ve ayrışmaya neden olur, aderans kaybolur, eleman betonarme olmaktan çıkar. Betonla donatının ayrılması, yapının herhangi bir etki altında daha kolayca göçmesi demektir.

Donatı üzerinde yeterli kalınlığa sahip, iyi bir beton donatıyı fiziksel ve kimyasal olarak dış etkilere karşı korur. Ca(OH)_2 'in varlığı nedeni ile alkalinitesi (pH=12) yüksek bir malzeme olan beton, bu özelliği ile betonarme elemandaki donatı yüzeyinde kararlı, koruyucu bir oksit tabakası oluşturur. Alkali pasivasyonu adı verilen bu olayda donatıdaki anodik akım yoğunluğu kısıtlanır, donatı korozyondan korunur. Betonun karbonatlaşması yada üretimde çimentoya cüruf, uçucu kül, silis dumanı gibi puzolan malzemeler katılması gibi nedenlerle ortamın alkalinitesi pH=8 'e

kadar düşer, betonun koruyuculuk özelliği kaybolur. Ayrıca ortamda Cl^- iyonları bulunursa, pH 'ın 11,5 'in üstünde olması durumunda bile çelikte çukurcuk korozyonu meydana gelir. Betona, agregalarla, karma suyu ile yada katkı maddeleri ile Cl^- karışması ve/veya Cl^- içeren suların etkisine maruz kalması betonarme korozyonunu hızlandıran çok önemli bir faktördür.

Beton içindeki çeliğin korozyonu, elektro-kimyasal süreç ile açıklanabilir. Çelik yüzeyinde oluşan farklı potansiyeldeki anodik ve katodik bölgeler, çimento hidratlarındaki tuz çözeltilerinin oluşturduğu elektrolit ile birleşir, donatının kendisi de elektronları ileten elektronik iletken görevini üstlenir. Dış kaynaklı akımın olmadığı durumda elektro-kimyasal reaksiyon için, açığa çıkan elektronların tüketildiği katodik reaksiyonun olması gerekir. Şekil 2.8 'de şematik olarak gösterilen betonarme elemanlarda donatının korozyonuna, betonun dayanımı, geçirimsizliği, çimentonun türü, dozajı, puzolan katkıların varlığı ve miktarı, karma suyunun özelliği, su/çimento oranı, katkı maddelerinin özelliği, miktarı, betonun kuru, elemanın boyutları, biçimi, örtü betonun paspayı kalınlığı, yapının yada elemanın içinde yer aldığı ortamın nemi, sıcaklığı, su veya çözeltilerle temas edip etmediği, bu çözeltilerin iyon konsantrasyonu, sıcaklığı vb. gibi çok sayıda faktör etki eder.

Betonarme elemanlarda donatı korozyonunun en belirgin göstergesi örtü betonunun çatlamasıdır. Donatıdaki 10-20 μ m gibi çok az kayıplar bile gevrek bir malzeme olan betonda 0.05-0.1 mm gibi gözle görünür çatlaklara neden olur (Aköz ve Çakır, 2002).



Şekil 2.6 Betonarmede donatının korozyonu

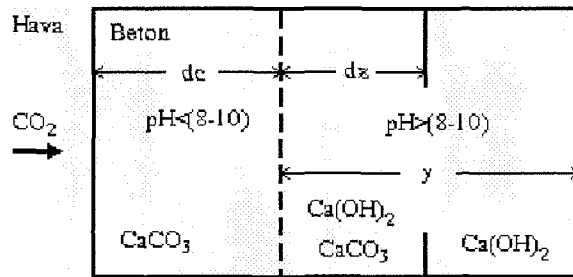
2.6.6 Karbonatlaşma

Fiziko-kimyasal bir süreç olan karbonatlaşma, ortamın alkalinitesini düşürerek, anodik akım yoğunluğunun kısıtlanmasına yardımcı olan koruyucu oksit tabakasının tahrip olmasına neden olur. Betonun alkalinitesi, hidrate olmuş çimentonun içerdiği Ca(OH)_2 ile sağlanır ve pH 12 civarındadır. Ancak Ca(OH)_2 zamanla havadaki CO_2 ile reaksiyona girerek CaCO_3 'e dönüşür ve pH azalır. Atmosferdeki miktarı hacimce %0.03 olan CO_2 nin kırsal bölgelerde bile karbonatlaşmaya olan etkisi söz konusudur. CO_2 miktarı laboratuarda %0.1 'e, büyük yerleşim merkezlerinde ortalama %0.3, maksimum % 1 'e yükselebilir. CO_2 konsantrasyonu arttıkça karbonatlaşma oranı artmaktadır. Karbonatlaşma derinliğinin birkaç mm ile sınırlı olduğu bilinmesine karşın, kusurlu betonda bazen karbonatlaşma derinliğinin 10 cm ' den de fazla olduğu tespit edilmiştir. Çünkü kusurlu betonda mekanik zorlamalar olmaksızın çatlaklar oluşur.

Karbonatlaşmamış bölgedeki boşluk suyunda çözünen havanın karbondioksiti bikarbonata dönüşür (2.20a), boşluk suyunda çözünen bir diğer madde Ca(OH)_2 'dir (2.20b). Ayrışan Ca(OH)_2 , H_2CO_3 ile reaksiyona girerek kararlı haldeki CaCO_3 'e ve suya dönüşür (2.20c).



Bu olay Şekil 2.7 'te görüldüğü gibi boşluk suyunda $(\text{OH})^-$ iyon miktarının azalmasına, pH 'ın düşmesine ($\text{pH} < 8-10$) ve pasivasyon niteliğinin kaybolmasına neden olur.



Şekil 2.7 Betonda karbonatlaşma olayı (Yüzer, 1998)

Karbonatlaşma olayı ekzotermik bir olaydır. $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 'e dönüşürken ağırlığı %35, hacmi ise %11.8 oranında artar. Bu hacim artışı iç boşluklarda yer alır ve oluşan ürün, reaksiyonun ilerlemesi için CO_2 gazına karşı daha az geçirimli hale gelir. Açığa çıkan ısı ise, reaksiyon sonucu oluşan suyun ve ürün içindeki kapiler veya serbest suyun buharlaşması için yeterlidir. Ortamın daha az geçirimli hale gelmesi ile CO_2 difüzyonu ve buharlaşma ile suyun azalması sonucu karbonatlaşma yavaşlar veya sona erer (Yüzer, 1998).

Karbonatlaşmanın daha az olabilmesini sağlayabilmek amacıyla yapılması gereken en önemli işlem, betonun mümkün olabildiği kadar geçirimsiz bir beton olarak üretilmesidir.

Karbonatlaşma sonucunda sertleşmiş çimento hamuru büzülme göstermekte, dolayısı ile, betonda çatlaklar oluşmaktadır. Karbonatlaşma sonucunda, kalsiyum hidroksitin çözünmesi nedeniyle, betonun içerisindeki mevcut olan alkalın ortam daha düşük düzeye inmektedir. Alkalinitenin azalması ile, betonda karbonatlaşmanın yer aldığı bölgelerdeki donatı korozyonu hızlanmaktadır (Erdoğan, 2003).

2.6.7 İslanma-Kuruma Etkisi

İslanma kuruma etkisini, su ile beton içine sızan tuzların kuruma esnasında suyun buharlaşmasıyla betonda kalması, ıslanma-kuruma tekrar sayısı arttıkça betondaki tuz yoğunluğunun artması, tekrar ıslanma periyodunda kuru tuzların suyla temas edince hacimlerinin artarak betonda genişleme yaratmaları ve hasar oluşturulmaları olarak özetlemek mümkündür. Ayrıca tuzların kristalleşirken de büyük basınçlar oluşturur. Ayrıca, kapiler yolla emilen deniz suyunun atmosfere açık bölgelerde buharlaşması da benzer etkiyi ortaya çıkarır. Bir yüzü ıslak diğer yüzü kuru olan iskele, rıhtım gibi yapılarda bu sebeple oluşan hasarlara daha sık rastlanmaktadır (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

Tekrarlı ıslanma kuruma ve aşınma sonucu önce ince agregaların beton kütesinden ayrılmaya başladığı, açığa çıkan kaba agregaların da zamanla yok olduğu ve daha fazla çimento hamuru bağlayıcı matrisinin zamanla bu etkilere açık hale geldiği, görülür. Bu durumda uygun agreganın

seçimi önemlidir. Su emmesi çok düşük, yoğun bir agregaya kullanılmalıdır. Olay fiziksel olduğu için çimentonun kimyasal yapısı ikinci planda kalmaktadır. Beton yüzey bölgesinin geçirimsizliği mutlaka sağlanmalıdır (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

2.6.8 Betonda Klorür Etkisi

Alkalin ortamda bulunan ve koruyucu oksit tabakasının depasivasyonuna neden olan bir diğer olay Cl^- iyonlarının varlığıdır. Betona klorür dış ortamdan difüzyonla girdiği gibi, önceden hammaddeler yoluyla da gelmiş olabilir. Klorür iyonlarının dışarıdan difüzyonu deniz suyu veya diğer çözeltilerin beton ile teması durumunda olur. Klorür iyonlarının dışarıdan difüzyonu deniz suyu veya diğer çözeltilerin beton ile teması durumunda olur. Bu durumda betonda oluşacak hasar, deniz suyunun veya çözeltilerin Cl^- konsantrasyonuna bağlıdır. Deniz yapılarında deniz sularının alçalıp yükseldiği bölgelerdeki önemli korozyon hasarları da deniz suyundaki klorür iyonlarının varlığına ve konsantrasyonunun bu bölgedeki artışına bağlanabilir (Yüzer, 1998). Türkiye denizlerinin ve dünyadaki bazı deniz ve okyanus sularının klorür konsantrasyonları Çizelge 2.8 ve Çizelge 2.9 'da verilmiştir.

Çizelge 2.8 Türkiye denizlerindeki Cl^- iyon konsantrasyonu (Akman, 1992)

Deniz	Karadeniz	Marmara	Ege	Akdeniz
Cl^- (mg/L)	8400	12840	18770	19270

Çizelge 2.9 Çeşitli deniz sularındaki Cl^- iyon konsantrasyonu (Tokyay, 1997)

Deniz	Akdeniz	Karadeniz	Hazar Denizi	Atlas O.	Dünya Ort.
Cl^- (%)	2.138	0.95	4.173	1.783	1.98

Klorür iyonları betona üretim aşamasında, agregaya, çimento, katkı maddeleri veya karma suyu ile karışabilir. Betonda işlenebilmeyi sağlamak, prizi hızlandırmak veya geciktirmek veya betona ek nitelikler kazandırmak amacı ile üretim sırasında çimento ağırlığının %1-3'ü oranında akışkanlaştırıcı, süperakışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı katkı maddeleri katılır. Priz hızlandırıcılar Cl^- içeren katkılardır ve bunlardan yaygın olarak kullanılanı kalsiyum klorürdür.

Yüksek sülfat iyonu konsantrasyonu olan sular, çimento hamurundaki C_3A ve CSH ile sülfat iyonlarının reaksiyonundan etrenjit oluşur. Yapılan araştırmalar klorür iyonlarının bulunduğu ortamda oluşan etrenjitin genişmeye yol açmadığını ve deniz suyunda çözüldüğünü göstermektedir. Bu bulgu oluşan etrenjitin ancak yüksek alkalili ortamda su emerek şiştiği ve genişmeye yol açtığı şeklinde yorumlanmaktadır. Yüksek C_3A içerikli çimento kullanıldığında hasar genişme ile değil katı bileşenlerin erozyona uğrayarak kütlede ayrılmalarıyla kendini göstermektedir. Yapılan araştırmalar, sülfat etkisi açısından zararlı olan çimento C_3A bileşeninin aynı zamanda çimentoya klorür bağlama özelliğini kazandırdığını, böylece donatının klorür korozyonundan etkilenme riskini azalttığını göstermektedir. Çimento C_3A bileşeni ile klorür iyonları arasındaki reaksiyonla beton içinde Friedel tuzu ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) adı verilen kalsiyum kloro alüminatlar oluşur. Düşük C_3A oranlı çimentoların klorür geçirimsizliği fazla olduğundan, bu durumda betonarme donatısının korozyon problemi de dikkate alınarak çözüm üretilmelidir. Ayrıca, karbonatlaşma sonucu Friedel tuzunun çözüldüğünü böylece klorür iyonlarının tekrar serbest kalarak donatının korozyon riskini daha da arttırdıkları da göz önünde bulundurulmalıdır.

Beton üzerindeki bir diğer kimyasal etki ise magnezyum iyonlarının kalsiyum iyonlarıyla yaptığı (2.21) reaksiyonunda gösterilen yer değiştirme reaksiyonudur.



Oluşan $Mg(OH)_2$ brusit adıyla bilinir. Çökelerek yüzeydeki gözenekleri tıkar ve koruyucu bir tabaka oluşturarak reaksiyonun gelişimini yavaşlatır. Ayrıca $Ca(OH)_2$ in CO_2 ile reaksiyonundan aragonit formundaki $CaCO_3$ oluşur ve çökelir. Kısa sürede oluşan bu koruyucu tabakaların kalınlığı 20-50 μm civarındadır ve yapının suya tamamen gömülü kısımlarında görülürler. Ancak aşındırıcı etkilere maruz kısımlarda bu tabakaların uzaklaşmasıyla reaksiyon tekrarlanır ve kütle kaybı süreklilik kazanır. Betonun magnezyum tuzlarıyla uzun süreli teması halinde CSH içindeki kalsiyumun da Mg iyonlarıyla yer değiştirdiği görülür ki oluşan magnezyum silikat hidratın (MSH) bağlayıcılık özelliği yoktur, kolayca parçalanabilir. Bu durum betonda rijitlik ve dayanım

kaybına yol açar (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

YFC'nun en yararlı etkilerinden biri klorun geçiş hızını ve dolayısıyla klorürün neden olduğu korozyonu önemli ölçüde azaltmasıdır. YFC içindeki yüksek alüminatlar bağlayıcılık sağlarlar. Bununla birlikte Dhir ve arkadaşları YFC hamurunun normal portland çimentosu hamuruna göre daha yüksek klorür bağlama kapasitesine sahip olduğuna ve bu farkın YFC'nun yer değiştirme miktarı ile arttığını gösterdiler. Betonun geçirimsizliği betona (veya çimento hamuruna) çözeltilerin veya gazların ilerlemesini ve hızını kontrol eder. Betonun geçirimsizliği su/çimento oranından etkilenir. Klor iyonları çok tahrip edicidir, buna özellikle kış aylarında buz çözücü olarak kullanılan tuzlar neden olur. Çizelge 2.8 'de gösterildiği gibi betonda YFC kullanımı klorür difüzyonu riskini önemli ölçüde azaltır. Çizelgede 2.10 dan görüldüğü gibi portland çimento ile üretilen betonlara klor iyonlarının geçişi YFC'lu benzer karışımlarınının 10 katıdır.

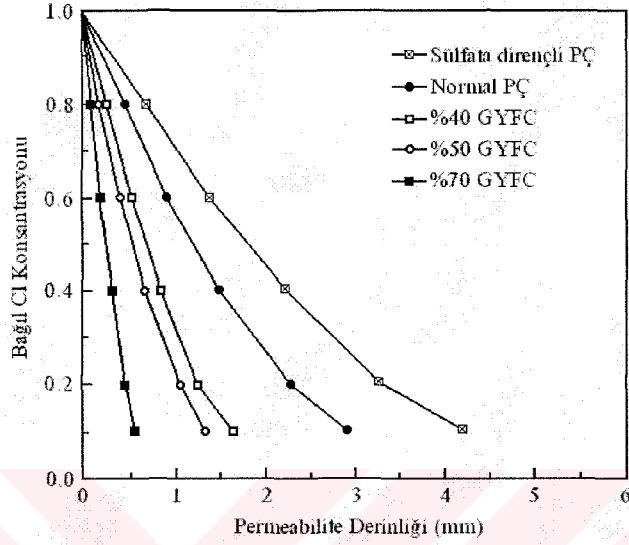
Çizelge 2.10 Klorür iyonları geçişinin bağıl değeri (Taşdemir vd., 2000)

Çimento tipi	Cl geçirgenliğinin bağıl değeri
PÇ + %65 ÖYFC	1
PÇ + %30 CÇ	3
PÇ	10
Sülfata dayanıklı çimento	25

Cürufu çimentolar ile üretilen betonların hareketli iyon difüzyonuna karşı direncinin portland çimentosu ile üretilenlere göre belirgin bir biçimde yüksektir (Taşdemir vd., 2000).

Klor permeabilitesinin tayini için yapılan bir araştırmada 100x200x300 mm boyutlarındaki 28 günlük beton plakaların üst yüzeyine %5 NaCl eriyiği göllendirme suretiyle 4 gün uygulanmış ve bunu takip eden 3 günde ise saf su uygulanmıştır. Söz konusu çevrim 48 hafta sürdürülmüş ve daha sonra yüzeyden 10, 20, 30, 40 ve 50 mm derinliklerinden numuneler alınıp klor analizi yapılmıştır. Bu deney yönteminin uygulandığı bir araştırmada bir sülfata dayanıklı çimento, bir normal portland çimentosu ve %40, %50 ve %70 GYFC içeren üç cürufu çimento kullanılmıştır.

Bu araştırmanın sonucunda yüksek fırın cürufu kullanımının klor permeabilitesini azalttığı ve kullanılan cüruf miktarı arttıkça bu etkinin daha belirginleştiği saptanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.8 de gösterilmiştir 3 farklı şekilde gerçekleşir (Tokyay ve Erdoğan, 2002).



Şekil 2.8 48 hafta sonunda çeşitli çimentolar için klor penetrasyonları (Tokyay ve Erdoğan, 2002)

Su/çimento oranı arttıkça klor iyonu difüzyon katsayısı artmaktadır. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül miktarının artmasıyla klor iyonu difüzyon katsayısı düşmektedir. YFC'da klor iyon difüzyon katsayısının düşüşü uçucu küle göre daha fazla olmaktadır. Uçucu küllü ve YFC'lu betonların klor iyon difüzyon katsayıları $10-13 \text{ m}^2/\text{sn}$ 'den daha düşük olabilir (Leng, 2000).

Yüksek fırın cürufu betonun klorür iyon difüzyonunu engelleme mekanizması:

Yüksek fırın cürufu betondaki boşlukları doldurarak boşlukların şeklini ve dağılımını düzenlemektedir. Yüksek fırın cürufu betonların hidrasyonunda daha fazla C-S-H jeli oluşmakta, daha fazla klor iyonu adsorbe edilmekte ve klor iyonlarının difüzyon yolları tıkanmaktadır. Yüksek fırın cürufu betonda, portland çimentolu betondakinden daha fazla Ca^{+2} , Al^{+3} , AlOH^{+2} ve Si^{+4} iyonları bulunmaktadır. Bu iyonlar difüzyonu engellerler ve klor iyonlarının hareketini kısıtlar. Yüksek fırın cürufu daha fazla C_3A 'a sahiptir. Böylece daha fazla

klor iyonu adsorbe edilmiş olur ($C_3A.CaCl_2.10H_2O$).

Su/çimento oranının artması ile klor iyonlarının difüzyonunun artmasının sebebi şu şekilde açıklanabilir. Klor iyonlarının betonun içine difüzyonu; çimento pastasındaki boşluklardan, agreganın boşluklarından ve çimento pastası ile agrega arasındaki boşluklardan olmak üzere 3 farklı şekilde gerçekleşir. Agreganın geçirgenliği düşürülür ve agrega ile çimento pastası arasındaki boşluklar olmazsa, esas difüzyon yolu çimento pastasında oluşur. Klor iyonlarının difüzyon hızını etkileyen iki ana unsur çimento pastasının hacmi ve yoğunluğudur. Hidratasyon derecesi sabit bir değer aldığı zaman, su/çimento oranından elde edilen kılcal boşluk hacmi bağlayıcı dayanımını önemli derecede etkiler. Su/çimento oranının artması ile daha fazla boşluk ve difüzyon yolları şekillenir ve klor iyonlarına karşı dayanım düşer böylece klor iyon difüzyon katsayısı yükselir (Leng, 2000).

Cürüflü çimentolara deniz suyu etkisinin belirlenmesi için yapılan bir deneyde, deniz suyuna tamamıyla batırılmış 40x40x160 mm harç numunelerle yapılan deneylerde kullanılan cüruf miktarının etkisi araştırılmış ve çimento içindeki GYFC miktarının artmasıyla genleşmenin azaldığı saptanmıştır. Bu araştırmadan elde edilen sonuçlar Çizelge 2.11 de verilmiştir.

Çizelge 2.11 1 yıl deniz suyunda bekleyen numunelerin boy uzamaları
(Tokyay ve Erdoğan, 2002)

Çimento	$\Delta l/l$ ($\mu m/m$)
P.Ç.	1000
%75 PÇ+ %25 GYFC	750
%70 PÇ+ %30 GYFC	690
%20 PÇ+ %80 GYFC	190

Diğer bir araştırmada ise 100x50x50 mm beton numuneler yarı boylarına kadar deniz suyuna batırılarak deneyler yapılmıştır ve bu deneyler sonucunda da en yüksek performans %70 in üzerinde cüruf içeren çimentolarla elde edilmiştir (Tokyay ve Erdoğan, 2002).

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmada demir-çelik tesislerinden atık malzeme olarak çıkan yüksek fırın cürufunun beton üretiminde kullanılması halinde betonun durabilitesine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, belirli oranlarda yüksek fırın cürufu, çimento ile yer değiştirmeli olarak betona katılmış, magnezyum klorürlü çözeltiler ile laboratuvar ortamında ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmış, betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinde zamanla meydana gelecek değişimler araştırılmıştır.

Ön deneyler, numune üretimi, eskitme süreci ve kontrol deneyleri olmak üzere 4 aşamada gerçekleştirilen deneysel çalışmada, malzemelerin özellikleri ön deneyler ile belirlenmiş, numune üretiminde kullanılan malzemeler ve özellikleri, numune üretimi, eskitme süreci ve kontrol deneyleri ile ilgili açıklamalar aşağıda verilmiştir. Yüksek fırın cürufunun betonun durabilitesine etkilerinin karşılaştırılması için üç farklı oranda yüksek fırın cürufu katkılı seriler ve şahit numuneler üretilmiştir. Her üretimde taze betonda birim ağırlık, çökme ve hava boşluğu tayini deneyleri yapılmıştır.

Betonun basınç, yarma dayanımları ve penetrasyon derinliğinin belirlenmesi ve bu özelliklerde zamanla meydana gelen değişimlerin tespit edilebilmesi amacıyla 60 adet basınç, 60 adet yarma deneyi için olmak üzere toplam 120 adet 100*200 mm boyutlu silindir beton numune, permeabilite deneyi için 60 adet 150*150*150 mm boyutlu küp beton numune üretilmiştir. Üretimden itibaren tüm numuneler 28 gün $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki suda kür edilmiştir. 28 gün bekletildikten sonra şahit numunelerin kontrol deneyleri yapılmış, diğer numuneler 1 çevrim (28+28 gün), 3 çevrim (28+84 gün), 6 çevrim (28+168 gün) olarak su ve magnezyum klorürlü çözeltiler ile laboratuvar ortamında ıslanma-kuruma etkisine bırakılmıştır.

3.1 Üretimde Kullanılan Malzemeler

Beton üretiminde, özellikleri aşağıda verilen agregalar, çimento, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, üçüncü nesil süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi, klorür etkisini araştırmak için sanayi tipi

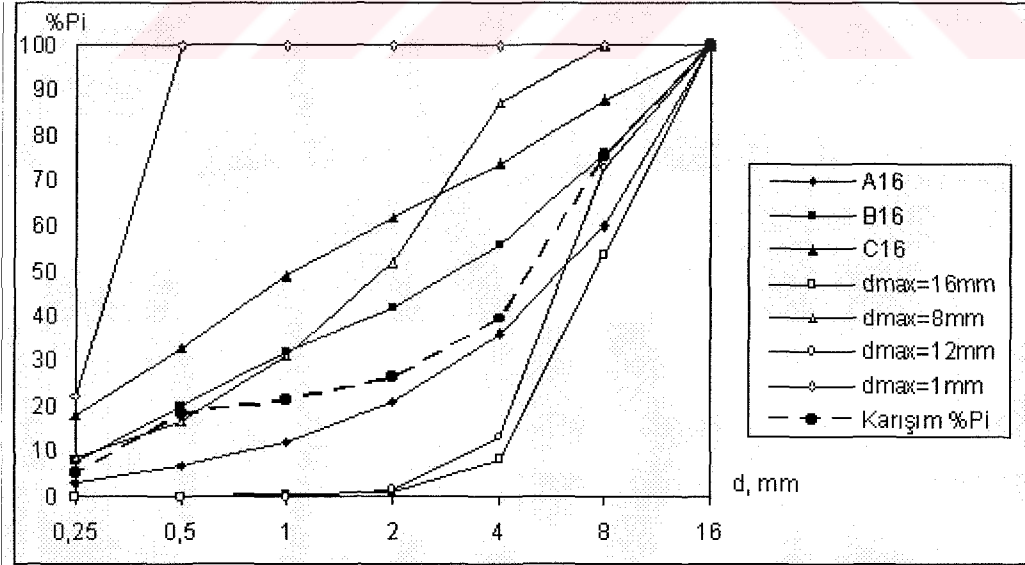
magnezyum klorür tuzu kullanılmıştır.

3.1.1 Agregalar

Beton üretiminde fiziksel özellikleri Çizelge 3.1 de verilen maksimum dane çapı 16 mm (1. agrega), 12 mm (2. agrega) ve 8 mm (3. agrega) olan kalker esaslı kırmataşlar ile maksimum dane çapı 1 mm olan silis esaslı kum kullanılmıştır. Agregaların özelliklerinin ve granülometrisinin belirlendiği deneyler TS 3529 ve TS 706 ya uygun olarak yapılmış, agregaların ve karışımın granülometri eğrileri Şekil 3.1 de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Üretimde kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Agrega	$\beta(\text{gr}/\text{cm}^3)$	$\gamma(\text{gr}/\text{cm}^3)$	Karışım Oranları (%)
dmax = 16mm	1,28	2,61	35
dmax = 12mm	1,35	2,61	30
dmax = 8mm	1,74	2,61	20
dmax = 1 mm (Kum)	1,51	2,61	15



Şekil 3.1 Agregalara ait granülometri eğrileri

3.1.2 Çimento

Beton üretiminde, fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi Çizelge 3.2 de, mekanik özellikleri Çizelge 3.3 de verilen PÇ 42,5 çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun özgül ağırlık, yoğurma suyu, priz süresi gibi fiziksel, eğilme ve basınç dayanımı gibi mekanik özellikleri için deneyler TS EN 196-1,2,3 e göre tekrarlanmıştır.

Çizelge 3.2 Çimentonun ve YFC' nin kimyasal analizi

Kimyasal Özellikler (%)	Portland Çimentosu (PÇ 42,5)		Yüksek Fırın Cürufu	
CaO	64,01		33,48	
SiO ₂ (Çözünen)	20,01		41,43	
Al ₂ O ₃	5,28		10,28	
Fe ₂ O ₃	3,65		3,48	
MgO	1,21		6,05	
SO ₃	2,47		-	
Cl ⁻	0,033		0,012	
Na ₂ O/K ₂ O	0,25/0,81		0,41/1,72	
Kükürt	-		1,61	
Kızdırma Kaybı	2,27		0,61	
Çözülemeyen Kalıntı (max)	0,32		-	
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,14		2,89	
Özgül yüzey, Blaine (cm ² /g)	3570		4730	
Priz Süresi : Vicat (saat)	Başlangıç	2 saat 25 dakika		
	Bitiş	3 saat		
3CaO.SiO ₂ (C ₃ S)	60,78			
2CaO.SiO ₂ (C ₂ S)	11,70			
3CaO.Al ₂ O ₃ (C ₃ A)	7,82			
4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ (C ₄ AF)	11,11			

Çizelge 3.3 Çimentonun ve yüksek fırın cürufunun mekanik deney sonuçları

Ürün	Eğilme Dayanımı (MPa)		Basınç Dayanımı (MPa)	
	7. gün	28. gün	7. gün	28. gün
Çimento (PÇ 42,5)	6,3	9,3	33,9	50,1
Cüruf	2,6	-	9,3	-

3.1.3 Yüksek Fırın Cürufu

Kimyasal özellikleri Çizelge 3.2 de verilen yüksek fırın cürufu, Blaine özgül yüzeyi $4730 \text{ cm}^2/\text{g}$ olacak şekilde öğütülmüştür. İnceltelen yüksek fırın cürufunun puzolanik aktivitesi TS 25'e göre araştırılmış, sonuçlar Çizelge 3.3 de verilmiştir.

3.1.4 Süperakışkanlaştırıcı

Farklı cüruf içeriğindeki taze betonda eşit işlenebilmeyi sağlamak amacı ile piyasadan temin edilen ve özellikleri Çizelge 3.4 de verilen modifiye polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

Çizelge 3.4 Katkı maddesinin özellikleri

Tipi	3. nesil Süperakışkanlaştırıcı beton katkısı, yüksek oranda su azaltıcı.
Standart	EN 934-2 & SIA 162 (1989) standardına uygun
Esası	Modifiye Polikarboksilat Esaslı
Görünüm	Uçuk sarı
Katı Madde Oranı	%34
Yoğunluk	$1,10 \pm 0,02 \text{ kg/l}$
Viskozitesi	Düşük
PH	-
Klorür oranı	Yok

3.1.5 Magnezyum Klorür Tuzu

Betonun kalıcılık özelliklerinin belirlenmesi amacı ile planlanan deneylerde Cl^- konsantrasyonu farklı çözeltilerin hazırlanması için özellikleri Çizelge 3.5 de verilen sanayi tipi MgCl_2 tuzu kullanılmıştır. Çözeltilerin Cl^- iyon konsantrasyonu Argentometrik titrasyon yöntemi ile deneysel olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.5 MgCl_2 tuzunun özellikleri

Bileşen	MgCl_2	CaCl_2	NaCl	KCl	Kristalleşme Suyu
%	47.0	2.1	0.5	0.2	100'e kadar

3.2 Numune Üretimi

Deneyel çalışmada üç farklı oranda yüksek fırın cürufu içeren numuneler, eskitme sürecinde kullanılan klorür konsantrasyonuna göre, Cl⁻ iyon konsantrasyonu yaklaşık 0 kabul edilen (su) grup ile 10.000 mg/L ve 40.000 mg/L olan gruplar olmak üzere 3 ana gruba ayrılmıştır.

3.2.1 Beton Üretimi

Çimento dozajı 350 kg/m³ olan betona, çimento ağırlığının %0 (katkısız), %30 ve %60 oranlarında yüksek fırın cürufu, çimento ile yerdeğiştirmeli olarak katılmıştır. Üretimde, su/bağlayıcı oranı 0,49 ile sabit tutulmuş, akıcı kıvamdaki betonda ortalama 20 cm lik çökme, %0,5 oranında sürepakışkanlaştırıcı katkı maddesi ile sağlanmıştır. Özellikleri yukarıda verilen malzemeler ile üretilen betonun karışım oranları ön deneyler ile belirlenmiş, 1 m³ taze beton için gerekli malzeme miktarları ve taze betonun birim ağırlığı Çizelge 3.6 'da verilmiştir. Beton üretimi, 50 lt kapasiteli cebri karıştırıcılı betonyerde yapılmış, taze betonda aşağıda açıklandığı gibi birim ağırlık, çökme ve hava boşluğu tayini deneyleri yapılmıştır.

Çizelge 3.6 1 m³ taze beton için gerekli olan gerçek malzeme miktarları

Seri		C0	C3	C6
Çimento Dozajı (kg)		380	263	151
Cüruf (kg)		0	112	227
Su (lt)		186	184	185
Süper Akışkanlaştırıcı	(%)	0,5	0,5	0,5
	(lt)	1,90	1,88	1,89
1. Agrega (kg)		688	679	684
2. Agrega (kg)		589	589	586
3. Agrega (kg)		393	388	390
Kum (kg)		295	291	293

3.2.2 Taze Betonda Yapılan Deneyler

Üretilen her farklı seride birim ağırlık, hava miktarı tayini ve iki saat süre onbeş dakika ara ile çökme deneyleri yapılmıştır.

3.2.2.1 Birim Ağırlık Deneyi ve Betondaki Hava Miktarı Tayini

Hacmi belirli bir kalıp içerisine yerleştirilen ve sıkıştırılan beton yüzeyi düzeltildikten sonra, kalıp içerisindeki betonun net ağırlığı bulunmaktadır. Birim ağırlık değeri betonun net ağırlığı kabın hacmine bölünerek bulunmaktadır. Çizelge 3.7 'de cüruf yüzdesi serilere göre birim ağırlıklar kg/m^3 cinsinden ve TS EN 12350-7 'e göre taze betondaki hava boşluğu miktarı (%) cinsinden verilmiştir.

Çizelge 3.7 Taze beton birim ağırlıkları ve hava miktarı tayini

Grup	%0 YFC	%30 YFC	%60 YFC
Birim ağırlık (kg/m^3)	2543	2517	2515
Hava miktarı (%)	3,1	2,7	3,6

3.2.2.2 Çökme Deneyi

Üç farklı oranda yüksek fırın cürufu katkılı serilerin üretimden itibaren iki saat süresince, onbeş dakika arayla TS EN 12350-2 e göre çökme deneyleri yapılmıştır. Çökme değerleri ve bu değerler için TS 11222 'e göre belirlenen kıvam sınıfları ile her seri için işlenebilme kaybı Çizelge 3.8 'de verilmiştir.

Çizelge 3.8 Çökme deneyi sonuçları ve iki saat sonunda çökme kaybı

Çökme (cm) ve Kıvam Sınıfı	Zaman (dk)									Çökme Kaybı
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	
0% YFC	20	19	19	18	17,5	17,5	17	14,5	14	%30
	K4						K3			
30% YFC	20	19	18	17	15,5	15	14	13	11	%45
	K4				K3					
60% YFC	20,5	19,5	16	15	14	13,5	13	12	10,5	%49
	K4			K3						

3.2.3 Numunelerin Kodlanması

Bu beton ile 120 adet 100/200 mm boyutlu silindir numune ve 60 adet 150 mm boyutlu küp numune üretilmiştir. Çalışmanın bu döneminde numune üretimi tamamlanmış, numuneler sırasıyla YFC oranına (C0, C3, C6), Cl⁻ konsantrasyonuna (S, M1, M4), kontrol deneylerine (B, Y, P) ve çevrim adedine (Ş, 1, 3, 6) göre dört farklı biçimde kodlanmış ve bu kodların açıklamaları Çizelge 3.9 'da verilmiştir.

Çizelge 3.9 Numune kodlarının açıklamaları

Kod	Açıklama
C0	YFC Katkısız Beton
C3	%30 YFC Katkılı Beton
C6	%60 YFC Katkılı Beton
S	Suda bekletilen numuneler
M1	Cl ⁻ iyon konsantrasyonuna 10.000 mg/l olan MgCl ₂ çözeltisinde bekletilen numuneler
M4	Cl ⁻ iyon konsantrasyonuna 40.000 mg/l olan MgCl ₂ çözeltisinde bekletilen numuneler
B	Basınç deneyi için üretilmiş numuneler (60 adet)
Y	Yarma deneyi için üretilmiş numuneler (60 adet)
P	Permeabilite deneyi için üretilmiş numuneler (60 adet)
Ş	Şahit
1	1 çevrim çözeltide bekletilen numuneler
3	3 çevrim çözeltide bekletilen numuneler
6	6 çevrim çözeltide bekletilen numuneler

3.3 Numunelerin Kürü ve Eskitme Süreci

Beton numuneler, üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış, 28. güne kadar sıcaklığı $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ olan su içinde kür edilmiştir. Bu günden sonra suda saklanacak olanlar aynı koşullarda bırakılmış, diğer iki grup Cl⁻ iyon konsantrasyonu 10.000 mg/L (M1) ve 40.000 mg/L (M4) olan MgCl₂ çözeltilerine maruz bırakılmıştır. Islanma-kuruma etkisi oluşturmak için beton numuneler, 14 gün sonra sudan ve çözeltilerden çıkarılmış, 14 gün süre ile ortalama sıcaklığı

$20\pm 3^{\circ}\text{C}$, ortalama bağıl nemi $\%60\pm\%10$ olan laboratuvar ortamında tutulmuştur. Bu süreçte, 14 gün süren bir periyotluk su ve çözeltideki ıslanma etkisinden sonra, 14 gün süren bir periyotluk kuruma etkisi 1 çevrim kabul edilmiştir.

Numuneler, çevrim uygulanmayan ve 28. günde kontrol deneyleri yapılan grup, şahit (Ş) kabul edilerek, 1, 3, 6 çevrimlik etkilere maruz bırakılmak üzere toplam 3 gruba ayrılmıştır. Çevrimi tamamlanan beton numunelerde ağırlık, ses geçiş hızı ölçümleri, basınç, yarma, karbonatlaşma derinliği, farklı derinliklerde Cl^- iyonu tayini ve permeabilite deneyleri yapılmıştır.

3.4 Kontrol Deneyleri

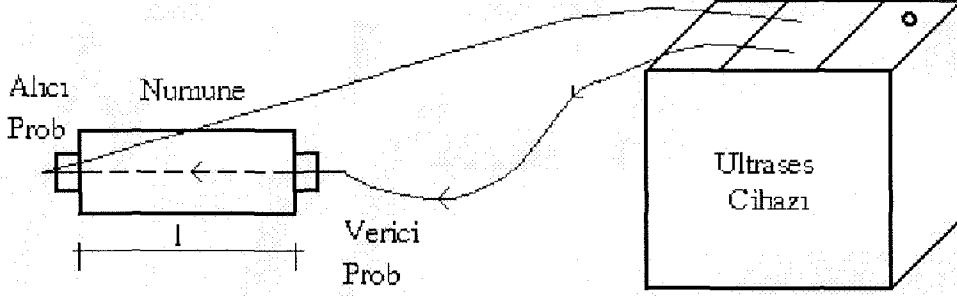
Betonda, başlangıçta, 28. günde ve ıslanma-kuruma çevrimlerinin yukarıda belirtilen adetlerinden sonra aşağıda açıklanan kontrol deneyleri yapılmıştır.

Betonun basınç ve yarma dayanımını belirlemek, su ve klorürlü çözeltiler ile gerçekleştirilen ıslanma-kuruma etkisinde bu özelliklerinde meydana gelecek değişimleri belirlemek amacı ile başlangıçta (28. günde), 1., 3., 6. çevrimlerden sonra 100/200 mm boyutlu silindir numunelerde basınç ve yarma deneyleri, 150*150*150 mm küp numunelerde permeabilite deneyi yapılmıştır. Bu deneylerden önce tüm numunelerde ayrıca ağırlık ve ses geçiş hızı ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca yarma deneyinden iki yarım silindire ayrılan parçalardan birinde karbonatlaşma derinliği ve diğerinde ise farklı derinliklerinde alınan tozlarda Cl^- tayini yapılmıştır.

3.4.1 Ağırlık ve Ultrases Ölçümü

Birim ağırlığı belirlemek amacı ile tüm numuneler, başlangıçta ve ıslanma-kuruma çevrimi tamamlandıktan sonra basınç, yarma ve permeabilite deneylerinden önce 4 kg kapasiteli 0,1 gr. duyarlıklı terazide tartılmıştır. Numunelerin hacmi, geometrik olarak hesaplanmış, birim ağırlıkları (β , kg/dm^3) belirlenmiştir. Aynı numunelerde daha sonra frekansı 55 kHz, modeli ASTM 597-BS 1881'e uygun olan ultrases aleti ile Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi ses geçiş süresi (t, μs) ölçülmüştür. Ölçümlerde direkt iletim yöntemi uygulanmış, ölçümler problemler yer değiştirilerek 2 kez tekrarlanmıştır. Ölçüm yapılan numune boyutunun, okunan zamanın

ortalamasına oranlanması ile ses geçiş hızı (V , km/sn) hesaplanmıştır. Betonun taze, 1 günlük, 28 günlük ve deney günü birim ağırlıkları ile 28 günlük ve deney gününe ait ses geçiş hızı sırasıyla kg/m^3 ve km/sn cinsinden Ekler Bölümünde verilmiştir.



Şekil 3.2 Numunelerde Ses Geçiş Hızının Ölçülmesi

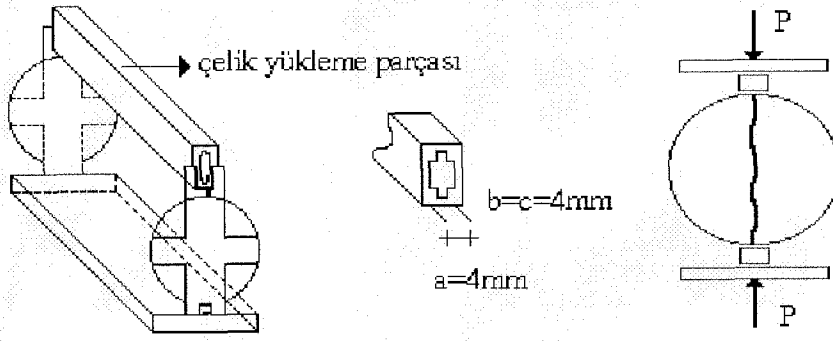
3.4.2 Basınç Deneyi

Beton numunelerde başlangıçta ve ıslanma-kuruma çevrimi tamamlandıktan sonra basınç deneyi Şekil 3.3 de görülen düzeneğe yardımıyla yapılmıştır. Deney, 100/200 mm boyutlu silindir numunelerde 3000 kN kapasiteli AutoTest basınç aletinde 2,4 kN/s sabit yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Deney TS EN 12390-3'e uygun olarak yapılmış, her bir numunede belirlenen kırma yükünden (P_k, kN), basınç dayanımı ($f_c, \text{N/mm}^2$), kırma yükünün kesit alanına oranlanmasıyla belirlenmiştir. Basınç deneyinin ortalama değeri MPa cinsinden Çizelge 3.12 de verilmiştir.

3.4.3 Yarma deneyi

Betonun çekme dayanımını belirlemek amacı ile başlangıçta (şahit), 1. çevrim, 3. çevrim, 6. çevrimlerden sonra Şekil 3.3 de görüldüğü gibi BS 1881: Part 117'ye uygun olarak geliştirilen yarma düzeneğinde yarma deneyi yapılmıştır. Yarma deneyi toplam 60 adet 100/200 mm boyutlu silindir numunede 3000 kN kapasiteli universal basınç aletinde 0.8 kN/s lik sabit yükleme hızı ile gerçekleştirilmiş, kırma yükü (P_{ky}, kN) belirlenmiştir. Yarma dayanımı ($f_{cy}, \text{N/mm}^2$) (3.1) bağıntısından yararlanılarak hesaplanmış ve ortalama değerler MPa cinsinden

Çizelge 3.12 de verilmiştir.



Şekil 3.3 Yarma deney düzeneği

$$f_{cs} = \frac{2 \cdot P_{ks}}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (3.1)$$

f_{cs} : yarma dayanımı (N/mm^2)

P_{ks} : kırma yükü (kN)

d : silindir çapı (mm)

l : silindir boyu (mm)

3.4.4 Karbonatlaşma Derinliğinin Belirlenmesi

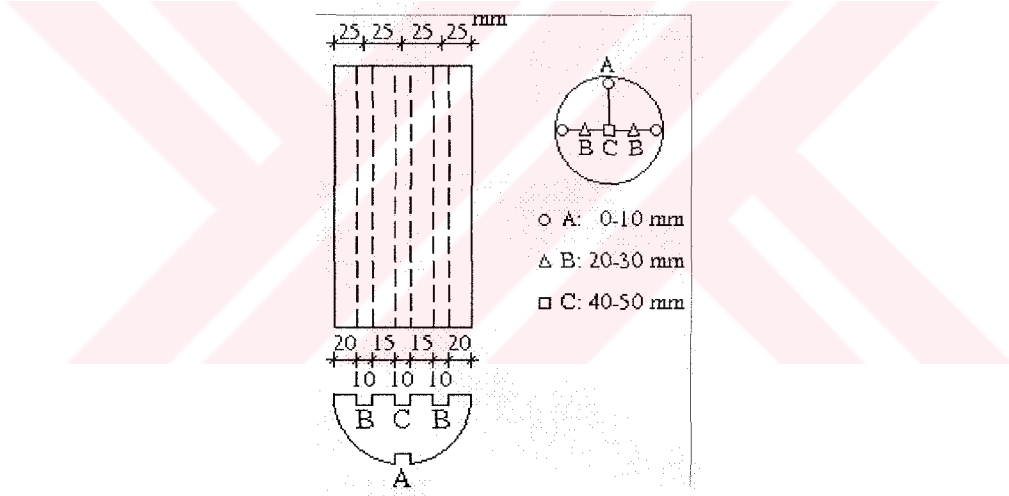
Karbonatlaşma derinliğini belirlemek amacı ile yarma deneyinde iki yarım silindir parçaya ayrılan numunelerden bir tanesinin yüzeyine zaman kaybetmeden, indikatör olarak pH'ı 8.2-9.8 olan fenolftalein ve etil alkol ile hazırlanmış %1'lik fenolftalein çözeltisi püskürtülmüştür. Çözelti püskürtüldükten hemen sonra, kırık beton yüzeyinde kırmızı-mor renge dönüşen karbonatlaşmamış ve yüzeyden itibaren rengi değişmeyen karbonatlaşmış olmak üzere iki bölge oluşmuştur. Karbonatlaşma derinliği (d ,mm) 10 değişik noktadan ölçülmüş, ortalama değerler mm cinsinden Çizelge 3.10 da verilmiştir.

Çizelge 3.10 Karbonatlaşma derinlikleri (mm)

Ş	C0			C3			C6		
	S	M1	M4	S	M1	M4	S	M1	M4
Ş	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	1-1,5	-	-	3-4	0-0,5	0,5-0,5

3.4.5 Cl⁻ Tayini

Yarma deneyi sonucunda elde edilen iki yarım silindir parçadan bir tanesinde Şekil 3.4 de görüldüğü gibi, yüzeyden itibaren 0-10 mm, 20-30 mm ve 45-50 mm' lik derinliklerden ucu 7 mm çaplı matkap yardımı ile toz numuneler çıkarılmıştır. Bu toz numunelerde Argentometrik titrasyon yöntem ile Cl⁻ iyon tayini deneyleri yapılmıştır.



Şekil 3.4 Beton numunelerinde klorür tayini için toz numune alınan derinlikler

Matkap ucu kırık yüzeyden veya numunenin yanal yüzeyinden en fazla 1 cm içeriye girmiştir. Çıkarılan toz 600µ elekten elenmiş ve toz:su oranı ağırlıkça 1:5 olmak üzere destile su ile 30 dakika karıştırılmıştır. Bu karışımın, süzgeç kağıdından filtre edilmesiyle hazırlanan çözelti numunenin pH ı WTW marka Mikroprossor 537 model pH metre ile ölçülmüştür. Karışımından alınan numunede Argentometrik titrasyon yöntemi ile Cl⁻ miktarı tayin edilmiştir. Bu yöntemle hazırlanan çözelti, Cl⁻ miktarının 50 mg/L 'den fazla olmaması amaçlanarak seyreltilmiştir. Argentometrik yöntemin geçerliliği için, ayrıca çözelti pH ının 7 ile 10

arasında olması gerekir. Deney sırasında, ölçülen pH ın bu değerlerin dışında olması durumunda çözeltiliye, pH ı azaltmak için 0,1N H₂SO₄, arttırmak için 0,1N NaOH damlatılmıştır. Klorür tayini deneyinde indikatör olarak 1 ml K₂CrO₄ kullanılmış, çözeltili 0.0141N AgNO₃ ile titre edilmiş, (3.2) bağıntısı ile Cl⁻ miktarı hesaplanmıştır. Deney sonuçlarından Cl⁻ iyon konsantrasyonunun (mg/l) derinliğe bağlı değişimi Çizelge 3.11 de verilmiştir.

$$C_f = \frac{(\alpha_A - \alpha_B) \cdot N \cdot 35450}{V_c} \quad (3.2)$$

α_A : Harcanan gümüşnitrat miktarı (ml)

α_B : Destile su için harcanan gümüşnitrat miktarı (ml)

N : Gümüşnitratın normalitesi (0.0141N)

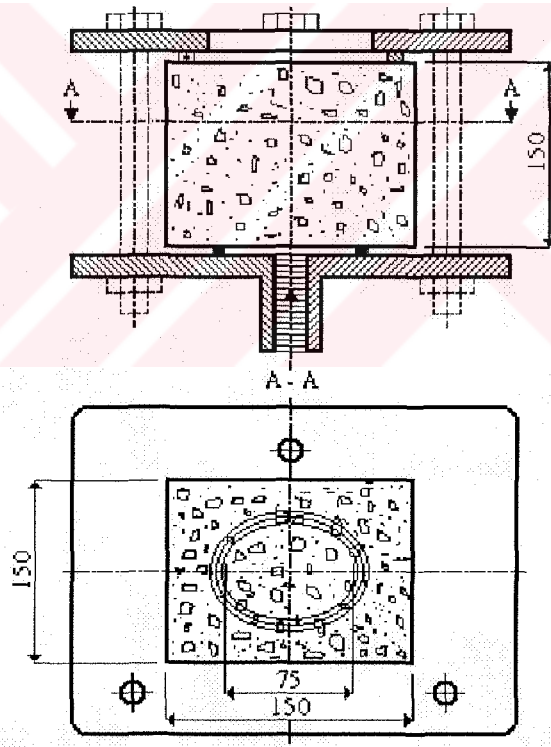
V_c : Çözelti hacmi

Çizelge 3.11 Farklı derinliklerdeki Cl⁻ konsantrasyonları (mg/L)

		0-10 mm derinliği			20-30 mm derinliği			45-50 mm derinliği		
		S	M1	M4	S	M1	M4	S	M1	M4
C0	Ş	0			1			0,5		
	1	7,5	76,5	196	14,5	3	0	7,5	0	0
	3	10,0	428	620	0	2	16,5	0	0	1,5
	6	16,5	683	836	0	11	15	0	2	1,5
C3	Ş	0			0			0		
	1	0	234	170	0	0	0	0	0	0
	3	0	370	640	0	0	3,5	0	0	7
	6	0	426	711	0	0,5	1,3	0	0,5	0
C6	Ş	0			0			0		
	1	0,5	190	359	0,3	0	2	0	0	0
	3	0	233	519	0	1	2,5	0	0	2,5
	6	2	284	710	0	1,5	3	0	1,5	1

3.4.6 Permeabilite Deneyi

Islanma-kuruma tekrar sayısı tamamlanan 15 cm boyutlu küp numunelerde permeabilite deneyi TS EN 12390-8'den yararlanılarak yapılmıştır. Numuneler, Şekil 3.6 'da görüldüğü gibi, üst yüzeyinden 24 saat süre ile 800 kPa basınçlı suya maruz bırakılmıştır. 24 saat sonra düzeneden çıkarılan numunelerin su uygulanan yüzeydeki fazla su silinerek temizlenmiş, tartılmış ve su uygulanan yüzeye dik şekilde ortasından yarılmıştır. İkiye ayrılan numunenin basınçlı su uygulanan yüzeyinden itibaren su işleme derinliği (h_w , mm) gözlenmiş, maksimum ve minimum değerleri belirlenmiş, ortalama sonuçlar mm cinsinden Çizelge 3.12 de verilmiştir.



Şekil 3.5 Permeabilite deney düzeneği

Çizelge 3.12 Basınç ve yarma dayanımları ile penetrasyon derinlikleri

		Basınç Dayanımı (N/mm ²)			Yarma Dayanımı (N/mm ²)			Penetrasyon Derinliği (min - max) (mm - mm)		
		S	M1	M4	S	M1	M4	S	M1	M4
C0	§	42,1			2,8			0-0		
	1	42,5	47,1	36,4	3,0	2,8	1,6	0-0	0-0	0-0
	3	47,1	35,8	39,1	3,2	2,4	3,0	7,5-19	1,5-4,5	3,5-10
	6	38,3	51,8	46,4	2,8	5,1	3,8	4,5-6,5	3-5	5-6
C3	§	38,0			3,2			0-0		
	1	32,6	36,1	37,3	3,9	2,7	3,2	0-0	2,5-10	7,5-15,5
	3	37,6	37,9	42,8	3,2	3,3	2,1	4,5-20	2,5-9	9-21,5
	6	35,4	38,6	37,5	2,0	3,7	3,0	6-12,5	6,5-13,5	3-9,5
C6	§	27,9			2,7			2-14		
	1	34,2	35,1	35,9	2,5	3,2	3,2	3,5-15	1-16	1,5-21
	3	36,6	36,3	36,7	2,7	2,5	2,2	5,5-20	7-23	4,5-18
	6	40,9	40,2	36,2	2,9	2,8	3,4	6,5-14,5	2,5-5,5	6,5-14,5

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ve İRDELENMESİ

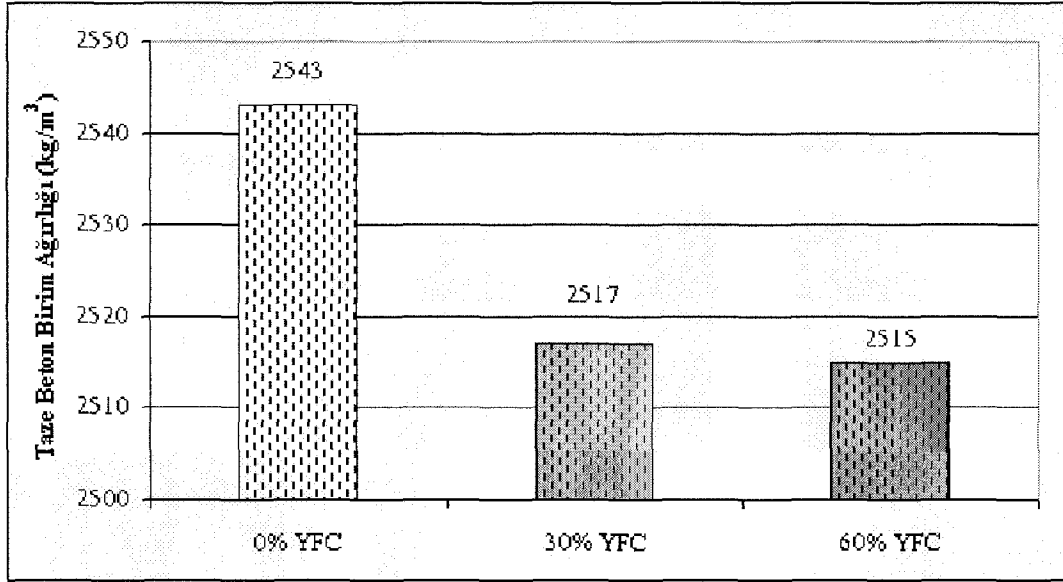
Beton üretiminde çimento yerine ikameli olarak kullanılan yüksek fırın cürufu, betonun zararlı ortamlara maruz bırakılması halinde, betonun basınç dayanımı, yarma dayanımı ve basınçlı su işleme derinliği özelliklerinde, zamanla meydana gelecek değişimlerinin araştırılması amacıyla yapılan deneysel çalışmada:

Yüksek fırın cürufu betona üretim aşamasında, çimento ağırlığının %0 (C0), %30 (C3) ve %60 (C6) oranlarında yerdeğiştirmeli olarak katılmıştır. Bu serilerde üretim esnasında yapılan deneyler ile taze beton özellikleri araştırılmıştır. Üretilen tüm numuneler 28 gün kirece doymun su ile dolu havuzda bekletildikten sonra 14 gün klorür konsantrasyonları 0(S), 10000 (M1) ve 40000 (M4) mg/L olan MgCl₂ çözeltilerinde ve 14 gün laboratuvar ortamında havada bekletilerek 1 çevrimleri tamamlanmıştır. 28. günden sonra kaç kere ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmasına göre 0(şahit), 1, 3, 6 çevrim olarak gruplanan numuneler bu günlerde yapılan deneyler ile sertleşmiş beton özellikleri araştırılmıştır.

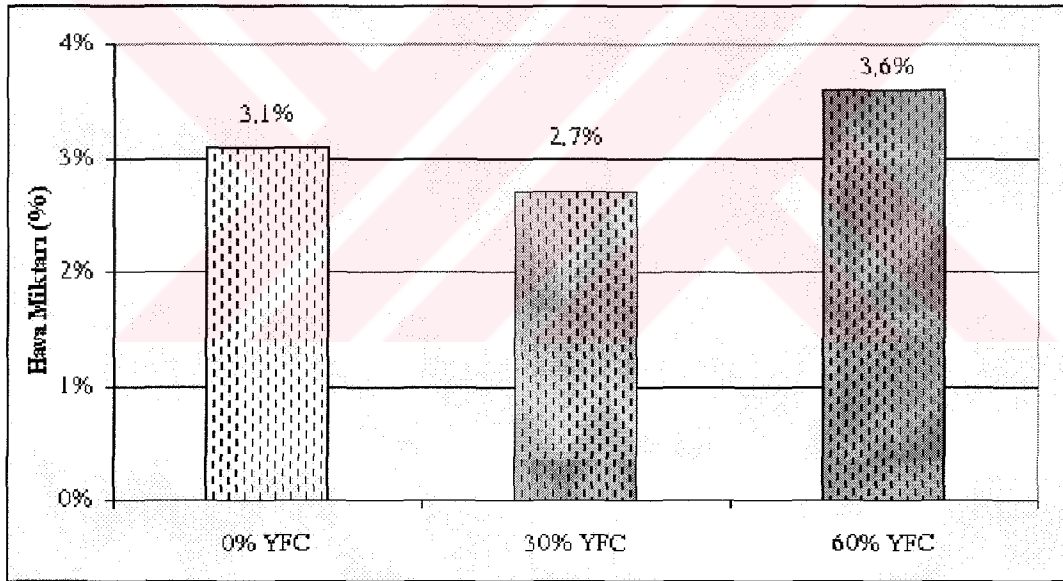
4.1 Taze Beton Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Deneysel çalışmada 3 farklı seride, her üretimde taze betonun birim ağırlık, taze betonda hava boşluğu miktarı ve çökme deneyi yapılmıştır. Taze betonlardaki birim ağırlıklar hava boşluğu miktarı Çizelge 3.7 de verilmiştir. Taze betonun birim ağırlığı Şekil 4.1 de ve hava boşluğu miktarı Şekil 4.2 de yüksek fırın cürufu oranının değişimine göre verilmiştir.

Yapılan birim ağırlık deneylerinden, çimentonun azaltılıp yerine yüksek fırın cürufu katılmasıyla birim ağırlıkta bir düşüş olduğu Şekil 4.1 e bakarak görülebilir. Bu düşüşün nedeni yüksek fırın cürufunun özgül ağırlığının, çimentonun özgül ağırlığından düşük olmasıdır, ancak yüksek fırın cürufu ikame oranı birim ağırlıktaki değişimi etkilememiştir. Hava miktarı tayinlerinde ise birim ağırlığın, yüksek fırın cürufu oranına göre düşüş gösterirken, hava miktarının artması beklenebilirdi. Ancak Şekil 4.2 den de görülebileceği gibi yüksek fırın cürufu katkısız seriye göre, %30 yüksek fırın cürufu katkılı serilerde %0,4 lük bir düşüş, %60 yüksek fırın cürufu katkılı serilerde %0,5 'lik bir artış olmuştur.



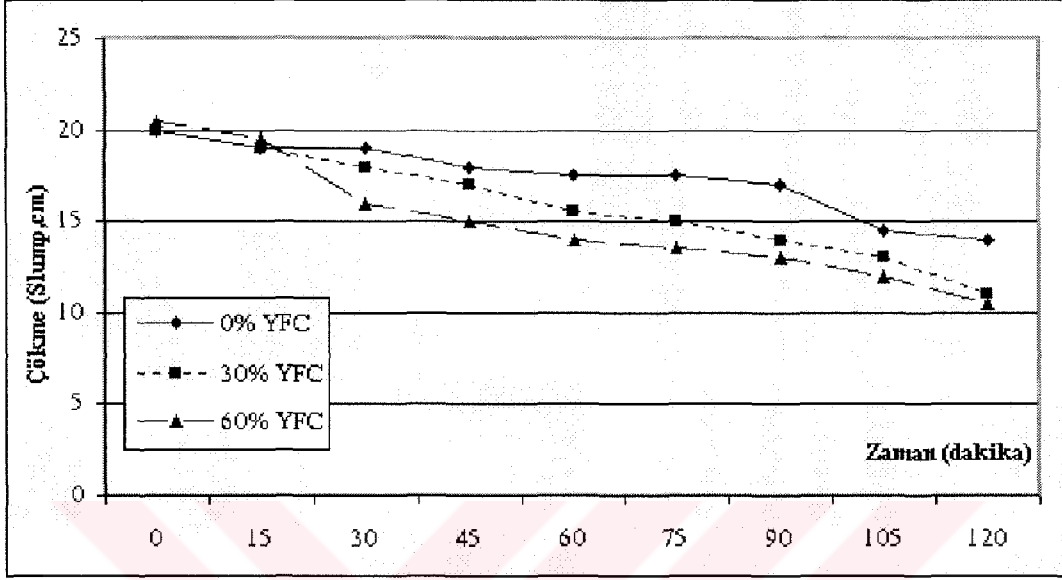
Şekil 4.1 Taze beton birim ağırlığının YFC oranıyla değişimi



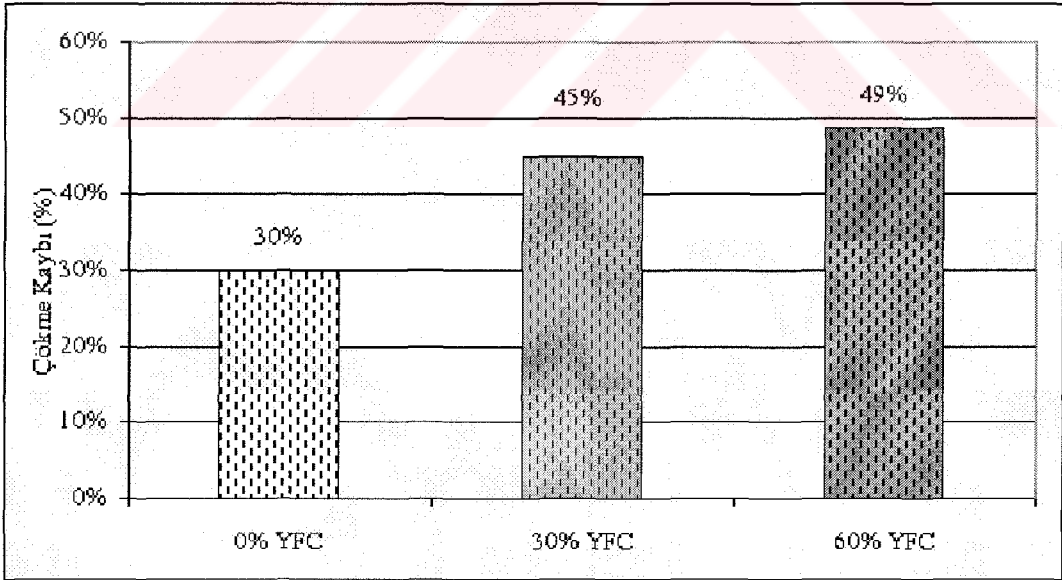
Şekil 4.2 Taze betondaki hava miktarının YFC oranıyla değişimi

İşlenebilme dikkate alınarak yapılan çökme deneyi, başlangıçta 15., 30., 45., 60., 75., 90., 105., 120., dakikalarda tekrarlanmıştır; çökme deneyi sonuçları, çökme miktarları sonucunda her 15 dakika için TS 11222 de belirtilen kıvam sınıfları ile iki saat sonunda ki işlenebilme kaybı Çizelge 3.8 de verilmiştir. Çökme miktarının zamanla değişimi ve iki saat sonundaki çökme kaybı Şekil 4.3 de YFC katkı yüzdesine göre değişimi verilmiştir. Bu sonuçlara göre

üretimde eşit işlenebilmeye sahip betonlardaki yüksek fırın cürufu ileriki dakikalarda etkisini göstermiş ve 30. dakikadan itibaren çökme miktarları, YFC oranının artmasıyla azalmıştır. YFC katkı oranı %60 olduğunda çökme kaybı %50'ye ulaşmıştır.



Şekil 4.3 Çökme miktarının zamanla değişimi



Şekil 4.4 İki saat sonundaki çökme kaybının YFC oranıyla değişimi

4.2 Sertleşmiş Beton Özelliklerinin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Sertleşmiş beton numuneleri üretimden itibaren 28 gün sonra su dolu havuzda bekledikten sonra 0(şahit), 1 çevrim, 3 çevrim ve 6 çevrim olarak değişik klorür konsantrasyonları olan çözelti havuzlarında bekletilmiştir. Bu süreler sonunda basınç, yarma ve basınçlı su işleme (penetrasyon) derinliği deneylerinden elde edilen sonuçlar ve ayrıca yapılan birim ağırlık, ses geçiş hızı, karbonatlaşma derinliği ve farklı derinliklerdeki klorür konsantrasyonları ile ilgili değerlendirme ve irdeleme aşağıda verilmiştir.

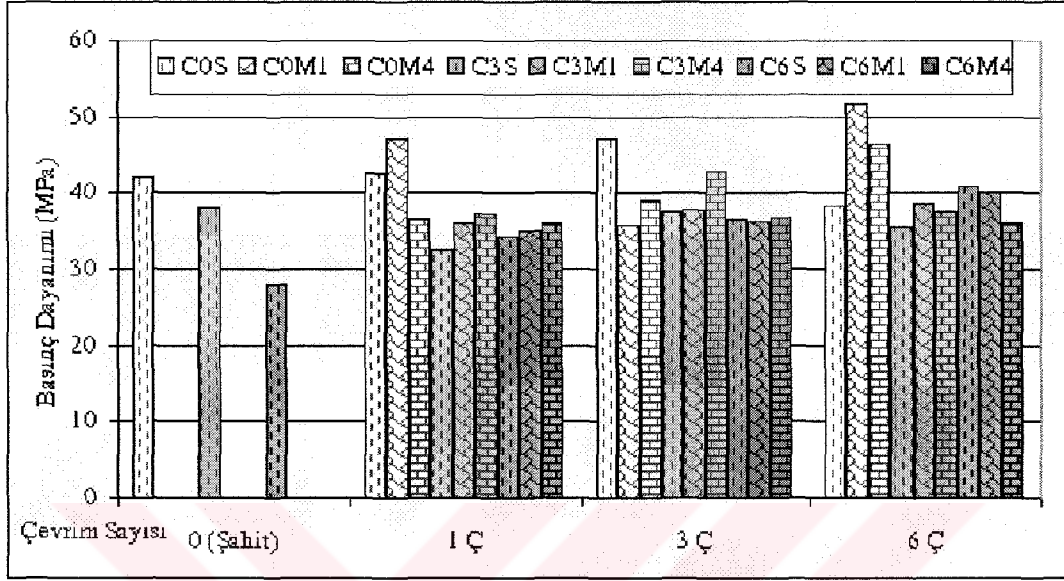
4.2.1 Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı (f_{cc} , N/mm²), 100*200 mm boyutlu silindir numunelerde 28. (şahit), 28 + 28. (1 çevrim), 28 + 84. (3 çevrim) ve 28 + 168. (6 çevrim) günlerinde yapılan basınç deneyi sonucunda bulunan kırma yükü numunelerin basınç yapılan yüzünün alanına bölünerek N/mm² cinsinden hesaplanmış ve ortalama değerler Çizelge 3.12 de verilmiştir. Şekil 4.5 de yüksek fırın cürufu oranı sabit tutularak klorürün etkisi, Şekil 4.6 da klorür konsantrasyonu sabit tutularak yüksek fırın cürufu etkisinin betonun basınç dayanımı ve çevrim adediyle ilişkileri verilmiştir.

Çizelge 3.12 'den görüldüğü gibi üretimden sonra 28. gündeki basınç dayanımlarında, YFC ikame oranının %0 dan %30 a çıkmasıyla birlikte %10 luk, YFC ikame oranının %0 dan %60 a çıkmasıyla birlikte yaklaşık %35 lik bir düşüş olmuştur.

C0 serisinin **M4** grubunda, **1** çevrim numunenin basınç dayanımı şahit numunenin basınç dayanımına göre yaklaşık %14 azalmış, **3** çevrim numunede ise %7 azalmış, fakat **6** çevrim sonunda basınç dayanımı şahit numunenin basınç dayanımına göre yaklaşık %10 artmıştır. **C0** serisinin **M1** grubunda, **1** çevrim numunenin basınç dayanımı şahit numuneye göre %12 artış gösterirken, **3** çevrim numunenin basınç dayanımı %15 düşmüş, fakat, **6** çevrim numunenin basınç dayanımı %23 artmıştır. **C0** serisinin **S** grubunda basınç dayanımı şahit numuneye göre çevrim sayısının artması ile basınç dayanımı artış gösterirken, **6** çevrim numunenin basınç dayanımı, **3** çevrim numuneye göre %10 'a varan bir düşüş olmuştur. Bu serinin 3 çevrim numunelerinin çözeltilerindeki klorür konsantrasyonunun 0 'dan, 10000 ve 40000

mg/l ye çıkması ile basınç dayanımları sırasıyla %24 ve %17 düşmesine rağmen, 6 çevrim numunelerinin çözeltilerindeki klorür miktarının 0' dan, 10000 ve 40000 mg/l ye çıkması ile basınç dayanımları sırası ile %35 ve %21 artmıştır.

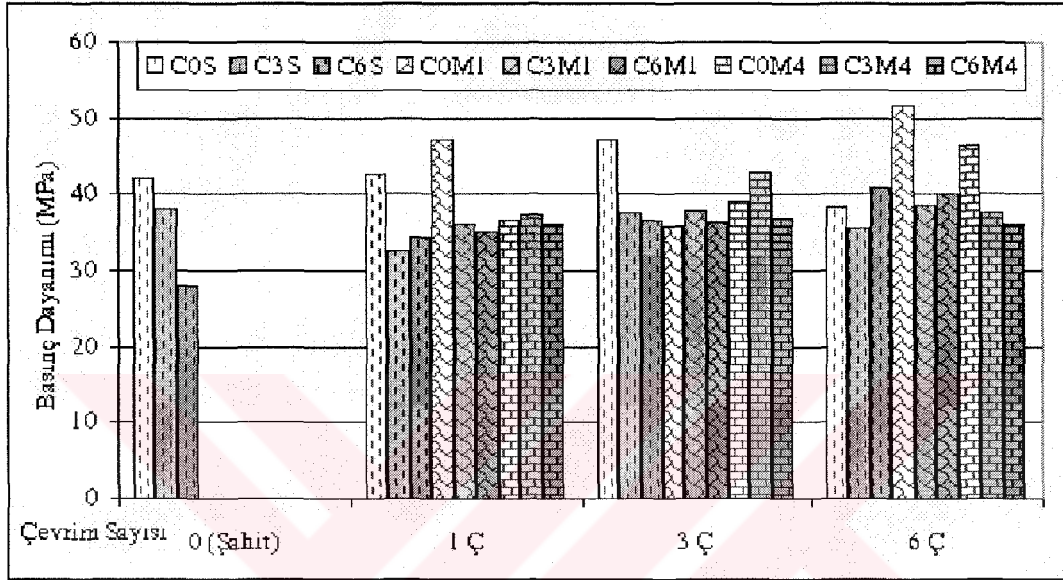


Şekil 4.5 Basınç dayanımına farklı çevrimlerdeki betonun Cl konsantrasyon etkisi

C3 serisinin bütün numunelerinin basınç dayanımının, numunelerin bekleme koşullarından ve bekleme sürelerinden büyük oranlarda etkilenmediği görülmüştür. Bu serinin tüm gruplardaki ve çevrim dilimlerindeki basınç dayanımlarının yaklaşık 36–39 MPa arasında kaldığı görülmüştür. **S** grubunun 1 çevrim numunenin basınç dayanımı şahit numuneye göre yaklaşık 5 MPa düşerken, **M4** grubunun 3 çevrim numunenin basınç dayanımı 5 MPa artmıştır.

C6 serisinin numunelerinde; basınç dayanımları (şahit numuneler hariç) birbirlerine oldukça yakındır. Bu serinin 1 ve 3 çevrim tüm grupların basınç dayanımının 34–37 MPa arasında, kaldığı gözlemlenmiştir. Bu serideki 1 çevrim tüm numunelerin basınç dayanımı şahit numuneye göre ortalama %25, 3 çevrim tüm numunelerin basınç dayanımı şahit numuneye göre ortalama %30 artmıştır. Bu serinin **S**, **M1** ve **M4** gruplarının, 6 çevrim numunelerinde basınç dayanımı, şahit numuneye göre sırasıyla yaklaşık %46, %45 ve %30 artmıştır.

S grubunun numunelerinin bütün çevrim dilimlerinde en yüksek basınç dayanımı **C0** serisindedir. Sadece 6 çevrimlik, **C6** serisinin basınç dayanımı, **C0** serisine göre daha yüksektir. Bu gruplarda yüksek fırın cürufu katılması ile beraber basınç dayanımı düşmektedir. Ancak YFC ikame oranının (şahitler hariç), basınç dayanımı üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.6 Farklı çevrimlerdeki betonun basınç dayanımına YFC oranının etkisi

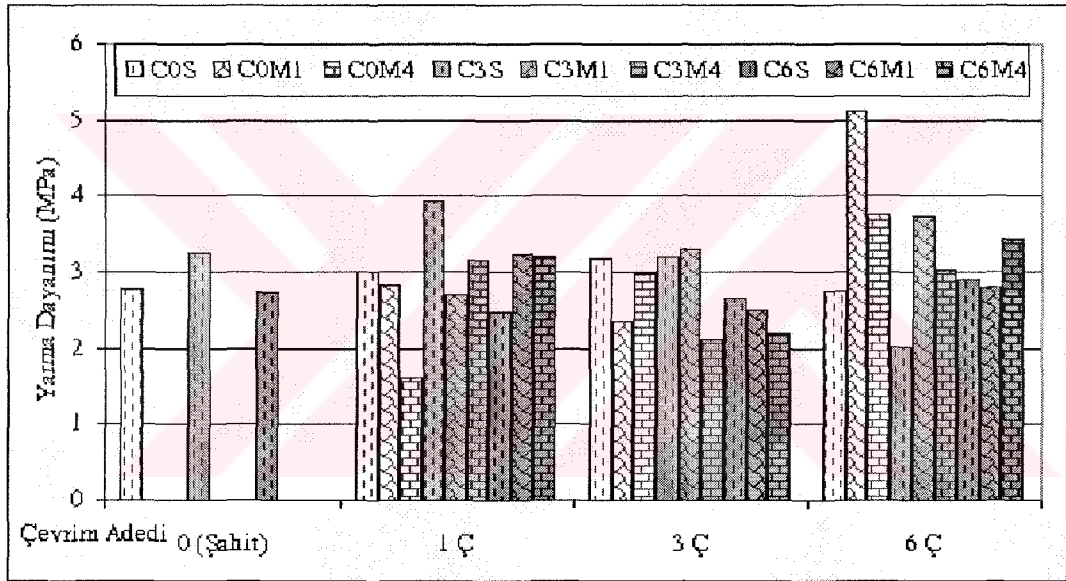
M1 gruplarında; **C0** serisinin (3 çevrim hariç) basınç dayanımı YFC katkılı serilere göre daha yüksektir. Yüksek fırın cürufunun katılma oranının basınç dayanımını etkilemediği, basınç dayanımının 35 – 40 MPa arasında kaldığı gözlenmiştir.

M4 gruplarında; hepsinde basınç dayanımının 36,4 – 46,4 MPa arasında kaldığı görülmüştür. YFC katkılı serilerin basınç dayanımları birbirine çok yakındır. Çimento ile ikame edilen gruplarda zamanın beton basınç dayanımına bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. **C3** serisinde ise 3 çevrim numunenin beton basınç dayanımında bir artış vardır. **C0** serisinde ise şahit numuneye göre bir azalma olmakla beraber çevrim adedinin artışı ile beton basınç dayanımında bir artış vardır.

4.2.2 Yarma Dayanımı

Yarma dayanımı (f_{cs} , N/mm^2), $100*200$ mm boyutlu silindir numunelerde 28., 28 + 28. (1 çevrim), 28 + 84. (3 çevrim), 28 + 168. (6 çevrim) günlerde yapılan yarma deneyi sonucunda 3.2 bağıntısından hesaplanmış, ortalama değerler Çizelge 3.12 'de verilmiştir. Şekil 4.7 de yüksek fırın cürufu oranı sabit tutularak klorürün etkisi, Şekil 4.8 da Cl konsantrasyonu sabit tutularak yüksek fırın cürufu etkisinin betonun yarma dayanımı ve çevrim adediyle ilişkileri verilmiştir.

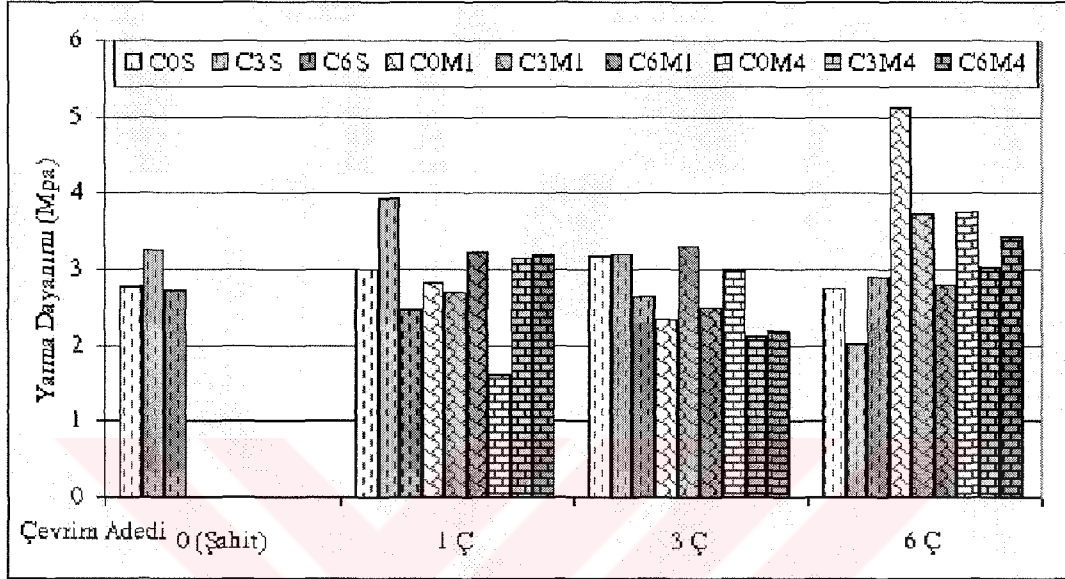
Şahit numunelerin yarma dayanımları içinde en yüksek dayanımı, C3 serisi vermiştir. Bu serinin yarma dayanımı YFC katkısız seriye göre yaklaşık %18 artmıştır.



Şekil 4.7 Yarma dayanımına farklı çevrimlerdeki betonun Cl konsantrasyon etkisi

C0 serisinde S grubunun numunelerinde çevrim adedinin yarma dayanımına bir etkisi olmamıştır. M1 grubu numunelerinde şahit numuneye göre 1 ve 3 çevrim numunelerde bir değişiklik olmamakla beraber 6 çevrim numunelerde ise 5 MPa 1 geçen bir artış olmuştur. M4 grubu numunelerde yarma dayanımı şahit numuneye göre 1 çevrimde azalmasına rağmen 3 çevrimde yaklaşmış ve 6 çevrimde ise geçmiştir. 1 çevrim numunelerin S ve M1 grubu numunelerinde yarma dayanımı şahit numuneninki yaklaşık aynıdır. M4 grubunun yarma dayanımı S grubuna göre %47 azalmıştır. 3 çevrim numunelerde S ve M4 grubu numunelerde

şahit numuneninkine yakındır, **M1** grubu numunelerinde yarma dayanımı **S** grubuna göre %25 azalmıştır. **6** çevrim numunelerde çözeltiliye konan numunelerin yarma dayanımı artmıştır. Klorür konsantrasyonunun 0 'dan, 10000 ve 40000 mg/l 'ye çıkması ile, sırası ile yaklaşık %80 ve %36 artmıştır.



Şekil 4.8 Farklı çevrimlerdeki betonun basınç dayanımına YFC oranının etkisi

C3 serisinin **M1** grubu numunelerinden **1** çevrim numuneler, şahit numuneye göre %15 azalırken, **3** çevrimde aynı kalmış, **6** çevrimde %15 artmıştır. **S** grubunda **1** çevrim olanlar %22 artarken, **3** çevrimde aynı kalmış, **6** çevrimde ise %37 azalmıştır. **M4** grubunda ise **1** çevrim numuneler, şahit numuneye göre aynı kalırken, **3** çevrimde %35 düşmesine rağmen **6** çevrimde tekrar şahit numune seviyesine gelmiştir. **1** çevrim numunelerde klorür konsantrasyonunun 0 'dan, 10000 ve 40000 mg/l 'ye çıkmasıyla, sırasıyla %30 ve %18 'lik düşüşler olmuştur. **3** çevrim numunelerde klorür konsantrasyonunun 0 ve 10000 mg/l olması halinde yarma dayanımı şahit numune ile aynı olmasına rağmen klorür miktarının 40000 mg/l olması ile %35 oranında bir düşüş olmuştur. **6** çevrim numunelerde ise klorür konsantrasyonunun 0 'dan, 10000 ve 40000 mg/l çıkması ile, yarma dayanımı sırası ile %85 ve %50 artmıştır.

C6 serisinin **S** grubu numunelerinde çevrim sayısının yarma dayanımını etkilemediği, **M1** grubu numunelerin **1** çevrimlerinde yarma dayanımının şahit numuneye göre %18 arttığı, **3** ve **6** çevrimlerinde ise aynı olduğu görülmüştür. **M4** grubu numunelerin **1** çevrimlerinde yarma dayanımı şahit numuneye göre %18 artmış, **3** çevrimde %18 azalmış, **6** çevrimde ise %26 artmıştır. **1** çevrim numunelerde klorür konsantrasyonunun 0 'dan, 10000 ve 40000 mg/l 'ye çıkması ile %28 artmıştır. **3** çevrim numunelerde ise klorür konsantrasyonunun etkin olduğu söylenemez. **6** çevrim numunelerde ise 0 ve 10000 mg/l klorür konsantrasyonu olan çözelti ve havada bekleyen numunelerde yarma dayanımı şahit numune ile aynı iken 40000 mg/l klorür konsantrasyonu olan çözelti ve havada bekleyen numunelerde ise yarma dayanımı su ve havada bekleyen numuneye göre %17 artmıştır.

4.2.3 Karbonatlaşma Derinliği

Yarma deneyi sonucunda iki yarım silindire ayrılan parçalardan birinde Bölüm 3.4 te anlatıldığı gibi karbonatlaşma derinliği tayini yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 3.10 da verilmiştir.

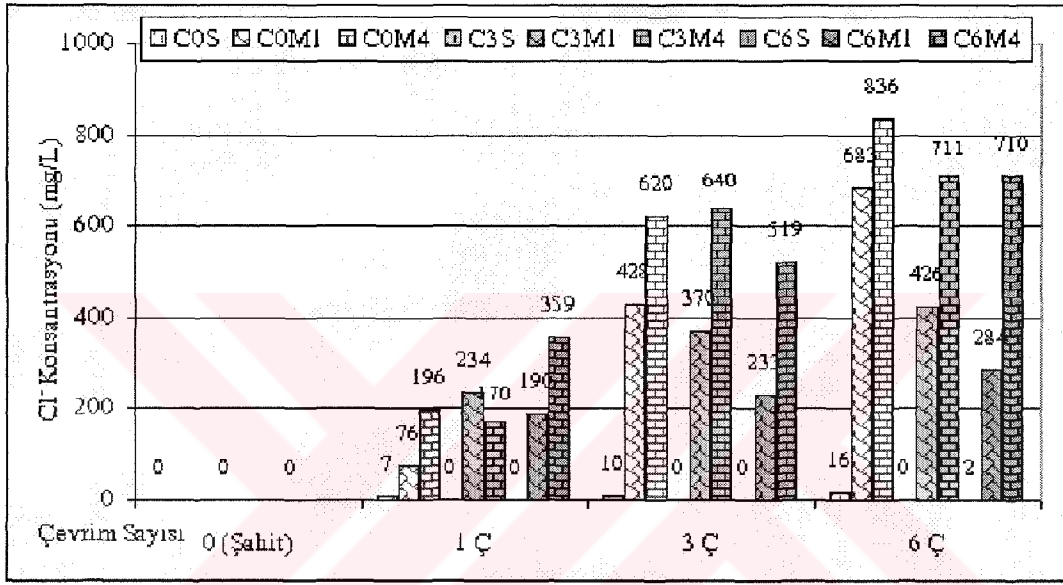
C0 serisinin hiçbir numunesinde karbonatlaşma olmamıştır. **C3** ve **C6** serilerinde **6** çevrimden itibaren karbonatlaşma başlamıştır. **S** grubunun **6** çevrim numunelerinin, YFC ikame oranının %30 dan %60 a çıkması ile, karbonatlaşma derinliği 1–1,5 mm 'den 3–4 mm 'ye çıkarak yaklaşık üç kat artmıştır. **C3** serisinin **M1** ve **M4** grubunda karbonatlaşma olmazken, **C6** serisinin **M1** ve **M4** grubunda karbonatlaşmanın **6** çevrim (28+168 gün) sonunda 0–0,5 mm 'ye ulaşarak yeni başladığı görülmüştür.

4.2.4 Farklı Derinliklerdeki Klorür Konsantrasyonları

Yarma deneyi sonucunda ikiye ayrılan diğer parçanın üç farklı derinliğinden tozlar alınarak 3.4.5 de anlatıldığı gibi Argentometrik titrasyon yöntemi ile serbest klorür miktarı araştırılmış, sonuçlar Çizelge 3.11 de verilmiştir. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 da numunelerin yüzey bölgelerindeki serbest klorür konsantrasyonu çevrim sayısı ile birlikte verilmiştir. Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13 de ise numune derinliğine bağlı serbest klorür miktarı değişimi verilmiştir.

Yüzey bölgelerindeki serbest klorür konsantrasyonu tüm numunelerde çevrim sayısının artırılması ile artmıştır. 20 mm den daha derin bölgelerde serbest klorür konsantrasyonu yok denecek kadar azdır. Bu henüz klorürün derinlere işlemediğini gösteriyor.

M4 grubunda **1** çevrim numunelerinde yüzey bölgesindeki en yüksek serbest Cl^- konsantrasyonuna sahip **C6** serisi, **6** çevrim numunelerde en düşük klorür konsantrasyonuna sahiptir.

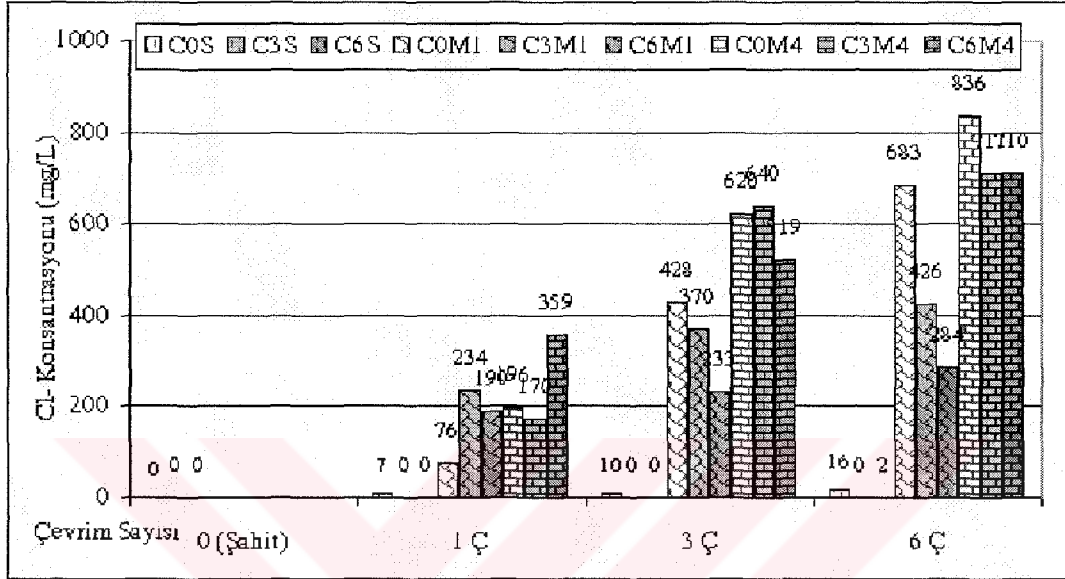


Şekil 4.9 0-10 mm derinliğinde serbest klorür konsantrasyonu - çevrim sayısı ilişkisi

C0 serisinin **S** grubunda, numunelerin yüzey bölgesinde bulunan serbest klorür konsantrasyonu çok az olmakla birlikte çevrim adediyle artmıştır. Bu serinin **M1** grubunda; **1** çevrim numunelerinde serbest klorür konsantrasyonu yaklaşık 80 mg/l iken, **3** çevrim numunelerde **1** çevrim numuneler göre yaklaşık 5.5 katına, **6** çevrim numunelerde ise 9 katına çıkmıştır. Bu serinin **M4** grubunda; **1** çevrim numunelerinde serbest klorür konsantrasyonu yaklaşık 200 mg/l iken, **3** çevrim numunelerde **1** çevrim numunelere göre yaklaşık 3.2 katına, **6** çevrim numunelerde ise 4.3 katına çıkmıştır.

C3 serisinin, **S** grubundaki numunelerin yüzey bölgesinde serbest halde bulunan klor iyonu yoktur. Bu serinin **M1** grubunda **1** çevrim numunelerinde serbest klorür konsantrasyonu

yaklaşık 230 mg/l iken, 3 çevrim numunelerde 1 çevrim numuneler göre yaklaşık 1.6 katına, 6 çevrim numunelerde ise 1.8 katına çıkmıştır. Bu serinin M4 grubunun 1 çevrim numunelerinde serbest klorür konsantrasyonu yaklaşık 170 mg/l iken, 3 çevrim numunelerde 1 çevrim numuneler göre yaklaşık 3.8 katına, 6 çevrim numunelerde ise 4.2 katına çıkmıştır.



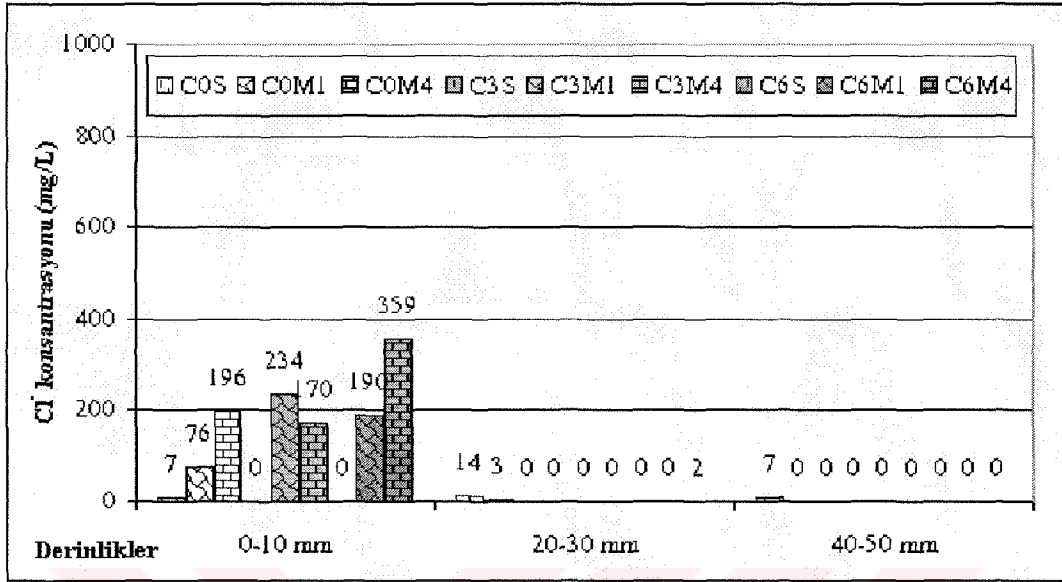
Şekil 4.10 0-10 mm derinliğinde serbest klorür konsantrasyonu - çevrim sayısı ilişkisi

C6 serisinin, su gruplarında numunelerin yüzey bölgesinde serbest halde bulunan klor iyonu yoktur. Bu serinin M1 grubunda; 1 çevrim numunelerinde serbest klorür konsantrasyonu yaklaşık 190 mg/l iken, 3 çevrim numunelerde 1 çevrim numunelere göre yaklaşık 1.2 katına, 6 çevrim numunelerde ise 1.5 katına çıkmıştır. Bu serinin M4 grubunda; 1 çevrim numunelerinde serbest klorür konsantrasyonu yaklaşık 360 mg/l iken, 3 çevrim numunelerde 1 çevrim numuneler göre yaklaşık 1.45 katına, 6 çevrim numunelerde ise 2 katına çıkmıştır.

S grubundaki yüzeylerinde serbest klorür miktarı çok azdır. Bu grubun YFC katkılı serilerinde serbest klorür bulunmamakta, fakat YFC katkısız serilerde çok az miktarda bulunmakta, çevrim sayısı ile birlikte yüzey bölgelerindeki serbest klorür miktarı artmıştır.

M1 grubunda; 1 çevrim numunenin C0 serisinin yüzey bölgesindeki serbest klorür konsantrasyonu 80 mg/l iken C3 serisinde 230 a, C6 serisinde 190 mg/l ye yükselmiştir. 3

çevrim numunelerde YFC oranının artmasıyla serbest klorür konsantrasyonunda 1.8 ve 6 çevrim numunelerde YFC katkı miktarının artmasıyla 2.4 oranında azalmalar olmuştur.



Şekil 4.11 1 çevrim tüm numunelerin derinliğe serbest Cl⁻ konsantrasyon değişimi

M1 grubunda; 1 çevrim numunenin C0 serisinin yüzey bölgesindeki serbest klorür konsantrasyonu 80 mg/l iken C3 serisinde 230 a, C6 serisinde 190 mg/l ye yükselmiştir. 3 çevrim numunelerde YFC oranının artmasıyla serbest klorür konsantrasyonunda 1.8 ve 6 çevrim numunelerde YFC katkı miktarının artmasıyla 2.4 oranında azalmalar olmuştur.

M4 grubunda; 1 çevrim numunenin C0 serisinin yüzey bölgesindeki serbest klorür konsantrasyonu 200 mg/l iken C3 serisinde 170 e düşmüş, C6 serisinde 360 mg/l ye yükselmiştir. 3 çevrim numunelerin C0 serisinde 620 mg/l iken, C3 serisinde 640 mg/l ve C6 seride 520 mg/l olmuştur. 6 çevrim numunelerin C0 serisinde 840 mg/l iken YFC katkılı serilerde ise 710 mg/l ye düşmüştür.

Mohammed ve Hamada (2003) tarafından yapılan bir araştırmada serbest (suda çözünen) klorür ile toplam (asitte çözünen) klorür arasında ilişkiler araştırılmış ve sonuçlar normal portland çimentosu (NPC), %5-30 cüruf (SCA) ve %30-60 cüruf (SCB) içeren çimentolar için doğrusal denklem (4.1) de sırasıyla verilmiştir. Bu çalışmada en yüksek klorür bağlama

kapasitesini alüminli çimento göstermiştir. Bu çalışmaya göre artan cüruf oranı klorür bağlama yeteneğini azaltmıştır.

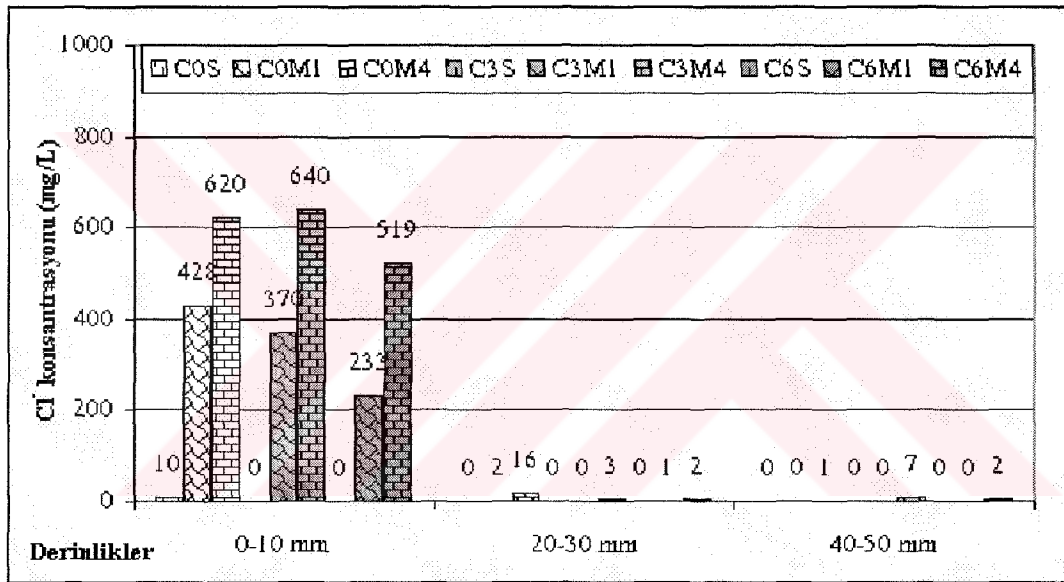
$$\text{NPÇ} : C_t = 1.160.C_f \quad (4.1a)$$

$$\text{SCA} : C_t = 1.153.C_f \quad (4.1b)$$

$$\text{SCB} : C_t = 1.113.C_f \quad (4.1c)$$

C_t : betonda toplam klorür içeriği

C_f : betonda serbest klorür içeriği

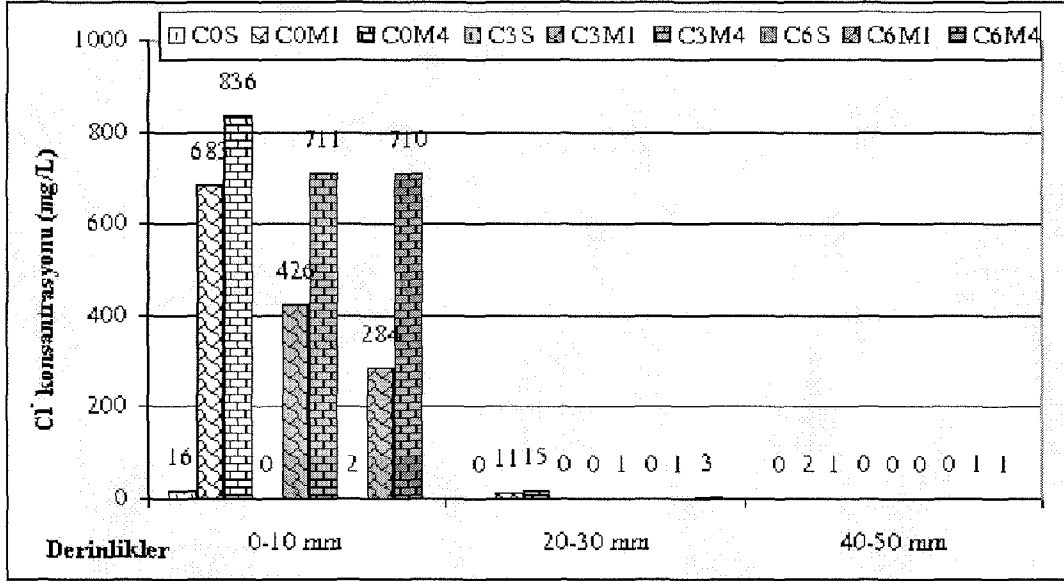


Şekil 4.12 3 çevrim tüm numunelerin derinliğe bağlı serbest Cl⁻ konsantrasyon değişimi

4.2.5 Penetrasyon Derinliği

Su işleme derinliği, 150*150*150 mm boyutlu küp numunelerde 28., 28+28. (1 çevrim), 28+84. (3 çevrim), 28+168. (6 çevrim) günlerde yapılan permeabilite deneyi sonucunda Bölüm 3.4.6 anlatıldığı gibi bulunmuş, ortalama değerler Çizelge 3.12 'de verilmiştir. Şekil 4.14 de maksimum su işleme derinliği, Şekil 4.15 da minimum su işleme derinliği çevrim sayısına göre verilmiştir.

Şahit numuneler içinde sadece C6 serisinde, numunelere 2-14 mm su işlemiştir.



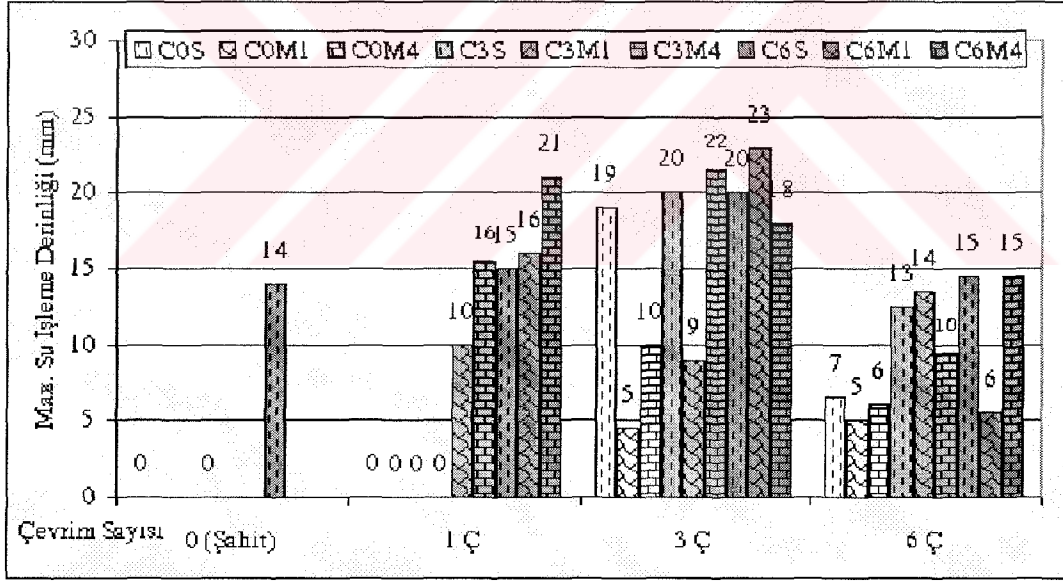
Şekil 4.13 6 çevrim tüm numunelerin derinliğe bağlı serbest Cl⁻ konsantrasyon değişimi

C0 serisinde; şahit ve 1 çevrimlik numunelerin hiçbirine su işlediği görülmemiştir. **S** grubunda 3 çevrimden itibaren 8-19 mm su işlemiştir. 6 çevrim numunelerde ise su işleme derinliği 5-7 mm ye düşmüştür. **M1** grubunda 3 ve 6 çevrimlerde 2-5 mm su işlemiştir. **M4** grubunda 3 çevrim numunelerde 4-10 mm ye 6 çevrim numunelerde 5-6 mm ye düşmüştür. 3 çevrim numunelerde çözelti konsantrasyonunun artması ile maksimum su işleme derinliği 19 mm den 5 mm ye düşmüş, 5 mm den 10 mm ye çıkmıştır. 6 çevrim numunelerde ise maksimum su işleme derinliği çözelti konsantrasyonundan etkilenmeden 5-6 mm arasında kalmıştır.

C3 serisinde şahit numunelere hiçbirine su işlediği görülmemiştir. **S** grubunun, 1 çevrim numunelerine su işlemezken, 3 çevrim numunelerde 5-20 mm, 6 çevrim numunelerde 6-13 mm su işlemiştir. **M1** grubunda, su işleme derinliği 1 ve 3 çevrim numunelerde 3-9,10 mm iken, 6 çevrim numunelerde 7-14 mm dir. **M4** grubunda, su işleme derinliği 1 çevrim numunelerde 8-16 mm, 3 çevrim numunelerde 9-22 mm ve 6 çevrim numunelerde 3-10 mm dir. 1 çevrim numunelerde çözelti konsantrasyonunun artması ile maksimum su işleme derinliği 0 dan 10 mm ye, 10 mm den 16 mm ye çıkmıştır. 3 çevrim numunelerde çözelti konsantrasyonunun artması ile maksimum su işleme derinliği 20 mm den 9 mm ye düşmüş, 9

mm den 22 mm ye çıkmıştır. 6 çevrim numunelerde ise maksimum su işleme derinliği 13-14 mm den, 40000 mg/l klorür konsantrasyonlu grupta 10 mm ye düşmüştür.

C6 serisinde şahit numunelerde su işleme miktarı 2-14 mm dir. S grubunun, 1 çevrim numunelerinde su işleme derinliği 4-15 mm, 3 çevrim numunelerde 6-20 mm, 6 çevrim numunelerde 7-15 mm dir. M1 grubunun 1 çevrim numunelerinde 1-16 mm, 3 çevrim numunelerinde 7-23 mm, 6 çevrim numunelerinde 7-15 mm dir. M4 grubunun 1 çevrim numunelerinde 2-21 mm, 3 çevrim numunelerinde 5-18 mm, 6 çevrim numunelerinde 7-15 mm dir. 1 çevrim numunelerde çözelti konsantrasyonunun artması ile maksimum su işleme derinliği 15-16 mm den 40000 mg/l klorür konsantrasyonlu grupta 21 mm ye çıkmıştır. 3 çevrim numunelerde çözelti konsantrasyonunun artması ile maksimum su işleme derinliği 20 mm den 23 mm ye çıkmış, 23 mm den 18 mm ye çıkmıştır. 6 çevrim numunelerde ise maksimum su işleme derinliği 15 mm den 6 mm ye düşmüş ve tekrar 15 mm ye çıkmıştır.



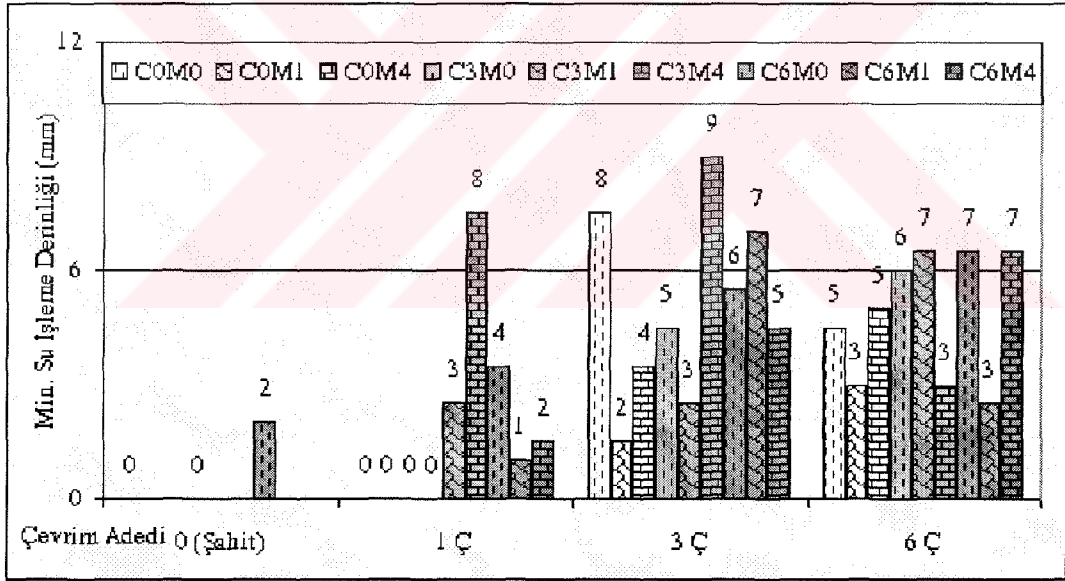
Şekil 4.14 Maksimum su işleme derinliğinin çevrim sayısına göre değişimi

S grubunda; 1 çevrimde C0 ve C3 serilerinde su işlemez iken, C6 serisinde maksimum su işleme derinliği 15 mm dir. 3 çevrimde tüm serilerin maksimum su işleme derinliği 19-20 mm dir. 6 çevrim numunelerde artan YFC oranı ile su işleme derinliği 7 mm den 13 mm ye, 13

mm den 15 mm ye çıkmıştır.

M1 grubunda; 1 çevrimde artan YFC oranı ile maksimum su işleme derinliği 0 dan 10 mm ye, 10 mm den 16 mm ye çıkmıştır. 3 çevrimde artan YFC oranı ile maksimum su işleme derinliği 5 mm den 9 mm ye, 9 mm den 23 mm ye çıkmıştır. 6 çevrim numunelerde artan YFC oranı ile su işleme derinliği 5 mm den 14 mm ye çıkmış, 14 mm den 6 mm ye düşmüştür.

M4 grubunda; 1 çevrimde artan YFC oranı ile maksimum su işleme derinliği 0 dan 16 mm ye, 16 mm den 21 mm ye çıkmıştır. 3 çevrimde artan YFC oranı ile maksimum su işleme derinliği 10 mm den 22 mm ye çıkmış, 22 mm den 18 mm ye çıkmıştır. 6 çevrim numunelerde artan YFC oranı ile su işleme derinliği 6 mm den 10 mm ye, 10 mm den 15 mm ye çıkmıştır.



Şekil 4.15 Minimum su işleme derinliğinin çevrim sayısına göre değişimi

Maksimum su işleme derinliği, TS 3440 da, kuvvetli kimyasal etkilerde 30 mm, zayıf etkilerde ise 50 mm olarak belirlenmiştir. Üretilen tüm numunelerin içinde maksimum su işleme derinliği 24 mm dir.

5. SONUÇLAR

Çimento ağırlığının %0 (C0), %30 (C3) ve %60 (C6) oranlarında çimento ile yerdeğıştirmeli olarak yüksek fırın cürufu katılarak üretilen betonlar 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak 28. gün sonuna kadar su dolu havuzda bekletildi. Bu günden sonra 0 (S), 1, 3 ve 6 defa tekrarlanmak üzere, 14 gün klorür konsantrasyonları 0 (S), 10000 (M1) ve 40000 (M4) mg/l olan MgCl₂ çözeltilerinde ıslanma ve 14 gün laboratuvar ortamındaki havada kuruma etkisine maruz bırakıldı. Betona, yüksek fırın cürufunun katılması ve zararlı ortamlara bırakılması halinde, betonun dayanıklılığında meydana gelen değışikliklerin araştırıldığı bu deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir:

Taze Betondaki Değışimler

Taze beton birim ağırlığı artan yüksek fırın cürufu ikame oranıyla azalmıştır.

Taze betonda yapılan çökme deneyinde; eşit işlenebilme ile üretilen betonların, iki saat sonundaki çökme kaybı miktarı artan yüksek fırın cürufu oranı ile artmıştır.

Taze betonlarda yapılan hava miktarı tayinlerinde anlamlı bir sonuç alınmamıştır.

Sertleşmiş Betondaki Değışimler

Basınç dayanımları: 28 günlük numunelerde basınç dayanımı, YFC oranı arttıkça azalmıştır. Cüruf katılmamış serinin basınç dayanımındaki değışim, çevrim sayısına ve klorür konsantrasyonuna göre kararlı değıildir. YFC katkılı serilerin basınç dayanımı, artış eğilimi göstermiş, artış, C6 serisinde 6 çevrim sonunda, S grubunda %42, M4 grubunda %28,5 oranına ulaşmıştır.

Yarma dayanımları: Yarma dayanımlarındaki değışim, YFC oranına, çözeltilerdeki klorür konsantrasyonlarına ve çevrim sayısına göre kararlılık göstermemiştir. Betona YFC katılması yarma dayanımında zamanla önemli düşüşe neden olmamıştır.

Karbonatlaşma: 6 çevrim (28+168 gün) sonunda C0 serisinin tamamı ile C3 serisinin M1 ve M4 gruplarında karbonatlaşma görülmemiştir. C3 ve C6 serilerinin S grubunda

karbonatlaşma 6 çevrimden itibaren başlamış ve YFC oranının artması ile artmış ve C6 serisinde ancak 4 mm ye ulaşmıştır.

Klorür difüzyonu: 6 çevrim sonunda klorürün sadece beton yüzeyinden 0-10 mm derinliğe kadar nüfuz ettiği, daha derinlere gidemediği görülmüştür. Beton yüzeyindeki serbest klorür miktarı, çevrim sayısı ve çözeltilerdeki klorür konsantrasyonunun artması ile artmıştır. Betona katılan yüksek fırın cürufu oranının artırılması ile, beton yüzeyindeki serbest klorür miktarı azalmıştır.

Penetrasyon derinliği: Penetrasyon derinliğinde çevrim sayısı ve çözelti konsantrasyonu bakımından kararlılık gözlenmemiştir. Penetrasyon derinliği YFC oranının artması ile artmıştır. Penetrasyon derinliği tüm serilerde standartta verilen 30 mm lik sınır değerinin altında kalmıştır.

Sonuç olarak; yukarıda miktarları ve özellikleri verilen malzemeler kullanılarak iyi işçilik ile üretilen cüruf katkılı ve katkısız betonlar, Cl⁻ iyonu konsantrasyonu 40000 mg/l gibi yüksek magnezyum klorür çözeltisi ile tekrarlı ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakıldığında, klor iyonları geçirimsizliği ve düşük su geçirimsizliği özelliğine sahip **dayanıklı** betonlardır.

KAYNAKLAR

- Akman, M. S., (1992), Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul.
- Aköz, F. ve Çakır, Ö., (2002), “Korozyon Hasarının Betonarme Yapının Depremdeki Davranışına Etkileri”, VIII. Uluslararası Korozyon Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ekim 2002, pp 463-470.
- Akyüz, S. ve Pekmezci, B. Y., (2002), “Doğal Bir Puzolanın Betonda Optimum Kullanımı”, Hazır Beton, 53:74-79.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., (2002), Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Biricik H., (1995), Buğday Sapı Külünün Puzolanik Özellikleri ve Külün Çimento Harcının Dayanıklılığına Etkisi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Çakır, Ö., (2000), Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Çakır, Ö. ve Aköz, F., (2003), “Alkali Agregası Reaksiyonunun Hızlandırılmış Deney Yöntemleri ile Araştırılması”, 5. Ulusal Beton Kongresi Betonun Dayanıklılığı (Durabilite) Bildiriler Kitabı, Ekim 2003, pp 175-184.
- Çakır, Ö. ve Aköz, F., (2001), “Yüksek Fırın Cürufunun Beton Üretiminde Kullanılması ve Beton Özelliklerine Etkileri”, “ARITIM 2000” 2000’ li Yıllarda Şehir ve Sanayide Atıklar ve Arıtımı Bildiriler Kitabı, Mayıs 2001, pp 545-553.
- Erdoğan, T. Y., (1993), “Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Bildiriler Kitabı, Kasım 1993, pp 1-8.
- Erdoğan, T. Y., (1995), “Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Kullanımı”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Bildiriler Kitabı, 1995, pp 1-13.
- Erdoğan, T. Y., (2003), Beton, Metu Press, Ankara.
- Erdoğan, Ş. ve Karataş, E., (2003), “Sülfat İyonu Konsantrasyonu Düşük Ortamlara Maruz Betonun Durabilitesinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi”, 5. Ulusal Beton Kongresi Betonun Dayanıklılığı (Durabilite) Bildiriler Kitabı, Ekim 2003, pp 555-566.
- Ersoy, U., (1987), Betonarme, Cilt 1, Evrim Basım Yayım Dağıtım.
- Ersoy, U. ve Özcebe G., (2001), Betonarme, Evrim Basım Yayım Dağıtım.
- Faguang, L., Naiqian, F., Xinying, L., (2000) "An Experimental Study on the Properties of Resistance to Diffusion of Chloride İons of Fly Ash and Blast Furnace Slag Concrete", Cement and Concrete Research, 30, 989-992.

Gül, R. ve Geçten O., (1993), "Elazığ Ferrokrom İşletmesi Granüle Cürufunun Hafif Beton Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Bildiriler Kitabı, Kasım 1993, pp 291-301.

Mohammed, T. U., Hamada, H., (2003), "Relationship between free chloride and total chloride contents in concrete", Cement and Concrete Research, 33 pp 1487-1490.

Neville, A. M., (2000), Properties of Concrete, Fourth Edition, Longman Scientific and Technical, New York.

Onat, O. B., (1998), Türkiye de Üretilen Yüksek Fırın Cüruflarının Çimento Özelliklerine Etkisi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Özışık, G., (2000), Beton, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Postacıoğlu, B., (1986), Beton, Cilt I, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul.

Postacıoğlu, B., (1987), Beton, Cilt II, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul.

Skalny, J., Marchand, J. ve Odler, I., (2002), Sulfate Attack on Concrete, Modern Concrete Technology Series, New York.

Taşdemir, M.A., Taşdemir, C., Özbek, E., Altay, B., (2000) "ÖYFC İnceliğinin Beton Özelliklerine ve Mikroyapısına Etkisi", Çimento ve Beton Dünyası, Yıl 4, Sayı 24, TÇMB Yayın Organı, 19-26.

Tokyay, M., (1997), "Agresif Ortamlarda Çimentolu Sistemler", Çimento ve Beton Dünyası, 2(8):13-19

Tokyay, M., Erdoğan, K., (2002), Cüruflar ve Cürüflü Çimentolar (Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirilmesi Raporu), Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.

TS 11222, (2001), Beton- Hazır Beton- Sınıflandırma, Özellikler Performans Üretim ve Uygunluk Kriterleri

TS 25, (1975), Tras.

TS 3440, (1982), Zararlı Kimyasal Etkileri Olan Su, Zemin ve Gazların Etkisinde Kalacak Betonlar İçin Yapım Kuralları.

TS 3529, (1980), Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini

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

TS 707, (1980), Beton Agregalarından Numune Alma ve Deney Numunesi Hazırlama Yöntemi.

TS EN 12350-2, (2002), Beton- Taze Beton Deneyleri- Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi.

TS EN 12350-7, (2002), Beton- Taze Beton Deneyleri- Bölüm 7: Hava İçeriğinin Tayini- Basınç Metotları.

TS EN 12390-3, (2003), Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini.

TS EN 12390-8, (2002), Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 8: Basınç Altında Su İşleme Derinliğinin Tayini.

TS EN 196-1, (2002), Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım.

TS EN 196-2, (2002), Çimento Deney Metotları- Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi.

TS EN 196-3, (2002), Çimento Deney Metotları- Bölüm 3: Priz Süresi ve Hacim Genleşme Tayini.

TS EN 197-1, (2002), Çimento – Bölüm 1: Genel Çimentolar – Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri.

Yıldırım, M. Ş., (1993), “Reverber Bakır Cürufunun Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Bildiriler Kitabı, Kasım 1993, pp 279-290.

Yüzer, N., (1998), Silis Dumanı Katkılı Betonarme Elemanlara Klorür Etkisinin Hızlandırılmış Korozyon Deneyi İle Araştırılması, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

EKLER

Ek Çizelge 1 Çeşitli Günlere Ait Ortalama Beton Birim Ağırlıkları (kg/dm^3)

Ek Çizelge 2 Çeşitli Günlere Ait Ortalama Beton Ses Geçiş Hızları (km/sn)



Ek Çizelge 1 Çeşitli Günlere Ait Ortalama Beton Birim Ağırlıkları (kg/dm³)

		Taze Beton Birim Ağırlığı			1. Gün Beton Birim Ağırlığı		
		S	M1	M4	S	M1	M4
C0	Ş	2542			2503		
	1 Ç	2537	2563	2539	2503	2520	2497
	3 Ç	2502	2553	2524	2472	2518	2496
	6 Ç	2553	2574	2544	2502	2524	2502
C3	Ş	2563			2532		
	1 Ç	2502	2507	2523	2471	2477	2481
	3 Ç	2512	2514	2525	2472	2472	2486
	6 Ç	2492	2512	2515	2451	2465	2474
C6	Ş	2542			2486		
	1 Ç	2519	2507	2506	2479	2472	2465
	3 Ç	2509	2519	2524	2473	2470	2491
	6 Ç	2517	2509	2495	2480	2465	2458
		28. Gün Beton Birim Ağırlığı			Deney Günü Beton Birim Ağırlığı		
		S	M1	M4	S	M1	M4
C0	Ş	2521					
	1 Ç	2519	2536	2519	2536	2519	2536
	3 Ç	2528	2542	2528	2542	2528	2542
	6 Ç	2522	2546	2522	2546	2522	2546
C3	Ş	2548					
	1 Ç	2490	2488	2490	2488	2490	2488
	3 Ç	2496	2494	2496	2494	2496	2494
	6 Ç	2479	2487	2479	2487	2479	2487
C6	Ş	2498					
	1 Ç	2497	2489	2497	2489	2497	2489
	3 Ç	2485	2482	2485	2482	2485	2482
	6 Ç	2496	2484	2496	2484	2496	2484

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	14.09.1978	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1992 - 1996	Maçka Anadolu Teknik Lisesi
Lisans	1996 - 2000	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2001 – Devam	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı

