

79180

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

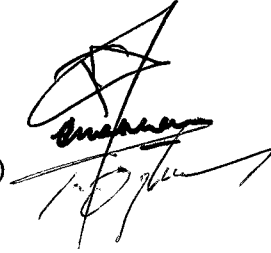
**SİLİS DUMANI KATKILI BETONARME  
ELEMANLARA KLORÜR ETKİSİNİN  
HIZLANDIRILMIŞ KOROZYON DENEYİ İLE  
ARAŞTIRILMASI**

**İnş.Yük.Müh. Nabi YÜZER**

**F.B.E.İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında  
Hazırlanan**

**DOKTORA TEZİ**

**Tez Savunma Tarihi** : 15/Aralık/1998  
**Tez Danışmanı** : Doç.Dr.Fevziye AKÖZ (YTÜ)  
**Jüri Üyeleri** : Prof.Dr.Ali Fuat ÇAKIR (İTÜ)  
Prof.Dr.Turan ÖZTURAN (BÜ)



79180

**İSTANBUL, 1998**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KONU İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Çeliğin Korozyonu.....	3
2.1.1 Beton içindeki çeliğin korozyonu.....	6
2.1.2 Betonun koruyucu etkisi.....	8
2.1.3 Puzolanlar.....	12
2.2 Korozyona Etki Eden Faktörler.....	16
2.2.1 Karbonatlaşma.....	17
2.2.2 Betonda klorür.....	24
2.2.2.1 Klorür geçirimsizliğini ölçme ve değerlendirme yöntemleri.....	32
2.3 Korozyon Tespit, Ölçüm ve Değerlendirme Yöntemleri.....	40
2.3.1 Gözlemsel metodlar.....	41
2.3.2 Deneysel tespitler ve ölçüm parametreleri.....	42
2.3.2.1 Ağırlık kaybını esas alan deneyler.....	42
2.3.2.2 Potansiyel haritaları.....	43
2.3.2.3 Polarizasyon teknikleri.....	45
2.3.2.4 Diğer metodlar.....	49
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	52
3.1 Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler.....	53
3.2 Numune Üretimi.....	57
3.3 Numunelerin Kürü ve Eskitme Süreci.....	59
3.4 Kontrol Deneyleri.....	61
3.4.1 Beton numunelerde yapılan deneyler.....	61
3.4.2 Harç numunelerde yapılan deneyler.....	67
3.4.3 Çelik numunelerde yapılan deneyler.....	70
3.4.4 Betonarme numunelerde yapılan deneyler.....	70

4.	DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ve İRDELENMESİ.....	76
4.1	Beton Numunelerde Yapılan Deneyler.....	76
4.1.1	Basınç deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi.....	76
4.1.2	Yarma deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi.....	82
4.1.3	Schmidt okumalarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi.....	88
4.1.4	Ultrases geçiş değerlerinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi.....	92
4.1.5	Karbonatlaşma derinliğinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi.....	96
4.1.6	Cl <sup>-</sup> penetrasyon derinliğinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi.....	99
4.1.7	Cl <sup>-</sup> difüzyonunun değerlendirilmesi ve irdelenmesi.....	100
4.2	Harç Numunelerde Yapılan Deneyler.....	106
4.2.1	Kılcal su emme deneyinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi.....	107
4.2.2	Rötire ve şişme deneyinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi.....	112
4.3	Çelik Numunelerde Yapılan Deneylerin Sonuçları.....	115
4.4	Betonarme Numunelerde Yapılan Deneyler.....	119
4.4.1	Hızlandırılmış korozyon deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi.....	119
4.4.2	Pull-out deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi.....	135
4.4.2.1	Normal betonarme numunelerde aderans dayanımı.....	135
4.4.2.2	Donatı korozyonu hızlandırılmış numunelerde aderans dayanımı...	140
4.4.3	Yarı hücre potansiyel ölçümlerinin değerlendirilmesi.....	143
4.4.3.1	Normal betonarme numunelerde yarı hücre potansiyeli.....	143
4.4.3.2	Donatı korozyonu hızlandırılmış numunelerde yarı hücre Potansiyeli.....	148
4.5	Matematik Model Oluşturulması.....	151
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	158
	KAYNAKLAR.....	164
	EKLER.....	178
	ÖZGEÇMİŞ.....	196

## SİMGE LİSTESİ

$\alpha_A$	Harcanan gümüş nitrat
$\alpha_{AF}$	Hızlandırma faktörü
$\alpha_B$	Destile su için harcanan gümüş nitrat
$\alpha_c$	Karbonatlaşma derinliği için katsayı
$\alpha_f$	Beton çekme dayanımı için katsayı
$\alpha_i$	Akım şiddetinin hesabı için kullanılan katsayı
$\beta$	Tafel eğimi
$\Delta$	Yoğunluk
$\Delta\phi_s$	Donatı çapındaki kayıp
$\Delta\phi_{s,cr}$	Donatı çapındaki kaybın kritik değeri
$\delta_c$	Karbonatlaşma derinliği için katsayı
$\varepsilon$	Deformasyon
$\varepsilon_r$	Harçlarda boy değişimi
$\varepsilon_u$	Kopma uzaması
$\phi_c$	Beton numunenin çapı
$\phi_s$	Donatı çapı
$\sigma$	İletkenlik
$c$	Karbonatlaşma hızı
$c_i$	Çözeltilerin klorür konsantrasyonu
$C_{ci}$	Beton numuneden hazırlanan çözeltinin serbest klorür konsantrasyonu
$d$	Beton örtü kalınlığı (pas payı)
$D$	Difüzyon katsayısı
$d_c$	Karbonatlaşma derinliği
$e$	Et kalınlığı
$E$	Hücre potansiyeli
$E_{HC}$	Yarı hücre potansiyeli
$E_{corr}$	Korozyon potansiyeli
$F$	Faraday sabiti
$f_{ci}$	i. gündeki beton basınç dayanımı
$F_{mf}$	Harçta maksimum eğilme kuvveti
$f_{mf}$	Harcın eğilmeye çekme dayanımı
$F_{cs}$	Maksimum yarma yükü
$f_{cs}$	Yarma dayanımı
$f_{scb}$	Aderans dayanımı
$F_{scb}$	Maksimum aderans kuvveti
$f_{su}$	Çeliğin çekme dayanımı
$f_{sy}$	Çeliğin akma gerilmesi
$i$	Akım şiddeti
$I_i$	Akım yoğunluğu
$I_{corr}$	Korozyon akım yoğunluğu
$j$	İyon akış hızı
$K$	Kılcal su emme katsayısı
$l$	Numune boyu



$l_b$	Aderans boyu
$M$	Molarite
$M_w$	Moleküler ağırlık
$n$	Elektrokimyasal reaksiyonda alınıp verilen elektron sayısı
$N$	Normalite
$P$	Penetrasyon miktarı
$Q$	Akım şiddeti-zaman ağırlığı altında kalan alan
$R$	Gaz sabiti
$R_s$	Yüzey sertliği (Schmidt okumaları)
$S$	Alan
$SF$	Silis dumanı oranı
$T$	Mutlak sıcaklık
$t$	Zaman
$t_{cr}$	Donatı korozyonu nedeni ile betonda meydana gelecek çatlakın kritik süresi
$V$	Hacim
$v_s$	Ses geçiş hızı
$w$	Su/çimento oranı
$W_c$	Çimento miktarı
$W_E$	Eşdeğer ağırlık
$W_{FA}$	Uçucu kül miktarı
$W_L$	Ağırlık kaybı
$W_w$	Su miktarı
$x$	Penetrasyon derinliği
$z$	iyon valans mutlak değeri

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Demiroksitlerinde meydana gelen hacim artışları..... 6
Şekil 2.2	Beton içindeki donatının korozyonu ve pasivasyon tabakasının oluşumu..... 7
Şekil 2.3	Hidratasyon süresince betonun elektriksel iletkenliği..... 11
Şekil 2.4	Betonda karbonatlaşma olayı..... 18
Şekil 2.5	Reaksiyon ürünlerinin idealize edilmiş kesiti..... 19
Şekil 2.6	Donatının klorür korozyonu aşamaları..... 26
Şekil 2.7	Klorürün varlığında elektro-kimyasal korozyon..... 28
Şekil 2.8	Difüzyon hücresi..... 33
Şekil 2.9	Klorür iyonlarının numune içine difüzyonu..... 35
Şekil 2.10	AASHTO-T277 deney aleti ve elektrik bağlantı şeması..... 36
Şekil 2.11	Elektriksel iletkenlik deney düzeneği..... 39
Şekil 2.12	Bakır-bakır sülfat yarı hücre devresi (ASTM C 876)..... 44
Şekil 2.13	Polarizasyon eğrilerinin çizimine olanak veren potansiyostatlı korozyon ölçüm sistemi..... 47
Şekil 2.14	İdealize edilmiş Tafel Eğrisi..... 48
Şekil 2.15	Lineer polarizasyon eğrisi..... 49
Şekil 3.1	Deney düzeneğinin şematik gösterimi..... 53
Şekil 3.2	Agrega granülometri eğrisi..... 54
Şekil 3.3	Ultrasonik yöntem ile ses geçiş süresinin belirlenmesi..... 63
Şekil 3.4	Yarma deneyi için kullanılan aparat..... 64
Şekil 3.5	Klorür profilinin elde edilmesi için toz numunelerin çıkarıldığı derinlikler..... 66
Şekil 3.6	Kılcal su emme deney düzeneği..... 69
Şekil 3.7	Boy değişimi ölçümü deney düzeneği..... 69
Şekil 3.8	Ön deneyler ile numunede tespit edilen sıcaklık-zaman değişimi..... 72
Şekil 3.9	Pull-out deneyi ve aparatı..... 75
Şekil 4.1	Beton basınç dayanımı bağıl değerlerinin zamanla değişimi..... 77
Şekil 4.2	Çözeltilerde ve havada bekletilen beton numunelerin basınç dayanımı - zaman (% $f_{cc}$ -t) ilişkisi..... 80
Şekil 4.3	Beton yarma dayanımına silis dumanının ve kür koşullarının etkisi..... 82
Şekil 4.4	Çözeltilerde ve havada bekletilen beton numunelerin yarma dayanımı - zaman (% $f_{cs}$ -t) ilişkisi..... 85
Şekil 4.5	Beton basınç dayanımı ile çekme dayanımı arasındaki ilişki..... 87
Şekil 4.6	Beton yüzey sertliği bağıl değerlerinin zamanla değişimi..... 89
Şekil 4.7	Çözeltilerde ve havada bekletilen beton numunelerin yüzey sertliği - zaman (% $R_s$ -t) ilişkisi..... 90
Şekil 4.8	Beton bağıl değerlerinin zamanla değişimi..... 93
Şekil 4.9	Çözeltilerde ve havada bekletilen beton numunelerin ses geçiş hızı - zaman (% $v_s$ -t) ilişkisi..... 94
Şekil 4.10	Karbonatlaşma derinliğinin zamanla değişimi..... 96
Şekil 4.11	Karbonatlaşma derinliğinin zamanla değişimi..... 98
Şekil 4.12	Klorür penetrasyon derinliğinin silis dumanı oranı ile değişimi..... 99

Şekil 4.13	Klorür difüzyonunun derinlikle değişimi.....	103
Şekil 4.14	Havada bekletilen betonda serbest klorürün derinlikle değişimi.....	104
Şekil 4.15	Serbest Cl <sup>-</sup> /Toplam Cl <sup>-</sup> oranına silis dumanının etkisi.....	106
Şekil 4.16	Kılcal su emme katsayısı bağıl değerlerinin zamanla değişimi.....	108
Şekil 4.17	Çözeltilerde ve havada bekletilen harç numunelerin kılcal su emme - zaman (%K-t) ilişkisi.....	110
Şekil 4.18	Harçların boy değişimine silis dumanı ve kür koşullarının etkisi.....	113
Şekil 4.19	Çözeltilerde ve havada bekletilen harç numunelerin boy değişimi - zaman (ε-t) ilişkisi.....	114
Şekil 4.20	Donatı ağırlık kaybına silis dumanı ve Cl <sup>-</sup> konsantrasyonunun etkisi..	117
Şekil 4.21	Suda ve havada 28 gün bekletilen betonarme numunelerde akım şiddeti - zaman (i-t) ilişkisi.....	120
Şekil 4.22	Suda ve havada 208 gün bekletilen betonarme numunelerde akım şiddeti - zaman (i-t) ilişkisi.....	122
Şekil 4.23	Suda ve havada bekletilen numunelerin (i-t) ilişkisine Cl <sup>-</sup> etkisi.....	124
Şekil 4.24	%10 silis dumanı katkılı numunelerin (i-t) ilişkisine Cl <sup>-</sup> etkisi.....	125
Şekil 4.25	%20 silis dumanı katkılı numunelerin (i-t) ilişkisine Cl <sup>-</sup> etkisi.....	126
Şekil 4.26	Hızlandırılmış korozyon deneylerinde çatlak oluştuğu kritik süre.....	130
Şekil 4.27	Suda bekletilen numunelerde deformasyon - zaman (ε-t) ilişkisi.....	131
Şekil 4.28	Suda bekletilen numunelerin (ε-t) ilişkisine Cl <sup>-</sup> etkisi.....	133
Şekil 4.29	Havada bekletilen numunelerin (ε-t) ilişkisine Cl <sup>-</sup> etkisi.....	134
Şekil 4.30	Aderans dayanımı bağıl değerlerinin zamanla değişimi.....	136
Şekil 4.31	Çözelti ve havada bekletilen numunelerin aderans dayanımı - zaman (%f <sub>scb</sub> -t) ilişkisine Cl <sup>-</sup> etkisi.....	138
Şekil 4.32	Çözelti ve havada bekletilen AC grubunun (%f <sub>scb</sub> -t) ilişkisi.....	141
Şekil 4.33	Kritik çatlama süresi ile aderans dayanımı arasındaki ilişki.....	142
Şekil 4.34	Yarı hücre potansiyel değerlerinin zamanla değişimi.....	144
Şekil 4.35	Çözeltilerde ve havada bekletilen numunelerin yarı hücre potansiyeli - zaman (E <sub>HC</sub> -t) ilişkisi.....	146
Şekil 4.36	Çözeltilerde ve havada bekletilen AC grubunun (E <sub>HC</sub> -t) ilişkisi.....	149
Şekil 4.37	Akım yoğunluğu - zaman eğrisi.....	153
Şekil 4.38	Havada bekletilen numunelerin Δφ <sub>s</sub> - Q ilişkisi.....	154
Şekil Ek.1	Klorür difüzyonunun zamanla değişimi.....	187
Şekil Ek.2	Havada bekletilen numunelerde serbest Cl <sup>-</sup> 'nin zamanla değişimi.....	190
Şekil Ek.3	Hızlandırılmış korozyon deneyi sonrasında donatının görünümü.....	193
Şekil Ek.4	Hızlandırılmış korozyon deney setinden bir görünüş.....	195
Şekil Ek.5	Hızlandırılmış korozyon deneyinde çatlak numunelere örnek.....	195

## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Elektrod potansiyelleri..... 4
Çizelge 2.2	Türkiye denizlerindeki Cl <sup>-</sup> iyon konsantrasyonu..... 25
Çizelge 2.3	Çeşitli deniz sularındaki Cl <sup>-</sup> iyon konsantrasyonu..... 25
Çizelge 2.4	Betonda klorür miktarının sınır değerleri..... 29
Çizelge 2.5	%20 NaCl çözeltisine maruz çimento harçlarındaki mineral fazların derinliğe göre dağılımı..... 30
Çizelge 2.6	Klorür geçirimsizliğinin değerlendirilmesi..... 36
Çizelge 2.7	Betonarme yapılarda korozyonun kontrolü için en çok kullanılan metodların özellikleri..... 41
Çizelge 2.8	ASTM C 876'ya göre potansiyel kriterleri..... 44
Çizelge 2.9	H.Arup'un potansiyel kriterleri..... 44
Çizelge 3.1	Agregaların fiziksel özellikleri..... 54
Çizelge 3.2	Çimento ve silis dumanının kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri. 55
Çizelge 3.3	Süper akışkanlaştırıcının teknik ve kimyasal özellikleri..... 56
Çizelge 3.4	Sanayi tuzuna ait analiz neticeleri..... 56
Çizelge 3.5	Donatının mekanik ve kimyasal özellikleri..... 57
Çizelge 3.6	Sacın mekanik ve kimyasal özellikleri..... 57
Çizelge 3.7	Beton üretiminde kullanılan gerçek malzeme miktarları..... 58
Çizelge 3.8	Harç üretiminde kullanılan gerçek malzeme miktarları..... 59
Çizelge 3.9	Numunelerin kodlanması..... 60
Çizelge 3.10	Kontrol deneyleri..... 62
Çizelge 3.11	Strain-gauge özellikleri..... 72
Çizelge 4.1	Hızlandırılmış korozyon deneylerinde çatlağın oluştuğu kritik süre ve o andaki akım şiddeti..... 129
Çizelge 4.2	Akım yoğunluğu-zaman eğrileri, eğrilerin altında kalan alan ve çaptaki kayıp..... 153
Çizelge Ek.1	Ortalama beton basınç dayanımları..... 179
Çizelge Ek.2	Ortalama beton yarma dayanımları..... 179
Çizelge Ek.3	Ortalama Schmidt okumaları..... 180
Çizelge Ek.4	Ortalama ses geçiş hızları..... 180
Çizelge Ek.5	Karbonatlaşma derinliği..... 181
Çizelge Ek.6	Klorür penetrasyon derinliği..... 181
Çizelge Ek.7	Serbest klorür miktarının derinlikle değişimi..... 182
Çizelge Ek.8	Ortalama harç basınç dayanımları..... 182
Çizelge Ek.9	Ortalama harç eğilme dayanımları..... 183
Çizelge Ek.10	Harç ortalama kılcal su emme katsayıları..... 184
Çizelge Ek.11	Ortalama aderans dayanımı..... 185
Çizelge Ek.12	Hızlandırılmış korozyon deneyi sonrası bulunan aderans dayanımı 185
Çizelge Ek.13	Donatının ortalama yarı hücre potansiyel değerleri..... 186
Çizelge Ek.14	Hızlandırılmış korozyon deneyi sonrası ölçülen yarı hücre potansiyel değeri..... 186

## ÖNSÖZ

Bu araştırmanın yapılmasında çalışmanın yürütücülüğünü üstlenerek, değerli zamanını ayıran; araştırma süresince bilimsel katkılarından istifade ettiğim ve akademik çalışmalarında her zaman yakın ilgi ve desteğini gördüğüm, değerli Hocam Sayın Doç.Dr.Fevziye AKÖZ'e,

Konu ile ilgili bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım Sayın Prof.Dr..M.Süheyl AKMAN'a, Sayın Prof.Mehmet Ali SARAYLI ve Sayın Yard.Doç.Dr.Hasan BİRİCİK'e,

“Normal ve Silis Dumanı Katılmış Harçlara-Donatıya Klorür Etkisi” adlı Araştırma Projesini destekleyerek, çalışmama maddi katkı sağlayan Y.T.Ü. Araştırma Fonu Başkanlığına,

“INTAG 636 :Silis Dumanı ve Tarım Artığı Puzolan Katkılı Betonarme Elemanlara Sodyum Klorürlü Çözeltilerin Etkisi” adlı Araştırma Projesini destekleyen TÜBİTAK Başkanlığı'na,

Çevre Mühendisliği Laboratuvarı olanaklarından yararlanmamı sağlayan YTÜ Çevre Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof.Dr.Ferruh ERTÜRK ve ekibine

Metalurji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarının olanaklarından yararlanmamı sağlayan YTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Dekanı Sayın Prof.Dr.Ahmet TOPUZ ve ekibine,

Deneyisel çalışmalarında bana her yönden destek olan YTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı çalışanlarına,

Doktora tezimin yazılmasında büyük emeği geçen Sayın Menekşe BOZYAYLA'ya,

Çalışmalarım boyunca verdikleri destekten dolayı aileme, sonsuz teşekkür ederim.

Nabi YÜZER

Ağustos, 1998

## ÖZET

Metallerde maddi kayıplara yol açan korozyon hasarı, betonarme yapılarda ekonomik ve sosyal problemler nedeni ile çok daha önem kazanmaktadır. Son yıllarda konu ile ilgili çalışmalara hız verilmekte, hızlandırılmış donatı korozyonu deney yöntemleri geliştirilmektedir. Bu yöntemlerde, sisteme ya sabit gerilim uygulanarak akım şiddeti ölçülmekte ya da akım şiddeti sabit tutularak betonda çatlak oluşumu gözlenmektedir. Bu çalışmada ise donatıya sabit gerilimden başka sabit aderans gerilmesi de uygulanmış, akım şiddetinin ve betondaki deformasyonların zamana bağlı değişimi kaydedilmiştir.

Donatı korozyonuna silis dumanı oranının, klorür konsantrasyonunun ve kür koşullarının etkisini araştırmak için, uzun süreli durabilite deneyleri ve hızlandırılmış donatı korozyonu deneyleri yapılmış, sonuçları karşılaştırılmıştır. Donatı korozyonunda önemli rol oynayan serbest klorür iyonlarının, betonarme bir yapı elemanına dışarıdan difüzyonunu ve malzemelere karışmış olması durumunda içeriden etkisini temsil etmek üzere, deneyler iki ana grupta gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla üretilen betonarme, beton ve harç numuneler, 0 (su), 1500, 10000 ve 40000 mg/L klorür iyonu içeren farklı konsantrasyonlardaki çözeltilerde bekletilerek  $Cl^-$  iyonunun dışarıdan difüzyonu, aynı konsantrasyonlardaki çözeltilerin karma suyu olarak kullanılması ile  $Cl^-$  iyonlarının betona bulaşması benzeşimi yapılmıştır. Numuneler, laboratuvar ortamında havada ve çözeltilerde bekletilmiş, 208 günlük süreçte kür koşullarının etkileri zamana bağlı olarak araştırılmıştır. Bu koşulların donatı korozyonuna ve beton özelliklerine etkileri, basınç, yarma ve pull-out deneyleri, ses geçiş süresi, schmidt sayısı, karbonatlaşma derinliği, serbest  $Cl^-$  ve  $OH^-$  tayini, akım şiddeti ve deformasyon ölçümleri yapılarak kontrol edilmiştir. Ayrıca harç numunelerde eğilme, basınç, kılcal su emme ve rötre, çelik numunelerde çekme ve ağırlık kaybı kontrol deneyleri yapılmıştır.

Deney sonuçlarından, silis dumanının klorür difüzyonuna maruz betonarme elemanların performansını artırdığı, klorür iyonlarının betona üretim aşamasında karışması durumunda ise donatı korozyonunu hızlandırdığı görülmüştür. Donatı korozyonu hızlandırılan numunelerin aderans dayanımında, önemli kayıplar olduğu tespit edilmiştir. Aderans dayanımında belirlenen önemli kayıplar, bu yöntemde uygulanan sabit aderans gerilmesinin gerekli olduğunu doğrulamıştır. Hızlandırılmış donatı korozyonu deney sonuçları ile durabilite deneylerinden elde edilen sonuçlar arasında paralellik görülmüştür. Deney sonuçlarından yararlanılarak, betonarme bir yapı elemanının korozyon hasarı nedeni ile servis ömrünün tahmini için, silis dumanı oranına, serbest  $Cl^-$  konsantrasyonuna ve hızlandırma faktörüne bağlı olarak, matematik bir model geliştirilmiş ve uygulaması yapılmıştır.

## ANAHTAR SÖZCÜKLER

Beton, çatlak, donatı korozyonu, durabilite, hızlandırılmış korozyon deneyi, klorür etkisi, matematik model, servis ömrü, silis dumanı.



## **ABSTRACT**

Corrosion damage causing material casualties in metals gains more importance in reinforced concrete construction because of economic and social problems. The investigations regarding to the subject has increased in recent years and experimental methods are improved on accelerated reinforcement corrosion. In these methods, either current intensity is measured by applying constant potential to the system or by keeping the current intensity, the crack formation in concrete is observed. In this study, constant bond stress is also applied to constant potential to the reinforcement and current intensity and deformations in concrete surface depending on time are recorded by monitoring.

To research the effects of silica fume content, chloride concentration and cure conditions, durability and accelerated reinforcement corrosion tests are applied and results are compared. The experiments on the effects of free chloride ions that have an important role on reinforcement corrosion are performed in two main groups; chloride diffusion into the reinforcement concrete member and internal chloride effect by mixing the materials. In order to investigate the effect of external chloride diffusion, reinforcement concrete, concrete and mortar specimens are stored in different chloride concentrations such as 0 (water), 1500, 10000, 40000 mg/L. Specimens are produced by using mix water, that has the same chloride concentration solutions, in order to simulate internal chloride effect. Specimens that are stored in air and in solutions in the laboratory conditions are observed during a 208 day process depending on time. The effects of these conditions on reinforcement corrosion and concrete properties are controlled by compressive strength, tensile splitting strength and pull-out tests, ultrasonic pulse velocity, rebound number, carbonation depth, free  $\text{Cl}^-$  and  $\text{OH}^-$  determination, current intensity and deformation measurement. In addition, flexural, compressive, capillary water absorption and shrinkage control tests are applied to mortar, weight loss determination and tensile tests are applied to steel specimens.

Finally, it is observed that silica fume increases the performance of reinforced concrete members exposed to chloride diffusion, however, it accelerates the reinforcement corrosion in case of internal chloride effects. It is determined that there is an important loss of bond stress in accelerated reinforcement corrosion test specimens. The loss of bond stress confirms that constant bond stress applied in this method is necessary. It is also observed that there is an agreement between accelerated reinforcement corrosion tests and durability tests. Using the experimental results, a mathematical model is developed and put into practice in order to estimate the service life due to the corrosion in reinforcement, including the silica fume content, free  $\text{Cl}^-$  concentration and acceleration factor.

## **KEYWORDS**

Accelerated corrosion test, chloride effects, concrete, cracking, durability, mathematical model, reinforcement corrosion, service life, silica fume.

## I.GİRİŞ

Atmosfer etkisinde kalan demir yüzeyinde oluşan korozyon ürününün hacmi, içerdiği demirin 1-6 katı kadardır. Bu hacim artışı betonarme elemanda donatıda meydana gelirse, gevrek bir malzeme olan beton örtüde çeliğe paralel çatlaklar oluşur. Parça atmalara kadar varan hasarlar sonucunda açığa çıkan donatılardaki korozyon, atmosfer etkileri ile hızlanır. Betonun donatıyı korozyona karşı koruyan bir malzeme olduğu bilinmesine karşın, yüksek performanslı beton üretiminde dünyada yaygın olarak kullanılan ve ülkemizde de kullanımı son yıllarda yaygınlaşan silis dumanı katkılı betonun donatı korozyonuna etkileri açıkça ortaya konmamıştır. Ayrıca, donatı korozyonuna etki eden önemli parametrelerden biri olan Cl<sup>-</sup> iyonlarının da silis dumanı ile birlikte donatı korozyonuna etkisi açık değildir.

Korozyon, metallerin bulunduğu ortam içinde, kimyasal veya elektro-kimyasal reaksiyonlar sonucu bozulması olarak tanımlanmaktadır. Metallerin hemen hepsi doğada bileşik halde bulduklarından, teknolojik amaçla üretilen metal veya alaşımların tekrar kararlı halleri olan eski bileşik haline dönme eğilimleri vardır. Bu nedenle metaller, içinde buldukları ortamın elemanları ile reaksiyona girerek iyon hale geldikten sonra ortam içindeki başka elementlerle birleşerek bileşik haline dönmeye çalışırlar, yani kimyasal değişime uğrarlar ve bozunurlar. Sonuçta metal veya alaşımın fiziksel, kimyasal, mekanik veya elektriksel özelliğinin istenmeyen değişikliklere uğraması önemli maddi kayıplara yol açar. Örneğin Türkiye’de metalik korozyon kayıplarının ülke ekonomisine getirdiği zarar GSMH’nin %4.36’sı kadardır (Çakır, 1984, 1994; Şengil, 1992).

Betonarme yapılarda korozyon hasarına ilişkin yapılan çalışmalarda, sadece Amerika Birleşik Devletleri’nde donatının korozyonundan kaynaklanan yapı hasarlarının onarımı için milyarlarca dolar harcandığı belirtilmektedir. İsviçre gibi yüzölçümü küçük bir ülkede, buz çözücü tuzların oluşturduğu hasar sonucu her yirmi yılda bir yaklaşık 3000 köprüde onarım yapılmaktadır (Rodriguez vd., 1994). Ülkemizde ise beton içindeki çeliğin korozyonuna, henüz yeteri kadar önem verilmediğinden onarım harcamaları içinde korozyon harcamasının payını tahmin etmek zordur. Karayolları Genel Müdürlüğü’nün 1996 yılı faaliyet raporuna göre, sadece 17. Bölge Müdürlüğüne ait otoyol üzerinde



bulunan köprü ve viyadüklerin bakım ve onarımın keşif bedeli 100 milyon dolardır. 1996 yılındaki ödeme 10 milyon dolar olarak gerçekleşmiştir (TCK, 1996).

Son yıllarda, ekonomik ve sosyal problemler nedeni ile önem kazanan donatı korozyonu ile ilgili araştırmaların sayısı artmakta, hızlandırılmış donatı korozyonu deney yöntemleri geliştirilmektedir. Bu yöntemlerde, sisteme ya sabit gerilim uygulanarak akım şiddeti ölçülmekte ya da akım şiddeti sabit tutularak betonda çatlak oluşumu gözlenmektedir. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, beton ile donatının birlikte çalışmasını sağlayan aderans gerilmesinin donatı korozyonuna etkisi gözönüne alınmamıştır. Bu çalışmada, tarafımızdan geliştirilen hızlandırılmış donatı korozyon deneyi tekniğinde önceki çalışmalardan farklı olarak, gerçeği daha iyi yansıtmak amacı ile, donatıya sabit gerilimden başka sabit aderans gerilmesi de uygulanmış, akım şiddetinin ve betondaki deformasyonların zamana bağlı değişimi kaydedilmiştir. Geliştirilen deney tekniğinin geçerliliğini araştırmak üzere, uzun süren durabilite deneyleri de yapılmıştır.

Çalışmanın birinci bölümünde, çeliğin ve beton içindeki çeliğin korozyon mekanizmaları, betonun koruyucu etkisi, donatının korozyonuna etki eden faktörlerden karbonatlaşma ve klorür difüzyonunun ölçüm ve değerlendirme yöntemleri ile bugüne kadar kullanılan korozyon tespit, ölçüm ve değerlendirme yöntemleri ele alınmıştır. İkinci bölümde donatı korozyonuna etki eden faktörlerden, donatıyı saran beton ve harcın, fiziksel ve mekanik özelliklerine, silis dumanı oranı, farklı konsantrasyonlardaki klorür çözeltileri ve kür koşullarının etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu bölümde ayrıca korozyonun tespiti ve değerlendirilmesi için tarafımızdan düzenlenmiş olan, hızlandırılmış donatı korozyonu deney yöntemi ve uygulamaları açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, yapılan deneylerden alınan sonuçlar değerlendirilmiş ve irdelenmiştir. Geliştirilen hızlandırılmış donatı korozyonu deney yönteminden elde edilen verilerden ve durabilite deneyi sonuçlarından yararlanılarak, betonarme bir yapı elemanında, betonun belirli koşullardaki korozyon hasarı nedeni ile çatlama için geçecek sürenin tahmini için deterministik bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bu modelde, silis dumanı oranına ve serbest Cl<sup>-</sup> konsantrasyonuna bağlı olarak hızlandırma faktörü belirlenmiş; betonda çatlama neden olan donatıdaki kritik kesit kaybının seçilen değeri için model kontrol edilmiştir.

## 2. KONU İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

### 2.1 Çeliğin Korozyonu

Korozyon çevrenin elektro-kimyasal etkisi ile oluşan ve özellikle metallerde önemli hale gelen malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır (Onaran, 1991). Korozyon, metallerin elektron kaybederek oksitlenmeleri ve metalin metal iyonuna dönüşmesi olarak da bilinir. Sulu bir çözeltiye daldırılan metalin bu çözelti ile temas eden yüzeyinde elektriksel yük dengesizliği söz konusudur. Metal yüzeyindeki yük dengesizliğini karşılamak için, çözelti içindeki yüklü iyonların dağılımı değişir. Metal-çözelti arayüzündeki yük dengesizliği, yüksek bir potansiyel gradyentinin oluşumuna sebep olur. Arayüzdeki küçük bir potansiyel değişimi ise elektronların, metale veya metalden çözeltiye geçişini kolaylaştırır. Elektron alışverişi şeklinde gelişen bu reaksiyonlara elektro-kimyasal reaksiyonlar denir (Çakır, 1984). Elektro-kimyasal süreç birbirinden ayrı şekilde fakat aynı zamanda meydana gelen oksidasyon ve redüksiyon reaksiyonlarından oluşur. Anot reaksiyonu adı verilen oksidasyon, sulu ortamda metalin elektron kaybederek katyona dönüşmesidir. (2.1) reaksiyonunda gösterildiği gibi elektron kaybeden metal elemana anot adı verilir. Katot reaksiyonu adı verilen redüksiyon ise ortaya çıkan elektronların (2.2) ve (2.3) reaksiyonlarında olduğu gibi sarfedilmesidir.



Elektro-kimyasal korozyonun sürekliliği için anot reaksiyonunun muhakkak surette katot reaksiyonu ile tamamlanması gerekir. Anot reaksiyonunda meydana gelen metal iyonu, bulunduğu sulu ortam içinde çözülür, dağılır ve/veya çökelen bir korozyon türünü meydana getirir, böylece anot olan metalde, bir malzeme kaybı, yani bir hasar oluşur. Korozyonun sürekliliği için bir diğer koşul ise katot ve anotun elektriksel akım geçişini sağlayan bir

iletkenle bağı olmaları ve anotta açığa çıkan elektronların katoda iletilmesidir (Akman, 1992a).

Birisi aktif öbürü daha az aktif iki metalin birbiri ile teması aktif metalin çözünmesine sebep olur. Galvanik korozyon olarak bilinen bu olayda elektron veren metal anot, elektron alan metal ise katot olur. Her metalin hidrojen elektroduna göre ölçülen bir elektrot potansiyeli vardır. Bunlar sıralanarak Çizelge 2.1.'de görüldüğü gibi elektromotif seri elde edilir (Van Vlack, 1980).

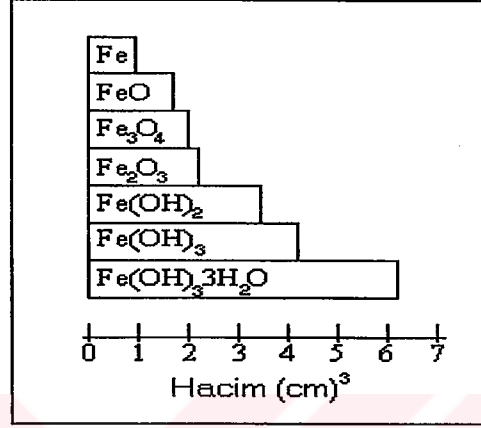
Çizelge 2.1 Elektrod potansiyelleri (Van Vlack, 1980)

Anot Reaksiyonu	Elektrod Potansiyel (V)
$Au \rightarrow Au^{3+} + 3e^{-}$	+1.50
$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^{+} + 4e^{-}$	+1.23
$Pt \rightarrow Pt^{4+} + 4e^{-}$	+1.20
$Ag \rightarrow Ag^{3+} + e^{-}$	+0.80
$Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^{-}$	+0.77
$4(OH)^{-} \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e^{-}$	+0.40
$Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^{-}$	+0.34
$H_2 \rightarrow 2H^{+} + 2e^{-}$	0.000
$Pb \rightarrow Pb^{2+} + 2e^{-}$	-0.13
$Sn \rightarrow Sn^{2+} + 2e^{-}$	-0.14
$Ni \rightarrow Ni^{2+} + 2e^{-}$	-0.25
$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$	-0.44
$Cr \rightarrow Cr^{2+} + 2e^{-}$	-0.74
$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^{-}$	-0.76
$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^{-}$	-1.66
$Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^{-}$	-2.36
$Na \rightarrow Na^{+} + e^{-}$	-2.71
$K \rightarrow K^{+} + e^{-}$	-2.92
$Li \rightarrow Li^{+} + e^{-}$	-2.96

Mühendislik alanında en yaygın biçimde kullanılan metal bilindiği gibi çeliktir. Mekanik özellikleri çok üstün olan bu metalin en önemli kusuru korozyona dayanıklılığının çok

düşük olmasıdır. Çelik, rutubetli ve oksijen içeren ortamlarda korozyona uğrar. Çeliğin korozyona uğraması için her zaman başka bir metale de ihtiyaç yoktur; aynı çelik çubuk üzerinde elektro-kimyasal hücre kendiliğinden oluşabilir. Atmosferik ortamda havanın nemi demir yüzeyinde yoğunlaşarak elektrolitik ortamı, çeliğin kendisi de elektriği ileten elektronik iletkeni oluştururlar (Akman, 1992a). Çelik üzerindeki anot ve katot bölgelerinin birbirine uzaklığı atomik boyutta ise, anot ve katot bölgeleri heran değişebiliyor ise ve olaylar metal yüzeyinde üniform olarak dağılmış ise, bu tür korozyona mikroskopik korozyon adı verilir. Bu olayda çeliğin kendisi iki elektrot gibi davranır. Makroskobik korozyon olarak adlandırılan ikinci modelde ise, anodik ve katodik bölgeler ayrı ve sabittir. Bu tür korozyonda, anodik ve katodik aktiviteler aynı çelik çubuk üzerinde olabileceği gibi, metal iletkenle bağlanmış birbirinden uzak iki farklı metal çubuk üzerinde de gelişebilir (Hope vd.,1986). Atmosferik ortamda  $SO_2$ ,  $CO_2$  ve klorür tuzları bulunması durumunda, bunlar metalin yüzeyinde oluşan su filmi içinde çözünür.  $H_2O$ ,  $SO_2$  ve  $NaCl$  iyonize olur, bunlardan  $Cl^-$  ve  $SO_4^{2-}$  iyonları, anodik bölgede oksitlenmiş olan  $Fe^{2+}$  iyonları ile  $FeSO_4$ ,  $FeCl_2$  veya  $FeCl_3$  bileşiklerini oluşturur. Bu bileşikler ile ortamdaki  $H_2O$  ve  $O_2$  arasında gerçekleşen reaksiyonlar sonucu  $FeOOH$ ,  $HCl$  ve  $H_2SO_4$  oluşur. Allam v.d (1994), atmosfer etkisinde 4 ay süre ile beklettikleri numunelerin yüzeyinde yaptıkları X-Ray analizinde,  $Fe_3O_4$  (%35),  $Fe_2O_3$  (%10),  $\alpha$ - $FeOOH$  (%40),  $Fe_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 2H_2O$  (%10) ve  $\nu$ - $FeOOH$  (%5) korozyon ürünlerini tespit etmişlerdir. Başlangıçta şahit numunelerin yüzeyinde iki ayrı oksit tabakası tespit edilmiştir. Bunlardan atmosfer ile temas halinde olan tabaka  $Fe_2O_3$ , iç kısımdaki ise  $Fe_3O_4$ 'tür. Bu çalışmada sadece bir gün atmosfer etkisinde kalan numunelerde bile çok ince kabarcıklar ve bu kabarcıklarda  $FeCl_2$  ve/veya  $FeCl_3$ ,  $FeSO_4$ ,  $Fe_2(SO_4)_3$ 'ün varlığı da gözlenmiştir. Atmosferin bu etkilerine rağmen, Allam vd. (1994), 16 ay süre ile Arap Körfezindeki doğal atmosfer koşullarına maruz çeliklerde yaptıkları çekme ve katlama deneylerinden, çeliğin dayanım ve duktilitesinin atmosferik korozyondan etkilenmediğini görmüşlerdir. Atmosfer etkisinde kalan demir yüzeyinde oluşan demiroksit tabakası Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi %600'e varan hacim artışlarına neden olur. Bu hacim artışı betonarme elemanlarda donatıda meydana gelir ise betonun çatlamasına ve parça atmasına neden olur (Mehta, 1986).

Çeşitli etkilerle oluşan demiroksit veya demirhidroksit tabakasının bünyeden ayrılması kütlede ağırlık kaybına neden olur. Ancak bu kayıplar çok küçük mertebelere düşer. İhmal edilebilir düzeyde olan bu kayıplar hacim artışı nedeni ile betonda çatlamalara neden olur (Andrade vd., 1993). Bu nedenle donatının korozyonu, betonarme elemanın dayanıklılığı için çok önemli faktördür.



Şekil 2.1. Demiroksitlerinde meydana gelen hacim artışları (Mehta, 1986)

### 2.1.1 Beton içindeki çeliğin korozyonu

Beton, alkalinitesi yüksek bir ortamdır ve içindeki çelik yüzeyinde kararlı, koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak anodik akım yoğunluğunun kısıtlanmasına yardımcı olur. Bu olaya alkali pasivasyon adı verilir. Ancak beton, klorür iyonlarının donatıya kadar nüfuz etmesine neden olacak kadar geçirimli ise, ortamda su ve oksijen varsa ve karbonatlaşma nedeni ile ortamın pH'ı 11'in altına düşerse donatı yüzeyindeki pasiv demiroksit tabakası tahrip olur, korozyon süreklilik kazanır (Neville ve Brooks, 1987).

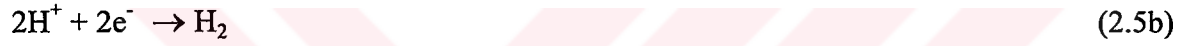
Beton içindeki çeliğin korozyonu elektro-kimyasal süreç ile açıklanabilir. Çelik yüzeyinde oluşan farklı elektro-kimyasal potansiyelle sahip anodik ve katodik bölgeler, çimento hidratlarındaki tuz çözeltilerinin oluşturduğu elektrolit ile birleşir, donatının kendisi de elektronları ileten elektronik iletkeni teşkil eder (Akman, 1992a). Dış kaynaklı akımın olmadığı durumda elektrokimyasal reaksiyon için, elektronların açığa çıktığı anodik reaksiyon ve korozyonun sürekliliği için açığa çıkan elektronların tüketildiği katodik

reaksiyonun olması gerekir. Beton içinde bulunan donatı için önemli anodik reaksiyonlar aşağıda (2.4a-d) ile, katodik reaksiyonlar ise (2.5a-b) ile gösterilmiştir. (2.5a-b) ile gösterilen olası katodik reaksiyonlar, donatı yüzeyinin etrafındaki pH'a ve O<sub>2</sub>'nin varlığına bağlıdır (Hansson, 1984).

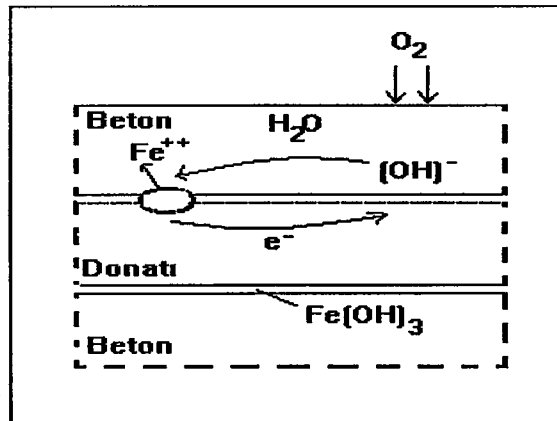
Anot reaksiyonları,



Katot reaksiyonları,



Katotta açığa çıkan hidroksil, anotta açığa çıkan demir iyonları ile birleşerek (2.6a) reaksiyonu ile gösterilen ferrohidroksite, sonra daha kararlı haldeki ferrihidroksite (2.6b) dönüşür (Neville ve Brooks, 1987).



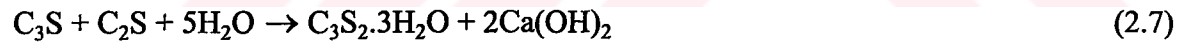
Şekil 2.2 Beton içindeki donatının korozyonu ve passivasyon tabakasının oluşumu (Neville ve Brooks, 1987).

Passivasyonu sağlayan ve donatıyı kaplayan pas tabakası da Şekil 2.2’de görüldüğü gibi  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ’tür (Neville ve Brooks, 1987).

Nürnberg’er’in (1984a) belirttiği gibi hava ile irtibat halinde olan bir betonarme yapıda, beton içindeki su ve  $\text{O}_2$  miktarı, korozyonun oluşmasına neden olabilecek seviyededir. Yeterli yoğunlukta ve yeterli pas payına sahip betonarme elemanında betondaki su miktarı fazla olsa bile  $\text{O}_2$  difüzyonu azaldığı için korozyon tehlikeli sınırlara ulaşmayacaktır. Ancak  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ’nin betonda karbonatlaşması veya ortamda belirli sınırı aşmış serbest  $\text{Cl}^-$ ’nin varlığı donatı korozyonuna yolaçacaktır. Sonuç olarak betonarmede donatının korozyonunu beton özellikleri belirleyecektir.

### 2.1.2 Betonun koruyucu etkisi

Beton kimyasal ve fiziksel karakteri nedeniyle donatının korozyondan korunmasında önemli rol oynar. Sıvı fazda betonun pH’ı çimentonun kimyasal içeriğine bağlı olarak 12.5-13.6 arasında değişir. Kalsiyum silikatların ( $\text{C}_3\text{S}$  ve  $\text{C}_2\text{S}$ ) hidratasyonu sonucu, (2.7) reaksiyonunda görüldüğü gibi hidrate kalsiyum silikatların yanında  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de oluşur. Oluşan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  donatının korozyonunu önleyen alkalın ortamı sağlar.



Ortamın pH’ı 12 civarında iken donatı yüzeyindeki  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  veya  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  pasif demiroksit film tabakası kararlı haldedir donatıyı korozyona karşı korur. (Nürnberg, 1984a). Koruyucu film, demir katyonlarının ( $\text{Fe}^{2+}$ ) elektrottaki çözeltiye girmesini ve oksijen anyonunun ( $\text{OH}^-$ ’daki  $\text{O}^-$ ) donatı yüzeyi ile temasını engelleyen bir bariyer gibi davranır (Al-Amouidi ve Maslehuddin, 1993). Bu olaya passivasyon adı verilir. Khan (1991), yaygın olarak benimsenen beton döküldükten hemen sonra donatı etrafında pasif film tabakası oluştuğu görüşünü irdellemek üzere yaptığı çalışmada, donatının başlangıçta aktif halde olduğunu tespit etmiştir. Deneyleerde, kür için suda bekletilen betonarme numunelerindeki donatının başlangıçta aktif korozyon potansiyelinde olduğu, numunelerin ancak kür tankından alınıp kuru laboratuvar ortamında uzun süre bekletilmesi durumunda pasif potansiyele ulaştığı



görülmüştür. Bunun sonucunda, su altındaki betonarme elemanlarında da pasif film tabakasının oluşmayacağı, kuru ortamdaki elemanlarda ise pasif film tabakası oluşumunun uzun zaman alacağı görüşüne varılmıştır. Ancak bu elemanlardaki korozyon hızı betonun hasarına yol açacak değerde değildir.

Beton, boşluklu yapıda olmasına rağmen, difüzyona karşı direnci nedeniyle, oksijen, karbondioksit, sülfürdioksit gibi gazların ve özellikle klorür olmak üzere tuz gibi zararlı maddeler içeren çözeltilerin çelik yüzeyine ulaşmasını önleyen fiziksel bir engeldir. Bu özellik, betonun boşluk yapısı, bünyesindeki su miktarı, elektriksel iletkenliği, su/çimento oranı ve pas payı gibi etkenlere bağlıdır.

Beton içindeki boşluklar, agrega tanelerinin bünyesi içindeki boşluklar, agrega taneleri arasında kalan boşluklar, betonun farklı oturmasının yolaçtığı boşluklar, agrega-çimento arayüzünde oluşan boşluklar ve sertleşmiş çimento hamuru içindeki boşluklar olmak üzere sınıflandırılabilir. Bunlardan agrega tanesi içindeki boşluklar, agreganın mensubu olduğu doğal taşın özelliklerine bağlıdır ve beton geçirimsizliğindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Betonun iyi yerleştirilememesi nedeni ile çimento hamurunun agrega taneleri arasına giremediği durumda, agrega taneleri arasında meydana gelen boşluklar ise taze beton özelliklerine ve işçiliğe bağlı denetlenebilir boşluklardır. Taze betonda agrega-çimento arayüzünde ve agrega taneleri arasında  $10^{-4}$  cm'den büyük boyutta küresel veya kılcal makro boşluklar vardır. Bundan başka taze betonun oturmasının herhangi bir nedenle engellenmesi ve özellikle iri agrega tanelerinin donatıya veya kalıba sürtünmesi nedeni ile askıda kalması sonucu, iri agrega tanelerinin altında boşluklar meydana gelir. Bu boşluklar, betondaki dış sürtünmeler, çeper etkisi dikkate alınarak azaltılabilir. Sertleşmiş çimento hamuru içinde, çimento hidrasyonu sonucu çok küçük boyutta boşluklar oluşur. Bunlar, çimento pastası hacminin yaklaşık %12'si oranında ve  $0.5 \times 10^{-8}$  ile  $3 \times 10^{-7}$  cm boyutunda jel boşlukları,  $3 \times 10^{-7}$  ile  $5 \times 10^{-3}$  cm boyutunda ve su/çimento oranının bir fonksiyonu olan kılcal boşluklar ve hacmin %7'sini oluşturan  $10^{-2}$  ile  $10^{-1}$  cm boyutlu makro boşluklardır. Hidrasyonun ilerlemesi ile bu boşlukların oranında bir azalma olur. Ayrıca ilk günlerde birbiriyle bağlantılı olan boşluklar ve kılcal borular zamanla jel hacminde meydana gelen artış nedeni ile tıkanarak sürekliliğini kaybeder. Beton içindeki toplam boşluk oranı

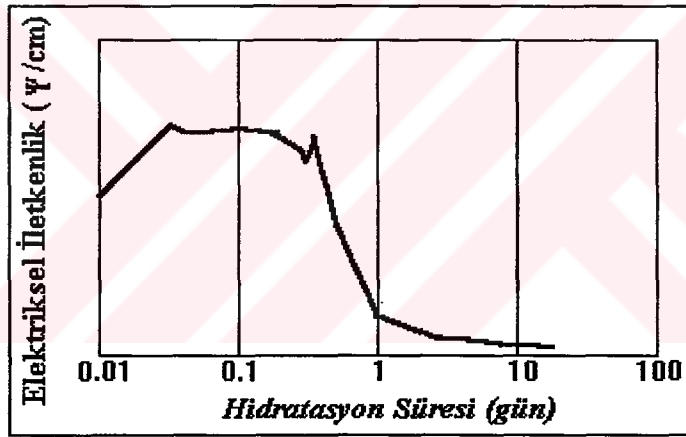


betonun dayanımını ve geçirimliliğini etkileyen önemli bir faktördür. Boşluk oranının artması beton dayanımının düşmesine, geçirimliliğin artmasına neden olur. Boşluk oranından başka boşluk yapısı ve boyutu beton içindeki sıvı ve gaz hareketlerini etkiler. Betonun bünyesindeki suyun miktarını ve geçirimliliğini beton yüzeyindeki ortamın bağıl nemi de etkiler. Örneğin beton yüzeyinin yağmur suyu ile doğrudan teması halinde, sertleşmiş çimento pastası içindeki boşlukların suyu absorpsiyonu nedeni ile su miktarı artar. Ortamın bağıl nemi düşük ise su buharlaşarak betondan uzaklaşır. Betonun su emme davranışı yani betonun sıvı ve gazların difüzyonuna karşı direnci, daha çok kapiler porozite ile belirlenir. Havanın bağıl nemi %99.9'un altına düşerse kapiler boşluklardaki su buharlaşmaya başlar. Bağıl nem %65 civarında ise, makro boşluklardaki ve kapiler boşluklardaki serbest su buharlaşabilir. İnce jel boşluklardaki adsorbe su, yüzeye Vander Walls bağları ile bağlı olduğundan, bünyeyi terk etmesi zordur ve buharlaşma hızı düşüktür (Uyan, 1975; Postacıoğlu, 1986,1987; Nürnberger, 1984a; Neville, 1992).

Donatının korozyon hızı ile betonun elektriksel direnci arasında doğrudan bir ilişki kurulabilir (Alonso vd., 1988). Sertleşmiş çimento hamurundaki hidrate bileşenlerde bulunan kimyasal bağlı su buharlaşamayan sudur ve elektrolitik iletkenliği yoktur. Kapiler boşluklardaki kapiler su ve sertleşmiş çimento pastasının jel boşluklarındaki jel suyu, korozyon sürecinde elektrolit görevini üstlenir. Betonun su emmesi arttıkça iletkenliği artar. Gonzalez vd. (1995a) tarafından çok nemli betonun elektriksel direnci  $5 \times 10^3$  ile  $15 \times 10^3 \Omega \text{cm}$ , kuru bir betonun ise  $5 \times 10^5$  ile  $10 \times 10^5 \Omega \text{cm}$  olarak ölçülmüştür. Buna göre beton kurduğunda direnci yaklaşık 100 kat artmaktadır. Betonun iletkenliği ayrıca boşluk suyundaki  $\text{OH}^-$  iyonlarının konsantrasyonuna ve çözünebilir  $\text{Cl}^-$  ve  $\text{SO}_4^{2-}$  iyonlarının miktarına da bağlıdır. Bu iyonların artması iletkenliği artırır (Nürnberger, 1984a, 1984b).

Buna göre boşluk suyu  $\text{Ca}^{2+}$  ve  $\text{OH}^-$  iyonları ile doymun hale geldikçe ve çimento tanelerinden az miktarda da olsa  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  ve  $\text{K}^+$  iyonları boşluk suyuna geçtikçe, prizın başlangıcında elektriksel iletkenlik artar. Bu iyonlar daha sonra hidrasyon ürünleri tarafından adsorbe edilir, bunun sonucu olarak başlangıçtaki maksimum değerden sonra iletkenlikte azalma olur. Şekil 2.3'te görülen ikinci pikin nedeni ise iki etkinin sonucu ile

açıklanmaktadır : i) Hidratasyonun ilerlemesi ile su ile temas eden çimento tanesinin yüzeyinde ve taneyi saran jelde toplam osmos basıncındaki artış sonucu iyon hareketinin artması, ii) Hamur içindeki sülfalüminatın (etrenjit,  $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ), kısmen monosülfalüminata ( $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 18H_2O$ ) dönüşmesi. Bu dönüşüm olayında, etrenjitin bir molündeki  $2Ca^{++}$  ve  $2SO_4^{2-}$  g iyonlarının serbest kalarak iyon konsantrasyonunun artması ile açıklanmıştır. Hidratasyonun daha sonraki aşamalarında çimento hidratlarının oluşumu ve iyonların tüketilmesi sonucunda, sertleşmiş çimento hamurunun iletkenliğinde belirgin bir azalma meydana gelir. Sonuç olarak betonun su/çimento oranı arttıkça, elektriksel iletkenliği artar (Abo El-Enein vd., 1995). Betonun elektriksel iletkenliğine su/çimento oranının etkisinin araştırıldığı diğer bir çalışmada, su/çimento oranı 0.4; 0.5 ve 0.7 olan betonlarda, su /çimento oranının azaltılması ile betonun difüzyon direncinin ve elektriksel direncinin belirgin bir şekilde arttığı görülmüştür (Schiessl, 1986).



Şekil 2.3 Hidratasyon süresince betonun elektriksel iletkenliği (Abo El-Enein vd., 1995)

Donatı korozyonunun önlenmesinde en önemli faktör beton örtü kalınlığıdır (Ohta, 1991). Beton örtü, donatıya nemin ve havanın difüzyonunu önleyen fiziksel bir engel olması nedeni ile, minimum beton örtü kalınlığının belirlenmesi amaçlanmalıdır. Minimum beton örtü kalınlığının belirlenmesinde yapının cinsi, konumu ve elemanın boyutu, donatının çapı ve ortam koşulları etkili olur (Patodiya, 1991). Bu amaçla yapılan çalışmalarda betonun dayanımı, su/çimento oranı, puzolan malzeme oranı, diğer katkı maddelerinin oranı, donatı çapı, beton örtü kalınlığı ve örtü kalınlığı/donatı çapı oranı gibi parametrelerin korozyona etkileri araştırılmış, uygun örtü kalınlığı belirlenmeye çalışılmıştır. Su/çimento oranını

sabit tutularak pas payı 15 ve 35 mm olan betonarme numuneleri, hızlandırılmış korozyon deneyi ile karşılaştırıldığında, pas payının 15 mm'den 35 mm'ye yükseltilmesiyle korozyonda büyük oranda azalma olduğu gözlenmiştir (Schiessl ve Raupach 1994, 1997). Donatının korozyonu çoğunlukla beton örtünün çatlamasına neden olur, bu çatlak yapının performansının düştüğüne işaret eder. Donatı çapındaki 15-50 $\mu$  gibi çok küçük kayıplar yani penetrasyon, beton örtüde 0.1 mm genişliğinde çatlak oluşmasına neden olur. Penetrasyon derinliği arttıkça, çatlak genişliği de lineer olarak artar. Hızlandırılmış korozyon deneyleri ile, 10, 15, 20, 30, 50 ve 70 mm gibi geniş bir aralıktaki beton örtü kalınlığının ve donatı çapının etkisinin araştırıldığı çalışmalarda; beton örtüdeki ilk çatlağa neden olan korozyon miktarının yalnızca beton örtü kalınlığına (d) bağlı olmadığı, donatı çapının ( $\phi_s$ ) da penetrasyon derinliğinde etkili olduğu ifade edilmiştir. Deneysel çalışmalar ilk çatlağa neden olan korozyon miktarı (donatı çapındaki kayıplar) ile  $d/\phi_s$  oranı arasında lineer bir artış olduğunu göstermiştir (Andrade vd., 1993, 1996).

Korozyon hızının azaltılmasında, betonun elektriksel direncinin artırılması önemli bir etkidir. Beton üretiminde tras, uçucu kül, silis dumanı ve cüruf gibi puzolan malzemelerin kullanılması, betonun elektriksel direncini artırarak donatının korozyon hızının azaltılmasında etkili olur (Schiessl ve Raupach, 1991; Wiens vd., 1995).

### 2.1.3 Puzolanlar

Puzolan malzemeler ince öğütülmüş silisli ve alüminli maddelerdir, yalnız başlarına bağlayıcılık özellikleri olmamasına rağmen normal şartlarda kireç veya çimento ile karıştırılığında su ile yaptığı reaksiyon sonunda, suda çözünmeyen, kararlı, bağlayıcı malzeme özelliği kazanır. Portland çimentosuna puzolan ilave edildiğinde çimentonun hidratasyonu sonunda açığa çıkan ve betonun durabilitesinde önemli rolü oynayan  $\text{Ca(OH)}_2$  (serbest kireç), puzolan içindeki  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  arasında oluşan reaksiyon sonucunda tespit edilir (Massazza, 1989; Postacıoğlu, 1986). Çimentoya ikameli olarak katılan puzolan, betonun plastikliğini artırır; terlemeyi, segregasyonu, hidratasyon ısısını ve betonun geçirgenliğini azaltır (Kocataşkın, 1959). Puzolanlar oluşumuna göre doğal veya yapay olmak üzere ikiye ayrılırlar. Doğal puzolan olarak bilinen maddeler volkanik

küller, killi şist, diatome toprağı, ponza taşı v.b.dir (Neville, 1987). Yapay puzolanlar, kalsinasyon işlemi ile elde edilirler. Silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıklar ise yapay puzolanlardır. Ayrıca pirinç kabuğı, buğday sapı külü gibi tarım artıklarının yakılması ile elde edilen küller de puzolanik özelliğe sahiptir (Mazlum, 1989; Biricik, 1995).

Bu çalışmada puzolan malzeme olarak silis dumanı kullanıldığı ve donatının korozyon hızına etkileri araştırıldığı için, silis dumanı aşağıda ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

### **Silis Dumanı**

Silis dumanı ferrosilisyum ve silisyum metal endüstrisinin yan ürünüdür. Elektrik ark fırınlarında yüksek saflıkta kuvarsitin, kok kömürü ile redüksiyonu sonucu elde edilir. Yüksek sıcaklıkta gaz haline geçen SiO, fırının düşük sıcaklıktaki üst bölümlerinde veya sisteme ilave edilen kollektörlerde SiO<sub>2</sub> olarak yoğunlaşır. Ani soğutma nedeniyle kristalleşemeyen SiO<sub>2</sub>, amorf yapıda, yüzey alanı 220,000-300,000 cm<sup>2</sup>/g olan çok ince küresel partiküllerdir. Üretilen silisyum alaşımlarının özelliğine bağlı olarak, hammeddenin bileşimindeki farklılıklar nedeni ile silis dumanının bileşenlerinin oranı değişir. Örneğin ferrosilisyum metali üretiminde silisyum miktarı arttıkça, silis dumanı bileşimindeki silisyumdioksit oranı %70'ten %96'ya kadar artar. Amerika Birleşik Devletleri'nde, SiO<sub>2</sub> oranı en az %85 olan silis dumanı kullanılmaktadır. Dünya çapında 900,000 ton silis dumanı üretildiği halde, yapı üretiminde kullanılabilen miktar yaklaşık 400,000 ton'dur (Wolsiefer, 1991; Khayat ve Aitcin, 1992). Silis dumanı dünyada, sıkıştırılmamış-kuru şekli ile paket içinde, kuru-sıkıştırılmış şekliyle, çimentoya veya klinkere karıştırılmak suretiyle silis dumanı katkılı çimento olarak ve katı kısmı %45-50 olan su ile karıştırılmış bulamaç halinde olmak üzere dört farklı şekilde pazarlanmakta ve kullanılmaktadır (Wolsiefer vd., 1995).

Ülkemizde silis dumanı, Etibank Elektrometalurji Sanayi İşletmesinin Antalya'daki tesislerinde elde edilmektedir. Fabrikanın ferrosilisyum (FeSi), silikoferrokrom (SiFeCr) ve kalsiyum kromit (FeCr) fırınlarının baca tozları özel filtreli toz tutucularında

tutulmaktadır. Bunlardan  $\text{SiO}_2$  oranı % 94.00-95.00 olan ferrosilisyum ve % 85.00-90.00 olan silikoferrokrom fırınları baca tozu, silis dumanı olarak kullanılabilir. Toplam baca tozu miktarı yıllık 1100 ton'a ulaşmaktadır. İşletme, baca tozlarını 80x80x140 cm boyutlarında torbalar ile pazarlamaktadır (Yeğınobalı, 1993).

Silis dumanı, yüksek silika miktarı, çok ince boyutlu partikülleri ve çok yüksek olan özgül yüzeyi nedeniyle, yüksek puzolanik aktiviteye sahip çok etkin bir malzemedir. Betona katkı malzemesi olarak kullanıldığında, çimentonun hidrasyonu sırasında çıkan serbest kireci bağlayarak kalsiyum silikat hidrateyi (CSH) oluşturur. Serbest kirecin bağlanması sonucu çimento hamuru daha büyük kimyasal dirence, daha yoğun mikro boşluk yapısına ve daha yüksek dayanıma sahip geçirimsiz bir beton oluşturur. Son derece düşük  $\text{Cl}^-$  geçirimsizliğine ve çok yüksek elektriksel dirence sahip olan silis dumanı katkılı betonlar, betonarme yapılarda donatıda makro ve/veya mikro korozyon hücrelerinin önlenmesinde çok önemli rol oynar (Wolsiefer, 1991; Wolsiefer vd., 1995).

Silis dumanı Portland çimentosundan 100 kat daha ince oluşu ve boyutları 0.1-0.2  $\mu$  olan küresel partiküller nedeniyle çimento taneleri arasındaki çok küçük boşlukları doldurarak ince boşluklardaki suyun serbest suya dönüşmesini sağlar, buna karşın adsorbe olan su miktarını artırır (Khayat ve Aitcin, 1992). Normal çimento ile karşılaştırıldığında çökmede yaklaşık %70'lik bir azalma söz konusudur (Swamy ve Laiv, 1995). Eşit işlenebilirlik için daha fazla su gereksinimi nedeniyle, süper akışkanlaştırıcı kullanılarak karışım suyu miktarının azaltılması yoluna gidilmektedir (Hope ve Ip, 1988). Çok yüksek özgül yüzeyi sayesinde serbest suyun bir kısmını adsorbe etmesi, terlemeyi azaltır. Özellikle süper akışkanlaştırıcı ile birlikte kullanılması, viskoziteyi ve kohezyonu artırarak segregasyonu (ayrışmayı) önler. Yapılan çalışmalarda silis dumanının priz sürelerini geciktirdiği (Khayat ve Aitcin, 1992), %10'a kadar kullanılması durumunda hidrasyon ısısını artırdığı görülmüştür (Gonçalves, 1992).

Mikrosilisin ilk kez 1971 yılında Norveç'te taşıyıcı sistemlerde kullanılmasıyla 70 MPa'ın üzerinde beton üretilmeye başlanmıştır (Koca, 1996). Günümüzde silis dumanı kullanılarak 120 MPa'ın üzerinde dayanımlara sahip betonlar üretilmektedir. Basınç dayanımındaki

artışa paralel olarak elastisite modülünde de önemli artışlar görülmektedir (Iravani, 1996). Silis dumanı katılması ile rötrede belirgin bir artış olduğu görülmüştür (Jensen ve Hansen, 1996). Wiegrink ve Marikunta (1996) silis dumanı içeren betonlarda katkı miktarının artması ile sünmenin azaldığını belirtmişlerdir. Gjorv vd. (1990), çelik ile çimento hamuru arayüzündeki geçiş bölgesinin morfolojisini ve mikro yapısını inceleyerek silis dumanının aderans dayanımını da artırdığını gözlemişlerdir. Olayın mekanizması, betonun yerleştirilmesi sırasında arayüzdeki serbest suyun birikiminin önlenmesi, çelik ile çimento hamuru arasındaki geçiş bölgesinde yeralacak olan CH kristallerinin azalması, geçiş bölgesi kalınlığı ve bu bölgedeki boşlukların en aza inmesi ile açıklanmıştır.

Betona katılan puzolan malzeme, hidrasyon ürünlerinden olan serbest kireci bağlaması ve ince boşlukları doldurması nedeni ile betonun zararlı ortama karşı dayanıklılığını artırır (Mehta ve Gjorv, 1982; Bonen, 1993). Farklı sülfat konsantrasyonlarındaki sodyum sülfat çözeltilerinin harç özelliklerine etkilerinin araştırıldığı çalışmada, %10 silis dumanı katkılı harçların 300. güne kadar 72000 mg/L  $SO_4^{2-}$  konsantrasyonunda bile, katkısız harca göre daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Magnezyum sülfat etkisinin araştırılması için yapılan benzer çalışmada ise harca silis dumanı katılmasının sülfat etkisini tam olarak önleyemediği ancak geciktirdiği görülmüştür (Aköz vd., 1995b, 1995c; Türker vd., 1996, 1997). Son yıllarda  $Cl^-$  difüzyonu ile ilgili deneysel çalışmalarda, silis dumanı katkılı betonların hemen hemen geçirimsiz olduğu belirtilmiştir (Plante ve Bilodeau, 1989; Cabrera ve Claisse, 1990; Azari vd., 1993; Gjorv vd., 1994; Taylor vd., 1995). Ancak silis dumanının, boşluk suyunun pH değerini azaltacağı ve Portland çimentolu betonda korozyona neden olmayan klorür konsantrasyonunun, silis dumanı katkılı bir betonda korozyonun başlaması için yeterli olabileceği ifade edilmiştir (Rasheeduzzafar vd., 1992b). Bununla birlikte silis dumanı katkılı betonun pH değeri,  $Cl^-$  veya karbonatlaşma olmaksızın çeliğin korozyonuna sebep olacak kadar düşük değildir (Byfors, 1987). Hussain ve Rasheeduzzafar (1993), korozyon başlangıç süresini esas alarak, klorürlerin beton içine difüzyonunu araştırdıkları çalışmalarında, silis dumanı içeren betonun, normal betona göre 3 kat daha iyi koruma sağladığını görmüşlerdir.



Silis dumanının bütün bu yararlı etkilerinin yanı sıra, karışımda klorür bulunması durumunda ortamın pH'ı düşeceği için, çeliğin korozyonunu hızlandırabileceğine (Aköz vd., 1995d; Tagaki vd., 1991), yüksek sıcaklığa maruz betonlarda kullanımının da çeşitli sakıncalar doğuracağına işaret edilmektedir. Aköz vd. (1995a) tarafından yapılan ve 1200 °C'ye kadar sıcaklıkların %10 silis dumanı katkılı harçlar üzerindeki etkilerin araştırıldığı deneylerde, 600 °C'tan sonraki sıcaklıklarda dayanım kaybının normal harçlardan daha fazla olduğu görülmüştür. Hertz (1992) ise farklı oranlarda silis dumanı içeren betonların dakikada sadece 1°C'lık ısınma hızında hasara uğrayabileceğini görmüştür. Normal betonların yıkılması için dakikada 10°C ve daha fazla ısınma hızına ihtiyaç göstermesi, silis dumanı ile güçlendirilmiş betonun yüksek sıcaklıkta yıkılmaya daha müsait olduğunu ortaya koymaktadır.

## 2.2 Korozyona Etki Eden Faktörler

Betonarme bir yapıda betonun fiziksel ve kimyasal olarak koruyucu özellikleri ile donatıyı korozyondan koruduğu bilinmesine karşın, betonarme yapılarda donatının korozyonuna neden olan faktörler şu şekilde özetlenebilir (Patodiya, 1991):

- a) Betonun yaşı, b) Betonun yeterince iyi yerleştirilememesi, kürünün yapılamaması, agrega ve çimento pastasının segregasyonu gibi nedenlerle betonun üniform olmaması
- c) Çimento miktarının yetersiz olması, d) Pas payının gereğinden düşük olması, e) Ortamın zararlı etkisi.

Beton üretilir üretilmez rötre ve benzeri nedenlerle çatlar. Bu çatlaklar başlangıçta mikro düzeyde olmasına rağmen, rötre, sünme, termik genleşmeler, mekanik yüklemeler gibi etkenlerle zamanla genişler ve donatının paslanmasına yol açan agresif ögelerin çeliğe ulaşmasına neden olurlar. Bu olay, betonun koruyucu niteliğinin kaybolmasına neden olur (Akman, 1992a). Ayrıca betonun, donatıda pasivasyonu sağlayan yüksek alkalın ortamı, zamanla azalarak koruyucu film tabakasının etkinliğinin kaybolmasına neden olur. Ortamın pH'ının düşmesine neden olan en önemli faktör betonun karbonatlaşmasıdır. Betonun alkalinitesi karbonatlaşma nedeniyle düşmemiş ise, çeliğin pasif olması beklenir. Ancak

çelik çevresinde klorür iyonları var ise, pH'ın 11'in üzerinde olması durumunda bile, çukurcuk korozyonu oluşur (Haque ve Kayyali, 1995a, 1995b). Donatı korozyonuna neden olan bu iki faktör aşağıda ayrı ayrı ele alınmıştır.

### 2.2.1 Karbonatlaşma

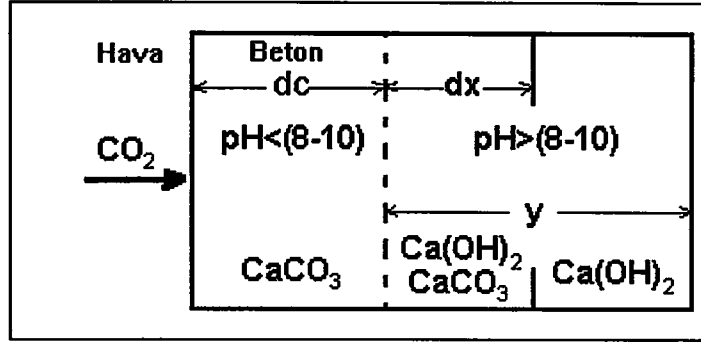
Fiziko-kimyasal bir süreç olan karbonatlaşma, ortamın alkalinitesini düşürerek, anodik akım yoğunluğunun kısıtlanmasına yardımcı olan koruyucu oksit tabakasının tahrip olmasına neden olur. Betonun alkalinitesi, hidrate olmuş çimentonun içerdiği  $\text{Ca(OH)}_2$  ile sağlanır ve pH 12 civarındadır. Ancak  $\text{Ca(OH)}_2$  zamanla havadaki  $\text{CO}_2$  ile reaksiyona girerek  $\text{CaCO}_3$ 'e dönüşür ve pH azalır (Akman,1992a). Çimento pastasında pH'ın azalmasına neden olabilecek bir başka etkenin sülfür dioksit ( $\text{SO}_2$ ) olabileceği ifade edilmektedir. Ancak atmosferdeki  $\text{SO}_2$  konsantrasyonu,  $\text{CO}_2$ 'ninkinden binlerce kat düşüktür ve etkisi çevre kirliliğinde önemli hale gelir, bu nedenle çimento pastasının nötralizasyonu için esas süreç karbonatlaşmadır (Loo vd., 1994). Atmosferdeki miktarı hacimce %0.03 olan  $\text{CO}_2$ 'nin kırsal bölgelerde bile karbonatlaşmaya olan etkisi söz konusudur.  $\text{CO}_2$  miktarı laboratuvarında %0.1'e, büyük yerleşim merkezlerinde ortalama %0.3, maksimum %1'e yükselebilir.  $\text{CO}_2$  konsantrasyonu arttıkça karbonatlaşma oranı artmaktadır (Neville, 1992). 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 (2.8a), boşluk suyunda çözünen bir diğer madde  $\text{Ca(OH)}_2$ 'dir (2.8b). Ayrışan  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$  ile reaksiyona girerek kararlı haldeki  $\text{CaCO}_3$ 'e ve suya dönüşür (2.8c).





Bu olay Şekil 2.4'te görüldüğü gibi boşluk suyunda (OH)<sup>-</sup> iyon miktarının azalmasına, pH'ın düşmesine (pH<8-10) ve pasivasyon niteliğinin kaybolmasına neden olur (Frey, 1993).



Şekil 2.4 Betonda karbonatlaşma olayı (Frey,1993)

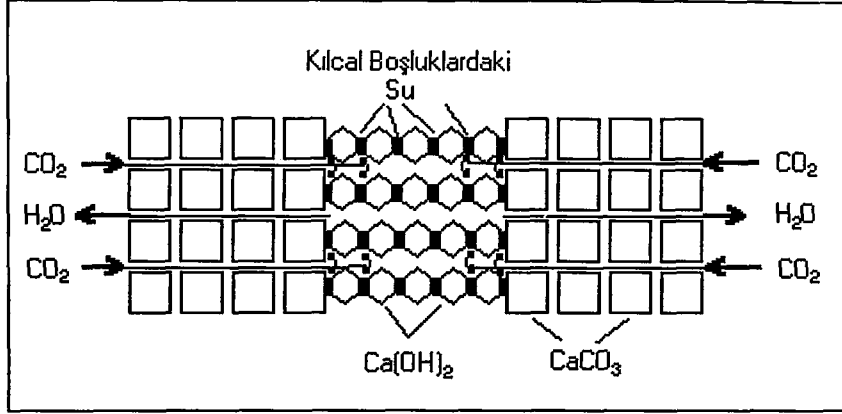
Karbonatlaşma olayı (2.9) denkleminde görüldüğü gibi ekzotermik bir olaydır. Ca(OH)<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>'e dönüşürken 74 g olan mol ağırlığı 100 g'a, 33 ml olan mol hacmi 36.9 ml'ye, özgül ağırlığı da 2.24 g/ml'den 2.71 g/ml'ye çıkar. Buna göre ağırlığı %35, hacmi ise %11.8 oranında artar.



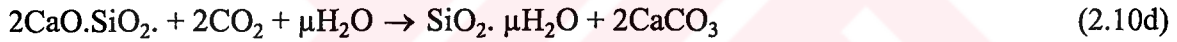
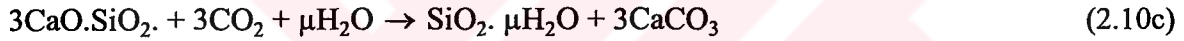
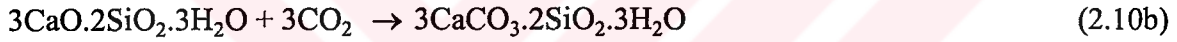
Bu hacim artışı iç boşluklarda yer alır ve oluşan ürün, reaksiyonun ilerlemesi için CO<sub>2</sub> gazına karşı daha az geçirimli hale gelir. Açığa çıkan 74 KJ/mol'lük ısı ise, reaksiyon sonucu oluşan suyun ve ürün içindeki kapiler veya serbest suyun buharlaşması için yeterlidir. Ortamın daha az geçirimli hale gelmesi ile CO<sub>2</sub> difüzyonu ve buharlaşma ile suyun azalması sonucu karbonatlaşma yavaşlar veya sona erer. Bu açıklamalar Moorehead (1986) tarafından Şekil 2.5'deki gibi idealize edilmiştir.

Vagelis vd. (1991), beton boşluklarından içeriye yayılan CO<sub>2</sub>'nin sadece Ca(OH)<sub>2</sub> ile değil, kalsiyum silikat hidrate 3CaO.2SiO<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O (CSH) ve henüz hidrate olmamış silikatlar ile de reaksiyona gireceğini ifade etmişlerdir. Özetle, karbonatlaşma sürecinde CO<sub>2</sub>, kalsiyum

hidroksit, kalsiyum silikat hidrate (C-S-H), anhidrit dikalsiyum silikat (C<sub>2</sub>S) ve anhidrit trikalsiyum silikat (C<sub>3</sub>S) ile aşağıdaki (2.10a-d) reaksiyonları yapabilir (Loo vd., 1994).



Şekil 2.5 Reaksiyon ürünlerinin idealize edilmiş kesiti (Moorehead, 1986)



Karbonatlaşmanın ilerleyişi başka deyişle karbonatlaşma derinliği, zamanın karekökünün bir fonksiyonu olarak tahmin edilebilmektedir. Aşağıda bu konuyla ilgili çıkarılmış matematiksel modellerden örnekler verilmiştir.

Frey (1993), yaptığı deneysel çalışmalar sonucu karbonatlaşma derinliği için 2.11 eşitliğini önermiştir. Bu eşitlikte, deneysel verilerden yararlanılarak  $[d_c(t_2)/d_c(t_1)]$  ile  $\delta_c$  değeri,  $d_c(t, \delta_c)$  için  $\alpha_c$  değeri belirlenerek 20 yıllık betonun karbonatlaşma derinliği tahmin edilmiştir.

$$d_c = \left[ \exp(\alpha_c / \delta_c^2) - 1 \right] \left[ 1 - \exp(-\delta_c \sqrt{t}) \right] \text{mm} \quad (2.11)$$

$d_c$ : Karbonatlaşma derinliği

$\alpha_c$ : Her beton için aynı, çevre şartlarından bağımsız bir sabittir.

$\delta_c$ : Betonun karbonatlaşmaya karşı dayanımını belirten spesifik değer.

Hobbs (1988), %35 oranında kattığı farklı iki tip uçucu kül ile farklı su/bağlayıcı oranı kullanarak ürettiği 100 mm'lik beton küp numunelerde, 3 yıllık araştırmasının sonucunda (2.12) bağıntısını bulmuştur. Hobbs (1994), aynı bağıntıyı 8.3 yıl sürdürdüğü deney sonuçlarıyla karşılaştırdığında, gözlenen karbonatlaşma derinliklerinin, tahmininden en çok  $\pm\%20$  saptığını göstermiştir.

$$d_c = \left\{ \alpha_c \left[ \left( \frac{W_w}{W_c} + 0.2W_{FA} \right) - \delta_c \right] t \right\}^{1/2} \quad (2.12)$$

$d_c$  : karbonatlaşma derinliği (mm)

$t$  : kuruma süresi (yıl)

$W_{FA}$  : uçucu kül miktarı ( $\text{kg/m}^3$ )

$W_w/W_c$ : su/çimento oranı

$\alpha_c$  : 15-29,  $\delta_c$ : 3-9.3

Betonun karbonatlaşmasının önceden tahmini için Funk ve Reinhardt (1997) tarafından yapılan diğer bir çalışmada, Baker'in yağış ve kuruma süresinde karbonatlaşma olmadığı ve betonun gerçek yaşından bu sürenin çıkartılması gerektiği görüşü esas alınarak (2.13) denklemi geliştirilmiştir. Bu eşitlikte  $d_c$ , mm;  $t$  ise yıl olarak alınmıştır.  $W_w$ , su miktarını,  $W_c$  ise çimento miktarını göstermektedir.

$$d_c = \left[ 1 + 2.4 \frac{W_w}{W_c} + \left( \frac{W_w}{C_c} \right)^2 + \frac{320}{W_c} \right] \sqrt{0.455t} \quad (2.13)$$

Konu ile ilgili çalışmalardan, karbonatlaşma derinliği ile zaman arasında basit bir ifade ile (2.14) ilişkisini yazmak mümkün olacaktır .

$$d_c = c\sqrt{t} \quad (2.14)$$

Eşitlikteki  $c$  sabitini belirlemek için bazı çalışmalar yapılmıştır. Örneğin Singapur'da yaşları 7 ila 59 yıl arasında değişen dört binada yapılan ölçümler sonucu  $c$  katsayısı için  $7 \text{ mm/yıl}^{0.5}$  bulunmuştur (Roy vd., 1996). Avustralya'daki bazı yapılardan alınan ölçümler sonucunda ise karbonatlaşma hızı olarak belirtilen  $c$ 'nin  $5 \text{ mm/yıl}^{0.5}$  olarak alınabileceği belirtilmiştir (Francois ve Maso, 1988).

Betonda karbonatlaşma süreci (karbonatlaşma derinliği),  $\text{CO}_2$  difüzyonundan başka su/çimento oranı, beton basınç dayanımı, bağlayıcının tipi ve miktarı, başlangıçtaki serbest kireç miktarı, ortamın bağıl nemi ve sıcaklığı gibi faktörlerden etkilenir.

Karma suyunun kalitesi, karbonatlaşma derinliğini az etkilemektedir. Roper ve Baweja (1991) tarafından yapılan çalışmada, musluk suyu ile yapılan karışımda karbonatlaşma derinliğinin destile suyu ile yapılan karışımdan en çok 5 mm daha fazla olduğu görülmüştür. Karbonatlaşma derinliğinin su/çimento oranıyla arttığı deneysel çalışmalarla gösterilmiştir (Takagi, 1991; Roper ve Baweja, 1991; Hobbs, 1994).

Betonun basınç dayanımı arttıkça karbonatlaşma derinliği azalmaktadır. Francois ve Maso (1988), karbonatlaşma derinliği ile basınç dayanımı arasında yüksek korelasyon katsayısına sahip (2.15) ilişkisinin olduğunu saptamıştır.

$$d_c = 1 / f_c^{0.5} \quad (2.15)$$

Kokubu ve Nagataki (1989), Japonya'da 1962 yılından beri sürdürülen bir araştırmanın 20 yıllık deney sonuçlarından yararlanarak betonun 28. gündeki basınç dayanımı ile karbonatlaşma derinliğinin (2.16) ve (2.17) eşitlikleri ile belirlenebileceğini ifade etmişlerdir. (2.16) eşitliği dış ortam etkisindeki sonuçlara, (2.17) eşitliği ise laboratuvar ortamındaki sonuçlara göre bulunmuştur.

$$d_c = (10 - 1.6\sqrt{f_{c28}})\sqrt{t} \quad (2.16)$$

$$d_c = (17 - 2.2\sqrt{f_{c28}})\sqrt{t} \quad (2.17)$$

Bijen ve arkadaşlarının (1989) yaptığı araştırmada farklı çimento tiplerinin kullanıldığı betonlarda basınç dayanımı-karbonatlaşma derinliği arasındaki ilişkilerde korelasyon katsayılarının azaldığı görülmüştür. Bunun sonucunda, karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesinde CaO miktarı da dikkate alınarak korelasyonu yüksek (2.18) bağıntısı elde edilmiştir.

$$dc = C_o + C_1(1/\sqrt{f_{ci}}) + C_2(1/\sqrt{CaO}) \quad (2.18)$$

$d_c$  : karbonatlaşma derinliği

$f_{ci}$  : 7 veya 28 günlük basınç dayanımı

CaO : Kireç miktarı

$C_o, C_1, C_2$  regresyon sabitleri

Vagelis ve arkadaşları (1991) ise  $CO_2$ 'nin sadece sertleşmiş çimento pastasının  $Ca(OH)_2$ 'si ile değil diğer bileşenler ile de reaksiyona girerek  $CaCO_3$  oluşturduğu görüşünü (2.19) ifadesinde dikkate almışlardır.

$$X_c = \sqrt{\frac{2D_{e,CO_2}^c [CO_2]^0}{[Ca(OH)_2]^0 + 3[CSH]^0 + 3[C_3S]^0 + 2[C_2S]^0} t} \quad (2.19)$$

Eşitliğin paydası, 2.10 denklemlerinde gösterilen karbonatlaşabilen bileşenler içindeki CaO'nun  $t=0$  anındaki toplam molar konsantrasyonudur.  $D_{e,CO_2}^c$ : etkin difüzyon katsayısı ( $m^2/s$ ),  $[CO_2]^0$  atmosferdeki  $CO_2$  konsantrasyonudur.

Karbonatlaşma sürecine bağlı nemin çok önemli etkisi vardır. %100 nemde ve %25'in altındaki nemde karbonatlaşma olmaz. Çimento pastasındaki boşluklarda yetersiz su olması,  $CO_2$ 'nin karbonik asite dönüşmesini engeller. Diğer taraftan %100 nemde, boşlukların tamamen su ile dolması  $CO_2$ 'nin çimento pastası içinde ilerlemesini çok

yavaşlatır (Neville,1992). Ceukelaire ve Nieuwenburg (1993) %40'tan başlamak üzere %10 artımla, %90 bağıl neme kadar, nem etkisini araştırdıkları çalışmalarında, maksimum karbonatlaşma hızının bağıl nemin %50 olduğu ortamda olduğunu görmüşlerdir.

Karbonatlaşma derinliğine sıcaklık ve bağıl nemin etkisinin araştırıldığı çalışmada, bu etkilerin betonun kalıpta tutulduğu sürede bile etkili olduğu görülmüştür. Bu çalışmada ayrıca 28. güne kadar 5°C'ta kür edilen numunelerin karbonatlaşma derinlikleri, 20°C'ta kür edilen numunelerden daha fazladır. Bununla birlikte en az 3 günlük nemli kür sağlandığında düşük sıcaklıkta beton dökülmesinin, karbonatlaşma hızına olumsuz etkisi yoktur. Başlangıç nem kürü süresinin uzatılması durumunda karbonatlaşma derinliği azalmaktadır (Thomas ve Matthes, 1992). Kür şartlarının karbonatlaşmaya etkilerinin araştırıldığı diğer bir çalışmada (Fattuhi, 1988), beton numuneler suda ve/veya havada kür edilerek karbondioksit kabinlerinde hızlandırılmış karbonatlaşma deneyine tabi tutulmuştur. Suda bekletilen numunelerin kür süresi arttırıldıkça beton karbonatlaşma hızı azalmaktadır. Suda kür edilen numunelerin karbonatlaşma hızının, havada bekletilen numunelerin hızına oranı, 28 gün için sadece %17'yi bulmaktadır.

Betona puzolan malzeme katılması ve ortamda Cl<sup>-</sup> iyonlarının bulunması da karbonatlaşma derinliğini etkileyen ve olayı hızlandıran diğer faktörlerdir. Örneğin, Uçucu kül katkılı betonlar ile yapılan çalışmalarda, bu betonlardaki karbonatlaşma derinliğinin normal betonlardakinden daha fazla olduğu görülmüştür (Haque ve Kawamura, 1992; Thomas ve Matthews, 1992). Harçlardaki klorür penetrasyonuna ve karbonatlaşmaya silis dumanının etkisinin araştırıldığı çalışmada da (Grimaldi vd., 1989); silis dumanı içeren harçlardaki görünen karbonatlaşma derinliğinin normal harçlardakinden daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeni silis dumanı ilavesinden kaynaklanan pH'daki azalmalara bağlanmıştır. Ayrıca Cl<sup>-</sup> iyonlarının etkisinde de karbonatlaşma derinliğinin arttığı gözlenmiştir. Bu ise boşluk suyu bileşenlerinden OH<sup>-</sup> iyonlarının elektriksel denge sağlanıncaya kadar Cl<sup>-</sup> iyonları ile yer değiştirmesi ile açıklanmaktadır. Cl<sup>-</sup> konsantrasyonunun artması ile karbonatlaşma derinliğinin arttığı, Aköz vd. (1995d) tarafından yapılan deneysel çalışmada da görülmüştür. Bu çalışmada, karışım suyuna farklı konsantrasyonlarda Cl<sup>-</sup> içeren NaCl çözeltileri katılarak araştırılan karbonatlaşma

derinliğinin, silis dumanı miktarı ve  $Cl^-$  konsantrasyonu ile arttığı ifade edilmiştir.  $MgCl_2$  ile yapılan bir diğer paralel çalışmada da (Aköz vd., 1996a)  $Cl^-$  konsantrasyonu ile karbonatlaşma derinliğinin arttığı görülmüştür. Kayyali and Haque (1988) tarafından  $CaCl_2$  tuzu kullanılarak yapılan çalışmada karbonatlaşma derinliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Klorürün karbonatlaşmayı azaltması ise,  $CaCl_2$  ile  $Ca(OH)_2$  ve  $C_3A$  arasındaki kimyasal reaksiyon sonucu, kalsiyum monoklorür alüminat'ın ( $C_3A.CaCl_2.10H_2O$ ) oluşması ile açıklanmaktadır. Bu oluşum  $CO_2$ 'nin difüzyonunu engelleyerek, çimento hidrate ürünleri ile karbonatlaşma reaksiyonunun hızını azaltmaktadır.

Hergenreoder ve Rackwitz'in (1991) yaptıkları gözlem ve teorik değerlendirmelerin sonuçlarına göre, yapı parametreleri ve malzemelerin kontrol edilmesi halinde, normal koşullar altında betonun karbonatlaşma derinliği genelde küçük değerler almaktadır. Örneğin su/çimento oranı 0.6 olan iyi yerleştirilmiş ve iyi kür edilmiş betonda, 22 yıllık ortalama karbonatlaşma derinliği 10 mm'nin altında kalmıştır. Bu çalışmada karbonatlaşma derinliğinin varyasyon katsayısının 0.5 olmasına rağmen, normal koşullarda minimum pas payının 20 mm olması gerektiği ifade edilmiştir.

Özetle normal şartlar altında üretilmiş, iyi yerleştirilmiş ve iyi kür edilmiş, boşluksuz ve yeterli pas payına sahip betonarme elemanda beton, donatıyı karbonatlaşma nedeniyle oluşabilecek korozyona karşı koruyacaktır.

### 2.2.2 Betonda klorür

Alkalın ortamda bulunan ve koruyucu oksit tabakasının depasivasyonuna neden olan bir diğer olay  $Cl^-$  iyonlarının varlığıdır. Betona klorür dış ortamdan difüzyonla girdiği gibi, önceden hammadeler yoluyla da gelmiş olabilir. 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 (Neville ve Brooks, 1987; Liam vd., 1992). Türkiye denizlerinin ve dünyadaki



bazı deniz ve okyanus sularının klorür konsantrasyonları Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Türkiye denizlerindeki  $Cl^-$  iyon konsantrasyonu (Akman, 1992a)

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

Çizelge 2.3 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

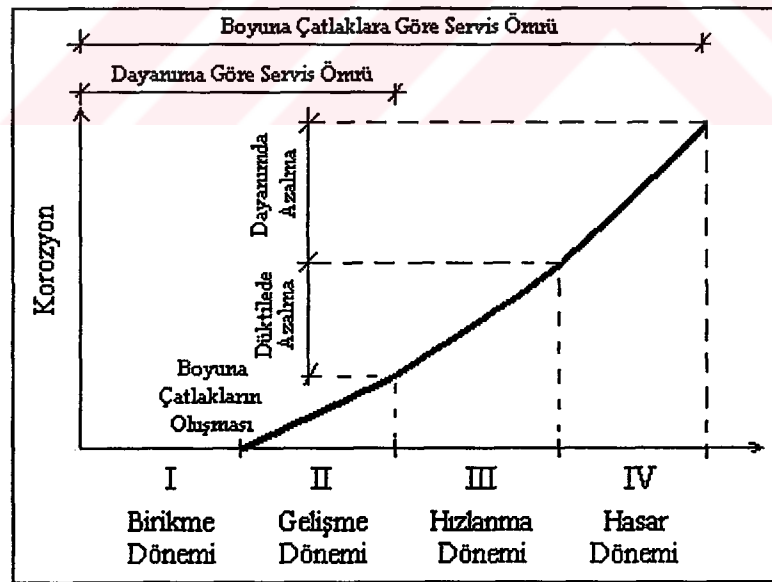
Klorür iyonları betona üretim aşamasında, agrega, çimento, katkı maddeleri veya karma suyu ile karışabilir (Neville ve Brooks, 1987). Betonda işlenebilmeyi sağlamak, prizi hızlandırmak veya geciktirmek ya da betona ek nitelikler kazandırmak amacı ile üretim sırasında çimento ağırlığının %1-3’ü oranında katkı maddesi katılır. Bunlardan en yaygın kullanılanları akışkanlaştırıcı, süperakışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı katkılardır. Akışkanlaştırıcılar anionik türde kolloidal tensio-aktif maddelerdir. Süperakışkanlaştırıcılar ise melamin formaldehit sülfonat, naftalin formaldehit sülfonat, geliştirilmiş linyosülfonatlarıdır ve anionik bileşikler içerirler. Priz hızlandırıcılar ise  $Cl^-$  içeren katkılardır ve bunlardan yaygın olarak kullanılanı kalsiyum klorürdür.  $CaCl_2$ , Alçı taşının  $C_3A$  ve  $C_4AF$  ile reaksiyonunu ve  $C_3S$ ’in hidrasyonunu hızlandırır (Akman, 1990). Çimento hamuru, ortamda bulunan anionları adsorbe etme yeteneğine sahiptir. Bu yeteneği sayesinde ortamda bulunan  $Cl^-$  iyonlarını da adsorbe eder. Beton üretiminde uçucu kül ve silis dumanı gibi puzolan malzemeler kullanıldığında, bu malzemelerin özgül yüzeyinin fazla olması nedeni ile adsorbsiyon yeteneği artar. Ancak puzolan malzemeler kullanıldığında işlenebilmenin sağlanması amacı ile akışkanlaştırıcı veya süperakışkanlaştırıcı katkı maddelerinin kullanılması zorunludur. Süperakışkanlaştırıcılar anionik türde katkı maddeleri olduğu için, çimento hamuru bu katkı maddesi içindeki  $Cl^-$  iyonları adsorbe edilemediğinden boşluk suyu içinde kalırlar. Sonuç olarak puzolan



malzeme ile süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılması durumunda boşluk suyundaki serbest  $Cl^-$  iyonu konsantrasyonu artar (Haque vd., 1992; Kayyali ve Haque, 1995).

Klorürün kaynağı ne olursa olsun, klorür iyonları donatıya kadar ulaşacak ve donatının depasivasyonuna neden olacaktır. İçerden veya dışarıdan nüfuz eden klorür iyonlarının tamamı boşluk suyunda serbest halde değildir, çünkü bunların bir kısmı hidrasyon ürünleri ile bağlanarak, kimyasal reaksiyon sonucu “kalsiyumkloroalüminathidrata” dönüşür. Klorür iyonlarının bir kısmı çimento hidratları tarafından adsorbe edilir. Bağlanmayan veya adsorbe edilmeyen  $Cl^-$  iyonları serbest halde kalır. İşte bu serbest haldeki klorür iyonları betonarme yapılarda ciddi hasarlara yol açar (Haque ve Kayyali, 1995a). Klorürün dışarıdan penetrasyonunda korozyon riski daha fazladır. Zira toplam klorürün büyük bir kısmı serbest klorür olarak boşluk suyuna geçer (Liam vd., 1992).

Betonarme yapıların klorür korozyonu nedeniyle hasar süreci, Miyagawa (1991) tarafından Şekil 2.6’da görüldüğü gibi 4 döneme ayrılmıştır. Bu aşamalar yapının durabilitesinde ve onarımında önem kazanır.



Şekil 2.6 Donatının klorür korozyonu aşamaları (Miyagawa, 1991)

I Birikme Dönemi : Bu dönem  $Cl^-$  iyonlarının beton örtüye penetrasyonu ve donatı etrafında birikmesi aşamasıdır. Bu dönemin süresi, betona  $Cl^-$  iyonlarının difüzyon hızıyla belirlenir.  $Cl^-$  betona karışım aşamasında katılırsa, örneğin  $Cl^-$  içeren deniz kumu kullanılmış ise, bu aşama ortadan kalkmış olur.

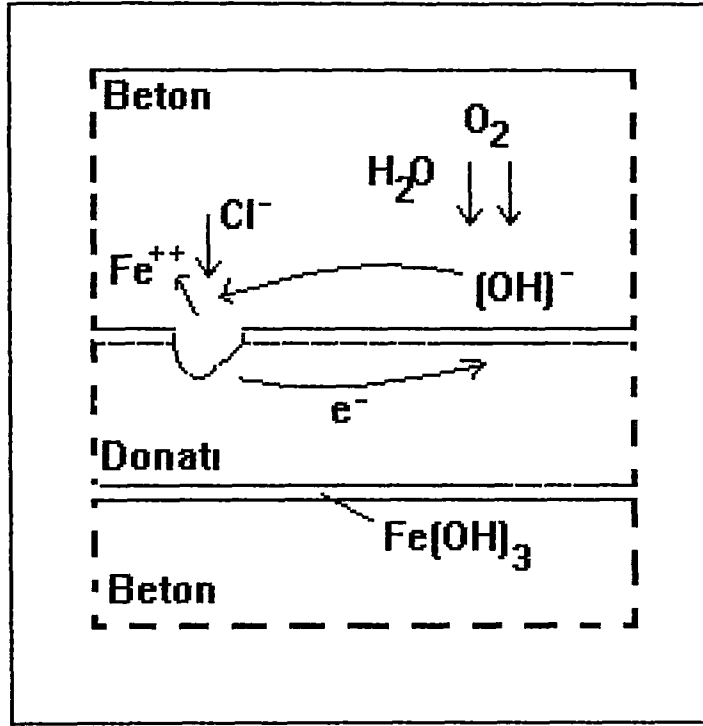
II Gelişme Aşaması : Bu aşamada, donatı  $Cl^-$  iyonları nedeniyle korozyona uğramaya başlar. Korozyon ürünlerinin hacim artışı nedeniyle oluşturduğu basınç, beton örtüde çatlaklara neden olur. Bu aşamayı etkileyen en önemli faktörler, oksijen miktarı, nem oranı, betonun elektriksel direncidir.

III Hızlanma Aşaması : Bu aşamada, II. aşamada oluşmuş olan boyuna çatlaklar nedeni ile  $Cl^-$  penetrasyonu artar ve korozyon hızlanır, beton örtüde parça atmalar başlar. Gelişme aşamasındaki oksijen miktarı, nem oranı ve betonun elektriksel direnci gibi faktörler burada da geçerlidir, ancak yüklemenin etkisi de bir faktör olarak bu aşamaya girer. Boyuna çatlaklar oluşmasına rağmen yapı statik bakımından tehlikeli durumda değildir. Eğer yapı yüksek gerilmeye neden olan tekrarlı yükler etkisinde ise dayanım ve duktilitenin azalmasına neden olur.

IV Hasar Aşaması : Donatının korozyonunun ilerlemesi ile kesit alanında ve dayanımında azalmalar belirgin hale gelmektedir. Bu aşamadaki olayı etkileyen faktörler, hızlanma aşamasındaki ile aynıdır.

Beton içindeki klorür iyonları, (2.20a), (2.20b) ve (2.20c) reaksiyonları ile anodik bölgede, çelik üzerindeki koruyucu pasif tabakayı tahrip eden hidroklorik asite dönüşür ve Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi oyuklanma türü korozyona (çukurcuk korozyonu) neden olur. Oluşan çukurlardaki asidik ortam nedeniyle, çukurcuk aktif hale gelir ve derinlik artar (Neville ve Brooks, 1987; Al-Amouidi ve Maslehuddin, 1993).





Şekil 2.7 Klorürün varlığında elektro-kimyasal korozyon (Neville ve Brooks, 1987)

Klorür bulaşmış betonlarda, korozyonun şiddetli olduğu yerlerde oluşan çukurcuklar, donatının kesitini küçülterek betonarme yapının mekanik yönden zayıflamasına neden olur. Ortalama penetrasyon derinliği ile çukurcukların maksimum derinliklerinin karşılaştırıldığı, doğal ve hızlandırılmış korozyon deneylerinde; klorür içeren beton içindeki donatının maksimum penetrasyon derinliğinin, genel korozyon hasarındaki ortalama penetrasyon derinliğinden 4-8 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Atmosfere açık yerlerdeki veya zemin içindeki metalin korozyonunda da penetrasyon derinliği yaklaşık bu değerlere ulaşır (Gonzalez vd., 1995b).

Standarlarda beton içindeki çeliğin korozyonuna neden olan Cl<sup>-</sup> miktarı çimento ağırlığının veya agrega ağırlığının yüzdesi olarak (Çizelge 2.4) ya da 1 m<sup>3</sup> betonda kg (0.6-0.9 kg/m<sup>3</sup>) olarak verilmektedir. Daha yüksek Cl<sup>-</sup> miktarı betonun, havadan daha fazla nem almasına neden olacağı için, betonun elektriksel iletkenliğini artıracaktır (Mehta, 1986).

Kayyali ve Haque (1990) serbest klorür miktarının beton içindeki donatı korozyonunun belirlenmesinde tek başına bir anlam ifade etmediğini, klorürün neden olduğu korozyonun tahmininde  $Cl/OH^-$  oranının çoğunlukla belirleyici faktör olacağını ifade etmiştir. Grimaldi vd. (1989) yaptığı deneysel çalışmada  $Cl/OH^-$  oranının kritik bir değere ulaşması durumunda çelikte paslanmanın meydana geldiğini göstermiştir. Donatı-beton arayüzündeki boşluk suyunun  $Cl/OH^-$  oranı sınır değeri için genelde kabul edilen tek bir değer olmamakla birlikte, bu oran için klorürün dışarıdan etkimesi durumunda 3.0, herhangi bir nedenle taze betona klorür karışması durumunda 0.6 kritik değerinin kullanılması yaygınlaşmaktadır (Hussain vd., 1995; Kayyali ve Haque, 1995). Taze betona  $Cl^-$  karışması ve  $Cl/OH^-$  molar oranının 0.6'yı aşması durumunda, koruyucu film tabakasının geçirimli ve kararsız hale gelmesi nedeniyle çelik, korozyona karşı uzun süre korunamaz (Mehta, 1986).

Çizelge 2.4 Betonda klorür miktarının sınır değerleri

Standard	Beton Özellikleri	Çimento A. Yüzdesi (%)	Agrega A. Yüzdesi (%)
BS 8110*	Öngerilmeli Beton	0.1	-
	Sülfata Dayanıklı Çimento ile Üretilmiş Beton	0.2	-
	Normal Portland Çimentosu ve Katkılı Portland Çimentoları ile Üretilmiş Beton	0.4	-
	Öngerilmeli Beton	0.06	-
ACI 318*	Servis Ömrü Boyunca $Cl^-$ 'e Maruz Beton	0.15	-
	Servis Ömrü Boyunca Kuru olan ya da Nemden Korunmuş Beton	1.00	-
	Diğer Betonarme Yapılardaki Beton	0.30	-
TSE 706	Öngerilmeli Beton	-	0.02

\*Değerler Neville ve Brooks (1987)'den alınmıştır.

Beton içindeki serbest klorür miktarı, betonun geçirimliliğine ve yüzeyde oluşan çatlakların varlığına, beton üretiminde kullanılan bağlayıcının tipine, miktarına, su/çimento

oranına ve ortamdaki klorür iyonlarının katyonlarına bağlı olarak değişir. Farklı bağlayıcılarla üretilen ve su/bağlayıcı oranı sabit betonların, klorür difüzyon katsayısının ve betonun durabilitesinin değiştiği gözlenmiştir. Su/bağlayıcı oranı sabit tutularak bağlayıcı miktarının azaltılması durumunda ise klorür difüzyonunda belirgin bir değişikliğin olmadığı ifade edilmiştir (Dhir vd, 1996a). Azari vd (1993) ise, çimento miktarı arttıkça serbest Cl<sup>-</sup> konsantrasyonunun azaldığını görmüşlerdir. Hoffman (1984), 65 mm çapında 100 mm yüksekliğindeki silindir çimento harçlarını 140 gün süreyle %20'lik NaCl çözeltisinde bekletmiş ve belirli derinliklerde monosülfat, Friedel Tuzu, Ca(OH)<sub>2</sub>, NaCl, CaCl<sub>2</sub> mineral fazlarının oluştuğunu X-Ray analizi ile belirlemiştir (Çizelge 2.5). Kalsiyum alüminat hidratenin kararlı fazı olan C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> (hydrogarnet) açık bir şekilde belirlenememiştir. Çözeltideki NaCl, beton içindeki Ca(OH)<sub>2</sub> ile reaksiyona girerek CaCl<sub>2</sub>'ü oluşturur. Doygun kalsiyum hidroksit çözeltisinde sadece %0.035 CaCl<sub>2</sub>'nin bulunması, koruyucu pasivasyon tabakasının tahrip olması için yeterlidir. Oluşan CaCl<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> ile birleşerek Friedel Tuzu'nu (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.CaCl<sub>2</sub>.10H<sub>2</sub>O) meydana getirir.

Çizelge 2.5. %20 NaCl çözeltisine maruz çimento harçlarındaki mineral fazların derinliğe göre dağılımı (Hoffman,1984)

Mineral Fazlar	Yüzeyden itibaren derinlikler (mm)					
	0-7	7-14	14-21	21-28	28-35	35-42
Monosülfat	x	-	-	-	-	-
Friedel Tuzu	xxx	xx	xxx	x	-	-
Ca(OH) <sub>2</sub>	x	xx	xx	xxx	xxx	xxx
NaCl	xxx	xx	x	-	-	-
CaCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	x	xx	x	x(?)	-	-
C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub>	x	x	x	x	x	x

Bağlayıcı tipi ve miktarının serbest Cl<sup>-</sup> konsantrasyonu üzerindeki etkisi, onun C<sub>3</sub>A miktarına bağlıdır. Rasheeduzzafar vd. (1992a), karışım suyuna farklı konsantrasyonlarda Cl<sup>-</sup> içeren NaCl çözeltisi katarak, su/çimento oranı 0.6 ve C<sub>3</sub>A miktarları farklı (%2.04, %7.59, %8.52 ve %14) dört ayrı çimento ile hazırladıkları çimento hamurunda serbest

klorür analizi yapmışlardır. Boşluk suyunun analizinden  $C_3A$  miktarı %2.04 gibi çok düşük olan çimentolarda bile  $Cl^-$ 'ün bağlandığı,  $C_3A$  miktarının artması ile serbest klorür konsantrasyonunun azaldığı görülmüştür. Rasheeduzzafar vd. (1992b) başka bir araştırmada, serbest  $Cl^-$  miktarına  $C_3A$ 'nın etkisini korozyonun başlangıç süresiyle de doğrulamışlardır. Bu amaçla yaptıkları hızlandırılmış korozyon deneyinde,  $C_3A$  miktarı %9, %11 ve 14 olan çimentoların performansının,  $C_3A$  miktarı %2 olan çimentonunkinden sırası ile 1.75, 1.93 ve 2.45 kat daha iyi olduğunu ortaya koymuşlardır. Dhir vd. (1996b), yüksek fırın cürufu katkılı çimento ile yapılmış çimento hamurunun klorür bağlama kapasitesindeki artış nedenini, bu çimentoların yüksek alüminat miktarına sahip olması ve bunun sonucu olarak daha fazla Friedel Tuzu üretimi ile açıklamaktadırlar. Betonda silis dumanı, uçucu kül ve curuf gibi katkı maddelerinin kullanılması, sistemin porozitesinin azalmasına ve betonun klorür iyon geçirimsizliğine karşı direncin artmasına katkıda bulunmaktadır. Kür koşulları da klorür geçirimsizliğine etki eden önemli bir faktördür. Örneğin nemli kür süresinin uzatılması geçirimsizlik sağlayan bir parametredir.

Çimento hamurunun klorür bağlama özelliği,  $Cl^-$  katyonunun değerliğinin ve tipinin bir fonksiyonudur. Örneğin iki değerlikli katyonlarla birleşen  $Cl^-$ 'ün difüzyon katsayısı ( $D_{Cl^-}$ ) tek değerlikli katyonlarla birleşenlerden daha büyüktür ve difüzyon katsayıları sırası ile şöyledir:

$$D_{Cl^-}(MgCl_2) > D_{Cl^-}(CaCl_2) > D_{Cl^-}(LiCl) > D_{Cl^-}(KCl) > D_{Cl^-}(NaCl) \quad (\text{Hansson vd., 1985})$$

Özellikle  $Mg^{2+}$  içeren çözeltilerin, daha agresif olduğu,  $Cl^-$  iyonlarının bulunması durumunda  $Mg_2(OH)_3Cl_4H_2O$  (magnezyumoksidokloride) formuna dönüştüğü (Feldman ve Cheng-yi, 1985), CSH'da yavaş yavaş erimeler olduğu (Ftikos ve Parissakis, 1985) ve betonun toplam porozitesinin arttığı gözlenmiştir (Moukwa, 1990; Aköz vd., 1996c).

Korozyonun hızını etkileyen bir diğer faktör, beton üzerinde oluşan çatlaklardır. Sertleşmiş betonda çatlakların bulunması, klorürün geçişini artırır. Kapiler çatlaklar, yüzey gerilimi nedeni ile çözeltilerin, dolayısı ile  $Cl^-$  iyonlarının girişini hızlandırır. Çatlağın etkisini açıklamak için önceden çatlak oluşturulmuş betonarme krişlerde yapılan deneylerde, çatlak

genişliği 0.05 mm'den 0.8 mm'ye kadar değişen numuneler, %3'lük NaCl çözeltilerinde bekletilmiş, çatlak genişliği arttıkça donatı çevresindeki klorür miktarının arttığı gözlenmiştir. Bu çalışmada, donatıya kadar uzanan ve 0.4 mm genişliğinde çatlak bulunan bir elemanda, pas payı yeterli ise, bu genişliğe kadar oluşan çatlakların yapının durabilitesine bir zarar vermediği sonucuna varılmıştır. Ancak yapılan diğer çalışmalarda, çatlak bölgesindeki donatının korozyon probleminin sadece çatlak genişliğinin 0.3-0.5 mm arasında sınırlandırılmasıyla çözülemeyeceği, korozyondan korunmanın yeterli beton kalitesi ve pas payı ile sağlanabileceği ifade edilmiştir (Hartl ve Lukas, 1987; Keller ve Menn, 1993; Schiessl ve Raupach, 1997).

### **2.2.2.1 Klorür geçirimliliğini ölçme ve değerlendirme yöntemleri**

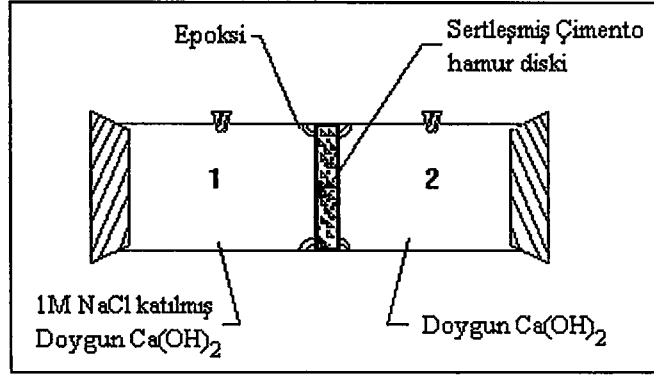
Klorür korozyonu nedeniyle hasar sürecinin I. döneminde belirtilen, klorür iyonlarının donatı etrafında birikmesi süresinin belirlenmesi için, betonun klorür difüzyon katsayısının tayin edilmesi gerekir. Betonların klorür iyonları geçirimliliğini tayin etmek üzere geliştirilmiş yöntemler iki ana grupta toplanmaktadır. Bunlardan biri difüzyon, diğeri elektriksel iletkenlik ölçmeye dayanır. Difüzyonu esas alan deneylerde, iyon konsantrasyon farkı oluşturularak, belirli kalınlıktaki betonu kateden klorür iyon miktarı belirlenir. Uzun zaman gerektiren bu deneyler uygulamaya yönelik sayılmazlar. Ancak deney sonuçları difüzyon katsayısının hesaplanmasında kullanılabilir. Elektriksel iletkenliği esas alan deneyler daha hızlı olmasına karşın sayısal değerlendirmeye olanak sağlamazlar, niteliksel değerlendirmeler yapılabilir (Akman ve Erdiñç, 1997).

### **Klorür Difüzyonuna Dayanan Deneyler**

Betonda klorür difüzyonunu esas alan deneylerde Şekil 2.8'de görüldüğü gibi farklı konsantrasyonlardaki klorür geçişinin ölçüldüğü deneylerle ve Şekil 2.9'da görüldüğü gibi belirli konsantrasyonlardaki klorürün numune içine difüzyonunu belirlemeye yönelik deney yöntemleri ile araştırılır. Birinci gruptaki deneyler, Şekil 2.8'de görüldüğü gibi, bir çimento hamur diski, kirece doygun iki su haznesi arasına yerleştirilir ve haznelerden birine 1 M NaCl katılarak iyon konsantrasyonu gradienti sağlanır. Byfors (1987), bu



amaçla yaptığı bir çalışmada 19 mm çapında ve 50 mm yüksekliğindeki silindirik çimento hamuru numuneleri, 14 ay süre ile kirece doymuş suda kürettikten sonra, numunelerden 3 mm kalınlığında diskler çıkarmış, bu diskleri Şekil 2.8'deki gibi iki hücre arasına yerleştirmiş ve 2 hücresindeki  $\text{Cl}^-$  konsantrasyonunu belirli zaman aralıklarında ion-selective elektrod ile ölçmüştür.



Şekil 2.8 Difüzyon hücresi (Byfors, 1987)

Klorür iyonlarının çimento hidrasyon ürünleri tarafından bağlanması nedeni ile başlangıçta disk içinden geçen  $\text{Cl}^-$  difüzyonu çok azdır. Daha sonraki günlerde, 2 hücresindeki  $\text{Cl}^-$  miktarı zamanın bir fonksiyonu olarak artar. Sertleşmiş çimento hamurundan geçen klorür difüzyonu, 1. Fick Yasası ile tanımlanabilir. 1. Fick Yasasına göre difüzyon, o noktadaki konsantrasyon gradyenti  $dc/dx$  ile orantılıdır (2.21). İon akışının  $J$  ( $\text{mol/m}^2 \cdot \text{san}$ ) ile gösterildiği (2.21) bağıntısında,  $D$ 'ye difüzyon katsayısı denir ve birimi ( $\text{cm}^2/\text{san}$ )'dir. Difüzyonun yönü  $dc/dx$ ' in işaretinin tersi yönünde olduğu için denkleme eksi işareti konmuştur.

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (2.21)$$

Bu çalışmada, 1. Fick yasası Şekil 2.8'de gösterilen sisteme uygulanarak (2.22) bağıntısı; klorür difüzyonunun kinetiği dikkate alınarak (2.23) bağıntısı yazılmıştır.

$$J = -D \frac{c_1 - c_2}{e} \quad (2.22)$$

- J : İyon akışı (mol/cm<sup>2</sup>.san)  
 D : Difüzyon katsayısı (cm<sup>2</sup>/san)  
 c<sub>i</sub> : Çözeltilerin Cl<sup>-</sup> konsantrasyon (mol/cm<sup>3</sup>)  
 e : Numunenin kalınlığı (cm)

$$J = -\frac{1}{S} \cdot V \frac{dc_2}{dt} \quad (2.23)$$

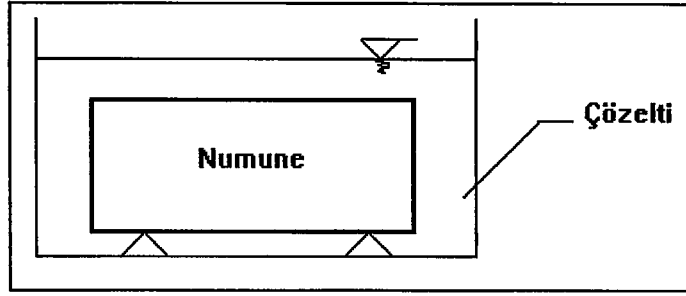
(2.22) ve (2.23) bağıntılarının eşitliğinden yararlanılarak, t<sub>1</sub>>t<sub>0</sub> ve c<sub>1</sub>>>c<sub>2</sub> için difüzyon katsayısını belirlemek üzere (2.24) bağıntısı yazılmıştır.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (c_2)_i \cdot V \cdot l}{c_1 \cdot S \cdot (t_n - t_0)} \quad (2.24)$$

- c<sub>1</sub> : 1 no'lu hücredeki Cl<sup>-</sup> konsantrasyonu (mol/cm<sup>3</sup>)  
 c<sub>2</sub> : 2 no'lu hücredeki Cl<sup>-</sup> konsantrasyonu (mol/cm<sup>3</sup>)  
 (c<sub>2</sub>)<sub>i</sub> : 2 no'lu hücrede (t-t<sub>0</sub>) zaman aralıklarında ölçülen Cl<sup>-</sup> konsantrasyonu (mol/cm<sup>3</sup>)  
 n : 2 no'lu hücreden alınan numune sayısı  
 t<sub>0</sub> : Lineer akışın başladığı süre  
 S : Numunenin çözelti ile temas eden yüzey alanı (cm<sup>2</sup>)  
 V : 2 hücresindeki çözeltinin hacmi (cm<sup>3</sup>)  
 t : Zaman  
 D : Çözeltinin konsantrasyon gradyentine bağlı, sertleşmiş çimento hamurundan geçen klorür iyonu difüzyon katsayısı (cm<sup>2</sup>/san)

Betonda difüzyon ölçmeye yönelik diğer bir deney ise, beton içine nüfuz eden Cl<sup>-</sup> miktarının ölçülmesi deneyidir. Bu deneylerde, belirli klorür konsantrasyonundaki çözeltiler içine daldırılmış numunelerden (Şekil 2.9), belirli zaman aralıklarında, farklı

derinliklerden numuneler alınır. Bu numuneler öğütülerek toz haline getirilir ve klorür miktarı kimyasal titrasyonla veya standard elektrodlar yardımıyla belirlenebilir. Deneyler sonucunda derinlik, zaman ve klorür miktarı belli olduğuna göre, D difüzyon katsayısını yine 1. Fick Yasası yardımıyla hesaplamak mümkün olmaktadır. Bu amaçla yapılan çalışmalarda, klorür miktarının derinliğin bir fonksiyonu olarak gösterildiği, klorür profilleri de çıkarılmaktadır (Tagaki vd, 1991; Azari vd, 1993; Mangat ve Molloy, 1995).



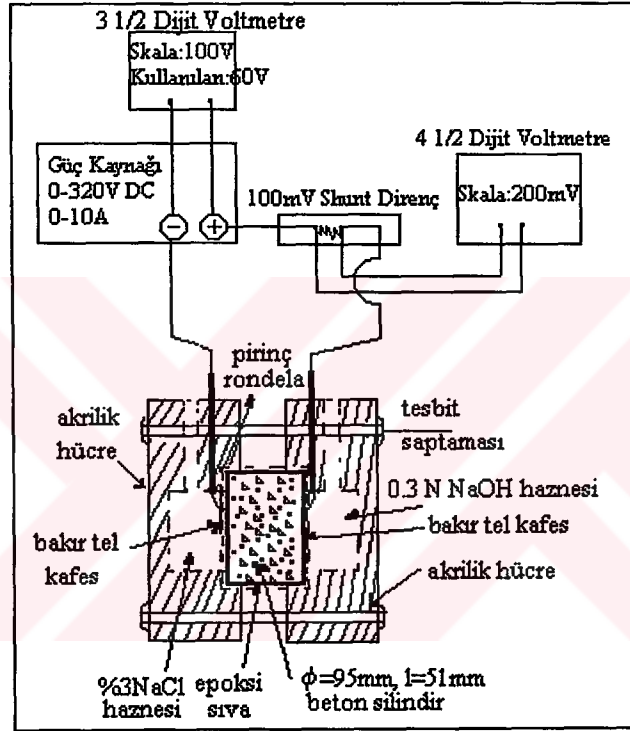
Şekil 2.9 Klorür iyonlarının numune içine difüzyonu

### Elektriksel Geçirgenliği Ölçmeye Dayanan Deneyler

Betonda elektriksel iletkenliğin esas alındığı dört tip hızlandırılmış klorür deneyi geliştirilmiştir. Bunlardan ilk üçünde beton numuneler, bir yüzünde klorür çözeltisi, diğerinde klorür içermeyen çözelti bulunan haznelere yerleştirilmiştir. Beton içinden  $Cl^-$  iyonlarının geçişi için bir potansiyel fark oluşturulmuştur. Dördüncü tipte ise her iki haznede aynı konsantrasyondaki NaCl çözeltileri kullanılmıştır (Streicher ve Alexander, 1995).

Bu metodlardan ilki, AASHTO T277 standardı ile belirlenmiştir. Bu deney metodu 60 V'luk potansiyel farkın oluşturduğu elektriksel alan etkisiyle harekete geçen  $Cl^-$  iyonlarının, taşıdığı elektrik miktarını belirleme amacını taşır. Standard yöntemde 95 mm çapında ve 51 mm yüksekliğindeki beton silindir numuneler, Şekil 2.10'da gösterildiği gibi düzenek içine yerleştirilir. Numuneler %3 NaCl ve 0.3N NaOH çözeltileri arasında 60 Volt DC akıma maruz bırakılarak, 6 saat zarfında geçen elektrik miktarı coulomb cinsinden belirlenir. AASHTO T-277 yönteminde elde edilen coulomb değerlerinin, betonun klorür

geçirimsizliği yönünden niteliksel olarak Çizelge 2.6'daki gibi değerlendirilebileceği ifade edilmiştir. AASHTO T277 deney metodu,  $Cl^-$  konsantrasyonunu kimyasal yolla belirlemeye oranla çok daha hızlı olmasına karşın; salt bir difüzyon testi olmadığından kararsız bir akı oluşmasına yol açar ve 1. Fick Yasası ile uyumlu değildir. Bu deney sisteminde, yüksek voltaj nedeni ile suyun ısınması, elektroliz meydana gelmesi, gaz kabarcıkları oluşması deneyin zorlaşmasına ve güvenilirliğinin azalmasına neden olur (Akman vd, 1994).



Şekil 2.10 AASHTO-T277 deney aleti ve elektrik bağlantı şeması

Çizelge 2.6 Klorür geçirimsizliğinin değerlendirilmesi (Akman vd, 1994)

Geçen Elektrik Miktarı coulomb / 6 saat	$Cl^-$ Geçirimsizlik Düzeyi	Beton Türü
>4000	yüksek	Su/Çimento>0.6 PÇ'li betonlar
2000-4000	orta	0.5>Su/Çimento>0.4 PÇ'li betonlar
1000-2000	düşük	Su/Çimento<0.4 PÇ'li betonlar
100-1000	çok düşük	Lateks modifiye betonlar
<100	ihmal edilebilir	Polimer emdirilmiş betonlar

İkinci tip iletkenlik deneyi, Dhir vd (1990) tarafından geliştirilmiştir. 10 V'luk potansiyel fark altında, D difüzyon katsayısını daha hızlı bulmayı amaçlar. Bu sistemde AASHTO T277'deki ısınma ve elektroliz olaylarının oluşmasına önlem olarak elektrolit sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Hızlandırılmış ve normal usullere göre yapılan testler yardımıyla önerilen bağıntı, 1. Fick Yasası'nın bir çözümü olarak ortaya konmuştur. Çözüm için, (2.22) ve (2.23) bağıntıları eşitlenerek  $t_0$ 'dan  $t_n$ 'e kadar integre edilmiş ve (2.25) bağıntısı elde edilmiştir. Difüzyon katsayıları için deneylerden bulunan sonuçlar ile geliştirdikleri bağıntıdan (2.25) elde edilen sonuçlar arasında 0.99'luk korelasyon olduğu gösterilmiştir.

$$\ln(c_1 - c_2) = -\frac{DS}{Ve}(t_n - t_0) + \ln c_1 \quad (2.25)$$

Üçüncü tip iletkenlik deneyi ise Tang ve Nilsson (1992) tarafından geliştirilmiştir. Bu deney yönteminde 8 saat, 30 V potansiyel farkı altında tutulan numunede  $\text{Cl}^-$  penetrasyon derinliği ölçülmüştür. Deney sonuçları değerlendirilerek, difüzyon katsayısı (2.26) bağıntısı ile belirlenmiştir.

$$D = 1.189 \times 10^{-11} \left(\frac{x_f}{t}\right) \text{ m}^2/\text{s} \quad (2.26)$$

Bu bağıntıda teorik  $\text{Cl}^-$  penetrasyon derinliği  $x_f$ ,  $x_d$ 'nin bir fonksiyonu olarak ( $x_f = x_d - 1.061x_d^{0.589}$ ) hesaplanmıştır;  $x_d$  renk ayırımı yöntemi ile ölçülen penetrasyon derinliğidir (Tang ve Nilsson, 1992; Tang, 1996). Klorür penetrasyon derinliğinin belirlenmesi için kullanılan renk ayırımı yönteminde, %1'lik fluorescein NaCl çözeltisi, %0.2'lik gümüş nitrat çözeltisi ve kolorimetreden yararlanılmaktadır. Belirli klorür konsantrasyonlarında bekletilen numuneler yarma deneyine tabi tutulur, yarılan yüzey üzerine belirtilen çözeltiler püskürtülür. Gümüş nitrat, klorürün nüfuz ettiği bölgede gümüş klorür olarak çökeler ve beyaz renge dönüşür. Klorürün ulaşamadığı bölgede  $\text{OH}^-$  iyonları gümüşoksit formuna dönüşür ve kahverengi renk alır. Renk ayırımının olduğu sınır çizgileri kolorimetre yardımıyla ölçülür (Yamoto vd, 1989; Otsuki vd, 1992; Torii vd, 1995).

(2.26) Bağıntısının elde edilmesinde 1. Fick (2.21) ve 2. Fick (2.27) yasalarından geliştirilmiş olan Nernst-Planck bağıntısından (2.28) yararlanılmıştır. İkinci Fick yasasında konsantrasyonun zamanla değişme hızı ( $dc/dt$ ), konsantrasyon gradyentinin ( $dc/dx$ ) türevi ile orantılıdır (Streicher ve Alexander, 1994).

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2} \quad (2.27)$$

Nernst-Planck denkleminde (2.28) difüzyon katsayısı, klorür penetrasyon derinliğinin zamanla değişimi ( $x_f/t$ ), iyon valansı mutlak değeri ( $z$ ) ve elektriksel alan ( $E$ ) dikkate alınarak belirlenmiştir.

$$D = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_f}{t} \quad (2.28)$$

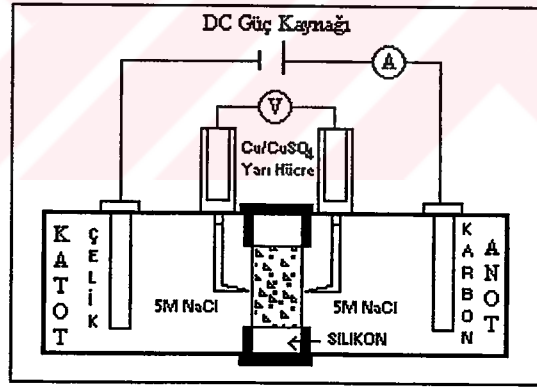
- $x_f$  : Teorik klorür penetrasyon derinliği (mm)  
 $t$  : Zaman (s)  
 $R$  : Gaz sabiti, 8.314 (Joule/K.mol)  
 $T$  : Mutlak sıcaklık 298 (K)  
 $z$  : İyon valansı mutlak değeri (eq/mol : Cl<sup>-</sup> için 1)  
 $F$  : Faraday sabiti  $9.648 \times 10^4$  (J/V mol)  
 $E$  : Elektriksel alan -600 (V/m)

2. Fick Yasası tek başına kullanılarak da difüzyon katsayısı belirlenmektedir. Ancak Chatterji (1995), çimento ve beton için başlangıç ve sınır şartlarına bağlı olarak (2.26) denkleminin çözümü ile ortaya konulan (2.29) denkleminin kullanılmayacağını, dolayısıyla Fick'in 2. yasasının tek başına anlam ifade etmediğini belirtmiştir.

$$\frac{(c_s - c_x)}{(c_s - c_0)} = \text{erf} \left[ \frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right] \quad (2.29)$$

- $c_s$  : Çözelti ile temas halinde olan yüzeyde, numunenin  $Cl^-$  iyon konsantrasyonu.  
 $c_x$  : Numunenin, x derinliğindeki  $Cl^-$  konsantrasyonu.  
 $c_0$  : Numunenin başlangıç klorür iyon konsantrasyonu.  
 $t$  : Klorür çözeltisinin etki ettiği süre (san).  
 $erf$  : Hata fonksiyonu.

Bu üç yöntemden başka, Streicher ve Alexander (1995), betonun  $Cl^-$  geçirimliliğini ölçmek için diğer deneylerden çok daha hızlı bir deney yöntemi önermişlerdir. Bu yöntemde bir iletken hücre kullanılarak bir saatte 20 beton numunesi test edilebilmiştir. Deney düzeneğinde Şekil 2.11'de görüldüğü gibi, her iki haznede aynı konsantrasyondaki NaCl çözeltisi (5M NaCl) kullanılmış, hücreler arasına daha önce aynı çözelti ile doyurulmuş numune yerleştirilmiştir. Bu yöntemde beton numunelerin boşluk yapılarındaki farklılık nedeniyle, farklı iletkenlikler göstereceği kabul edilerek sistemin 10 V'luk sabit gerilimdeki akım şiddeti ölçülmüştür. Numunenin iletkenliğini belirlemek için deney sonuçlarından ve (2.30) bağıntısından yararlanılmıştır :



Şekil 2.11 Elektriksel iletkenlik deney düzeneği (Streicher ve Alexander, 1995)

$$\sigma = \frac{i e}{E S} \quad (2.30)$$

- $\sigma$  : Numunenin iletkenliği (mS/cm)  
 $i$  : Elektrik akımı (mA)  
 $E$  : Potansiyel fark (V)



- e : Numune kalınlığı (cm)  
 S : Numunenin kesit alanı (cm<sup>2</sup>)

Bu bağıntı ile belirlenen elektriksel iletkenlik, betonun klorür geçirgenliği kadar, (2.31) bağıntısı ile verilen difüzyon oranı ile de ilişkilidir.

$$Q = \frac{D}{D_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (2.31)$$

- Q : Boşluklu malzemenin difüzyon oranı  
 D : Boşluklu malzemenin difüzyonu  
 D<sub>0</sub> : Boşluk çözeltisinin difüzyonu  
 σ : Boşluklu malzemenin iletkenliği  
 σ<sub>0</sub> : Boşluk çözeltisinin iletkenliği

Doğru tuz çözeltisinin iletkenliği kolaylıkla ölçülebilmektedir. Ancak iletkenliği artıran K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> ve OH<sup>-</sup> gibi iyonları da içeren beton boşluk çözeltisinin iletkenliğini ölçmek zordur. Streicher ve Alexander tarafından farklı konsantrasyondaki (NaCl, 0.16 M KOH ve 0.32 M KOH) çözeltilerin ve farklı konsantrasyonlardaki NaCl çözeltilerine doyurulmuş harç numunelerin iletkenlik ölçümleri yapılmış, yüksek klorür konsantrasyonlarında difüzyon oranının (Q=σ/σ<sub>0</sub>) sabit kaldığı ve boşluk çözeltisinde kabul edilen miktarlardaki KOH'in bulunmasının bu oranı etkilemediği görülmüştür. Sonuç olarak teorik anlamı olan iletkenlik deneyinin çok daha hızlı bir yöntem olduğu; silis dumanı ve uçucu kül gibi puzolanların kullanıldığı, farklı tipdeki bağlayıcılar için de kullanılabileceği ifade edilmiştir.

### 2.3 Korozyon Tespit, Ölçüm ve Değerlendirme Yöntemleri

Betonarme yapılarda korozyondan kaynaklanan hasarlardaki artış ve bunlar için ayrılan mali kaynakların büyüklüğü, korozyondaki erken teşhisin önemini ortaya koymaktadır. Korozyondan korunmada önceden yapılacak deneyler ile yapıda kullanılacak malzemelerin yeterliliğinin araştırılması, sonradan yapılacak pahalı onarımların önüne geçilmesini

sağlayacaktır. Betonarme yapılarda olası hasarların teşhis ve kontrol metodlarında, gözle görülen semptomlardan korozyonun kalitatif olarak belirlenmesine, korozyon hızının sistematik olarak ölçülmesine ve konu ile ilgili bazı parametrelere ihtiyaç vardır. Betonarme yapılarda korozyonun kontrolü için kullanılan metodların özellikleri, sonuçların elde edilmesindeki hıza bağlı olarak Çizelge 2.7’de özetlenmiştir (Rodriguez vd., 1994). Korozyon deneyleri doğrudan agresif ortamın bulunduğu doğal çevrede veya laboratuvarda yapılır. Arazide veya denizde yapılan deneylerde yapı elemanının kendisi, bir diğer deyişle prototipi deney numunesi olur. Korozyon hasarı, gözlem sonucu kalitatif olarak veya paslanma miktarı yani penetrasyon derinliği ölçülerek değerlendirilir. Laboratuvar deneylerinde amaç, genellikle koruma için alınan önlemlerin yeterliliğinin, örneğin Cl<sup>-</sup> difüzyonunun önlenip önlenmediğinin incelenmesidir (Akman, 1992a).

Çizelge 2.7 Betonarme yapılarda korozyonun kontrolü için en çok kullanılan metodların özellikleri, (A): ani (optimum), (C): çok yavaş (yetersiz)

Karakteristiği	Gözleme Dayanan İncelemeler	Deneysel Tespitler		
		Ağırlık Kaybı Deneyleri	Potansiyel Haritalar	Polarizasyon Metodları
Sonuç Elde Etme Hızı	A	C	A	A
Değişimlere Tepkinin Hızı	C	C	A	A
Kantitatif Bilgi	C	A	C	A
Non-Destructive	A	C	A	A
Ölçüm Parametresi	Ortaya çıkan değişiklik	Korozyon hızı	Korozyon olasılığı	$I_{corr}$

### 2.3.1. Gözlemsel metodlar

Gözlemsel metodlar, özel koşullar altında pratik ve tahribatsız olmalarına rağmen, değişimlere tepkinin hızı düşük olduğu için önemli sonuçların elde edilmesinde uzun zaman gerektirir. Bu yöntemde gözlemlerin çok hızlı yorumlanabilmesine karşın, korozyon direnci yüksek sistemlerde değişikliğin ortaya çıkması uzun zaman alır. Tahribatsız yöntem olduğu için donatıdaki değişiklikler doğrudan belirlenemez; pas lekeleri, çatlama ve parça atmalar gibi semptomların açıkça görülmeye başlanmasından itibaren korozyondan şüphelenilir, ancak bu durumda korozyon önemli derecede ilerlemiş olabilir.

### 2.3.2 Deneysel tespitler ve ölçüm parametreleri

Betonarme yapılarda korozyon hızının ölçümü için yerinde ve laboratuvarında yapılan deneyler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

#### 2.3.2.1 Ağırlık kaybını esas alan deneyler

Donatıda korozyonun oluşturduğu hasarı araştırmak için ağırlık kaybından yararlanılarak penetrasyon derinliği belirlenebilir. Bunun için belirli süreler sonunda metalin yüzeyindeki malzeme kaybı tesbit edilerek malzemenin ortalama yıllık penetrasyon miktarı (2.32) bağıntısı ile hesaplanır. Bu ifadede P, cm/yıl olarak penetrasyon miktarını;  $W_K$  metalin korozyonla ağırlık kaybını (g); S, korozyona maruz kalan yüzeyi ( $cm^2$ ); t, deney süresini (saat);  $\Delta$  ise metalin yoğunluğunu göstermektedir (Saraylı, 1978).

$$P = \frac{W_K}{\Delta \cdot S \cdot t} \times 24 \times 365 \quad (2.32)$$

Korozyon nedeni ile birim zamanda yüzeyden taşınan tabakanın kalınlığını ifade eden ve literatürde korozyon hızı olarak tanımlanan bu bağıntı, mpy (mil/yıl) cinsinden (2.33) standartlarda da yer almaktadır (ASTM G1-90). Korozyon hızı, ağırlık kaybının oranı olarak (%) veya yüzeyden ağırlık kaybı olarak ( $mg/cm^2$ ) (Kouloumbi and Batis, 1992) ya da ortalama kesit kaybı (mikron) (Rasheeduzzafar vd., 1992c) olarak ifade edilmektedir. Ancak literatürde hem zamanı hem de yüzeyi dikkate alan ve en sık kullanılan ifade mpy'dir.

$$\text{Korozyon Hızı (mpy)} = \frac{3,45 \times 10^6 W_L}{\Delta \cdot S \cdot t} \quad (2.33)$$

Korozyon Hızı (mpy : mil/yıl): 1mil= 0.001inç; 1 mil/yıl = 25.4  $\mu$ /yıl;

$W_L$  : Ağırlık kaybı (g)

$\Delta$  : Yoğunluk ( $g/cm^3$ )

S : Alan ( $\text{cm}^2$ )

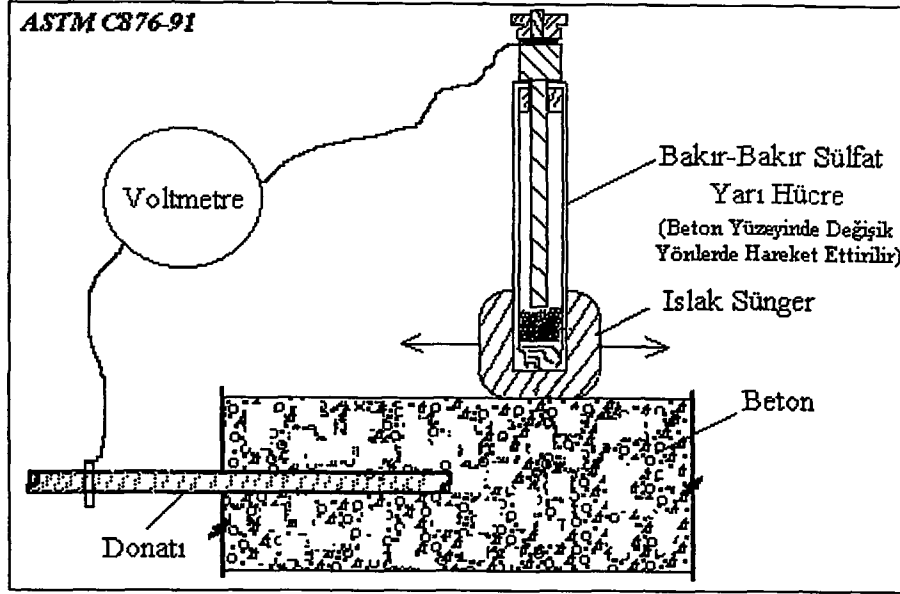
t : Zaman (saat)

Korozyon nedeni ile oluşan ağırlık kaybı, pas tabakasının Clarke Çözeltisi olarak bilinen kimyasal sıvı (1000 mL HCl, 24 g  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  ve 71.3 g  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ile temizlenmesinden sonra belirlenir (Parkins, 1994).

Aköz vd. (1996b), 300 gün süre ile farklı konsantrasyonlarda  $\text{Cl}^-$  içeren çözeltilerde bekletilen harç içindeki donatıların ağırlık kaybının ihmal edilebilir düzeyde olduğunu belirtmişlerdir. Ancak Andrade vd. (1993), donatı kesitindeki ihmal edilebilir kayıpların betonun çatlamasına neden olabileceğini göstermişlerdir. Al-Tayyib ve Khan (1988), ağırlık kaybı yönteminin uzun zaman ve/veya çok daha fazla korozif ortam gerektirdiğini, korozyon ölçümünde elektrokimyasal tekniklerin daha uygun olacağını ifade etmişlerdir.

### 2.3.2.2 Potansiyel haritaları

Yapının korozyona uğrama ihtimalinin çok arttığı aktif bölgelerin gösterildiği potansiyel haritalarından çok sık yararlanır. Bu deney metodu donatı çeliğinin korozyon aktivitesini belirlemek amacıyla yerinde veya laboratuvarında donatının elektriksel yarı hücre potansiyelinin belirlenmesini amaçlar (Liam vd., 1992; Khan, 1991). Bu kolay ve hızlı elektrokimyasal korozyon izleme yöntemidir ve korozyon potansiyelinin ( $E_{\text{corr}}$ ) ölçülmesine dayanır. Şekil 2.12'de görüldüğü gibi referans elektrotu beton yüzeyine değdirilir, beton içindeki çelik çubuk ile referans elektrotu arasında meydana gelen potansiyel farkı, yüksek empedanslı bir voltmetre ile ölçülür. Betonun elektriksel direnci yüksek olduğundan iletkenliği sağlamak amacı ile referans elektrot ile beton arasına özel bir sıvı ile nemlendirilmiş sünger konulur. Bu metod donatı üzerindeki beton kalınlığını dikkate almaz, beton elemanın herhangi bir servis süresinde kullanılabilir. Yarı-hücre potansiyeli değerine göre olası korozyon durumunu veren değerlendirmeler Çizelge 2.8 ve Çizelge 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.12 Bakır-bakır sülfat yarı hücre devresi (ASTM C 876)

Çizelge 2.8 ASTM C 876'ya göre potansiyel kriterleri

Yarı-hücre potansiyel değerleri, CSE (SCE)	Korozyon Olasılığı
$E < -350\text{mV} (-270\text{mV})$	%90 güvenirlikle donatının korozyona uğrama olasılığı vardır
$-350\text{mV} < E < -200\text{mV} (-120\text{mV})$	belirsizlik vardır, kesin bir şey söylenemez
$-200\text{mV} < E$	%90 güvenirlikle korozyon yoktur

Çizelge 2.9 H.Arup'un Potansiyel Kriterleri (Khan, 1991)

Yarı-hücre potansiyel değerleri, (SCE)	Ortam	Korozyon Durumu
$-600\text{mV} < E < +200\text{mV}$	$\text{Cl}^-$ iyonu yok, $\text{pH}=13$	Pasif
$-200\text{mV} < E < +100\text{mV}$	Normal koşullardaki betonarme eleman	Durum
$-500\text{mV} < E < -200\text{mV}$	Ortamda $\text{Cl}^-$ iyonu var	Çukurcuk Korozyonu
$-600\text{mV} < E < -450\text{mV}$	Karbonatlaşma ve $\text{Cl}^-$ iyonu nedeni ile depasivasyon	Genel Korozyon
$-1000\text{mV}$	Oksijen girişinin sınırlandırıldığı ve pasif filmin korunamadığı ortam	Aktif Durum

Referans elektrotu olarak en fazla kullanılanlar bakır-bakır sülfat (CSE), gümüş-gümüş klorür veya kalomel elektrottur. Kalomel, KCl eriğine daldırılmış  $Hg/Hg_2Cl_2$  elektrotudur, KCl çözeltisinin normalitesine bağlı olarak 0.1N; 1N veya doymuş kalomel elektrot adlarını alır. Yapılması ve muhafazasının kolaylığı bakımından ve 1mV'luk hassasiyet yeterli olduğundan doymuş kalomel elektrot (SCE) daha yaygın olarak kullanılır ( $E=0.2425$  Volt). Sharp vd (1988), yukarıda belirtilen üç farklı referans elektrotu karşılaştırdıkları deneysel çalışmada; bakır-bakır sülfat elektrotunun beton boşluk suyuna benzeyen sodyumhidroksit çözeltisinde kararsız olduğunu, deniz suyunda ise elektrot potansiyelinin 150 mV'a varan salınımlar yaptığını, diğer iki elektrotun iyi sonuçlar verdiğini görmüşlerdir.

ASTM C 876'nın verdiği daha yüksek negatif potansiyel değeri, her zaman daha hızlı korozyon olduğu anlamına gelmez, çünkü potansiyelin negatif yönde artışı, gerçekte örneğin Fe iyon konsantrasyonundaki azalmanın göstergesi olabilir. Bu nedenle korozyon hızının, yarı-hücre potansiyeli yerine diğer elektro-kimyasal tekniklerle elde edilmesi daha doğrudur (Basunbul vd., 1991).

### 2.3.2.3 Polarizasyon teknikleri

Elektropotansiyeli farklı iki metal elektrolitik bir ortamla birleştirildiğinde bir tam elektrokimyasal hücre oluştururlar. Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi elementlerden standard potansiyeli yüksek olan katodu, diğeri anodu teşkil eder. Oluşturulan elektrokimyasal hücrenin potansiyel farkı, katot ve anot standard potansiyellerinin cebrik farkına eşittir. Bu fark ne kadar büyükse, devreden akım geçme olasılığı da o kadar yüksektir. Hücrede oluşan akım şiddeti korozyonun şiddetini belirler. Sulu ortama daldırılan metallerin oluşturduğu hücrenin  $E_0$  potansiyeli, ortamdaki iyon konsantrasyonunun veya diğer bir deyişle aktivitesinin fonksiyonu olarak Nernst denklemiyle (2.34) belirlenir. Bu denklemdeki  $E$  hücrenin standard potansiyelini,  $E_0$  hücrenin termodinamik denge potansiyelini,  $n$  iletilen elektron mol sayısını,  $R$  gaz sabitini (8.314),  $T$  sıcaklığı (298 °K),  $F$  bir mol elektron yükünü (96500 Coulomb) ve  $a_m \cdot n^+$  iyon konsantrasyon oranının molarite cinsinden değerini ifade eder.

$$E_0 = E - \frac{RT}{nF} \cdot \ln(a_m \cdot n^+) = E_0' + \frac{0.059}{n} \cdot \log(a_m \cdot n^+) \quad (2.34)$$

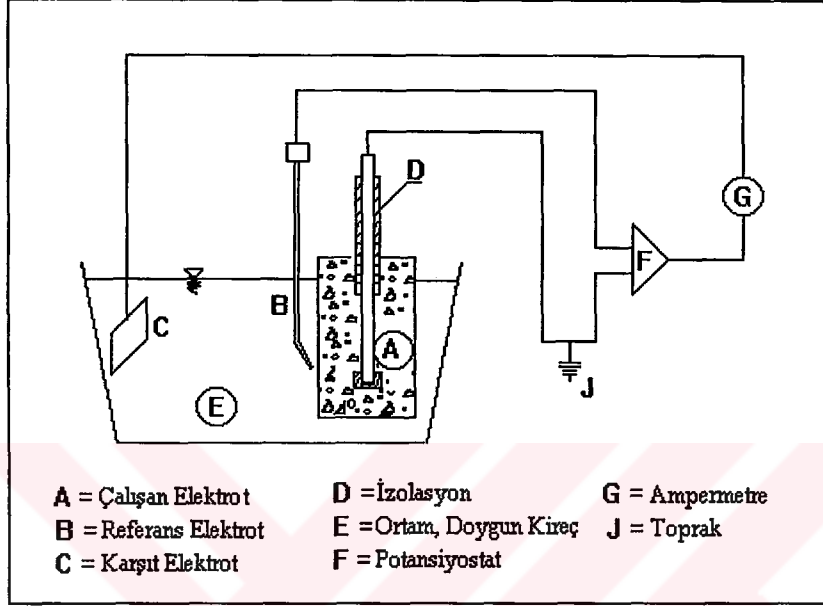
Hücrenin potansiyel değeri E, termodinamik denge potansiyeli E<sub>0</sub>'dan farklılaşınca korozyon başlar (Akman, 1992a). Tek bir elektrot reaksiyonunun belirli bir hızda ve belirli bir kinetik mekanizmaya bağlı olarak gelişmesi için gerekli enerjiye fazla voltaj adı verilir. Polarizasyon bir elektrottaki fazla voltajların toplamıdır. Polarizasyona neden olan olaylar konsantrasyon polarizasyonu, aktivasyon polarizasyonu ve IR düşmesidir. Çözeltideki iyonların difüzyonunun neden olduğu polarizasyona konsantrasyon polarizasyonu denir. Aktivasyon polarizasyonu elektrotta meydana gelen elektron alış-veriş reaksiyon basamaklarından birinin yavaş cereyan etmesi sonucunda ortaya çıkar. Metal üst yüzeyini örten oksit tabakalarının elektrik direnci ise IR polarizasyonunu doğurur. Gerçekte gözlemlenen aşırı potansiyeller yukarıda açıklanan konsantrasyon, aktivasyon ve direnç potansiyellerinin toplamıdır. Bunlardan biri veya ikisi diğerine oranla daha baskın olabilir. (Şengil, 1992). Korozyon hızı polarizasyonunun büyüklüğüne bağlıdır. η<sub>A</sub> ile gösterilen fazla voltaj E-E<sub>0</sub> farkına eşittir. Bu eşitlik aynı zamanda korozyonun önemli bir büyüklüğünü, “β : Tafel Eğimi’ni” de tanımlamaktadır (2.35).

$$\eta_A = E - E_0 = \pm \beta \cdot \log \frac{i}{i_0} \quad (2.35)$$

Korozyonun gelişmesi hakkında bilgi sağlayan polarizasyon eğrileri, elektro-kimyasal hücre içinde anot ve katodun polarizasyonu sonucu gelişen, akımın şiddeti ve potansiyeli arasındaki bağıntıyı gösteren eğrilerdir. Polarizasyon eğrilerinin çizilebilmesi için gerekli olan potansiyel ve akım şiddetinin belirlenmesinde akım şiddetinin doğrudan ölçülmesi uygun değildir. Çünkü burada ölçülen akım metal yüzeyindeki sayısız anot ve katot arasından geçen akımdır. Bu nedenle ölçüm Şekil 2.13'deki gibi bir devre ile dolaylı olarak yapılır ve polarizasyon eğrileri çizilir. Sabit bir gerilim ile beslenen bu devrede, gerilim değişimleri ve akım şiddetleri ölçülür. İstenilen sabit potansiyeli sağlayan, potansiyel değişimlerini ve akım şiddetlerini ölçen araçlara potansiyostat adı verilir. Ölçü sisteminde donatı, çalışan elektrot adını alır, dış kaynaktan verilen gerilime ve akım şiddetine bağlı



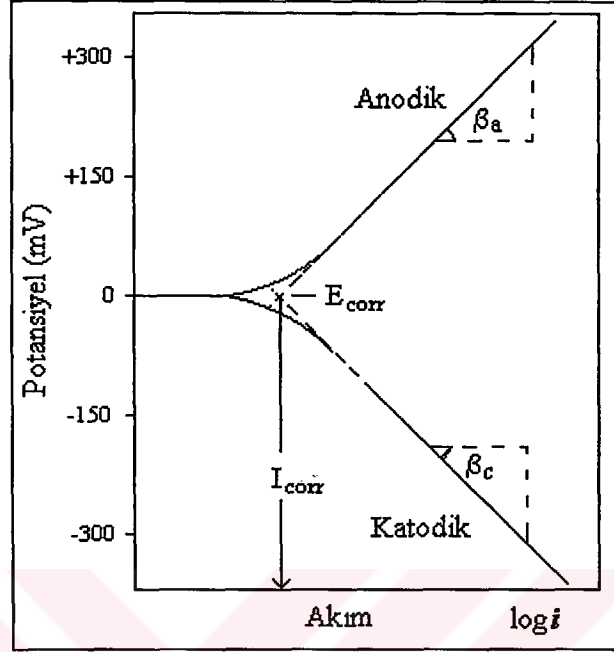
olarak, beton içindeki çelik anottan katoda doğru değişik davranışlar gösterir. Şekil 2.13'de görülen sistemde hücreyi tamamlamak üzere kirece doymun ortam içinde bir karşıt elektrot daldırılmıştır. Potansiyostat yardımı ile donatının anot olarak davranması sağlanabilir, bu durumda karşıt elektrot katot olarak davranır. Bunun tersi de mümkündür.



Şekil 2.13 Polarizasyon eğrilerinin çizimine olanak veren potansiyostatlı korozyon ölçüm sistemi (Akman, 1992a)

Karşıt elektrot camısı karbon, platin veya oksit kaplı titan olabilir. Çalışan elektrotun potansiyeli, beton yüzeyine yakın bir yerde tutulan referans elektrota göre belirlenir. Potansiyostat içinde bulunan bir ampermetre yardımıyla da akım şiddeti ölçülür (Akman, 1992a). Polarizasyon eğrilerinin çizimi için yapılan ölçümlerde, daldırıldığı sıvı ortam içinde çözünmekte olan bir metalin ölçülen potansiyeli korozyon potansiyelidir ( $E_{corr}$ ) (Şengil, 1992). Şekil 2.13'deki sistemde numuneye bir potansiyostat yardımı ile  $E_{corr}$ 'dan başlayarak yaklaşık 250 mV'a kadar potansiyel, anodik ve katodik doğrultularda yavaş yavaş uygulanır. Ölçülen dış akımlar ile uygulanan potansiyeller arasında deneysel polarizasyon eğrileri çizilir. Şekil 2.14'te görülen eğriler idealize edilmiş Tafel eğrileridir. Doğrusal kısımların kesiştiği noktadan  $I_{corr}$  belirlenir. Faraday kanunundan çıkarılan 2.36 bağıntısı yardımıyla korozyon hızı hesaplanabilir. Bağıntıda  $W_E$  çeliğin eşdeğer ağırlığı (g),  $\Delta$  ise yoğunluğudur (Al-Tayyib ve Khan, 1988; ASM Handbook, 1992).

$$\text{Korozyon hızı } (\mu/\text{yıl}) = \frac{3.27 \times I_{\text{corr}} \times W_E}{\Delta} \quad (2.36)$$



Şekil 2.14. İdealize edilmiş Tafel eğrisi (Al-Tayyib ve Khan, 1988)

Tafel ekstrapolasyonu ile korozyon hızının tayini oldukça çabuk sonuç verir. Fakat birden fazla indirgenme reaksiyonu varsa veya konsantrasyon polarizasyonu büyük ise Tafel bölgesi kaybolur ve ekstrapolasyon güçleşir. Böyle bir durumda lineer polarizasyon yöntemine başvurulur (Şengil, 1992).

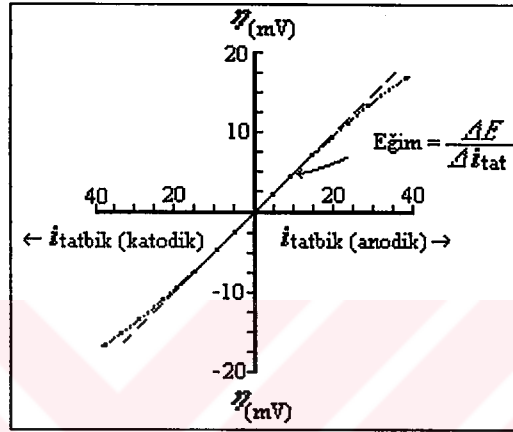
### Lineer Polarizasyon Yöntemi

Bu teknikte numuneye  $E_{\text{corr}}$ 'dan itibaren  $-25\text{mV}$  ile  $+25\text{mV}$  arasında kalmak üzere, Tafel tekniğinde kullanılanlardan çok daha küçük aralıklarda potansiyel uygulanır. Elde edilen veriler ile Şekil 2.15'teki gibi lineer polarizasyon diyagramı çizilir. Buradan bulunan eğimden ( $R_p$ ) ve Tafel eğimlerinden ( $\beta_a$  ve  $\beta_c$ ) yararlanılarak çıkarılan Stern-Geary ilişkisi (2.37a) kullanılarak  $I_{\text{corr}}$  belirlenir (Al-Tayyib ve Khan, 1988).

$$I_{corr} (\mu A / cm^2) = \frac{B}{R_p} \quad (2.37a)$$

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (2.37b)$$

$$B = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c)} \quad (2.37c)$$



Şekil 2.15. Lineer polarizasyon eğrisi (Şengil, 1992)

Sulu ortamlardaki çelik için  $\beta_a$  ve  $\beta_b$  değerleri 100mV'a eşittir. Beton içindeki donatının  $\beta_a$  ve  $\beta_b$  değerleri hakkında yeterli veri yoksa pasif durumdaki çelik için  $B=52mV$ , aktif durumdaki çelik için  $B=26mV$  değerleri kullanılarak denklem (2.37a) daha basit hale getirilir (Alonso vd., 1988; Gonzalez vd., 1990; Al-Amoudi ve Maslehuddin, 1993). Korozyon hızının belirlenmesinde ise yine 2.36 denkleminde yararlanılır.

#### 2.3.2.4 Diğer metodlar

Betonun elektriksel direncinin çok yüksek oluşu, doğru akımla (DC) veya düzeltilmiş alternatif akımla (AC) ölçmede hatalara sebep olur. Daha güvenilir sonuçlar elde etmek üzere, betonarme elemanlar için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Rodriguez vd.'ne (1994) göre, en çok kullanılan yöntemlerden bazıları, Koruma Çemberi, Coulostatik, Elektrokimyasal Gürültü ve Elektrokimyasal Impedans Spektroskopisi'dir. Ancak bütün bu

elektro-kimyasal izleme yöntemleri, bir dereceye kadar Lineer Polarizasyon Metoduna yardımcı olurlar. Gerçekte korozyon kinetiğinin tahminleri, ya küçük doğru akım polarizasyonu altında ölçülen  $R_p$  değerleri ya da bir alternatif akım tekniği ile elde edilen impedans diyagramlarından çıkarılan  $R_T$  değerleri kullanılarak Stern-Geary bağıntısı ile yapılır. Betonarme yapılarda Elektro-kimyasal Impedans Spektroskopisi ile yapılan potansiyel ölçümlerinin daha güvenilir olduğu ifade edilir. Ancak bu metod yapıların korozyon kinetiğinin tahmini için Lineer Polarizasyon Metodundan daha avantajlı değildir, ve çok pahalı aletlere, özellikle küçük korozyon hızlarında uzun süreli ölçümlere ihtiyaç gösterir.

Literatürde ayrıca, zayıf gerilim dalgasının (weak stress wave) genliğinden yararlanılarak çatlağın yeri ve türünü belirleyen ve akustik emisyon tekniği adı verilen tahribatsız yöntemde rastlanmaktadır Zayıf gerilim dalgası çatlağın varlığı nedeni ile değişmekte, genlikteki değişimden çatlağın yeri, değişim oranından da çatlağın türü belirlenmektedir (Masayasu vd., 1998). Korozyona uğrayan donatının çevresinde, korozyon ürünü miktarına bağlı olarak mikroçatlaklar oluşur ve gelişir. Zayıf gerilim dalgasının genliğindeki değişim oranı, korozyon hızının bir göstergesi olmakta, yapı elemanının korozyon durumu hakkında fikir vermektedir (Li vd., 1998).

Korozyon akım yoğunluğu ile, ağırlık kaybı ile bulunan korozyon hızı arasında, ilişki kurmaya yönelik çalışmalar da vardır. Bu çalışmalarda, 1 A/m<sup>2</sup>'lik korozyon akım yoğunluğunun, çelik yüzeyinden ortalama 1.16 mm/yıl korozyon hızına eşdeğer olduğu görülmüştür. Örneğin pasif durumdaki çeliğin ~0.1 µ/yıl'lık korozyon hızı sadece 10<sup>-4</sup> A/m<sup>2</sup> iken, klorür iyonları etkisindeki ~0.1 mm/yıl'lık korozyon hızı 10<sup>-1</sup> A/m<sup>2</sup> 'dir (Hansson, 1984). Betonarme elemanın servis ömrünün bir ifadesi olarak korozyon için 0.1-0.8 µA/cm<sup>2</sup> arasındaki akım yoğunluğu ihmal edilebilir değer olarak kabul edilmektedir (Alonso vd., 1988; Gulikers ve Mier, 1991).

Elektro-kimyasal yöntemlerin tümünde amaçlanan, beton içindeki donatının korozyon akım yoğunluğunun ( $I_{corr}$ ) belirlenmesidir. Betonda elektrolitin katı bir kütle içinde olması, elektro-kimyasal ölçümün özel bir durumu olarak ele alınmasını gerektirir. Yapılan

çalışmalarda, beton içerisindeki akım dağılımının üniform olmadığı, donatı çapı ve beton örtü kalınlığından etkilendiği ifade edilmiştir. Bu sonuç Kasper tarafından çıkarılan 2.38 bağıntısında da görülmektedir (Feliu vd., 1995). Bu parametreleri dikkate alan Andrade vd.'nin (1996) yaptığı çalışmada, korozyon hızı ile pas payı/donatı çapı oranı  $\left(\frac{d}{\phi_s}\right)$  arasında lineer ilişki olduğu görülmüştür.

$$\frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \left(\frac{1 + \alpha_i}{1 - \alpha_i}\right)^2, \quad \alpha_i = \frac{d}{\phi_s} - \sqrt{\frac{d^2}{\phi_s^2} - 1} \quad (2.38)$$

Donatı korozyonunun gözlenen en belirgin sonucu beton örtünün çatlamasıdır ve korozyon başlangıç süresi için esas alınan önemli parametrelerden biridir. Çünkü donatının çapına bağlı olarak metalin 10-50µ'luk korozyonu sırasında oluşan demiroksit, 2-3 cm'lik beton örtünün çatlaması için yeterlidir. Bunun anlamı sadece 10-30 µ/yıl'lık korozyon hızında beton örtünün 1-3 yıl içinde çatlayacağıdır (Gonzalez vd., 1995b). İlk çatlak süresi (t) esas alınarak (2.39) bağıntısında görüldüğü gibi, betonda 0.3-0.4 mm'lik çatlak neden olan donatı çapındaki azalmaya ilişkin basit nümerik modeller geliştirilmektedir (Andrade vd., 1993).

$$t = \frac{\text{donatı çapındaki azalma}}{\text{korozyon hızı (mm / yıl)}} \quad (2.39)$$

Deniz yapılarında ise beton yüzeyinde ilk çatlak oluştuğu an kritiktir ve onarım kaçınılmazdır (Uomoto ve Mısra 1988).

Kritik çatlama süresinin önceden tahmini için laboratuvarında hızlandırılmış deneylere gereksinim vardır. Bu çalışmada, donatı korozyonunun beton yüzeyinde oluşturduğu çatlak süresi esas alınarak, hızlandırılmış donatı korozyonu deneyi geliştirilmiştir. Donatı korozyonunu hızlandırmak için, sabit gerilimin (voltaj) yanı sıra, daha önceki çalışmalardan farklı olarak, donatı ile beton arayüzüne sabit aderans gerilmesi uygulanmıştır.

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Betonarme elemanlarda korozyonun araştırılması amacı ile düzenlenen deneysel çalışma, numunelerin üretimi, kürü, eskitme süreci ve kontrol deneyleri olmak üzere başlıca dört aşamada gerçekleştirilmiştir. Araştırma, son yıllarda beton üretiminde yaygın kullanım alanı bulan silis dumanının etkinliğini ve donatı korozyonu için en önemli sorunlardan biri olan klorür iyonunun etkisini kapsamaktadır.

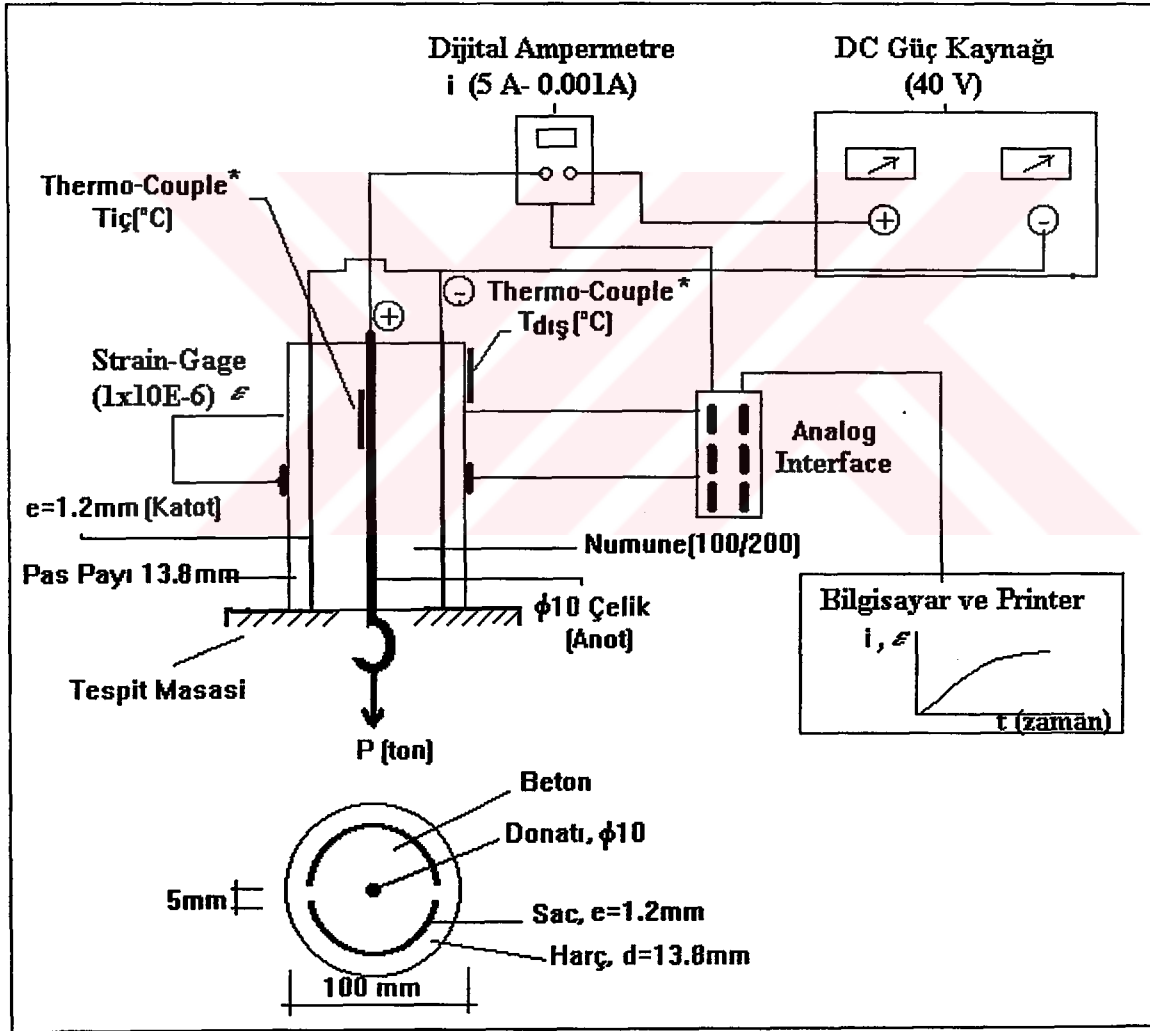
Betonarmeye  $Cl^-$  iyonlarının dışarıdan difüzyonu ve malzemelere karışmış olması nedeni ile içerden etkisini laboratuvarda temsil etmek üzere deneyler iki ana grupta toplanmıştır. Bu amaçla numuneler farklı konsantrasyonlarda  $Cl^-$  iyonu içeren çözeltilerde bekletilerek  $Cl^-$  iyonunun dışarıdan difüzyonu, aynı konsantrasyonlardaki çözeltilerin karma suyu olarak kullanılması ile de betona  $Cl^-$  iyonlarının bulaşması durumu benzeşimi yapılmış, etkiler zamanın fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir. Kontrol deneyleri betonda, harçta, çelikte ve betonarme numunelerde yapılmıştır. Kontrol deneyi olarak basınç, yarma, pull-out, eğilme ve çekme gibi mekanik deneyler; ağırlık değişimi, rötre ve su emme gibi fiziksel deneyler; ses geçiş süreleri ve schmidt sayılarının belirlenmesi gibi tahribatsız deneyler; karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesi,  $Cl^-$  ve  $OH^-$  tayini gibi kimyasal deneyler yapılmıştır. Bu deneylerden beton numunelerde basınç, yarma, ses geçiş süresi, schmidt sayısı, karbonatlaşma derinliği,  $Cl^-$  ve  $OH^-$  tayini deneyleri; betonarme numunelerde pull-out ve hızlandırılmış korozyon deneyleri; harç numunelerde eğilme, basınç, kılcal su emme ve rötre deneyleri; çelik numunelerde çekme ve ağırlık kaybı deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Beton özelliklerinin tespiti ve korozyonun araştırılması için bilinen ve uygulanan deneylerden başka, bu çalışmanın kapsamı içinde Şekil 3.1'de görülen numune ve deney düzeneği geliştirilmiştir. Daha önceki benzer çalışmalarda sisteme ya sabit gerilim uygulanarak akım şiddeti ölçülmüş ya da akım şiddeti sabit tutularak donatıda korozyon oluşumu hızlandırılmış ve betonda çatlak oluşumu gözlenmiştir. Bu çalışmada ise daha önceki çalışmalardan farklı olarak donatıya sabit aderans gerilmesi ve sabit gerilim uygulanarak akım şiddeti ve betondaki deformasyonlar ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

Aşağıda kullanılan malzemeler, numune üretimi, kür koşulları, eskitme süreci ve kontrol deneyleri sunulmuştur.

### 3.1 Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Beton üretiminde özellikleri aşağıda verilen agregalar, çimento, silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi, klorür etkisini araştırmak için sanayi tipi sodyum klorür tuzu kullanılmıştır. Kesiti Şekil 3.1'de verilen silindir numunelerde 10 mm çapındaki inşaat çeliği ve 1.2 mm kalınlığındaki sac kullanılmıştır.



Şekil 3.1 Deneysel düzeneğin şematik gösterimi  
\* Zamana bağlı sıcaklık değişimi ön deneylerle belirlenmiştir

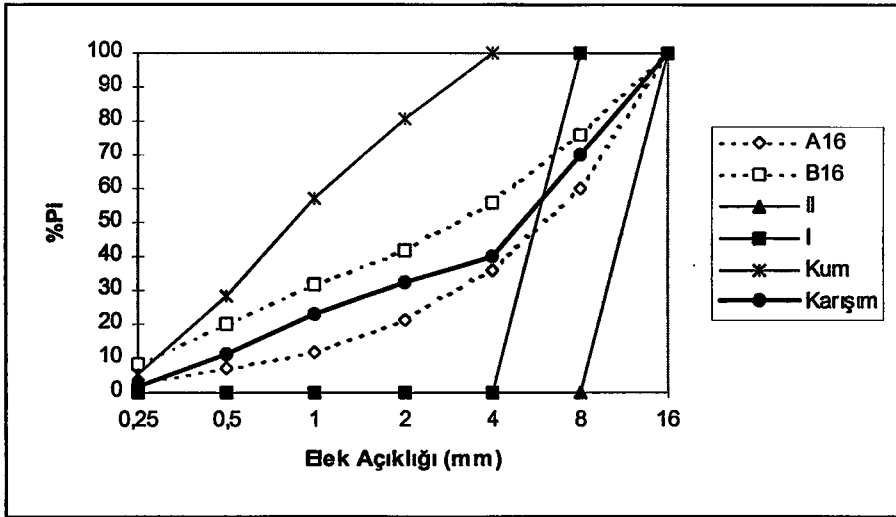


## Agregalar

Beton üretiminde özellikleri Çizelge 3.1’de verilen Çorlu’dan temin edilen kalker esaslı I ve II no’lu kırma taş agregalar ile maksimum dane çapı 4 mm olan ve Silivri’den temin edilen silis esaslı kum kullanılmıştır. Harç üretimi için aynı kum 2 mm’ lik elekten elenmiştir. Kullanılan agregaların ve karışımın granülometri eğrileri Şekil 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Agregaların fiziksel özellikleri

Agregalar		II No’lu Kırma Taş	I No’lu Kırma Taş	Kum
Birim Ağırlık ( $g/cm^3$ )		1.36	1.41	1.50
Özgül Ağırlık ( $g/cm^3$ )		2.62	2.69	2.54
Komposite (%)		52	52	59
Aşınma (Los Angeles) (%), (TS3694)	$a_1$	9.3	6.7	7.0
	$a_2$	28.3	23.0	26.9
İnce Madde Oranı (%),(TS3527)		0.5	1.5	1.8
Organik Madde		yok	yok	yok
Cl Miktarı (%), (TS3732)		0.1	0.1	yok



Şekil 3.2 Agregaların granülometri eğrileri

## Çimento

Çalışmada, fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.2’de verilen, Nuh Çimento fabrikasından temin edilen PÇ 42.5 çimentosu kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda tasarlanan kür koşullarına bağlı olarak üretimin 18 ay sürmesi nedeni ile, kullanılan çimentoda kıvam tayini ve priz süreleri gibi standard deneyler tekrarlanmış, önemli değişiklik gözlenmemiştir.

## Silis Dumanı

Antalya Ferro-Krom tesislerinden temin edilen silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri ile silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı oranlarına bağlı olarak, bağlayıcının priz sürelerindeki değişiklikler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Çimento ve silis dumanının kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Özellikler (%)	Portland Çimentosu		Silis Dumanı		
CaO	65.24		5.36		
SiO <sub>2</sub> (Çözünen)	21.28		88.70		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.96		1.05		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.19		1.95		
MgO	1.28				
SO <sub>3</sub>	1.73				
Kızdırma Kaybı	1.14		1.95		
Çözünemeyen Kalıntı (max)	0.42				
Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	3.14		2.00		
Özgül yüzey, Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3101		-		
Priz süresi Vicat (dak.)	Başlangıç	Bitiş	Silis Dumanı (%)	Başlangıç	Bitiş
	200	310	0 <sup>(1)</sup>	240	705
			10 <sup>(2)</sup>	135	765
			20 <sup>(3)</sup>	180	780
Mineralojik Bileşimler (%)					
C <sub>3</sub> S	63.03				
C <sub>2</sub> S	13.45				
C <sub>3</sub> A	3.40				
C <sub>4</sub> AF	12.75				

(<sup>1</sup>) %3, (<sup>2</sup>) %4 ve (<sup>3</sup>) %5 süper akışkanlaştırıcı ile birlikte elde edilen deney sonuçları

## Süper Akışkanlaştırıcı

Üretimde kullanılan akışkanlaştırıcı katkı maddesi piyasadan temin edilmiştir. Katı madde miktarı %30 olan melamin formaldehit esaslı süper akışkanlaştırıcının bazı teknik ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3 Süper akışkanlaştırıcının teknik ve kimyasal özellikleri

Esası	Melamin formaldehit
Tipi	Süper akışkanlaştırıcı, yüksek oranda su azaltıcı ASTM C 494 Tip A ve F ASTM C 1017 Tip I
Görünüm	Şeffaf
Katı Madde Oranı	Ortalama %30
Çözücüsü	Su
Yoğunluğu	1.1 g/cm <sup>3</sup>
Viskozitesi	Düşük
pH	10-13
Klorür Oranı	Yok

## Sanayi Tuzu

Eskitme deneylerinde kullanılan belirli Cl<sup>-</sup> konsantrasyonundaki çözeltiler, özellikleri Çizelge 3.4'te verilen sanayi tipi NaCl tuzu ile hazırlanmıştır.

Çizelge 3.4 Sanayi tuzuna ait analiz neticeleri (%)

Sodyum Klorür (NaCl)	99.75-99.76
Kalsiyum (Ca <sup>++</sup> )	0.01-0.03
Magnezyum (Mg <sup>++</sup> )	0.01-0.03
Sülfat (SO <sub>4</sub> )	0.02-0.04
Çözünmeyen Maddeler (max)	0.01
Rutubet (H <sub>2</sub> O)	0.07-0.11
Demir (Fe) (max)	milyonda bir
Bakır (Cu) (max)	milyonda bir
Kurşun (Pb)	-
Arsenik (As)	-
Bakteri	-
Mantar	-
pH (%1'lik Çözelti)	7.0±0.2
Kristal Büyüklüğü (mm)	0.1-1.0

## Donatı

Hızlandırılmış donatı korozyonu ve Pull-out deneyinde kullanılan 10 mm çapındaki çeliğin mekanik özellikleri 350 kN kapasiteli ünversal çekme aletinin 70 kN'luk skalası kullanılarak yapılmıştır. Çeliğin kimyasal özellikleri spektral analiz ile belirlenmiş, Fe 37'ye uygun olduğu saptanan (TS 2162) donatının özellikleri Çizelge 3.5'te sunulmuştur.

Çizelge 3.5 Donatının mekanik ve kimyasal özellikleri

Mekanik Özellikler				Kimyasal Özellikler				
A.Çapı (mm)	$f_{sy}$ (MPa)	$f_{su}$ (MPa)	$\epsilon_u$ (%)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
10	294	485	32	0.140	0.132	0.539	0.0097	0.0246

## Sac

Hızlandırılmış donatı korozyonu deneyinde katot olarak görev alan ve 1.2 mm kalınlığındaki sacın mekanik özellikleri 100 kN kapasiteli yük kontrollü ünversal çekme aleti ile, kimyasal özellikleri spektral analiz ile belirlenmiştir. Fe 37'ye uygun olduğu saptanan (TS 2162) sacın özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 Sacın mekanik ve kimyasal özellikleri

Mekanik Özellikler				Kimyasal Özellikler				
Kalınlık (mm)	$f_{sy}$ (MPa)	$f_{su}$ (MPa)	$\epsilon_u$ (%)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
1,2	247	367	40	0.087	0.028	0.415	0.0111	0.0121

## 3.2 Numune üretimi

Farklı konsantrasyonlardaki sodyum klorürün silis dumani katkı ve katkısız betona ve betonarmeye etkilerinin araştırıldığı deneyler için numuneler eskitme sürecine göre, çözeltilerde ve havada saklanmak üzere iki ana gruba ayrılmıştır. Bu gruplardan birincisinde numuneler kontrol deneylerinin yapılacağı güne kadar, Cl<sup>-</sup> konsantrasyonu 0,

1500, 10000 ve 40000 mg/L olan çözeltilerde saklanmıştır. İkinci grupta ise aynı Cl konsantrasyonundaki çözeltiler karma suyu olarak üretilen beton içine katılmış ve numuneler kontrol deneylerinin yapılacağı güne kadar havada tutulmuştur. Betona, çimento ağırlığının %0, %10 ve %20 oranlarında silis dumanı, çimento ile yer değiştirmeli olarak katılmış, su/bağlayıcı oranı 0.45 ile sabit tutulmuştur. Özellikleri yukarıda verilen malzemeler ile üretilen 1 m<sup>3</sup> taze beton için gerekli gerçek malzeme miktarları ve taze beton birim ağırlığı Çizelge 3.7'de verilmiştir. Üretim, 50 litre kapasiteli betonyerde yapılmıştır.

Çizelge 3.7 Beton üretiminde kullanılan gerçek malzeme miktarları ve taze beton b. ağırlığı

Silis Dumanı Oranı (%)	Çimento (kg)	Silis Dumanı (kg)	Süper Akışkan. (%)	Agregalar			Taze Beton Birim Ağırlığı kg/dm <sup>3</sup>
				Kum	Kırma	Taş	
				0-4mm (kg)	4-8 mm (kg)	8-16mm (kg)	
0	340	0	3	721	575	558	2348
10	312	35	4	736	587	569	2395
20	278	70	5	738	588	571	2401

Çözeltilerde ve havada saklanan iki farklı seride basınç ve yarma deneyleri için toplam 522 adet 100/200 mm silindir beton numune üretilmiştir. Pull-out deneyi için, aynı beton karışımından üretilen 261 adet 100/200 mm silindir numunenin merkezine 10 mm çapında 300 mm uzunluğunda 1'er adet donatı yerleştirilmiştir. Hızlandırılmış korozyon deneyinde kullanılmak üzere kesiti Şekil 3.1'de verilen 117 adet betonarme numune üretilmiştir.

Beton numunelerde yapılarına benzer kontrol deneylerinin harç numunelerde de yapılması için, TS 24'e uygun olarak 261 adet 40x40x160 mm boyutlarında harç numune üretilmiştir. Bu harç, hızlandırılmış korozyon deneyi için üretilen numunede, pas payı için de kullanılmıştır. Ayrıca aynı karışımdan, boy değişimlerinin ölçülmesi amacı ile 25.4x25.4x285 mm'lik 48 adet harç numune hazırlanmıştır. 1 m<sup>3</sup> harç için gerekli gerçek malzeme miktarları ve taze harç birim ağırlığı Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8 Harç üretiminde kullanılan gerçek malzeme miktarları ve taze harç b. ağırlığı

Silis Dumanı Oranı (%)	Çimento (kg)	Silis Dumanı (kg)	Süper Akışkan. (%)	Kum 0-2mm (kg)	Taze Harç Birim Ağırlığı kg/dm <sup>3</sup>
0	321	0	3	1701	2166
10	291	32	4	1712	2180
20	258	65	5	1712	2183

### 3.3 Numunelerin Kürü ve Eskitme Süreci

Klorürün dışarıdan difüzyonunun araştırıldığı birinci grupta numuneler sıcaklığı  $20 \pm 3$  °C olan suda, 1500 mg/L, 10000 mg/L ve 40000 mg/L Cl<sup>-</sup> konsantrasyonundaki sodyum klorür çözeltileri içinde saklanmıştır. Malzemelere karışmış olması nedeni ile Cl<sup>-</sup>'ün içerden etkisinin araştırıldığı ikinci grupta ise aynı konsantrasyondaki çözeltiler numunelerin üretiminde karma suyu olarak kullanılmıştır. Numunelerin tümü üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmıştır.

Birinci gruptaki numuneler çözeltilere konulacağı 28. güne kadar  $20 \pm 1$  °C sıcaklıktaki suda saklanmıştır. İkinci gruptaki numuneler ise kalıptan çıkarıldığı günden itibaren  $20 \pm 3$  °C sıcaklık ve  $\%65 \pm 5$  bağıl nemdeki laboratuvar ortamında havada saklanmıştır. Her iki grupta da 28.gün eskitme süreci için başlangıç kabul edilerek, bugünden itibaren 0, 28, 90 ve 180. günlerde kontrol deneyleri yapılmıştır. Hızlandırılmış korozyon deneyi ise sadece 28. ve 180. günlerde yapılmıştır. Suda ve çözeltilerde saklanan numuneler kontrol deneylerinin yapılacağı günden 24 saat önce çözeltilerden çıkarılarak laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Numuneler Çizelge 3.9'da görüldüğü gibi üretimde silis dumanı katkı oranına, eskitme koşullarına ve klorür konsantrasyonuna bağlı olarak kodlanmıştır. Buna göre, üretimde silis dumanı katılmayanlar SF0, %10 silis dumanı katkılılar SF1, %20 silis dumanı katkılılar SF2; eskitme koşullarına göre havada saklananlar A, suda ve çözeltide saklananlar W ile gösterilmiştir. Çözeltilerin Cl<sup>-</sup> konsantrasyonu için suda saklananlar W0, 1500 mg/L Cl<sup>-</sup> içerenler W1, 10000 mg/L Cl<sup>-</sup> içerenler W2 ve 40000 mg/L Cl<sup>-</sup> içeren çözeltiler için W3, çözeltilerin karma suyu olarak kullanıldığı havada saklanan numuneler ise çözelti konsantrasyonuna göre A0, A1, A2 ve A3 olarak kodlanmıştır.





### 3.4 Kontrol Deneyleri

Başlangıçta ve eskitme sürecinden sonra belirli günlerde betonda, betonarmede, harçta ve çelikte yapılan kontrol deneyleri, dört ana grupta ele alınmıştır. Bu deneyler Çizelge 3.10'da özetlenmiş, Bölüm 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3 ve 3.4.4'de açıklanmıştır.

#### 3.4.1 Beton numunelerde yapılan deneyler

Betonun basınç ve yarma dayanımını belirlemek ve bu özelliklerde zamanla meydana gelen değişimleri tespit etmek amacı ile yapılan basınç ve yarma deneyleri için, 522 adet 100/200 mm silindir beton numune üretilmiştir. Üretimden itibaren 28., 56., 118. ve 208. günlerde yapılan basınç ve yarma deneyinden önce aynı numunelerde N tipi Schmidt çekici ile yüzey sertliği belirlenmiş, ultrasonik yöntem ile ses geçiş süreleri ölçülmüştür. Mekanik deneylerde 0.1 kN duyarlıklı, 3000 kN kapasiteli üniversal basınç aleti kullanılmıştır. Basınç deneyi 2.40 kN/s, yarma deneyi 0.8 kN/s hızı ile BS.1881: Part 117'ye (1983) uygun olarak yapılmıştır. Havada kür edilen grubun, yarma deneylerinden alınan parçalarının kırılan yüzeyine deneyden hemen sonra %1'lik fenolftalein çözeltisi püskürtülmüş, renk değişimleri 0.01 mm hassasiyetli ışıklı mikroskop altında ölçülerek karbonatlaşma derinliği belirlenmiştir. Yarma deneyi yapılan tüm numunelerin farklı derinliklerinden matkap yardımı ile toz numuneler çıkarılmış, bu toz ile hazırlanan çözeltilerde pH ölçülmüş ve Cl<sup>-</sup> miktarı tayin edilmiştir. Renk ayırımı yönteminden yararlanılarak Cl<sup>-</sup> penetrasyon derinliği belirlenmiştir.

#### Schmidt Okumaları

Basınç ve yarma deneyleri için üretilen toplam 522 adet 100/200 mm silindir beton numunelerde mekanik deneylerden önce, numune yaklaşık 20 kN'luk sabit yük altında tutulmuş, 70 N/mm<sup>2</sup> kapasiteli N tipi Schmidt çekici ile yanal yüzeyine dik doğrultuda en az 10 vuruş yapılarak yüzey sertliği belirlenmiştir. Deney sonuçlarının verildiği grafiklerdeki herbir nokta için, toplam 6 numunede yapılan ölçüm sonucu en az 60 vuruşun ortalaması alınmıştır. Alınan sonuçlar zamana, silis dumanı oranına, Cl<sup>-</sup> konsantrasyonuna

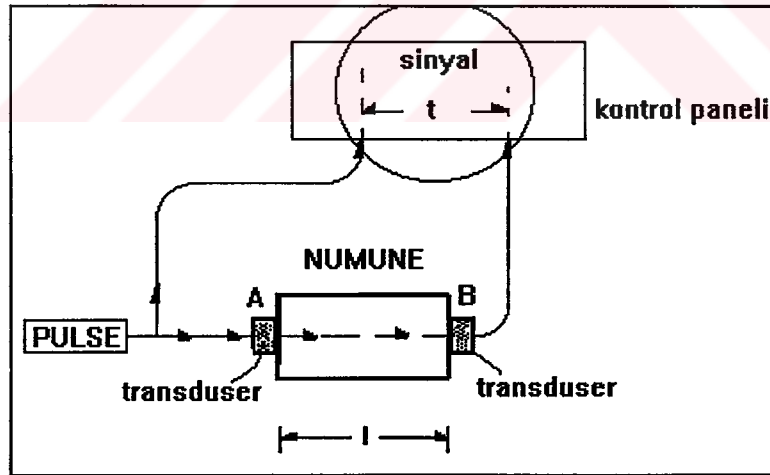
Çizelge 3.10 Kontrol Deneyleri

BETONDA		HARÇTA		ÇELİKTE		BETONARMEDE		
TAHRİBATLI	TAHRİBATSIZ	MEKANİK	FİZİKSEL	MEKANİK	FİZİKSEL	HIZLANDIRILMIŞ	TAHRİBATLI	TAHRİBATSIZ
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Basınç Deneyi</li> <li>• Yarma Deneyi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schmidt Okumaları (Yüzey Sertliğinin Belirlenmesi)</li> <li>• Ultrasonik Yöntemle Ses Geçiş Sürelerinin Belirlenmesi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eğilme Deneyi</li> <li>• Basınç Deneyi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kılcal Su Erme Deneyi</li> <li>• Rötre Ölçümü</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Çekme Deneyi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ağırlık Kaybının Belirlenmesi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Akım Şiddeti - Zaman İlişkisinin Belirlenmesi</li> <li>• Deformasyon - Zaman İlişkisinin Belirlenmesi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pull-Out Deneyi (Aderans Dayanımının Belirlenmesi)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yarı Hücre Potansiyelinin Belirlenmesi</li> </ul>

ve eskitme koşullarına göre değerlendirilmiş, Çizelge Ek.3, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir.

### Ultrases Geçiş Değerleri

Schmidt okumalarının yapıldığı her numunede, ASTM C 597 - BS 1881’e uygun profesyonel model, 0.1  $\mu$ s duyarlıklı ultrases aleti ile ses geçiş süreleri ölçülmüştür. Bu yöntemde transduserlerin yerleştirilmesine bağlı olarak, direkt iletim, yarı direkt iletim ve direkt olmayan iletim düzenlemesi kullanılmaktadır. Bu çalışmada direkt iletim yöntemi uygulanmıştır. Ses geçiş sürelerinin ölçülmesinde, numunelerin alt ve üst yüzeylerine, mala yüzeyindeki pürüzlerin oluşturduğu çok küçük boşlukları doldurmak amacı ile vazelin sürülmüş, 55 kHz’lik frekansa sahip ses dalgaları gönderen ve alan iki transduser Şekil 3.3’te görüldüğü gibi numunenin düzgün yüzeylerine yerleştirilmiştir. Daha sonra problar yer değiştirilerek iki okuma alınmış, her numune için, bu iki okumanın ortalaması alınarak 3.1 bağıntısı ile ses geçiş hızı hesaplanmıştır. Deney sonuçları Çizelge Ek.4, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 3.3 Ultrasonik yöntem ile ses geçiş süresinin belirlenmesi

$$v_s = \frac{l}{t} \quad (3.1)$$

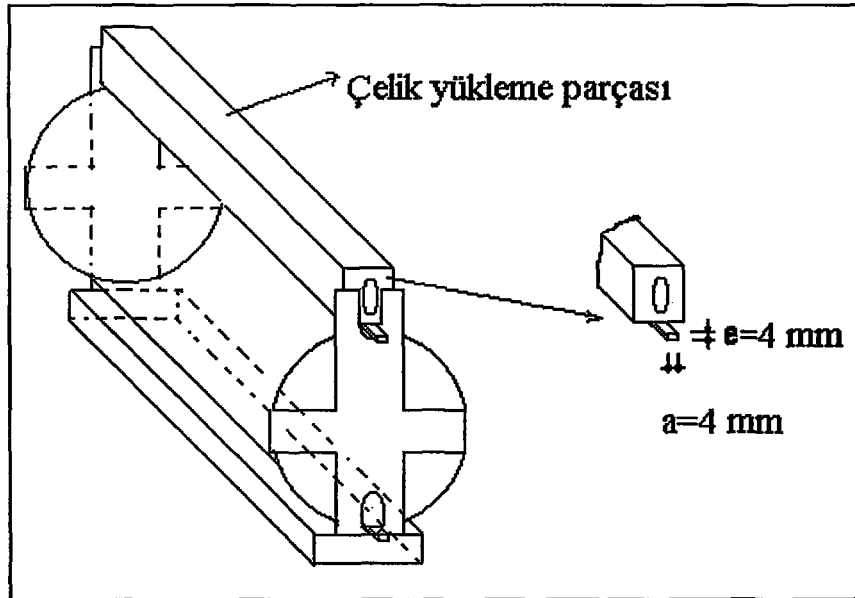
- $v_s$  : Ses geçiş hızı (mm/ $\mu$ s)  
 $l$  : Numunenin boyu (mm)  
 $t$  : Ses geçiş süresi ( $\mu$ s)

### Basınç Deneyi

Schmidt sayılarının ve ultrases geçiş değerlerinin belirlendiği toplam 522 adet 100/200 mm boyutlu silindir beton numunenin 261 tanesinde tek eksenli basınç deneyi yapılmış,  $F_c$  kırma yükü belirlenmiştir. Deney, 0.1 kN duyarlıklı, 3000 kN kapasiteli üniversal basınç aleti kullanılarak, 2.40 kN/s yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Her bir parametre için 3 numunedeki değerin ortalaması alınmıştır. Deney sonuçları izelge Ek.1 ile şekil 4.1 ve şekil 4.2’de verilmiştir.

### Yarma Deneyi

Basınç deneyinde olduğu gibi yarma deneyi de Schmidt sayıları ve ultrases geçiş değerleri belirlenen toplam 522 numuneden 261’i üzerinde yapılmıştır. Deney 3000 kN kapasiteli üniversal basınç aletinde 0.8 kN/s yükleme hızı ile yapılmıştır. Bu deneyde şekil 3.4’te görölen ve BS 1881: Part 117’ye uygun yarma aparatı kullanılmıştır.



şekil 3.4 Yarma deneyi için kullanılan aparat (BS 1881: Part 117)

Her bir parametre için 3 numunedeki deney sonucunun ortalaması alınarak, 3.2 bağıntısı ile yarma dayanımı ( $f_{cs}$ ) hesaplanmıştır.

$$f_{cs} = \frac{2 \cdot F_{cs}}{\pi \cdot l \cdot \phi_c} \quad (3.2)$$

- $F_{cs}$  : Maksimum yük (N)  
 $l$  : Numune boyu (mm)  
 $\phi_c$  : Beton numunenin çapı (mm)

Deney sonuçları Çizelge Ek.2 ile Şekil 4.3 ve Şekil 4.5'te verilmiştir.

### **Karbonatlaşma Derinliğinin Belirlenmesi**

Karbonatlaşma derinliğini belirlemek amacı ile yarma deneyi sonucunda iki yarı silindirik 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, yüzeyden itibaren oluşan renk sınırının, 0.01 mm duyarlıklı ışıklı mikroskop altında taranması ile belirlenmiştir. Her numunede en az 10 okuma yapılmış, üç numunede yapılan toplam 30 okumadan, sapması en fazla  $\pm 0.5$  mm olan verileri değerlendirmeye alınmıştır. Deney sonuçları Çizelge Ek.5 ile Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de verilmiştir.

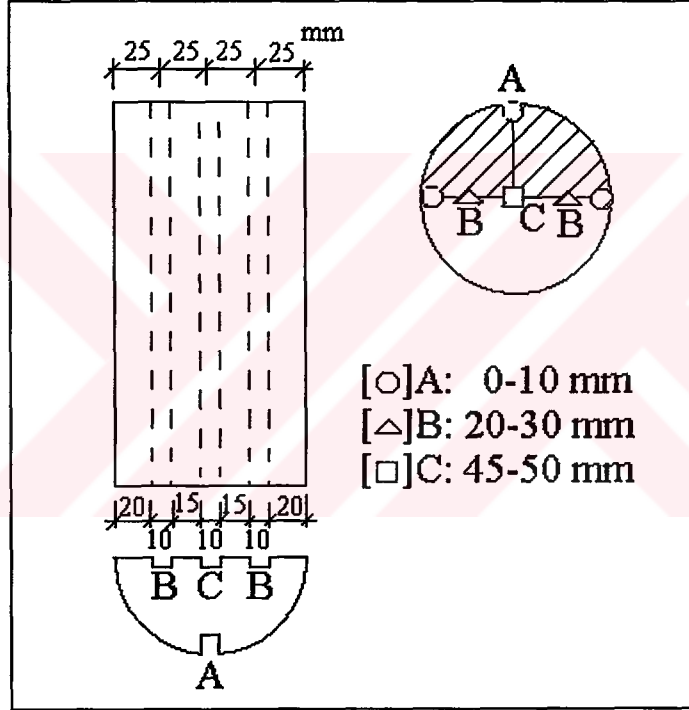
### **Cl<sup>-</sup> Penetrasyon Derinliğinin Belirlenmesi**

Cl<sup>-</sup> penetrasyon derinliğinin renk ayırımı yöntemi ile belirlenmesi için, yarma deneyi sonucunda elde edilen kırık yüzeylere % 0.1'lik fluorescein sodyum tuz çözeltisi ve % 0.2'lik gümüş nitrat çözeltisi sırası ile püskürtülmüştür. Betonda klorürün bulunduğu bölgeler beyaz, klorürün bulunmadığı bölgeler kahverengi olarak görülmüştür. Oluşan renk

sınırından penetrasyon derinliği, 0.05 mm duyarlıklı kumpas ile ölçülmüştür. Deney sonuçları Çizelge Ek.6 ve Şekil 4.12’de verilmiştir.

### Cl<sup>-</sup> ve OH<sup>-</sup> Tayini

Yarma deneyi sonucunda elde edilen iki yarım silindir parçadan bir tanesinde Şekil 3.5’te 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. Matkap ucu kırık yüzeyden veya numunenin yanal yüzeyinden en fazla 1 cm içeriye girmiştir.



Şekil 3.5 Klorür profilinin elde edilmesi için toz numunelerin çıkarıldığı derinlikler

Çıkarılan toz 600  $\mu$  elekten elenmiş, toz:su oranı ağırlıkça 1:5 olmak üzere destile su ile 30 dakika karıştırılmıştır. 60 dakika dinlendirilen bu karışım, süzgeç kağıdından filtre edilmiştir. Hazırlanan çözelti numunenin pH'ı WTW marka Mikroprossor 537 model pH metre ile ölçülmüş ve bu değerlerden OH<sup>-</sup> miktarları hesaplanmıştır. Aynı karışımdan alınan numunede Argentometrik titrasyon yöntemi ile Cl<sup>-</sup> miktarı tayin edilmiştir. Bu yöntemle hazırlanan çözelti, Cl<sup>-</sup> miktarının 100 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 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, arttırmak için 1 M NaOH damlatılmıştır. Klorür tayini deneyinde indikatör olarak 1 ml K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> kullanılmış, çözelti 0.0141 N AgNO<sub>3</sub> ile titre edilmiş, 3.3 bağıntısı ile Cl<sup>-</sup> miktarı hesaplanmıştır (APHA, 1989). Deney sonuçları Çizelge Ek.7, Şekil 4.13-4.15 ve Şekil Ek.1-2'de, verilmiştir.

$$mg \text{ Cl}^- / L = \frac{(\alpha_A - \alpha_B) \cdot N \cdot 35450}{100 \text{ mL numune}} \quad (3.3)$$

$\alpha_A$  : Harcanan gümüşnitrat (mL)

$\alpha_B$  : Destile suyu için harcanan gümüşnitrat (mL)

N : Gümüşnitratın normalitesi (0.0141 N)

### 3.4.2 Harç numunelerde yapılan deneyler

Klorür etkisi ile harç numunelerde zamanla meydana gelen değişiklikler eğilme, basınç, geçirimsizlik ve rötre deneyleri yapılarak araştırılmıştır. Bu amaçla üretilen toplam 261 adet 40x40x160 mm boyutlu numunenin bir grubu 28 gün süre ile 20±1 °C sıcaklıktaki su içinde bekletilmiş, bunlardan suda saklanan şahit grup hariç diğerleri, Cl<sup>-</sup> konsantrasyonu 1500, 10000 ve 40000 mg/L olan NaCl çözeltilerine konulmuştur. Karma suyu olarak Cl<sup>-</sup> konsantrasyonu 0, 1500, 10000 ve 40000 mg/L olan NaCl çözeltileri kullanılan diğer bir grupta ise, numuneler kalıptan çıkarıldığı günden itibaren sıcaklığı 20±3 °C ve bağıl nemi %65±5 olan laboratuvar ortamında saklanmıştır. Çözeltilerde bekletilen numuneler, 28. gün başlangıç (0) kabul edilmek üzere, deneylerin yapıldığı 0, 28, 90 ve 180. günlerden bir gün önce, buldukları ortamdan çıkarılarak laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Eğilme deneyinde kırılan 3 numunedan elde edilen 6 adet parçanın yarısında basınç deneyi, diğer yarısında kılcal su emme deneyi yapılmıştır. Aynı özellikteki harç ile üretilen 25.4x25.4x285 mm boyutlu 48 adet numunede ayrıca, 1, 3, 7, 14, 28, 42,....., 180. günlerde boy değişimleri (rötre) ölçülmüştür.



### Eğilmede Çekme Deneyi

Eğilme deneyi 40x40x160 mm boyutlu toplam 261 adet harç numunede TS 24'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için numuneler, çekmede eğilme aleti altında mesnet açıklığı 100 mm olan 10 mm çaplı iki silindir çubuk üzerine yerleştirilmiş ve aynı özelliklere sahip yükleme silindiri ile açıklık ortasından  $5\pm 1$  kgf/s yükleme hızı ile kırılmıştır. Eğilmede çekme dayanımları 3.4 bağıntısı ile hesaplanmış, deney sonuçları, CI konsantrasyonu ve zamana bağlı olarak Çizelge Ek.8'de verilmiştir.

$$f_{mf} = 0.00234F_{mf} \quad (3.4)$$

$f_{mf}$  : Eğilmede çekme dayanımı (N/mm<sup>2</sup>)

$F_{mf}$  : Mesnet açıklığının ortasına uygulanan maksimum kuvvet (N)

### Basınç Deneyi

Eğilme deneyinde iki parçaya bölünmüş olan yarım prizmalar, yan yüzeyleri 40x40 mm'lik 2 adet kırma başlığı altına konmak üzere tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney, 7 ton kapasiteli üniversal basınç aletinde 10-20 kgf/cm<sup>2</sup>.s yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanımı değerleri, Çizelge Ek.9'da verilmiştir.

### Kılcal Su Emme Deneyi

Kılcal su emme deneyi 40x40x70 mm boyutlu 3 adet prizma numunenin 40x40 mm'lik yüzeyinde yapılmıştır. Numuneler öncelikle  $100\pm 5$  °C sıcaklıktaki etüvde değişmez ağırlığa kadar kurutulmuştur. Deney düzeneği Şekil 3.6'da verilen ve Darcy kanunundan yararlanılarak yapılan kılcal su emme deneyi, 3 numune için aynı anda başlatılmak ve 1., 4., 9., 16., 25., 36., 49. ve 60. dakikada tartım yapılmak üzere sürdürülmüştür. Deney sonuçlarından ve lineer regresyon analizinden yararlanılarak ortalama kılcal su emme



### 3.4.3 Çelik numunelerde yapılan deneyler

Uzun süreli durabilite ve hızlandırılmış korozyon deneyleri için hazırlanan betonarme numunelerde, pull-out deneyi ile çıkarılan donatılarda TS 138'e göre çekme deneyi yapılmıştır. Uzun süreli durabilite numunelerinden çıkarılan donatıların 3 tanesinde, hızlandırılmış korozyon deneylerinin yapıldığı numunelerden çıkarılan 3 adet donatıdan 1 tanesinde çekme deneyi yapılmıştır, diğer ikisinde ise ağırlık kaybı belirlenmiştir.

Çekme deneyi 70 kN kapasiteli üniversal çekme aletinde gerçekleştirilmiştir. Gerek uzun süreli durabilite deneylerinden, gerekse hızlandırılmış korozyon deneylerinden çıkarılan donatıların kesitinde önemli kayıp olmadığı için akma gerilmesinde, çekme dayanımında ve kopma uzamasında değişiklik gözlenmemiştir.

Donatılar numunenin üretimi aşamasında taze beton içine yerleştirilmeden önce 0.0001 g duyarlıklı terazide tartılmış ve donatının ilk ağırlığı belirlenmiştir. Deneylerden sonra beton içinden çıkarılan numuneler, 1000 mL HCl, 24 g Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve 71.3 g SnCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O'dan oluşan Clarke çözeltilisi ile temizlendikten sonra, aynı terazide tartılarak son ağırlık belirlenmiştir. İlk ağırlıktan son ağırlıklar çıkarılarak ağırlık kaybı ve kaybın ilk ağırlığa oranı ile de kayıp oranı hesaplanmıştır. Deney sonuçları silis dumanı oranı ve Cl konsantrasyonlarına bağlı olarak Şekil 4.20'de verilmiştir.

### 3.4.4 Betonarme numunelerde yapılan deneyler

Betonarme, beton ve çelik çubuklar ile üretilen lifli kompozittir. Kompozit malzemelerin üretiminde, bileşenlerin üstün nitelikleri biraraya getirilerek, beklenen işlevin daha iyi gerçekleştirilmesi amaçlanır. Betonarmeyi oluşturan elemanlardan betonun basınç mukavemeti yüksek, çekme mukavemeti düşük, kimyasal ve fiziksel dış etkilere karşı dayanıklılığı fazladır. Çelik ise çekme mukavemeti yüksek, sünek bir malzemedir; ancak kimyasal etkilere karşı dayanıksız olduğundan kısa sürede korozyona uğrar. Termik genişleme katsayıları yaklaşık eşit olan beton ve çelik arasındaki aderansın iyi olması, inşaat teknolojisine büyük boyut kazandırmıştır. Donatı veya betonda meydana gelen

hasarlar, özellikle donatı-beton arasındaki aderans dayanımının azalmasına ve yapının servis ömrünün kısalmasına neden olur. Yapılan araştırmalarda, örneğin yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış betonarme bir yapının, donatı ve betonda oluşacak hasarlardan önce, aderans dayanımındaki azalma nedeni ile göçtüğü ifade edilmektedir (Aköz ve Yüzer, 1994).

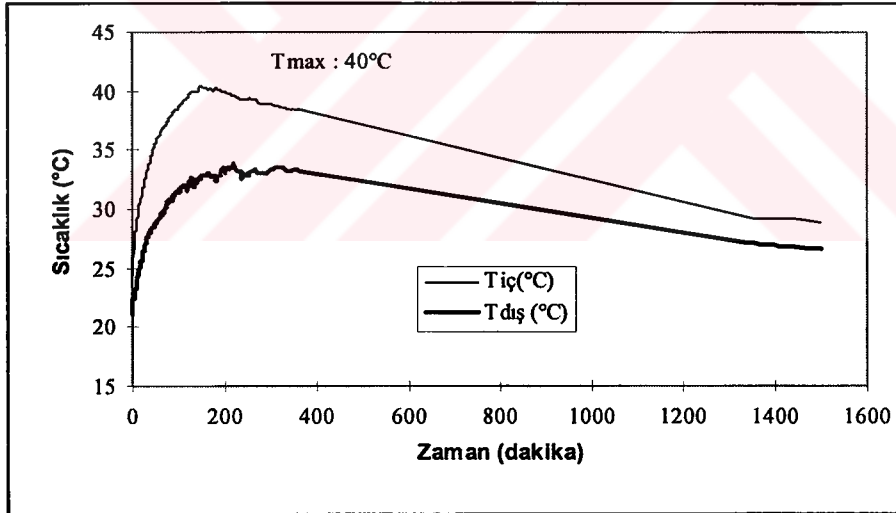
Çalışmanın bu bölümünde, beton ile donatı arasındaki aderans dayanımına, donatı korozyonunun etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla  $Cl^-$  etkisine maruz kalmış ve kalmamış numunelere, aynı anda sabit aderans gerilmesi ile sabit gerilim (voltaj) uygulanarak hızlandırılmış korozyon deneyleri yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.1’de verilen betonarme numuneler üzerinde yapılan hızlandırılmış korozyon deneyinde, beton içinden geçen akım miktarı ve beton yüzeyinde oluşan deformasyonlar ölçülmüş ve zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. Hızlandırılmış korozyon deneylerine maruz kalan ve kalmayan numunelerde pull-out deneyleri yapılarak aderans dayanımları belirlenmiştir. Bu numunelerde ayrıca pull-out deneyinden önce, ASTM C 876’ya uygun olarak yarı hücre potansiyelleri ölçülmüş, donatının korozyonu tahribatsız olarak da araştırılmıştır.

### **Hızlandırılmış Korozyon Deneyi**

Klorür konsantrasyonu yüksek çözeltilerde donatı korozyonunun şiddetlendirilmesi ile yapılan durabilite deneyleri, uzun süre gerektirmektedir. Betonarme elemanlarda donatı korozyonunun araştırılması amacı ile yapılan hızlandırılmış korozyon deneylerinde, beton ve çelikten oluşan sisteme, ya sabit gerilim uygulanarak, beton içinden geçen akım şiddeti ölçülür ya da akım şiddeti sabit tutularak gerilim ölçülür. Bu tür çalışmalarda ayrıca donatıda ağırlık kaybı, yarı hücre potansiyelinin değişimi ve betonda çatlak oluşumu gibi ölçüm ve gözlemler değerlendirilir.

Bu çalışmada önceki çalışmalardan farklı olarak, Şekil 3.1’de görüldüğü gibi sisteme sabit gerilimin yanısıra, donatı ile beton arayüzüne **sabit aderans gerilmesi** uygulanmıştır. Beton içinden geçen akım şiddeti ve donatının korozyonu nedeni ile meydana gelen hacim artışının betonda oluşturduğu deformasyonlar silindir numunenin yanal yüzeyine

yerleştirilen strain-gauge ile ölçülmüştür. Ölçülen akım şiddeti ve deformasyon değerleri zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. Bu deney grubu için üretilen ve Şekil 3.1’de görülen 100/200 mm boyutlu 117 adet silindir numunenin tam ortasına, 10 mm çapında donatı ve donatıdan 30 mm dışarıya 1.2 mm kalınlığındaki yarım silindir biçiminde iki adet sac yerleştirilmiştir. Saclar numunelerin üretimi sırasında beton içine, aralarında 5 mm boşluk kalacak şekilde karşılıklı konulmuşlardır. İki yarım silindir sac arasında 5 mm’lik boşluk bırakılmasının nedeni; anot durumundaki donatının korozyonu ile meydana gelecek hacim artışının betonda oluşturacağı çatlağın bu bölgeye yönlendirilmesi ve deformasyonların bu bölgede ölçülebilmesidir. Sisteme sabit gerilim uygulayan doğru akım kaynağı, numuneye donatı anot, sac elemanlar katot olacak şekilde bağlanmıştır. Donatı-beton arayüzünde 0.5 MPa’lık aderans gerilmesi oluşturulmak üzere donatıya Şekil 3.1’de görüldüğü gibi sabit kuvvet uygulanmıştır. Mikhailov ve Taylor-Broms’a göre adezyonun göçmesine neden olan aderans gerilmesi 0.5-1.5 MPa değerleri arasındadır (Karakoç, 1985). Bu değerler dikkate alınarak sabit aderans gerilmesi 0.5 MPa olarak seçilmiştir.



Şekil 3.8 Ön deneyler ile numunede tesbit edilen sıcaklık-zaman değişimi

Çizelge 3.11 Strain-gauge özellikleri

Gage Uzunluğu (mm)	Direnç ( $\Omega$ )	Gage Faktörü (Her iki doğrultuda) (%)	Termik Genleşme Katsayısı ( $1/^\circ\text{C}$ )
10	$120 \pm 0.5$	$2.14 \pm \%1$	$11.18 \times 10^{-6}$

Uygulanan 40 V'luk sabit gerilim değeri ön deneylerde farklı gerilimler uygulanarak seçilmiştir. Ön deneylerde bir tane donatı-beton arayüzüne, bir tane de numunenin yanal dış yüzeyine termo-couple yerleştirilmiş (Şekil 3.1) ve 40 V'luk sabit gerilim altındaki sıcaklık artışları zamana bağlı olarak tesbit edilmiştir. Şekil 3.8'de görüldüğü gibi arayüzde maksimum sıcaklık 40 °C'ye ulaşmıştır. Bu sıcaklık, betonda ve donatıda yapısal değişikliğe neden olmayacağından, 40 V'luk gerilim uygun bulunmuştur. Numunenin dış yüzeyindeki deformasyonu ölçmek için, 40 °C sıcaklıkta deformasyonu sıfıra çok yakın olan ve özellikleri Çizelge 3.11'de verilen, birbirine dik doğrultularda ölçüm yapabilen Strain-gauge seçilmiştir.

Hızlandırılmış korozyon deneylerinde akım şiddeti 1 mA, deformasyonlar ise  $2.25 \times 10^{-6}$  duyarlık ile ölçülmüştür. Sisteme gerilim ve gerilmenin uygulanmaya başladığı andan itibaren ilk birinci saatte 1'er dakika, ikinci saatte 5'er dakika, üçüncü saatte 10'ar dakika, dördüncü saatte 15'er dakika, beşinci saatte 30'ar dakika ara ile kayıt yapılmıştır. Okumalar beşinci saatten itibaren 1'er saat ara ile yapılmış ve yedinci güne kadar bilgisayara kaydedilmiştir. Betonun çatlamasına izin verilen bölgelerin tam ortasına gelecek şekilde karşılıklı iki yüzeye yerleştirilen strain-gauge'ler ile ilk çatlağın yüzeye ulaştığı an belirlenebilmiştir. Başlangıçtan çatlağın tespit edildiği ana kadar geçen süre kritik süre ( $t_{cr}$ ) olarak adlandırılmıştır. Deney düzeneğine aynı anda 3 numune yerleştirilmiş, ölçümlerin elektrik kesintilerinden etkilenmemesi için, sistem güç kaynağı ile jeneratöre bağlanmıştır.

Beton yüzeyindeki deformasyonlar ve beton içinden geçen akım şiddetinin zamanla değişimi, silis dumanı katkı miktarı ve  $Cl^-$  konsantrasyonlarına bağlı olarak değerlendirilmiş ve Şekil 4.21-4.29'da verilmiştir.

### **Yarı Hücre Potansiyelinin Belirlenmesi**

Aderans dayanımındaki değişimlerin araştırılması için hazırlanan toplam 261 numunede, pull-out deneyinden önce, beton içindeki donatının yarı hücre potansiyeli ASTM C 876'ya uygun olarak Şekil 2.12'de görüldüğü gibi belirlenmiştir. Bu amaçla yüksek empedanslı

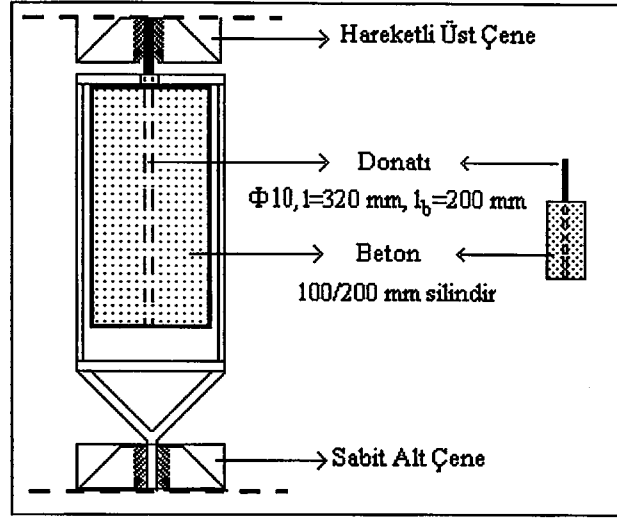
voltmetre ve kalomel referans elektrotu kullanılmıştır . Betonun elektriksel direnci yüksek olduğundan, iletkenliği sağlamak için referans elektrot ile beton arasına nemlendirilmiş sünger yerleştirilmiştir. Ölçümler hızlandırılmış korozyon deneyi için hazırlanan numunelerde de yapılmıştır. Çizelge Ek 13-14 ve Şekil 4.34-36'da verilen deney sonuçlarındaki her bir nokta, 3 numunede yapılan okumaların ortalaması alınarak belirlenmiştir.

### **Pull-Out Deneyi**

Donatı-beton arayüzündeki aderans dayanımının belirlenmesi amacı ile, 100/200 mm boyutlarındaki beton silindir numunenin tam ortasına, 10 mm çapında 320 mm uzunluğunda çelik çubuklar yerleştirilerek, toplam 261 adet betonarme numune üretilmiştir. Bu numunelerin bir kısmı, 28. güne kadar  $20\pm 1$  °C sıcaklıktaki kirece doymun suda saklanmış, 28. gün başlangıç kabul edilerek bir grubu kür havuzunda bırakılmış; diğer üç grubu  $\text{Cl}^-$  konsantrasyonu 1500, 10000 ve 40000 mg/L olan sodyum klorür çözeltilerinin bulunduğu plastik tanklarda, donatısız beton numuneler ile birlikte aynı eskitme koşullarına maruz bırakılmıştır. Aynı  $\text{Cl}^-$  konsantrasyonuna sahip çözeltilerin karma suyu olarak kullanıldığı bir diğer grup ise kalıptan çıkarıldığı günden itibaren,  $20\pm 3$  °C sıcaklık ve %  $65\pm 5$  bağıl nemdeki laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

Çözeltilerde bekleyen numuneler pull-out deneylerinin yapıldığı 28, 90 ve 180. günlerden bir gün önce saklandığı ortamdan çıkarılarak laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Deney, 20 kg duyarlıklı 7 ton kapasiteli üniversal çekme aletinde, Şekil 3.9'da gösterilen pull-out deneyi aparatı kullanılarak, 1.5-3.5  $\text{kgf/cm}^2$  hızda gerçekleştirilmiştir. Aderans dayanımı ( $f_{scb}$ ), 3.5 bağıntısı ile hesaplanmış, farklı  $\text{Cl}^-$  konsantrasyonu etkisinde, aderans dayanımının zamanla değişimi Çizelge Ek 11-12 ve Şekil 4.30-4.32'de verilmiştir.





Şekil 3.9 Pull-out deneyi ve aparatı

$$f_{scb} = \frac{F_{scb}}{\pi \cdot \phi \cdot l_b} \quad (3.5)$$

$F_{scb}$  : Maksimum aderans kuvveti (N)

$\phi$  : Donatı çapı (10 mm)

$l_b$  : Aderans boyu (200 mm)

#### 4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ve İRDELENMESİ

Başlangıçta ve eskitme sürecinden sonra belirli günlerde beton, betonarme, harç ve çelik numunelerde yapılan kontrol deneylerinin sonuçları, Bölüm 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'de değerlendirilmiştir. Deney sonuçları Çizelge Ek.1-14'te verilmiş, değerlendirmeler için sonuçlar,  $20\pm 1^{\circ}\text{C}$  sıcaklıktaki suda 28 gün kür edilen şahit numuneye (SF0W0) oranlanarak grafiklerde gösterilmiş ve irdelenmiştir.

##### 4.1 Beton Numunelerde Yapılan Deneyler

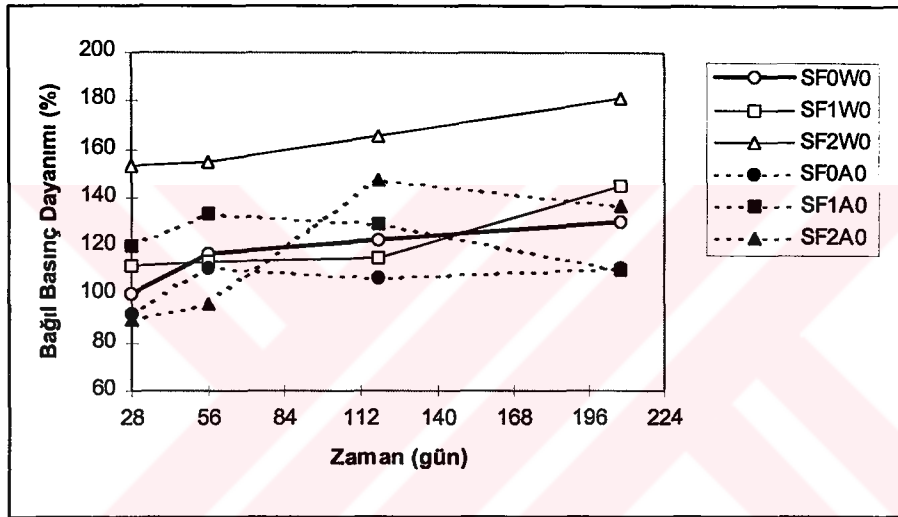
Donatının korozyonuna etki eden faktörleri incelemek üzere, öncelikle onu saran betonun özellikleri, betona klorürün etkileri, silis dumanın oranı ve kür koşulları dikkate alınarak irdelenmiştir. Bu amaçla, sırası ile yüzey sertliği deneyi, ultrases deneyi, basınç deneyi, yarma deneyi yapılmış; betonun yüzey sertliğinde, ultrases geçiş hızında, basınç ve yarma dayanımlarında ve karbonatlaşma derinliğindeki değişimler incelenmiştir. Ayrıca ortamdaki klorürün difüzyonu ve klorürün çimento hidrate ürünleri tarafından tespiti araştırılmış, elde edilen sonuçlar aşağıda değerlendirilmiş ve irdelenmiştir.

##### 4.1.1 Basınç deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi

Basınç deneylerinden alınan sonuçlara göre, suda bekletilen şahit grubun (SF0W0) dayanımı, zamanla artış göstermiş, bu artış 56. günde %16, 118. günde %23 ve 208. günde %30 olmuştur. Bağıl nemi  $65\pm 5$  olan havada bekletilen şahit grubun (SF0A0) basınç dayanımı ise suda bekletilen numunelerden daha düşük değer almıştır. Dayanım 56. gündeki %18'lik bir artıştan sonra 208. güne kadar hemen hemen sabit kalmıştır. Havada bekletilen numunelerin basınç dayanımı, şahite oranla 28. günde %7, 208. günde %19 daha düşüktür (Şekil 4.1). Suyun betonun pek çok özelliğini iyileştirebilen kür ortamı olduğunu belirten Fatuhi'nin (1988) çalışmasında, kalıptan çıkarıldıktan sonra 27 gün %22-63 bağıl nemdeki havada ve sadece 1 gün suda beklemiş numunenin basınç dayanımının, doğrudan havada 28. güne kadar bekletilen numunenin basınç dayanımının yaklaşık 2 katına çıktığı

ifade edilmektedir. Buradan ortam koşullarının, bağıl nemin betonun basınç dayanımına olan etkisi açıkça görülmektedir.

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi betona silis dumanı katılması, basınç dayanımını önemli oranda artırmıştır. Bu artışlar başlangıçta %10 silis dumanı katkılı betonda %12, %20 katkılı betonda %53'tür. Suda kür edilen grupların basınç dayanımı zamanla artış göstermiştir. 208. gündeki bu artış, şahit grupta (SF0W0) yaklaşık %30, SF1W0 grubunda %30, SF2W0 grubunda %18 oranında olmuştur. Silis dumanı boşlukları doldurması ve puzolanik aktivitesi sayesinde beton basınç dayanımını iyileştirmiştir (Wolsiefer, 1991).



Şekil 4.1 Beton basınç dayanımı bağıl değerlerinin zamanla değişimi

Bağıl nemin  $65 \pm 5$ , sıcaklığın  $20 \pm 3$  °C olduğu ortamda (havada) saklanan grupların basınç dayanımındaki değişimde, suda saklanan gruplardaki gibi kararlılık görülmemiştir. Başlangıçta (28. günde), %10 silis dumanı katkılı SF1A grubunun basınç dayanımı diğer iki grubunkinden büyüktür. 208. günde ise SF0A ve SF1A gruplarında basınç dayanımı yaklaşık eşit iken SF2A grubu başlangıca göre %68'lik artışla bu iki gruptan daha büyük değere ulaşmıştır. 208. günde havada saklanan grupların basınç dayanımı, suda saklanan grupların basınç dayanımından önemli oranda düşük değerler almıştır, bu fark SF0W0 grubunda %19, SF1W0 grubunda %31 ve SF2W0 grubunda %44'tür. Havada saklanan grupların daha düşük değerler alması, rötrenin neden olduğu çatlaklara bağlanabilir. Malolepszy ve Deja (1992) tarafından yapılan ve havada bekletilen numunelerin eğilme

dayanımının araştırıldığı çalışmada; SEM (Scanning Electron Microscope) ile gözlenen aşırı rötrenin neden olduğu çatlaklar tespit edilmiş ve dayanımdaki düşüşe işaret edilmiştir. Bu çalışmada harç fazında yapılan ve Bölüm 4.3.4'te açıklanan boy değişimleri araştırmasında, havada bekletilen numunelerde önemli oranda rötre olduğu görülmektedir.

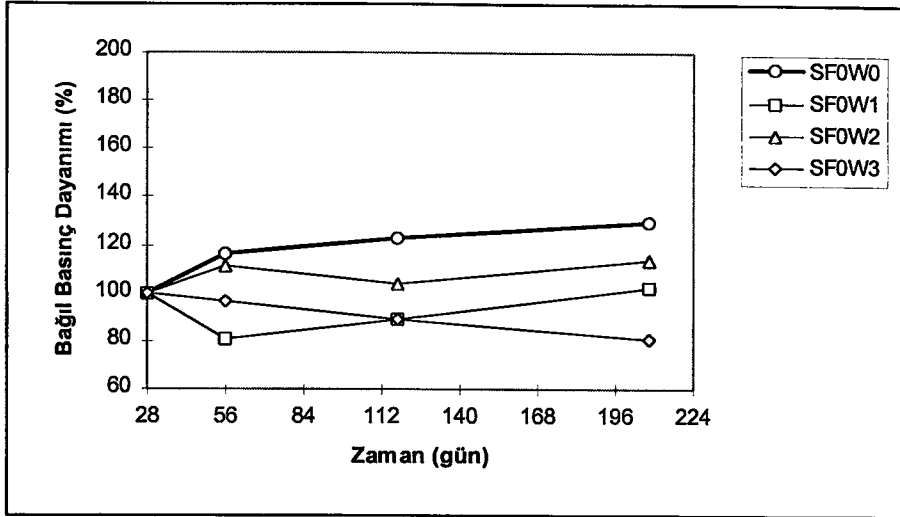
Klorürlerin dışarıdan difüzyonu ve içeriden etkimesi durumunda, beton basınç dayanımındaki değişimler Şekil 4.2a-f'de gösterilmiştir.  $Cl^-$  etkisindeki silis dumanı katkısız numunelerin (SF0W) basınç dayanımı, 28 günlük etkilenme süresinden başlayarak şahit grubun altında seyretmiştir, klorür basınç dayanımını azaltmıştır (Şekil 4.2a). Konsantrasyonun etkisi 180 günlük süreçte açık olarak görülmemekle birlikte, 208. gündeki en büyük azalma, şahitin (SF0W0) bu gündeki değerine oranla %49 olan SF0W3 grubunda gerçekleşmiştir. Bu grupta 28. günden itibaren lineer bir azalma görülmüş, 208. günde basınç dayanımındaki kayıp başlangıçtaki değerine göre %19 olmuştur. Harçlara tuz çözeltisinin etkisini,  $Ca(OH)_2$ 'nin yıkanıp süzülmesi, CSH'ın ayrışması ve kalsiyum kloroalüminatın oluşması ile açıklayan Feldman ve Cheng-yi (1985),  $Cl^-$  etkisi ile numunelerin porozitesindeki artışın, mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediğini belirtmişlerdir. Klorürün harç fazındaki etkisinin araştırıldığı Bölüm 4.3'te verilen kılcal su emme deney sonuçları, klorürün poroziteyi artırdığını doğrulamaktadır.

Betona %10 silis dumanı katıldığında ve klorürün dışarıdan etki ettiği durumda, 1500 mg/L klorür içeren çözelti hariç, 10000 ve 40000 mg/L  $Cl^-$  içeren çözeltilerin difüzyonunda, basınç dayanımında 28. günden itibaren başlangıca göre %20 artış olmuştur (Şekil 4.2b). Ancak betona %20 silis dumanı katılması durumunda 208. günde suda saklanan grupta %28'lik artış olurken, özellikle 40000 mg/L  $Cl^-$  içeren çözeltinin etkisinde basınç dayanımında %22 oranında azalma görülmüştür, dolayısı ile bu gruptaki toplam dayanım kaybının %50 olduğu söylenebilir (Şekil 4.2c). Silis dumanı katkılı numunelerde klorür etkisinde dayanımdaki azalmanın, silis dumanı katkısız numunelere göre daha az olması, hatta artışların gözlenmesi, silis dumanının klorür difüzyonuna engel olması ile açıklanabilir. Ayrıca silis dumanının  $Ca(OH)_2$ 'yi bağlamış olması nedeni ile  $Cl^-$ 'nin

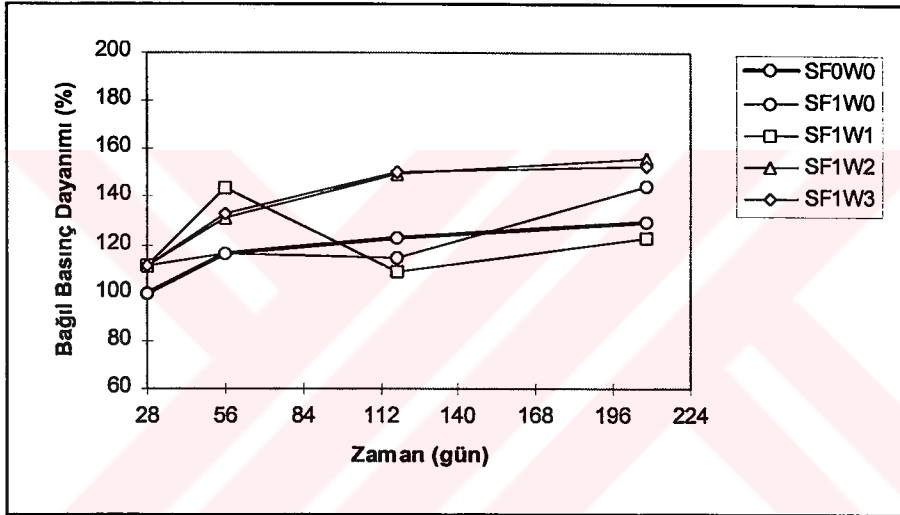
yıkayarak süzme etkisi azalır. Silis dumanı katkılı numunelerde, yüksek klorür konsantrasyonu etkisinde dayanımdaki azalmalar CSH'ın ayrışmasına bağlanabilir.

Karma suyuna klorür katılarak havada bekletilen numunelerde basınç dayanımındaki değişim, Şekil 4.2d-f'de gösterilmiştir.  $Cl^-$  etkisinde numunelerin basınç dayanımı 118. güne kadar artmıştır. NaCl'nin prizi hızlandırıcı etkisi ile açıklanabilecek artış, bugünden sonra azalma yönünde olmuştur (Şekil 4.2d). Benzer sonuçlar Giergiczny ve arkadaşlarının 320 g/L NaCl çözeltisini hem ortam hem de karma suyu olarak kullandıkları deneysel çalışmasında da görülmektedir. Bu çalışmada, basınç dayanımının ilk 90 günde arttığı, ileriki yaşlarda NaCl'ün dayanımı azalttığı belirtilmiştir. NaCl'ün bu etkisi, 10 molekül su içeren ve hacim artışına neden olan hidrate kalsiyum kloroalüminat ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ) ile açıklanmıştır. Bu ürünün miktarının zamanla artışı da XRD analizi ile tespit edilmiştir (Giergiczny vd. 1995).

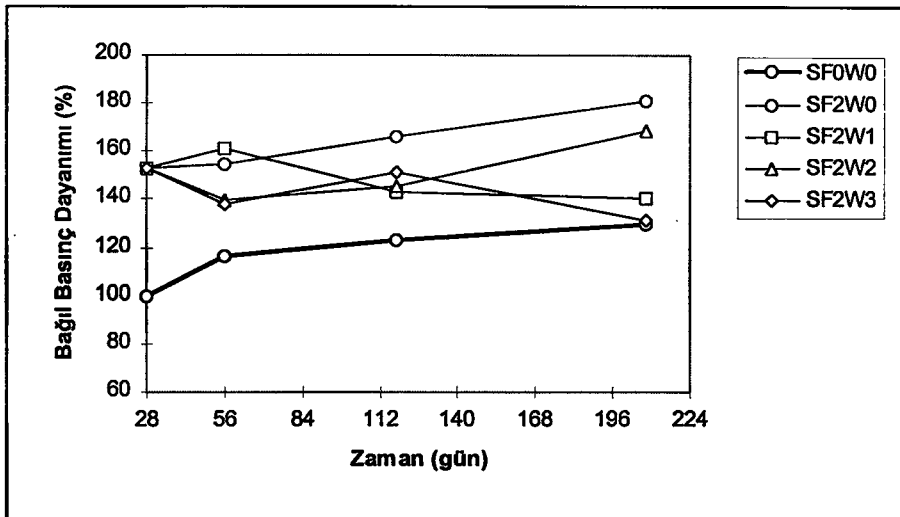
Silis dumanı katılan numunelerde de benzer eğilim görülmekle birlikte, 118. günden itibaren basınç dayanımı değerleri, SF2A3 grubu hariç başlangıçtaki değerlerin altına inmemiştir (Şekil 4.2e-f). Silis dumanının basınç dayanımına bu olumlu etkisi yukarıda açıklanan kalsiyum kloraalüminatın daha az miktarda oluşumu ile açıklanabilir (Rasheeduzzafar vd, 1992b). Ayrıca bu çalışmada, silis dumanının ikameli katılması nedeni ile çimento miktarı ve dolayısı ile  $C_3A$ 'nın oranı bir miktar daha azalmıştır. Kloraalüminatın varlığı ve miktarının  $C_3A$  oranı farklı çimentolar için araştırıldığı deneysel çalışmada,  $C_3A$ 'nın azalması ile bu ürünün azaldığı görülmüştür (Rasheeduzzafar vd., 1992a).



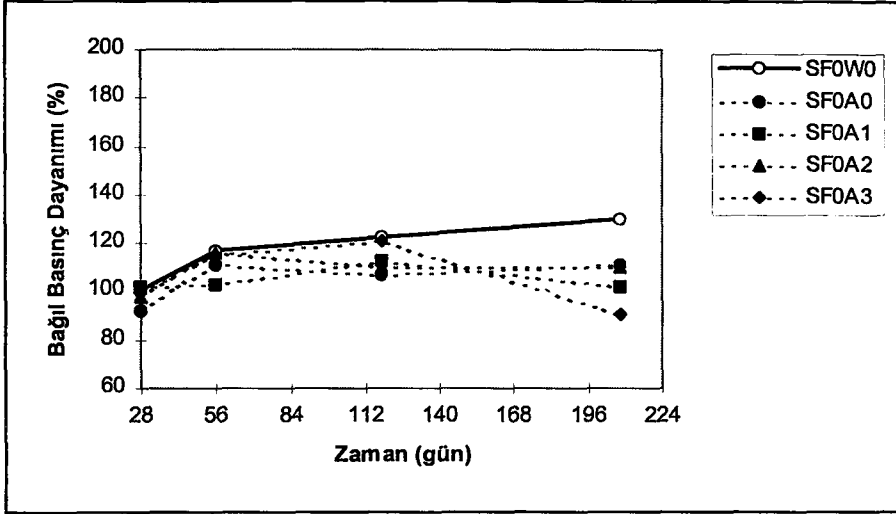
Şekil 4.2.a Çözeltilerde bekletilen şahit grubun (% $f_{cc-t}$ ) ilişkisi



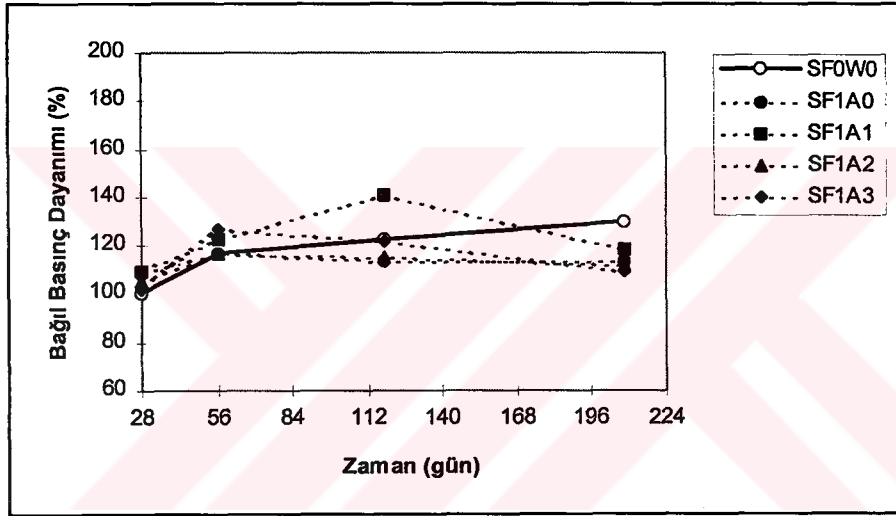
Şekil 4.2.b Çözeltilerde bekletilen %10 silis dumanı katkılı grubun (% $f_{cc-t}$ ) ilişkisi



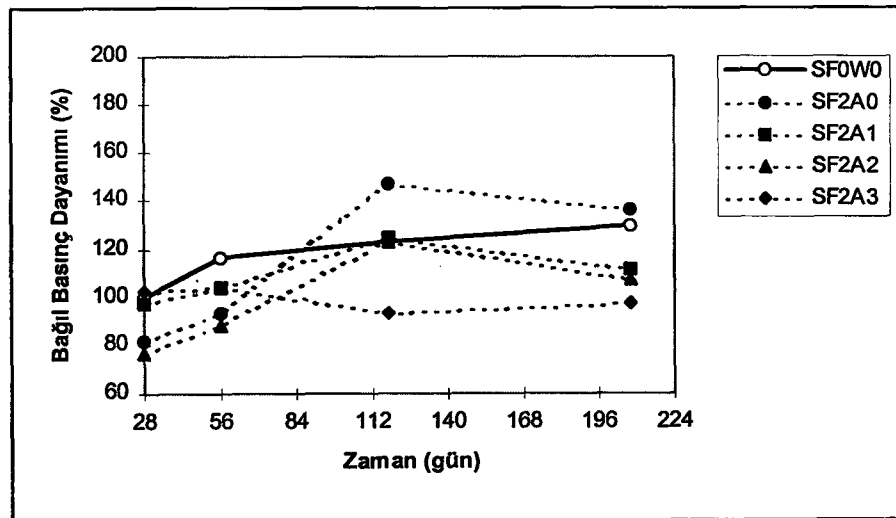
Şekil 4.2.c Çözeltilerde bekletilen %20 silis dumanı katkılı grubun(% $f_{cc-t}$ ) ilişkisi



Şekil 4.2.d Havada bekletilen şahit grubun (%f<sub>cc-t</sub>) ilişkisi



Şekil 4.2.e Havada bekletilen %10 silis dumanı katkılı grubun (%f<sub>cc-t</sub>) ilişkisi

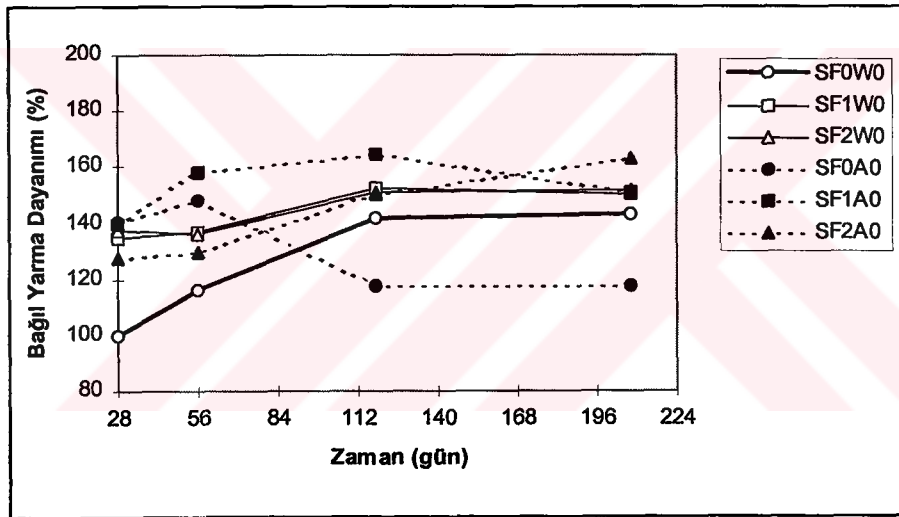


Şekil 4.2.f Havada bekletilen %20 silis dumanı katkılı grubun (%f<sub>cc-t</sub>) ilişkisi



#### 4.1.2 Yarma deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi

Yarma dayanımlarının, suda bekletilen şahit grubun (SF0W0) 28. gündeki değerine oranlanarak Şekil 4.3'te verilen deney sonuçlarına göre, havada bekletilen şahit grubun 28 günlük yarma dayanımları suda bekletilenlerden daha yüksektir. Şahit grubun yarma dayanımı, 118. güne kadar %41'lik lineer bir artış göstermiş, bu günden sonra 208. güne kadar hemen hemen lineer kalmıştır. Katkısız numunelerden havada saklanan grubun (SF0A0) yarma dayanımı 56. güne kadar artmıştır. Bu günden sonra 118. güne kadar, şahite oranla başlangıçtaki değerine göre %23 azalmış, daha sonra 208. güne kadar değişme gözlenmemiştir. Basınç dayanımında olduğu gibi, yarma dayanımındaki bu azalma da rötrenin neden olduğu çatlakların bir sonucudur.



Şekil 4.3 Beton yarma dayanımına silis dumanının ve kür koşullarının etkisi

Betona silis dumanı katılması, yarma dayanımını artırmıştır, ancak yarma dayanımı katkı oranından etkilenmemiştir; örneğin SF1W0 ve SF2W0 gruplarının dayanımları hemen hemen eşittir. Havada bekletilenlerden silis dumanı katkılı grupların yarma dayanımında zamanla artış gözlenmiştir. Bu artış SF2A0 grubunda %25 seviyesindedir ve lineerdir. SF1A0 grubu ise 118. güne kadar % 25'lik artıştan sonra azalma eğilimine girmiştir. Deja vd. (1991), NPÇ ve %10 silis dumanı katkılı harç numuneler ile yaptıkları çalışmada, normal harçların klorürlü çözeltilerin etkisinde basınç ve eğilme dayanımının 56. günde

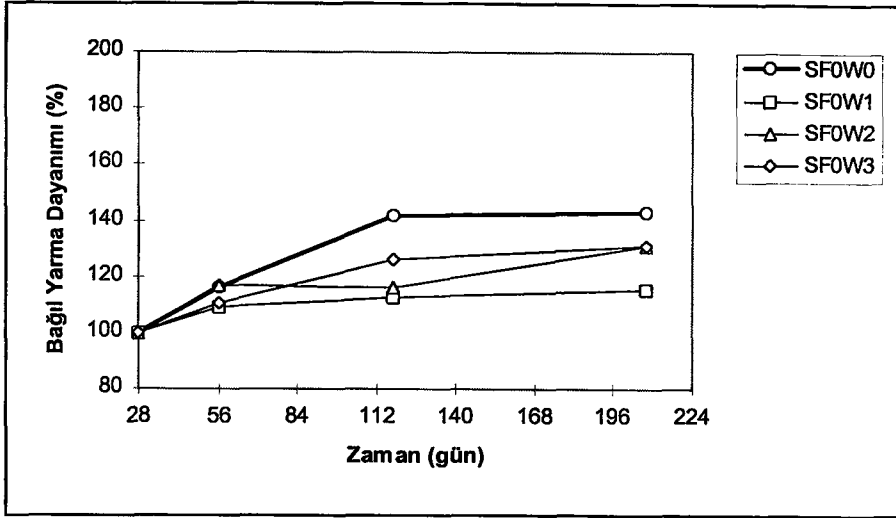
bile suda bekleyen numunelere göre azaldığını, azalma değerinin 365. günde basınç dayanımında yaklaşık %30, eğilme dayanımında %10 olduğunu görmüşlerdir. Silis dumanı katkılı numunelerde de 56. gündeki küçük artışlara rağmen, 365. günde görülen önemli azalmalara işaret etmişlerdir. Ancak Malolepszy ve Deja (1992), farklı kür koşullarının etkisinin uzun süre bekleyen numunelerde daha az belirgin olduğunu, ayrıca negatif etkinin plastifiyan kullanımı ile azaltılabileceğini belirtmişlerdir. Çimento ağırlığının %5'ine varan oranda plastifiyan kullandığımız bu çalışmada silis dumanı katkılı numuneler için, 208 günlük süreçte havada kürün önemli oranda olumsuz etkisi görülmemiştir.

Klorürlü çözeltilerin difüzyonu nedeni ile 28 günlük etki süresinden itibaren, yarma dayanımlarında önemli değişiklik olmamış, ancak dayanımlar şahitinkinin altında kalmıştır. Şekil 4.4a'da görüldüğü gibi, bu fark, şahit numunenin (SF0W0) 208. gündeki değerine oranla SF0W1'de %27, SF0W2 ve SF0W3 grubunda %12'dir. Ftikos ve Parissakis'in (1985) de belirttiği gibi, Cl<sup>-</sup> iyonlarının kalsiyumu çözerek, kolaylıkla eriyebilen CaCl<sub>2</sub>'yi oluşturması nedeni ile boşluklu yapıdaki CSH'ı oluşturması, beton basınç dayanımında olduğu gibi yarma dayanımında da etkili olmuştur.

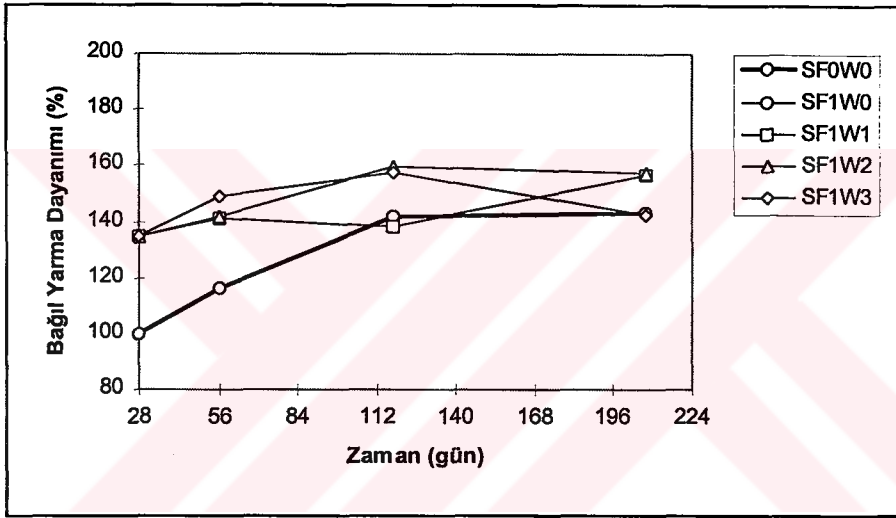
Silis dumanı katılan numunelerin her iki oranı için yarma dayanımı, başlangıçta şahitinkinden yaklaşık %40 daha fazladır. %10 silis dumanı katkılı grubun yarma dayanımı, 1500 mg/L klorür konsantrasyonunun etkisinde başlangıçtan itibaren 180 günlük etki süresince artış göstermiştir, artış oranı %22'dir. Yarma dayanımı 10000 ve 40000 mg/L Cl<sup>-</sup> konsantrasyonunun etkisinde ise 90. güne kadar yaklaşık %25 artmış, bugünden sonra azalma eğilimi göstermiştir (Şekil 4.4b). %20 silis dumanı katkılı gruplardan 1500 mg/L Cl<sup>-</sup> konsantrasyonundaki çözeltide bekletilenlerin dayanımı 28. güne kadar artmış, bugünden itibaren düşüş başlamıştır. %20 silis dumanı katkılı grubun diğer konsantrasyonlardaki değişim, 90. güne kadar dayanımında artış sonra azalmalar şeklindedir. Örneğin SF2W1 grubundaki azalma başlangıçtaki değerine göre %14, SF2W2 grubunda %4 olmuş, SF2W3 grubunda ise 180. günde azalma eğilimi göstermesine rağmen, başlangıçtaki değerinin altına inmemiştir (Şekil 4.4c). Silis dumanı katkılı grubun konsantrasyon farkı olmaksızın dayanımının artması ya da düşüşlerin çok az olması, silis dumanının klorür geçirimsizliğini azaltmasına bağlanabilir.

Farklı klorür konsantrasyonlarının karma suyu olarak kullanıldığı numunelerde, klorürün yarma dayanımına olan etkisi daha belirgindir (Şekil 4.4d-f). 28. günde klorürün prizi hızlandırıcı etkisi sonucu yarma dayanımındaki artış, klorür konsantrasyonu ile artarken, Şekil 4.4d’de görüldüğü gibi 1500 mg/L Cl<sup>-</sup> içeren çözeltiler hariç, ileriki yaşlarda önemli oranda azalma kaydedilmiştir. Örneğin SF0A3 grubunda 56. gündeki yarma dayanımı %4 artarken, 208. günde %12 azalma görülmüştür. Bu azalmalar silis dumanı katkılı numunelerde de kendini göstermiş, 10000 ve 40000 mg/L Cl<sup>-</sup> içeren çözeltiler için belirgin hale gelmiştir. Örneğin SF1A3 grubunda başlangıca göre azalma %32, SF2A3 grubunda %38’dir. Karma suyuna klorür katılmış harç numunelerinde, klorür katılmayan numunelere oranla daha büyük rötrelerin görülmesi dayanımdaki bu azalmayı açıklamaktadır.

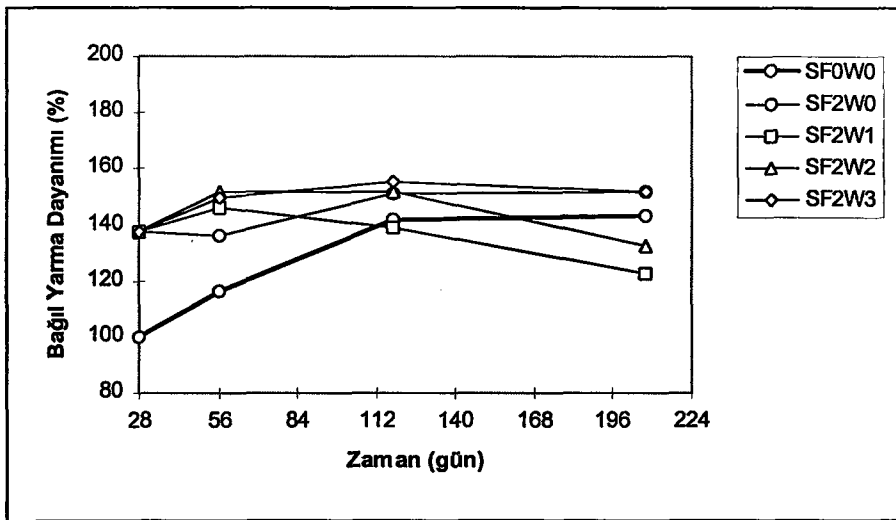




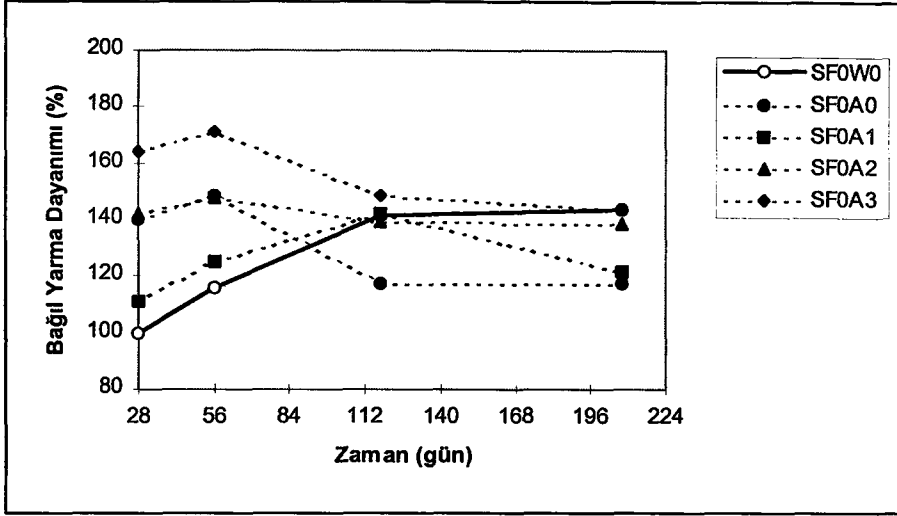
Şekil 4.4.a Çözeltilerde bekletilen şahit grubun ( $\%f_{cs} - t$ ) ilişkisi



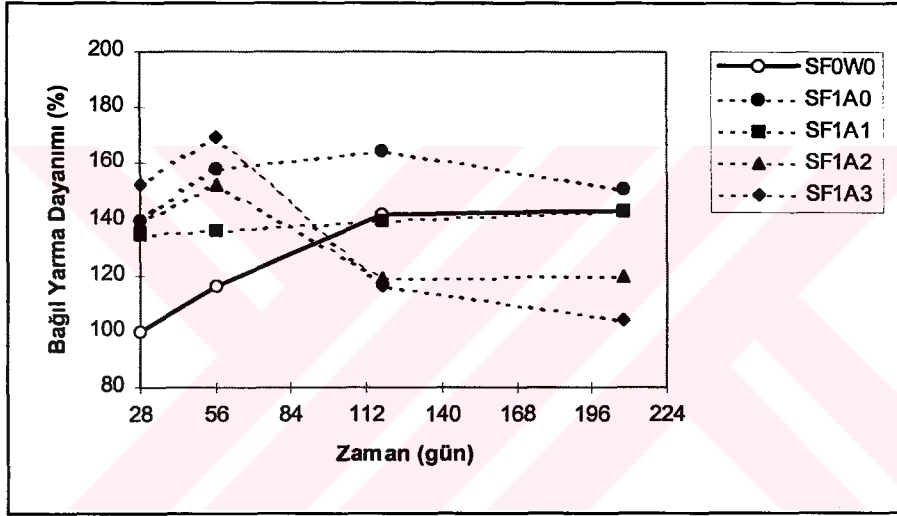
Şekil 4.4.b Çözeltilerde bekletilen %10 silis dumanı katkı grubun ( $\%f_{cs} - t$ ) ilişkisi



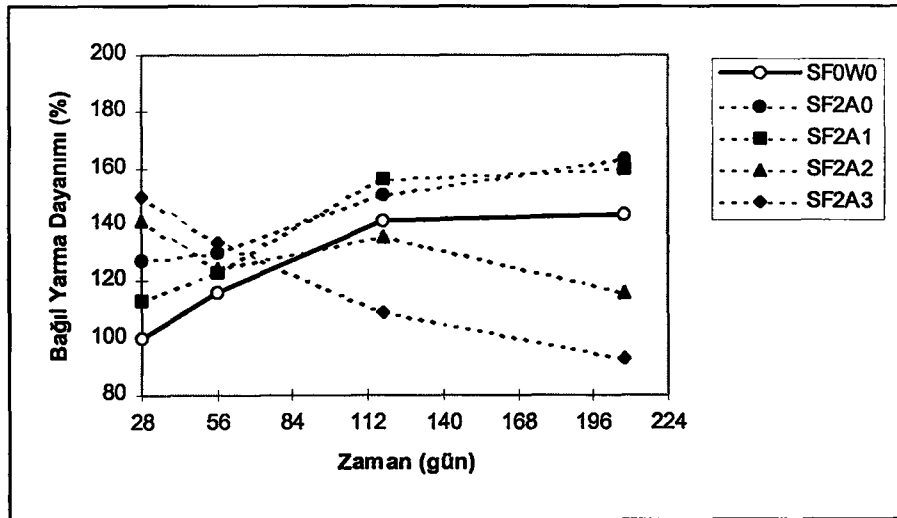
Şekil 4.4.c Çözeltilerde bekletilen %20 silis dumanı katkı grubun ( $\%f_{cs} - t$ ) ilişkisi



Şekil 4.4.d Havada bekletilen şahit grubun ( $\%f_{cs} - t$ ) ilişkisi



Şekil 4.4.e Havada bekletilen %10 silis dumanı katkılı grubun ( $\%f_{cs} - t$ ) ilişkisi



Şekil 4.4.f Havada bekletilen %20 silis dumanı katkılı grubun ( $\%f_{cs} - t$ ) ilişkisi

Basınç ve yarma deneyi sonuçlarına göre, Şekil 4.1 ile verilen basınç dayanımının ve Şekil 4.4 ile verilen yarma dayanımının zamana bağlı değişimi incelendiğinde, bu dayanımlar arasında bir ilişki kurulabileceği görülmektedir. Konu ile ilgili çalışmalarda ve standartlarda betonun çekme dayanımının, basınç dayanımının karekökü ile doğru orantılı olduğu (4.1) ortaya konulmuştur (TS500,1985; ACI, 1994; Iravani, 1996).

$$f_{cs} = \alpha_f \sqrt{f_{cc}} \quad (4.1)$$

$f_{cs}$  : Betonun çekme (yarma) dayanımı

$f_{cc}$  : Betonun basınç dayanımı

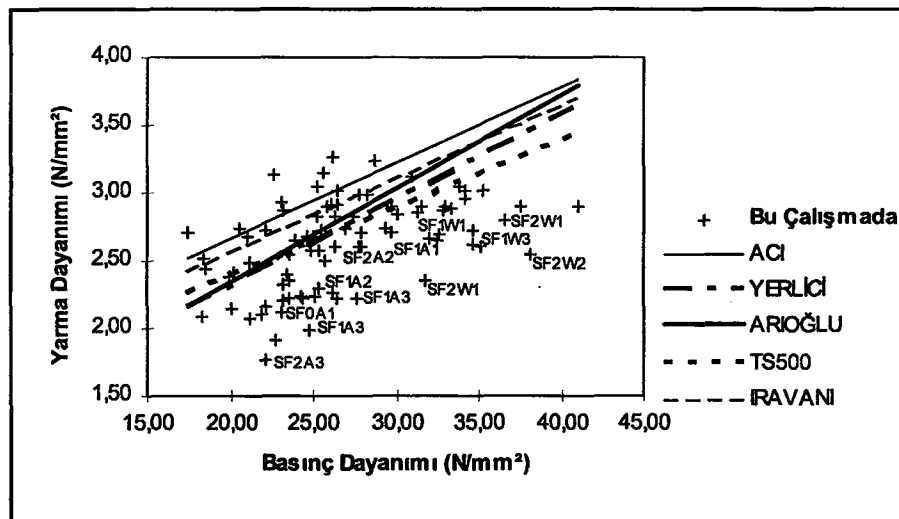
$\alpha_f$  : Beton çekme dayanımı için katsayı, (TS:0.53; ACI:0.59; Iravani:0.57)

Bu bağıntı, Yerlici ve Ersoy (1995) tarafından 4.2 ve Arıoğlu (1996) tarafından 4.3 bağıntıları ile biraz daha geliştirilerek, gerçeğe daha uygun hale getirilmiştir (Şekil 4.5).

$$f_{cs} = 0.36 f_{cc}^{0.62} \quad (4.2)$$

$$f_{cs} = 0.321 f_{cc}^{0.661} \quad (4.3)$$

Bu çalışmadaki basınç dayanımı değerleri ile bağıntılardan yararlanılarak bulunan yarma dayanımları, Şekil 4.3'deki yarma dayanımlarına uymaktadır.



Şekil 4.5 Beton basınç dayanımı ile çekme dayanımı arasındaki ilişki

Şekil 4.5'te çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki için verilen bağıntıların grafikleri ile deney sonuçları karşılaştırıldığında, klorürün difüzyonunda veya karma suyu olarak klorürün kullanıldığı betonlarda ise önemli sapmaların olduğu ve bağıntıların geçerliliğini yitirdiği anlaşılmaktadır. Bunun bir sonucu olarak klorür etkisinde, çekmeye de çalışan beton/betonarme elemanlarda, kalitenin sadece basınç dayanımı ile denetlenmesi yeterli değildir, çekme dayanımının eğilme veya yarma deneyleri ile araştırılması gerekir.

#### 4.1.3 Schmidt okumalarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi

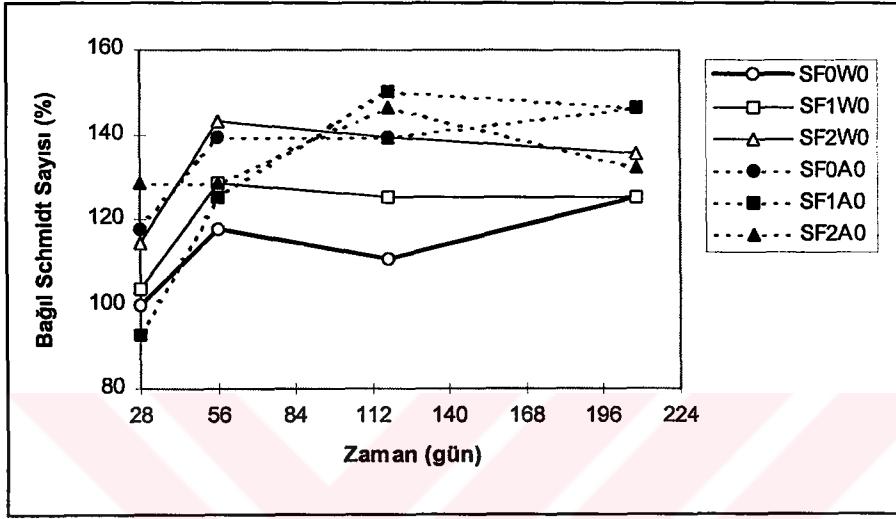
Günümüzde yüzey sertliğinden faydalanılarak beton dayanımının belirlenmesinde, tahribatsız yöntemlerden biri olan Schmidt çekici, sıkça kullanılmaktadır. Ayrıca ultrases yöntemi ile birlikte kullanılarak birleşik tahribatsız yöntemlere ilişkin bağıntılar da geliştirilmiştir (Akman, 1992b; Arıoğlu ve Köylüoğlu, 1996). Bu bölümde silis dumanı katkılı ve katkısız betonlarda, kür koşullarının ve  $Cl^-$ 'nin beton özelliklerine etkileri yüzey sertliği ile de kontrol edilmiştir.

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi suda bekletilen numunelerde, beton yüzey sertliği 56. güne kadar artmış, bugünden sonra önemli değişiklik göstermemiştir. Silis dumanı katkı miktarı arttıkça, betonun yüzey sertliği de artmıştır. Havada bekletilen numunelerde ise beton yüzey sertliğindeki artış, 118. güne kadar devam etmiş, bugünden sonra önemli değişim görülmemiştir. Suda bekletilen numunelere göre, daha yüksek değerlerin elde edilmesi, karbonatlaşma ile ilgili deney sonuçlarından da görülebileceği gibi, betonun yüzeyden itibaren karbonatlaşması ile açıklanabilir. Aynı zamanda suda bekletilen numunelerin deneyden önce sadece 24 saat havada bekletilmesi, yüzey sertliğinin düşük olmasının bir nedeni olabilir.

Farklı konsantrasyonlardaki çözeltiler içinde bekletilen, katkısız ve silis dumanı katkılı numunelerin yüzey sertliğinde 56. güne kadar artış olmuş, daha sonraki günlerde önemli bir değişim görülmemiştir (Şekil4.7a-c). 180 gün süre ile NaCl içeren çözeltilerde bekleyen numunelerde, klorür konsantrasyonu arttıkça yüzey sertliğinde önemli bir fark olmamıştır. Ftikos ve Parissakis (1985) ile Moukwa (1990),  $Cl^-$  iyonlarının etkisinde kalsiyumun

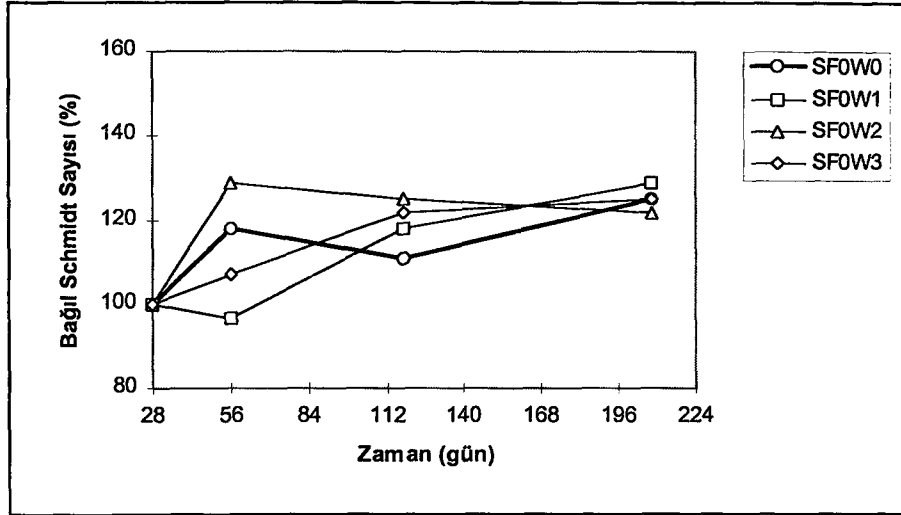


yıkılarak kolay çözünebilir  $\text{CaCl}_2$  oluşmasından dolayı, bu iyonların CSH'ı boşluklu hale getirdiğini ve poroziteyi artırdığını ifade etmişlerdir. Ancak yüzey sertliği deney sonuçlarından klorür konsantrasyon etkisinden söz etmek zordur. Deneyden 24 saat önce çözeltilerden çıkarılarak havada bekletilen numunelerin yüzeylerinin nemli olması, schmidt okumalarının değerlendirilmesinde yanıltıcı olabilir.

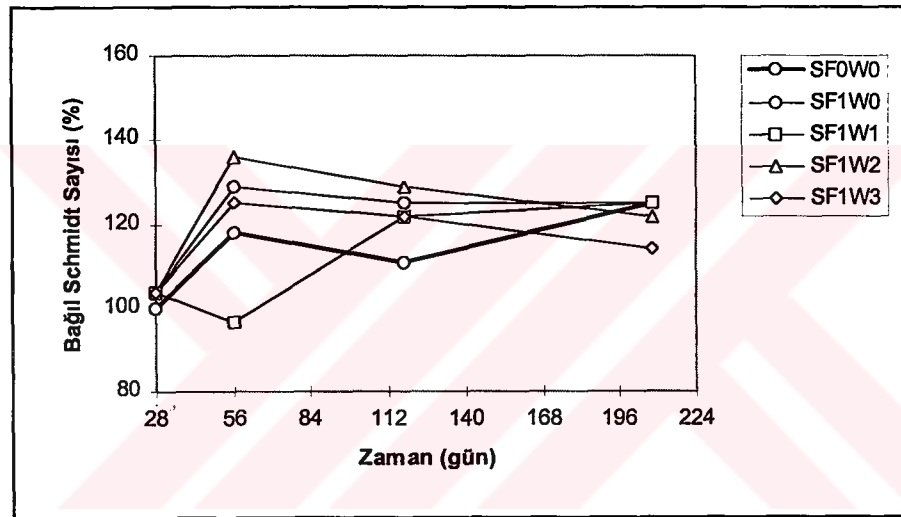


Şekil 4.6 Beton yüzey sertliği bağıl değerlerinin zamanla değişimi

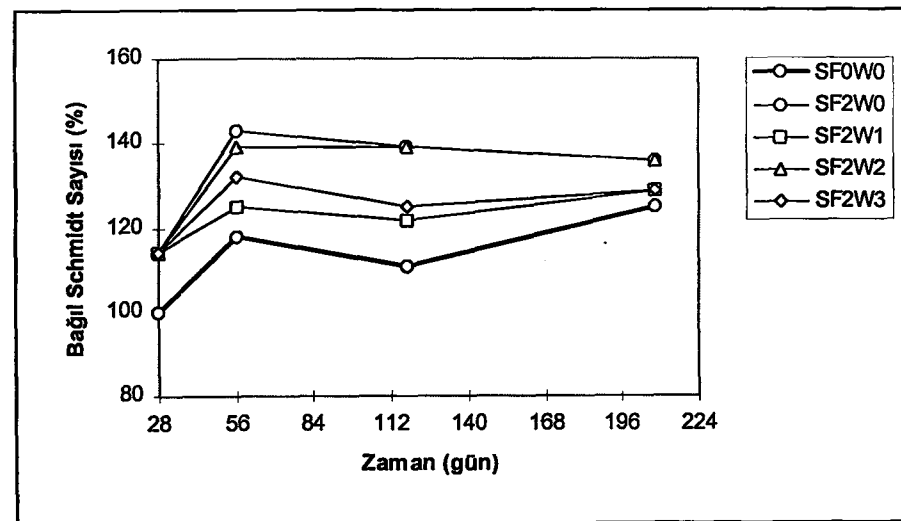
Havada bekletilen ve NaCl içeren çözeltilerin karma suyu olarak kullanıldığı şahit numunelerde ise yüzey sertliği, basınç dayanımındaki değişime paralel olarak gelişmiş, 118. günden itibaren klorür beton yüzey sertliğini azaltmıştır (Şekil 4.7d). Şekil 4.7e-f'de görüldüğü gibi, silis dumanı katılan numuneler de basınç dayanımındaki gelişmeye benzerlik göstermiştir. Bu sonuçlardan beton yüzey sertliği ile basınç dayanımının kontrol edilebileceği sonucuna varılmıştır. Ancak Schmidt çekici ile tahmin edilen dayanım, tahribatlı olarak belirlediğimiz şahit numunelerin gerçek değerlerinden bile  $\pm\%23$  saptığı görülmüştür. Klorürün etkisini beton yüzey sertliği ile değerlendirmek zordur. Bunun yanında klorürün beton boşluk yapısını etkilediğini belirten pek çok çalışmayı değerlendirebilmek için beton yüzey sertliğinden ziyade, ses geçiş sürelerini irdelemek daha anlamlı olacaktır.



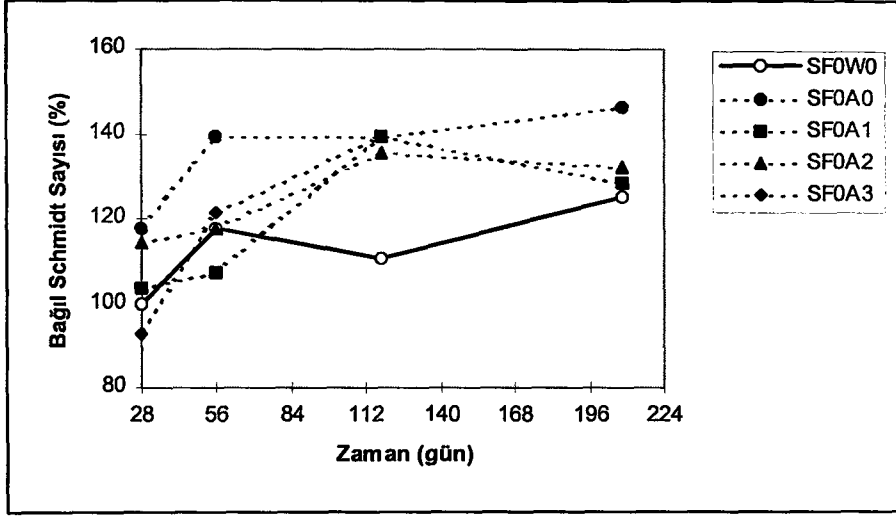
Şekil 4.7a Çözeltilerde bekletilen şahit grubun ( $\%R_s - t$ ) ilişkisi



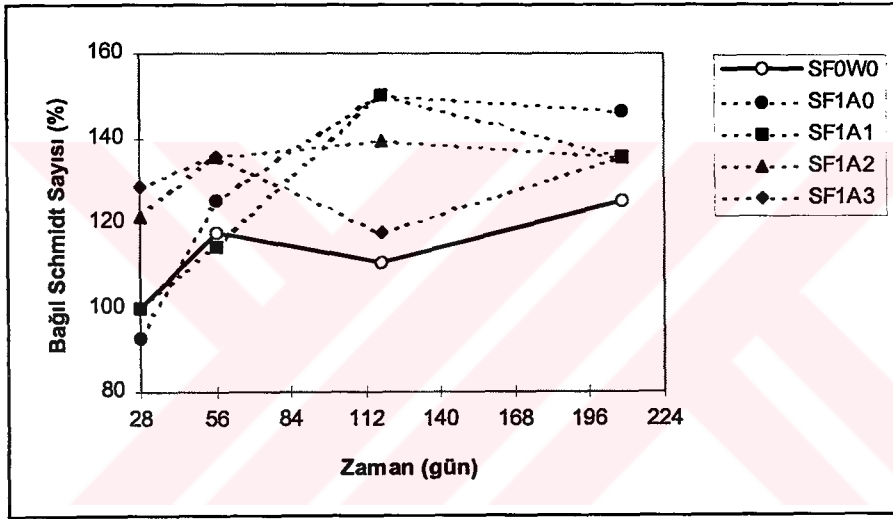
Şekil 4.7b Çözeltilerde bekletilen %10 silis dumani katkı grubun ( $\%R_s - t$ ) ilişkisi



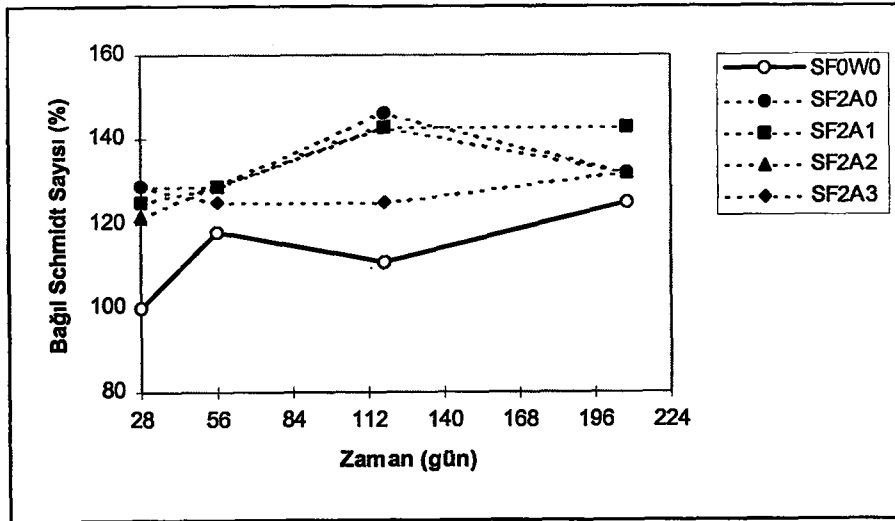
Şekil 4.7c Çözeltilerde bekletilen %20 silis dumani katkı grubun ( $\%R_s - t$ ) ilişkisi



Şekil 4.7d Havada bekletilen şahit grubun (% $R_s$  -t) ilişkisi



Şekil 4.7e Havada bekletilen %10 silis dumanı katkılı grubun (% $R_s$  -t) ilişkisi



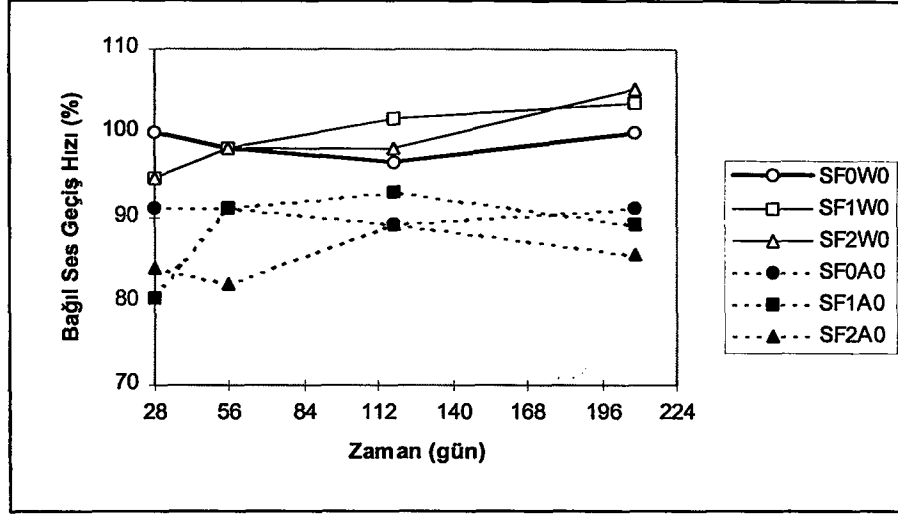
Şekil 4.7.f Havada bekletilen %20 silis dumanı katkılı grubun (% $R_s$  -t) ilişkisi

#### 4.1.4 Ultrases geçiş değerlerinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi

Boyuna ses geçiş dalgalarının değerlendirilmesi esasına dayanan ultrases metodu, basit ve ucuz olması nedeni ile betonun tahribatsız deneyleri için çok kabul goren yöntemlerden biridir. Betonun ses geçiş hızına gore nitelendirildiği (Neville, 1992) bu metot için, bazı ülkelerde standartlar da geliştirilmiştir. Bu standartlarda betonun basınç dayanımı ile ses geçiş hızı arasında lineer veya exponansiyel ifadeler önerilmiştir (Komlos vd., 1996). Ultrasonik dalğanın bir ortamda yayılma hızı o ortamın boşluk yapısına, dolayısı ile yoğunluğuna ve elastik özelliklerine bağlıdır. Bu bölümde yapılan ultrases ölçümler ile, silis dumanının ve  $Cl^-$  etkisinin beton boşluk yapısına etkileri değerlendirilmiştir.

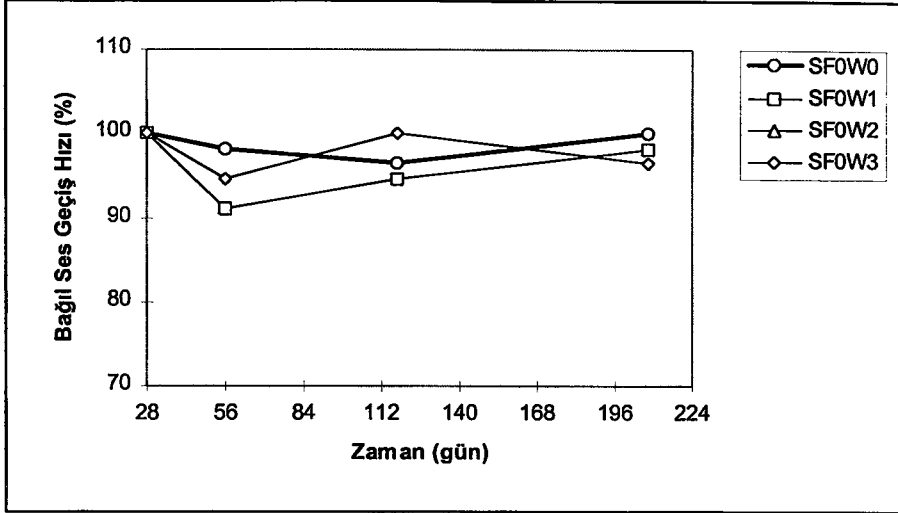
şekil 4.8'de, havada ve suda bekletilen, %10 ve %20 silis dumanı katkılı ve katkısız beton numunelerde, bağlı ses geçiş değerlerinin zamanla değişimi gösterilmiştir. Bu çalışmadaki betonlardan en düşük ses geçiş hızı, 4.3 mm/ $\mu$ s ile SF0A3 ve SF2A2 gruplarında; en büyük değer ise 6.1 mm/ $\mu$ s ile SF1W2 grubunda elde edilmiştir. oğunluğu 4.5 mm/ $\mu$ s ile 6.0 mm/ $\mu$ s arasında değerler vermiştir. Buna göre tüm gruplardaki numuneler, mükemmelen beton olarak nitelendirilebilir (Neville, 1992). Suda kr edilen numunelerde, boşlukların su ile dolu olması ve ses dalgalarının boşluğa göre daha hızlı geçmesi, bu numunelerde ses geçiş hızının daha yüksek çıkmasına neden olmaktadır. Bunun sonucu olarak silis dumanının etkisi çok açık görülmemekle birlikte, 56. günden itibaren silis dumanı katkılı numunelerde ses geçiş hızı 208. günde yaklaşık 0.3 mm/ $\mu$ s daha yüksek değerler almıştır. Ultrasonik yöntemde suyun bu olumsuz etkisine rağmen, silis dumanının toplam boşluk hacmini azalttığı görüşlerine uymaktadır (Feldman ve Cheng-yi, 1985). Havada kür edilen numunelerde ise silis dumanının ses geçiş sürelerine olumlu etkisinden söz edilemez. Hatta 208. günde silis dumanı katkı oranı arttı ses geçiş hızlarının daha düşük olduğu görülmektedir. Ramezaniyanpour ve Malhotra (1995), kalıptan çıkarıldıktan sonra oda sıcaklığında bekletilen numunelerin porozitesinin, sadece iki gün süre ile nemli kr etkisinde kalan numunelere oranla çok yüksek olduğunu görmüşlerdir. Aynı çalışmada, havada bekletilen silis dumanı katkılı numunelerin toplam boşluk hacminin kontrol numunelerine göre daha büyük değerler aldığını belirtmişlerdir. Bu verilerin sonucunda,

yüksek dayanımlı betonların porozitesinin düşük, dayanıklılığının yüksek olması için sürekli nemli ortamda kür edilmesi gerektiğine işaret etmişlerdir.

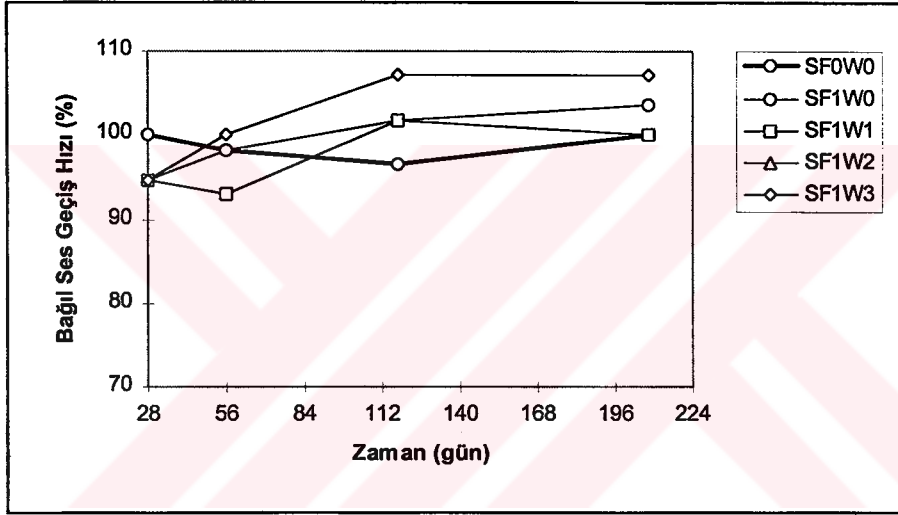


Şekil 4.8 Beton ses geçiş hızı bağıl değerlerinin zamanla değişimi

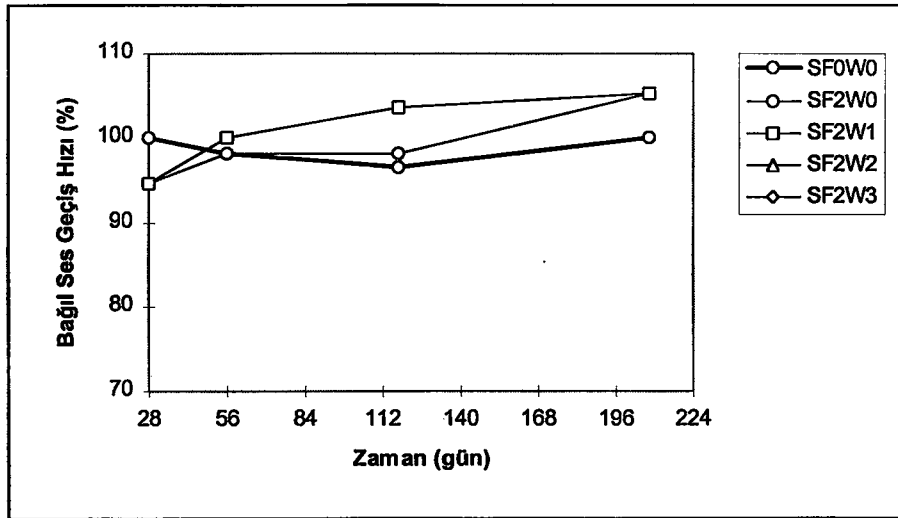
Farklı Cl konsantrasyonlarındaki çözeltilerin, beton ultrases geçiş hızına etkilerinin zamana bağlı olarak gösterildiği Şekil 4.9a-f'de, değerlendirmeye alınabilecek önemli fark görülmemiştir. Bu nedenle, Cl'ün boşluk yapısındaki etkisinin ultrasonik yöntem ile açıklanması anlamlı olmayacaktır. Ayrıca klorür içeren çözeltilerin, suya göre yoğunluğunun daha yüksek olması, ses geçiş hızını artırabileceği için, sonuçların yanıltıcı olabileceği gözardı edilmemelidir.



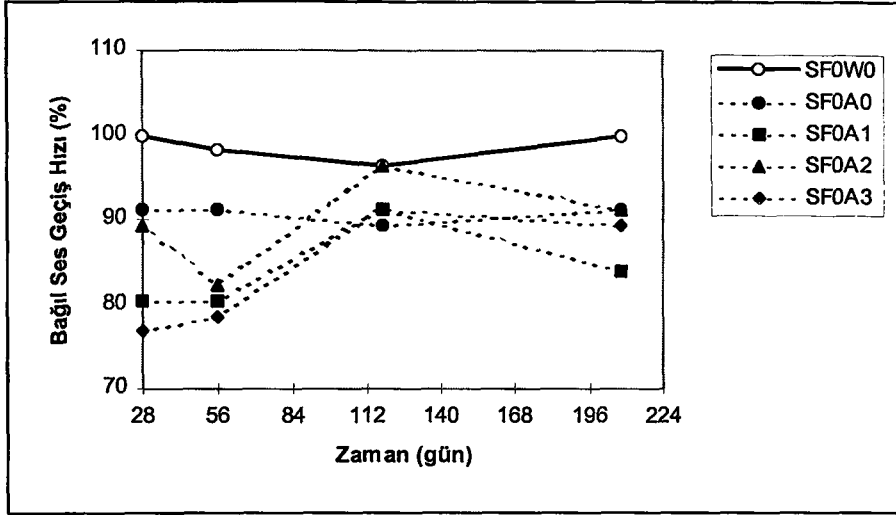
Şekil 4.9a Çözeltilerde bekletilen şahit grubun ( $\%v_s-t$ ) ilişkisi



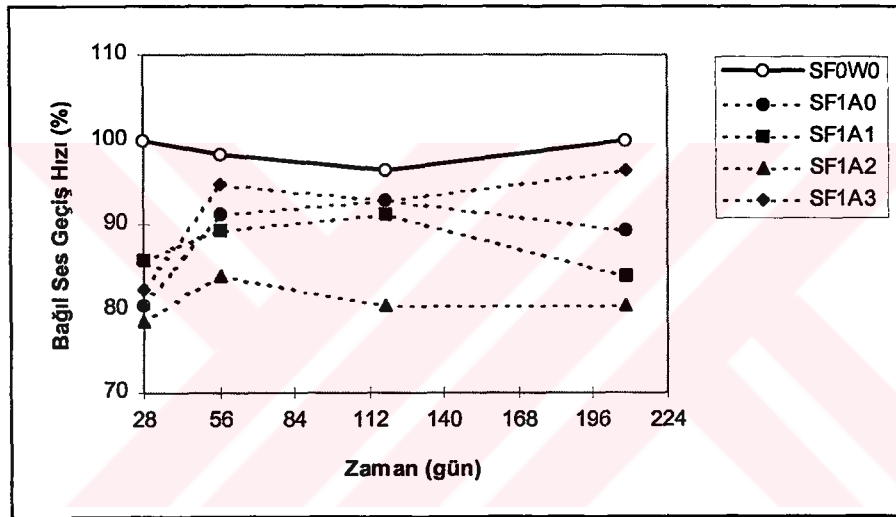
Şekil 4.9b Çözeltilerde bekletilen %10 silis dumana katkı grubun ( $\%v_s-t$ ) ilişkisi



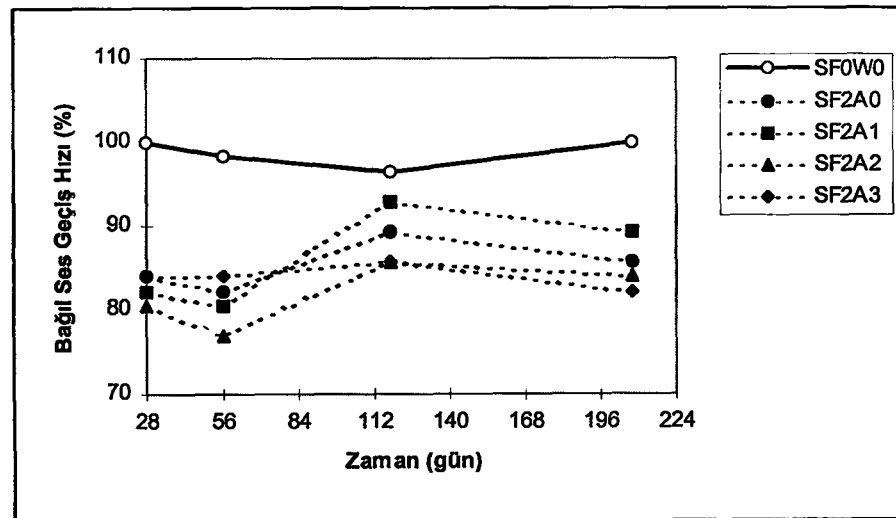
Şekil 4.9c Çözeltilerde bekletilen %20 silis dumana katkı grubun ( $\%v_s-t$ ) ilişkisi



Şekil 4.9d Havada bekletilen şahit grubun ( $\%v_s$ -t) ilişkisi



Şekil 4.9e Havada bekletilen %10 silis dumanı katkılı grubun ( $\%v_s$ -t) ilişkisi

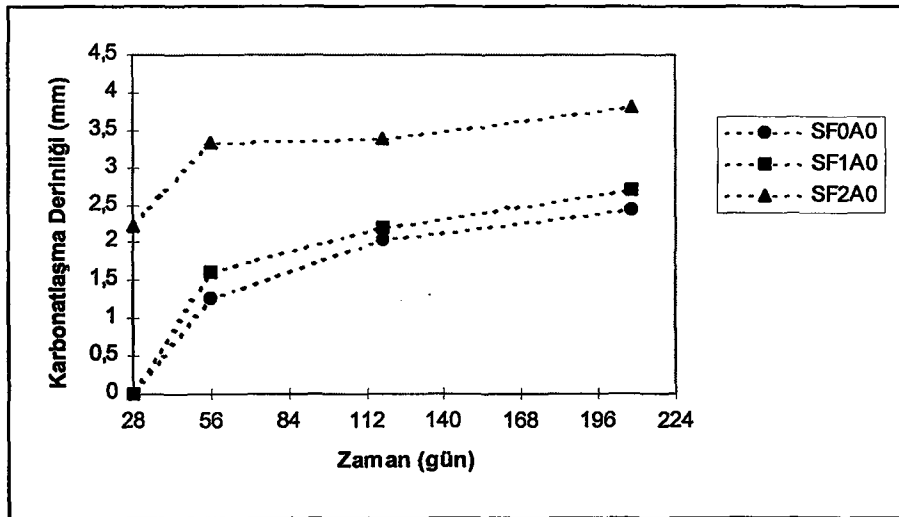


Şekil 4.9f Havada bekletilen %20 silis dumanı katkılı grubun ( $\%v_s$ -t) ilişkisi



#### 4.1.5 Karbonatlaşma derinliğinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi

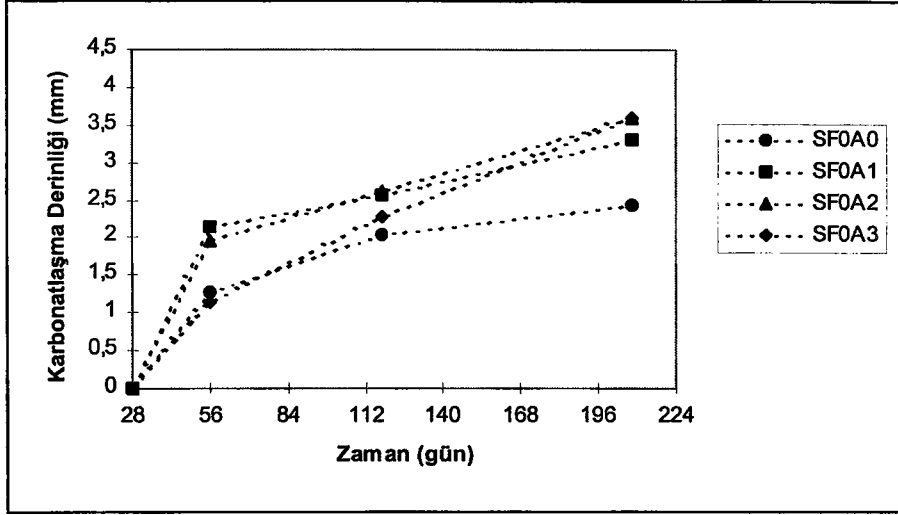
Bu çalışmada, su içinde bekletilen numunelerde  $\text{CO}_2$ 'nin beton içine nüfuz etmesi zorlaştığından (Neville, 1992) karbonatlaşma derinliği sadece havada bekletilen numunelerde ölçülmüştür. Şekil 4.10'da görüldüğü gibi karbonatlaşma derinliği, bütün gruplarda zamanla artmaktadır. Silis dumanı miktarı da karbonatlaşma derinliğini artırmıştır. Grimaldi vd. (1989), karbonatlaşma derinliğindeki artışı, silis dumanı ilavesinden kaynaklanan pH'daki azalmaya bağlamasına karşın; pek çok yayında silis dumanının pH'ı önemli derecede azaltmadığı gösterilmiştir (Yamato vd., 1989; Byfors, 1987). Çalışmamızda, pH elektrodu kullanılarak yapılan deneylerde, silis dumanı katkılı gruplarda pH değeri 11.6-12.23 arasında ölçülmüş ve silis dumanının pH'ı önemli derecede etkilemediği görülmüştür. Silis dumanı katkılı gruplarda karbonatlaşma derinliğinin artışı, silis dumanının beton içindeki  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'yi bağlamış olması nedeni ile  $\text{CO}_2$ 'nin daha derine doğru nüfuz etmiş olmasına bağlanabilir. Bu nedenle karbonatlaşma derinliği ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi ifade eden bağıntıların, kullanılan çimento cinsi ve silis dumanı oranı gözönüne alınarak, yeniden gözden geçirilmesi doğru olacaktır. Zira düşük dayanımlı betonların yüksek dayanımlı betonlardan daha hızlı karbonatlaştığı belirtilirken (Roy vd., 1996); silis dumanı hem basınç dayanımını hem de karbonatlaşma derinliğini artırmaktadır, bu durum önceki ifadelerden farklıdır.



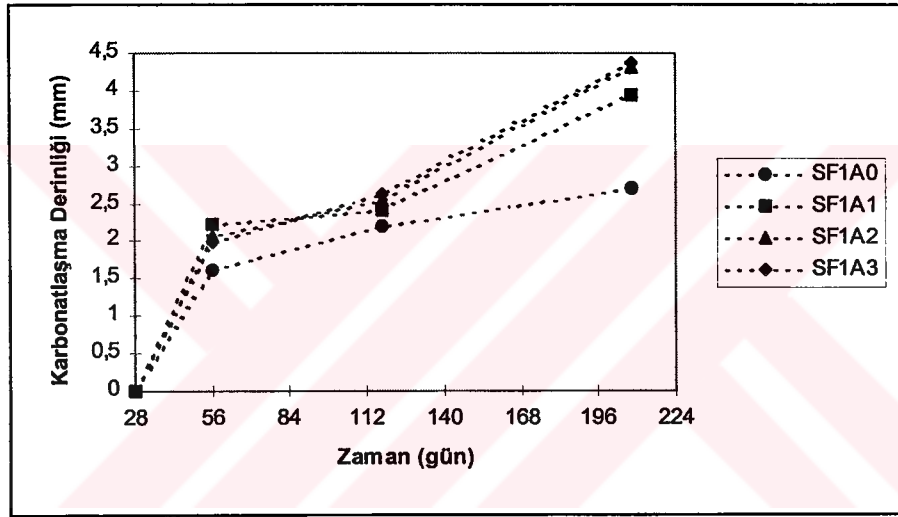
Şekil 4.10 Karbonatlaşma derinliğinin zamanla değişimi

Karma suyuna farklı konsantrasyonlarda klorür katılarak üretilen betonların karbonatlaşma derinliğindeki değişimler, Şekil 4.11a-c'de gösterilmiştir. Normal betona klorür katılması, 56. günden itibaren karbonatlaşma derinliğini artırmış, klorür konsantrasyonunun önemli bir etkisi görülmemiştir. Örneğin 208. günde, şahit grubun karbonatlaşma derinliği 2.43 mm iken SF0A1 grubunun 3.32 mm, SF0A2 ve SF0A3 gruplarının 3.61 mm'dir (Şekil 3.11a). Benzer sonuçlar Al-Amoudi vd.'nin (1991) çalışmasında da görülmekte, klorür nedeni ile karbonatlaşma derinliğindeki artışın çok önemli derecede olmadığı belirtilmektedir. Grimaldi vd. (1989), klorürün karbonatlaşma derinliğini az da olsa artırmasını,  $Cl^-$  iyonlarının elektriksel denge sağlanıncaya kadar, boşluk suyu bileşenlerinden  $OH^-$  iyonları ile yer değiştirmesine bağlamış ve  $OH^-$  içeren bu olayı karbonatlaşma olarak adlandırmıştır.

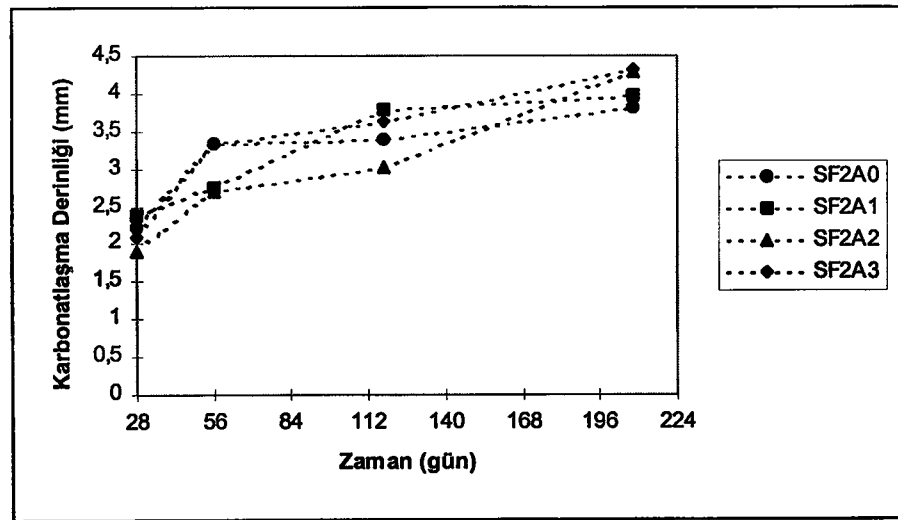
Betona %10 silis dumanı katılmış SF1A0 grubunda karbonatlaşma derinliği, 56. güne kadar hızlı bir artış ile 1.62 mm'ye, 208. günde ise daha yavaş artış hızı ile 2.70 mm'ye ulaşmıştır. Klorür içermeyen bu grubun karbonatlaşma derinliği, klorür katkılı gruplarından düşüktür. Klorür katkılılardan SF1A0 grubunun karbonatlaşma derinliği 2.7 mm, SF1A1 grubunda 3.94 mm, SF1A2 ve SF1A3 grubunda yaklaşık 4.5 mm'dir (Şekil 4.11b). Betona %20 silis dumanı katılması durumunda ise klorürün ve konsantrasyonun karbonatlaşma derinliğini etkilemediği ve 208 günlük etki süresince önemli bir fark oluşturmadığı saptanmıştır (Şekil 4.11c). Bu sonuçlara göre karbonatlaşma derinliğine, silis dumanının varlığı ve oranı, klorürün ise sadece varlığı etkili olmaktadır. Konsantrasyon etkisinin gözlenmeyişi ise, Vassie'nin (1979) de deneysel olarak kanıtladığı gibi, farklı  $Cl^-$  konsantrasyonlarındaki çözeltilerin pH'ı değiştirmemesi ile açıklanabilir.



Şekil 4.11a Silis dumanı katkısız grubun karbonatlaşma derinliğinin zamanla değişimi



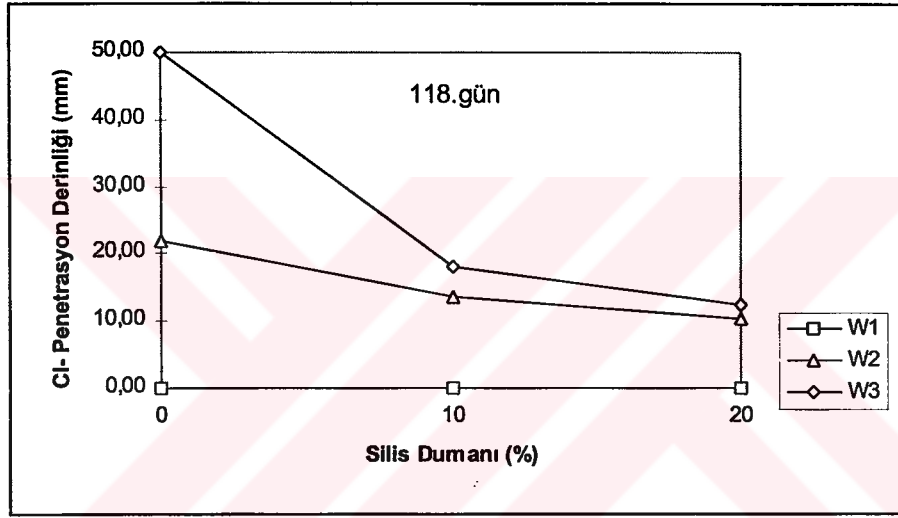
Şekil 4.11b %10 Silis dumanı katkılı grubun karbonatlaşma derinliğinin zamanla değişimi



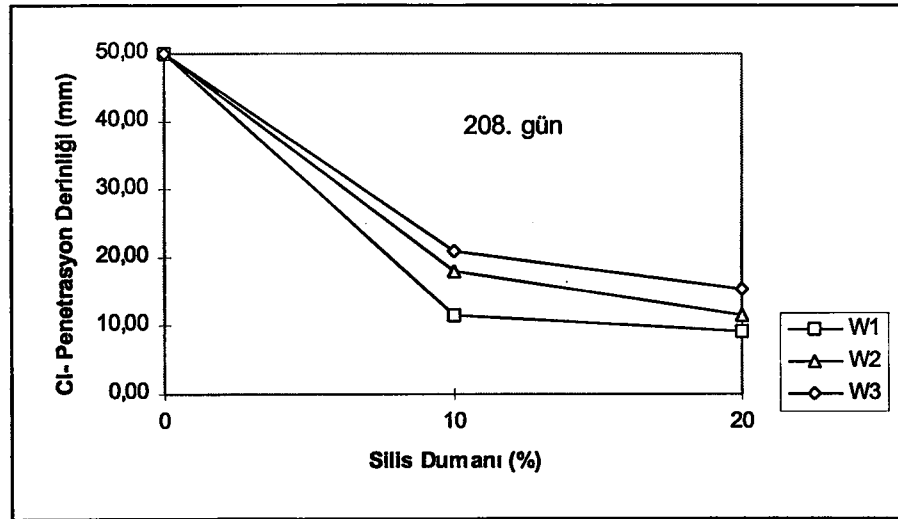
Şekil 4.11c %20 Silis dumanı katkılı grubun karbonatlaşma derinliğinin zamanla değişimi

#### 4.1.6 Cl<sup>-</sup> penetrasyon derinliğinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi

Beton yapılar klorürlü çözeltilerin etkisinin belirlenmesi amacı ile kullanılan renk ayırımı yöntemi ve uygulaması, kolay olmakla birlikte sadece kalitatif değerlendirme imkanı vermesi nedeni ile eleştirilmektedir. Bu yöntemde, yarma deneyinden hemen sonra kırılan yüzeye, ayrı ayrı hazırlanan Fluorescein sodyum ve AgNO<sub>3</sub> çözeltileri püskürtülmüş ve renk ayırımı ile klorür penetrasyon derinliği (mm) ölçülmüştür. Farklı klorür konsantrasyonlarının etkisinde, penetrasyon derinliğinin silis dumanı oranına göre değişimi Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12a Klorür penetrasyon derinliğinin silis dumanı oranı ile değişimi (118. günde)



Şekil 4.12b Klorür penetrasyon derinliğinin silis dumanı oranı ile değişimi (208. günde)

Betona silis dumanı katılması, klorür penetrasyonuna karşı olumlu etkisini göstermiş, silis dumanı oranı arttıkça penetrasyon derinliği azalmıştır. Örneğin 10000 mg/L  $Cl^-$  konsantrasyonundaki çözeltilerde (W2), normal beton grubunun 118. günde klorür penetrasyon derinliği, 22 mm'ye, 208. günde numunenin ortasına kadar ulaşmıştır. Penetrasyon derinliği, %10 silis dumanı katıldığında %38, %20 silis dumanı katılması durumunda %54 azalmıştır. Klorür konsantrasyonu 40000 mg/L olan NaCl çözeltisinde (W3) ise normal beton numunelerde klorür, daha 118. günde numunenin ortasına kadar ilerlemiştir. Klorür penetrasyon derinliği, %10 silis dumanı katılan numunede 18 mm'ye, %20 silis dumanı katılan numunede 12 mm'ye ulaşabilmiştir. Silis dumanının klorür geçirimsizliğini azalttığı, pek çok araştırmacı tarafından da ortaya konulmuştur (Berke, 1989; Yamato vd. 1989; Swamy ve Laiw, 1995).

Penetrasyon derinliği, renk ayırımı yöntemi ile serbest  $Cl^-$  konsantrasyonu çimento ağırlığının %0.15'i değerine ulaştığı zaman belirlenebilir (Otsiki vd., 1992). Daha düşük klorür konsantrasyonları için bu yöntem uygun değildir. 118. günde, çimento ağırlığının %0.06 oranındaki 1500 mg/L klorür konsantrasyonunun (W1), penetrasyon derinliğinde bir değişime neden olmayışı, bu metod için klorür konsantrasyonunun yeterli olmadığını göstermektedir. Bu nedenle renk ayırımı yöntemi araştırmacılar tarafından eleştirilmektedir.

#### 4.1.7 $Cl^-$ difüzyonunun değerlendirilmesi ve irdelenmesi

Alkalin ortamda bulunan donatının koruyucu oksit tabakasında depasivasyonuna neden olan en önemli olay  $Cl^-$  iyonlarının varlığı ve ortamın alkalinitesinin düşmesidir. Bölüm 2.2.2'de klorürün neden olduğu korozyonun tahmininde  $Cl^-/OH^-$  oranının belirleyici faktör olacağı açıklanmıştı. Bu amaçla,  $Cl^-$  ve  $OH^-$  iyonlarının miktarı bütün gruplarda toz numuneler ile hazırlanan çözeltilerde Bölüm 3.4.1'de tanımlanan titrasyon yöntemi ile belirlenmiştir. Bu çözeltilerde öncelikle elektrot yardımı ile pH ölçümleri yapılmıştır. Puzolan malzemelerin betonda boşluk suyunun pH'ını düşürdüğü bilinmesine karşın (Byfors, 1987); ölçülen pH değerlerinin çeliğin korozyonuna neden olacak kadar düşük olmadığı görülmüştür. Silis dumanının  $Ca(OH)_2$  ile reaksiyona girmesi nedeni ile pH'da

KORÖZYON VE PENETRASYON

azalmalar görülmüş, ancak silis dumanı pH'ı önemli derecede etkilememiştir. Benzer sonuçlar Yamato vd. (1989) tarafından yapılan çalışmalarda da ifade edilmektedir. Ayrıca, bazı çalışmalarda toz numuneler çıkarılarak belirlenen OH<sup>-</sup> miktarının, boşluk suyunda ölçülen OH<sup>-</sup> miktarından 3-13 kat daha fazla değerler verdiği ve sonuçların hatalı olabileceği ifade edilmektedir (Haque ve Kayyali, 1995a, 1995b). Yapılan deneylerden alınan sonuçlara göre Cl<sup>-</sup> iyonları varlığı, Kaushik ve Islam'ın (1995) çalışmasında da görüldüğü gibi, betonun alkalinitesinde önemli bir değişikliğe neden olmamıştır.

Toz numunelerde ölçülen pH değeri ve buradan belirlenen OH<sup>-</sup> iyonlarının boşluk suyundaki OH<sup>-</sup> iyonları ile aynı değerde olmaması ve silis dumanı gibi puzolan malzemelerin, pH'da önemli değişime neden olmaması dikkate alınarak Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup> oranının anlamlı olmayacağına karar verilmiş, serbest Cl<sup>-</sup> profili çıkarılmıştır. Mangat ve Molloy, (1995), özellikle silis dumanı gibi puzolan malzemelerin kullanılması sonucunda, donatı korozyonu ile Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup> oranı arasında bir ilişki olmadığını ifade etmişlerdir. Aşağıda, klorürün dışarıdan difüzyonu ve karma suyuna katılarak etkisi ayrı ayrı ele alınmış, deney sonuçları Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil Ek.1 ve Şekil Ek.2'de gösterilerek irdelenmiştir.

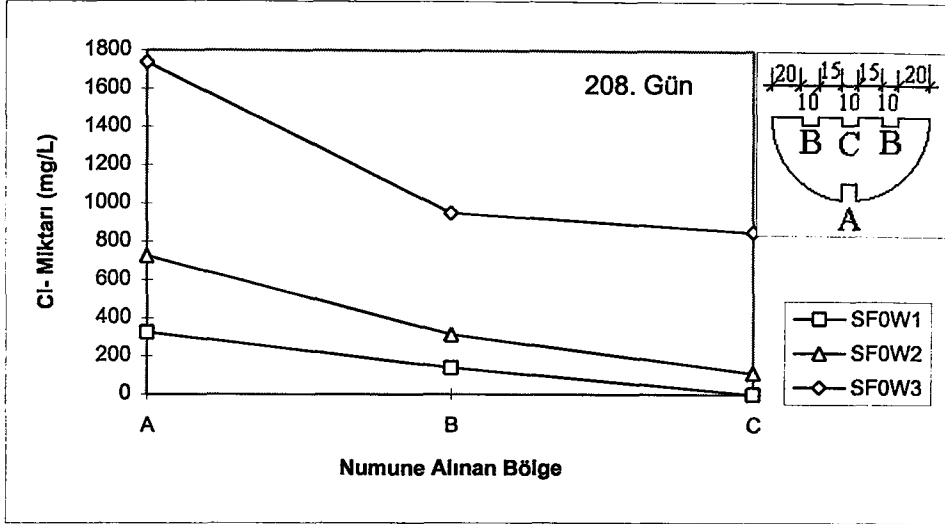
Klorürün 180 gün süre ile dışarıdan etki ettiği gruplarda, serbest Cl<sup>-</sup> miktarı etki eden çözeltilerin konsantrasyonu ile artmış, derinlik ile azalmıştır (Şekil 4.13a). Örneğin Cl<sup>-</sup> konsantrasyonu 40000 mg/L çözeltide bekleyen numunenin (SF0W3) yüzeyinden itibaren 10 mm derinlikte (A) 1737 mg/L serbest klorür mevcut iken, 20-30 mm derinlikte (B) 950 mg/L, 45-50 mm derinlikte (C) 850 mg/L serbest Cl<sup>-</sup> tespit edilmiştir. Klorür konsantrasyonu 10000 mg/L olan çözeltide bekleyen grubun (SF0W2), aynı derinliklerdeki serbest klorür miktarları ise 0-10 mm'de 725 mg/L, 20-30 mm'de 312 mg/L, ve 45-50 mm'de 112 mg/L'dir. Klorür konsantrasyonu 1500 ve 10000 mg/L olan çözeltilerin 180 günlük etkisinde, beton numunenin 50 mm derinliğinde belirlenen serbest klorür ihmal edilebilir düzeyde iken, 40000 mg/L için bu derinlikte 850 mg/L serbest klorür tespit edilmiştir.

Şekil 4.13.b ve Şekil 4.13.c'de, %10 ve %20 silis dumanı katkılı numunelere farklı konsantrasyonlarda klorür içeren çözeltilerin difüzyonunda, derinlikle değişen serbest  $Cl^-$  miktarları gösterilmiştir. %10 silis dumanı katkılı numunelerde, yüzeyden itibaren 10 mm derinlikte serbest klorür miktarı yaklaşık 2 kat, %20 silis dumanı katkılı numunelerde yaklaşık 4 kat azalmıştır. Serbest  $Cl^-$  miktarı, silis dumanı katkılı betonlarda 20 mm derinlikte ihmal edilebilir düzeydedir. Konu ile ilgili çalışmalarda da belirtildiği gibi, silis dumanı katkılı betonlarda  $Ca(OH)_2$  kristalleri azalmakta, yoğun ve üniform yapıda C-S-H jeli oluşmaktadır. Silis dumanı çok ince olduğu için, çimento hamuru matrisinde ve agrega-çimento hamuru arayüzünde oluşturduğu mikroyapısal değişiklikler nedeni ile, klorür iyonu geçirgenliğini önemli ölçüde azaltmaktadır (Gautefall ve Havdahl, 1989; Cabrera ve Claisse, 1990; Azari vd., 1993; Tori ve Kawamura, 1994; Mangat vd., 1994).

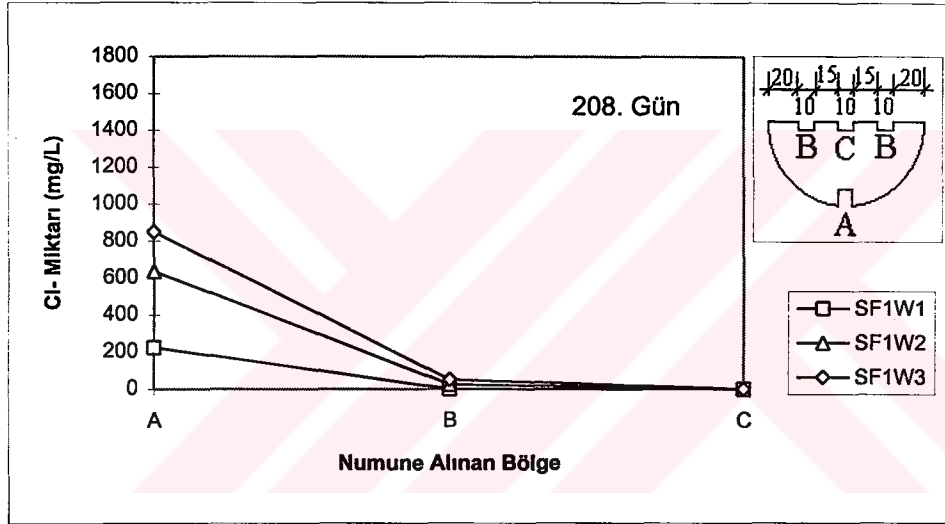
Farklı  $Cl^-$  konsantrasyonlarındaki çözeltilerin karma suyu olarak kullanıldığı numunelerde, 0-10 mm (A), 20-30 mm (B) ve 45-50 mm (C) derinliklerde ölçülen serbest klorür miktarı Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Titrasyon yöntemi ile belirlenen serbest  $Cl^-$  miktarı, karma suyu olarak katılan çözeltilerin klorür konsantrasyonunun çok altında kalmıştır. Örneğin karma suyu olarak 40000 mg/L klorür içeren çözeltinin katıldığı numunenin (SF0A3) 0-10 mm derinliğinde ölçülen serbest  $Cl^-$  miktarı 775 mg/L, 20-30 mm'de 625 mg/L ve 45-50 mm'de 550 mg/L'dir. Karma suyuna katılan klorür miktarı azaldıkça, ölçülen serbest klorür miktarı çok daha düşük seviyede kalmış, SF0A1 grubunda tespit edilememiştir. Çimentonun karma oksitlerinden  $C_3A$  ( $3CaO.Al_2O_3$ ),  $Cl^-$  iyonları ile birleşerek Friedel Tuzu adı verilen  $3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$  kalsiyum kloraalüminatı oluşturmaktadır. Pek çok çalışmada gösterildiği gibi, düşük  $C_3A$  oranlarında bile klorürün bağlandığı belirtilmektedir (Hussain vd., 1995; Rasheeduzzafar vd., 1992a, 1992b). Bu çalışmada kullanılan ve özellikleri Çizelge 3.2'de verilen çimentonun  $C_3A$  oranı %3.40 gibi düşük değerde olmasına karşın, klorür iyonları bağlanmıştır.

Şekil 4.13a ve Şekil 4.14a karşılaştırıldığında,  $Cl^-$  iyonlarının dışarıdan difüzyonunda, beton içindeki serbest  $Cl^-$  miktarının, karma suyuna katılan grubunkinden daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Şekil Ek.1a,d,e ile Şekil Ek.2a,d,e'de görüldüğü gibi, içine katılan ve dışarıdan nüfuz eden iki grubun serbest klorür miktarındaki fark zamanla daha

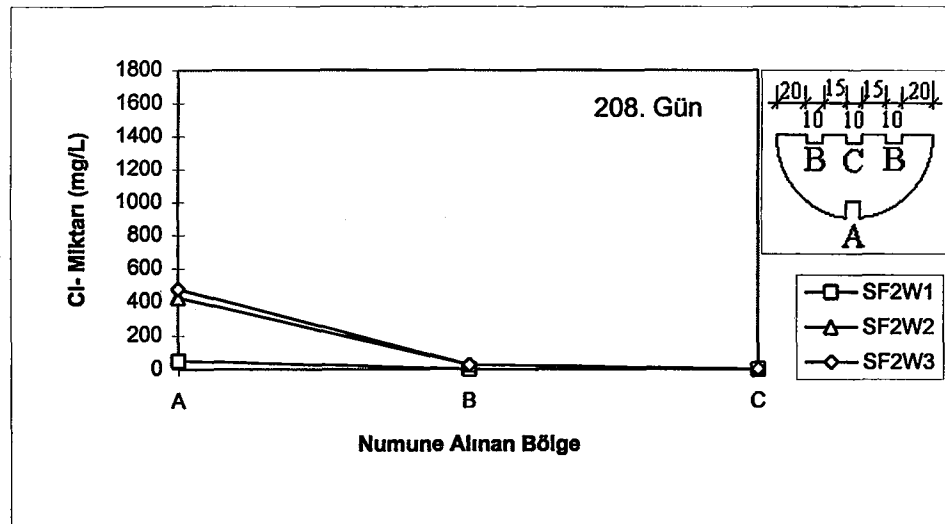




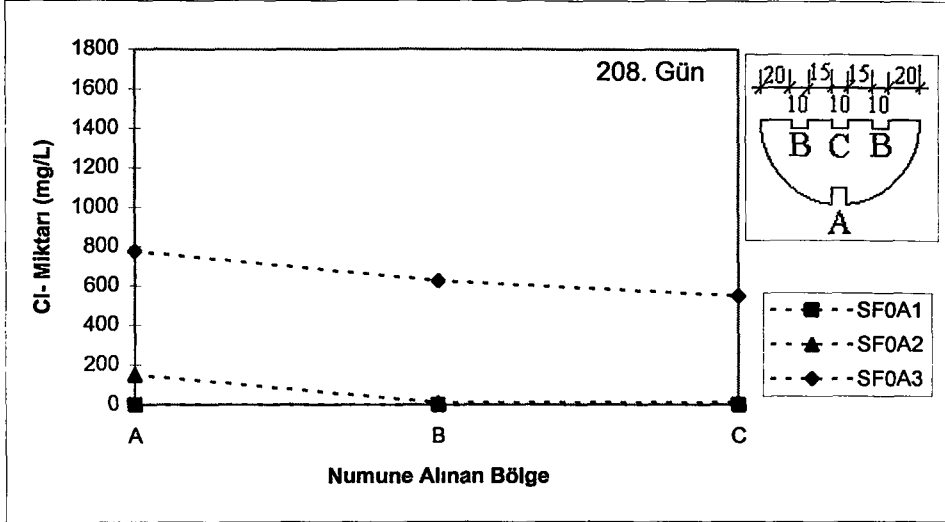
Şekil 4.13a Normal betonda Cl- difüzyonunun derinlikle değişimi



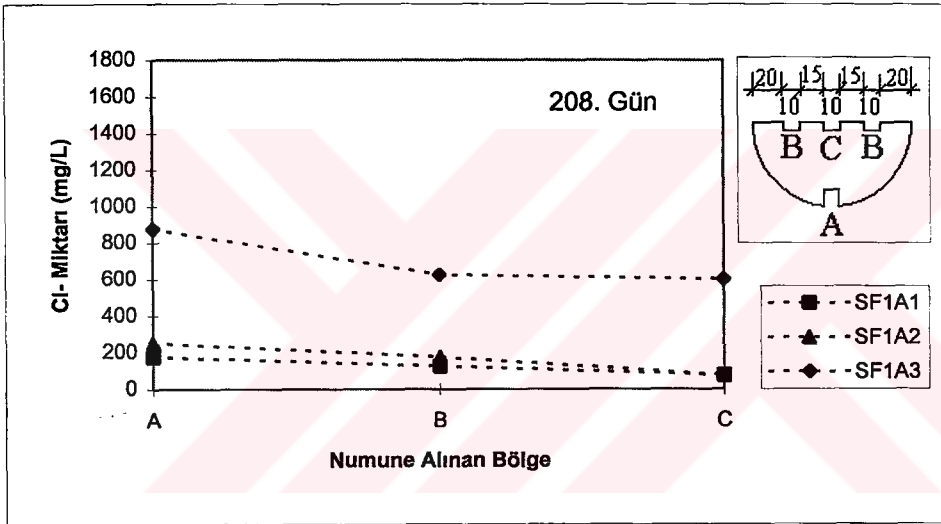
Şekil 4.13b %10 Silis dumanı katkıli betonda Cl- difüzyonunun derinlikle değişimi



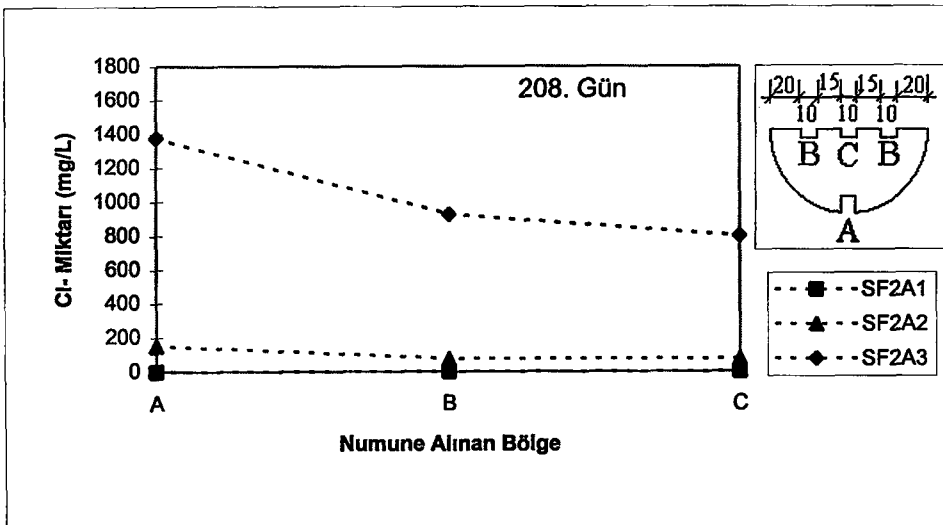
Şekil 4.13c %20 Silis dumanı katkıli betonda Cl- difüzyonunun derinlikle değişimi



Şekil 4.14a Havada bekletilen normal betonda serbest Cl-'nin derinlikle değişimi



Şekil 4.14b %10 silis dumanı katkıli betonda serbest Cl-'nin derinlikle değişimi



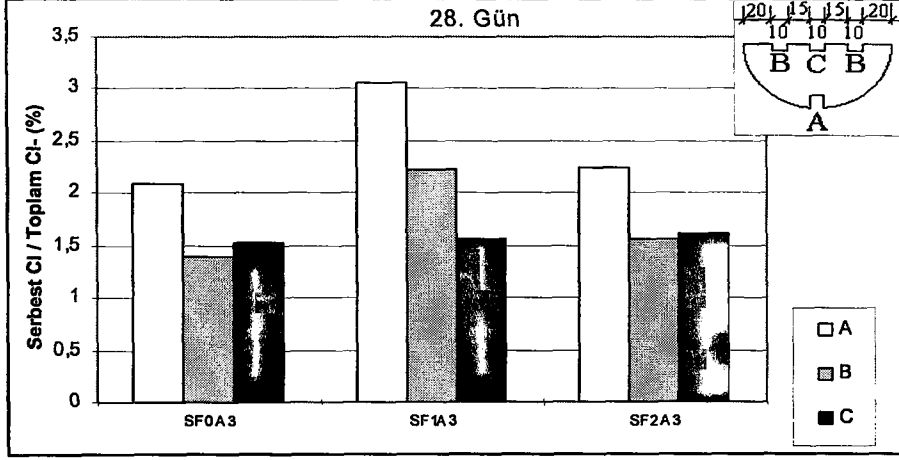
Şekil 4.14c %20 silis dumanı katkıli betonda serbest Cl-'nin derinlikle değişimi

yüksek değerler almıştır. Bu durum, karışıma giren  $Cl^-$  iyonlarının hidratasyon sırasında kimyasal olarak bağlanması ve ortamda daha az miktarda serbest  $Cl^-$  kalması anlamına gelir, donatı korozyonu açısından klorürün dışarıdan difüzyonu daha sakıncalıdır.

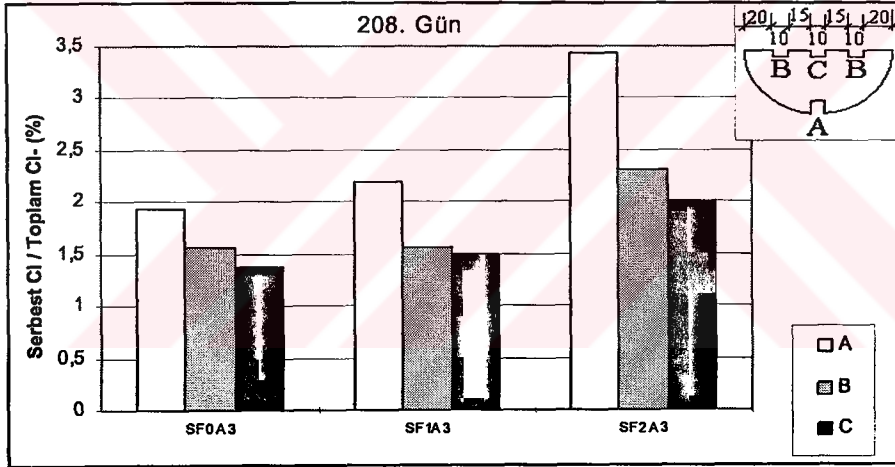
Şekil 4.14b ve Şekil 4.14c'de, karma suyuna klorür katılan sertleşmiş betonun serbest klorür miktarına silis dumanının etkisi gösterilmiştir. Silis dumanı katılan numunelerde serbest  $Cl^-$  miktarı, şahitinkinden daha yüksek değerler almıştır. Bu fark %20 silis dumanı katılan numunelerde 40000 mg/L  $Cl^-$  konsantrasyonu için çok belirgindir. Örneğin 208 gün laboratuvar ortamında bekletilen SF0A3 grubunda serbest  $Cl^-$  miktarı 0-10 mm derinlikte 775 mg/L, aynı derinlikte SF1A3 grubunda 875 mg/L ve SF2A3 grubunda 1375 mg/L'dir. Yüksek konsantrasyonlu çözeltilerde silis dumanı oranının artması ile serbest  $Cl^-$  miktarı artmıştır. Şekil Ek.2'de görüldüğü gibi serbest  $Cl^-$  miktarı, özellikle %20 silis dumanı katkılı betonlarda zamanla da artış göstermiştir.

Yapılan literatür araştırmasında, serbest  $Cl^-$  miktarına silis dumanının etkisi konusunda iki farklı görüşe rastlanmıştır. Bunlardan ilkinde silis dumanının özgül yüzeyinin daha fazla olması nedeni ile, daha çok  $Cl^-$ 'nin adsorbe edileceği, bunun sonucunda boşluk suyuna geçecek serbest  $Cl^-$  miktarının daha az olacağı ifade edilmiştir (Byfors vd., 1986). İkinci görüşte ise, silis dumanının alkaliniteye azalmaya neden olduğu ve pH'daki azalmanın, kalsiyumkloraalüminatın çözünürlüğünü artırdığı, dolayısı ile silis dumanı katkılı betonda ortamdaki serbest klorürün arttığı yönündedir (Mangat ve Molloy, 1995). Bunlardan ilk görüşü destekleyen Byfors vd., %10 silis dumanı katkılı betonun karma suyuna çimento ağırlığının %1'i oranında klorür katarak, 3 ay sonra serbest klorür miktarını araştırmış ve serbest klorürün azaldığını göstermişlerdir. Benzer sonuçlar Şekil Ek.2b,e,g'de görülmüş ancak, 3 aylık süreden sonra (118. gün) %10 silis dumanı katkılı grubun 0-10 mm derinliğinde tekrar artış görülmüştür. %20 silis dumanı katılan numunelerde ise serbest  $Cl^-$  miktarında zamanla ve her derinlikte artış görülmüştür. Rasheeduzzafar vd. (1991), silis dumanının Friedel Tuzunu gittikçe artan bir şekilde ayrıştırdığını ve boşluk suyunda daha fazla serbest  $Cl^-$  oluşturduğunu, DTA (Diferansiyel Termal Analiz) ile de kanıtlamıştır. Farklı derinliklerdeki serbest  $Cl^-$ 'nin, karışıma katılan toplam klorür miktarına oranının

gösterildiği Şekil 4.15a ve Şekil 4.15b’de, bağlı klorür miktarına silis dumanının bu etkisi açıkça görülmektedir.



Şekil 4.15.a Serbest Cl/Toplam Cl oranına silis dumanının etkisi



Şekil 4.15.b Serbest Cl/Toplam Cl oranına silis dumanının etkisi

#### 4.2 Harç Numunelerde Yapılan Deneyler

Silis dumanı oranını, klorür konsantrasyonunun ve kür koşullarının etkileri betondakine paralel olarak, harç fazında da araştırılmıştır. Bu amaçla, mekanik deneylerden basınç ve eğilme, fiziksel deneylerden kılcal su emme ve boy değişimi (rötre ve şişme) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları Çizelge Ek.8-10 ve Şekil 4.16-4.19’da verilmiştir. Bu harç, hızlandırılmış korozyon deneyi için hazırlanan numunelerde, pas payı için de kullanıldığından önem kazanmıştır. Harcın mekanik özellikleri, betonunkine paralellik

gösterdiğinden tekrardan kaçınılmış, sadece boy değişimi ve kılcal su emme özellikleri aşağıda irdelenmiştir.

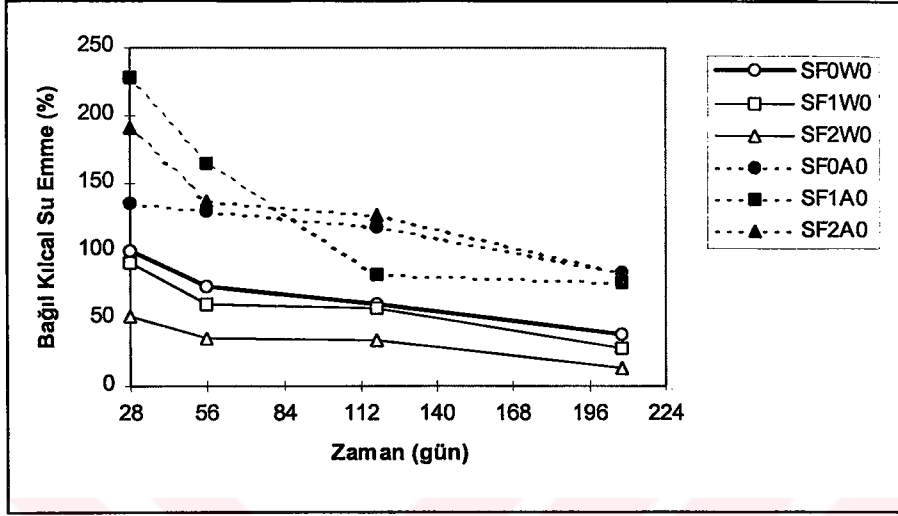
#### 4.2.1 Kılcal su emme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi

Betonun klorür difüzyonunu etkileyen fiziksel özelliklerin başında, geçirimsizlik özelliği gelmektedir. Geçirimsizliğin belirlenmesi amacı ile belirli günlerde kılcal su emme deneyi yapılmış, betonun geçirimsizliğine silis dumanı oranının, klorür konsantrasyonunun, kür koşullarının ve zamanın etkisi incelenmiştir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge Ek.10, Şekil 4.16 ve 4.17’de gösterilerek değerlendirilmiştir.

Suda ve havada bekletilen gruplardan şahit, %10 ve %20 silis dumanı katkılı numunelerin kılcal su emme katsayılarının bağıl değerleri Şekil 4.16’da gösterilmiştir. Şahit ve silis dumanı katkılı harçların kılcallıkla su emmesi, hem havada hem de suda zamanla azalmaktadır. Kalıptan çıkarıldıktan sonra 28. güne kadar havada bekletilen grupların kılcal su emmesi, suda bekletilenlerinkinden daha büyüktür. Örneğin suda bekletilen şahit grubun (SF0W0) kılcal su emme katsayısı  $3.22 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/s iken, havada bekletilen SF0A0 grubununki  $4.35 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/s ile %35 daha büyüktür. Kılcal su emme deney sonuçları basınç dayanımı verileri ile uygunluk göstermekte, dayanım ve dayanıklılık açısından su kürünün önemini bir kez daha vurgulamaktadır.

Harca katılan ve özgül yüzeyi çok yüksek olan silis dumanı, numunelerin suda kür edilmesi şartı ile, harcın kılcal su geçirimsizliğini azaltmaktadır. Kılcal su emme katsayısındaki düşüş, SF1W0 grubunda yaklaşık %10, SF2W0 grubunda %50’dir. Mineral katkıların, betonun dayanıklılığını artıran fonksiyonlarının en önemlisi beton boşluk yapısını iyileştirmesi ve dolayısı ile geçirimsizliği azaltmasıdır (Uyan vd., 1998). Silis dumanı, çok ince taneli olması nedeni ile, çimento hamuru-agrega arayüzü ve çimento hamuru içindeki boşlukları doldurarak, kılcal boşlukların azalmasını sağlar. Silis dumanı katkılı numunelerin havada kür edilmesi, basınç dayanımında olduğu gibi, kılcal su emmeye de olumsuz etki yapmıştır. Zira 208. günde aynı değerlere ulaşmasına rağmen, 28. gündeki kılcal su emme katsayıları, havada bekletilen şahit gruba göre, SF1A0 grubunda yaklaşık

%90, SF2A0 grubunda %56 daha büyüktür. Bu sonuç yüksek performanslı betonlarda, silis dumanı etkinliğinin oluşabilmesi için, sürekli nemli ortamda kür edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Aköz vd., 1997; Ramezianpour ve Malhotra, 1995).



Şekil 4.16 Kılcal su emme katsayısı bağıl değerlerinin zamanla değişimi

Ortamda klorür iyonlarının bulunması durumunda, harç numunelerin kılcal su emme katsayılarındaki değişim Şekil 4.17.a-f'de gösterilmiştir. Silis dumanı katkısız numunelerin kılcal su emme katsayıları klorür etkisinin başlatıldığı günden itibaren, zaman içinde önemli değişiklik göstermemiş, ancak suda bekletilen grubunkinden bir miktar büyük değerler almıştır. Klorürün 180 günlük etki sürecinde, suda bekletilen numunelere göre, SF0W1 grubunda %28, SF0W2 grubunda %55, SF0W3 grubunda ise %40 daha büyüktür. Bu sonuçlar, tuz çözeltisinin etkisinde  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin yıkanıp süzülmesi ve CSH'nın ayrışması sonucu, porozitenin arttığı görüşünü doğrular niteliktedir (Feldman ve Cheng-yi, 1985).

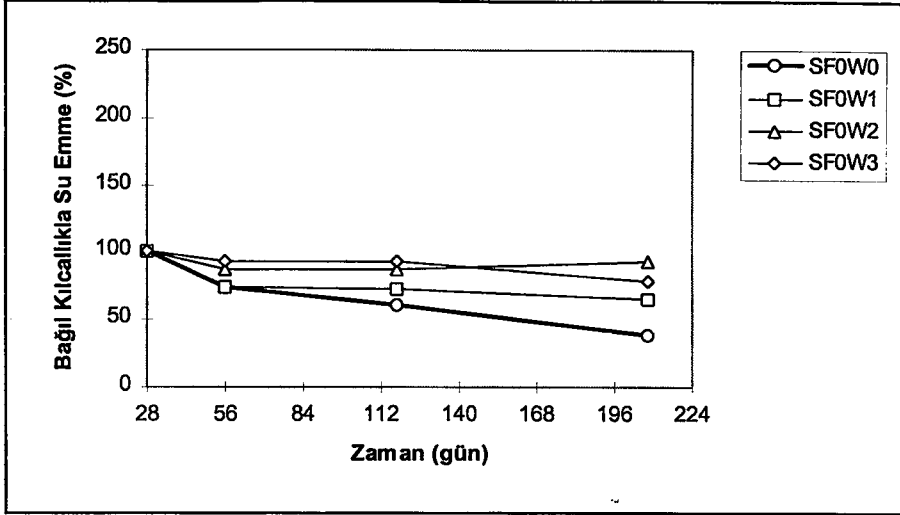
Farklı konsantrasyonlardaki klorür çözeltilerinin difüzyonuna maruz bırakılan %10 silis dumanı katkılı numunelerin, kılcal su emme katsayılarında önemli bir değişim olmamış, konsantrasyon etkisi görülmemiştir (Şekil 4.17.b). Harçlara %20 silis dumanı katılması durumunda, klorür etkisinin başlatıldığı 28. günde %50 daha düşük olan kılcal su emme katsayısı, 180 günlük klorür çözeltisi etkisinde de şahit numunenin altında kalmıştır. Silis

dumanı, mikroskobik boyuta sahip partiküllerinin yüksek özgül yüzey alanı ile betonun permeabilitesini azaltır. Bu partiküller, çimento hidrasyonu sırasında açığa çıkan  $\text{Ca(OH)}_2$  ile reaksiyona girerek kapiler boşluklarda büyük miktardaki kalsiyum silikat hidrate fazını oluşturur. Daha az geçirimsizlik sağlayan silis dumanının bu özelliği, su ve klorür gibi betona nüfuz eden maddelerin azalmasına katkı sağlar (Azari vd.,1993). Bu eğilim, Bölüm 4.1.6'da açıklanan  $\text{Cl}^-$  penetrasyonunda ve Bölüm 4.1.7'de açıklanan  $\text{Cl}^-$  profilinde de açıkça görülmektedir.

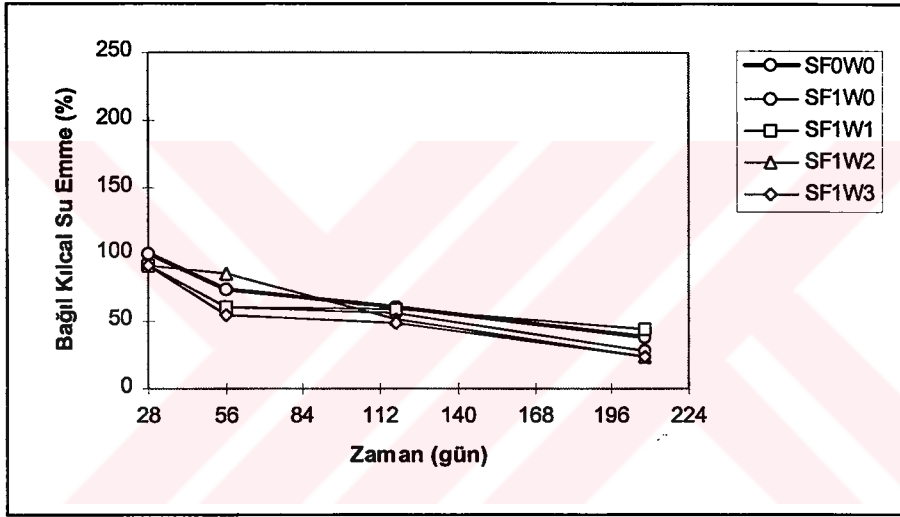
Karma suyuna klorür katılarak havada bekletilen numunelerde kılcal su emme katsayılarındaki değişim, Şekil 4.17.d-f'de gösterilmiştir. Karma suyu olarak kullanılan 10000 ve 40000 mg/L gibi yüksek  $\text{Cl}^-$  konsantrasyonlu çözeltiler Şekil 4.17.d'de görüldüğü gibi, 28. günde kılcal su emme katsayılarını azaltmıştır. Daha sonraki günlerde konsantrasyon farkından bağımsız olarak kılcal geçirimsizlik zamanla artmıştır. Örneğin SF0A3 grubunun kılcal su emme katsayısı 28. günde havada bekletilen şahite oranla %78 daha az iken, 208. günde %132'lik artış ile şahite göre %54'lük büyük değere ulaşmıştır. Silis dumanı katılan numunelerin tümünde benzer eğilim gösteren kılcal geçirimsizlik 118. güne kadar artmış, bugünden itibaren azalmaya başlamıştır. %20 silis dumanı katılan numunelerin klorür iyonları etkisindeki kılcal geçirimsizlikleri, katkısız ve %10 silis dumanı içeren gruplara göre Şekil 4.17.d-f'de görüldüğü gibi daha düşük değerler almıştır.

Kılcal geçirimsizlikteki bu değişim, NaCl etkisi ile oluşan ve hacim artışına neden olan hidrate kalsiyum kloroalüminatın ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) zamanla artışını doğrulamaktadır (Hoffman, 1984; Giergiczny vd., 1995). Başlangıçtaki (28. gün) hacim artışı, gözenekleri tıkayarak kılcal geçirimsizliği azaltmış, ileriki günlerde katı fazda oluşan ince çatlaklar nedeni ile kılcal boşlukların miktarını artırmıştır. Silis dumanının katılması ile başlangıçta düşük olan kılcal geçirimsizliğin zamanla daha da azalması ise, Friedel tuzunun oluşumunda yer alan  $\text{Ca(OH)}_2$ 'nin ortamda daha az bulunma nedeni ile açıklanabilir.

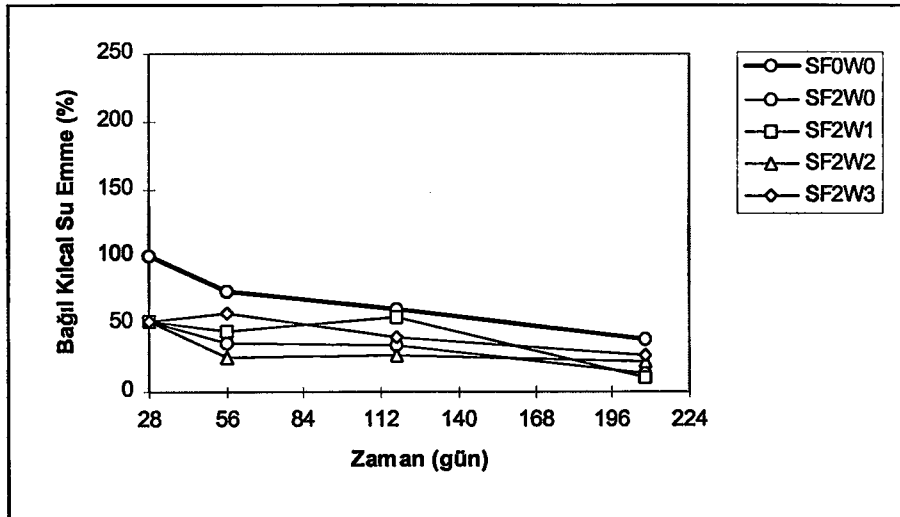




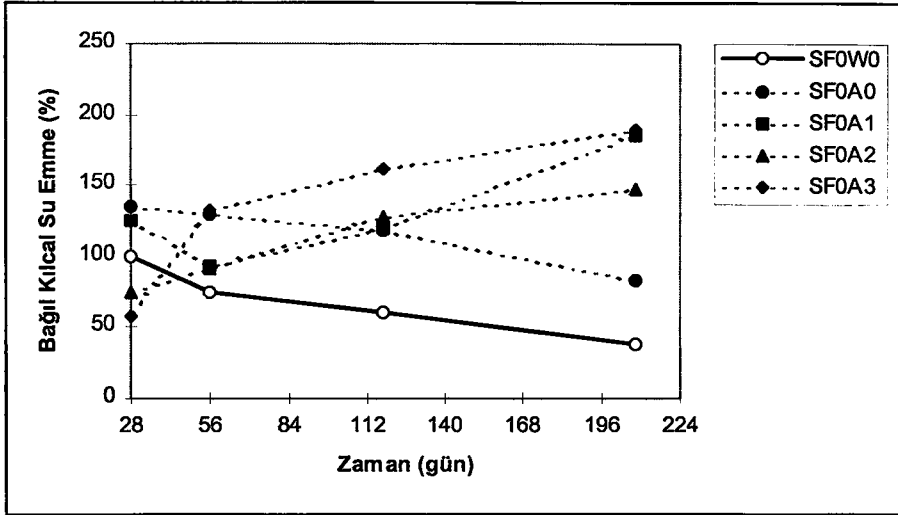
Şekil 4.17.a Çözeltilerde bekletilen şahit grubun (%K-t) ilişkisi



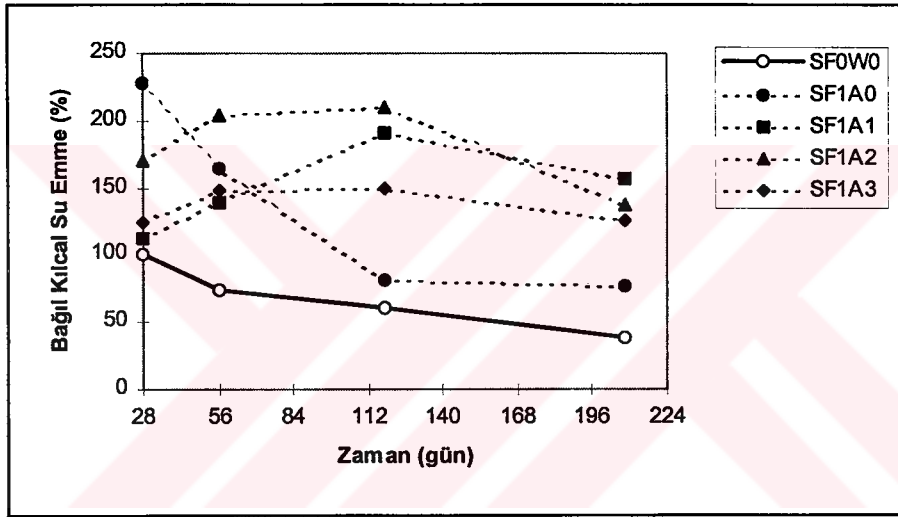
Şekil 4.17.b Çözeltilerde bekletilen %10 silis dumanı katkı grubun (%K-t) ilişkisi



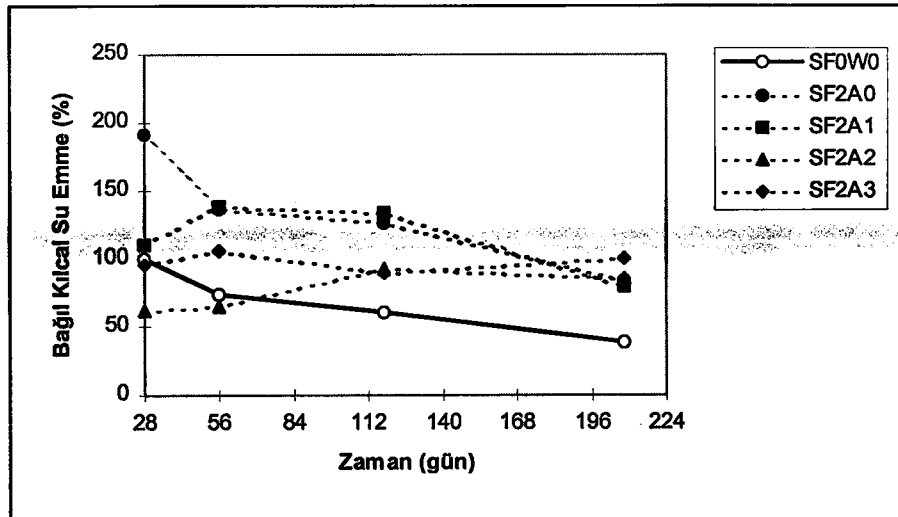
Şekil 4.17.c Çözeltilerde bekletilen %20 silis dumanı katkı grubun (%K-t) ilişkisi



Şekil 4.17.d Havada bekletilen şahit grubun (%K-t) ilişkisi



Şekil 4.17.e Havada bekletilen %10 silis dumanı katkı grubun (%K-t) ilişkisi



Şekil 4.17.f Havada bekletilen %20 silis dumanı katkı grubun (%K-t) ilişkisi

#### 4.2.2 Rötire ve şişme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi

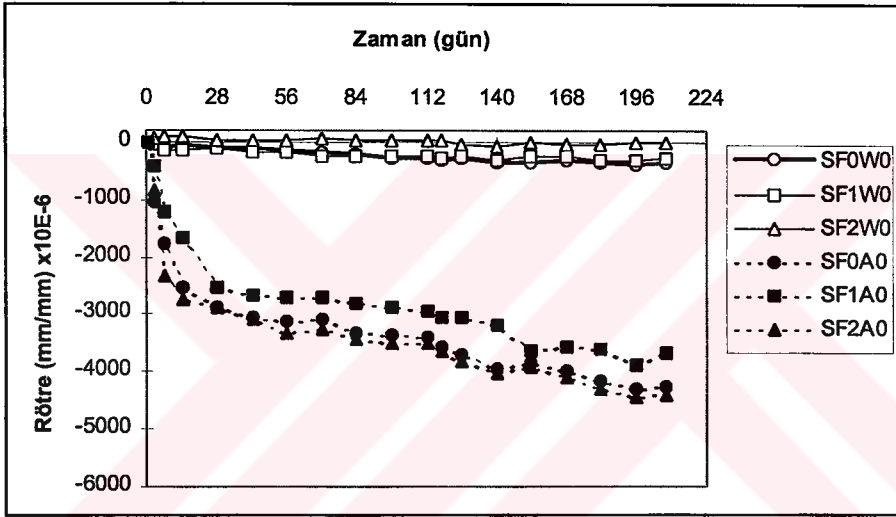
Hızlandırılmış korozyon deneyinin başlatıldığı ilk anlarda, uygulanan dış kaynaklı gerilim (voltaj) nedeni ile numunelerin  $40 \pm 1$  °C sıcaklığa ulaştığı ön deneyler ile belirlenmiştir. Bu sıcaklığın rötreye neden olacağı varsayılarak, rötire ile ilgili araştırma yapılmıştır.

Çimento ile suyun reaksiyona girdiği andan itibaren bünyesel olarak başlayan ve sertleşmiş betonda, betonun kuruması ile süreklilik kazanan hacim değişiklikleri, beton yüzeyinde ve iç kısımlarda çatlamalara neden olur. Bu çatlaklar yapının dayanımında ve durabilitesinde önemli rol oynar. Hacim değişimi çimento hamurunda gerçekleştiği için, boy değişimi harç fazında araştırılır ve bazı matematik ifadelerden yararlanılarak betonun boy değişimi hesaplanır (Neville, 1992). Bu çalışmada harçlardaki boy değişimi silis dumanı oranı, farklı kür koşulları ve klorür etkisi bakımından değerlendirilmiş ve irdelenmiştir.

Şekil 4.18'de, suda ve laboratuvar ortamında havada bekletilen şahit ve silis dumanı katkılı harçların boy değişimleri gösterilmiştir. Sıcaklığı  $20 \pm 3$  °C ve bağıl nemi  $\%65 \pm 5$  olan laboratuvar ortamında bekletilen numunelerde, önemli miktarda büzülme (rötire) görülmektedir. Su içinde bekletilen numunelerde ise, bünyesindeki suyu muhafaza etmesi nedeni ile hacmindeki büzülme çok daha azdır, hatta hacimde genişlemeler (şişme) söz konusudur. Havada bekletilen numunelerin rötresinde ilk 28. güne kadar önemli artışlar olmuş, bugünden sonra kuruma rötresi hızı azalmıştır. Silis dumanının rötire üzerinde çok önemli etkisi olmamıştır. %20 silis dumanı katkılı numuneler şahit ile hemen hemen aynı değerleri alırken, %10 silis dumanı katkılı numunelerde 208. günde %10 daha az rötire görülmüştür.

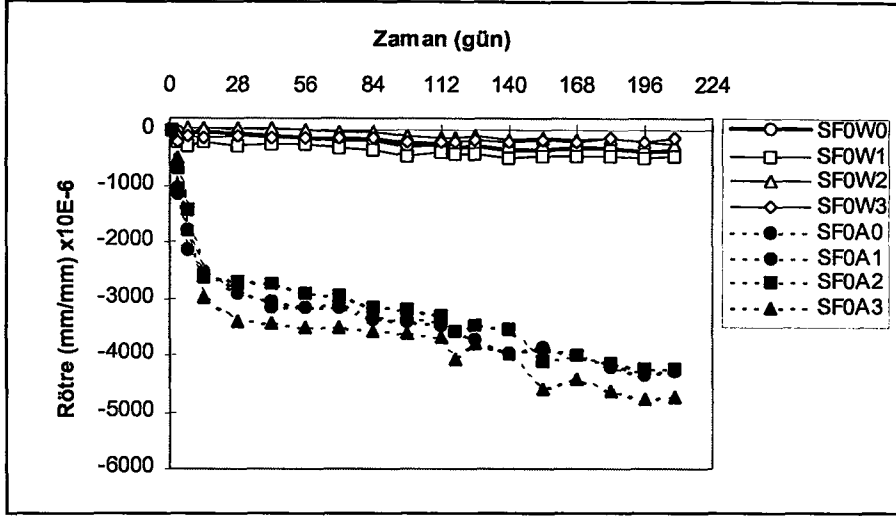
Silis dumanının betonun rötresine etkileri konusunda, Wolsiefer vd (1995) ve Wiegrink ve Marikunte (1996) tarafından yapılan literatür araştırmasında, silis dumanı içeren betonların boşluk yapısının daha ince olması nedeni ile, kuruma rötresinin daha düşük değer alacağı görüşü benimsenmektedir. Oysa literatürde, silis dumanının rötreye etkisi konusunda birbiri ile çelişen görüşlere rastlanmaktadır (Gonçalves, 1992; Khayat ve Aitcin, 1992; Malolepszy ve Deja, 1992). Araştırmacılar erken rötire konusunda ise hemfikirdirler. Bu

çalışmada numunelerin üretimi aşamasında, silis dumanı katkıli betonlarda terleyen su miktarının çok az olduğu gözlenmiştir. Silis dumanı çok ince bir malzeme olduğundan, suyun yüzeye çıkmak için izleyeceği yolları tıkayıcı bir özellik göstermekte; ayrıca suyu adsorbe ettiği için yüzeye çıkabilecek su miktarını azaltmaktadır. Böylece numunelerin yüzeyinden kaçan ve terleyen su miktarı arasındaki fark artmakta, bu da numunelerde erken rötre nedeni ile hacim değişimine yol açmaktadır (Birincioğlu ve Tokyay, 1996). Deneylerde ölçülen rötre, erken rötre ve kuruma rötresinin toplamıdır, Şekil 4.18’de görüldüğü gibi silis dumanı katkıli numuneler ile şahit numuneler arasında farklılık gözlenmemiştir.

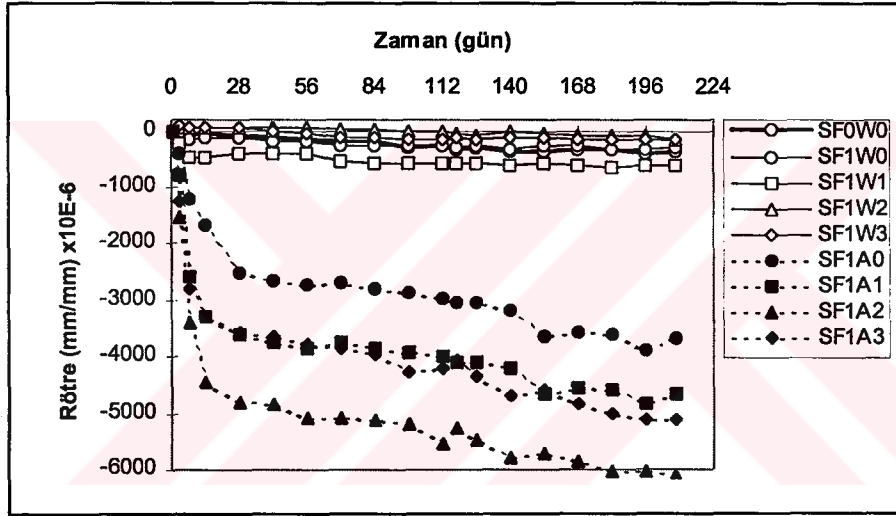


Şekil 4.18 Harçların boy değişimine silis dumanı ve kür koşullarının etkisi

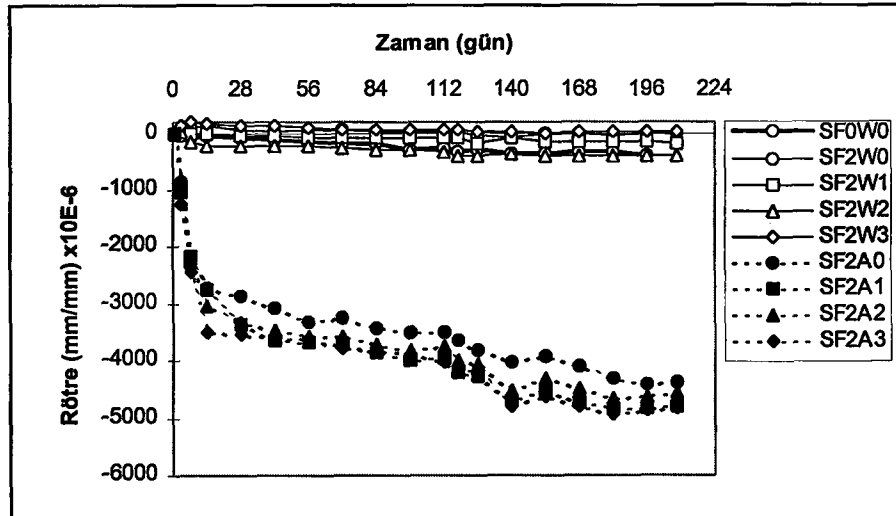
Cl<sup>-</sup> konsantrasyonları farklı çözeltilerin karma suyu olarak kullanıldığı veya bu çözeltilerin difüzyonu sonucunda harç numunelerinin rötresindeki zamanla değişim Şekil 4.19.a-c’de gösterilmiştir. Deneylerden alınan sonuçlara göre, su içinde veya çözeltilerde bekletilen numunelerde, silis dumanı veya klorür konsantrasyonunun belirgin bir etkisi gözlenmemiştir. Rötre değerleri yok denecek kadar azdır. Karma suyuna farklı konsantrasyonlarda Cl<sup>-</sup> katılarak havada bekletilen numunelerde konsantrasyon etkisi görülmemekle birlikte, rötre şahit numuneden daha fazladır. Bu fark %10 silis dumanı katkıli numunelerde daha belirgindir. Örneğin klorür katkısız SF1A0 grubu, 208. günde



Şekil 4.19.a Çözeltilerde ve havada bekletilen şahit grubun ( $\epsilon_r$ -t) ilişkisi



Şekil 4.19.b Çözeltilerde ve havada bekletilen %10 silis dumanı katkılı grubun ( $\epsilon_r$ -t) ilişkisi



Şekil 4.19.c Çözeltilerde ve havada bekletilen %20 silis dumanı katkılı grubun ( $\epsilon_r$ -t) ilişkisi

3684 $\mu$ D\* rötre yaparken, SF1A1 grubu 4646 $\mu$ D, SF1A2 grubu 6091 $\mu$ D ve SF1A3 grubu 5102 $\mu$ D ile Cl<sup>-</sup> katkılı gruplar daha büyük değerler almıştır.

Betona CaCl<sub>2</sub> katılması, imento hamurunda daha ince jel yapıyı oluşturur, ileri yaşlarda karbonatlaşmayı artırır, bunların sonucu olarak CaCl<sub>2</sub> katkı kullanılan betonlarda rötre artar (Neville,1992). Bu alışmada NaCl katkılı numunelerde daha fazla rötre oluşması, CaCl<sub>2</sub>'nin etkisine benzetilebilir. Karbonatlaşma derinliğinin, dolayısı ile karbonatlaşmanın arttığı Bölüm 4.1.5'de görülmektedir.

Hızlandırılmış korozyon deneyinde sıcaklık etkisinin oluşturacağı hacimsel değişikliği araştırmak üzere, yukarıdaki paragraflarda belirtilen numuneler, 40±1 °C sıcaklık ve %65±5 bağlı nemdeki nem kabine yerleştirilmış ve hızlandırılmış korozyon deneyinin sürdürüldüğü 7 gün içinde oluşabilecek rötreyi belirlemek üzere birer gün ara ile boy değişimleri ölçülmüştür. 208 gün havada bekletildikten sonra nem kabine konulan numunelerde 358-568 $\mu$ D arasında değişen Şişme, su ve zeltiiler içinde 208 gün bekletildikten sonra nem kabinde tutulan numunelerde ise 1165-1523 $\mu$ D arasında değişen rötre oluşmuştur. Harçta meydana gelen rötre değeri, Bölüm 4.4.1'de verildiği gibi 300  $\mu$ D'u aştığından çatlamaya neden olacak düzeydedir. Doğaldırki bu rötre değeri, betonda iri agreganın varlığı nedeni ile yaklaşık %60 kadar azalacaktır. Deney setinde strain-gauge ile ölçülen deformasyonlar, korozyonun neden olduğu Şekil değiştirmeler ile rötrenin neden olduğu Şekil değiştirmelerin toplamıdır. Deney sonuçlarına göre, Şekil değiştirmelerin klorür konsantrasyonundan ve silis dumanı kullanımından etkilenmediği, kr koşularından (havada ve suda) etkilendiği görülmüştür.

### 4.3 elik Numunelerde Yapılan Deneylerin Sonuçları

Durabilite deneyleri için hazırlanan numunelerden ve hızlandırılmış korozyon deneylerinin yapıldığı numunelerden, pull-out deneyi ile çıkarılan donatılarda çekme deneyi yapılmıştır. Gerek uzun süreli durabilite deneylerinden, gerekse hızlandırılmış korozyon deneylerinden çıkarılan donatıların akma gerilmesinde, çekme dayanımında ve kopma uzama oranında

---

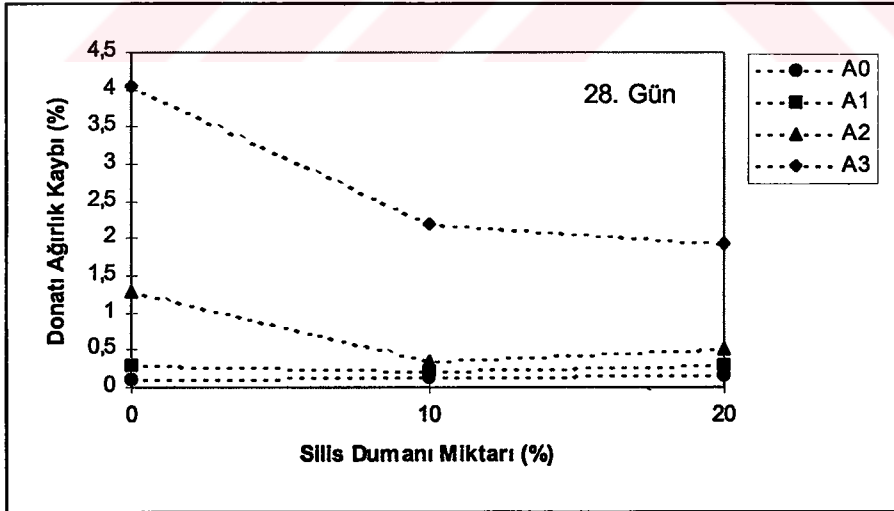
\* 1 $\mu$ D : 10<sup>-6</sup> Deformasyon

değişiklik gözlenmemiş, ağırlık kaybı olduğu belirlenmiştir. Allam vd. (1994) tarafından, 16 ay süre ile Arap Körfezinin doğal atmosfer koşullarında bırakılan çeşitli inşaat çeliklerinde yapılan benzer deneylerde de çeliğin mekanik özelliklerinde değişiklik olmadığı ifade edilmiştir. Doğrudan korozyona maruz çeliğin mekanik özellikleri değişmediğinden, betonun koruyucu etkisi altındaki donatının korozyonunda asıl problem, çeliğin mekanik özelliklerinde değil, korozyon ürününün hacim artışındadır. Bu da donatı korozyon ürününün, hacim artışı nedeni ile betonda yapacağı hasarın ön plana çıkacağını göstermektedir.

Hızlandırılmış korozyon deneyinden sonra numunelerden çıkarılan ve son durumu Şekil Ek.3'de gösterilen çelik numunelerde, betonun çatlamasına neden olan korozyon ürünü, donatıda ağırlık kaybına neden olmuştur. Su ve çözelti içinde bekletilen numunelerin ve 208 gün havada bekletilen numunelerin beton dışında kalan donatı yüzeyi, korozyondan korunması amacı ile antipas tabakası ile kaplanmıştır. Bu nedenle, belirtilen gruplarda ağırlık kaybı deney sonuçları anlamlı olmadığı için burada değerlendirmeye alınmamıştır. Karma suyuna farklı konsantrasyonlarda klorür çözeltisi katılan ve 28 gün havada bekletilen grubun donatıdaki ağırlık kaybı, Şekil 4.20.a silis dumanı oranına göre, Şekil 4.20.b'de klorür konsantrasyonuna göre değerlendirilmiş ve irdelenmiştir.

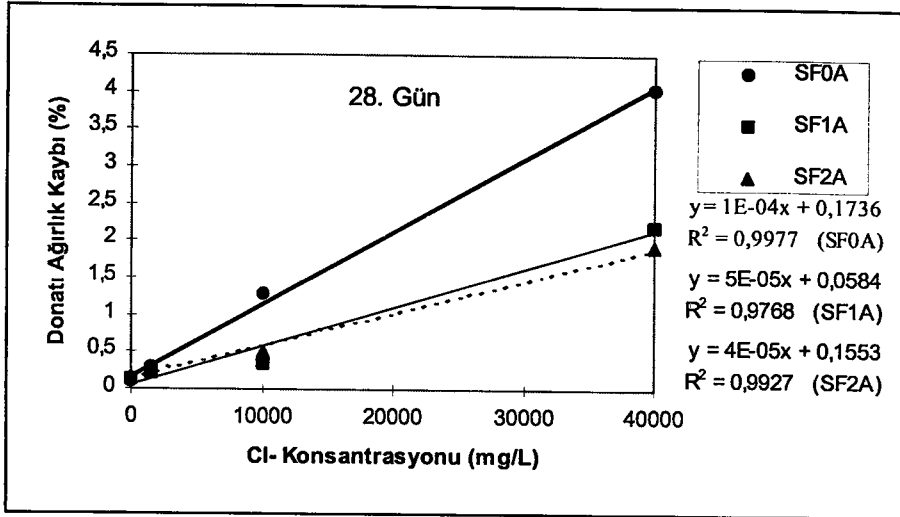
Silis dumanı katkılı numunelerde donatı ağırlık kaybı azalmış (Şekil 4.20.a), karma suyuna katılan  $Cl^-$  konsantrasyonu arttıkça ağırlık kaybı lineer olarak artmıştır (Şekil 4.20.b). En büyük ağırlık kaybı %4 ile, karma suyu olarak 40000 mg/L  $Cl^-$  içeren çözeltinin kullanıldığı SF0A3 grubunda görülmüştür. Betona silis dumanı katılması, donatıdaki ağırlık kaybını azaltmış, ancak silis dumanı oranının etkisi, özellikle düşük  $Cl^-$  konsantrasyonlarında belirgin olarak görülmemiştir. Örneğin %10 silis dumanı kullanılması durumunda ağırlık kaybı %2.2 iken; %20 silis dumanı kullanılması durumunda %1.9'dur. Karma suyu 1500 mg/L klorür içeren numuneler ile şahit numune arasında önemli bir fark görülmemiş; ağırlık kaybındaki fark SF0A2 grubunda %1.4 ve SF0A3 grubunda %4 gibi değerler ile 10000 ve 40000 mg/L  $Cl^-$  konsantrasyonu için belirginleşmiştir.

Donatı ağırlık kaybı bütün gruplarda, ASTM A-615-90 standardında çelik çubuklar için verilen, %6'lık kritik değerin altında kalmıştır. Ancak hızlandırılmış korozyon deneyi sonunda, Şekil 4.20'de gösterilen gruplardan SF0A2, SF0A3, SF1A3 ve SF2A3 gruplarına ait donatıların korozyonu, beton numunelerin çatlamasına neden olmuştur (Şekil 4.26). Bu sonuç, çelik çubuklar için verilen %6'lık sınır değerin, donatı için kullanılmayacağını açıkça göstermektedir. Bu çalışmadaki deney sonuçlarına göre; donatıdaki ağırlık kaybı %0.5'in altında kalan betonarme numunelerde çatlak görülmemiş olması, bu değerin üzerinde çıkan numunelerde ise önemli oranda hasar oluşması; donatı ağırlık kaybı için %0.5 değerinin sınır değer olarak kabul edilebileceğini göstermektedir. Bu değer donatı çapındaki 50  $\mu$ 'luk kayıptan daha az bir değere karşı gelmesine rağmen, betonu çatlatmak için yeterli olmuştur. Gonzalez vd. (1995b) de çaptaki yaklaşık 10-50  $\mu$ 'luk kaybın beton yüzeyinde 0.1 mm genişliğinde çatlığa neden olacağını belirtmişlerdir. Çeliğin mekanik özellikleri ve betonarmedeki kesit kontrolü bakımından dikkate alınmayacak düzeyde olan bu kayıp, önemli hasara neden olmakta ve elemanın servis ömrünü azaltmaktadır.



Şekil 4.20.a Donatı ağırlık kaybına silis dumanı oranının etkisi





Şekil 4.20.b Donatı ağırlık kaybına klorür konsantrasyonunun etkisi

#### 4.4 Betonarme Numunelerde Yapılan Deneyler

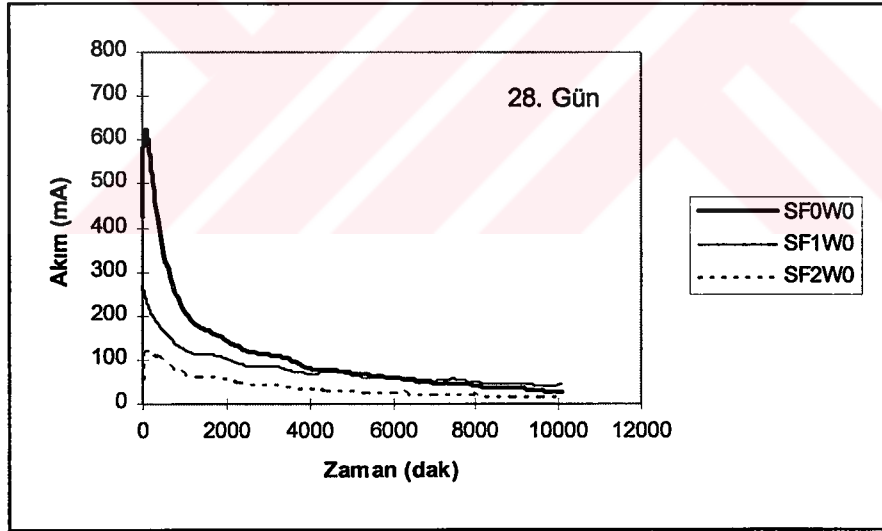
Betonarme numunelerde donatının korozyonu nedeni ile oluşan hasarların değerlendirilmesi amacı ile, donatı yüzeyindeki elektrokimyasal değişimler ve donatı-beton arayüzündeki etkileşimler araştırılmıştır. Donatı korozyonunun betonda neden olacağı değişimleri tespit etmek amacı ile, bu çalışma kapsamında geliştirilmiş olan Şekil 3.1'deki deney düzeneği ile hızlandırılmış korozyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Sabit aderans gerilmesi ve sabit gerilim (voltaj) uygulanan sistemdeki beton numune yüzeyinde yatay ve düşey deformasyonlar, beton içinden geçen akım şiddeti, zamana bağlı olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

Sistemde ölçülen akım şiddeti ve deformasyonlar, klorür konsantrasyonu, silis dumanı oranı ve kür koşullarına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Hızlandırılmış ve hızlandırılmamış deney gruplarındaki donatının yarı hücre potansiyelindeki ve aderans dayanımındaki değişimler de aynı koşullara bağlı olarak değerlendirilmiş ve irdelenmiştir.

##### 4.4.1 Hızlandırılmış korozyon deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi

Korozyon nedeni ile betonarmenin hasarına yol açan temel problem, çeliğin mekanik dayanımındaki azalma değil, korozyon ürününün hacim artışının betonda neden olduğu çekme gerilmelerini, betonun çok sınırlı olan plastik deformasyonunun karşılayamaması ve betonun çatlamasıdır (Cabrera, 1996). Korozyon hasarını etkileyen en önemli parametrelerden biri betonun elektriksel iletkenliğidir. Bu bölümde zamanla beton içinden geçen akım miktarı ölçülerek, farklı beton karışımlarının performanslarının karşılaştırılması sağlanmıştır. Pas ürününün oluşturduğu hacim artışı nedeni ile beton yüzeyinde meydana gelen deformasyonların ve bunun sonucunda oluşan çatlağın süresi, strain-gauge yardımı ile belirlenmiştir. Deney setinin görünüşü ve çatlayan numunelere bir örnek Şekil Ek.4.a-b'de görülmektedir. Akım şiddeti-zaman ve deformasyon-zaman ilişkilerine ait deney sonuçları, klorür konsantrasyonu, silis dumanı oranı ve kür koşullarına bağlı olarak Şekil 4.21-4.29 ve Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

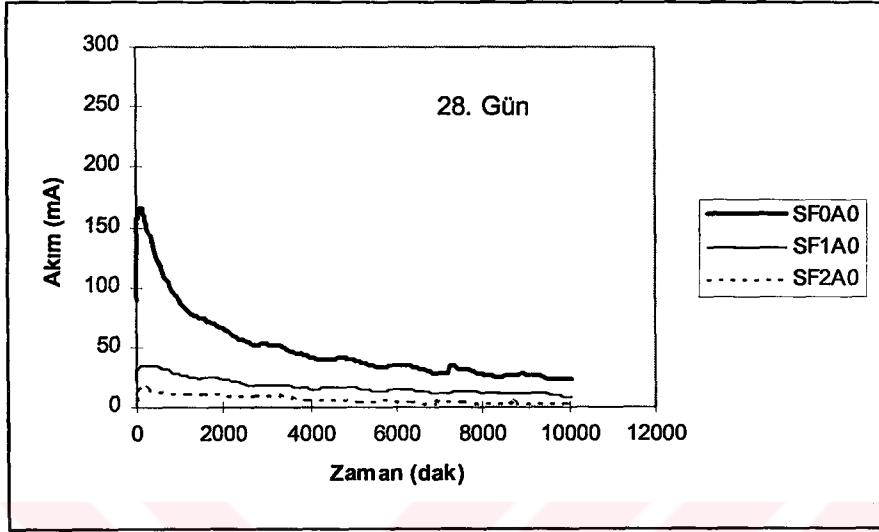
Şekil 4.21.a'da 27 gün suda 1 gün de havada bekletildikten sonra hızlandırılmış korozyon deneyi uygulanan, şahit, %10 ve %20 silis dumanı katkılı betonun içinden geçen akım şiddetinin zamanla değişimi gösterilmiştir. İlk dakikalarda akım şiddetinde hızlı bir artış kaydedilmiştir. Akım şiddetindeki bu artış, şahit numunede (SF0W0) 600 mA'i geçerken, %10 silis dumanı katkılı betonda (SF1W0) 250 mA'e, %20 silis dumanı katkılı betonda (SF2W0) ancak 120 mA'e ulaşabilmiştir. Khedr ve Idriss (1995), deneyin başlangıcında akım şiddetindeki bu artışı, beton içindeki suyun oksijen ve hidroksil iyonlarına ayrışmasına ve ortamdaki elektron akışına bağlamıştır. Bölüm 3.4.4, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi, betonda ölçülen sıcaklık değişimine paralel olarak, zamanla kuruyan betonun elektriksel direnci artmış ve akım şiddeti azalmıştır. Akım şiddetinin değeri 7. günün sonunda tüm gruplarda hemen hemen 0 mA'e inmiştir. Silis dumanı katkılı betonlardan geçen akımın başlangıçta şahitinkinden daha az olması, silis dumanının donatı korozyonuna karşı betonun koruyuculuk özelliğini iyileştirdiğinin bir göstergesidir (Şekil 4.21.a).



Şekil 4.21.a Suda 28 gün bekletilen numunelerde (i-t) ilişkisi.

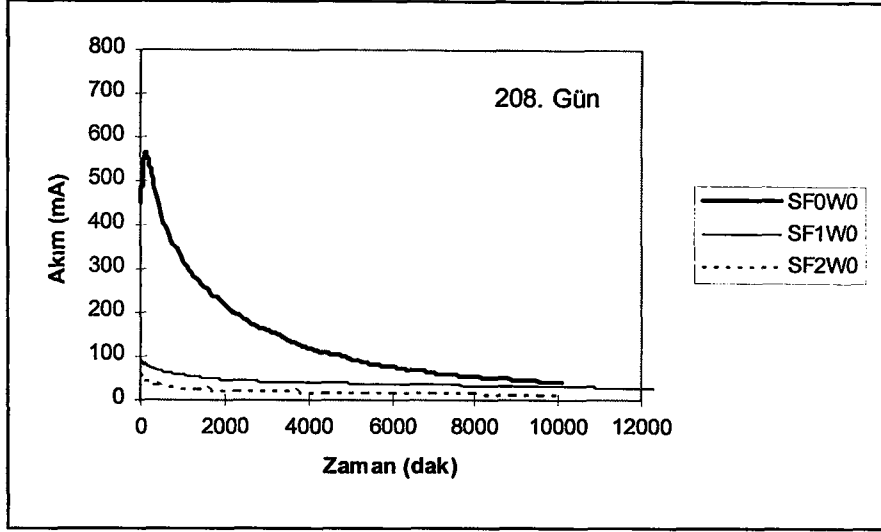
Silis dumanı içeren betonların elektriksel direncinin normal betonlardan daha yüksek değer aldığı; silis dumanının korozyon akım yoğunluğunu azaltarak korozyona karşı betonun koruyuculuk özelliğini artırdığı, bazı araştırmacılar tarafından da deneysel olarak gösterilmiştir (Angi vd., 1991; Lorentz ve French, 1995; Wiens vd., 1995). Silis dumanının bu olumlu etkisi, 28 gün laboratuvar ortamında havada bekletilen betonlarda da

görülmüştür (Şekil 4.21.b). Silis dumanı katkılı ve katkısız tüm gruplarda, suda bekletilen numunelere göre, havada bekletilen numunelerin akım şiddetinin daha düşük değerlerde kalması, betonun kuruması nedeni ile elektriksel direncindeki artışa bağlanabilir.

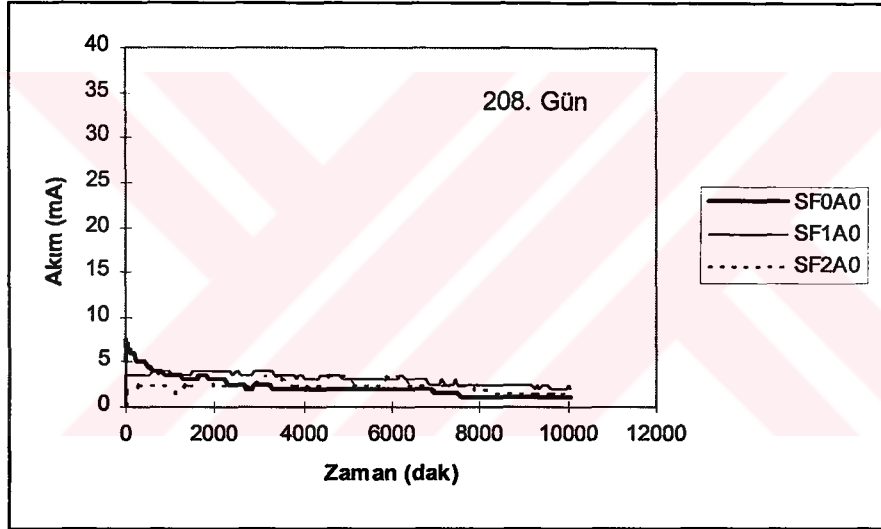


Şekil 4.21.b Havada 28 gün bekletilen numunelerde (i-t) ilişkisi

Suda ve havada 208. güne kadar bekletilen grupların hızlandırılmış korozyon deneyi sonuçları Şekil 4.22.a ve 4.22.b'de gösterilmiştir. Bu gruplardaki hızlandırılmış korozyon deneyi sonuçlarından, akım şiddetinin beton yaşının ve silis dumanı oranının artması ile azaldığı görülmektedir. 208. güne kadar suda kür edilen numunelerin iletkenliği 28. güne kadar suda kür edilenlerinkinden daha azdır. Örneğin, şahit grubun 28. gündeki akım şiddetinin en yüksek değeri 620 mA iken, 208. gündeki değeri 570 mA'dir. Silis dumanı katılı numunelerde ise %10 katkılının 28. gündeki akım şiddeti 250 mA, 208. gündeki 100 mA; %20 katkılının 28. gündeki 120 mA, 208. gündeki 50 mA değerindedir. Akım şiddetinin 208. günde daha az olması boşluk suyundaki iyonların azalmasına yani hidratasyonun ilerlemiş olmasına bağlanabilir. Aynı günde silis dumanı katkılı grupların akım şiddetindeki düşüşün daha çok olması, silis dumanının serbest kireci bağlamasının ve OH<sup>-</sup> iyonu miktarını azaltmasının bir sonucu olabilir. Beton yaşının iletkenliğe etkisi 208. güne kadar havada bekletilen grupta daha belirgin olarak görülmüştür. Çünkü, 28. günde ölçülen en büyük akım şiddeti değeri 170 mA'e ulaşmış iken, 208. güne kadar havada bekletilen grupta ölçülen en büyük akım şiddeti değeri 10 mA'i geçmemiştir.



Şekil 4.22.a Suda 208 gün bekletilen numunelerde (i-t) ilişkisi

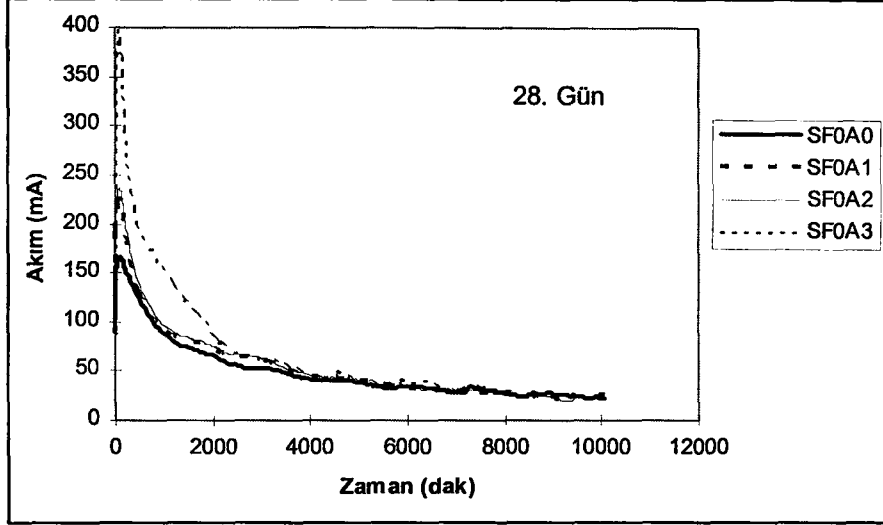


Şekil 4.22.b Havada 208 gün bekletilen numunelerde (i-t) ilişkisi

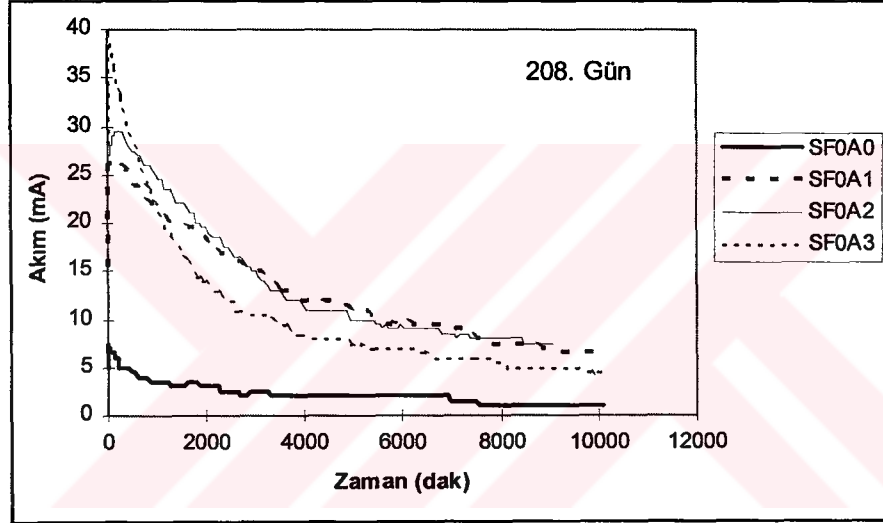
Karma suyuna farklı konsantrasyonlarda klorür katılarak üretilen ve 28 gün havada bekletilen grupların hızlandırılmış korozyon deneyi sonuçları Şekil 4.23.a'da, 208 gün havada bekletilen grupları ise Şekil 4.23.b'de gösterilmiştir. Havada bekletilen gruplarda, deneyin başlatıldığı ilk dakikalarda  $Cl^-$  içeren numunelerden geçen akım yüksek değerler almış, konsantrasyon artışı akım şiddetini önemli oranda etkilememiştir. Karışıma klorür katılması, betonun daha fazla nem tutmasına neden olacağı için, erken yaşlarda elektriksel direnci düşen betonun koruyuculuğu azalacak, donatının korozyon riski

artacaktır (Mehta, 1986). Zaman içinde klorürün bağlanması ve betonun kuruması iletkenliğin azalmasına neden olur. Örneğin bu çalışmada, 28. günde deneyin başlangıcında 300 mA'e ulaşan akım şiddeti, 208 günlük süreçte betonun kurumasına paralel olarak, 40000 mg/L gibi yüksek  $Cl^-$  konsantrasyonunun etkisinde bile 40 mA'i geçmemiştir.

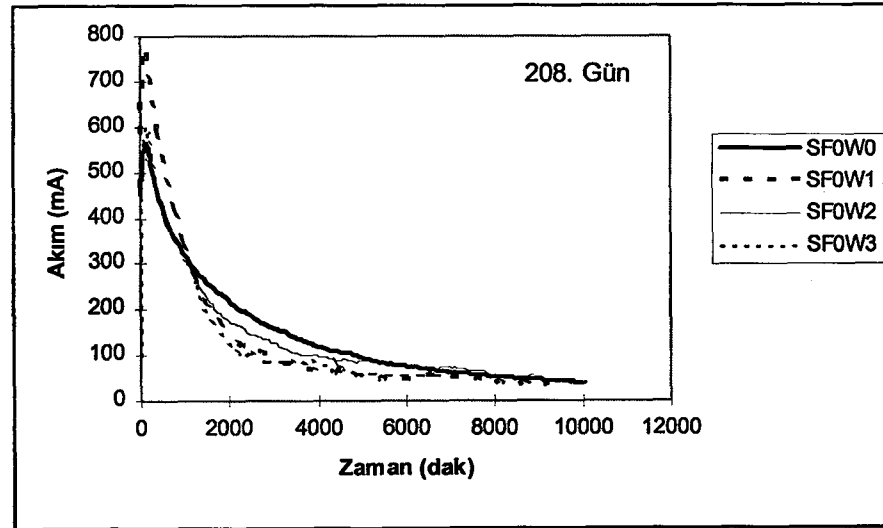
Farklı klorür konsantrasyonlarındaki çözeltilerde 208 gün bekletilen şahit grubun hızlandırılmış korozyon deneyinde ölçülen akım şiddeti-zaman değişimi Şekil 4.23.c'de gösterilmiştir. Ortamda bulunan serbest  $Cl^-$  iyonlarının elektriği daha kolay iletmesi, betonun iletkenliğinin artmasına ve akım şiddetinin daha büyük değer almasına neden olmuştur. Ancak akım şiddeti ile  $Cl^-$  konsantrasyonu arasında anlamlı bir ilişki gözlenmemiştir. Bu olay, Şekil 3.1'de görülen numunede katot oluşturmak üzere yerleştirilmiş olan yarı silindir biçimindeki sac elemanın  $Cl^-$  difüzyonunu önlemesine, iyonların bu bölgede birikmiş olmasına bağlanabilir. Çünkü, klorür penetrasyon derinliğinin belirlendiği beton numunelerde ve  $Cl^-$  profilinin çıkarıldığı deneylerde konsantrasyon etkisi açıkça görülmüştür.



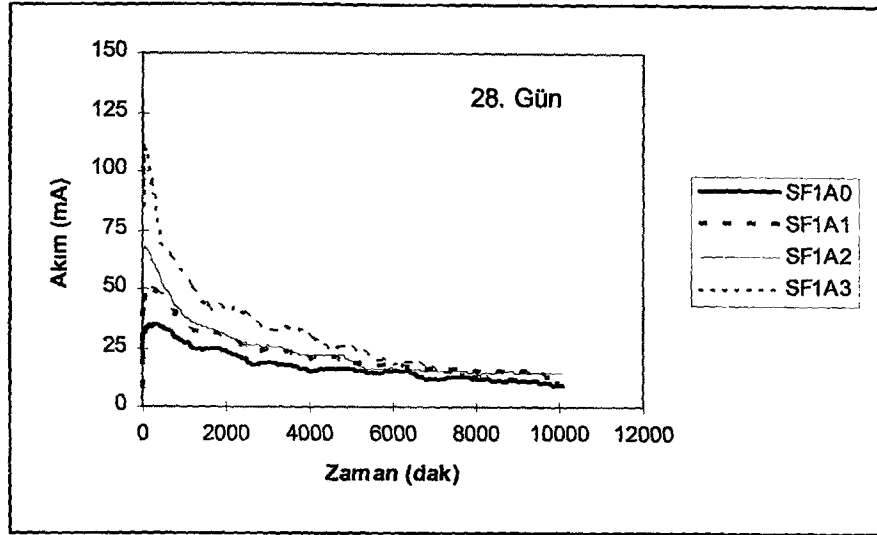
Şekil 4.23.a Havada 28gün bekletilen numunelerin (i-t) ilişkisine  $Cl^-$  etkisi



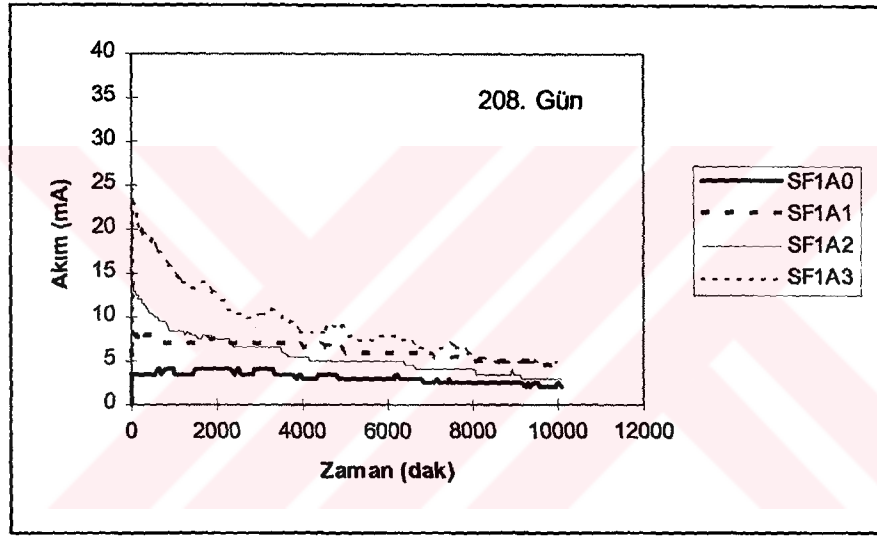
Şekil 4.23.b Havada 208gün bekletilen numunelerin (i-t) ilişkisine  $Cl^-$  etkisi



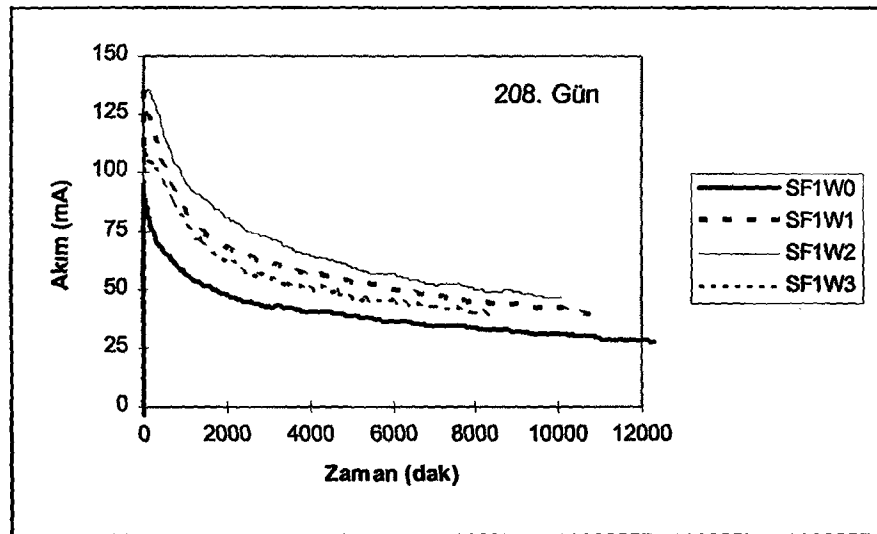
Şekil 4.23.c Suda 208 gün bekletilen numunelerin (i-t) ilişkisine  $Cl^-$  etkisi



Şekil 4.24.a %10 silis dumanı katkılı numunelerin (i-t) ilişkisine  $Cl^-$  etkisi

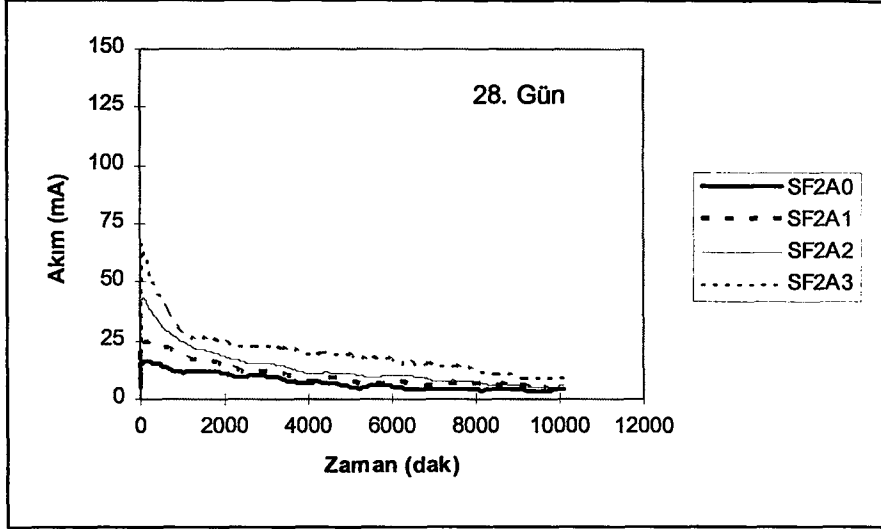


Şekil 4.24.b %10 silis dumanı katkılı numunelerin (i-t) ilişkisine  $Cl^-$  etkisi

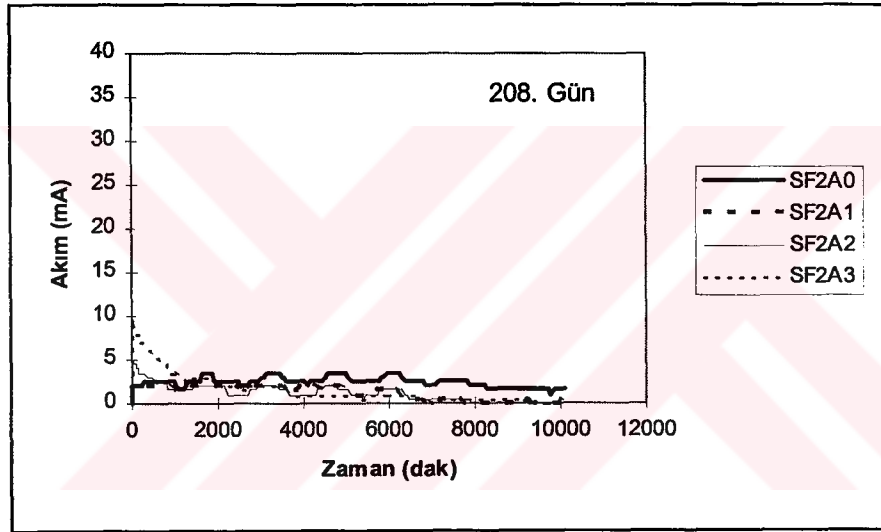


Şekil 4.24.c %10 silis dumanı katkılı numunelerin (i-t) ilişkisine  $Cl^-$  etkisi

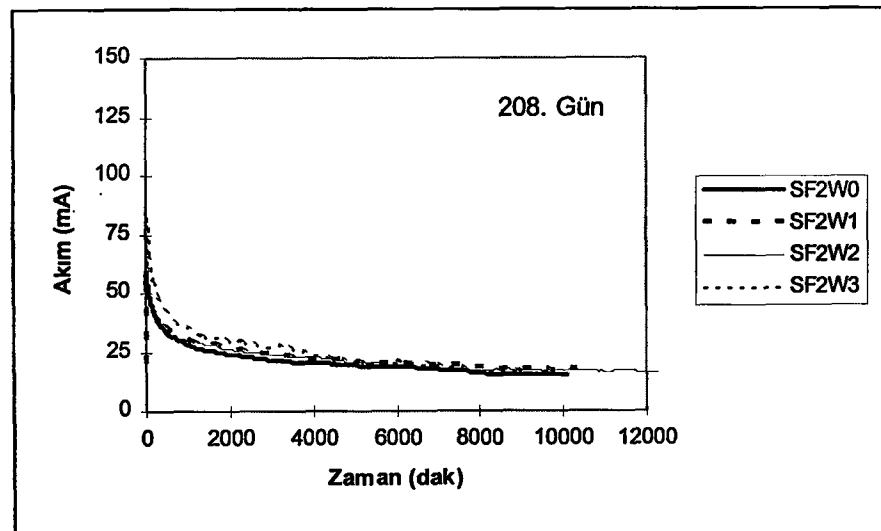




Şekil 4.25.a %20 silis dumani katkılı numunelerin (i-t) ilişkisine  $Cl^-$  etkisi



Şekil 4.25.b %20 silis dumani katkılı numunelerin (i-t) ilişkisine  $Cl^-$  etkisi



Şekil 4.25.c %20 silis dumani katkılı numunelerin (i-t) ilişkisine  $Cl^-$  etkisi

Karma suyunda klorür bulunan silis dumanı katkılı numunelerde, hızlandırılmış korozyon deneyi sonuçları Şekil 4.24-4.25'de gösterilmiştir. Bu gruplarda klorür konsantrasyonu arttıkça, 28 günlük numunelerden geçen akım miktarı da artmıştır. Silis dumanı miktarı %10'dan %20'ye çıkarıldığında, akım şiddeti yaklaşık %50 azalmıştır. Benzer sonuçlar 208 günlük numuneler için de söylenebilir. 208 günlük sürede betonun kurumması ile, %10 silis dumanı katkılı numunelerde akım şiddeti 25 mA'in, %20 silis dumanı katkılı numunelerde 10 mA'in üzerine çıkmamış, 28 günlüklerden daha düşük değerler almıştır. Bölüm 4.1.7'de açıklandığı ve Şekil Ek.2.c'de görüldüğü gibi, %20 silis dumanı katkılı grubun 208. günündeki  $Cl^-$  miktarı daha fazla olmasına karşın, akım şiddeti daha düşük değerde kalmıştır. Bu grupta düşük akım şiddetinde bile beton yüzeyinde korozyondan dolayı çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir. Bu olay  $Cl^-$ 'nin betondan çok donatıya etki ettiği görüşünü doğrulamaktadır (Kaushik ve Islam,1995).

Klorürlü çözeltilerin dışarıdan difüzyonunda ise, silis dumanının betonun geçirimsizliğini artırması nedeni ile akım şiddetinde şahite göre azalma olmuştur (Şekil 4.24.c, 4.25.c). %10 silis dumanı katkılı numunelerde,  $Cl^-$  etkisi ile akım şiddetinde şahite göre yaklaşık 20 mA gibi çok az artış olurken, %20 silis dumanı katkılı numunelerde  $Cl^-$  etkisi yok denecek kadar az olmuş, bu grupta akım şiddeti en çok 75 mA'e ulaşmıştır.

Hızlandırılmış korozyon deneylerinde ölçülen akım şiddetinin zamanla ve silis dumanı oranı ile azaldığı görülmektedir. Betonun kurumması ile elektriksel direncindeki artış ve silis dumanının elektriksel iletkenliği azaltması, bu sonuçları belirleyen önemli parametrelerdir. Ortamda klorürün bulunması, akım şiddetinin düşük değerlerinde bile, donatının korozyona uğramasına ve betonun daha kısa sürede çatlamasına neden olmaktadır. Bu nedenle, hızlandırılmış korozyon deneylerinde, sadece akım şiddetinin ölçülmesi yeterli değildir. Bu amaçla, Şekil 3.1'de verilen deney setinde, numunelerin yan yüzeylerine yapıştırılan strain-gauge'ler yardımı ile, donatı korozyonunun betonda oluşturduğu yatay ve düşey deformasyonlar ( $\mu D$ ) belirli aralıklarla ölçülmüş ve sürekli kaydedilmiştir. Gevrek bir malzeme olan betonun çekme mukavemeti, basınç mukavemetinin 1/8 ile 1/14'ü arasında değişir. Basınç etkisindeki kısılma oranı en çok 2000-4000  $\mu D$  değerini alırken, çekmede kopma uzama oranı ~300  $\mu D$  mertebesindedir (Akman, 1992a). Çok

kısıtlı çekme dayanımı ve çekmede kopma uzama oranının sınırlı değeri nedeni ile korozyon ürününün hacim artışı sonucu, betonun çatlaması kaçınılmazdır.

Betonda oluşan çekme gerilmelerinin, betonun yapabileceği plastik deformasyonun sınırını aşması sonucu, donatıya paralel doğrultuda çatlak oluşmuştur. Numune içine yerleştirilen ve katod görevi alan yarım silindir biçimindeki sac elemanlar yardımı ile, çatlağın yeri önceden yönlendirilmiştir. Çatlağın oluşması ve gelişmesi yatay deformasyonlardan izlenmiştir. Beton yüzeyinde oluşan çatlak, strain-gauge'nin 20000  $\mu$ D olan limit değerini zorlaması sonucu, deformasyon-zaman grafiğinde bir pik oluşmuştur. Pikin oluştuğu süreden 1 saat öncesi kritik çatlama süresi olarak kabul edilmiş, kritik çatlama süresi 1 saatlik duyarlılıkla belirlenebilmiştir. Hızlandırılmış korozyon deneyi sonuçları toplu olarak Çizelge 4.1 ve Şekil 4.26'da, kritik çatlama süreleri strain-gauge ile belirlenen gruplara ait deformasyon-zaman grafikleri de Şekil 4.27-4.29'da gösterilmiştir.

Hızlandırılmış korozyon deneylerinde sabit gerilim altında, akım şiddetinin ölçülmesinin yeterli olmadığı, Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi, 2 mA gibi çok düşük akımlarda bile donatı korozyonu nedeni ile betonda çatlak oluşmasından görülmektedir. Bu nedenle çatlağın oluştuğu anın tespiti için deformasyonların zamana bağlı olarak ölçülmesi gerekmiştir. Hızlandırılmış korozyon deneyi her grup için en çok 7 gün sürdürülmüştür. Sadece %10 silis dumanı katkılı gruptan 3 numune 7 gün sonunda, özdeş bir diğer deney setine yerleştirilmiş, akım şiddeti ve deformasyonların dijital olarak ölçülmesine bir yıl süre ile devam edilmiştir.

Şekil 4.27'de 208 gün suda bekletilen numunelerde, hızlandırılmış korozyon deneyi ile ölçülen deformasyon-zaman ilişkisi gösterilmektedir. Şahit numunede (SF0W0) donatı korozyonu nedeni ile oluşan deformasyonda, ilk 150 dakikadan başlayarak hızlı bir artış meydana gelmiş ve 780. dakikada oluşan gerilmeler betonun çekme dayanımını aşmış, donatıya paralel doğrultuda çatlak oluşmuştur. %10 ve %20 silis dumanı katkılı numunelerde (SF1W0, SF2W0), 7 gün sürdürülen hızlandırılmış korozyon deneyi sonunda akım şiddeti 10 mA'in altına düşmüş, çatlak gözlenmemiştir. Bu grubun %10 silis dumanı katkılı numunelerinde bir yıl süre ile yapılan ölçümler sonucunda da çatlak oluşmamıştır.

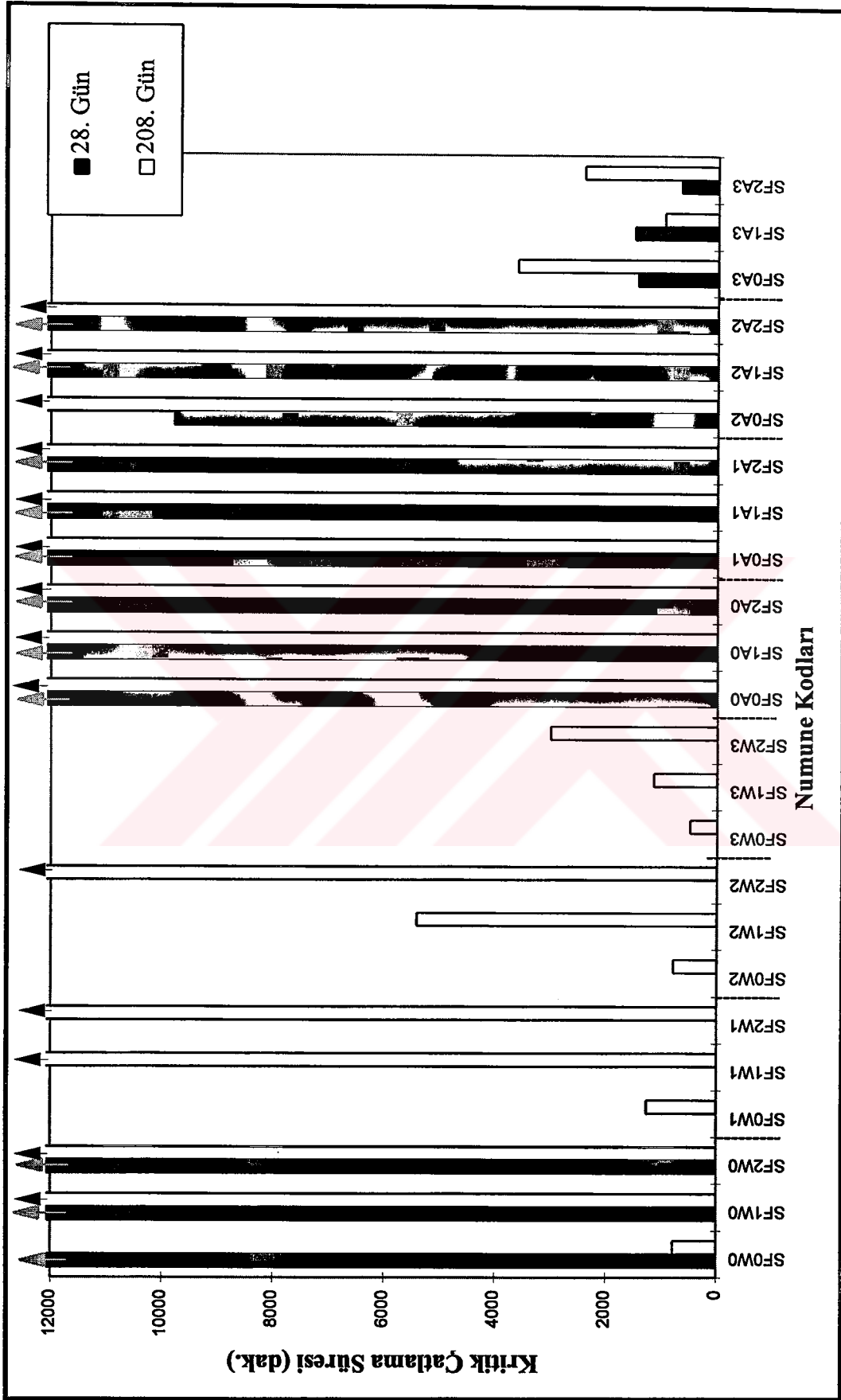
Çizelge 4.1 Hızlandırılmış korozyon deneylerinde çatlak oluştuğu kritik süre ve o andaki akım şiddeti

Numune Kodları	Akım Şiddeti (mA)		Kritik Süre (dak)	
	208.Günde	28.Günde	208.Günde	28.Günde
SF0W0	**	780	**	780
SF1W0	**	*	*	**
SF2W0	*	*	*	*
SF0W1	-	1260	-	1260
SF1W1	-	**	-	**
SF2W1	-	*	-	*
SF0W2	-	780	-	780
SF1W2	-	5400	-	5400
SF2W2	-	*	-	*
SF0W3	-	480	-	480
SF1W3	-	1140	-	1140
SF2W3	-	3000	-	3000
SF0A0	*	*	*	*
SF1A0	*	*	*	*
SF2A0	*	*	*	*
SF0A1	*	*	*	*
SF1A1	*	*	*	*
SF2A1	*	*	*	*
SF0A2	9780	*	9780	*
SF1A2	**	*	**	*
SF2A2	**	*	**	*
SF0A3	1440	3600	1440	3600
SF1A3	1500	960	1500	960
SF2A3	690	2400	690	2400

- : Çözeltilerde bekletilen numuneler 28 gün suda kür edildiği için, hızlandırılmış korozyon deneyi sadece SF0W0, SF1W0 ve SF2W0 gruplarında yapılmıştır

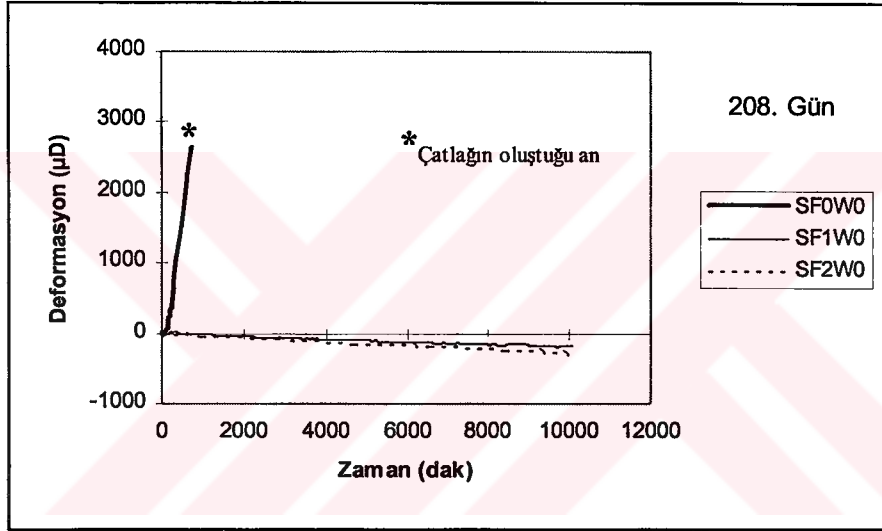
\* : Çatlak yok

\*\* : Çatlak var, ancak starin-gauge'ye ulaşmamıştır.



Şekil 4.26 Hızlandırılmış korozyon deneylerinde çatlağın oluştuğu kritik süre

Buradan silis dumanının donatı korozyonuna karşı olumlu etkisi, açıkça görülmektedir. Silis dumanının olumlu etkisi, bu çalışma kapsamında elde edilen deney sonuçlarının ikisi ile kolaylıkla açıklanabilir. Bunlardan ilki silis dumanının betonun elektriksel direncini artırması sonucu, geçen akım miktarının daha düşük değer alması; ikincisi ise, Bölüm 4.1.2'de yarma deneyi ile gösterilen, silis dumanı katkılı betonların çekme dayanımındaki artıştır. Bilindiği üzere betonda meydana gelecek hasarlar, çatlağa dik doğrultuda oluşan çekme gerilmelerinin, betonun çekme dayanımını aşması sonucu ortaya çıkar. Silis dumanı içeren betonun çekme dayanımındaki artış, korozyon ile ilgili hasarın başlangıç süresini geciktirir.

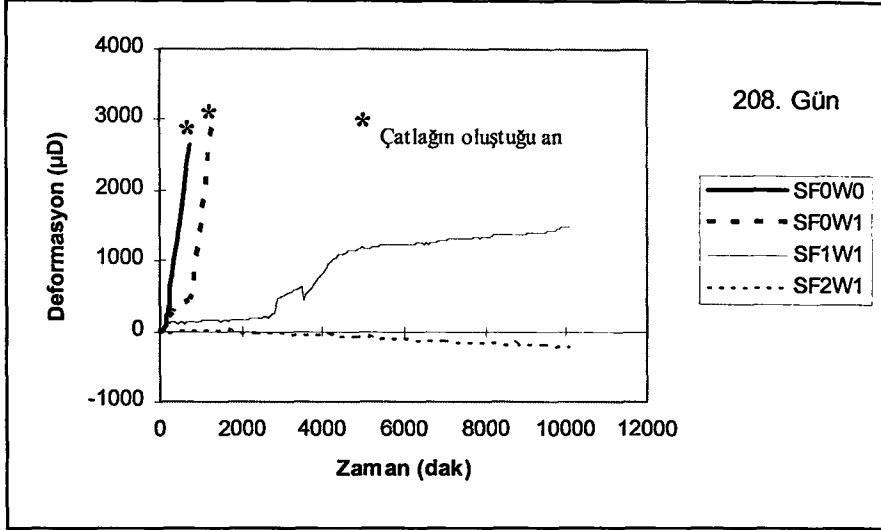
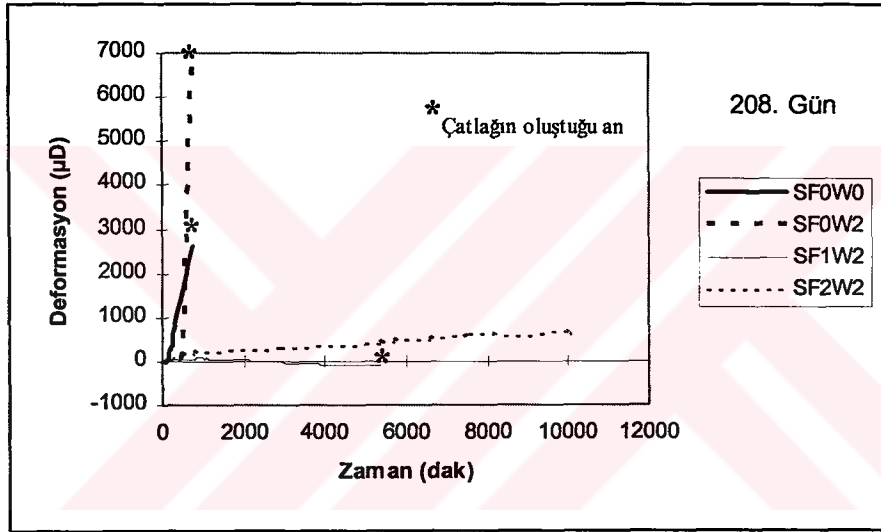
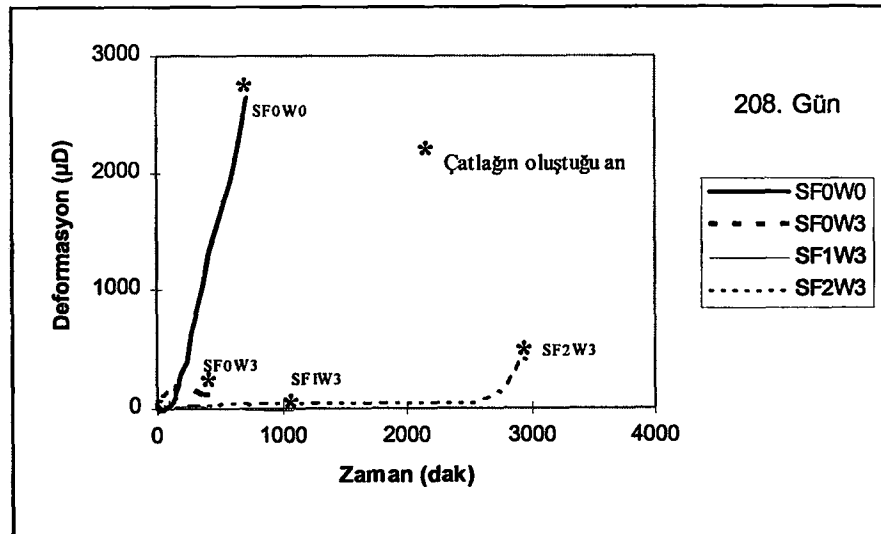


Şekil 4.27 Suda 208 gün bekletilen numunelerde ( $\epsilon$ -t) ilişkisi

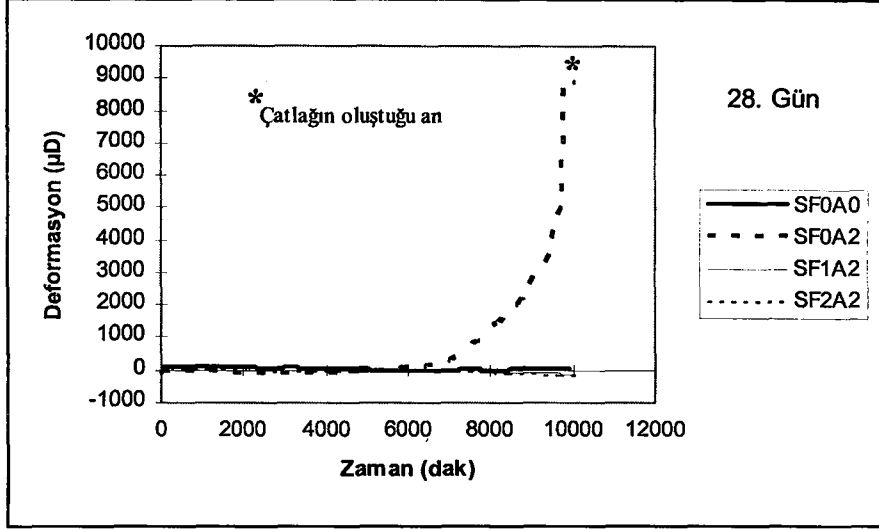
Donatı korozyonuna dolayısı ile betonun çatlamasına neden olan en önemli faktörlerden klorürün etkisi Şekil 4.28 ve 4.29'da gösterilmiştir. 208 gün 1500 mg/L  $Cl^-$  içeren çözeltiliye maruz bırakılan silis dumanı katılmamış grup (SF0W1) 21. saatte çatlamıştır. SF1W1 grubunda beton üst yüzeyinde 5. günde ince çatlak oluşmuş ancak strain-gauge'ye ulaşmamıştır. %20 silis dumanı katkılı grupta ise 7 gün süre ile hiç çatlak gözlenmemiştir (Şekil 4.28.a). 10000 mg/L  $Cl^-$  içeren çözeltilinin 208 günlük etkisindeki SF0W2 grubu 13 saatte, SF1W2 grubu 90 saatte çatlamış, SF2W2 grubunda ise 7. günün sonuna kadar çatlak oluşmamıştır (Şekil 4.28.b). 40000 mg/L  $Cl^-$  konsantrasyonundaki çözeltilinin difüzyonunda, silis dumanının donatı korozyonuna etkisi Şekil 4.28.c'de gösterilmiştir.

208 gün 40000 mg/L Cl<sup>-</sup> çözeltisinin etkisindeki SF0W3 grubu, hızlandırılmış korozyon deneyi ile sadece 8 saatte çatlatılırken, SF1W3 grubu 19 saatte, SF2W3 grubu 50 saatte çatlatılabilmektedir. Buradan silis dumanının 40000 mg/L gibi yüksek Cl<sup>-</sup> konsantrasyonunda bile, çatlama süresi ile belirlenen korozyonu, katkısız gruba göre 6 kat geciktirdiği görülmektedir.

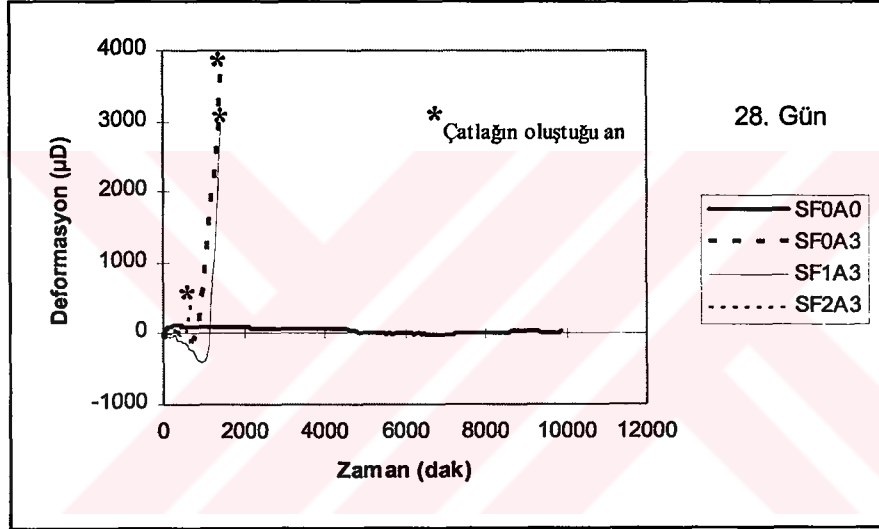
Karma suyuna klorür katılarak laboratuvar ortamında havada bekletilen numunelerde yapılan hızlandırılmış korozyon deneyi sonuçları, çatlayan numuneler için Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Karma suyu 1500 mg/L Cl<sup>-</sup> içeren numunelerde gerek 28. gerekse 208. günde çatlak oluşmamıştır. 10000 mg/L Cl<sup>-</sup> ise sadece SF0A2 grubunda 6. günün sonunda (163 saat) çatlama neden olmuştur (Şekil 4.29.a). Karma suyu 40000 mg/L gibi yüksek Cl<sup>-</sup> içeren numunelerin tüm gruplarında hızlandırılmış korozyon deneyi ile çatlaklar gözlenmiştir (Şekil 4.29.b, 4.29.c). Bu grupta hem 28 gün hem de 208 gün havada bekletilen numunelerde, betonun kuruması ve akım şiddetinin daha düşük değer alması nedeni ile çatlama süresinde gecikme olmuştur. Karma suyunun klorür konsantrasyonu yüksek silis dumanı katkılı numunelerde kritik çatlama süreleri şahitinkinden daha kısadır. Örneğin SF0A3 grubu 60. saatte çatlarken, SF1A3 grubu 16., SF2A3 grubu 40. saatte çatlamıştır. Serbest Cl<sup>-</sup> miktarının kimyasal yolla araştırıldığı Bölüm 4.1.7'de, silis dumanının Friedel tuzunun çözünürlüğünü artırması nedeni ile, ortamda daha fazla serbest Cl<sup>-</sup> tespit edilmiştir. Hızlandırılmış korozyon deneyi sonuçları, silis dumanı katkılı betonlarda herhangi bir nedenle klorür karışması durumunda, donatı korozyonunun hızlanacağını göstermiştir.

Şekil 4.28.a Suda 208 gün bekletilen numunelerde ( $\epsilon$ -t) ilişkisine  $\text{Cl}^-$  etkisiŞekil 4.28.b Suda 208 gün bekletilen numunelerde ( $\epsilon$ -t) ilişkisine  $\text{Cl}^-$  etkisiŞekil 4.28.c Suda 208 gün bekletilen numunelerde ( $\epsilon$ -t) ilişkisine  $\text{Cl}^-$  etkisi

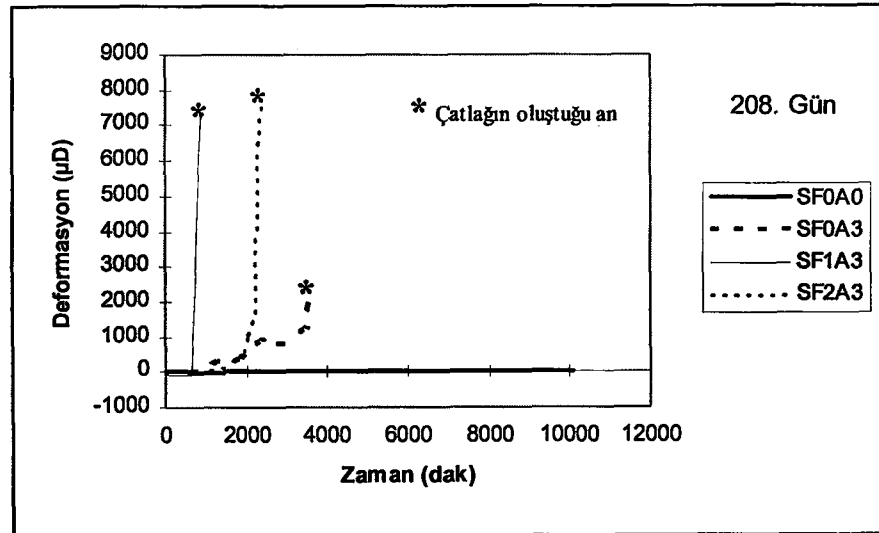




Şekil 4.29.a Havada 28 gün bekletilen numunelerin ( $\epsilon$ -t) ilişkisine  $\text{Cl}^-$  etkisi



Şekil 4.29.b Havada 28 gün bekletilen numunelerin ( $\epsilon$ -t) ilişkisine  $\text{Cl}^-$  etkisi



Şekil 4.29.c Havada 208 gün bekletilen numunelerin ( $\epsilon$ -t) ilişkisine  $\text{Cl}^-$  etkisi

#### 4.4.2 Pull-out deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi

Beton ve çelik çubuklardan oluşan bir yapı elemanının, betonarme olarak davranabilmesi için çubukların betona kenetlenmesi gerekir. Kenetlenmeyi sağlayan kayma gerilmelerine aderans denir. Aderansa etki eden faktörler, düz yüzeyli çubuklarda beton ile çelik çubuk arasındaki adezyon (yapışma) ve sürtünme kuvvetleridir. Nervürlü çubuklarda ise çubuk üzerindeki çıkıntılarının betona yaslanması ile sağlanan diş kuvvetleridir. Donatı ve beton arasındaki aderans gerilmesi, donatıdaki gerilme ve moment nedeni ile oluşan deformasyonlardan, betondaki rötre ve sünmeden etkilenir (Ersoy, 1987). Aderans olayı, çatlama durumunu belirleyen ve betonun çatlamasından sonraki durumlarda da donatı ile birlikte çalışmasını sağlayan bir öge olması nedeni ile, limit durum için önemli faktörlerden biri olarak ayrıca önem kazanmaktadır (Karakoç,1985). Donatının korozyonu beton ve donatı arasındaki aderansın zayıflamasına neden olduğu için, bir yapı içindeki beton elemanların maksimum dayanımını ve servis ömrünü doğrudan etkiler (Cabrera, 1996).

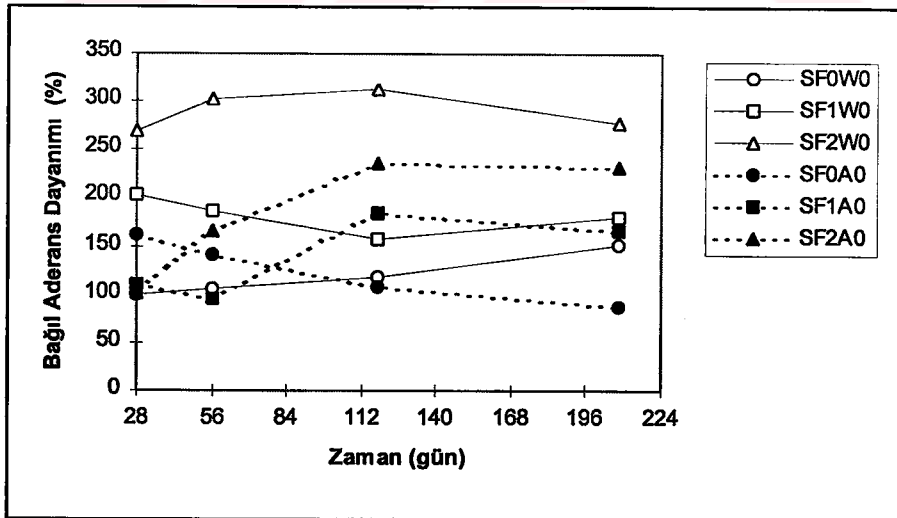
Bu çalışmada, konu ile ilgili deneysel çalışmalardan farklı olarak, gerçeği daha iyi yansıtması amacı ile, donatı korozyonu hızlandırılan numunelerde, sabit gerilimden başka beton-donatı arayüzüne sabit aderans gerilmesi de uygulanmıştır. Donatı korozyonunun aderans dayanımına olan etkisini değerlendirebilmek için, hızlandırılmış korozyon deneyi öncesinde ve korozyonu hızlandırılan numunelerde pull-out deneyi yapılmıştır. Kür koşulları, silis dumanı oranı ve klorür konsantrasyonunun etkilerini içeren deney sonuçları, Şekil 4.30-32'de verilmiştir.

##### 4.4.2.1 Normal betonarme numunelerde aderans dayanımı

Suda ve laboratuvar ortamında havada bekletilen numunelerin aderans dayanımının zamanla değişimi Şekil 4.30'da gösterilmiştir. 28. güne kadar havada bekletilen silis dumanı katkısız grubun aderans dayanımı, suda bekletilenlerinkinden %62 daha fazladır. Suda bekletilen şahit grubun (SF0W0) aderans dayanımı zamanla artış gösterirken, havada bekletilenin dayanımında kayıp söz konusudur. 208. günde şahit gruptaki dayanım artışı

%50'nin üzerinde, havada bekletilenlerin dayanım kaybı %75 düzeyindedir ve şahit grubun başlangıçtaki değerinin altındadır. Aderans dayanımındaki değişim, Bölüm 4.1.1'de verilen basınç dayanımındaki değişime paralellik göstermektedir. Basınç dayanımı, betonun diğer özelliklerinde olduğu gibi, aderans dayanımını da etkileyen en önemli faktörlerden biridir (Gjorv vd., 1990).

Betona silis dumanı katılması, aderans dayanımını artırmıştır. 28. güne kadar suda saklanan katkısız grubun aderans dayanımı 1.4 MPa iken, %10 silis dumanı katkılı grubunki 2.8 MPa, %20 silis dumanı katkılı grubunki 3.7 MPa değerindedir. Aynı süre için havada bekletilen gruplarda katkısızınki 2.2 MPa, %10 katkılınki 1.5 MPa, %20 katkılınki ise 1.4 MPa'dır. Aderans dayanımı, havada bekletilen silis dumanı katkılı numunelerde zamanla artarken, suda bekletilen numunelerde önemli bir değişim göstermemiştir. Silis dumanının aderans dayanımına olan katkısını X-Ray analizi ile araştıran Gjorv vd. (1990), silis dumanının donatı-çimento hamuru arayüzünde etkili olduğunu açıklamıştır. Silis dumanı, çok ince oluşu nedeni ile betonun yerleştirilmesi sırasında, arayüzdeki serbest suyu adsorbe ederek suyun birikmesini azaltmakta, kalsiyum hidroksit ile yaptığı puzolanik reaksiyon sonucu da geçiş bölgesinin yoğunluğunu artırmaktadır.

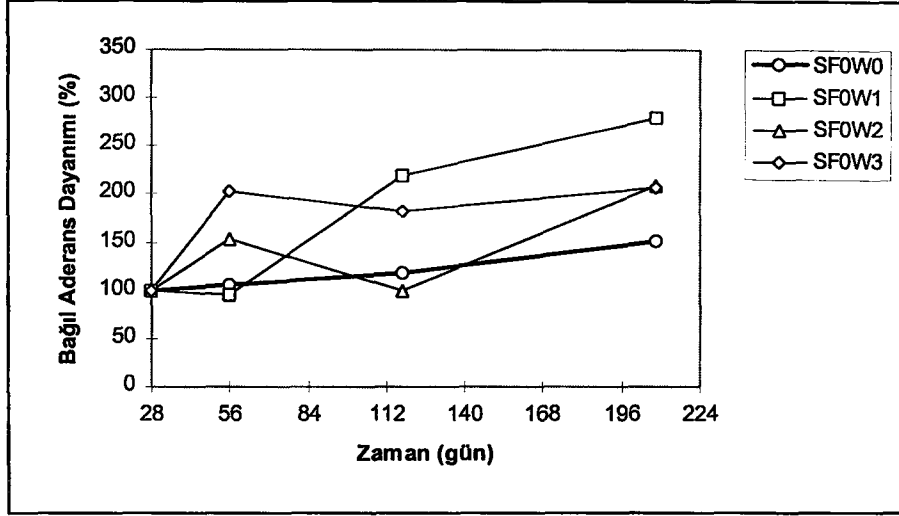


Şekil 4.30 Aderans dayanımı bağıl değerlerinin zamanla değişimi

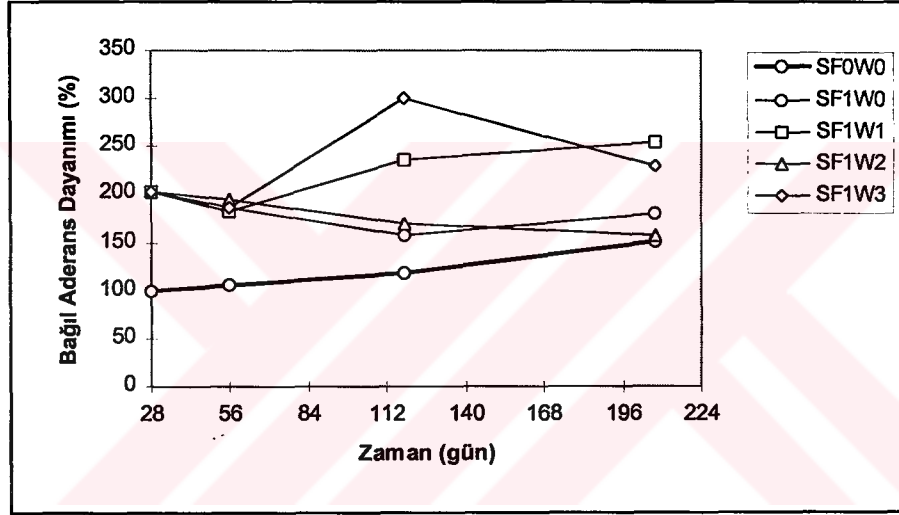
Klorürlerin dışarıdan difüzyonunda ve içeriden etkimesi durumunda, aderans dayanımındaki değişimler Şekil 4.31a-f'de gösterilmiştir.  $Cl^-$  etkisindeki silis dumanı katkısız numunelerin aderans dayanımı, 56. günde SF0W1, 118. günde SF0W2 grubu hariç, şahit grubun (SF0W0) üzerinde seyretmiş, 208. günde klorür etkisindeki tüm gruplarda aderans dayanımı artış göstermiştir (Şekil 4.31.a).

Betona %10 silis dumanı katıldığında, şahite göre başlangıçta %103 daha büyük olan aderans dayanımı, 28 günlük klorür etkisinden başlayarak değişimler göstermiştir (Şekil 4.31.b). Bu günden itibaren 1500 mg/L  $Cl^-$  içeren çözeltinin difüzyonunda, aderans dayanımı sürekli artarak 208. günde %154'e ulaşmıştır. SF1W2 grubunun aderans dayanımı zamanla azalmış ancak şahit grubun üzerinde kalmıştır. 40000 mg/L  $Cl^-$  içeren çözeltinin etkisinde, aderans dayanımı 118. günde %200 artmış, bugünden sonra azalmış, ancak 208. günde şahite oranla %131 daha büyük değer almıştır. Şekil 4.31.c'de betona %20 silis dumanı katılan numunelerde aderans dayanımı, daha başlangıçta şahite göre %170'lik bir artış ile çok yüksek değerler almıştır. Klorür çözeltilerinin etkisinde aderans dayanımında çok küçük artışlar olmuştur. Yalnızca 40000 mg/L  $Cl^-$  içeren çözeltinin difüzyonunda 118. günden itibaren önemli bir azalma olmuş, ancak 208. günde şahit numuneden %111 daha yüksek değerde kalmıştır.

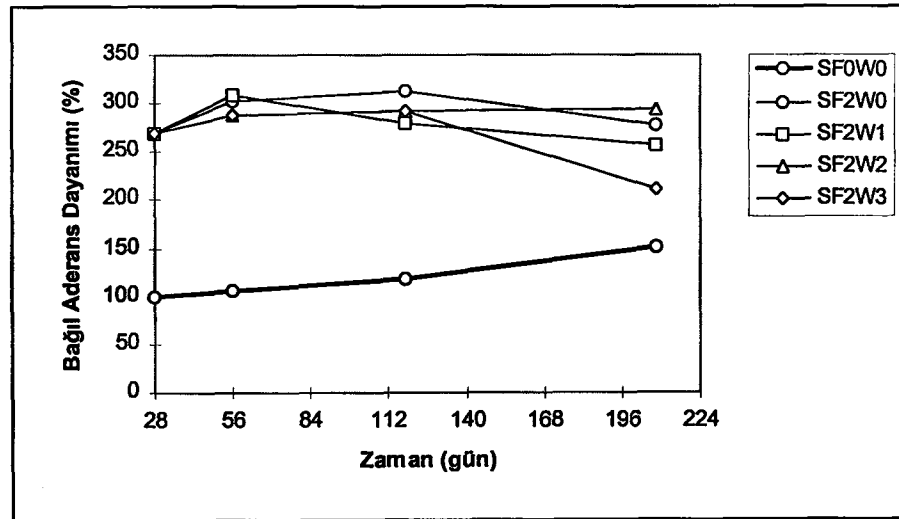
Karma suyuna klorür katılarak üretilen ve havada bekletilen numunelerin aderans dayanımındaki değişim, Şekil 4.31.d-f'de gösterilmiştir. Gerek katkısız (şahit) numunelerde gerekse silis dumanı katkılı numunelerde, karışıma giren 40000 mg/L  $Cl^-$  konsantrasyonundaki çözelti, aderans dayanımında zamanla artışa neden olmuştur. 208. günde SF0A3 grubunun aderans dayanımı SF0A0'dan %57; SF1A3 grubunun aderans dayanımı, SF1A0'dan %133 ve SF2A3'ünki SF2A0'dan %59 daha yüksek değerler almıştır.  $Cl^-$  konsantrasyonları 1500 ve 10000 mg/L olan grupların aderans dayanımı ise 56. ve 118 gündeki bazı farklılıklara rağmen, klorür katılmamış numunelerden (SF0A0, SF1A0, SF2A0) önemli bir fark göstermemiştir.



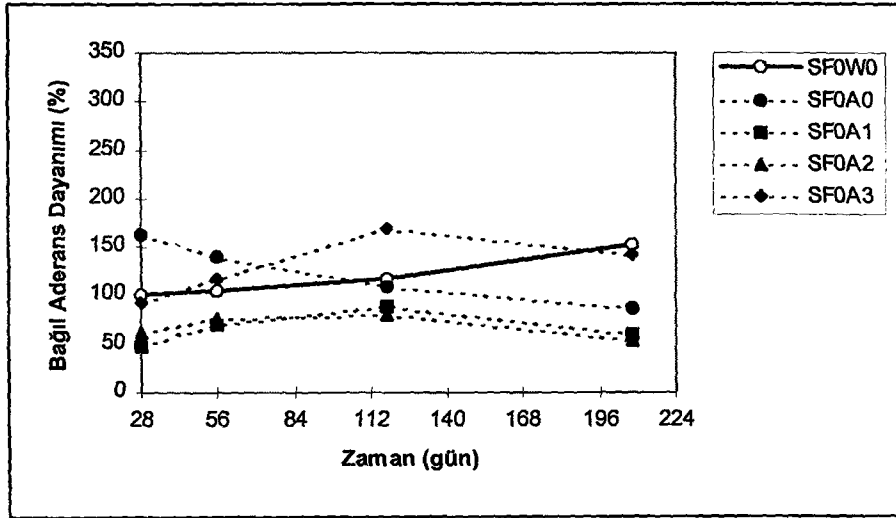
Şekil 4.31.a Çözeltilerde bekletilen şahit grubun ( $\%f_{scb-t}$ ) ilişkisi



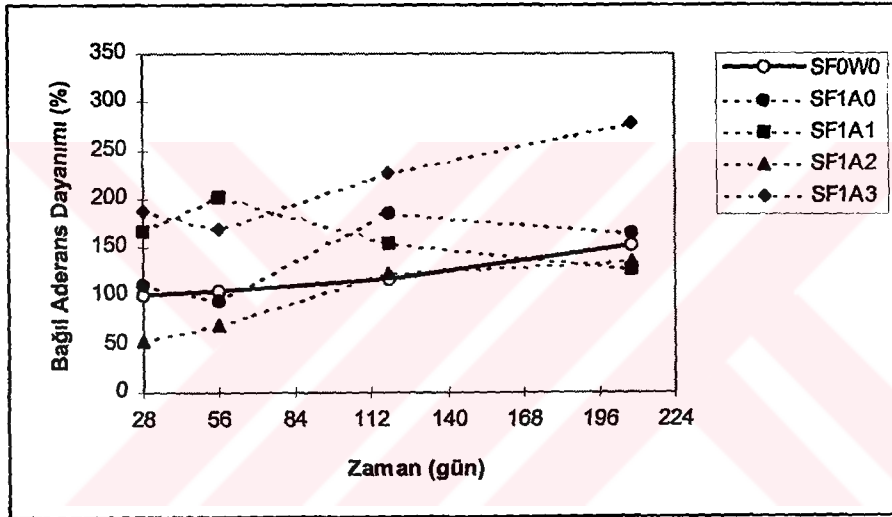
Şekil 4.31.b Çözeltilerde bekletilen %10 silis dumanı katkı grubun ( $\%f_{scb-t}$ ) ilişkisi



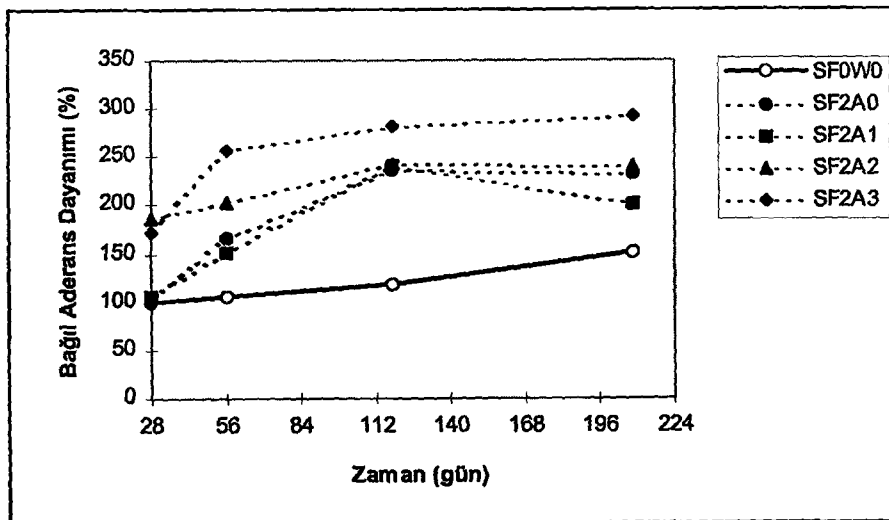
Şekil 4.31.c Çözeltilerde bekletilen %20 silis dumanı katkı grubun ( $\%f_{scb-t}$ ) ilişkisi



Şekil 4.31.d Havada bekletilen şahit grubun ( $\%f_{scb-t}$ ) ilişkisi



Şekil 4.31.e Havada bekletilen %10 silis dumani katkılı ( $\%f_{scb-t}$ ) ilişkisi



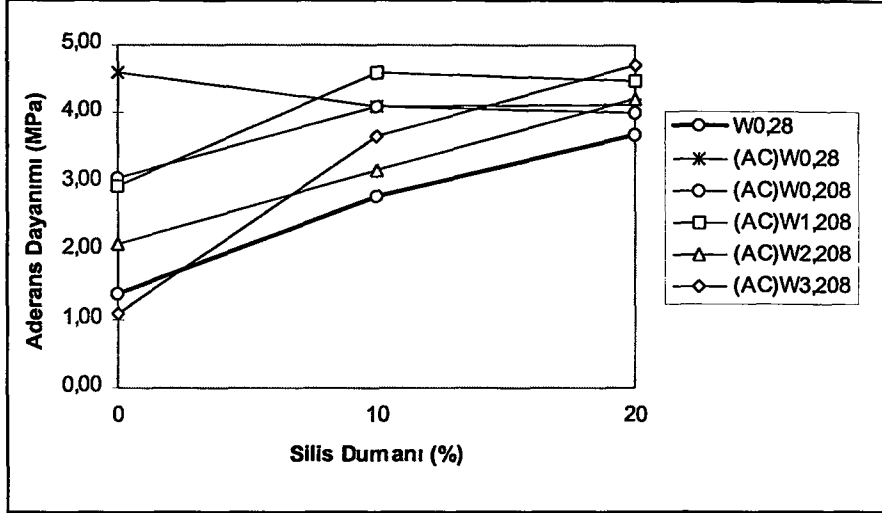
Şekil 4.31.f Havada bekletilen %20 silis dumani katkılı grubun ( $\%f_{scb-t}$ ) ilişkisi

Korozyon ürününün hacim artışının donatı-beton arayüz bölgesinde oluşturduğu basınç gerilmeleri, sürtünme kuvvetini artırarak, adezyon kuvvetinin daha yüksek gerilmelerde aşılmasına ve aderans dayanımının artışına neden olmuştur. Klorür çözeltileri 208 günlük etkileme sürecinde, donatı korozyonunu hızlandırarak korozyon ürününün artışına neden olmuş ve bu etkileme sürecinde aderans dayanımını artırmıştır. Cabrera (1996), aderans dayanımının bir maksimum değere kadar, korozyon hızı ile arttığını ve korozyon hızının daha yüksek değerler alması ile, aderans dayanımında önemli bir azalma olduğunu ifade etmiştir. Bu çalışmada ise, pull-out deneyi için hazırlanan normal betonarme numunelerin, 45 mm gibi büyük pas payına sahip olması ve betonun geçirimsizliğinin az olması nedeni ile; 180 günlük klorür etkisinde bile, korozyon hızı betonu çatlatacak düzeye ulaşmamıştır. Korozyon hızını artırmak amacı ile geliştirilen deney sisteminde, donatı korozyonu hızlandırılan numunelerde de pull-out deneyi yapılarak, korozyon hızındaki artışın aderans dayanımına etkisi araştırılmıştır.

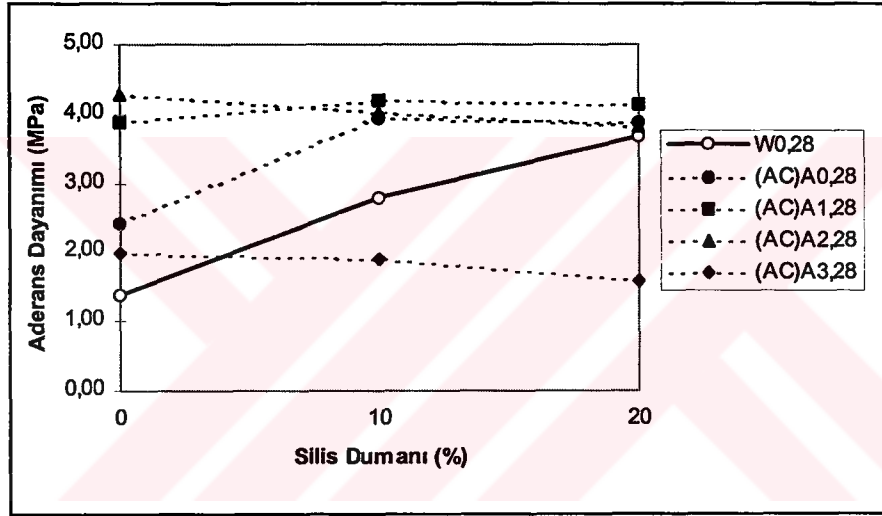
#### 4.4.2.2 Donatı korozyonu hızlandırılmış numunelerde aderans dayanımı

Farklı konsantrasyonlardaki çözeltilerde 208 gün, suda ise 28 ve 208 gün bekletilen numunelerin, hızlandırılmış korozyon deneyi sonrasındaki aderans dayanımları, silis dumanı oranına bağlı olarak Şekil 4.32.a'da verilmiştir. Donatı korozyonu hızlandırılan numunelerin aderans dayanımı genelde, şahit numunenin üzerinde çıkmış, silis dumanı oranı arttıkça, dayanım artmıştır. En düşük değer, 1.1 MPa ile 208 gün süre ile 40000 mg/L klorür konsantrasyonundaki çözeltinin etkisinde kaldıktan sonra hızlandırılmış korozyon deneyine maruz kalan SF0W3 grubunda görülmüştür. Buradan silis dumanının olumlu, klorür konsantrasyonunun ise olumsuz etkisi açıkça görülmektedir. Bu grup, Çizelge 4.1 ve Şekil 4.26'dan da görüldüğü gibi, hızlandırılmış korozyon deneyinde, 480 dakika gibi çok kısa sürede çatlamıştır. Bu grupta akım şiddeti 597 mA değerine ulaşmış, yarı hücre potansiyeli -351 mV ile korozyon bölgesinde yer almıştır.

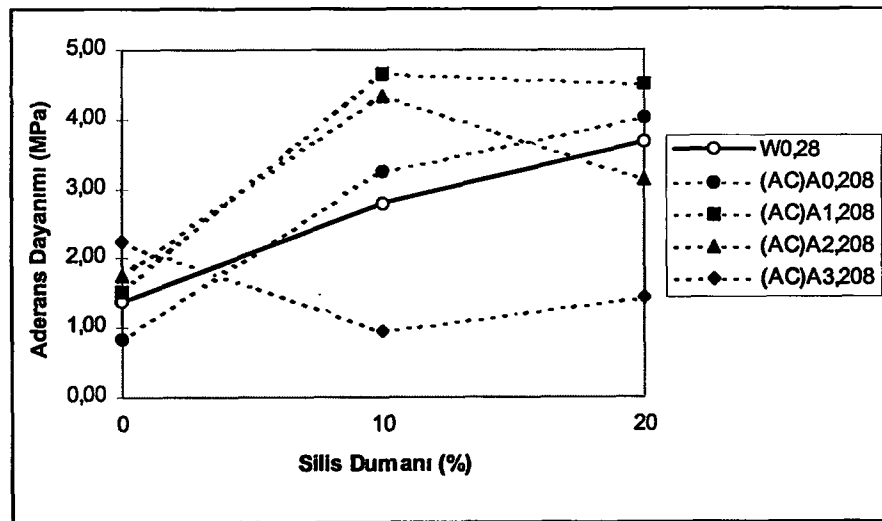
Karma suyuna farklı konsantrasyonlarda klorür çözeltisi katılan ve havada bekletilen numunelerin, hızlandırılmış korozyon deneyinden sonra aderans dayanımındaki değişim Şekil 4.32.b ve 4.32.c'de verilmiştir. Hızlandırılmış deneyden sonraki aderans dayanımı, suda bekletilen 28 günlük şahit numunelerin aderans dayanımı ile karşılaştırıldığında,



Şekil 4.32.a Çözeltilerde bekletilen AC grubunun ( $\%f_{scb-t}$ ) ilişkisi



Şekil 4.32.b Havada 28 gün bekletilen AC grubunun ( $\%f_{scb-t}$ ) ilişkisi

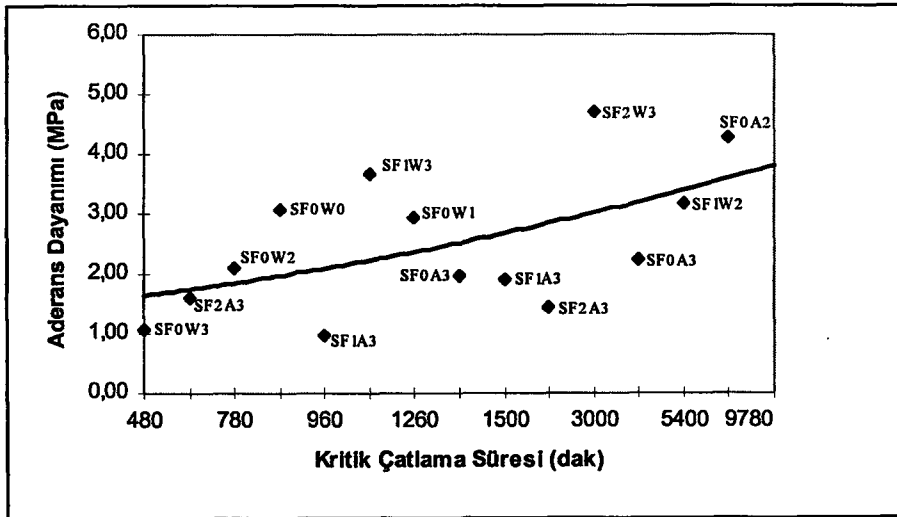


Şekil 4.32.c Havada 208 gün bekletilen AC grubunun ( $\%f_{scb-t}$ ) ilişkisi



Şekil 4.32.b'de görüldüğü gibi SF1A3 ve SF2A3 grupları hariç diğer grupların aderans dayanımı şahitinkinden büyüktür. Şekil 4.32.c'de de benzer durum görülmüş ancak SF0A0 ve SF2A2 gruplarının aderans dayanımı, 28. gündeki değerlerinden sırası ile 1.6 MPa ve 0.7 MPa'lık düşüş ile şahit grubun altına inmiştir. SF0A0 grubundaki 1.6 MPa'lık düşüşe karşın, bu numuneler hızlandırılmış korozyon deneyinde çatlama olmamıştır. SF0A0'ın 28 günden sonraki hızlandırılmış deneyde akım şiddeti 166 mA iken, 208 günden sonrakinde en çok 8 mA'dir. Bu durum 28 günlük numunelerde korozyon hızının daha fazla olması nedeni ile donatı-beton arayüzündeki sürtünme kuvvetlerinin artmış olmasına, 208 günlüklerde ise adezyon kuvvetinin azalmış olmasına bağlanabilir.

Hızlandırılmış korozyon deneylerinde Şekil 4.27 ve 4.28'de görüldüğü gibi numunenin çatladığı an kritik çatlama süresi olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.33'de korozyon hızı kritik çatlama süresi olarak ifade edilmiş, aderans dayanımı ile kritik çatlama süresi arasındaki ilişki gösterilmiştir. Buna göre aderans dayanımı korozyon hızındaki artış ile azalmıştır. Bu sonuç, korozyon hızının belirli bir değerinden sonra donatı ile beton arasındaki aderansın zayıflayacağını bir göstergesidir. Silis dumanı katkılı gruplarda, karma suyunun yüksek konsantrasyonda  $Cl^-$  içermesi, aderans dayanımının azalmasına, kritik çatlama süresinin kısılmasına neden olmuştur. Bu sonuç, karma suyu yüksek konsantrasyonda  $Cl^-$  içeren silis dumanı katkılı betonlarda basınç, yarma, serbest  $Cl^-$  miktarı deney sonuçları ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.33 Kritik çatlama süresi ile aderans dayanımı arasındaki ilişki

#### 4.4.3 Yarı hücre potansiyel ölçümlerinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi

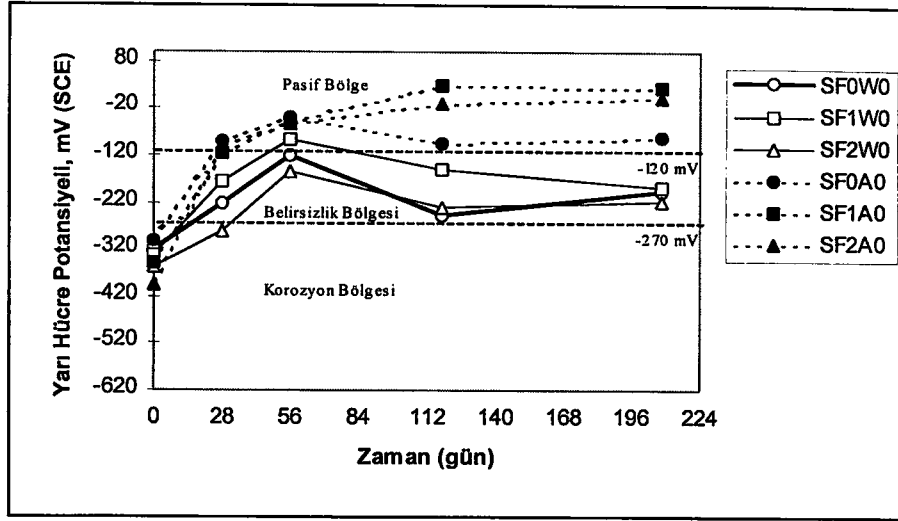
Yarı hücre potansiyel ölçümü, niteliksel bir değerlendirme yöntemidir ve uygulamada donatının korozyona uğradığı bölgeyi pratik olarak belirlemeye yarar (Maslehuddin vd, 1987; Sharp vd, 1988). Bu bölümde, donatının korozyonu ile ilgili yarı hücre potansiyeli, kalomel referans elektrotu (SCE) kullanılarak, normal betonarme numunelerde ve donatı korozyonu hızlandırılmış numunelerde ölçülmüştür. Alınan sonuçlar, ASTM C876 91'in kalomel elektrota göre verdiği, -270 mV ve -120 mV sınır değerleri ile karşılaştırılarak Şekil 4.34 - 4.36'da gösterilmiştir.

##### 4.4.3.1 Normal betonarme numunelerde yarı hücre potansiyel ölçümleri

Üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkarılan tüm numunelerde yarı hücre potansiyeli ölçülmüş, yarı hücre potansiyelinin -303 mV ile -502 mV (SCE) arasında değerler aldığı görülmüştür. Bu değerlerden, tüm numunelerde donatının aktif durumda olduğu, donatının etrafındaki pasif film tabakasının, betonun dökümünden hemen sonra oluşmadığı görüşünü doğrulamaktadır (Khan, 1991).

Kalıptan çıkarıldıktan sonra su içinde bekletilen grubun tüm numunelerinde ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri, 28. günden itibaren Şekil 4.34'te görüldüğü gibi, -270 mV sınır değerinin üzerine çıkmış, ASTM C876'ya göre -270 mV ile -120 mV arasında verilen belirsizlik bölgesinde kalmıştır. Kalıptan çıkarıldıktan sonra -337mV olarak ölçülen şahit numunenin (SF0W0) yarı hücre potansiyeli, 28 gün suda bekletildikten sonra -221mV değerine ulaşmış ve 208. güne kadar -270 mV sınır değerinin üzerinde kalmıştır. Suda bekletilen %10 ve %20 silis dumanı katkılı numunelerde de benzer davranış görülmüş, 28. günden itibaren ölçülen değerler aktif potansiyel değerinden uzaklaşmıştır. 208 günlük süreçte şahit numune ile silis dumanı katkılı numuneler arasında önemli bir farklılık görülmemiştir. Değerler ASTM C876'nın belirttiği potansiyel kriterlerine göre belirsizlik bölgesinde kaldığından, bu kriterlere göre korozyon durumu hakkında bir şey söylemek zordur. Bu gruptaki numunelerde korozyon hasarı görülmemiştir. Su içinde oksijen difüzyonunun daha az olması nedeni ile donatı yüzeyinde pasif film tabakası oluşmasının

güçleşmesine rağmen donatının korozyon hızı, betonda hasara yol açacak düzeyde değildir (Khan, 1991).



Şekil 4.34 Yarı hücre potansiyel değerlerinin zamanla değişimi

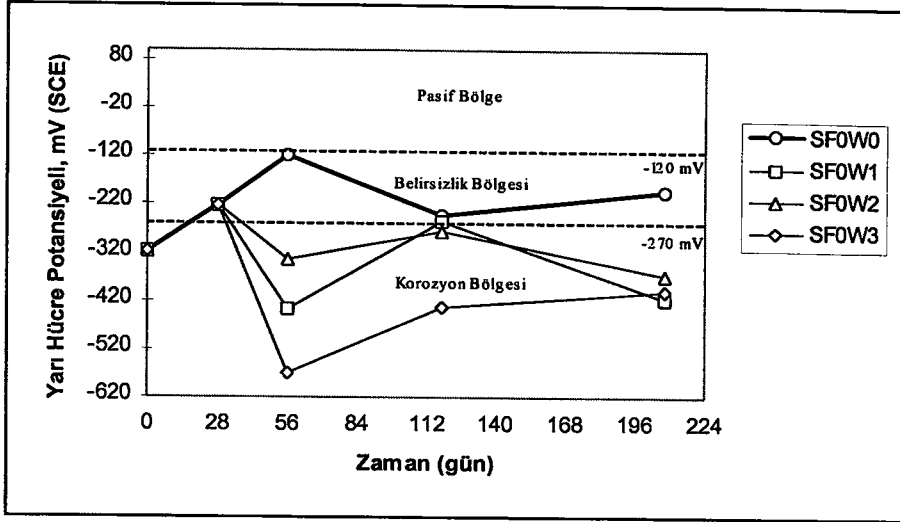
Kalıptan çıkarıldıktan sonra laboratuvar ortamında havada bekletilen betonarme numunelerin yarı hücre potansiyeli ise hızlı bir değişim ile, aktif potansiyel değerlerinden uzaklaşmış, %90 güvenirlikle donatıda korozyonun olmadığı pasif bölgeye geçmiştir. Bu grubun silis dumanı katkılı numunelerinde ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri, 56. güne kadar şahitinki ile yaklaşık aynı kalmış, bugünden itibaren pasif bölgede daha büyük değerler almıştır. Örneğin SF0A0 grubunun 208. gündeki yarı hücre potansiyeli -84 mV iken, SF1A0'da 23 mV, SF2A0'da 4 mV olarak ölçülmüştür. Havada bekletilen numunelerde ASTM C876'nın belirlediği potansiyel kriterlerine göre, donatıda korozyon olmadığı görülmüştür. Gerek havada gerekse suda bekletilen 45 mm'lik pas payına sahip numunelerde 208 günlük süreçte, betonda donatı korozyonu nedeni ile gözle görülen bir çatlığa rastlanmamıştır. Bu sonuç standardın %90 güvenirlikle belirlediği kriterleri doğrular niteliktedir.

Donatının yarı hücre potansiyeline klorürlü çözeltilerin etkisi Şekil 4.35.a'da gösterilmiştir. Üretimden sonra 28. günde klorürlü çözeltilere yerleştirilen numunelerin yarı hücre potansiyeli, çözeltiliye konulduğu gün belirsizlik bölgesinde olmasına rağmen, Cl<sup>-</sup> etkisi ile

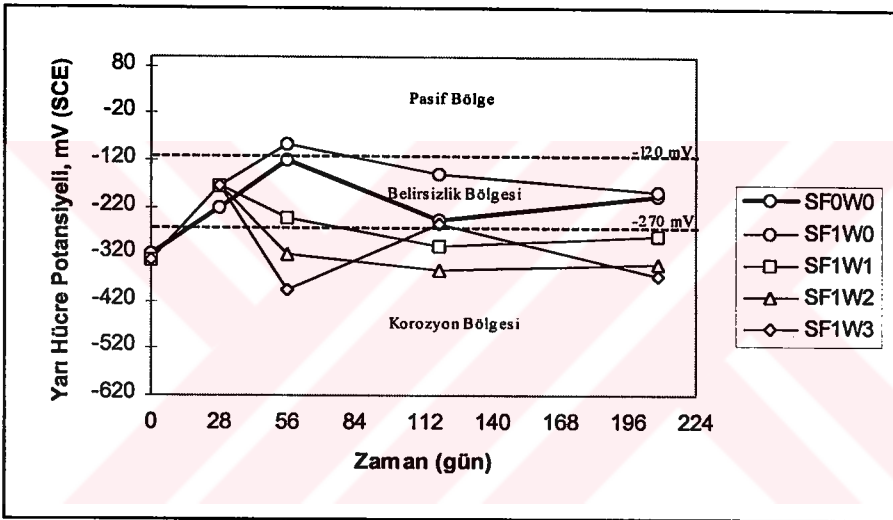
hızlı bir düşüş göstermiş,  $-270$  mV'un altına inmiştir. Bu grupta 56. ve 90. günlerde  $\text{Cl}^-$  konsantrasyon etkisi görülmüş, en düşük potansiyel  $-570$  mV ile 56. günde  $40000$  mg/L klorür içeren çözeltinin etkisinde ölçülmüştür. 180 gün klorür etkisinde kalan numunelerin tümünde, yarı hücre potansiyel değerleri korozyon bölgesine çıkmasına rağmen, konsantrasyonun etkisi kalmamıştır. Klorür içeren çözeltilerdeki silis dumanı katkılı numunelerde de yarı hücre potansiyeli, Şekil 4.35.b-c'de görüldüğü gibi,  $-270$  mV'luk sınır değer altında korozyon bölgesinde kalmıştır. Bölüm 4.1.7'de açıklandığı gibi, silis dumanı  $\text{Cl}^-$  difüzyonunu önemli oranda azaltmasına karşın, ölçülen yarı hücre potansiyellerinde şahit numunenin değerlerinden önemli fark görülmemiştir. Silis dumanı katkılı numunelerde de ASTM C876 standardına göre %90 güvenirlikle donatının korozyona uğradığı söylenmelidir.

Karma suyuna farklı konsantrasyonlarda klorür çözeltisi katılan ve havada bekletilen grupların, yarı hücre potansiyelinin zamanla değişimi Şekil 4.35.d-f'de gösterilmiştir. Başlangıçta  $-371$  mV ile  $-481$  mV değerleri arasında ölçülen yarı hücre potansiyelleri, SF0A1 ve SF0A2 gruplarında 28. günden sonra, SF0A3 grubunda ise 56. günden sonra korozyon bölgesinden uzaklaşmıştır. Silis dumanı katkılı numunelerde SF1A3 ve SF2A3 grupları hariç, 56. günden itibaren donatıların pasif bölgede olduğu görülmektedir. Bu gruplardan SF1A3'ün potansiyeli 118. günden, SF2A3 grubununki ise 56. günden sonra belirsizlik bölgesinde yer almıştır. Bu durum kuru beton içinde,  $40000$  mg/L gibi yüksek  $\text{Cl}^-$  konsantrasyonunda bile donatının korozyon bölgesinde olmadığını göstermektedir.

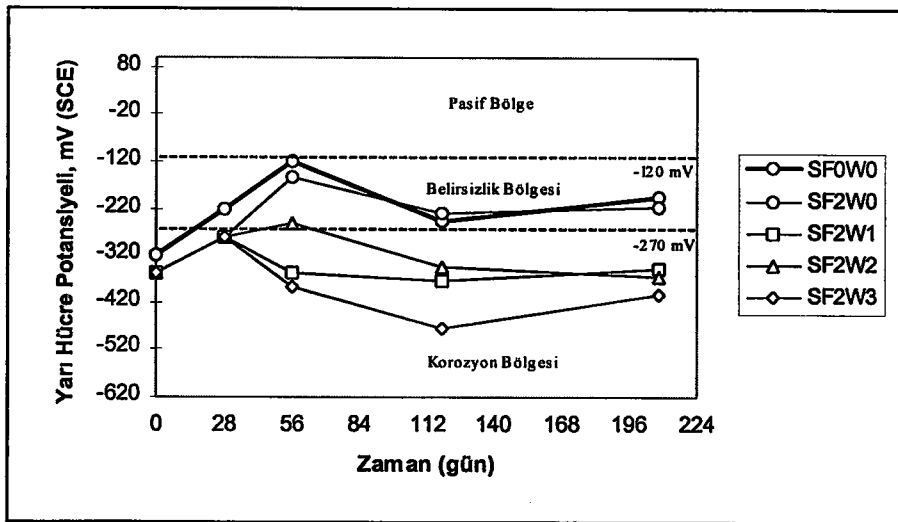
Deney sonuçlarına göre yarı hücre potansiyelinin, çözeltide bekletilen numunelerde aktif bölgede, havada bekletilen numunelerde pasif veya belirsizlik bölgesinde yer alması, betonun elektriksel iletkenliğine bağlıdır (Doğan ve Yalçın, 1989). Havada bekletilen grubun kuruması nedeni ile iletkenliği azalmakta, potansiyel ASTM C876 standardında verilen pasif bölgeye kaymaktadır. Bu nedenle yarı hücre potansiyelinden yararlanılan yöntem, deneyi ve değerlendirmesinin kolay olmasına rağmen, donatı korozyon durumuna karar vermek için yeterli değildir.



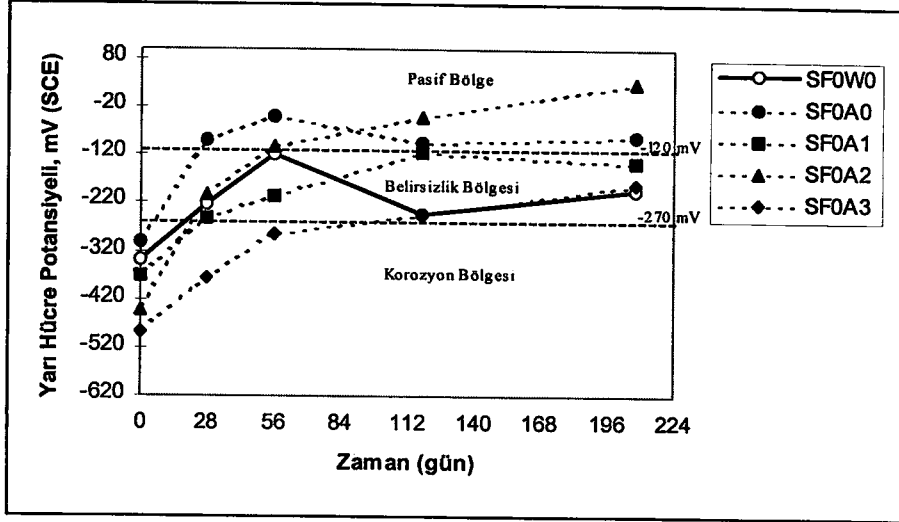
Şekil 4.35.a Çözeltilerde bekletilen şahit grubun ( $E_{HC}$  -t) ilişkisi



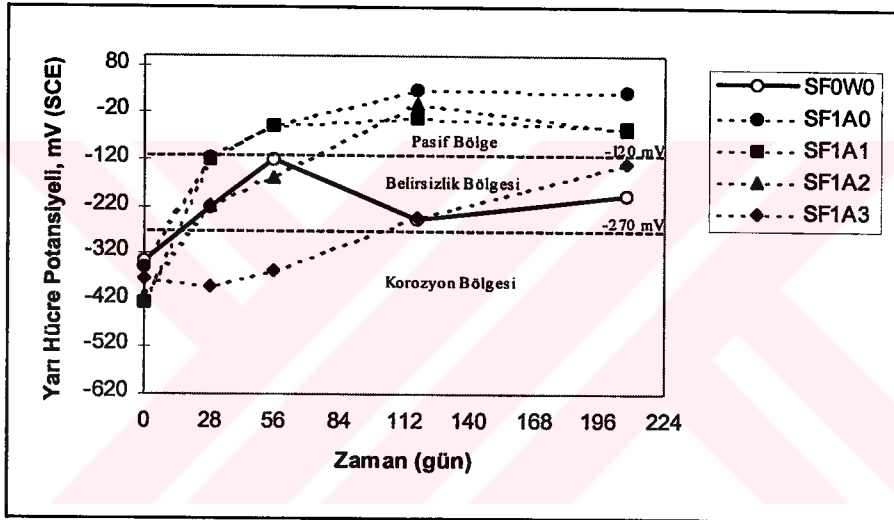
Şekil 4.35.b Çözeltilerde bekletilen %10 silis dumani katkı grubun ( $E_{HC}$  -t) ilişkisi



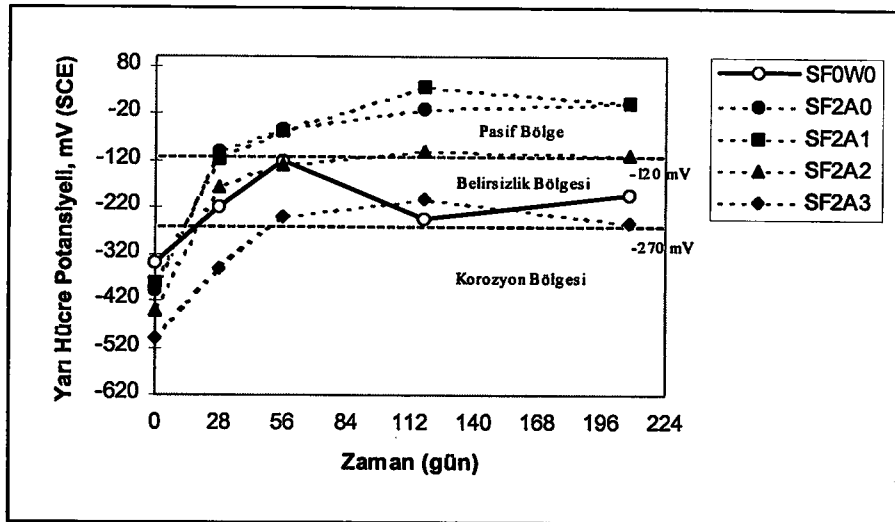
Şekil 4.35.c Çözeltilerde bekletilen %20 silis dumani katkı grubun ( $E_{HC}$  -t) ilişkisi



Şekil 4.35.d Havada bekletilen şahit grubun ( $E_{HC} - t$ ) ilişkisi



Şekil 4.35.e Havada bekletilen %10 silis dumanı katkılı grubun ( $E_{HC} - t$ ) ilişkisi



Şekil 4.35.f Havada bekletilen %20 silis dumanı katkılı grubun ( $E_{HC} - t$ ) ilişkisi

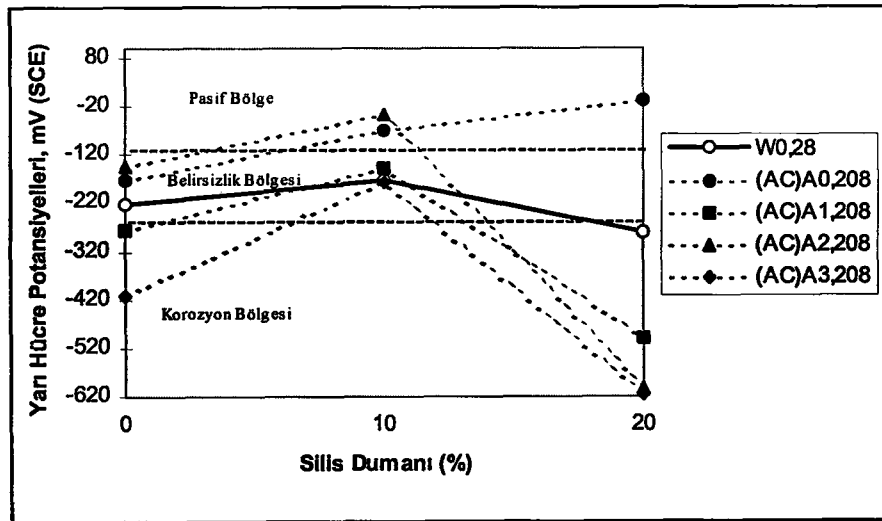
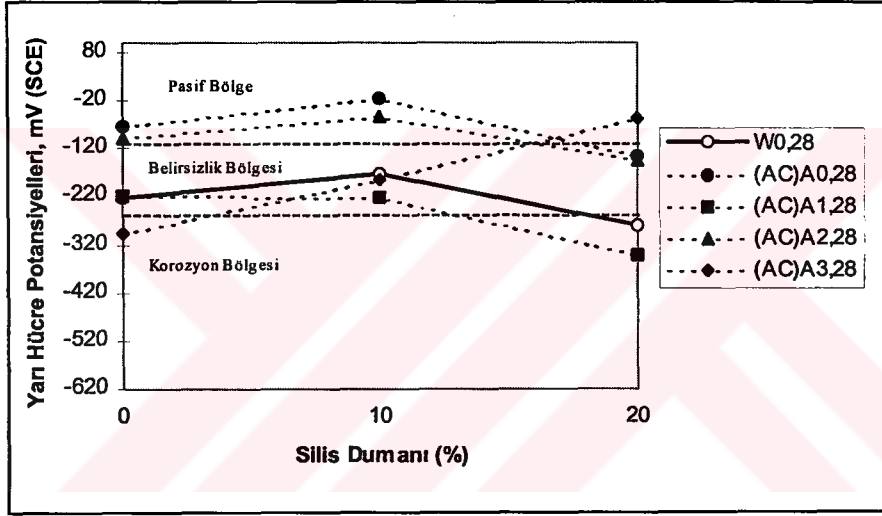
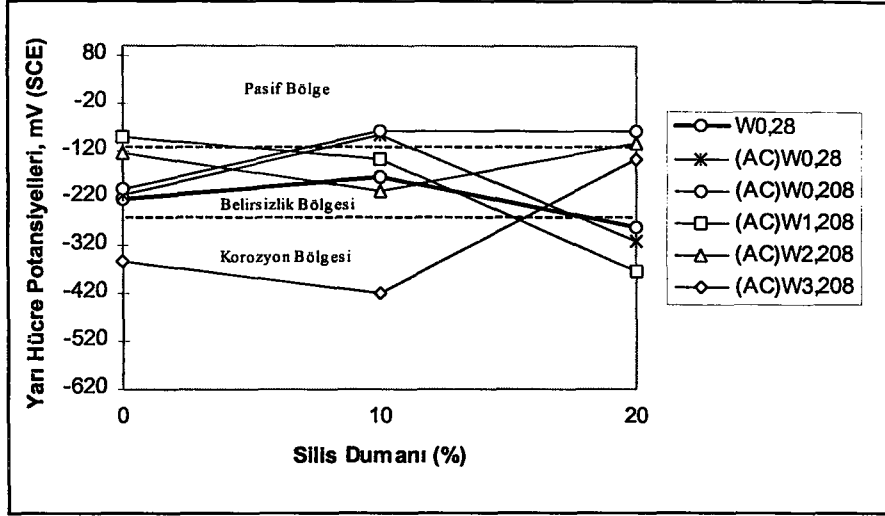
#### 4.4.3.2 Donatı korozyonu hızlandırılmış numunelerinin yarı hücre potansiyeli

Yukarıda alınan sonuçlardan, donatı korozyonu için sadece yarı hücre potansiyel ölçümleri ile değerlendirme yapmanın yanıltıcı olabileceği görülmektedir. Ancak ASTM C876'nın kriterlerini eleştirebilmek için, deney süresinin uzatılması ya da hızlandırılmış ve/veya şiddetlendirilmiş deneylerden sonra ölçüm yapılması ve sonuçların gözlenen korozyon durumu ile karşılaştırılması doğru olacaktır. Bu çalışmada, 28 ve 208 gün farklı kür koşullarında bekletilen numuneler, hızlandırılmış korozyon deneyi (AC) ile hasara uğratılmış ve bu deneyden sonra da yarı hücre potansiyelleri ölçülmüştür.

Suda 28 ve 208 gün, farklı konsantrasyonlardaki çözeltilerde ise 208 gün süre ile bekletilen numunelerin, hızlandırılmış korozyon deneyi sonrası ölçülen yarı hücre potansiyelleri Şekil 4.36.a'da gösterilmiştir. Yarı hücre potansiyelin betona katılan silis dumanı oranına göre değerlendirildiği Şekil 4.36.a'da görüldüğü gibi, şahit grubun yarı hücre potansiyeli, 40000 mg/L Cl<sup>-</sup> konsantrasyonundaki çözeltide 208 gün bekletilen grup hariç (SF0W3), belirsizlik bölgesinde yer almıştır. %10 silis dumanı katkılı grupta da benzer davranış görülmüş, yüksek Cl<sup>-</sup> konsantrasyonunda (40000 mg/L) bekletilen grup (SF1W3), bu katkı oranında da korozyon bölgesinde kalmıştır. %20 silis dumanı katkılı grupların yarı hücre potansiyelinde, Cl<sup>-</sup> konsantrasyonu ve etkilenme süresi bakımından kararlılık görülmemiş, SF2W0 ve SF2W1 korozyon bölgesinde, SF2W3 belirsizlik bölgesinde, SF2W0 (208 gün) ve SF2W2 pasif bölgede yer almıştır. Çizelge 4.1 incelendiğinde korozyon bölgesinde yer alan numunelerden SF2W1 VE SF2W0 numunelerinin çatlamadığı, belirsizlik bölgesinde yer alan SF2W3'ün ise çatlamış olduğu görülmektedir.

Karma suyuna farklı konsantrasyonlarda klorür çözeltisi katılan ve 28 gün havada bekletilen numunelerdeki, hızlandırılmış korozyon deneyi sonrası ölçülen yarı hücre potansiyelleri Şekil 4.36.b'de verilmiştir. Donatıda korozyon nedeni ile önemli ağırlık kaybı olduğu Şekil 4.20'de görülen SF0A2 ve SF2A3 grupları, özellikle SF2A3 grubu donatıda oluşan korozyon nedeni ile 11 saat gibi kısa sürede betonu çatlattığı halde, bu deneyde pasif bölgede yer almaktadır. Ayrıca SF2A1 grubunda hızlandırılmış korozyon deneyinde çatlak oluşmuş ama bu grup ASTM C876 kriterlerine göre donatı korozyon







bölgesinde görülmüştür. Benzer örnekler Şekil 4.36.c'de gösterilen 208 günlük numuneler için de verilebilir.

Bu çalışmada hızlandırılmış korozyon deneyine tabi tutulan numunelerde ve hızlandırılmamış numunelerde ölçülen yarı hücre potansiyeli değerleri, ASTM C876'da verilen sınır değerler ile karşılaştırıldığında alınan sonuçlar, donatı korozyonunun (hasar) gerçek durumunu tam olarak yansıtmamıştır. Bu nedenle mevcut yapılarda, sadece yarı hücre potansiyel ölçümü yapılarak, donatının aktif, pasif veya belirsizlik bölgesinde olduğu sonucuna varmak yanıltıcı olabilir. ASTM C876'da %90 güvenirlikle verilen sınır değerlerin gözden geçirilmesi, özellikle pasif bölge için verilen sınır değerinin, amaca uygun deneyler yapılarak, belirlenecek bir değere çekilmesi doğru olacaktır.



#### 4.5 Matematik Model Oluşturulması

Donatı korozyonu ile ilgili bağıntıların çıkarıldığı çalışmalarda, 4.1 bağıntısı ile verilen Faraday kanunundan (ASM Handbook, 1992) yararlanılarak, donatı çapında meydana gelen kayıp ile elektrokimyasal akım verileri arasında matematiksel ilişkiler kurulmaktadır.

$$W_L = \frac{itM_w}{nF} \quad (4.1)$$

$W_L$  : Ağırlık kaybı (g)

$i.t$  : akım şiddeti.zaman (C:Coulomb)

$M_w$  : Elektroaktif metalin molekül ağırlığı

$n$  : Elektrokimyasal reaksiyonda alınıp verilen elektron sayısı

$F$  : Faraday sabiti (96487 C/g-eşdeğer ağırlık)

Andrade vd. (1993) tarafından, donatı çapındaki kaybın belirlenmesi için Faraday Kanununu esas alan 4.2 bağıntısı önerilmiştir.

$$\Delta\phi_s = 0.023.I_{corr}.t \quad (4.2)$$

$\Delta\phi_s$  : Donatı çapındaki kayıp (mm)

$I_{corr}$  : Korozyon akım yoğunluğu ( $\mu A/cm^2$ )

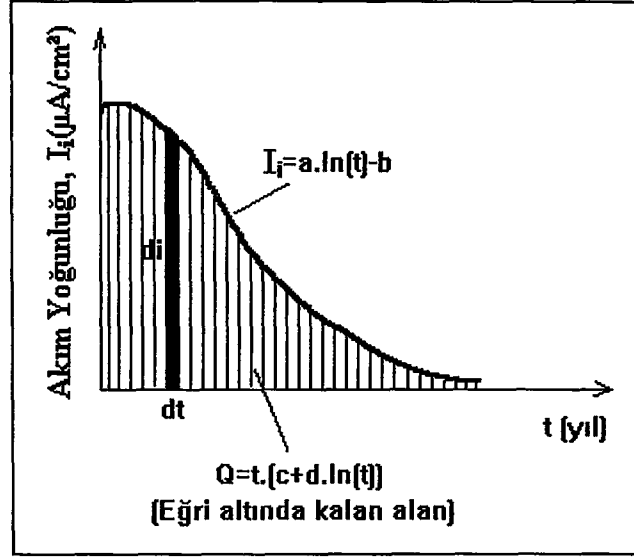
$t$  : Zaman (yıl)

Andrade ve arkadaşlarının yaptığı deneysel çalışmaların sonucunda, betonun çatlaması için geçecek sürenin belirlenmesi için, 2.39 bağıntısında verilen ve donatı çapındaki azalmanın (mm) korozyon hızına oranı (mm/yıl) ile ifade edilen basit nümerik model geliştirilmiştir.

Çalışmanın bu bölümünde durabilite ve hızlandırılmış donatı korozyonu deney sonuçlarından yararlanılarak, korozyon hasarı nedeni ile yapı elemanının servis ömrünün tahmini için geliştirilen matematiksel model, aşamaları ile açıklanmıştır. Bu model ile

farklı silis dumanı oranı, klorür konsantrasyonu ve bu oranlar için belirlenen hızlandırma faktörüne bağlı olarak penetrasyon derinliği ( $p, \mu/\text{yıl}$ ) hesaplanmıştır. Seçilen kritik kesit kaybı ( $\Delta\phi_{s,cr}$ ) ile hesaplanan penetrasyon derinliği karşılaştırılarak, betonarme elemanın kritik çatlama süresi ( $t_{cr}, \text{yıl}$ ) tahmin edilmiştir.

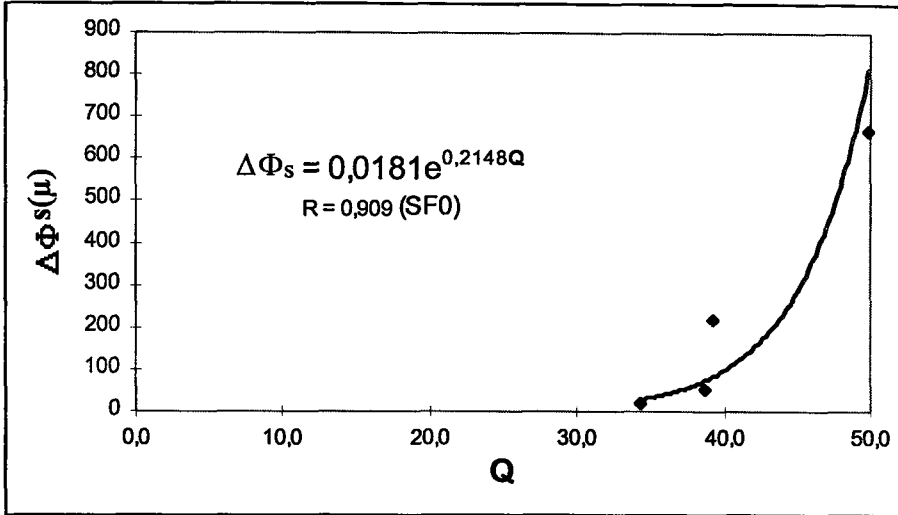
Bölüm 4.4.1’de irdelenen ve Şekil 4.21.a-4.21.b ile Şekil 4.22.a-4.22.b’de gösterilen Akım şiddeti-Zaman eğrilerinin altında kalan alan,  $t$  zamanda beton içinden geçen toplam akım miktarını verir. Toplam akım miktarı, donatının yüzey alanına, beton özelliklerine, sisteme uygulanan gerilime v.b. parametrelere bağlı olarak değişir. Akım şiddeti ile zaman arasındaki ilişkiyi araştırmak için laboratuvar ortamında havada bekletilen 12 gruba ait toplam 36 numunenin deney sonuçlarından yararlanılmıştır. Modelin geliştirilmesinde, öncelikle elemandan geçen akımı birim alana indirgemek üzere, akım şiddeti ( $\mu\text{A}$ ) donatı yüzey alanına bölünmüş,  $y$  ekseninde  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  cinsinden akım yoğunluğu ( $I_p$ ) olarak gösterilmiştir. Akım Yoğunluğu ( $I_p, \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) ile Zaman( $t, \text{yıl}$ ) arasındaki ilişki, Çizelge 4.2’de verilen ve korelasyon katsayısı ( $R$ ) yüksek olan denklemler ile ifade edilmiş, Şekil 4.37’de genel olarak gösterilmiştir. Her bir denklem, hızlandırılmış korozyon deneyi ile bilgisayar ortamında kaydedilmiş, toplam 247 veri ile belirlenmiştir. Bu eğrilerin altında kalan alanın ( $Q$ ) hesaplanması için, denklemlerin integralleri alınmış, zamana bağlı toplam akım miktarının bağıntıları elde edilmiştir. Çizelge 4.2’de ayrıca, elde edilen bu bağıntılar ve donatı çapında 7 gün sürdürülen hızlandırılmış korozyon deneyi sonucunda meydana gelen kayıplar ( $\Delta\phi_s, \mu$ ) da verilmiştir. Donatı çapındaki kayıp, ağırlık kaybının, donatı birim ağırlığına ve yüzey alanına bölünmesi ile hesaplanmıştır. Hesaplarda, korozyonun numunenin tüm yüzeyinde üniform olduğu kabul edilmiştir.

Şekil 4.37 Akım Yoğunluğu ( $I_i$ ,  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )-Zaman( $t$ , yıl) eğrisi

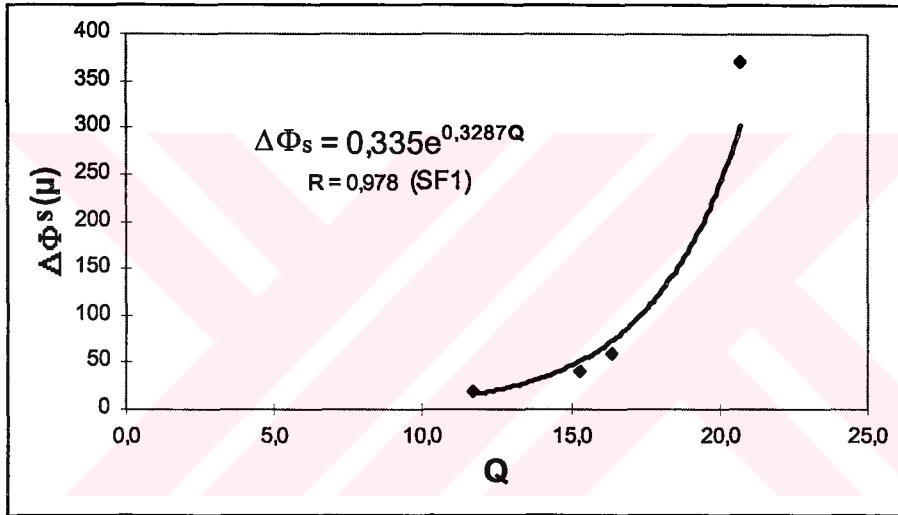
Çizelge 4.2 Akım yoğunluğu-zaman eğrileri, eğrilerin altında kalan alan ve çapdaki kayıp

Numune Adı	$I_i$ - $t$ eğrilerine ait denklemler	Korelasyon Katsayısı (R)	Q ( $I_i$ - $t$ eğrilerinin altında kalan alan)	$\Delta\phi_s, \mu$
SFOA0	$I_i = -787\ln(t) - 2108$	0.938	$Q = t[-1321 - 787\ln(t)]$	20
SFOA1	$I_i = -1142\ln(t) - 3639$	0.939	$Q = t[-2497 - 1142\ln(t)]$	20
SFOA2	$I_i = -1175\ln(t) - 3771$	0.944	$Q = t[-2596 - 1175\ln(t)]$	220
SFOA3	$I_i = -2100\ln(t) - 7806$	0.946	$Q = t[-5705 - 2100\ln(t)]$	670
SF1A0	$I_i = -112\ln(t) + 53$	0.869	$Q = t[165 - 112\ln(t)]$	20
SF1A1	$I_i = -175\ln(t) - 70$	0.881	$Q = t[105 - 175\ln(t)]$	40
SF1A2	$I_i = -303\ln(t) - 647$	0.923	$Q = t[-344 - 303\ln(t)]$	60
SF1A3	$I_i = -565\ln(t) - 1720$	0.967	$Q = t[-1155 - 565\ln(t)]$	370
SF2A0	$I_i = -62\ln(t) - 53$	0.875	$Q = t[9 - 62\ln(t)]$	30
SF2A1	$I_i = -100\ln(t) - 134$	0.887	$Q = t[-34 - 100\ln(t)]$	50
SF2A2	$I_i = -217\ln(t) - 596$	0.963	$Q = t[-379 - 217\ln(t)]$	90
SF2A3	$I_i = -302\ln(t) - 755$	0.948	$Q = t[-453 - 302\ln(t)]$	320

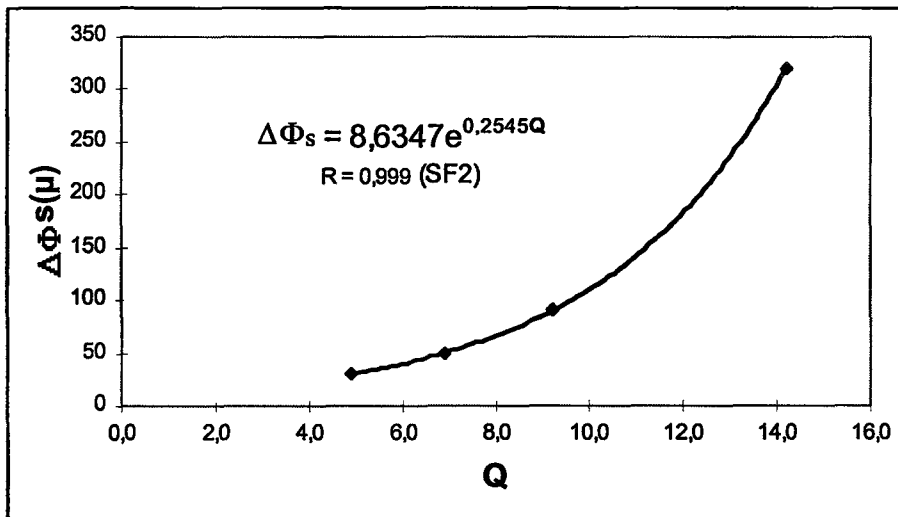
$I_i$ - $t$  eğrilerinin altında kalan alan (Q), hızlandırılmış korozyon deneyinin uygulandığı 7 günlük süre esas alınarak hesaplanmıştır. Farklı oranlarda silis dumanı içeren beton grupları için hesaplanan bu Q değerleri ile bu gruplara ait donatı çapındaki kayıplar ( $\Delta\phi_s, \mu$ ) arasındaki ilişki, bir tablolaştırma programı kullanılarak araştırılmış, Şekil 4.38.a-c'de görülen ve korelasyon katsayısı yüksek, 4.3-4.5 ilişkileri bulunmuştur.



Şekil 4.38.a Havada 28 gün bekletilen numunelerin ( $\Delta\Phi_s$ -Q) ilişkisi



Şekil 4.38.b Havada 28 gün bekletilen %10 silis dumanı katkılı grubun ( $\Delta\Phi_s$ -Q) ilişkisi



Şekil 4.38.c Havada 28 gün bekletilen %20 silis dumanı katkılı grubun ( $\Delta\Phi_s$ -Q) ilişkisi

Şahit numuneler için,

$$\Delta\phi_s = 0.018e^{0.215Q} \quad (R=0.909) \quad (4.3)$$

%10 silis dumanı katkılı numuneler için,

$$\Delta\phi_s = 0.335e^{0.329Q} \quad (R=0.978) \quad (4.4)$$

%20 silis dumanı katkılı numuneler için,

$$\Delta\phi_s = 8.635e^{0.254Q} \quad (R=0.999) \quad (4.5)$$

Yapılan ön araştırmadan hesaplanan Q değerleri ile hem silis dumanı oranı hem de klorür konsantrasyonu arasında lineer ilişki olduğu belirlenmiştir. Bu tespitler dikkate alınarak, penetrasyon derinliği ( $p$ ,  $\mu$ /yıl) ile serbest klorür konsantrasyonu ( $C_{ci}$ ) ve silis dumanı oranı (SF) arasındaki matematiksel ilişki, bir istatistiksel analiz programı yardımı ile araştırılmış, aşağıdaki 4.6 bağıntısı elde edilmiştir. Bağıntıdaki  $C_{ci}$  değerleri için, Çizelge Ek.7'de gösterilen ve donatı çevresindeki beton toz numuneden (45-50 mm derinlik) hazırlanan çözeltilerdeki serbest klorür miktarlarından yararlanılmıştır. Penetrasyon derinliği ( $p$ ,  $\mu$ /yıl) ise hızlandırılmış korozyon deneyindeki 7 günlük süredeki kesit kaybının ( $\Delta\phi_s$ ), 1 yıldaki değerine dönüştürülmesi ile elde edilmiştir. Bu dönüşümde donatı çapındaki kaybın lineer olacağı kabul edilmiştir.

$$p=1806.e^{0.004(C_{ci}-SF)} \quad (R=0.934) \quad (4.6)$$

$p$  : Penetrasyon derinliği ( $\mu$ /yıl)

$C_{ci}$  : Beton numuneden hazırlanan çözeltilerin serbest klorür konsantrasyonu (mg/L)

SF : Silis dumanı oranı (çimento ağırlığının %'si)

Hızlandırılmış korozyon deneyleri ile belirlenen 4.6 bağıntısının, laboratuvar ortamında bekletilen gruplardaki penetrasyon derinliği ile karşılaştırılabilmesi için, hızlandırma faktörünün ( $\alpha_{AF}$ ) belirlenmesi gerekir. Bu amaçla, korozyonu hızlandırılan donatıların

ağırlık kaybı, aynı gruptaki hızlandırılmamış numunelerin ağırlık kaybına oranlanarak elde edilen değerler ile, silis dumanı oranı ve klorür konsantrasyonu arasındaki ilişki araştırılmış, 4.7’de verilen hızlandırma faktörü ( $\alpha_{AF}$ ) bağıntısı çıkarılmıştır.

$$\alpha_{AF}=1211.608+16.803SF+4.580C_{ci} \quad (R=0.960) \quad (4.7)$$

Matematik modelin geliştirilmesinde, kritik kesit kaybının ( $\Delta\phi_{s,cr}$ ) seçimi son aşamayı oluşturmaktadır. Bu amaçla, deneylerde kritik çatlama süreleri belirlenen numunelerden ve konu ile ilgili daha önceki çalışmalardan yararlanılmıştır.

Andrade ve arkadaşları (1993) tarafından yapılan çalışmada, betonda gözle görülebilir genişlikteki (0.05-0.1 mm) çatlak oluşumuna, donatıdaki 10-20  $\mu$  gibi çok küçük kayıpların neden olduğu tespit edilmiştir. Gonzalez vd. (1995b) ise, donatı çapında 10-50  $\mu$ ’luk kayıp oluşturan demir oksit tabakasının, 2-3 cm’lik beton örtüyü çatlatacağını belirtmektedirler.

Bu çalışmadaki numunelerin ve deney yönteminin özelliklerine bağlı olarak, betonda çatlama neden olan kesit kaybını belirlemek ve bu kaybı literatürdeki değerler ile karşılaştırmak amacı ile, betonun çatladığı an bilgisayardaki kayıtlardan tespit edilen deney sonuçlarından yararlanılmıştır. Bu amaçla, karma suyuna  $Cl^-$  katılmış SF0A2, SF0A3, SF1A3 ve SF2A3 numunelerin, beton yüzeyinde çatlağın oluştuğu anda donatı çapındaki kayıp, 4.1-4.3 bağıntıları ile hesaplanmış ve sırası ile 26, 1, 3 ve 14  $\mu$  bulunmuştur. Hesaplanan kesit kayıplarının, literatürde verilen değerlere yakın oluşu ile deney sonuçlarından geliştirilen 4.1-4.3 bağıntılarının uygunluğu kontrol edilmiştir. Betonun yarma dayanımına ulaştığı andaki değerler esas alınarak, SF0A2, SF0A3, SF1A3 ve SF2A3 grupları için, sonlu elemanlar metodu ile yapılan nümerik analizde, betonun çatlama neden olan donatıdaki pas ürününün kalınlığı, 86, 100, 92 ve 90  $\mu$  olarak hesaplanmıştır. Korozyon ürününün hacim artışının, donatı çapındaki kaybın 6 misli olacağı kabulü ile (Mehta, 1986); sonlu elemanlar metodundan yararlanılarak bulunan değerlerin sırası ile 14, 17, 15 ve 15  $\mu$ ’luk teorik kesit kayıplarına karşı geleceği söylenebilir. Deneylerin ve teorik hesaplamaların sonucunda, Gonzalez ve arkadaşları

tarafından verilen 10-50  $\mu$ 'luk kesit kaybı, betonun çatlamasına neden olacak kritik değer ( $\Delta\phi_{s,cr}$ ) olarak alınabilir. 4.6, 4.7 bağıntıları ve seçilen  $\Delta\phi_{s,cr}$  kritik değeri kullanılarak, betonarme bir yapı elemanının donatı korozyonu nedeni ile çatlaması için geçecek süre ( $t_{cr}$ , yıl), 4.8 bağıntısı yardımı ile deterministik olarak tahmin edilebilir.

$$t_{cr} = \frac{\Delta\Phi_{S,CR} \cdot \alpha_{AF}}{p} = \frac{\Delta\Phi_{S,CR} \cdot (1211,608 + 16,803 \cdot SF + 4,580 \cdot C_{ci})}{1806 \cdot e^{0.004(C_{ci} - SF)}} \quad (4.8)$$

Örneğin, 800 mg/L serbest klorür konsantrasyonuna sahip, %10 silis dumanı katkılı bir betonun hızlandırma faktörü;

$$\alpha_{AF} = 1211.608 + 16.803 \times 10 + 4.580 \times 800 = 5044$$

Hesaplanan hızlandırma faktörü değeri ve veriler 4.8 bağıntısında yerine konulursa,  $\Delta\phi_{s,cr} = 10\mu$  ve  $\Delta\phi_{s,cr} = 50\mu$  için veya bu değerler arasında seçilecek bir  $\Delta\phi_{s,cr}$  için  $t_{cr}$  değerleri hesaplanır. Buna göre;

$$t_{cr} = \frac{10 \times 5044}{1806 \cdot e^{0.004(800-10)}} \quad \text{veya} \quad t_{cr} = \frac{50 \times 5044}{1806 \cdot e^{0.004(800-10)}}$$

ile yapı elemanın korozyondan çatlaması için geçecek süre, 1.2 yıl ile 6 yıl arasında değer olacaktır. Bu matematiksel model, sisteme 40 V'luk sabit gerilim ve 0.5 MPa'lık sabit aderans gerilmesi uygulanan, hızlandırılmış korozyon deneyi ile laboratuvar koşullarındaki durabilite deneylerinden elde edilen sonuçlardan yararlanılarak çıkarılmıştır. Doğal ortam koşullarındaki bir süreçte gelişecek olan korozyon olayında, hasar süresi için  $t_{cr,min}$  ve  $t_{cr,max}$  gibi geniş bir zaman aralığı kaçınılmazdır. Bu nedenle modelin, belirli güvenilirlik düzeyi ile stokastik yaklaşımla değerlendirilmesi gerekir. Hesaplanacak değerlerde, yapı elemanının bulunduğu ortam koşulları, elemanının işlevi, malzeme özellikleri gibi parametreler dikkate alınarak deneysel olarak belirlenecek katsayı ve katsayılar gereklidir.



## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Donatı korozyonunun araştırıldığı bu çalışma kapsamında, donatı korozyonunu etkileyen parametreler, silis dumanı, klorür ve kür koşullarının etkisi de dikkate alınarak, hızlandırılmış donatı korozyonu deneyleri ve uzun süreli durabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarından yararlanılarak, betonarme bir yapı elemanının belirli koşullardaki korozyon hasarı nedeni ile kritik çatlama süresinin tahmini için, matematiksel bir model geliştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler, aşağıda kısaca özetlenmiştir.

1. Silis dumanı, numunelerin bağıl nemi yüksek ortamda kür edilmesi koşulu ile, betonun basınç ve yarma dayanımını artırmıştır. Silis dumanı oranı arttıkça dayanım artmaktadır, ancak kullanılacak çimentonun ve silis dumanının özelliklerine bağlı olarak, optimum oranının durabilite deneyleri ile belirlenmesi doğru olacaktır.
2. Silis dumanı, donatı ile çimento hamuru arayüzünde daha yoğun bir geçiş bölgesi oluşturarak, aderans dayanımında silis dumanı oranına bağlı olarak, %100'ün üzerinde artışlar sağlamıştır.
3. Silis dumanı betonun geçirimliliğini önemli ölçüde azaltmış, elektriksel direncini artırmıştır. Klorür geçirimliliği son derece düşük ve elektriksel direnci çok yüksek olan silis dumanı katkılı betonlar, donatıda makro ve/veya mikro korozyon hücrelerinin oluşmasını önleyerek elemanın dayanıklılığına olumlu etki yapmıştır.
4. Betonun basınç dayanımı ile, çekme dayanımı arasında standartlarda verilen ilişkiler, silis dumanı katkılı betonlar için de geçerlidir. Ancak betona üretim aşamasında herhangi bir nedenle klorür karışması veya klorür iyonlarının sertleşmiş betona dışarıdan difüzyonu durumunda beton özelliklerinde önemli değişiklikler meydana geldiğinden, basınç dayanımı ile yarma deneyinden belirlenen çekme dayanımı arasındaki bu bağıntılar geçerliliğini yitirmektedir. **Bu çalışmadan elde edilen orjinal sonuca göre, klorür etkisinde kalan, beton ve/veya betonarme elemanlarda,**

**kalitenin sadece basınç dayanımı ile denetlenmesi yeterli değildir; çekme dayanımının da denetlenmesi gerekir.**

5. Silis dumanı katkılı betonların Schmidt çekici ve ultrases kullanılarak tahribatsız deney yöntemleri ile tahmin edilen basınç dayanımı değerleri, basınç deneyinden elde edilen değerler ile paralellik göstermektedir. Ancak ortamda klorür iyonlarının bulunması durumunda tahribatsız yöntem ile tahmin edilen dayanımlar ile basınç deneyinden elde edilen değerler arasında önemli farklar görülmüştür. **Bu çalışmanın sonucuna göre, klorür etkisindeki yapı elemanlarında basınç dayanımının, yüzey sertliği, ses geçiş hızı gibi tahribatsız yöntemler ile değerlendirilmesinde güvenilirlik düzeyinin düşük olacağı dikkate alınmalıdır.**
6. Betona silis dumanı katılmış olması ve oranı, rötreyi önemli oranda etkilememiştir. Ancak betonda terlemeyi önlediği için erken plastik rötrenin artacağı dikkate alınmalı, silis dumanı katkılı betonların kürüne özen gösterilmelidir. Bu amaçla beton yüzeyleri örtülerek, priz süresince buharlaşma önlenmeli ve betonun nemli ortamda tutulması sağlanmalıdır.
7. Betona üretim aşamasında klorür iyonlarının karışmasını temsilen, farklı klorür konsantrasyonundaki NaCl çözeltilerinin karma suyu olarak kullanıldığı silis dumanı katkılı betonlarda, serbest klorür iyonu miktarının katkısızdan daha fazla olduğu belirlenmiştir. Silis dumanı katkılı betonlarda serbest klorür miktarının artması, ortamın alkalinitesinin azalması nedeni ile, Friedel Tuzu adı verilen kalsiyumkloraalüminat ürününün, çözünürlüğünün artması ile açıklanmaktadır. Serbest klorür iyonlarının artması, donatı korozyonunu hızlandırdığından, korozyonun ileri aşamasında aderans dayanımında da düşüş gözlenmiştir. **Bu çalışmanın verilerine göre varılan bir diğer sonuç, silis dumanı katkılı beton üretiminde malzemelerin klorür içermesinin son derece sakıncalı olacaktır.**

8. Betona silis dumanı katılması, karbonatlaşma derinliğini artırmıştır. Karbonatlaşma derinliğinin artması, silis dumanının beton içindeki  $\text{Ca(OH)}_2$ 'yi bağlamış olması nedeni ile havadaki  $\text{CO}_2$ 'nin daha derine doğru nüfuz etmiş olmasına bağlanabilir. Karbonatlaşma derinliğinde ayrıca klorürün varlığı da etkili olmuş, derinlik daha büyük değerler almış, ancak klorür konsantrasyonunun etkisi gözlenmemiştir. **Bu çalışmadaki deney sonuçlarına göre, silis dumanının ve klorürlerin bu etkileri de dikkate alınarak, beton yaşının ve basınç dayanımının tahmininde kullanılan karbonatlaşma derinliği ile ilgili bağıntıların, yeniden gözden geçirilmesi doğru olacaktır.**
9. Yapılan deneylerde aderans dayanımı, korozyon hızının belirli bir seviyesine kadar artmış, korozyon hızının çok yüksek değerler alması durumunda azalmıştır. Klorür difüzyonu etkisinde kalan betonarme numunelerde, aderans dayanımlarında önemli değişim gözlenmemiştir. Yüksek oranda  $\text{Cl}^-$  içeren numunelerde donatı korozyonunun hızlandırılması ile, aderans dayanımında önemli düşüş olmuştur. Bu nedenle korozyon etkilerinin araştırıldığı çalışmalarda aderans dayanımının öncelikle gözönüne alınması gerekir. Karma suyu yüksek konsantrasyonda klorür içeren silis dumanı katkıli numunelerin, aderans dayanımındaki büyük kayıplar, silis dumanı katkıli betonun herhangi bir nedenle klorür içermesinin olumsuz etkisini bir kez daha ortaya koymuştur. Puzolan katkıli çimentolar ile beton üretiminde özellikle ince agregaların (deniz kumu) klorür oranı, büyük önem taşımaktadır.
10. Donatıdaki korozyonun durumu, hem uzun süreli durabilite deneyleri için hazırlanan betonarme numunelerde hem de hızlandırılmış korozyon deneyi numunelerinde yarı hücre potansiyel ölçümleri ile araştırılmıştır. Yapılan ölçümlerden niteliksel bir değerlendirme yöntemi olan yarı hücre potansiyel değerleri ile donatı korozyonunun gerçek durumu arasında çelişki olduğu görülmüştür. Bu nedenle uygulamada hızlı ve kolay sonuç alınmasına olanak sağlayan bu yöntemin güvenilirliğinin düşük seviyede olduğu dikkate alınmalı, donatı korozyonunun sadece yarı hücre potansiyeli ile değerlendirilmesinden kaçınılmalıdır.

11. Betonarme numunelerden çıkarılan donatılarda yapılan çekme deneyi sonuçlarına göre; çeliğin çekme ve akma dayanımlarında ve düktilitesinde bir değişiklik görülmemiştir. Korozyon nedeni ile meydana gelen ağırlık kaybı, betonarmede kullanılacak donatı için standartlarda belirtilen %6 sınır değerini aşmamıştır. Buna rağmen betonarme numunelerin çatlamış olması, asıl problemin betonarmede donatının korozyonu sonucu oluşan korozyon ürününün neden olduğu hacim artışının, betonda yaptığı hasar ve aderans kaybı olduğunu göstermektedir. Çünkü donatıda korozyon nedeni ile %0.5'i aşan ağırlık kaybı, donatı çapında yaklaşık 50  $\mu$ 'luk kayıba karşı gelmektedir. Donatı çapındaki 10-50 $\mu$ 'luk kayıp nedeni ile oluşan ürünün hacim artışı, betonda çatlak oluşumuna neden olmaktadır. **Bu çalışmadaki deney sonuçları dikkate alınarak, standartlarda donatıdaki ağırlık kaybı için verilen %6'lık sınır değere ek olarak, beton içindeki donatının ağırlık kaybı için %0.5 sınır değeri verilmelidir.**

12. Donatıda korozyonunun hızlandırılması amacı ile bu çalışmada geliştirilen deney yönteminde, sisteme sabit gerilim ve sabit aderans gerilmesi uygulanmış, akım şiddetindeki değişim ve betondaki deformasyonlar zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. Bu ölçümlerden, farklı özellikteki betonların elektriksel direnci araştırılmış ve deformasyonlar yardımı ile betonun çatladığı an 1 saatlik duyarlılıkla belirlenmiştir. Donatı korozyonu hızlandırılan betonarme numunelerin aderans dayanımındaki önemli kayıplar, geliştirilen bu yöntemde aderans gerilmesi uygulanmasının gerekliliğini göstermiştir. Hızlandırılmış korozyon deneyinden alınan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Silis dumanı katkılı betonlardan geçen akım miktarının şahitinkinden çok daha düşük değer alması, silis dumanının betonun elektriksel direncini artırdığının ve korozyon akım yoğunluğunu azaltarak donatı korozyonunu geciktirdiğinin bir göstergesidir.

- Klorür difüzyonuna maruz betonlarda, beton içinden geçen akım miktarı daha yüksek değerler almıştır. Silis dumanı katkılı betonlar, yaklaşık kuru betonun gösterdiği direnci göstermiş, akım şiddetini önemli oranda düşürmüştür.
  - Havada kür edilen şahit, silis dumanı ve klorür katkılı betonlarda ise, akım şiddeti bakımından çok önemli fark görülmemiştir. Bu grupta silis dumanı oranının ve klorür konsantrasyonunun etkisi, kritik çatlama süresi ile değerlendirilmiştir.
  - Silis dumanı, betonun çekme dayanımını ve elektriksel direncini artırarak, donatı korozyonu nedeni ile betonda çatlak oluşumunu engellemiştir. Sadece 40000 mg/L gibi yüksek Cl<sup>-</sup> konsantrasyonundaki çözeltilerin etkisinde kalan numunelerde, klorür difüzyonu ile donatının korozyonu artmış, betonda donatıya paralel doğrultuda çatlak oluşmuştur.
  - Karma suyu olarak 40000 mg/L Cl<sup>-</sup> konsantrasyonundaki çözeltilerin kullanılması durumunda silis dumanı, betonun daha kısa sürede çatlmasına neden olmuştur. Uzun süreli durabilite deneylerinde olduğu gibi, hızlandırılmış korozyon deneyi sonuçlarından da betona klorür karışması durumunda, silis dumanının donatı korozyonunu hızlandıracağı görülmüştür.
13. Çalışmanın son bölümünde durabilite ve hızlandırılmış donatı korozyonu deney sonuçlarından yararlanılarak, **donatı korozyonu hasarı nedeni ile yapı elemanının kritik çatlama süresinin tahmini için bu çalışma kapsamında aşağıdaki matematiksel model geliştirilmiştir.**

$$t_{cr} = \frac{\Delta\Phi_{S,CR} \cdot \alpha_{AF}}{p}$$

Bu model ile farklı silis dumanı oranı, klorür konsantrasyonu ve bu oranlar için belirlenen hızlandırma faktörüne bağlı olarak penetrasyon derinliği ( $p$ ,  $\mu$ /yıl) hesaplanacak, seçilen kritik kesit kaybı ( $\Delta\phi_{s,cr}$ ) ile penetrasyon derinliği

karşılaştırılarak, laboratuvardaki belirli koşullardaki betonarme elemanın kritik çatlama süresi ( $t_{cr}$ , yıl) tahmin edilebilecektir. Ancak doğal ortam koşullarındaki bir süreçte gelişecek olan donatı korozyonu nedeni ile elemanın çatlama için geçecek sürenin hesaplanmasında, yapı elemanının bulunduğu ortam koşulları, elemanın işlevi, malzeme özellikleri gibi parametreler dikkate alınmalıdır.

14. Bu çalışmada geliştirilmiş olan, hızlandırılmış korozyon deneyi yöntemi ile yapılacak çalışmalardan daha hızlı sonuç alınması için; sisteme uygulanan sabit aderans gerilmesinin değeri artırılabilir. Sabit gerilim altında özellikle kuru beton içinden geçen akım miktarının çok düşük değerler alması nedeni ile deney süresi uzamaktadır. Deney süresini kısaltmak için, donatı korozyonu mekanizmasını tam olarak yansıtmasa da sistemdeki akım şiddeti sabit tutularak, potansiyel değişimi gözlenir, donatı korozyonu hızlandırılabilir.

## KAYNAKLAR

AASHTO T-277-831 Standard Method of Test for Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete.

Abo El-Enein, S.A., Kotkata, M.F., Hanna, G.B., Saad, M. ve Abd El Razak, M.M., (1995), "Electrical Cunductivity of Concrete Containing Silica Fume", Cement and Concrete Research, 25(8):1615-1620.

Akman, M.S., (1990), Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul.

Akman, M.S., (1992a), Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul.

Akman, M.S., (1992b), "Betonarme Yapılarda Yangın Hasarı ve Yangın Sonunda Taşıyıcılığının Belirlenmesi", Yapıda Yangından Korunma Sempozyumu, 26.11.1992, İstanbul.

Akman, M.S, Öztekin, E. ve Erdinç, M., (1994), "Düşük Çimento Dozajlı ve Uçucu Kül Katkılı Hazır Betonlarda Dayanım ve Dayanıklılık", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 3. Ulusal Beton Kongresi, Hazır Beton, 19-21. 10. 1994, İstanbul, 297-310.

Akman, M.S, ve Erdinç, M. (1997), "Uçucu Küllü Betonlarda Klor Geçirimsizliği", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu 3, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 1-2. 10. 1997, Eskişehir, 1-19.

Aköz, F. ve Yüzer, N., (1994), "Yüksek Sıcaklığın Nedenleri ve Betonarme Elemanlara Etkileri", Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, (3):89-98.

Aköz, F., Yüzer, N. ve Koral, S., (1995a), "Portland Çimentolu ve Silis Dumanı Katkılı Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkileri", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Teknik Dergi, 6(1):919-931.

Aköz, F., Türker, F., Koral, S. ve Yüzer, N., (1995b), "Effects of Sodium Sulfate Concentration on the Sulfate Resistance of Mortars With and Without Silica Fume", Cement and Concrete Research, 25(6):1360-1368.

Aköz, F., Türker, F., Koral, S. ve Yüzer, N., (1995c), "20°C ve 40°C Sıcaklıklardaki Magnezyum Sülfat Çözeltisinin Normal ve Silis Dumanı Katkılı Harçlara Etkisi", İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, II. Teknik Kongre, 18-20. 9. 1995, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 339-348.

Aköz, F., Yüzer, N. ve Koral, S., (1995d), "Silis Dumanı Katkılı ve Katkısız Harç İçindeki Çeliğe Farklı Konsantrasyonlardaki Sodyum Klörürün Etkisi", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, 29-30. 10. 1995, Ankara, 185-199



Aköz, F., Yüzer, N. ve Koral, S., (1996a), "Betonarme Çeliğinin Korozyonuna Sodyum Klorür ve Magnezyum Klörürün Etkileri", V.Korozyon Sempozyumu, 6-9. 11. 1996, Çukurova Üniversitesi Adana, 114-123.

Aköz, F., Yüzer, N. ve Koral, S., (1996b), "Silis Dumanı Katkılı ve Katkısız Harç İçindeki Çeliğe Farklı Konsantrasyonlardaki Magnezyum Klörürün Etkisi", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 4.Ulusal Beton Kongresi, 30-31. 10 - 1. 11. 1996, İstanbul, 317-326.

Aköz, F., Yüzer, N. ve Koral, S., (1996c), "Silis Dumanı Katkılı ve Katkısız Harçlara Sodyum Klorür ve Magnezyum Klörürün Etkileri TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 4.Ulusal Beton Kongresi, 30-31. 10 - 1. 11. 1996, İstanbul, 305-316.

Aköz, F., Yüzer, N., Biricik, H. ve Koral, S., (1997), "Silis Dumanı Katkılı Beton Özelliklerine Kür Koşullarının Etkileri", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu 3, 1-2. 10. 1997, Eskişehir, 63-71.

Al-Amouidi, O.S.B., Rasheeduzzafar, Maslehuddin, M., (1991), "Carbonation and Corrosion of Rebars in Salt Contaminated OPC/PFA Concretes", Cement and Concrete Research, 21(1):38-50.

Al-Amouidi, O.S.B. ve Maslehuddin, M., (1993), "The Effect of Chloride and Sulphate Ions on Reinforcement Corrosion", Cement and Concrete Research, 23(1):139-146.

Allam, I.M., Maslehuddin, M., Sarcimen, H. ve Al-Mana, A.I., (1994), "Influence of Atmospheric Corrosion on the Mechanical Properties of Reinforcing Steel", Construction and Building Materials, 8(1):35-41.

Alonso, C., Andrade, C. ve Gonzalez, J.A., (1988), "Relation Between Resistivity and Corrosion Rate of Reinforcements in Carbonated Mortar Made with Several Cement Types", Cement and Concrete Research, 18(5):687-698.

Al-Tayyib, A.J. ve Khan, M.S., (1988), "Corrosion Rate Measurements of Reinforcing Steel in Concrete by Electrochemical Techniques", ACI Materials Journal, May-June:172-177.

Andrade, C., Alonso, C. ve Molina, F.J., (1993), "Cover Cracking as a Function of Bar Rebar Corrosion : Part I-Experimental Test", Materials and Structures, 26:453-464.

Andrade, C., Alonso, C., Rodriguez, J. ve Garcia, M., (1996), "Cover Cracking and Amount of Rebar Corrosion : Importance of the Current Applied Accelerated Tests", Concrete Repair, Rehabilitation and Protection, E&FN Spon, London, 263-273.

Angi, L., Booyu, L., Guoping, H., Yeibo, C. ve Guolion, S., (1991), "Study on Corrosion Prevention in Reinforced Concrete Containing Condensed Silica Fume and its Application", II. CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Canada, 499-509.



APHA, (1989), Standard Method for the Examination of Water and Waste Water, 17th Edition, AWWA, WPEF, Washington, 4.66- 4.74.

Arıoğlu, E. ve Köylüoğlu, Ö.S., (1996), “Tahribatlı ve Tahribatsız Yöntemlerin Beton Dayanımının Değerlendirilmesi”, Çimento ve Beton Dünyası, 1(3):33-34.

Arıoğlu, E., (1996). “Betonun Çekme ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki”, Teknik Dergi, 7(1):1153-1157.

ASM Handbook, (1992), Volume 13 Corrosion, 4. baskı, ASM International.

ASTM A-615-90, American Society for Testing and Materials, Standard Specifications for Deformed and Plain Billet Steel Bars for Concrete Reinforcement.

ASTM C-876-91, American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.

ASTM C-597-71, American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.

ASTM G1- 90, American Society for Testing and Materials, Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens.

Azari, M.M., Mangat, P.S. ve Tu, S.C., (1993), “Chloride Ingress in Microsilica Concrete”, Cement and Concrete Composites, 15:215-221.

Basunbul, İ.A., Dehwah, H.A.F. ve Maslehuddin, M., (1991), “Onarılmış Betonarme Kolonlarda Çelik Donatının Korozyonu”, Korozyon, 3(2):49-53.

Berke, N.S., (1989), “Resistance of Microsilica Concrete to Steel Corrosion, Erosion and Chemical Attack”, III. CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, Norway, 861-886.

Bijen, J., Wegen, G. ve Selst, R., (1989), “Carbonation of Portland Blast Furnace Slag Cement Concrete with Flyash”, III. CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, Norway, 645-668.

Biricik, H., (1995), Buğday Sapı Külünün Puzolanik Özellikleri ve Külün Çimento Harcının Dayanıklılığına Etkisi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs, İstanbul.

Birincioğlu, T. ve Tokyay, M., (1996), “Bazı Mineral Katkı Maddelerin Harç Numunelerindeki Hacim Değişikliğine Etkileri”, Çimento ve Beton Dünyası, 2(1):38-41.

Bonen, D., (1993), "A microstructural Study of the Effect Produced by Magnesium Sulfate on Plain and Silica Fume Bearing Portland Cement Mortars", *Cement and Concrete Research*, 23(3):541-553.

BS 1881: Part 117, (1983), *Testing Concrete, Method for Determination of Tensile Splitting Strength*.

Byfors, K., Hansson, C.M. ve Tritthart, J., (1986), "Pore Solution Expression as a Method to Determine The Influence of Mineral Additives on Chloride Binding", *Cement and Concrete Research*, 16(5):760-770.

Byfors, K., (1987), "Influence of Silica Fume and Flyash on Chloride Diffusion and pH Values in Cement Paste", *Cement and Concrete Research*, 17(1):115-130.

Cabrera, J.G. ve Claisse, P.A., (1990), "Measurement of Chloride Penetration into Silica Fume Concrete", *Cement and Concrete Composites*, 12:157-161.

Cabrera, J.G., (1996), "Deterioration of Concrete Due to Reinforcement Steel Corrosion", *Cement and Concrete Composites*, 18:47-59.

Çakır, A.F., (1984), "İnşaat Endüstrisinde Korozyon ve Katodik Koruma Yöntemi ile Korunma", İTÜ İnşaat Fakültesi Malzeme Semineri.

Çakır, A.F., (1994), "Türkiye'nin Metalik Korozyon Kaybı", IV.Korozyon Sempozyumu, 25-27. 10. 1994, İstanbul Teknik Üniversitesi İstanbul, 1-8.

Ceukelaire, L. ve Nieuwenburg, D., (1993), "Accelerated Carbonation of a Blast-Furnace Cement Concrete", *Cement and Concrete Research*, 23(2):442-452.

Chatterji, S., (1995), "On the Applicability of Fick's Second Law To Chloride Ion Migration Through Portland Cement Concrete", *Cement and Concrete Research*, 25(2):299-303.

Deja, J., Malolepszy, J. ve Jaskiewicz, G., (1991), "Influence of Chloride Corrosion on the Durability of Reinforcement in the Concrete", II. CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Canada, 511-525.

Dhir, R.K., Jones, M.R., Ahmed, H.E.H. ve Seneviratne, A.M.G., (1990), "Rapid Estimation of Chloride Diffusion Coefficient in Concrete", *Magazine of Concrete Research*, 42(152):177-185.

Dhir, R.K., Jones, M.R. ve McCaherty, M.J., (1996a), "Binder Content Influences on Chloride Ingress in Concrete", *Cement and Concrete Research*, 26(12):1761-1766.

Dhir, R.K., El-Mohr, M.A.K. ve Dyer, T.O., (1996b), "Chloride Binding in GGBS Concrete", *Cement and Concrete Research*, 26(12):1767-1779.

Doğan, M. and Yalçın, H. (1989), “Çeliğin Beton İçindeki Korozyonu”, Korozyon, 1(3):125-130.

Ersoy, U., (1987), Betonarme, Cilt 1., Evrim Basım Yayım Dağıtım.

Fattuhi, N.I., (1988), “Concrete Carbonation as Influenced by Curing Regime”, Cement and Concrete Research, 18(3):426-430.

Feldman, R.F. ve Cheng-yi, H., (1985), “Resistance of Mortars Containing Silica Fume to Attack by a Solution Containing Chlorides”, Cement and Concrete Research, 15(3):411-420.

Feliu, S., Gonzalez, J.A. ve Andrade, C., (1995), “Effect of Current Distribution on Corrosion Rate Measurements in Reinforced Concrete”, Corrosion Engineering, 51(1):79-86.

Francois, R. ve Maso, J.C., (1988), “Effect of Damage in Reinforced Concrete on Carbonation or Chloride Penetration”, Cement and Concrete Research, 18(6):961-970.

Frey, R., (1993), “Untersuchung der 20 Jahrigen Karbonatisierung von Betonen”, Beton, 3:116-120.

Ftikos, C. ve Parissakis, G., (1985), “The Combined Action of  $Mg^{++}$  and  $Cl^-$  Ions in Cement Pastes”, Cement and Concrete Research, 15(4):593-599.

Funk, G. ve Reinhardt, H.W., (1997), “Realitätsnahe Berechnung der Carbonisierungstiefe unter Berücksichtigung von Materialparametern und Bewitterung”, Betonwerk+Fertigteile-Technik, 3:83-88.

Gautefall, O. ve Havdahl, J., (1989), “Effect of Cordensed Silica Fume on the Mechanism of Chloride Diffusion in to Hardened Cement Paste”, III. CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, Norway, 849-860.

Giergiczny, Z., Malolepszy, J. ve Deja, J., (1995), “Durability of Some Cement Mortars in Chlorides Containing Solutions”, V. CANMET/ ACI International Conference on Fly Ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Milwaukee, 681-693.

Gjorv, O.E., Monteiro, P.J.M. ve Mehta, P.K., (1990), “Effect of Condensed Silica Fume on the Steel-Concrete Bond”, ACI Materials Journal, 87(6):573-580.

Gjorv, O.E., Tan, K. ve Zhang, M., (1994), “Diffusivity of Chlorides from Seawater in to High-Strength Lightweight Concrete”, ACI Materials Journal, 91(5):447-452.

Gonçalves, A., (1992), "Influence of Portuguese Silica Fume on the Behaviour of Concrete without Admixtures", IV. CANMET/ACI International Conference, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Mayıs, İstanbul, Supplementary Papers, 283-297.

Gonzalez, J.A., Molina, A. Otero, E. ve Lopez, W., (1990), "On the Mechanism of Steel Corrosion in Concrete: The Role of Oxygen Diffusion", Magazine of Concrete Research, 42(150):23-27.

Gonzalez, J.A., Benito, M., Feliu, S., Rodriguez, P. ve Andrade, C., (1995a), "Suitability of Assessment Methods for Identifying Active and Passive Zones in Reinforced Concrete", Corrosion Engineering, 51(2):145-152.

Gonzalez, J.A., Andrade, C., Alonso, C. ve Feliu, S., (1995b), "Comparison of Rates of General Corrosion and Maximum Pitting Penetration on Concrete Embedded Steel Reinforcement", Cement and Concrete Research, 25(2):257-264.

Grimaldi, G., Carpio, J. ve Raharinaivo, A., (1989), "Effects of silica Silica Fume on Carbonation and Chloride Penetration in Mortars", III. CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, Norway, Supplementary Papers 321-334.

Gulikers, J.J.W. ve Mier, J.G.M., (1991), "The Effect of Patch Repairs on The Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete", II. CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Canada, Supplementary Papers, 445-460.

Hansson, C.M., (1984), "Comments on Electrochemical Measurements of the Rate of Corrosion of Steel in Concrete", Cement and Concrete Research, 14(4):574-584.

Hansson, C.M., Frolund, T. ve Markussen, J.B., (1985), "The Effect of Chloride Cation Type on the Corrosion of Steel in Concrete by Chloride Salts", Cement and Concrete Research, 15(1):65-73.

Haque, M.N. ve Kawamura, M., (1992), "Carbonation and Chloride-Induced Corrosion of Reinforcement in Fly Ash Concretes", ACI Materials Journal, 89(1):41-47.

Haque, M.N., Kayyali, O.A. ve Gopalan, M.K., (1992), "Fly Ash Reduces Harmful Chloride Ions in Concrete", ACI Materials Journal, 89(3):238-241.

Haque, M.N. ve Kayyali, O.A., (1995a), "Free and Water Soluble Chloride in Concrete", Cement and Concrete Research, 25(3):531-542.

Haque, M.N. ve Kayyali, O.A., (1995b), "Aspects of Chloride Ion Determination in Concrete", ACI Materials Journal, 92(5):532-541.

Hartl, G. ve Lukas, W., (1987), "Untersuchungen zur Chlorideindringung in Beton und zum Einfluss von Rissen auf die Chlorideinduzierte Korrosion der Bewehrung", Betonwerk+Fertigteil-Technik, 7:497-506.

Hergenroeder, M. ve Rackwitz, R., (1991), "Investigation on the Statistics of Carbonation Depths in Concrete", II. International RILEM/CEM Symposium, Quality Control of Concrete Structures, 12-14. 6. 1991, Ghent, Belgium, 451-460.

Hertz, K.D., (1992), "Danish Investigation on Silica Fume Concretes at Elevated Temperatures", ACI Materials Journal, 89(4):345-347.

Hobbs, D.W., (1988), "Carbonation of Concrete Containing PFA", Magazine of Concrete Research, 40(143):69-78.

Hobbs, D.W., (1994), "Carbonation of Concrete Containing PFA", Magazine of Concrete Research, 46(166):35-38.

Hoffman, D.W., (1984), "Changes in Structure and Chemistry of Cement Mortars Stressed by a Sodium Chloride Solution", Cement and Concrete Research, 14(1):49-56.

Hope, B.B., Page, A.J. ve Ip, A.K.C., (1986), "Corrosion Rates of Steel in Concrete", Cement and Concrete Research, 16(5):771-781.

Hope, B.B., ve Ip, A.K.C., (1988), "Grout for Post-Tensioning Ducts", ACI Materials Journal. July-August, 234-240.

Hussain, S.E. ve Rasheeduzzafar, (1993), "Influence of Microsilica on Protection from Chloride-Induced Corrosion of Reinforcing Steel", Journal of Materials in Civil Engineering, 5(2):155-169.

Hussain, S.E., Al-Mussalam, A. ve Al-Gahtani, A.S., (1995), "Factors Affecting Threshold Chloride for Reinforcement Corrosion in Concrete", Cement and Concrete Research, 25(7):1543-1555.

Iravani, S., (1996), "Mechanical Properties of High-Performance Concrete", ACI Material Journal, 93(5):416-426.

Jensen, O.M. ve Hansen, P.F., (1996), "Change of the Relative Humidity in Silica Fume-Modified Cement Paste", ACI Materials Journal, 93(6):539-543.

Karakoç, C., (1985), Aderansta Mekanik Etkileşim Olayı, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

Kaushik, S.K. ve Islam, S., (1995), "Suitability of Sea Water for Mixing Structural Concrete Exposed to a Marine Environment", Cement and Concrete Composites, 17:177-185.

Kayyali, O.A. ve Haque, M.N., (1988), "Effect of Carbonation on the Chloride Concentration in Pore Solution of Mortars with and without Flyash", *Cement and Concrete Research*, 18(4):636-648.

Kayyali, O.A.ve Haque, M.N., (1990), "Environmental Factor and Concentration of Cl<sup>-</sup> and OH<sup>-</sup> in Mortars", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2(1):24-34.

Kayyali, O.A. ve Haque, M.N., (1995), "The Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup> Ratio in Chloride-Contaminated Concrete- a Most Important Criterion", *Magazine of Concrete Research*, 47(172):235-242.

Keller, T. ve Menn, C. (1993), "Der Einfluss Von Rissen auf die Bewehrungskorrosion", *Beton und Stahlbetonbau*, 88(1):16-20.

Keller, T. ve Menn, C. (1993), "Der Einfluss Von Rissen auf die Bewehrungskorrosion", *Beton und Stahlbetonbau*, 88(2):47-51.

Khan, M.S., (1991), "Corrosion State of Reinforcing Steel in Concrete at Early Ages", *ACI Materials Journal*, 88(1):37-40.

Khayat, K.H. ve Aitcin, P.C., (1992), "Silica Fume in Concrete - An Overview", IV. CANMET/ACI International Conference, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Mayıs, İstanbul, 835-872.

Khedr, S.A. ve Idriss, A.F., (1995), "Resistance of Silica Fume Concrete to Corrosion-Related Damage", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 7(2):102-107.

Koca, C., (1996), "Yüksek Performanslı Beton Üretiminde Mikrosilis, Cüruf, Klinker Karışımı Çimento Kullanımı" TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 4.Ulusal Beton Kongresi, 30-31. 10 - 1. 11. 1996, İstanbul, 381-394.

Kocataşkın, F., (1959), *Beton Teknolojisi*, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul.

Kokubu, M. ve Nagataki, S., (1989), "Carbonation of Concrete with Fly Ash and Corrosion of Reinforcements in 20-Years Tests", III. CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, Norway, 315-329.

Komlos, K., Popovics, S., Nürnbergerova, T., Babal, B. ve Popovics, J.S, (1996), "Ultrasonic Pulse Velocity Test of Concrete Properties as Specified in Various Standars", *Cement and Concrete Composites*, 18:357-364.

Kouloumbi, N. ve Batis, G., (1992), "Chloride Corrosion of Steel Rebars in Mortars with Fly Ash Admixtures", *Cement and Concrete Composites*, 14:199-207.

Li, Z., Li, F., Zdunek, A., Landis, E. ve Shah, S.P., (1998), "Aplication of Acoustic Emission Techniqu to Detection of Rebar Corrosion in Concrete", *ACI Materials Journal*, 95(1).



Liam, K.C., Ray, S.K. ve Nortwood, D.O., (1992), "Chloride Ingress Measurement and Corrosion of Potential Mapping Study of a 24-year-old Reinforced Concrete Jetty Structure in a Tropical Marine Environment", Magazine of Concrete Research, 44(160):205-215.

Loo, Y.H., Chin, M.S., Tam, C.T. ve Ong, K.C.G., (1994), "A Carbonation Prediction Model for Accelerated Carbonation Testing of Concrete", Magazine of Concrete Research, 46(168):191-200.

Lorentz, T. ve French, C., (1995), "Corrosion on Reinforcing Steel in Concrete : Effect of Materials, Mix Composition and Cracking", ACI Materials Journal, 92(2):181-190.

Malolepszy, J. ve Deja, J., (1992), "The Effect of Variable Curing Conditions on the Properties of Mortars with Silica Fume", IV. CANMET/ACI International Conference, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Mayıs, İstanbul, 1075-1087.

Mangat, P.S., Khatip, J.M. ve Molloy, B.T., (1994), "Microstructure Chloride Diffusion and Reinforcement Corrosion in Blended Cement Paste and Concrete", Cement and Concrete Composites, 16:73-81.

Mangat, P.S. ve Molloy, B.T., (1995), "Chloride Binding in Concrete Containing PFA, Gbs or Silica Fume Under Sea Water Exposure", Magazine of Concrete Research, 47(171):129-141.

Maslehuddin, M., Saricimen, H. ve Al-Mana, A.I., (1987), "Effect of Fly Ash Addition on the Corrosion Resisting Characteristics of Concrete", ACI Materials Journal, Jan-Feb:42-50.

Massaza, F., (1989), "Puzolanlar", Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 11-12. 05. 1989, Ankara, 1-60.

Mazlum, F., (1989), Pirinç Kabuğu Külünün Pozzolanik Özellikleri ve Külün Çimento Harcının Dayanıklılığına Etkisi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Aralık, İstanbul.

Mehta, P.K. ve Gjordv, O.D., (1982), "Properties of Portland Cement Concrete Containing Fly Ash and Condensed Silica-Fume", Cement and Concrete Research, 12:587-595.

Mehta, P.K., (1986), Concrete, Structure Properties and Materials, Printice-Hall, USA, 152-158.

Miyagawa, T., (1991), "Durability Design and Repair of Concrete Structures : Chloride Corrosion of Reinforcing Steel and Alkali-Aggregate Reaction", Magazine of Concrete Research", 43(156):155-170.

Moorehead, D.R., (1986), "Cementation by the Carbonation of Hydrated Line, Cement of Concrete Research", 16(5):700-708.

Moukwa, M., (1990), "Characteristics of the Attack of Cement Paste by  $MgSO_4$  and  $MgCl_2$  from the Pore Structure Measurement", *Cement and Concrete Research*, 20(1):148-158.

Neville, A.M. ve Brooks, J.J., (1987), *Concrete Technology*, Longman Scientific and Technical, New York, 275-282.

Neville, A.M., (1992), *Properties of Concrete*, Third Edition, Longman Scientific and Technical, New York, 433-529.

Nürnbergger, U., (1984a), "Chloridekorrosion von Stahl in Beton", *Betonwerk+Fertigteil-Technik*, 9:601-612.

Nürnbergger, U., (1984b), "Chloridekorrosion von Stahl in Beton", *Betonwerk+Fertigteil-Technik*, 10:697-704.

Ohta, T., (1991), "Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Exposed to Sea Air", II. CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Canada, 459-477.

Ohtsu, M., Okamoto, T. ve Yuyama, S., (1998), "Moment Tensor Analysis of Acoustic Emission for Cracking Mechanisms in Concrete", *ACI Materials Journal*, 95(2).

Onaran, K., 1991, *Malzeme Bilimi*, İ.T.Ü.İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

Otsuki, N., Nagataki, S. ve Nakashita, K., (1992), "Evaluation of  $AgNO_3$  Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials", *ACI Materials Journal*, 89(6):587-592.

Parkins, R.N., (1994), "Intergranular Corrosion and Stress Corrosion and Stress Corrosion Cracking of Mild Steel in Clarke's Solution", *Corrosion Science*, 36(12):2097-2110

Patodiya , S.C., (1991), "Corrosion of Reinforcement in RCC Structures: A Case Study", II. CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Canada, 79-91.

Plante, P., Bilodeau, A., (1989), "Rapid Chloride Ion Permeability Test : Data on Concretes Incorporating Supplementary Cementing Materials", III. CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, Norway, 625-644.

Postacıoğlu, B.,1986, *Beton*, Cilt 1, Teknik KitaplarYayınevi, İstanbul.

Postacıoğlu, B.,1987, *Beton*, Cilt 2, Teknik KitaplarYayınevi, İstanbul.



Ramezaniyanpour, A.A. ve Malhotra, V.M., (1995), "Effect of Curing on the Compressive Strength, Resistance to Chloride Ion Penetration and Porosity of Concretes Incorporating Slag, Fly Ash or Silica Fume", *Cement and Concrete Composites*, 17:125-133.

Rasheeduzzafar, Hussain, S.E. ve Al-Gahtani, A.S., (1991), "Pore Solution Composition and Reinforcement Corrosion Characteristics of Microsilica Blended Cement Concrete", *Cement and Concrete Research*, 21(6):1035-1048.

Rasheeduzzafar, Hussain, S. ve Al-Saadoun, S.S., (1992a), "Effect of Tricalcium Aluminate Content of Cement on Chloride Binding and Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete", *ACI Materials Journal*, 89(1):3-12.

Rasheeduzzafar, Al-Saadoun, S.S. ve Al-Gahtani, A.S., (1992b), "Reinforcement Corrosion-Resisting Characteristics of Silica Fume Blended Cement Concrete", *ACI Materials Journal*, 89(4):337-344.

Rasheeduzzafar, Dakhil, F.H., Bader, M.A. ve Khan, M.M., (1992c), "Performance of Corrosion Resisting Steel in Chloride-Bearing Concrete", *ACI Materials Journal*, 89(5):439-448.

Rodriguez, P., Ramirez, E. ve Gonzalez, J.A., (1994), "Methods for Studying Corrosion in Reinforced Concrete", *Magazine of Concrete Research*, 46(167):81-90.

Roper, H. ve Baweja, D., (1991), "Carbonation-Chloride Interactions and Their Influence on Corrosion Rates of Steel in Concrete", II. CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Canada, 295-315.

Roy, K.S., Beng, P.K. ve Northwood, D.O., (1996), "The Carbonation of Concrete Structures in the Tropical Environment of Singapore and a Comparison with Published Data for Temperate Climates", *Magazine of Concrete Research*, 48(177):293-300.

Saraylı, M.A., (1978), *Yapı Malzemeleri Bilimi*, Kutulmuş Matbaası, İstanbul.

Schiessl, P., (1986), "Chlorideinduzierte Korrosion von Stahl in Beton", *Betonwerk+Fertigteil-Technik*, 10:626-635.

Schiessl, P. ve Raupach, M., (1991), "Macrocell Steel Corrosion in Concrete Caused by Chlorides", II. CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Canada, 565-583.

Schiessl, P. ve Raupach, M., (1994), "Laboruntersuchungen und Berechnungen zum Einfluss der Rissbreite des Betons auf die Chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton", *Bauingenieur*, 69:439-445

Schiessl, P. ve Raupach, M., (1997), "Laboratory Studies and Calculations on the Influence of Crack with on Chloride-Induced Corrosion of Steel in Concrete", ACI Materials Journal, 94(1):56-62

Sharp, J.W., Figg, J.W. ve Leeming, M.B., (1988), "The Assessment of Corrosion of the Reinforcement in Marine Concrete by Electrochemical and Other Methods", II. International Conference on Performance of Concrete in Marine Environment, 21-26. 8.1988, New Brunswick, Canada, 105-125.

Streicher, P.E. ve Alexander, M.G., (1994), "A Critical Evaluation of Chloride Diffusion Test Methods for Concrete", III. CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Nice, 517-530.

Streicher, P.E. ve Alexander, M.G., (1995), "A Chloride Conduction Test for Concrete", Cement and Concrete Research, 25(6):1284-1294.

Swamy, R.N. ve Laiw, J.C., (1995), "Effectiveness of Supplementary Cementing Materials in Controlling Chloride Penetration into Concrete", V. CANMET/ ACI International Conference on Fly Ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Milwaukee, 657-674.

Şengil, İ.A., (1992), Korozyon, İ.T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi Matbaası.

Tagaki, N., Miyagawa, T., Amosaki, S. ve Kojima, T., (1991), "Chloride Corrosion of Reinforcing Steel in Silica Fume Concrete Exposed to Marine Environment" II. CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Canada, 479-497.

Tang, L. ve Nilsson, L.O., (1992), "Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field", ACI Materials Journal, 89(1):49-53.

Tang, L., (1996), "Electrically Accelerated Methods for Determining Chloride Diffusivity in Concrete Curent Development", Magazine of Concrete Research, 48(176):173-179.

Taylor, P.C., Streicher, P.E., Goch, G. ve Fliss, L., (1995), "Comparative Testing of Portland Cement, Fly Ash, Ground Granulated Blast Furnace Slag and Silica Fume Concretes for Potantial Durability", V. CANMET/ ACI International Conference on Fly Ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Milwaukee, 479-495.

T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü 17. Bölge Müdürlüğü 1996 Yılı Çalışmaları Hakkında Genel Bilgiler Bülteni.

Thomas, M.D.A. ve Matthews, J.D., (1992), "Carbonation of Fly Ash Concrete", Magazine of Concrete Research, 44(160):217-228.

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

Torii, K. ve Kawamura, M., (1994), "Pore Structure and Chloride Ion Permeability of Mortars Containing Silica Fume", Cement and Concrete Composites, 16:279-286.

Torii, K., Sasatani, T. ve Kawamura, M., (1995), "Effects of Fly Ash, Blast Furnace Slag and Silica Fume on Resistance of Mortar to Calcium Chloride Attack", V. CANMET/ ACI International Conference on Fly Ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Milwaukee, 931-949.

TS 3527, (1980), Beton Agregalarında İnce Madde Oranı Tayini.

TS 3694, (1981), Beton Agregalarında Aşınmaya Dayanıklılık, Aşınma Oranı Tayini.

TS 3732, (1982), Beton Agregalarında Klorür Miktarı Tayini.

TS 24, (1985), Çimentoların Fiziki ve Mekanik Deney Metodları.

TS 500, (1985), Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları.

TS 2162, (1986), Genel Yapı Çelikleri.

Türker, F., Aköz, F., Koral, S. ve Yüzer, N., (1996), " 20°C ve 40°C Sıcaklıklardaki Sodyum Sülfat Çözeltilisinin Normal ve Silis Dumanı Katkılı Harçlara Etkisi". TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 4.Ulusal Beton Kongresi, 30-31. 10 - 1. 11. 1996, İstanbul, 291-303.

Türker, F., Aköz, F., Koral, S., ve Yüzer, N., (1997), "Effects of Magnesium Sulfate Concentration on the Sulfate Resistance of Mortars with and without Silica Fume", Cement and Concrete Research, 27(2):205-214.

Uomoto, T. ve Mısra, S., (1988), "Behavior of Concrete Beams and Columns in Marine Environment when Corrosion of Reinforcing Bars Takes Place", II. International Conference on Performance of Concrete in Marine Environment, 21-26. 8.1988, New Brunswick, Canada, 127-146.

Uyan, M., (1975), Beton ve Harçlarda Kılcallık Olayı, Doktora Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, Şubat, İstanbul.

Uyan, M., Özcan, M. ve Yıldırım, H., (1998), "Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Betonun Kılcallık ve Su Emme Özelliklerine Etkisi", D.S.İ. Beton-Çimento ve Boya Semineri, 24-26 Haziran, Ankara, 1-13.

Vagelis, G.P., Papadakis, V.G., Vayenas, G. ve Fardis, M.N. (1991), "Fundamental Modelling and Experiments Investigation of Concrete Carbonation", *ACI Materials Journal*, 88(4):363-373.

VanVlack, L.H.V. (1980), *Elements of Materials Science and Engineering*, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts.

Vassie, P.R., (1979), "The Influence of Chlorides on the Alkalinity of Concrete", TRRL Laboratory Report 915.

Wiegink, K. ve Marikunte, S., (1996), "Shrinkage Cracking of High-Strength Concrete", *ACI Materials Journal*, 93(5):409-415.

Wiens, U., Breit, W. ve Schiessl, P., (1995), "Influence of High Silica Fume and High Fly Ash Contents on Alkalinity of Pore Solution and Protection of Steel against Corrosion", V. CANMET/ ACI International Conference on Fly Ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Milwaukee, 740-761.

Wolsiefer, J., (1991), "Silica Fume Concrete : A Solution to Steel Reinforcement Corrosion in Concrete", II. CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Canada, 527-558.

Wolsiefer, J., Sivasanduram, V., Malhotra, V.M. ve Carette, G.G., (1995), "Performance of Concretes Incorporating Various Forms of Silica Fume", V. CANMET/ ACI International Conference on Fly Ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Milwaukee, 591-655.

Yamato, T., Soeda, M. ve Emoto, Y., (1989), "Chemical Resistance of Concrete Containing Condensed Silica Fume", III. CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, Norway, 897-913.

Yeğınobalı, A., (1993), "Silis Dumanının Beton Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 18-19. 11. 1993, Ankara, 149-167.

Yerlici, V. ve Ersoy, U., (1995), "Betonun Çekme ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Teknik Dergi, 6(4):1059-1062.

**EKLER**





Çizelge Ek.3 Ortalama Semidt okumaları

Numune Kodları	SF0W0	SF1W0	SF2W0	SF0W1	SF1W1	SF2W1	SF0W2	SF1W2	SF2W2	SF0W3	SF1W3	SF2W3	SF0A0	SF1A0	SF2A0	SF0A1	SF1A1	SF2A1	SF0A2	SF1A2	SF2A2	SF0A3	SF1A3	SF2A3
	28	28	29	32	28	29	32	28	29	32	28	29	32	33	26	36	29	28	35	32	34	34	26	36
56	33	36	40	27	27	35	36	38	39	30	35	37	39	35	36	30	32	36	33	38	36	34	38	35
	118	31	35	39	33	34	35	36	39	34	34	35	39	42	41	39	42	40	38	39	40	39	33	35
208	35	35	38	36	35	36	34	34	38	35	32	36	41	41	37	36	38	40	37	38	37	36	38	37

Çizelge Ek.4 Ortalama ses geçiş hızları (mm/µs)

Numune Kodları	SF0W0	SF1W0	SF2W0	SF0W1	SF1W1	SF2W1	SF0W2	SF1W2	SF2W2	SF0W3	SF1W3	SF2W3	SF0A0	SF1A0	SF2A0	SF0A1	SF1A1	SF2A1	SF0A2	SF1A2	SF2A2	SF0A3	SF1A3	SF2A3
	28	5.6	5.3	5.3	5.6	5.3	5.3	5.6	5.3	5.3	5.6	5.3	5.3	5.1	4.5	4.7	4.5	4.8	4.6	5.0	4.4	4.5	4.3	4.6
56	5.5	5.5	5.5	5.1	5.2	5.6	5.4	5.5	5.2	5.3	5.6	5.2	5.1	5.1	4.6	4.5	5.0	4.5	4.6	4.7	4.3	4.4	5.3	4.7
	118	5.4	5.7	5.5	5.3	5.7	5.3	5.6	5.2	5.6	6.0	5.3	5.0	5.2	5.0	5.1	5.1	5.2	5.4	4.5	4.8	5.1	5.2	4.8
208	5.6	5.8	5.9	5.5	5.6	5.9	5.4	6.1	6.0	5.4	6.0	5.8	5.1	5.0	4.8	4.7	4.7	5.0	5.1	4.5	4.7	5.0	5.4	4.6

Çizelge Ek.5 Karbonatlaşma derinliği (mm)

Nümunne Kodları		SF0A0	SF1A0	SF2A0	SF0A1	SF1A1	SF2A1	SF0A2	SF1A2	SF2A2	SF0A3	SF1A3	SF2A3
Gün	28	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	2.37	0.00	0.00	1.91	0.00	0.00	2.08
	56	1.27	1.62	3.34	2.15	2.23	2.74	1.96	2.06	2.69	1.15	1.99	3.34
	118	2.04	2.20	3.38	2.56	2.41	3.78	2.61	2.54	3.03	2.27	2.62	3.63
	208	2.43	2.70	3.81	3.32	3.94	3.96	3.61	4.31	4.28	3.61	4.38	4.31

Çizelge Ek.6 Klorür penetrasyon derinliği (mm)

Nümunne Kodları		SF0W0	SF1W0	SF2W0	SF0W1	SF1W1	SF2W1	SF0W2	SF1W2	SF2W2	SF0W3	SF1W3	SF2W3
Gün	118	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.02	13.59	10.22	50.00	18.05	12.34
	208	0.00	0.00	0.00	50.00	11.45	9.09	50.00	17.95	11.45	50.00	21.00	15.17



Çizelge Ek.7 Serbest klorür miktarının derinlikle değişimi (mg/L)

Numune	Kodları	Derinlik mm																								
		SF0W0	SF1W0	SF2W0	SF0W1	SF1W1	SF2W1	SF0W2	SF1W2	SF2W2	SF0W3	SF1W3	SF2W3	SF0A0	SF1A0	SF2A0	SF0A1	SF1A1	SF2A1	SF0A2	SF1A2	SF2A2	SF0A3	SF1A3	SF2A3	
28	0-10	25	0	0	25	0	0	0	0	0	25	0	0	0	25	0	0	0	12	0	175	212	250	837	1225	900
	20-30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62	0	0	0	0	75	150	125	562	887	625	
	45-50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62	0	0	0	25	0	75	162	125	612	625	650
56	0-10	12	0	0	162	0	0	525	250	312	1162	525	425	0	0	0	0	25	25	150	225	225	575	1075	1075	
	20-30	12	0	0	0	0	25	0	0	0	75	0	0	0	0	0	0	0	0	125	162	150	575	675	625	
	45-55	0	0	0	0	0	12	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0	125	150	100	575	675	650	
118	0-10	25	25	0	187	237	50	475	450	275	1675	850	475	0	0	0	0	225	50	175	275	175	725	750	1250	
	20-30	25	0	0	50	0	0	75	50	0	900	50	25	0	0	0	0	150	25	100	175	75	625	725	737	
	45-50	0	0	0	0	0	25	0	0	0	700	12	0	0	0	0	100	25	25	137	75	575	687	650		
208	0-10	25	175	0	325	225	50	725	637	425	1737	850	475	0	0	0	175	0	150	250	150	775	875	1375		
	20-30	0	0	0	137	0	0	312	25	25	950	50	25	0	0	0	125	0	100	175	75	625	625	925		
	45-50	0	0	0	0	0	112	0	0	0	850	0	0	0	0	0	75	0	100	75	75	550	600	800		
Gün																										

Çizelge Ek.8 Ortalama harç eğilme dayanımları (MPa)

Numune Kodları	Ortalama harç eğilme dayanımları (MPa)																							
	SF0W0	SF1W0	SF2W0	SF0W1	SF1W1	SF2W1	SF0W2	SF1W2	SF2W2	SF0W3	SF1W3	SF2W3	SF0A0	SF1A0	SF2A0	SF0A1	SF1A1	SF2A1	SF0A2	SF1A2	SF2A2	SF0A3	SF1A3	SF2A3
28	6.09	4.20	5.15	6.09	4.20	5.15	6.09	4.20	5.15	6.09	4.20	5.15	6.45	6.38	5.25	6.41	4.79	6.21	5.81	5.32	6.12	7.50	5.45	7.51
	7.15	6.73	6.39	6.64	7.02	5.80	6.62	6.47	5.65	7.18	7.60	7.08	4.34	6.16	4.58	6.07	4.95	7.08	5.34	5.29	6.43	5.82	5.07	6.61
118	5.63	6.23	5.31	5.44	6.06	5.29	5.16	6.16	6.29	5.12	6.28	5.07	5.77	6.46	5.68	5.03	4.58	6.35	5.63	5.04	5.95	7.48	5.61	6.95
	7.03	6.24	6.26	6.13	5.52	6.11	5.45	6.44	6.38	6.59	7.88	8.28	5.18	8.90	5.06	5.61	5.38	7.56	5.69	5.20	8.57	7.36	6.50	6.55
208	7.03	6.24	6.26	6.13	5.52	6.11	5.45	6.44	6.38	6.59	7.88	8.28	5.18	8.90	5.06	5.61	5.38	7.56	5.69	5.20	8.57	7.36	6.50	6.55

Çizelge Ek.9 Ortalama harç basınç dayanımları (MPa)

Numune Kodları	Ortalama harç basınç dayanımları (MPa)																							
	SF0W0	SF1W0	SF2W0	SF0W1	SF1W1	SF2W1	SF0W2	SF1W2	SF2W2	SF0W3	SF1W3	SF2W3	SF0A0	SF1A0	SF2A0	SF0A1	SF1A1	SF2A1	SF0A2	SF1A2	SF2A2	SF0A3	SF1A3	SF2A3
28	34.69	39.58	30.10	34.69	39.58	30.10	34.69	39.58	30.10	34.69	39.58	30.10	28.23	27.92	27.50	26.25	31.88	38.71	17.81	22.71	33.33	31.15	22.50	40.31
	40.21	37.92	45.52	31.98	44.90	49.79	33.85	33.44	43.54	37.60	47.19	46.35	22.19	35.21	24.58	28.13	21.04	34.58	27.19	26.15	36.88	27.60	22.42	43.65
56	38.96	38.75	48.44	26.46	40.94	38.02	37.08	42.50	46.77	43.75	35.83	49.38	26.46	32.50	33.75	23.75	22.40	32.29	23.33	27.19	36.35	23.54	31.67	40.63
	41.35	47.60	51.15	36.35	43.96	55.00	43.23	42.29	48.65	41.67	38.96	54.17	25.94	41.46	26.46	33.13	27.29	35.63	30.10	22.08	40.00	29.79	29.79	37.50
118	38.96	38.75	48.44	26.46	40.94	38.02	37.08	42.50	46.77	43.75	35.83	49.38	26.46	32.50	33.75	23.75	22.40	32.29	23.33	27.19	36.35	23.54	31.67	40.63
208	41.35	47.60	51.15	36.35	43.96	55.00	43.23	42.29	48.65	41.67	38.96	54.17	25.94	41.46	26.46	33.13	27.29	35.63	30.10	22.08	40.00	29.79	29.79	37.50

Çizelge Ek.10 Harç ortalama kılcal su emme katsayıları (E-05 cm<sup>2</sup>/s)

Numune Kodları	SF0W0	SF1W0	SF2W0	SF0W1	SF1W1	SF2W1	SF0W2	SF1W2	SF2W2	SF0W3	SF1W3	SF2W3	SF0A0	SF1A0	SF2A0	SF0A1	SF1A1	SF2A1	SF0A2	SF1A2	SF2A2	SF0A3	SF1A3	SF2A3
	28	3.22	2.93	1.65	3.22	2.93	1.65	3.22	2.93	1.65	3.22	2.93	1.65	4.35	7.33	6.14	4.04	3.60	3.57	2.40	5.49	1.98	1.84	3.98
56	2.39	1.93	1.12	2.40	1.93	1.45	2.80	2.76	0.82	2.98	1.76	1.87	4.17	5.30	4.40	3.00	4.49	4.44	2.95	6.55	2.10	4.23	4.75	3.43
118	1.93	1.83	1.10	2.33	1.92	1.77	2.82	1.68	0.85	2.99	1.56	1.28	3.79	2.64	4.09	3.86	6.14	4.30	4.10	6.76	2.96	5.21	4.79	2.89
208	1.23	0.92	0.42	2.11	1.41	0.34	3.00	0.74	0.70	2.51	0.78	0.87	2.69	2.46	2.71	5.96	5.04	2.55	4.75	4.42	2.73	6.10	4.05	3.20
Gün																								

Çizelge Ek.11 Ortalama aderans dayanımı (MPa)

Numune Kodları	SF0W0	SF1W0	SF2W0	SF0W1	SF1W1	SF2W1	SF0W2	SF1W2	SF2W2	SF0W3	SF1W3	SF2W3	SF0A0	SF1A0	SF2A0	SF0A1	SF1A1	SF2A1	SF0A2	SF1A2	SF2A2	SF0A3	SF1A3	SF2A3
	28	1.4	2.8	3.7	1.4	2.8	3.7	1.4	2.8	3.7	1.4	1.8	3.7	2.2	1.5	1.4	0.7	2.3	1.4	0.9	0.7	2.6	2.3	2.6
56	1.4	2.6	4.1	1.3	2.5	4.2	2.1	2.7	3.9	2.8	2.6	3.9	1.9	1.3	2.2	1.0	2.8	2.1	1.0	1.0	2.8	1.6	2.3	3.5
	118	1.6	2.2	4.3	3.0	3.3	3.8	1.4	2.3	4.0	2.5	4.1	1.5	2.5	3.2	1.2	2.1	3.3	1.1	1.7	3.3	2.3	3.1	3.9
208	2.1	2.5	3.8	3.8	3.5	3.5	2.9	2.2	4.0	2.8	3.2	2.9	1.2	2.3	3.2	0.8	1.8	2.8	0.7	1.9	3.3	2.0	3.8	4.0

Çizelge Ek.12 Hızlandırılmış korozyon deneyi sonrası bulunan aderans dayanımları (MPa)

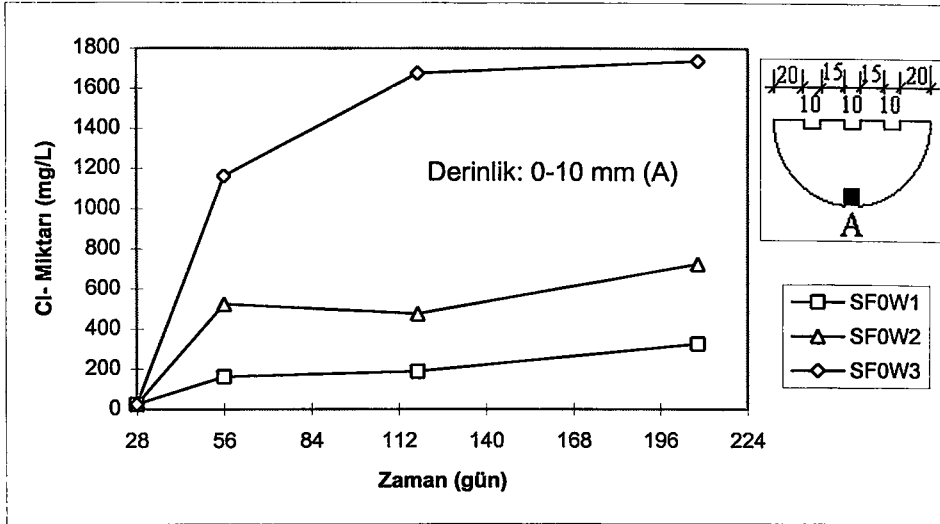
Numune Kodları	SF0W0	SF1W0	SF2W0	SF0W1	SF1W1	SF2W1	SF0W2	SF1W2	SF2W2	SF0W3	SF1W3	SF2W3	SF0A0	SF1A0	SF2A0	SF0A1	SF1A1	SF2A1	SF0A2	SF1A2	SF2A2	SF0A3	SF1A3	SF2A3
	28	4.6	4.1	4.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.4	4.0	3.9	3.9	4.2	4.1	4.3	4.0	3.8	2.0	1.9
208	3.1	4.1	4.0	2.9	4.6	4.5	2.1	3.2	4.2	1.1	3.7	4.7	0.8	3.3	4.0	1.5	4.7	4.5	1.8	4.3	3.1	2.2	1.0	1.4

Çizelge Ek.13 Donatının ortalama yarı hücre potansiyel değerleri (mV)

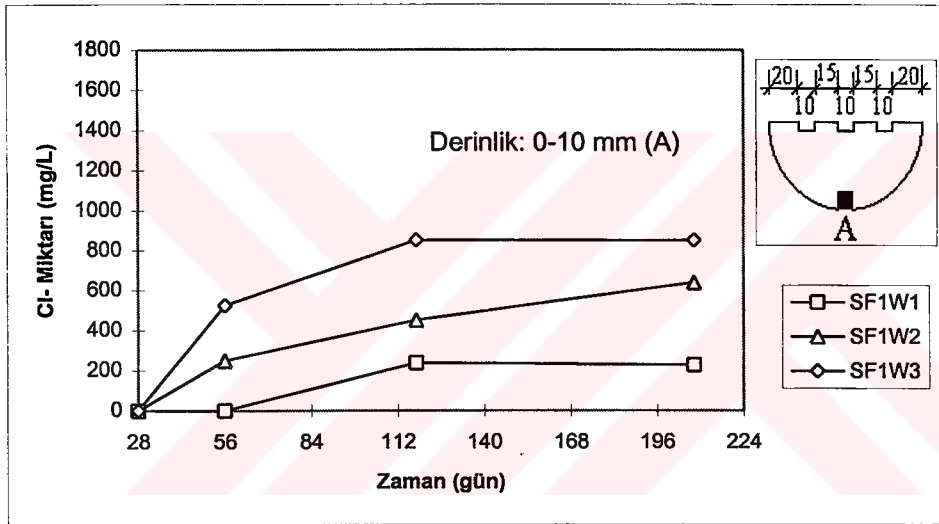
Numune Kodları	SF0W0	SF1W0	SF2W0	SF0W1	SF1W1	SF2W1	SF0W2	SF1W2	SF2W2	SF0W3	SF1W3	SF2W3	SF0A0	SF1A0	SF2A0	SF0A1	SF1A1	SF2A1	SF0A2	SF1A2	SF2A2	SF0A3	SF1A3	SF2A3
	0	-318	-333	-358	-318	-333	-358	-318	-333	-358	-318	-333	-358	-303	-349	-397	-371	-426	-383	-441	-413	-442	-488	-376
28	-221	-175	-281	-221	-175	-281	-221	-175	-281	-221	-175	-281	-89	-116	-99	-253	-122	-115	-201	-217	-176	-376	-390	-352
56	-120	-87	-155	-436	-241	-358	-334	-321	-252	-570	-394	-385	-40	-47	-53	-204	-49	-57	-105	-158	-129	-286	-359	-243
118	-245	-148	-232	-255	-303	-372	-277	-354	-343	-434	-257	-475	-96	26	-12	-115	-32	38	-39	-2	-99	-245	-243	-204
208	-196	-187	-218	-418	-279	-347	-368	-342	-364	-402	-365	-405	-84	23	4	-135	-53	2	31	-55	-109	-181	-131	-252

Çizelge Ek.14 Hızlandırılmış korozyon deneyi sonrası ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri (mV)

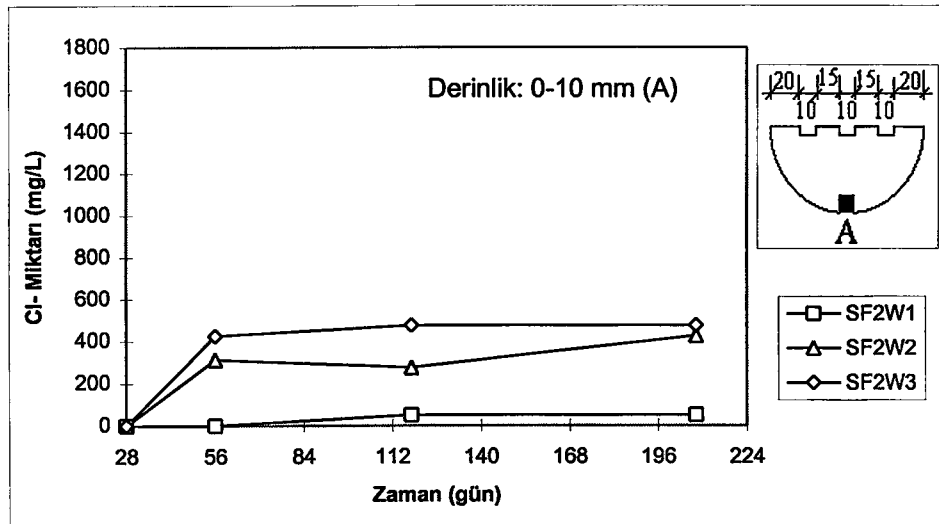
Numune Kodları	SF0W0	SF1W0	SF2W0	SF0W1	SF1W1	SF2W1	SF0W2	SF1W2	SF2W2	SF0W3	SF1W3	SF2W3	SF0A0	SF1A0	SF2A0	SF0A1	SF1A1	SF2A1	SF0A2	SF1A2	SF2A2	SF0A3	SF1A3	SF2A3
	0	-450	-501	-253	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-93	-27	-261	-72	-30	-88	-66	-124	-90	-259	-306
28	-215	-90	-310	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-74	-17	-136	-217	-222	-344	-100	-52	-145	-297	-184	-58
208	-200	-78	-79	-94	-139	-371	-127	-205	-104	-351	-417	-137	-172	-70	-8	-275	-150	-502	-145	-38	-602	-412	-177	-616



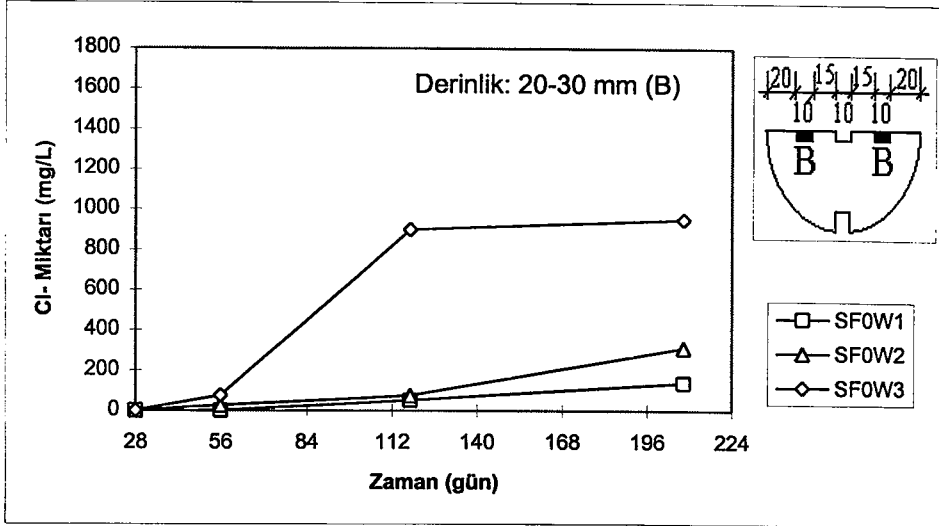
Şekil Ek.1a Normal betonda Cl- difüzyonunun zamanla değişimi



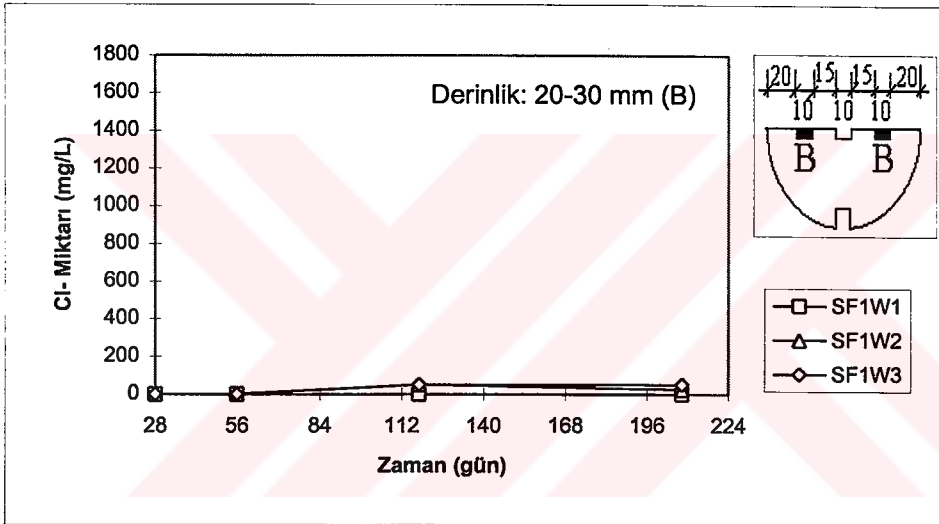
Şekil Ek.1b %10 Silis dumanı katkılı betonda Cl- difüzyonunun zamanla değişimi



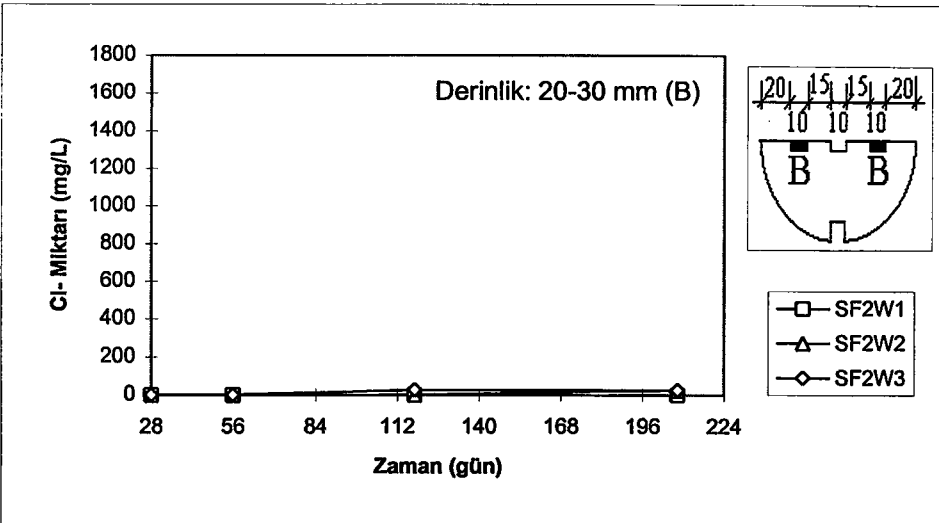
Şekil Ek.1c %20 Silis dumanı katkılı betonda Cl- difüzyonunun zamanla değişimi



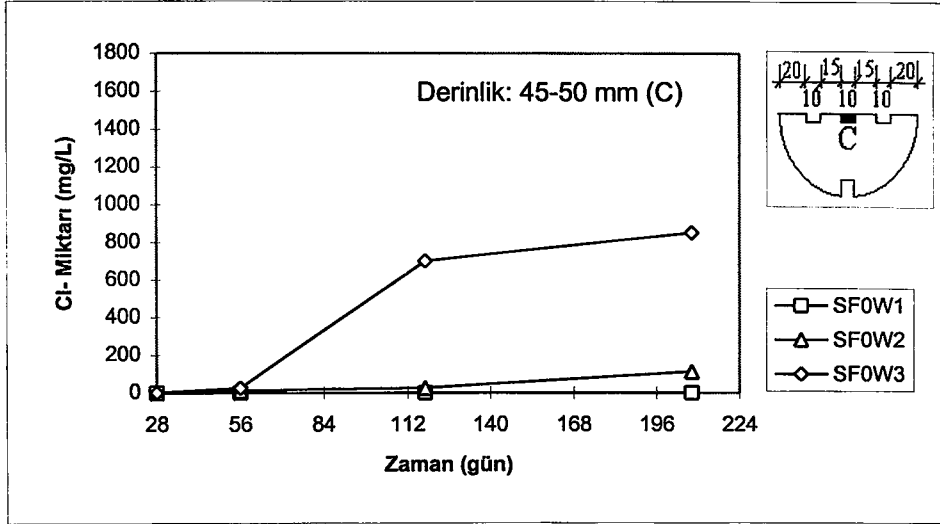
Şekil Ek.1d Normal betonda Cl- difüzyonunun zamanla değişimi



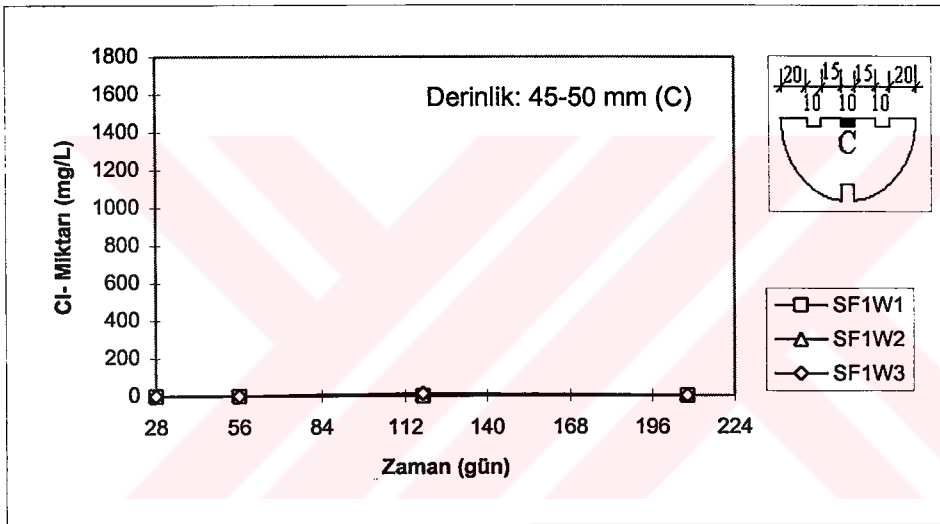
Şekil Ek.1e %10 Silis dumanı katkılı betonda Cl- difüzyonunun zamanla değişimi



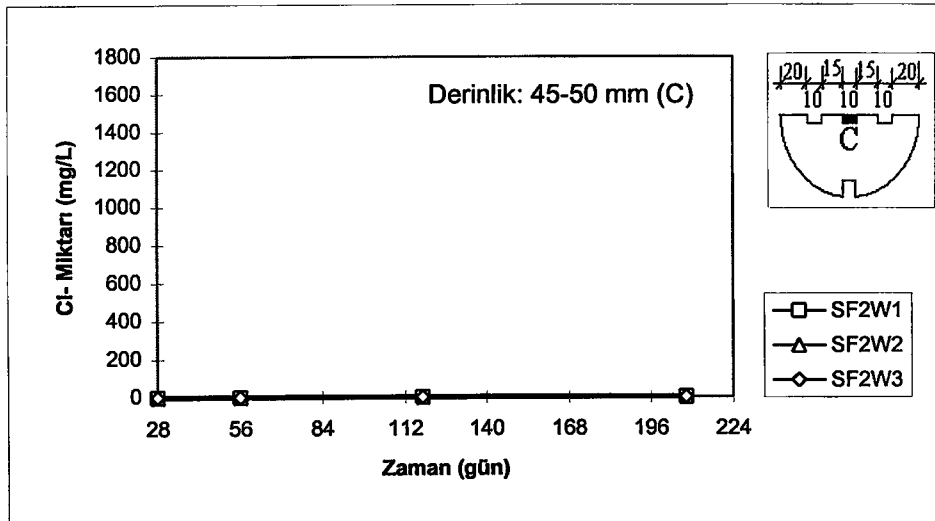
Şekil Ek.1f %20 Silis dumanı katkılı betonda Cl- difüzyonunun zamanla değişimi



Şekil Ek.1g Normal betonda Cl- difüzyonunun zamanla değişimi

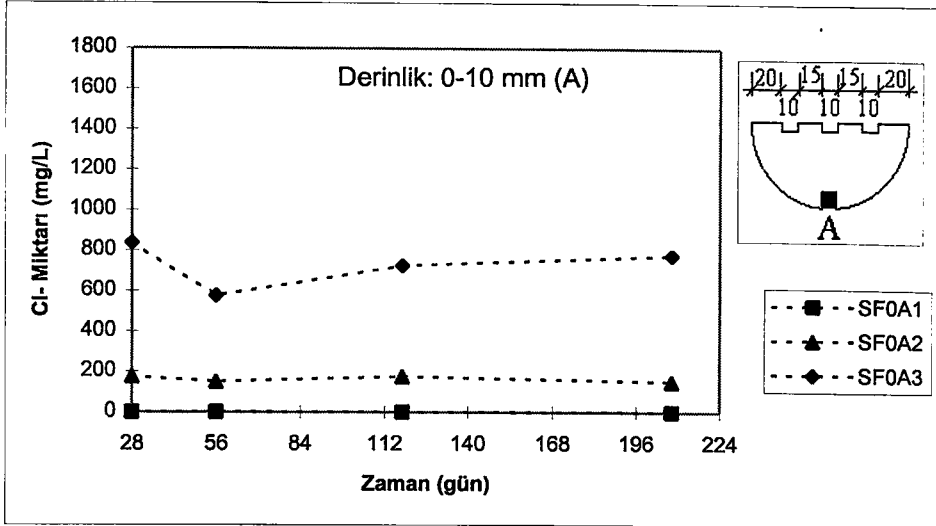


Şekil Ek.1h %10 Silis dumanı katkılı betonda Cl- difüzyonunun zamanla değişimi

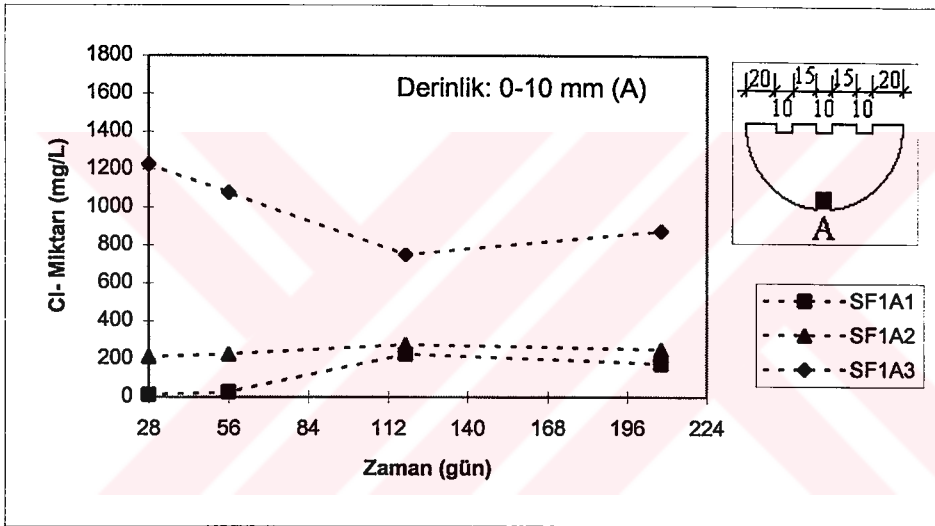


Şekil Ek.1i %20 Silis dumanı katkılı betonda Cl- difüzyonunun zamanla değişimi

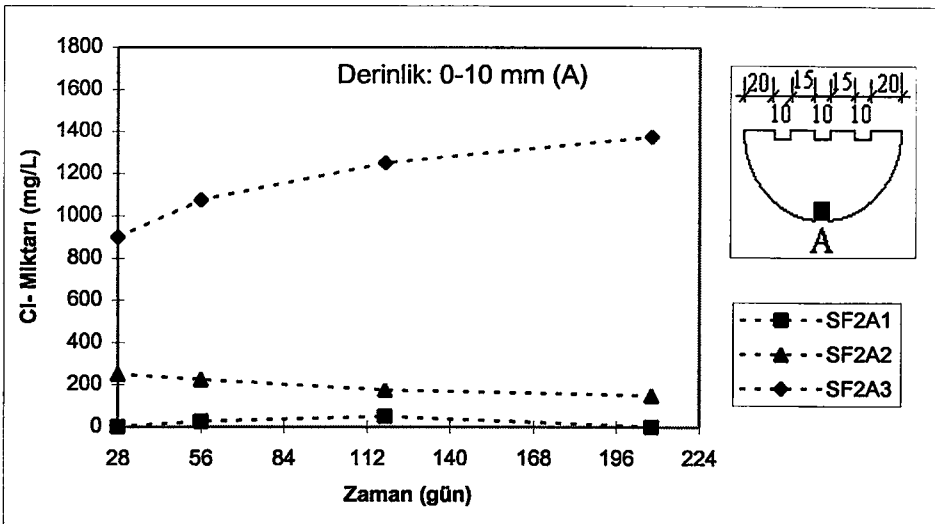




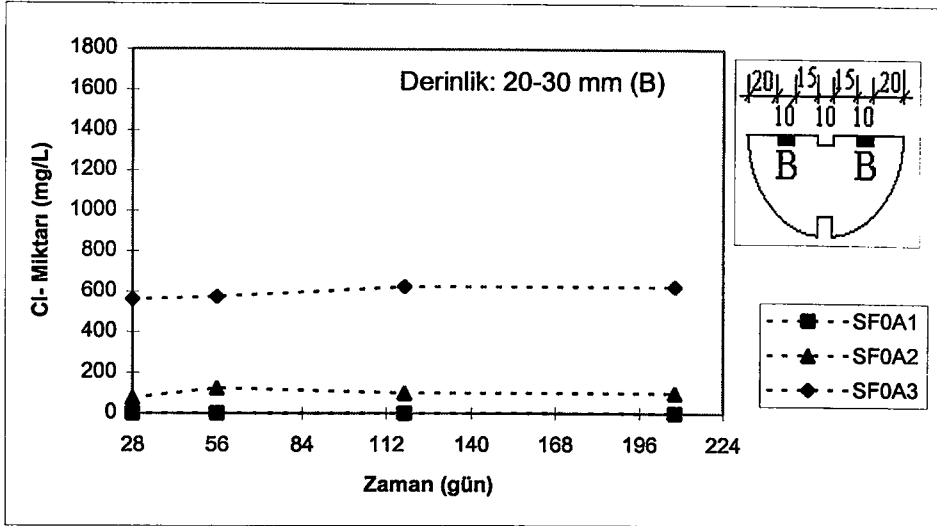
Şekil Ek.2.a Havada saklanan normal betonda serbest Cl-'nin zamanla değişimi



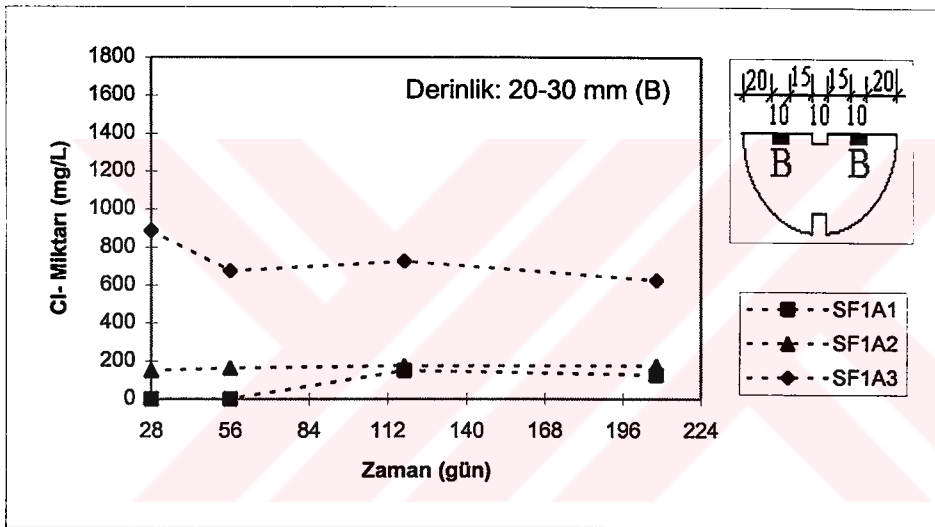
Şekil Ek.2.b %10 silis dumanı katkılı betonda serbest Cl-'nin zamanla değişimi



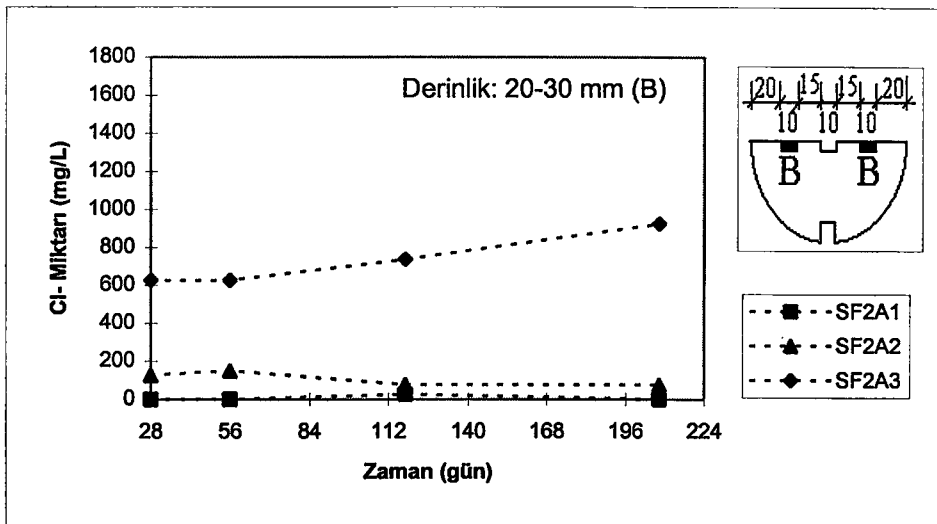
Şekil Ek.2.c %20 silis dumanı katkılı betonda serbest Cl-'nin zamanla değişimi



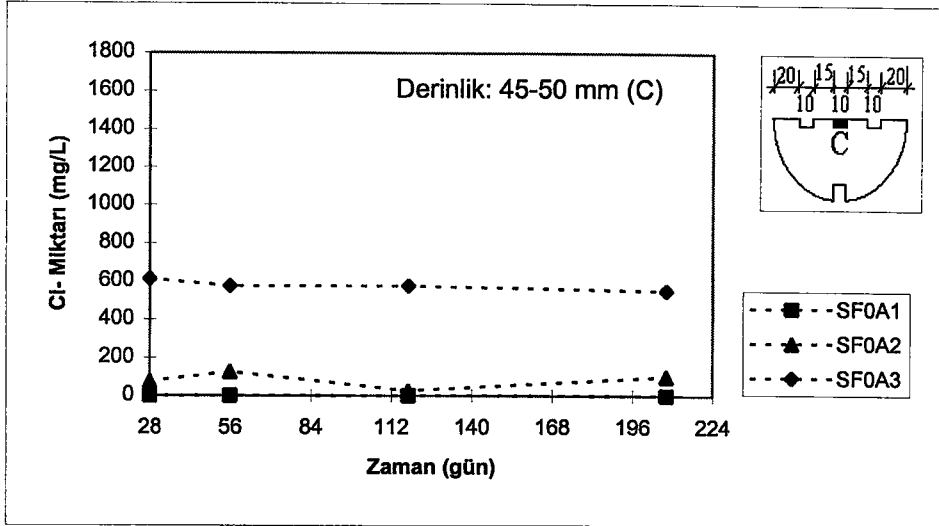
Şekil Ek.2d Havada saklanan normal betonda serbest Cl-'nin zamanla değişimi



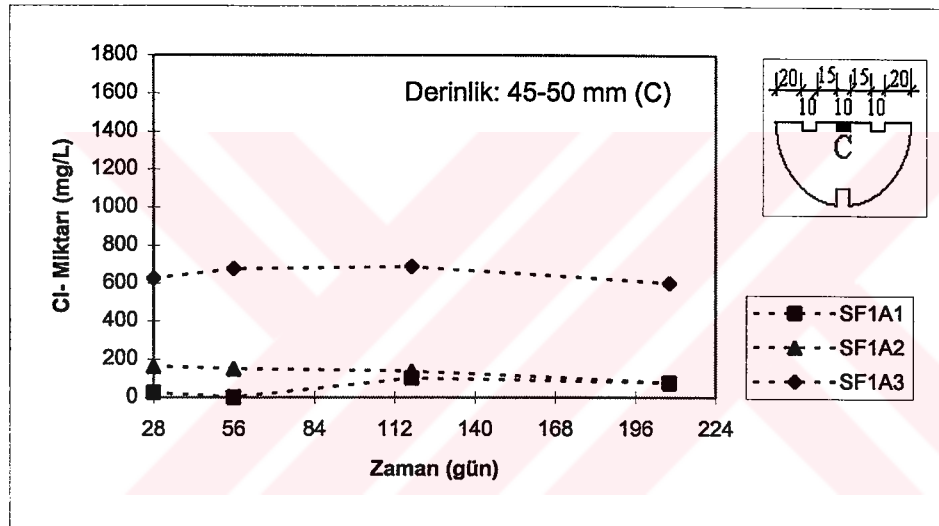
Şekil Ek.2e %10 silis dumanı katkılı betonda serbest Cl-'nin zamanla değişimi



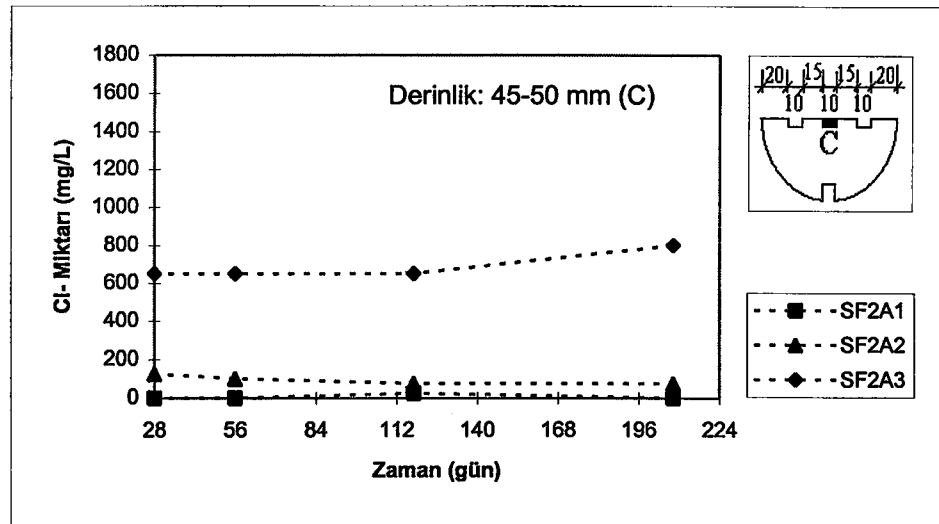
Şekil Ek.2f %20 silis dumanı katkılı betonda serbest Cl-'nin zamanla değişimi



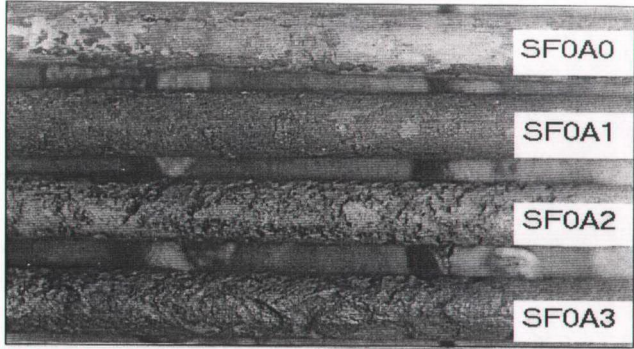
Şekil Ek.2g Havada saklanan normal betonda serbest Cl-'nin zamanla değişimi



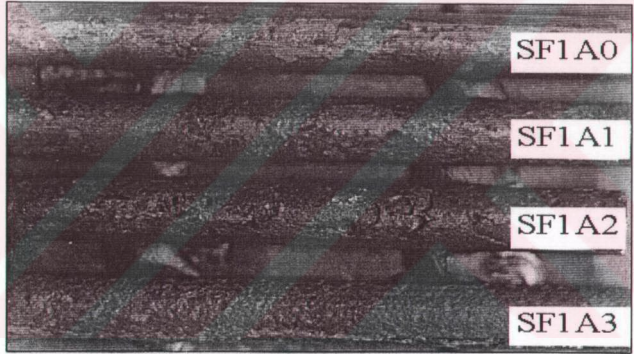
Şekil Ek.2h %10 silis dumanı katkılı betonda serbest Cl-'nin zamanla değişimi



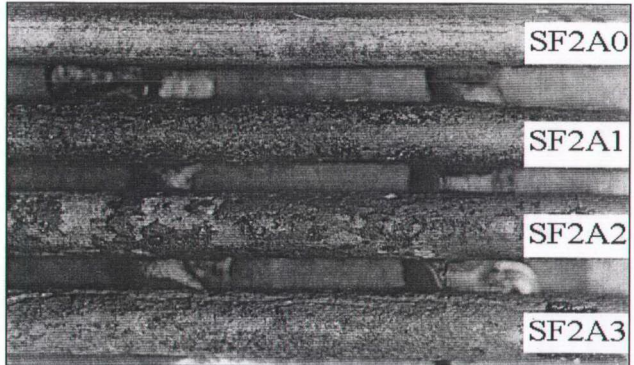
Şekil Ek.2i %20 silis dumanı katkılı betonda serbest Cl-'nin zamanla değişimi



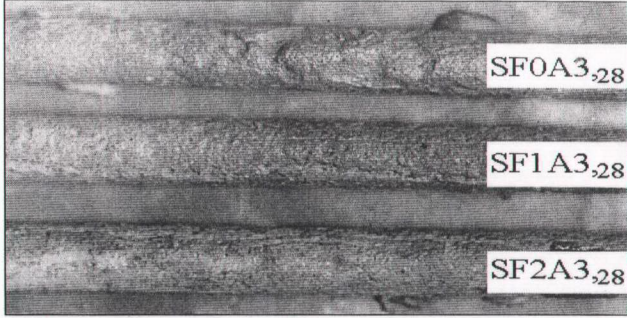
Şekil Ek.3.a Şahit beton içindeki donatıya Cl<sup>-</sup> konsantrasyonunun etkisi (28. gün)



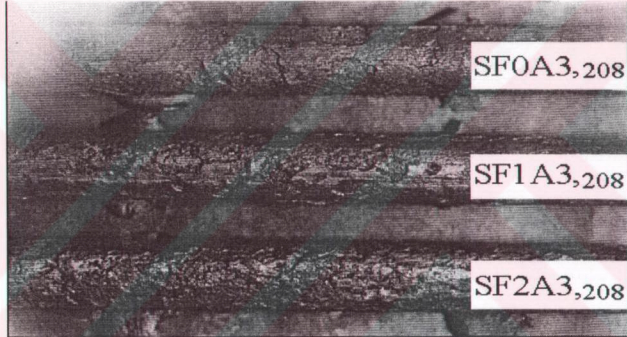
Şekil Ek.3.b %10 Silis dumanı katkılı beton içindeki donatıya Cl<sup>-</sup> konsantrasyonunun etkisi



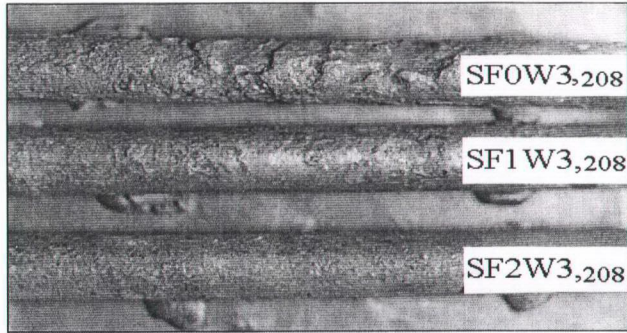
Şekil Ek.3.c %20 Silis dumanı katkılı beton içindeki donatıya Cl<sup>-</sup> konsantrasyonunun etkisi



Şekil Ek.3.d Karma suyu 40000 mg/L Cl<sup>-</sup> içeren beton içindeki donatının korozyonuna silis dumanı oranının etkisi (28. gün)



Şekil Ek.3.e Karma suyu 40000 mg/L Cl<sup>-</sup> içeren beton içindeki donatının korozyonuna silis dumanı oranının etkisi (208. gün)

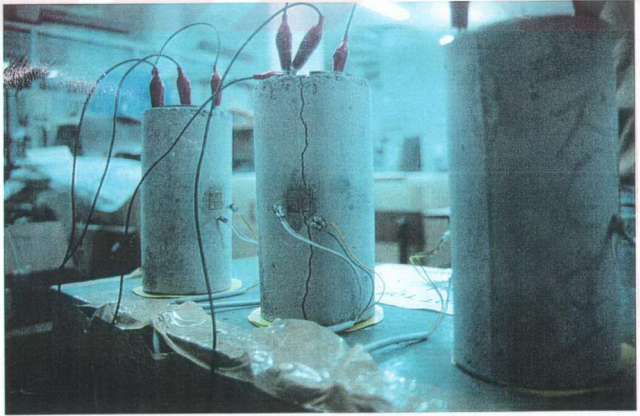


Şekil Ek.3.f 40000 mg/L Cl<sup>-</sup> konsantrasyonundaki çözeltide bekleyen beton içindeki donatının korozyonuna silis dumanının etkisi (208. gün)





Şekil Ek.4 Hızlandırılmış korozyon deneyi setinden bir görünüş



Şekil Ek.5 Hızlandırılmış korozyon deneyinde çatlayan numunelere örnek

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi 07.09.1968

Doğum yeri Sivas

Lise 1982-1985 Sivas Lisesi

Lisans 1985-1989 Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1989-1992 Yıldız Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı

Doktora 1992-1998 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri  
Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı  
Programı

**Çalıştığı kurumlar**

1990-1991 Mitaş İnş.Tic.Ltd.Şti

1991-Devam Ediyor YTÜ İnşaat Fakültesi İnşaat Müh. Bölümü  
Yapı Malzemeleri Anabilim Dalı  
Araştırma Görevlisi