

104201

**DONATILI BETONDA KOROZYON HASARI VE
GİDERİLME YOLLARI**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMENTASYON MERKEZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mimar Funda DELİKANLI
(502981092)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Haziran 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Haziran 2001**

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mustafa E. KARAGÜLER

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Erol GÜRDAL

Prof.Dr. Halit Yaşa ERSOY

HAZİRAN 2001

104201

ÖNSÖZ

Hazırlamış olduğum bu çalışmada gerek konu seçimi ve içeriği, gerekse çalışma ve araştırma yöntemi konusunda bana yol gösteren, destek ve anlayışını esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Mustafa Karagüler'e teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca; tüm hayatım boyunca bana destekde bulunan, çalışmam boyunca yardım ve desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarıma, sevgili annem Fahriye Delikanlı, babam İnş. Müh. Ahmet Delikanlı ve kardeşim Cihan Delikanlı'ya teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2001

Funda DELİKANLI



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR	vii
TABLO LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	1
2. BETONARME YAPILARDA BETON KOROZYONU	6
2.1. Beton Korozyonunun Tanım	6
2.2. Beton Korozyonu Çeşitleri	6
2.2.1. Fiziksel-Mekanik Korozyon	7
2.2.1.1. Don Etkisi ve Donma- Çözünme Tekrarları	7
2.2.1.2. Isıl Gerilmeler	9
2.2.1.3. Hidrolik Rötire	10
2.2.1.4. Sünme	10
2.2.1.5. Şok Dalgaları	11
2.2.1.6. Aşınma	12
2.2.1.7. Erozyon ve Kaviteleşme	12
2.2.1.8. Yangına Dayalı Korozyon	14
2.2.2. Dış Etkiler Sonucu Betonda Oluşan Kimyasal Korozyon	15
2.2.2.1. Tatlı Su Etkisi	15
2.2.2.2. Asit Etkisi	15
2.2.2.3. Magnezyum Tuzları ile Yüklü Suların Etkisi	17
2.2.2.4. Sülfatlı Su Etkisi	19
2.2.2.5. Deniz Suyu Etkisi	20
2.2.2.6. Tuz Etkisi	22
2.2.2.7. Karbonatlaşma	22
2.2.3. Beton İçindeki Reaksiyonlara Bağlı Olarak Oluşan Kimyasal Korozyon	26
2.2.3.1. Alkali-Agrega Etkisi	26
2.2.3.2. Uygun Olmayan Çimento Kullanımı	29
2.2.3.3. Biyolojik Korozyon	29
3. BETONARME YAPILARDA DONATI KOROZYONU	31
3.1. Betonarme Yapılarda Donatı Korozyonu Mekanizması	31

3.1.1. Betonda Oksijen Faktörü ve Difüzyonu	34
3.1.2. Korozyon Riskinin Ölçülmesi	35
3.1.3. Betonarme Yapılarda Donatı Korozyonu Sonucu Çatlak Oluşumu	37
3.1.4. Siyah Pas	37
3.2. Betonarme Yapılarda Donatı Üzerinde Oluşan Korozyon Çeşitleri	38
3.2.1. Çukurcuk Korozyonu	38
3.2.2. Bakteriyel Korozyon	39
3.2.3. Rastgele Akımların Oluşturduğu Korozyon	40
3.3. Betonarme Yapılarda Donatı Korozyonunun Temel Sebepleri ve Mekanizmaları	40
3.3.1. Karbonatlaşma	41
3.3.1.1. Beton İçerisinde Karbonatlaşmanın İlerlemesi	43
3.3.2. Klor Etkisi	46
3.3.2.1. Klor Kaynakları	46
3.3.2.2. Betona Klor Taşınımı	46
3.3.2.3. Klor Etki Mekanizması	47
3.3.2.4. Klor İyonlarının Zararları	49
3.3.2.5. Özel Yapılarda Klora Sebep Korozyon	52
3.4. Öngerilmeli Betonarme Yapılarda Korozyon	53
3.4.1. Öngerilmeli Betonarmenin Tanımı	53
3.4.2. Öngerilmeli Yapılarda Korozyon Problemi	54
3.4.2.1. Korozyonun Başlaması	55
3.4.2.2. Yüksek Dayanımlı Çeliğin Korozyonu	57
3.4.3. Artgerme Kabloların Korozyona Karşı Korunması	58
3.5. Farklı Metallerin Korozyon Dirençleri	59
3.5.1. Alüminyum ve Alaşımları	59
3.5.2. Dökme Demir	60
3.5.3. Bakır ve Alaşımları	61
3.5.4. Kurşun	62
3.5.5. Paslanmaz Çelik	62
3.5.6. Çelik (paslanmaz çelik hariç)	63
3.5.7. Çinko	64
4. BETONARME YAPILARDA KOROZYONA KARŞI BETON YAPISINA VE BİLEŞİMİNE İLİŞKİN ÖNLEMLER	65
4.1. Agregası Seçimi	65
4.1.1. Agreganın Porozitesi	66
4.1.2. Agreganın Rutubeti	68
4.1.3. Agreganın Donmaya Karşı Dayanıklılığı	68

4.1.4. Agrega Būnyesindeki Zararlı Maddelerin ve Tanelerin Etkisi	69
4.1.5. Özel Agregalar	70
4.2. Su / Ćimento Oranı ve Karışım Suyu	71
4.3. Betonda Yeterli Paspayı	74
4.4. Ćimento Seçimi	78
4.5. Katkı Maddesi Olarak Puzolan Katılması	81
4.5.1. Uçucu Kül	84
4.5.2. Silis Dumanı	86
4.5.3. Yüksek Fırın Cūrufu	87
4.6. Donatı Seçimi	88
4.6.1. Epoksi Kaplamalı Donatı	89
4.6.2. Galvanize Ćelik Donatı	92
4.6.3. Paslanmaz Ćelik Donatı	92
4.6.4. Kompozit Donatı	95
4.6.5. Akrilik Lateks Sūrūlmūş Donatı	99
5. KOROZYON HASARI GŖRMŖŞ B.A. YAPILARDA HASAR ONARIM TEKNİKLERİ VE PRENSİPLERİ	100
5.1. Yūzeyssel Hasar Onarım Teknięi	100
5.1.1. Altyapı Hazırlanması	102
5.1.1.1. Hasarlı Beton Kısımların Sağlam Betondan Ayrıştırılması	102
5.1.1.2. Yūzey Temizlenmesi	104
5.1.1.3. Donatı Yūzeyi Hazırlanması	106
5.1.2. Yūzeyssel Hasar Onarımında Kullanılan Harĉ ve Betonlar	107
5.1.2.1. Ćimento Esaslı Harĉlar	107
5.1.2.2. Reĉine Bazlı Harĉlar	108
5.1.2.3. Magnezyum Fosfat Betonu	109
5.1.2.4. Lif Katkılı Betonlar	110
5.1.2.5. Lateksle Modifiye Edilmiş Beton	110
5.1.3. Donatı Takviyesi	111
5.1.4. Yūzeyssel Hasar Onarımı GŖrmūş Betonarme Elemanlarda Korozyon Riski	113
5.2. Betonarme Elemanlarda İnhibitŖr Kullanılması	115
5.2.1. Betonda Katkı Maddesi Olarak Kullanılan İnhibitŖrler	115
5.2.1.1. Anodik İnhibitŖrler	116
5.2.1.2. Katodik İnhibitŖrler	118
5.2.1.3. Karma İnhibitŖrler	118
5.2.2. Kaplamalar	119
5.2.2.1. Betona Nūfuz Eden Sıvı veya Buhar Bazlı İnhibitŖrler	120

5.3. Elektrokimyasal Önlemler	123
5.3.1. Katodik Koruma	123
5.3.1.1. Zorlanmış Akım Sistemi	124
5.3.1.2. Feda Edilen Anot Sistemi	128
5.3.2. Klorün Ortamdan Uzaklaştırılması	132
5.3.2.1. Alkali-Silis Reaksiyonu	134
5.3.2.2. Aderans Kuvveti	134
5.3.3. Yeniden Alkalileştirme	135
6. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR	137
KAYNAKLAR	146
EKLER	
Ek A	150
Ek B	154
ÖZGEÇMİŞ	157

KISALTMALAR

mm	: Milimetre
cm	: Santimetre
m	: Metre
kg	: Kilogram
in.	: Inch
GSMH	: Gayri Safi Milli Hasıla
NBS	: National Bureau of Standard
KSH	: Kalsiyum Silikat Hidrat
ASR	: Alkali Silis Reaksiyonu
w/c	: Su/çimento Oranı
ACI	: American Concrete Institute
SDPÇ	: Sülfat Dayanımlı Portland çimento
EKD	: Epoksi Kaplamalı Donatı
FIP	: Uluslararası Öngerilmeli Beton Federasyonu
FEAS	: Feda Edilen Anot Sistemi
KOAS	: Klorün Ortamdan Alınması Sistemi (chloride removal)

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1. : Korozyonun yol açtığı kayıpların endüstri dallarına göre geri kazanılabilirlikleri.....	5
Tablo 3.1. : Yarım pil potansiyelleri	36
Tablo 4.1. : En dış donatının dış yüzünden ölçülen gerekli beton örtülerinin minimum sınırları	77
Tablo 4.2. : Epoksi kaplamalı donatı ile yaş galvanize donatı Karşılaştırılması.....	93
Tablo 5.1. : Ankraj macununun teknik özellikleri	112
Tablo 5.2. : Mevcut klor iyonu miktarına göre 1 m³ betonda gereken CaNO₂ dozajı	117



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	: Bilim ve mühendislik alanı olarak korozyon ve ilgili diğer alanlar	3
Şekil 2.1.	: Zayıf onarımlı bir detayda don hasar	8
Şekil 2.2.	: Dış ortamın soğuması sırasında, zemine yakın duvarlarda, döşemede, zemin ve iç ortam sıcaklığı tarafından önlenen termik daralma sonucu meydana gelen çatlaklar	10
Şekil 2.3.	: Kolon ve kirişler bağlantısında deprem sırasında eğilme momentini taşıyamayan betonarme kolon başının kırılması	12
Şekil 2.4.	: Barajlarda oluşan kavitasyon hasarları	13
Şekil 2.5.	: Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun basınç dayanımında gözlenen azalmalar ve renk değişimleri.....	15
Şekil 2.6.	: Bir beton yapısında deniz suyu etkisi ile korozyon Aşamaları	21
Şekil 2.7.	: Betonun korozyon periyodu	24
Şekil 2.8.	: ASR nin yol açtığı hasar örnekleri	27
Şekil 3.1.	: Anotta ve katotta yeralan tepkimeler	32
Şekil 3.2.	: Çelik donatı üzerinde oluşan korozyon tepkimeleri.....	33
Şekil 3.3.	: Paspayı kalınlığı ve s/ç oranının beton ve harçta oksijen akısına etkisi	34
Şekil 3.4.	: Bir Daniel pili	35
Şekil 3.5.	: Korozyon potansiyelinin yarım pil metodu ile ölçümü	36
Şekil 3.6.	: Bir su yalıtım membranının altından alınan donatı Örnekleri	38
Şekil 3.7.	: Çukurcuk korozyonu modeli.....	39
Şekil 3.8.	: Karbonatlaşma hareketi ve korozyon eşiği ile fenofaleindeki renk değişimiyle ilişkisi	42
Şekil 3.9.	: Kısmen ve tamamen karbonatlaşma etkisindeki donatı çeliğinin karşılaştırması ve betondaki çatlaklar	43
Şekil 3.10.	: Betonarme bir kolonda karbonatlaşma hasarı.....	45
Şekil 3.11.	: Balkon çerçevesinin ve donatı çeliğinin korozyonu.....	45
Şekil 3.12.	: Pourbaix diyagramı ile alkalinite(pH)ve Cl ⁻ konsantrasyonunun çeliğin passivasyonu ve korozyonuna etkisi	48
Şekil 3.13.	: Alkalın ortamda çeliğin anodik polarizasyonu	49
Şekil 3.14.	: Bir yüzme havuzu boşaltma kanalında klor etkisine dayalı korozyon	51
Şekil 3.15.	: 17 Ağustos depreminde hasar görmüş Petkim iskelesinin donatı korozyonuna uğramış kazıklarından biri	52
Şekil 3.16.	: Kılıf tamamen enjekte edilmişse oluşan korozyon riski.....	56
Şekil 3.17.	: Kılıf kısmen enjekte edilmiş ve su doluysa oluşan korozyon riski.....	56
Şekil 3.18.	: Kılıf enjekte edilmemiş ve hava doluysa oluşan korozyon riski.....	57

Şekil 4.1. : Agrega tanelerinde suyun bulunması.....	67
Şekil 4.2. : w/c oranının tuz penetrasyonuna etkisi.....	73
Şekil 4.3. : Yetersiz sıkıştırmanın tuz penetrasyonuna etkisi.....	73
Şekil 4.4. : w/c oranı ve paspayının korozyon başlama zamanına etkisi	73
Şekil 4.5. : Deniz yapılarında kullanılabilir normal portland çimentolarında (C_3A-C_3S) bölgesi	80
Şekil 4.6. : Korozyon hızının puzolanlı ve puzolansız çimento miktarına göre değişimi	82
Şekil 4.7. : 2000 kez büyütülmüş uçucu küller	85
Şekil 4.8. : Kusurlu bir epoksi kaplamalı donatı üzerindeki anot ile katot arasında oluşan korozyon	91
Şekil 4.9. : Kompozit donatı olarak C-BAR® örnekleri	99
Şekil 4.10. : Kompozit donatı olarak C-BAR® uygulama örnekleri.....	100
Şekil 5.1. : Karbonatlaşma etkisi ile korozyona uğramış bir betonarme kolonun hatalı onarımı	101
Şekil 5.2. : Bir beton elemanın karbon elyaf kullanarak güçlendirilmesi	113
Şekil 5.3. : Yüzeysel hasar onarımı sonrası yeni oluşan anotların oluşumu	114
Şekil 5.4. : Betonda klorür iyon içeriklerine göre farklılaşan kalsiyum nitritin ürettiği korozyon önleyici etki.....	118
Şekil 5.5. : Sika FerroGard –903 uygulaması.....	120
Şekil 5.6. : Yeni yapılarda Sika FerroGard –903 uygulaması.....	121
Şekil 5.7. : Oldukça ileri korozyon riski, fakat gözle görülür korozyon hasarı olmayan yapılarda Sika FerroGard –903 uygulaması	121
Şekil 5.8. : Gözle görülür korozyon hasarı ve beton onarımı gereksinimi olan yapılarda Sika FerroGard –903 uygulaması	121
Şekil 5.9. : Virginia’da yarıklara yerleştirilmiş bir karbon bazlı anot sistemi.....	125
Şekil 5.10. : Titanyum şerit anotlu katodik sistem.....	125
Şekil 5.11. : İletken kaplamalı anot sistemleri.....	127
Şekil 5.12. : Feda edilen anotlu katodik korumanın sistem şeması	128
Şekil 5.13. : Genişlemiş alüminyum hasır kullanılması	129
Şekil 5.14. : Bir balkona 3M Çinko-Hidrojel Anot 4727 uygulaması	130
Şekil 5.15. : Bir balkonun 3M Çinko-Hidrojel Anot 4727 uygulamasından sonraki görünüşü	130
Şekil 5.16. : Klorün ortamdan uzaklaştırılma mekanizması	131
Şekil 5.17. : Çelik ağ anot kullanılarak klor iyonlarının ortamdan uzaklaştırma işlemi	132
Şekil 5.18. : Klor iyonlarının ortamdan uzaklaştırılması için battaniyeli anot sistemi uygulaması	133
Şekil 5.19. : Tekrardan alkalileştirme mekanizması	135
Şekil A.1. : Bir betonarme kolonda, hasarlı betonun çıkarılmasından sonra ortaya çıkmış, korozyonlu donatılar.....	151
Şekil A.2. : Korozyona uğramış betonarme bir elemanda, paspayının atması ve açığa çıkan donatılar	152
Şekil A.3. Korozyona uğramış kolon örneği	152
Şekil A.4. Korozyona uğramış döşeme örneği.....	153
Şekil A.5. Korozyona uğramış kiriş örneği.....	153
Şekil B.1. Taşkılla’da açığa çıkarılmış donatılara epoksi uygulaması.....	155
Şekil B.2. Epoksi uygulaması yapılmış ve henüz yapılmamış donatılar.....	156
Şekil B.3. Epoksi uygulaması ardından tamir betonu ile kaplama	156

SEMBOL LİSTESİ

C	:Karbonatlaşma derinliği (inch)
K	:Karbonatlaşma sabiti
T	:Zaman (yıl)
W	:Su Miktarı (litre)
C_m	:Çimento Miktarı (kg)
F	:Mukavemet (N/mm ²)
dx / dt	:Karbonatlaşma oranı
Do	:Difüzyon sabiti
J	:Akı (mol/m ² /san)
C	:İyon Konsantrasyonu (mol/m ³)
dc/dx	:İyon Konsantrasyonu gradyanı



DONATILI BETONDA KOROZYON HASARI VE GİDERİLME YOLLARI

ÖZET

Betonarme yapılarda korozyon problemi, inşaat sektöründe her zaman için önemini koruyan ve sıkça karşılaşılabilecek yapı problemlerinden biridir. Yapılarda korozyonun ne denli önemli olduğu, yakın zamanda 17 Ağustos 1999 Marmara Depreminde ve ardından 12 Kasım 1999 Düzce Depreminde acı bir şekilde gözler önüne serilmiştir. Bu çalışmada; bu denli önemli ve aynı zamanda da ihmal edilebilen, tedbir alınmadıkça yapılarda deprem veya benzer şok etkileri esnasında yıkıma kadar yolaçabilen korozyon problemi irdelenmiştir.

Betonarme yapılarda korozyon problemi; çoğu zaman sadece donatı problemi olarak ele alınmaktadır. Fakat; betonarme yapılarda iki tür korozyon probleminden söz etmek mümkündür. Birincisi; beton korozyonu, ikincisi ise donatı korozyonudur. Bu iki tür korozyon olayı, birbirleri ile çoğu zaman etkileşim halindedir. Beton korozyonuna maruz betonda; donatı korozyonu da çoğu zaman kaçınılmaz olacaktır. Ayrıca; karbonatlaşma veya klor etkisiyle donatı korozyonuna maruz bir yapıda, beton geçirimsizliğinin yokolması ve böylece beton korozyonunun oluşması da sürpriz olmayacaktır.

Betonarme yapıları tehdit eden korozyon olayından korunmanın yolu; başta uygun, geçirimsiz, yeterli paspayılı, doğru bileşenli beton üretmek ve gerektiğinde de koruyucu katkı maddeleri ilave ederek korozyonu başlatan korozif iyonlara karşı beton direncini yükseltmektir. Korozyon problemi ile karşı karşıya kalındığında da en önemli konu, problemi doğru şekilde analiz etmek ve en uygun onarım metodunu seçmek olacaktır..

Yukarıdaki anlatılan bilgiler esas alınarak; “Donatılı Betonda Korozyon Hasarı ve Giderime Yolları” adlı çalışma hazırlanmış ve sistematik olarak aşağıdaki gibi irdelenmiştir.

Giriş Bölümünde; korozyon genel tanımı ve mekanizması incelenmiştir. Ayrıca ilişkide olduğu diğer sektörler ve Türkiye dahil diğer bazı ülkelerde korozyonun GSMH daki toplam kayıpları ve geri kazanabilirlik değerleri veriler halinde sunulmuş ve ülke ekonomilerine getirdiği zararlara dikkat çekilmiştir.

İkinci Bölümde; beton korozyonu geniş anlamda incelenmiştir. Ayrıca; “Fiziksel-Mekanik Korozyon, Dış Etkiler Sonucu Oluşan Kimyasal Korozyon ve Beton İçindeki Reaksiyonlara Bağlı Oluşan Kimyasal Korozyon” olarak beton korozyonu bölümlere ayrılmış ve genel nedenleri ve mekanizmaları hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü Bölümde; Betonarme yapılarda donatı korozyon problemi irdelenmiştir. Öncelikle genel bir korozyon mekanizması ve sebepleri irdelenmiş, daha sonra genel anlamda korozyon çeşitleri anlatılmıştır. Betonarme yapılarda donatı korozyonunun temel sebepleri ve mekanizmaları başlığı altında klor etkisi ve karbonatlaşma etkisi ile oluşan donatı korozyonu mekanizmaları, sebepleri ve otoparklar ile köprüler gibi özel bazı yapılarda korozyon problemi incelenmiştir.

Bu bölümde ayrıca, önerilmeli betonarme yapılarda da sıkça karşılaşılan korozyon problemi ele alınmış, yapılması gereken önlemler ve koruma şekilleri incelenmiştir. Son olarak da; donatı çeliği dışında diğer metal yapı elamanlarında karşılaşılabilecek korozyon olayı ve bunların çeşitli koşullara maruz kaldıklarında gösterecekleri korozyon dirençleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Dördüncü Bölümde; korozyon olayının oluşmasında ve devamında önemli yer tutan beton ve beton bileşenleri incelenmiş, korozyona karşı betonarme yapıyı korumada ne tür özellikleri içermeleri gerektiği ve nelere dikkat edilmesi gerektiği hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca; korozyona karşı sağlanması gereken beton geçirimsizliği için betona karışım suyu ile yada çimento içine ilave edilerek katılan puzolanlar ve çeşitleri de irdelenmiştir.

Beşinci Bölümde; korozyon hasarı görmüş betonarme yapılarda hasar onarım teknikleri incelenmiş ve bu tekniklerin kullanılmasından önce onarım görecektir betonarme elemanın üzerinde ne tür bir hazırlık yapıldığı, onarıma nasıl hazır hale geldiği, kullanılan farklı teknikleri de kapsayarak incelenmiştir. Ayrıca; yüzeysel hasar onarımı görmüş betonarme elemanlarda zaman zaman ortaya çıkan korozyon tekrarı riski ve sebepleri anlatılmıştır. Korozyona karşı önlemlerin arasında yer alan inhibitörler ve elektrokimyasal tedavi yöntemleri de detaylıca ele alınmıştır.

Sonuç Bölümünde de; korozyon olayının işleyiş mekanizmasından başlanarak donatı ve beton korozyonu ve bunların çeşitleri kısaca özetlenmiştir. Korozyona karşı gerektiğinde betonda bulunması gereken katkı maddeleri, puzolanlar ve beton bileşenlere ait sağlanması gereken özellikler tablolar halinde, bellibaşlı özellikleri ile verilmiştir. Ayrıca: çalışma kapsamında; korozyon hasarı bulunan yapılarda en uygun onarım tekniğini seçmek için belli ayırıcı parametreler içeren bir soru-cevap metodu oluşturulmuştur. Böylece; en uygun tekniği belirlerken yapısal ve çevresel riskler de gözönüne alınabilecek ve doğru bir seçim olacaktır. Hasarlı betonların yüzeysel hasar onarım teknikleriyle onarımlarında izlenecek aşamalar da farklı teknikleri de içeren bir şema halinde gösterilmiştir.

THE CORROSION DEFECTS IN REINFORCED CONCRETE AND ITS PREVENTIVE WAYS

SUMMARY

The corrosion problem in reinforced concrete structures is one of the most important construction problems for everytime and can be met very often. With the earthquakes in 17th August 1999 in Marmara and then in 12nd November in Düzce, the huge importance of the the corrosion of the buildings had been seen with sorrow. In this work, the corrosion problem that has such importance, that can be neglected in the same time and also unless precautions are taken, it can let the building collapse, is studied.

The corrosion problem in reinforced concrete structure is mostly accepted as reinforcement problem. But; it's possible to talk about two kind of corrosion problem in reinforced concrete structures. The first one is the concrete corrosion and the second one is the reinforcement corrosion. In many times, these two kinds of corrosion problem affect themselves directly. For a concrete exposed to the concrete corrosion, the reinforcement corrosion will be inevitable in many times. Furthermore; for a structure exposed to the reinforcement corrosion by carbonation or chloride attack, the disappearing of the concrete impermeability and thus, the appearing of the concrete corrosion will not be a surprise.

The ways to protect the structures against corrosion is firstly to produce a health, impermeable concrete with proper concrete cover and components and also if necessary, to add preventive admixtures. When a corrosion problem is met, the most important thing is to analyze the problem properly and select the most suitable repair method.

In the base of these knowledges, this work titled as “ The Corrosion Defects in Reinforced Concrete and Its Preventive Ways” have been examined in order that can be found below.

In the 1st Chapter; the general definition and the mechanism of the corrosion has been studied. Furthermore, for some countries including Turkey and for the other sectors related with this problem, the total and available costs of corrosion in gross national product are given as input-output datas and taken attention to the losses in the country economies.

In the 2nd Chapter; concrete corrosion has been studied widely. In addition, the concrete corrosion has been divided into 3 parts as “Physical-mechanical corrosion, Chemical corrosion occurred by external affects and Chemical corrosion occurred by the reactions in the concrete”. And the informations about the general reasons and mechanisms are also given in this chapter.

In the 3rd Chapter; the reinforcement corrosion problem is examined. First of all, the main corrosion mechanism and the causes are examined and then the corrosion types are investigated. Under the title of “ The main reasons and mechanism of reinforced

concrete structures”, the corrosion mechanisms occurred by carbonation and chloride attacks and also some special structures as parking structures and bridges have been investigated.

On the other hand; in this chapter, the corrosion problem that often exists in prestressed structures, has been also searched and the precautions that have to be done and protection ways are examined. And lastly; the other metallic construction elements's reactions and their resistance to the corrosion problems have been given.

In the 4th chapter; the concrete and the concrete compounds that have been accepted as the major solution to the corrosion problem, are studied. The required properties for the protection of the structures and the things that have to be taken care, are explained. Furthermore; the puzolan and the types of it which are added to the mixing water or cement to make the concrete impermeable in order to provide the corrosion protection, are explained and informations are given detailly.

In the 5th chapter; the patching technic in the damaged reinforced concrete structures are explained and before applying this technic, the steps that have to be achieved, like surface preparation and concrete removal, have been investigated with the different types. In addition, the repeated corrosion risk that sometimes appears on the patched concrete components and the reasons are researched. The inhibitors and the electrochemical treatments are also researched with details.

In the Conclusion Chapter; firstly a brief summary of the thesis and then important conclusions about the corrosion protections and the comparison of the repair technics are placed. Furthermore; for the selection of the technic, a question-answer method is formed in order to reach the most suitable technic. Important properties of different technics and the steps that have to be followed for a proper repair are placed in the conclusion chapter.

1. GİRİŞ

Betonarme yapılarda beton ve donatı korozyonu, Yapı Mühendisliğinin başlıca problemi olarak 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi sonrasında herkes tarafından kabul edilmiştir. Daha önceleri çok fazla üzerinde durulmayan, korozyon hasarlı binalarda basit yöntemlerle asıl sebebe inilmeden çözülmeye çalışılan korozyon probleminin, deprem sonrası yapılan gözlem ve araştırmalarda aslında ne kadar ihmal edildiği, yanlış betonun nelere malolabileceği apaçık ortaya çıkmıştır. Deprem sonrası araştırmalara ilişkin bazı yazı ve makalelerde, korozyonun yapıları depremden daha çok tehdit ettiği ifade edilmiştir. [1]

Betonarme yapılarda korozyon hasarını oluşturan sebeplerin başında bilgisizlik ve dikkatsizlik gelmektedir. Kötü bir beton, geçirimli bir betonla eşdeğerdir ve bu sebeple çevresindeki agresif iyonların içeri girmesine müsaade edecektir. 17 Ağustos 1999 Marmara Depreminde bazı tespitlerde; göçmelerin çoğunluğunda beton yetersizliği görülmüştür. Beton yetersizliği yanında denetim eksikliği, ilgili standartlara uymama, çevre analizi yapmama, beton bileşenleri ile ilgili hatalar v.s. gibi türlü sebepler, beton korozyonu ve donatı korozyonunun sebepleri olarak ele alınabilir. Genellikle hasar görmüş binalarda ilk değerlendirme, çimento ve çeliğin gerektiğinden daha düşük yoğunluk ve miktarlarda kullanıldığıdır. Fakat yanlış kullanılan malzemelerin veya dikkatsizce yapılan yapıların da bu tür hasarlara yolaçtığı apaçık gerçektir. Prof.Dr. Süheyl Akman'ın "Deprem Hasarları ve Yapı Malzemeleri" adlı makalesindeki şu cümle bu eksiklikleri en güzel şekilde ifade etmektedir." Aslında ucuza yaptırılan bir proje, bilgisizce üretilen bir beton, yanlış kullanılan bir malzeme, binanın göçmesinde hırsızlıktan önce düşünülmelidir." [2]

Yapılmış olan bu tez çalışmasının kapsamında, yapıları tehdit eden korozyon probleminin sebeplerini incelenmiş, beton üretimi sırasında dikkat edilmesi gerekenler ve korozyon hasarı görmüş yapıların onarım çeşit ve esasları araştırılmıştır.

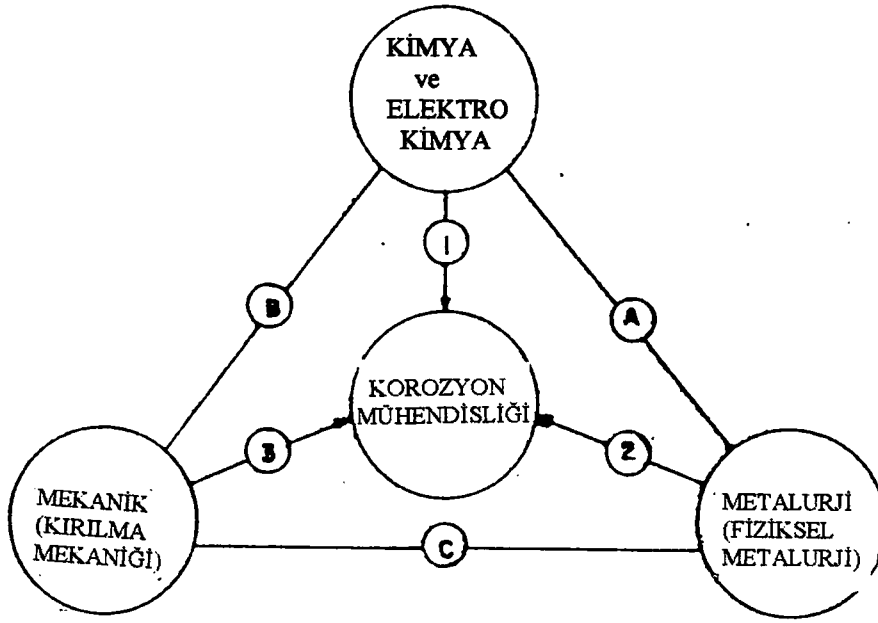
1.1. Korozyonun Tanımı

Geleneksel anlamda korozyon, metal ve alaşımlarının çevreleri ile kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonları sonucu bozulmalarıdır. Ancak; bunun yanında cam, seramik malzemeler, polimerler gibi metal olmayan malzemelerin de çevresel koşullardan benzer biçimde etkilendiklerini ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle; genel bir tanım olarak korozyonu, yapı malzemesi niteliği olan tüm malzemelerin çevrenin etkisi ile bozulması olarak ifade edebiliriz.

Korozyonun genel tarifinden de anlaşılacağı gibi oluşumu sağlayan reaksiyonun türüne göre kimyasal ve elektrokimyasal korozyon olmak üzere iki tür korozyon olayından sözedilebilir. Kimyasal korozyon metal ve alaşımların gaz ortamlar içindeki oksitlenmesidir.(kuru korozyon) Elektrokimyasal korozyon ise metal ve alaşımların sulu ortamlar içinde bozulmaları olarak adlandırılır.

Korozyon olayının esasen tanımlanmasında ilk aşama, elektrokimyasal ilkelerin tariflenmesi ve uygulanmasıdır. Elektrokimyasal yaklaşımda, korozyona uğrayan metal yüzeyinin sürekli bir ortam oluşturduğu kabul edilir. Korozyona dayanıklı krom veya krom-nikel çeliklerinde bazı koşullar altında oluşabilen “tane sınırları korozyonu” malzeme iç yapısının korozyon olayında nedenli önemli olduğunu gösteren ilginç bir örnektir. Bu tür etkenlerin değerlendirilmesinde, malzeme bilimi ve fiziksel metalurji gibi malzeme iç yapısını konu alan yaklaşımlara gereksinme vardır.

Korozyon olayını, mekanik gerilmeler de büyük ölçüde etkiler. Bu ilişkiyi mekanik özelliklerin korozyondan etkilenmesi şeklinde de tariflemek mümkündür. Mekanik gerilmeler (dıştan uygulananlar veya iç gerilmeler) altındaki metallerin korozyonla bozulmalarını yalnızca elektrokimyasal oluşum düzenleri ile tariflemek olanaksızdır. Metalin şekil değiştirme ve kırılma özelliklerinin bozulma üzerindeki etkisi birçok hallerde en önemli etkenler olarak karşımıza çıkar. Bu yönleri ile korozyon, Şekil 1.1’deki ilişkiler şemasında ayrıca tanımlanmaya çalışılmıştır.



Şekil 1.1 Bilim ve mühendislik alanı olarak korozyon ve ilgili diğer alanlar.

Korozyon mühendisliğine temel katkılar:

1. Kimyasal ve elektrokimyasal ilkeler,
2. Malzemelerde korozyon direncini belirleyen iç etmenler,
3. Mekanik yüklemelerin etkisi.

Alanlararası ilişkiler: A. Genel korozyon, B. Çevresel kırılmalık (gerilimli korozyon v.b.), C. Mekanik davranış (mekanik özellikler, şekillendirme, kırılma)

[3]

Korozyon olayında tahribat hızı ve tahribatın genel olarak oluşma sebepleri hayati önem taşır. Aynı zamanda; korozyonun olası etkileri de dikkate değer bir önem taşımaktadır. Basit bir ifadeyle; korozyonu bir çeşit atık biçimi olarak ifade edebiliriz. Özellikle binalarda bu tür atıklar, tekrar yerine konulması gerekebilen metal tahribatlarıyla mutlak anlamda sınırlı değildir, ayrıca korozyon esnasında yada sonucu olarak oluşan diğer metallerin tahribiyle de tam olarak etkisi ifade edilemez. Örneğin; servis alanlarındaki metallerin korozyonu (borular, su tankları, kazanlar, radyatörler, v.s.) servislerin çalışmalarındaki kesintilere yol açmakla kalmaz, binanın bünyesindeki kazara su sızıntılarına da yolaçabilir. [4]

Korozyonun doğrudan ve dolaylı olarak açtığı ekonomik kayıplar, önemini belirleyen en önemli göstergedir. *Doğrudan kayıpların* en önde gelen kaynağı, korozyona karşı verilen savaşta başvuru olan önlemlerdir. Korozyona dayanıklı malzemeler, yüzey kaplamaları, etkenliğini azaltmak amacı ile korozif ortamlara

yapılan ilaveler ve görevini yapamayacak derecede bozulmuş parçaların yenileri ile değiştirilmeleri, bir anlamda korozyonun fiyatını oluşturmaktadır. [3]

Korozyonun yolaçtığı kayıplar toplamı, endüstriyel gelişmişlik düzeyi ile yakın ilgilidir ve tahminlere göre gayri safi milli gelirin %3,5'inden başlayarak %5'e kadar yükselebilir. Korozyonla uğranılan kayıpların geri kazanılmasında izlenecek temel ilke, bu alanda mevcut bilgi ve deneyimlerin en iyi biçimde kullanılmasıdır.

Bu alanda bilinen en kapsamlı araştırma National Bureau of Standard'ın (ABD) 1975'de gerçekleştirip 1978 yılında yayınladığı çalışmadır. Bu çalışmada; ülke ekonomisi 130 sektöre bölünerek her sektördeki “doğrudan ve dolaylı korozyon kaybı”, “doğrudan ve dolaylı önlenabilir korozyon”, “girdi-çıkıtı” analizi ile incelenmiş ve her sektör için “birim dolar başına” korozyon kayıpları ve önlenabilir korozyon kayıpları için “endüstri katsayıları” hesaplanmıştır. Bu araştırmaya göre; 1975 yılında metalik korozyonun ABD ekonomisine yüklediği yük GSMH'nin %4.2'si yani 70 milyar dolar civarındadır. Bunun %15'i yani 10 milyar doları, “önlenabilir korozyon kaybı”dır.

NBS'in bu çalışması ve katsayılardan yararlanılarak Türk Ekonomisinin uğradığı metalik korozyon kayıpları da 1982 yılından beri analiz edilmektedir. 1975 ve 1985 yıllarına ait girdi-çıkıtı analizlerinden yararlanılan bu çalışmalarda, Türk Ekonomisinde mevcut 64 sektör için ya NBS endüstri kayıtlarından yararlanılmış veya uyarlamalar yapılmıştır. Bu araştırmada, daha önceki çalışmaların ışığında ve 1991 yılı girdi-çıkıtı analiz değerleri ve daha önce üretilen katsayılardan yararlanılarak, Türk Ekonomisini oluşturan 64 sektör “korozyon kaybı” ve “önlenabilir korozyon” açısından değerlendirilmiştir..

Sonuç olarak; 1991 yılı ülkemizde korozyon kaybı:

Doğrudan + dolaylı toplam korozyon kaybı = %4.36 GSMH

Önlenabilir doğrudan + dolaylı toplam korozyon kaybı = %1.63 GSMH [5]

1970 yılında İngiltere'de yapılan bir çalışmada, yalnız bu ilkeye uyarak geri kazanılabilecek kayıpların yüzde miktarları endüstri dallarına bağlı olarak belirlenmeye çalışılmıştır ve elde edilen bu değerler Tablo 1. 1.' de gösterilmiştir.

Tablo1.1.Korozyonun yol açtığı kayıpların endüstri dallarına göre geri kazanılabilirlikleri. [3]

Endüstri dalı	Geri kazanılabilirlik, %
Yapı ve inşaat	20
Gıda	10
Genel mühendislik	32
Deniz	20
Metal izabe ve yarı üretim	13
Petrol ve kimya	8
Enerji	42
Taşımacılık	29

2 . BETONARME YAPILARDA BETON KOROZYONU

2.1. Beton Korozyonunun Tanım

Korozyon, betonun ve/veya beton içine gömülü çelik donatının, fiziko-kimyasal çevresel dış etkenler sonucu niteliklerini kaybetmeleri anlamına gelmektedir.

Çeliğin korozyonu, metal malzemeye daha sıkı ilişkisi olan mühendislik alanlarının, beton korozyonu ise çelikten tamamen farklı süreçlerde oluşan ve inşaat mühendislerini ilgilendiren bir olaydır. Fakat; çelik donatılı betonların korozyonunda, betonun ve çeliğin korozyon süreçleri birbirlerinin etkisindedir ve her iki süreç birleşerek yapı elemanının daha yoğun ve daha hızlı bir biçimde yıpranmasına yol açar. Örneğin; betonun deniz suyu etkisiyle çatlaması, parçalanması; donatıya klor iyonlarının daha hızlı bir şekilde erişmesine ve donatının daha çabuk korozyona uğramasına sebep olur; ayrıca donatının paslanması sonucu meydana gelen hacim artması, betonun parçalanmasının ve kopmasının bir nedenidir. [6]

2.2. Beton Korozyonu Çeşitleri

Beton korozyonun 3 ana grupta toplayabiliriz;

1. Fiziksel – Mekanik Korozyon

- i. Don etkisi ve donma – çözülme tekrarları
- ii. Isıl gerilmeler
- iii. Kuruma rötresi
- iv. Sünme
- v. Şok dalgaları
- vi. Aşınma
- vii. Erozyon ve Kaviteasyon
- viii. Yangına dayalı korozyon

2. Kimyasal Korozyon

Kimyasal korozyonda kendi içinde 2 gruba ayrılabilir:

i. Dış etkiler sonucu betonda oluşan kimyasal korozyon

- Tatlı su etkisi
- Asit etkisi – Karbonik asitli su etkisi
- Magnezyum tuzları ile yüklü su etkisi
- Sülfatlı su etkisi
- Deniz suyu etkisi
- Tuz etkisi
- Karbonatlaşma

ii. Beton içinde reaksiyonlara bağlı olarak oluşan kimyasal korozyon

- Alkali – Agregat Etkisi
- Alkali – Silis reaksiyonu
- Alkali – Karbonat reaksiyonu
- Uygun olmayan (bozuk) çimento kullanımı
- Biyolojik korozyon

2.2.1. Fiziksel-Mekanik Korozyon

2.2.1.1. Don Etkisi ve Donma-Çözülme Tekrarları

Don etkisi, beton ıslakken süregelen sık donma-çözülme tekrarları sonucunda betona etki eder ve hasar oluşturur. Zemin ile su tahliyesi yapılan ya da biriken yerlerle doğrudan ilişkide olan betonlarda bu hasar türü sık sık görülür. Özellikle parapetler, heriki tarafları da dış hava koşullarına maruz kaldıkları için büyük hasar riski taşırlar. [7 sf.59]

Betonun priz olayından önce don olayına maruz kaldığı durumda, hidrasyon düşük sıcaklık boyunca ertelenir. Çözünme başladığında, karışım suyunun genleşmesi, büyük hacimlerde gözenekler oluşturmak eğiliminde olmasına rağmen beton ciddi bir mukavemet kaybına uğramadan katılaşacak ve priz yapacaktır. Eğer donma, beton prizinden sonra gerçekleşirse, buzun formasyonu ile oluşan genleşme, bozulmaya ve onarılamaz bir mukavemet kaybına yol açar. Yeterli mukavemeti elde edilmiş betonda, 5-14 Mpa (700 – 2000 psi) arasında sıralanan değerler, buz formasyonu ile oluşan genleşme kuvvetlerine karşı direnç gösterebilir.

Doymuş ve sertleşmiş beton düşük sıcaklıklara maruz kaldığı zaman kılcal boşluklardaki su donar ve genleşme oluşur. Erimeye, daha ileri seviyede genleşme

ortaya çıkar ve böylece tekrar edilen donma-çözülme tekrarları, kümülatif bir etki gösterirler. Hacim etkileri, jel gözeneklerindeki erimiş alkalilerin konsantrasyonundaki değişimler ve yüksek yüzey çekme eğilimleri, donmanın büyük boşluklarda başlamasına ve küçüklere kadar uzamasına sebep olur. Jel gözenekleri, buz formasyonunun içlerinde oluşmasına uygun olacak şekilde çok küçüktür fakat; sıcaklık düştüğü zaman jel suyu buz da içererek kapiler delikler içine difüzyon etme eğilimi gösterir, bu da genişlemeyle sonuçlanır. Özellikle; çözelti, buz çözücü kimyasallar içerdiğinde, tekrarlanan donma-çözülme devirleri, genişlemiş basınçta bir yükselmeye yol açar, böylece çatlama ve bozulma oluşur. Beton içinde genişlen basınç, çekme mukavemetini aşarsa çatlama ve hasar oluşur. Hasar büyüklüğü; yüzey kabarması, betonun gevrekleşmesi, tabakalara ayrışma (delamination) ve bazen matriksin şiddetli dağılmasına kadar çeşitlilik gösterir. [7-8]

Donma-çözülme hasarına karşı eğilimli olan beton, ilk aşamada yeterince suya geçirgenliği olan betondur. Bu nedenle; donma-çözülme hasarı, ancak yeterince geçirimsiz bir beton üreterek engellenebilir, böylece beton içine donmaya müsait çok fazla su bulunmaz. Diğer bir çözümde; doğru bir hava sürükleyici kullanarak düzgün aralıklarla yerleşmiş hava kabarcıklı bir hamur elde etmektir. Eğer donan su, yükselen basınç büyük boyutlara ulaşmadan bir hava kabarcığına ulaşırsa, hasar önlenmiş olacaktır. [14]



Şekil 2.1. Zayıf onarımlı bir detayda don hasarı.[9]

2.2.1.2. Isıl Gerilmeler

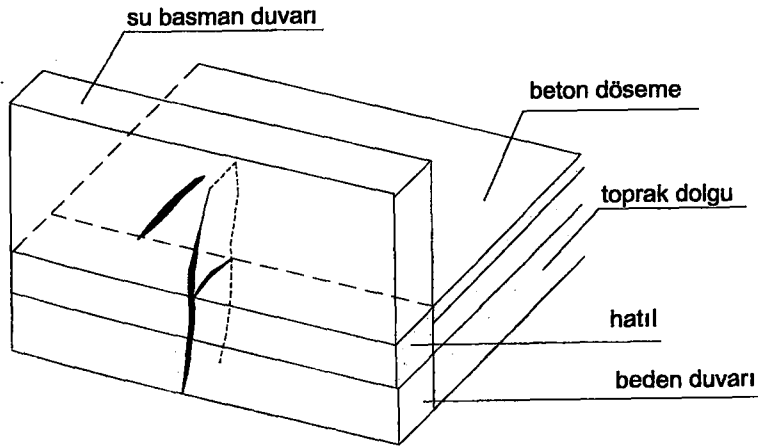
Isıl gerilmeler, sıcaklık farklılaşmalarından dolayı betona etkiyen ve hasara yol açan ısı hareketleridir. Genelde bu ısı hareketler, mevsimsel değişimler olarak düşünülür fakat; İngiltere ve Avrupanın bazı bölgelerinde bulunan günlük hızlı ve aşırı sıcaklık farklılıkları,yapı dayanıklılığı için çok ciddi sorunlara yolaçabilir. [7]

Bir beton yapı içinde sıcaklık değişimleri, hacim farklılaşmaları ile sonuçlanır. Genleşme veya büzülme engellendiği zaman, sonuçta oluşan çekme gerilmeleri betonun çekme gerilme kapasitesini aşar ve hasar oluşur. Çimento hidratasyonuna bağlı sıcaklık değişimlerinin etkileri, kütle betonu ile yakın ilişkidir. Büzülme ve genleşme, daha önceden oluşan çatlakları açmaya ve kopmaya sebep olur.

Genellikle, bir strüktüre zarar veren ısı değişimler, içinde yüzey sıcaklıklarının çabucak değiştiği ve sadece bileşenlerin içindeki sıcaklığın yavaşça değiştiği hızlı değişimlerdir. Bu durum, kavisli bir sıcaklık eğimi oluşturur ve bu eğimin en dik kısmı bilhassa dış yüzeydeki 1 inc.lik (2,54 cm) katmandır. Isıl gerilmenin yol açtığı görünür belirtilerden yüzey parçalanması (surface spalling), aniden yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonun sıcak yüzeyi ile soğuk iç kısmı arasında yükselen keskin ve dik sıcaklık eğrisine bağlı olarak oluşan ısıl gerilme sonucu oluşmaktadır. [8]

Kış aylarında, duvarların dışı daralma eğilimindedir, fakat bunun yanında toprak içinde kalan bölüm ve binanın içi daha sıcaktır. Duvara bağlı olan bu iç bölümler genişlerler. Bu ters davranışlar sonucunda, duvar dışında çekme gerilmeleri oluşur ve düşey yönde gelişen çatlaklar meydana gelir. Duvarla bağlantılı olan döşemede de yatay çatlaklar oluşabilir. Bu çatlaklar da duvara yakın bölgelerde geniş olacak, döşemenin iç bölgesinde daralıp kaybolacaktır. Şekil 2.2., ısıl gerilmeler sonucu beton duvarlarda ve döşemede oluşması muhtemel çatlakları betimlemektedir.

Benzer olaylar; özellikle üstü teras olan çatı döşemelerinde yani; dış duvarların döşemelere yakın kısımlarında meydana gelir. Buralarda çatlaklar; parapet duvarlarında, düşey yönde ve çatı döşemesi seviyesinde oluşmaktadır. Atmosfer sıcaklığının etkisi; uyum göstermeyen malzemelerin yanyana gelmesi halinde açık bir şekilde ortaya çıkar. Çok eski bir betonla yeni bir betonun uygunsuzluğu, ısıl gerilmeleri farklı şekilde algılayacaklarından beton hasarına yolaçabilir. [10]



Şekil 2.2. Dış ortamın soğuması sırasında, zemine yakın duvarlarda, döşemede, zemin ve iç ortam sıcaklığı tarafından önlenen termik daralma sonucu meydana gelen çatlaklar. [10]

2.2.1.3. Hidrolik Rötire

Hidrolik rötire, genelde sertleşmiş betonun ilk günlerde yaptığı ve suyunu kaybetmesi sonucu oluşan büzülme olarak ifade edilir. Beton başlangıçta priz yapıp sertleşirken, hafifçe büzülür ve daha fazla rötire, kuruduğu esnada ve karbonatlaşmaya bağlı olarak oluşur.[8] Suyun buharlaşması sonunda betonun ağırlığında azalma gözükür ve bu azalma ile birlikte rötirede artış devam eder. Bu olay genelde beton üretimini takiben 6 aylık bir periyot içinde devam eder. Daha sonra ağırlıkta artışlar oluşmaya başlar. Bu artışlar; karbonatlaşma nedeniyle, yani serbest kirecin havadaki CO₂ tutması sonunda meydana gelmektedir. 6 ay sonunda kaybolan su miktarından daha fazla miktarda CO₂ betona girmektedir. Bu durumda; beton ağırlığı azalmayıp artmasına rağmen rötirede artış görülür.[11sf127] Eğer rötire engellenirse, gerilme stresleri oluşur ve bu olay çatlamayla sonuçlanır. Engellenen rötireye bağlı olarak oluşan çatlaklar, genelde yapımdan sonra farkedilir, fakat yavaş kuruma olduğu yerde uzun süre görülmeyebilir. Oluşan çatlak, saç teli kadar incelikten 3mm (1/8 in.) kadar kalınlığa kadar farklılaşabilir ve genelde nem, CO₂ ve diğer zararlı tuzlar için betona bir giriş olarak kullanılır. [8]

2.2.1.4. Sünme

Sünme, sürekli yük altında betonda oluşan devamlı deformasyondur ve sonuçları uzun yıllar sonra görülür. Sünmenin etkisi, bir baskı altında betondaki gerilmede

azalmaya yol açmaktır. Yine de; strüktürel elemanların sünmesine izin vermede başarısız kalan yetersiz tasarım, bölme duvarlar veya kaplama panelleri gibi strüktürel olmayan elemanlara yük transferi ile sonuçlanır, bu da sonuçta hasar ve çatlamalara yol açar.[8]

Taşıyıcı eğilme elemanlarında meydana gelen sehimler nedeniyle, kat duvar yüklerinin alt kat kirişlerine aktarılması ve zemin kat kirişlerinin çatlaması olayı, ilginç bir hasar türüdür. Kat betonlarının kalıpları alınır alınmaz duvarların örülmesine geçilirse, örülen duvar üstündeki kiriş sehimi yapar ve üstündeki yükü alttaki duvara aktarır. Böylece tüm katların duvar yüklerinin enalt kattaki kirişe aktarılması, bu kirişin aşırı yüklenmesine, çatlamasına bazen de çökmesine yolaçar. [10]

2.2.1.5. Şok Dalgaları

Beton, heterojen bünyesine bağlı olarak kapak atmaya (spalling) eğilimlidir. Bu olay özellikle deniz yapılarında dalgaların; agrega, matriks ve donatı gibi bir kaç bileşene doğru geçen değişik yük aktarım oranına bağlıdır.

Şok dalgaların oluştuğu birkaç durum aşağıda yer almaktadır;

- Deprem esnasında oluşan gerilmeler
- Bombalama sırasında oluşan gerilmeler [8]

Deprem esnasında oluşan yatay kuvvetler kolon ve kirişlerin birleşim noktalarında yoğunlaşırlar. Bu düğüm noktalarındaki eğilme momentleri, büyük değerler alırlar. Böylece; düşey yükler altında normal kuvvetin daha etkili olduğu kolonlar, deprem sırasında başları eğilmeye çalışan elemanlara dönüşürler. Şekil 2.3., bir betonarme kolon başının deprem sırasında yükselen eğilme momenti sonucu kırılmasını göstermektedir. [10]

Şok dalgaları sonucu hasar görmüş betonarme bileşenlerinin onarımı yapılmaması durumunda içeriye girecek hava, su ve zararlı iyonlar sonucunda donatı korozyonu kaçınılmaz olacak ve betonarme yapıyı içten çürütecek bir mekanizma başlayacaktır.



Şekil 2.3. Kolon ve kirişler bağlantısında deprem sırasında eğilme momentini taşıyamayan betonarme kolon başının kırılması.

2.2.1.6. Aşınma

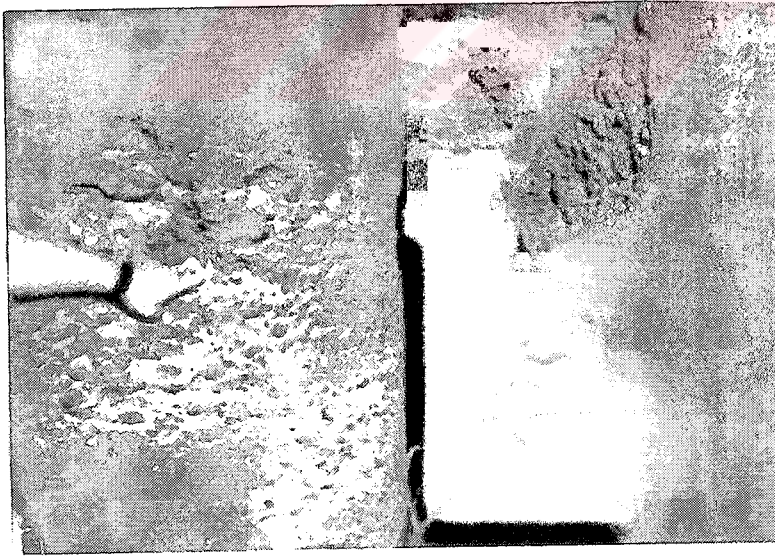
Aşınma, betonda tekrarlanan ovalama ,yuvarlama ve sürtünme olayları sonucu betonun tahribatıdır. Döşemelerde ağır yüklü çelik tekerlekler, döşemeyi kazıma, eskitme, sürtme kombinasyonuna maruz bırakır. Bu da aşınmaya yol açar. [8] Genellikle bu hasar, yol ve havaalanı pistlerinde gözlenir. Bu hasarda, agrega yüzeyleri parlaktır ayrıca; trafik yönüne ve virajlara uyan aşınma çizgileri oluşmuştur. Aşınma sırasında betondan sökülerek oluşan tozların varlığı ve döküntü tozları bu hasarı gösteren kanıtlardır. (10 sf 81)

2.2.1.7. Erozyon ve Kaviteasyon

Erozyon, içinde taş ve çakıl gibi kütleler içeren suların, aşındırıcı hareketleri tarafından oluşan aşınmaya denir. Kaviteasyon ise, yüksek akma hızındaki buhar kabarcıklarının şiddetlice içeriye doğru çökmesiyle oluşur. Yüksek akma hızına rağmen, pürüzsüzce akan temiz su, betonu tahrip etmeyecektir fakat; akma hızı yada akma yönü aniden değişirse veya sudaki basınçları azaltacak koşullar oluşursa, kaviteasyondan dolayı çukurcuklar oluşabilir. [8]

Kaviteasyon olayı, sadece küçük küçük parçaların kopmasıyla sınırlı değildir. Yoğunlaşan ve şiddetlenen kaviteasyon sonucunda barajların düşüm yataklarında

tonlarca ağırlıktaki parçalar kopabilir. Barajlarda oluşan kavitasyon hasarlarından örnekler şekil 2.4 a ve b de verilmektedir. (10 sf 62-63)



Şekil.2.4. Barajlarda oluşan kavitasyon hasarları.

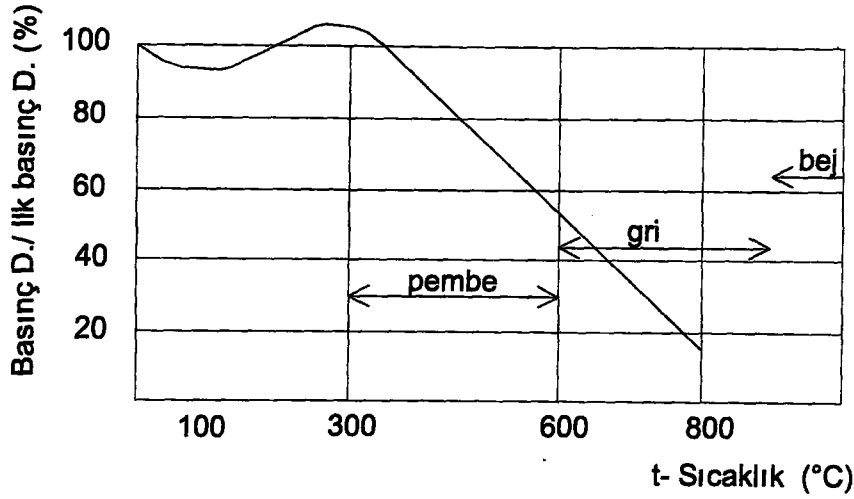
Betonun su içindeki taş ve çakıllarla erozyonu, en az kavitasyon olayı kadar şiddetli olabilir. Erozyon hızı, taşınan partiküllerin boyutu, şekli, miktarı ve sertlikleri, akan su hızı ve beton kalitesi gibi birçok faktörden etkilenir. [8]

2.2.1.8. Yangına Dayalı Korozyon

Beton yangın sırasında yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı zaman, içinde yeralan suyun buharlaşması sonucu rötreye uğrar ve yükselen sıcaklıklarda kümülatif bir şekilde hasara uğrar. Yangının beton üzerindeki etkisinde, ulaşılan sıcaklığa ve çimento cinsi, su/çimento oranı, agrega cinsi, çimento içeriği ile paspayı kadar sıcaklığın devam ettiği süreç de önemlidir.

Çimento hamurunda jel yapısı oluşturan KSH (kalsiyum silikat hidrat) katı ögeleri adsorbsiyon suyu ile birbirlerine bağlanmışlardır. Jel adsorbe suyu ve KSH'ların içindeki sular kolaylıkla buharlaşmazlar. Fakat, kılcal boşluklardaki serbest su, 100°C civarında buharlaşabilir. Yangının ilk aşamasında buharlaşan bu su, betonda rötreye sebep olur. Beton hacminin %4'üne kadar değerler alabilen serbest suyun kaybı ve buna dayalı büzülme ve buhar basıncı, donatı üzerindeki beton örtünün çatlamasına ve parçalanarak kopmasına sebep olur. Böylece; çelik donatı sıcaklıkla temas haline geçer. 300°C'den itibaren KSH'ın kimyasal bağlı suyu ve jel suyu da yokolmaya başlar. 530°C civarında Ca(OH)_2 sönmemiş kirece (CaO) dönüşür. Bu olay sonucunda %33'e varan bir büzülme oluşur. Yangına müdahale sırasında sıkılan su, oluşan CaO 'nun tekrar Ca(OH)_2 'ye dönüşmesini sağlar. Böylece; %44 civarında bir hacim artışı meydana gelir. Beton boşluklu bir yapıya dönüştüğünden, Ca(OH)_2 süzülür. Yangın sonrası yapılan incelemelerde tespit edilen kireç lekeleri, sıcaklığın 550°C'yi aştığını gösterir.

Yangınlarda genellikle 900°C (1652°F) geçen sıcaklıklarda dış katmanlar şiddetlice etkilenir. Yüzey genelde kavrulur ve parçalanır. Yüzey katmanının soyulması, beyaz betonu ve çoğu rastgele yüzey çatlaklarını ortaya çıkarır. Şekil 2.5., yüksek sıcaklıklarda betonun basınç dayanımlarının nasıl etkilendiğini ve renk değişimlerini göstermektedir. [10 sf41] Çoğu çatlaklar yüzeyseldir, fakat bazıları daha derine iner ve agrega taneciklerini kırar. Donatının termal genleşmesi, betonunkinden daha büyük olmaya müsait olduğu için, çeliğin etrafında patlama stresleri ve beton çatlakları oluşur. [8]



Şekil 2.5. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun basınç dayanımında gözlenen azalmalar ve renk değişimleri. (Sıcaklık 1200°C'yi geçince renk sarı olur.) [10]

2.2.2. Dış Etkiler Sonucu Betonda Oluşan Kimyasal Korozyon

2.2.2.1. Yumuşak Su (soft water) Etkisi

Yumuşak su, kalsiyum hidroksiti çözerek çimento bileşiklerini ayrıştırır ve sonuçta sadece şekilsiz bir hidratlanmış silis tortu, demir oksit ve alümin bırakır. Bu tür bir reaksiyon, su beton kütlesine sürekli olarak geçmedikçe yavaş ilerler. CO₂ veya organik yada inorganik asitlerin oluşumuna bağlı olarak asidik sular, daha agresiftir. Zarar derecesi ve hızı, asitlik oranı ve azalan PH değeri ile artar. Doğal sularda beton çözünme hızı, serbest CO₂ konsantrasyonuna bağlıdır. [8]

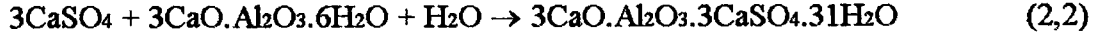
2.2.2.2. Asit Etkisi

Asit etkisi, kalsiyum hidroksitin şiddetlice etkilendiği bir reaksiyondur. Hem mineraller (sülfürik, hidroklorik, nitrik ve fosforik asitler) hem de organik asitler (laktik, asetik, formik, lanik, propionik) betona karşı agresif bünyedelerdir. Etkiyen asit, genellikle betondaki asitin kalsiyum tozunu tortu bırakır. Örneğin; sülfürik asit, çimentoda alçıtaşı olarak tortulaşan kalsiyum sülfatı oluşturmak için kalsiyum hidroksitle reaksiyona girer:



Daha sonra; ilk çimento ürünü (örn. kalsiyumsülfat) çimentoda kalsiyumsulfo alüminat(etrenjit) oluşturmak için alüminat fazlar ile reaksiyona girer.

Kalsiyumsulfoalüminatın sonraki kristalleşmesi betonda genişletici bozulmaya yol açar.



Sülfat iyonu içermeyen asitler, genişlemenin eşlik etmediği asit korozyonuna yol açarlar. Örneğin; beton üzerine bir organik asit zararı, çimentonun çözündüğü ve çok düşük bir mukavemeti olan kohezyonsuz bir kütle üretir. Beton ile temas halinde olup, zararlı etki gösteren birçok organik asit vardı ve bunlar 2 gruba ayrılabilirler:

- 1) Düşük moleküler ağırlıklı asitler; laktik, asetik, butrik, oksalik asit gibi suda çözünen;
- 2) Yüksek moleküler ağırlıklı asitler; aleik, stearik ve yağlarda bulunan palmitik asit gibi;

Laktik asit, Çimento hamuru üzerine yıkıcı etki gösterir. Süthanelerde ve peynir fabrikalarının betonarme döşemelerinde bu tür laktik asit zararı gözükabilir.

Bütrik asit, laktik asitle benzer etkilere sahiptir. Silo duvarlarında zararlı etkilere sahip olabilir.

Asetik asit, Hem Portland hemde yüksek alüminli çimentoya şiddetlice zararlıdır. Birkaç ay çerçevesinde belirgin zararlar gösterir.

Sitrik, tartarik ve malik asitler, asitik asitle aynı şekilde etki ederler. Karşılaştırma olarak; oksalik asit betona daha az tesirlidir. Portland – puzolan çimento karışımları bu tür asitlere daha çok dirençlidirler. [6]

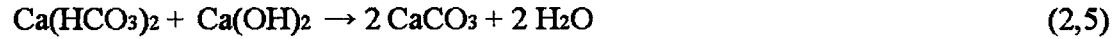
Karbonik Asitli Su Etkisi: Yeryüzünde bulunan tüm sular karbonik asit içerirler. Su, atmosferdeki bir miktar CO₂ 'i çözerek bünyesine alır. Karbonik asit, “kimyasal çözme ve iyon değiştirme” korozyonuna yol açar. Bu olayı; karbonat, silikat ve alüminatlarla yaptığı kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşur. Karbonik asitin karbonatlarla olan etkileşimi, en yaygın olanıdır. Bilindiği gibi CaCO₃ ve Mg CO₃ suda erimezler, buna karşılık bikarbonatlar suda çözünen tuzlardır. Karbonik asitin etkisi, karbonatları bikarbonatlara dönüştürmek şeklinde ortaya çıkar. Öncelikle suda bulunan CO₂, aşağıdaki tepkime ile karbonik asite dönüşür;



Bu arada suyun içinde buluna bir miktar kireç CaO ile su içinde bulunan CO₂ ile tepkimeye girerek CaCO₃ oluşturur. Bu madde ile H₂CO₃ arasındaki tepkime ise kalsiyumbikarbonatı meydana getirir.



Oluşan Ca(HCO₃)₂ çimentodaki Ca(OH)₂ ile tepkimeye girerek tekrar karbonata dönüşür.



Suda bulunan CO₂ miktarı az ise, tepkime sonunda suda CO₂ kalmaz ve reaksiyon durur. Böylece önceden meydana gelen CaCO₃ betonun boşluklarını doldurarak cismin dış etkilere karşı daha dayanıklı hale gelmesine sebep olur. Fakat; tam tersi bir durumda, CO₂ miktarı fazla yada devamlı yenileniyorsa, serbest kalan CO₂, CaCO₃'la tepkimeye girer:



Böylelikle kalsiyum bikarbonat oluşumu ile betonun ayrışması devam eder. [6–11] Karbonik asit, silis ve alümin asitlerine oranla daha kuvvetlidir. Çünkü; bu asitlerin tuzlarını çözmesine olanak vermektedir. Kalsiyum silikat ve alüminatlar ise çimentonun esas iskeletini oluştururlar. Böylece; “karbonik asit, esas taşıyıcı öğeleri tahrip ederek betonu çözer.” denilebilir.

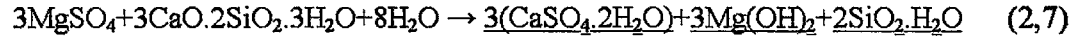
Dış yüzeyde toplanan CaCO₃ çiçeklenmeye neden olur. Beton üzerinde çok zararlı bir etkisi olmayan çiçeklenme olayı, estetik yönden betona zarar verir. [6]

2.2.2.3. Magnezyum Tuzları ile Yüklü Suların Etkisi

Mg tuzları genellikle sülfat, klorür, karbonat ve bikarbonatlardır. Mg⁺² un Ca⁺² katyonlarının yerini alma özelliği (ion exchange), Mg tuzlarının korozyif etkisinin daha zararlı boyutlarda gerçekleşmesine yol açar. Özellikle; deniz yapılarında Mg⁺² nin korozyonu daha önemlidir. Çünkü; deniz suyunda konsantrasyonu 1300 mg/l civarında bulunan bu iyonun, yüzeysel sularda konsantrasyonu 15-25 mg/l ve zemin sularında 300 mg/l'dir.

Mg⁺² iyonunun korozyon etkisini etkileyen önemli bir faktör, tuzdaki anyon türüdür. Tuzun özellikle sülfat olması, daha agresif bir etki oluşturur. Deniz sularında bulunan tuzlar, MgSO₄ ve MgCl₂' dir.

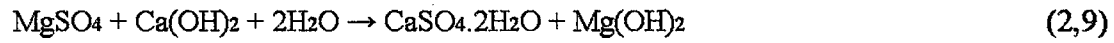
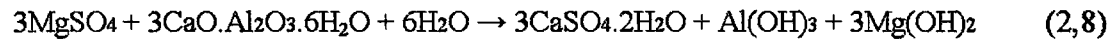
Hidrate olmuş Portland çimentolarının esas öğeleri olan kalsiyum silikatlar (3CaO.2SiO₂.3H₂O kısaca CSH), kalsiyum alüminatlar (3CaO.Al₂O₃.6H₂O kısaca C₃AH₆) ve kalsiyum hidroksit (Ca(OH)₂ kısaca CH), Mg² ile iyon değiştirme reaksiyonlarına girerler.



alçıtaşı

brusit

silis jeli



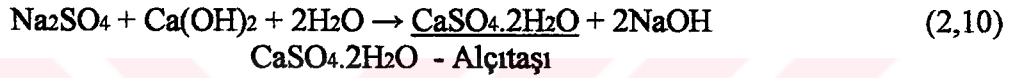
Yukarıdaki reaksiyonlarda ortak olarak, reaksiyon ürünleri olarak alçıtaşı ve amorf yapılı Mg(OH)₂ (brusit) oluşmaktadır. Hacim genişlemesiyle önce alçıtaşı oluşur, daha sonra büyük hacim genişlemesine yol açan etrenjit oluşabilir. Alçıtaşının su içinde nispeten çözünebilir karakterde olması, sağlam yapılı silikatların çözünür bir maddeye dönüştüklerini ve çimento esas taşıyıcı öğelerinin bozulduğunu göstermektedir. Bir diğer reaksiyon ürünü olan brusit yani, Mg(OH)₂ yapısal olarak korozyonda faydalı bir rol oynar. Bu madde suda erimediğinden, beton yüzeyini örter ve zararlı sülfatlı suların beton içine nüfuzunu önleyerek etrenjit oluşumunu engeller. Ancak uzun bir süre sonunda, silisjeli ile birleşerek magnezyum silikata dönüşür ve bu ürün, bağlayıcı nitelikten yoksundur. [6]

MgCl₂, MgSO₄'den farklı bir şekilde etkisini gösterir. İyon değişim reaksiyonu sonunda, Ca(OH)₂ ile birleşip CaCl₂ oluşur ve Mg(OH)₂ meydana gelir. Oluşan CaCl₂'ün zararı, fazla molekül su içeren 3CaO Al₂O₃ 3CaCl₂'m (kalsiyum kloro alüminat) meydana getirmesi ile oluşabilir. Ayrıca, MgCl₂'ün HCl asidini meydana getirerek de zararlı etkisini ortaya koyduğu bilinmektedir.[10] Fakat; diğer yandan oluşan Mg(OH)₂'in, beton yüzeyini kaplayarak zararlı suların beton içinde daha derinlere girmesini engellediği de bilinmektedir. [6]

2.2.2.4. Sülfatlı Su Etkisi

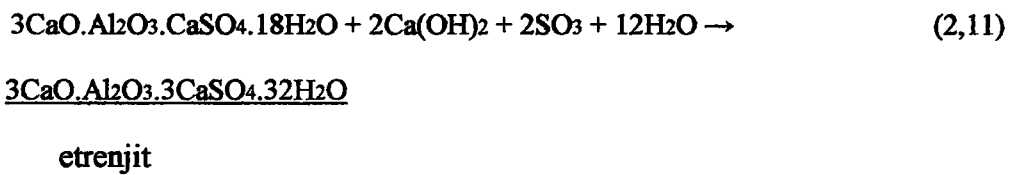
Sülfat etkisi, betondaki gözenek sistemine genellikle yeraltı suları, toprak, denizsuğu veya endüstri akıntılarından kaynaklanan sülfat çözeltilerinin sızması ile oluşur.[8] Yerüstü sularında SO₄, 60-100 mg./l konsantrasyonunda bulunurken, deniz sularında 1400-2500 mg/lt. arasında değışen değerlerde bulunmaktadır. [10]

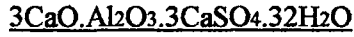
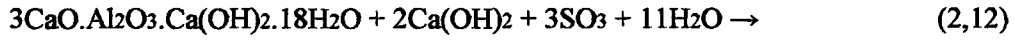
Betonda sülfatlı suların etkisi, iki şekilde ortaya çıkmaktadır. Birinci etkide, sülfat anyonları, çimento hidrasyon ürünü hidrate kireçle tepkimeye girer ve sonuçta alçıtaşı oluşur. Sülfat tuzunun katyon türüne bağılı olarak alçıtaşı ile birlikte teşekkül eden reaksiyon ürünü; suda eriyen NaOH veya suda erimeyen Mg(OH)₂ türünde olabilir. Yan ürünün eriyebilirliğine bağılı olarak korozyon daha şiddetli olacaktır. Örneğin; sodyum sülfat, magnezyum sülfata oranla sülfat etkisi açısından daha zararlıdır. Sodyum sülfatın Ca(OH)₂ ile tepkimesi aşağıda yer almaktadır.



Fakat asıl önemli etki, alçıtaşı ile veya suda ermiş halde bulunan kalsiyum sülfatla trikalsiyum alüminatın reaksiyona girmesiyle ortaya çıkar. Sonuçta meydana gelen yüksek sülfatlı sülfat-alüminat tuz(etrenjit), içerdığı kristal suyunun fazlalığı nedeniyle büyük hacim artması oluşturur. Katı haldeki tuz kristalleşerek, betonun boşluk çeperlerinde büyük basınç gerilmeleri meydana getirir. Çatlamlar şeklinde başlayan hasar ileriki yıllarda, ayrışmaya ve yumuşamaya dönüşür.

Çimentoda hidrate trikalsiyum alüminatların bir kısmı karmaşık bir yapı olan monosülfat alüminata dönüşür. Etrenjit'in oluşabilmesi için bu şarttır. Monosülfat alüminatın formülü 3CaO.Al₂O₃.CaSO₄.18H₂O'dur. Çimentoda trikalsiyum alüminat içeriğı %6'yı aşarsa, kalsiyum hidroksit içeren bir diğer karmaşık ürün daha oluşur. Bu ürün de; 3CaO.Al₂O₃.Ca(OH)₂.18H₂O'dır. Trikalsiyum alüminatların oluşturduğu bu iki karmaşık ürün de sülfat iyonları ve kireçle reaksiyona girerek etrenjit'e dönüşürler.





etrenjit

Kalsiyum sülfat dışındaki sülfatlarda, önce alçıtaşı meydana gelmektedir. Bu reaksiyondaki ikinci ürünün (NaOH, Mg(OH)₂ gibi) suda çözünürlüğüne bağlı olarak korozyon daha hafif veya daha şiddetli olur. Kalsiyum sülfat oluşumunda ise doğrudan etrenjit hasarı ortaya çıkmaktadır. [6]

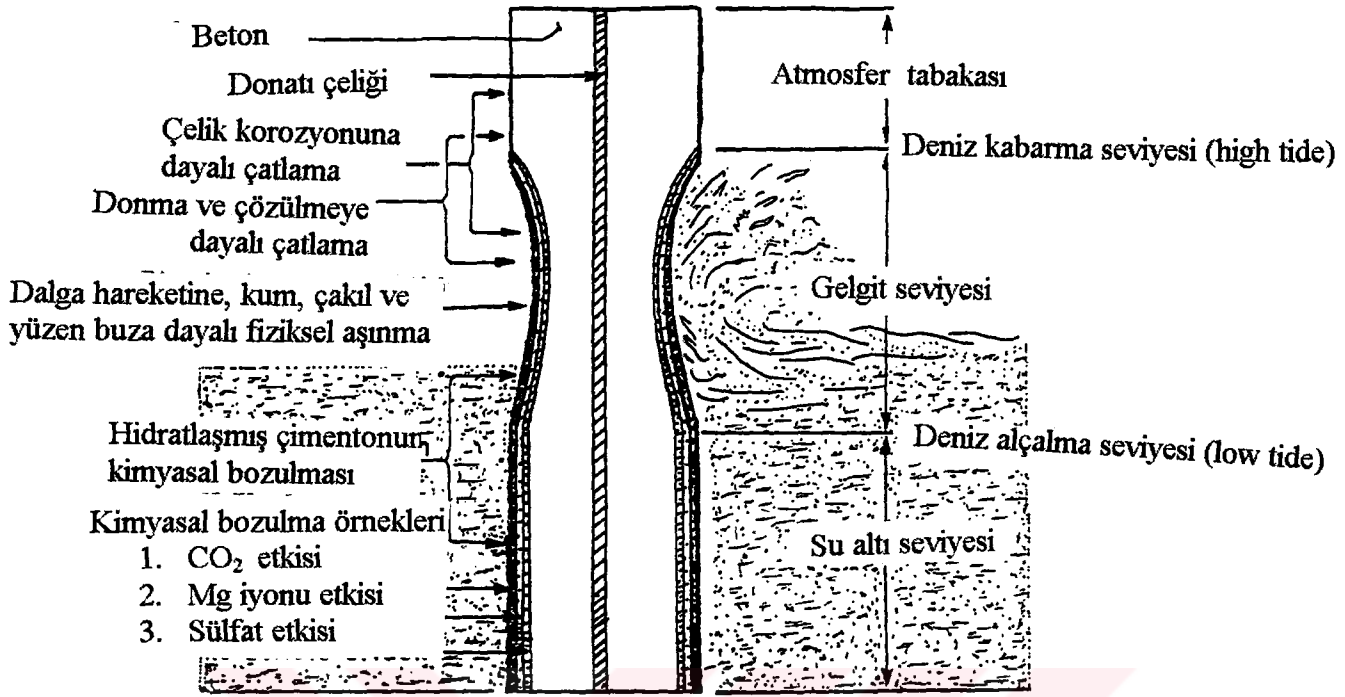
Etrenjit, sülfat etkisindeki betonlarda genleşme ve dağılma problemlerinin başlıca sebeplerindendir.[12] Betonda sülfat zararının genel belirtileri, genel olarak kapak atma ve pul pul dökülmesidir. Beton alkalinitesinde azalma oluşur ve donatılı betonu korozyona karşı daha hassaslaştırır. Islanma-kuruma tekrarlarına maruz kalan bodrum kat ve döşemeler, tamamen su içindeki yapılardan daha hızlıca korozyona uğrar. [7]

Ammonyum, nitrat ve sülfat iyonları etkileri ile de beton korozyonu bilinmektedir. Deniz sularında endüstri ve kanalizasyon kirliliği bulunmadığı sürece, bu iyonlara rastlanmaz. Fakat; günümüzde deniz suları ve özellikle kıyılarda bu iyonların miktarlarının tehlike sınırlarının çok üstünde olduğunu bilmekteyiz. [6]

2.2.2.5. Deniz Suyu Etkisi

Deniz çevresi, şok yüklerini (shockload) oluşturan, aşınma ve kavitasyon ile beton yüzeylerinin erozyonuna sebep veren dalga hareketleri ile tanımlanır. Ayrıca; beton, deniz suyunun agresif bileşenlerine maruz kalır ve tekrar eden donma-çözülme ve ıslak-kuru devirleri ile karşı karşıyadır. Böylece; bu tür bir çevre içinde beton yapıların bozulması doğada hem kimyasal hemde fiziksel bir olaydır ve etkisi gelgit olaylarına bağlı olarak 3 bölgeye sınırlandırılabilir.[8]

Şekil 2.6. da bu üç bölgede oluşan hasar çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Bir beton yapısında deniz suyu etkisi ile korozyon aşamaları

Yüksek gelgit seviyesinin üst kısmı, direkt olarak deniz suyu ile etkileşimde değildir. Yine de; atmosferik hava hareketine ve rüzgarla gelen deniz tuzlarına maruzdur. Bu nedenle, donatı korozyonuna ve/veya donma-çözölme tekrarlarına bağlı olarak çatlama, bu bölgede en temel hasar olayıdır. Gelgit bölgesinde yapı, nöbetleşe ıslanma-kuruma, donma-çözölme tekrarlarına, dalgaların çarpmasına, kum ile çakılların aşındırmasına ve donatı korozyonuna maruzdur. Büyük dalgaların yüksek bir hızla beton yapıya çarpması, bu malzemenin dinamik etkilere maruz kalmasına, aşınmasına, boşluklarının artmasına, çatlamasına neden olur.[11 sf157] Su içinde olan daha alçak bölge, donma-çözölme hareketinin ve donatı korozyonunun oluşmadığı nispeten sağlam bir çevredir. Burada zararlı baskın hareket, kimyasaldır ve mukavemet azalışına yolaçar. [8]

Deniz sularında beton üzerine olan kimyasal etki, sülfat, magnezyum, karbonik asit ve NaCl'ün kristalleşmesinin bir kombenozu şeklindedir oluşur. Bir yüzü ıslak diğer yüzü kuru olan, diğer bir deyişle "hidrolik gradient" altındaki iskele, rıhtım gibi beton yapılarda kristalleşme olayı hasara yol açar. NaCl'ün kristalleşme sırasında

oluşturduğu basınç 0°C de 554 atmosfer, 50°C de 654 atmosferdir. Beton boşluklarında oluşan bu iç basıncın hasara yol açması doğaldır.

Deniz suları, doğadaki diğer zararlı sular kadar tahribat yapmazlar. Tahribatı azaltan bu özellikler, iki ana noktada toplanabilir:

- I. Tamamen su içinde kalan yapılarda Mg korozyonu nedeniyle ortaya çıkan brusit ($Mg(OH)_2$), yüzey tıkayarak sülfatların içeri nüfuz etmesini önler.
- II. Deniz suyundaki klor iyonları, etrenjit ve jipsin çözünürlüğünü artırır ve bu ögeler katı ortamda kristalleşmediklerinden zararlı genleşme yapmazlar.

Fakat bu esaslar, konu başında anlatılan su seviyesi değişen bölgeler için pek geçerli sayılmaz. Sürekli ıslanıp kuruyan bu kısımlarda hasar oldukça şiddetlidir. Dalga hareketleri, erozyon, donma-çözülme ve biyolojik korozyon ile alkali-agrega reaksiyonları, hasarı ileri düzeye vardırırlar. [6]

Deniz yapılarında beton geçirimsizliği çok önemli ve dikkat edilmesi gereken bir konudur. Yapım aşamasında uygun puzolanlar katılarak, beton içine girebilecek tuzlar ve zararlı iyonlar engellenebilir. Fakat; son yıllarda daha çok elektrokimyasal yöntemler veya betona inhibitör olarak silonsiloksan gibi malzemeler sürülerek yalıtım sağlanmaktadır.[12] Tüm bu teknikler Bölüm 5' de detaylıca yer almaktadır.

2.2.2.6. Tuz Etkisi

Tuz etkisi, beton yüzeyi altındaki suda çözünen tuzların geniş kristalleşmesine bağlı olarak oluşur. Etkileri iki şekilde ortaya çıkar; Birincisi, yüksek tuzlu zemin suyu üstünde yerleşmiş betonda tuzlu zeminsuyu kapiler hareketlerle maruz bölgeye doğru göçeder ve bu bölgede tuzları yoğunlaştırarak yüzeyde buharlaşır. Bu koşullar altında, tuz gözeneklerde kristalleşir ve yüzey parçalanmasıyla sonuçlanan genleşici stresleri meydana getirir. İkincisi, deniz koşullarına maruz betonda, özellikle çırpıntı bölgesinde, beton tuzlu deniz suyu ile birlikte sıçrayan suya ve kuruma periyotlarına maruzdur. Emilen tuzlu su daha sonra kurur. Yüzey katmanlarındaki tuzların seviyeleri yükselir. Bu tür bir bozulma, Ortadoğuda daha çok Arabistan Körfezinde yaygındır. [8]

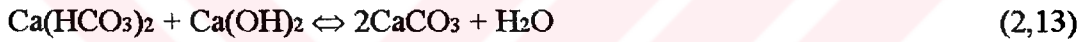
2.2.2.7. Karbonatlaşma

Karbonatlaşma, atmosferde bulunan CO₂'ın hidrate çimento mineralleri ile nemli ortamda reaksiyona girmesidir.[8]

Karbonatlaşma olayında, beton bünyesindeki CaO önce suyla birleşip Ca(OH)₂ 'i oluşturur ve daha sonra CO₂ gazı ile reaksiyona girer. Bu reaksiyonlar zinciri sonucunda CaCO₃ daha sonra su ve CO₂ gazı ile tekrar reaksiyona girer ve kalsiyum hidrokarbon yani kalsiyum bikarbonat'a dönüşür.



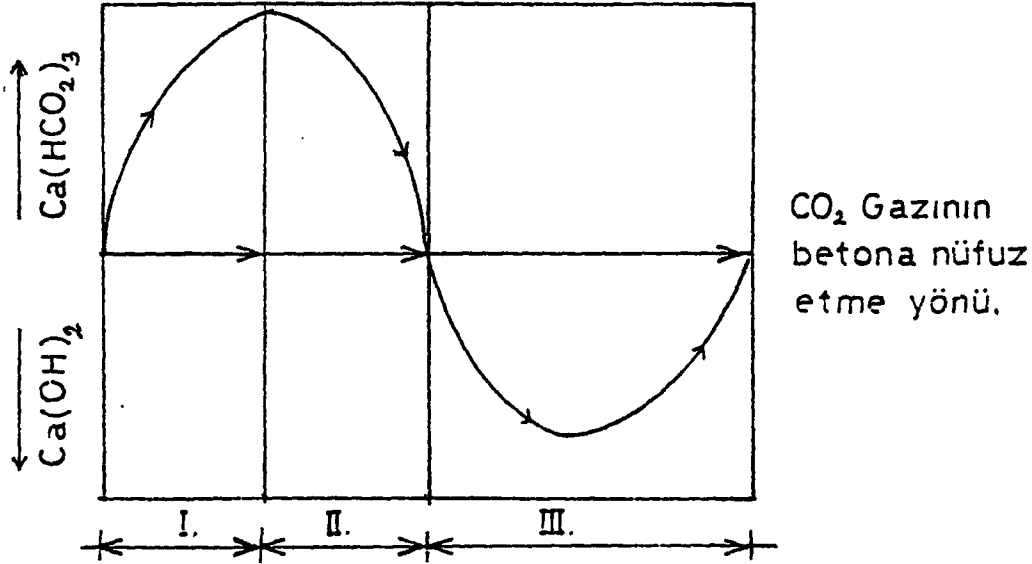
Suda erimesi çok kolay olan kalsiyum bikarbonat, betonun korozyona uğramasına sebep olur. Oluşan kalsiyum bikarbonatların tamamı beton bünyesinden ayrılmaz. Bir miktar kalsiyum bikarbonat, kalsiyum hidroksit ile yeniden reaksiyona girer ve kalsiyum karbonat oluşturur.



Bu reaksiyon sonucu meydana gelen kalsiyum karbonat, CO₂ gazı ile tekrar reaksiyona girerek kalsiyum bikarbonatı oluşturur

Tüm bu reaksiyonlar, karbonatlaşacak daha fazla CaO kalmadığında yada karbonatlaşma ortamı ortadan kalktığında son bulabilir. Karbonatlaşmaya bağlı olan korozyon da karbonatlaşma gibi zamanla azalır. Porozitesi yüksek bir betonda, karbonatlaşmaya dayalı korozyon oldukça fazladır. Gözeneklerin içindeki su, havadaki CO₂ gazının betona nüfuz etmesi için gerekli ortamı fazlasıyla sağlamış olur.

Karbonatlaşmada olduğu gibi betonun korozyonu da CO₂ gazının miktarıyla orantılıdır.[13] Betonda karbonatlaşma sonucu oluşan korozyon, ortamın kalsiyum hidroksit ve kalsiyum bikarbonat konsantrasyonuna göre Şekil 2.7. de gösterilen bir periyot dahilinde değişiklik gösterir.



Şekil 2.7. Betonun Korozyon Periyodu.

- I. Kalsiyum karbonatın kalsiyum bikarbonata dönüşmesi,
- II. Daha fazla kalsiyum bikarbonat oluşmadığı için ortamda kalsiyum hidroksit'in çoğalmaya başlaması,
- III. Oluşan kalsiyum bikarbonatların kalsiyum hidroksitle birleşerek kalsiyum karbonat oluşturmaları ve bu arada bir kısım kalsiyum bikarbonatın su yardımıyla eriyerek betondan ayrılması. [12]

Karbonatlaşma kimi yerlerde aşağıdaki formülle açıklanır: [8 sf162]

$$c = k\sqrt{T}$$

c = in. olarak karbonatlaşma derinliği

k = sabit

T = yıl olarak zaman

Bazı araştırmacılar da karbonatlaşmanın ilerlemesi üzerinde aşağıdaki bağlantıyı vermişlerdir: [11 sf 127]

$$x = a \frac{W/C}{\sqrt{f}} \sqrt{t}$$

a = sabit

t = yıl olarak zaman

W = su miktarı

C = çimento miktarı

f = mukavemet

Karbonatlaşmada, difüzyon olayı sözkonusudur. Bu nedenle olayın gelişmesi zaman (t) faktörü ile orantılıdır. Çimento dozajı 350 kg. ve s/ç oranı 0.55 olan bir beton

üzerinde yapılan deneyler sonucunda karbonatlaşma kalınlığı (x) aşağıdaki değerleri almaktadır. [11 sf127]

<u>Süre</u>	<u>Karbonatlaşma kalınlığı</u>
1 sene	6 mm
5 sene	13 mm
10 sene	20 mm
25 sene	30 mm

Karbonatlaşmanın olduğu hız, betonun nem içeriğine ve beton çevresinin bağıl nemine bağlıdır. Karbonatlaşma ayrıca, büyük ölçüde havadaki CO₂ konsantrasyonu ile çimento tipi ve su/çimento oranından da etkilenir. Nem, karbonatlaşmanın ilerlemesi için CO₂ ile birleşmelidir. Sonuç olarak bağıl hava nemi, karbonatlaşma derecesini tayin edecektir. Hızlı nüfuz olayı, %40 ile %75 arası sıralanan bağıl nem değerlerinde oluşur

<u>Bağıl hava nemi (%)</u>	<u>Karbonatlaşma derecesi</u>
30'un altı	alçak
40-70	yüksek
75 üstü	alçak

Portland çimentolu betonun karbonatlaşması, mukavemette artış ve derinin geçirgenliğinde azalma ile sonuçlanır. Çünkü; CaCO₃ beton içindeki boşlukları azaltır. Yüzey üzerinde oluşmuş kalsit katmanı, bu yüzden betonu daha sonra gelecek zararlı etkilere korur. Buna tezat olarak karbonatlaşma, hidratlaşmış çimento harcının bazı koşulları ile sağlanan, çeliğin korozyon korumasını nötralize eder. Reaksiyon derece derece bazik solüsyonun doyma seviyesini düşürür. Burada başlangıçta pH değeri 12 ile 13 arasındadır. Gözenek suyunun pH'ı 9'un altına düşerse alkalinite, pasif oksit filmi tamir edecek güce daha fazla sahip olamaz ve çelik donatıda elektrokimyasal reaksiyonların oluşmasına sebep olur.[8] Sonuçta; karbonatlaşma donatılı beton içinde iki türlü probleme yolaçar. Birinci problemde karbonatlaşmış beton rötre yapar. İkinci problem ise beton bazikliğini düşürerek donatı üzerindeki koruyucu tabakayı yokeder ve donatı korozyona uğrar. Donatı korozyonu, Bölüm 3 de detaylı olarak anlatılacaktır.

2.2.3. Beton İçindeki Reaksiyonlara Bağlı Olarak Oluşan Kimyasal Korozyon

2.2.3.1. Alkali-Agrega Etkisi

Hidratlaşan imentodan salıverilen alkaliler, reaktif bileşenli agregalarla reaksiyona girdiklerinde iki tür zarar oluşur. Bunlardan ilki; Alkali-Silis reaksiyonu, ikincisi ise Alkali-Karbonat reaksiyonudur. [8]

Alkali – Silis reaksiyonu

Bazı imentoların içinde fazlaca miktarda bulunan Na_2O ve K_2O gibi alkali oksitlerin, aktif silis içeren agregalarla kimyasal reaksiyona girmesi, ve betonu çatlatan bir jel oluşturması olayına, beton teknolojisinde alkali-silis reaksiyonu denilmektedir.[6] ASR'nin oluşması için üç elemente ihtiyaç vardır. Bunlar; potansiyel reaktif agrega, yeterli bir alkali kaynağı ve sudur. [14]

Reaktivite gösteren silisler, kuvarz dışındaki silisin polimorflardır. Bunlar genellikle tridimit, kristoballit ve camdır. Doğada en çok bulunan reaktif kütleler ise opal ve kalseduvandır. Batı Karadeniz Bölgesinde de kumlarda yüksek oranda kalseduvana rastlanmaktadır. Volkanik kayalar olan riyolit, andezit ve dasitte de reaktif silis camı mevcuttur.

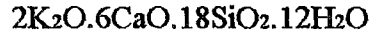
Alkali-silis reaksiyonunun oluşmasındaki aşamalar aşağıda yer almaktadır;

1. Alkalilerin ayrışması ve reaktif silisin çözülmesi,
2. Alkali-silikat jelin oluşması,
3. Çevredeki suyun jel tarafından çekilmesi,
4. Kolloit tanelerinin sulu bir süspansiyona dönüşmesi. [6]

Belli silisli taşlar, çimentodaki alkalilerle jel oluşturmak üzere reaksiyona girerler. Açık alkali-silis kompleksi, kalsiyum hidroksit veya diğer imento hidratlarından kaynaklanan kalsiyum iyonları ile reaksiyona girerek beyaz,opak bir kalsiyum silis veya alkali-kalsiyum-silis kompleksi oluşturur. Alkali-silis reaksiyon ürünü, suyu emer ve hacimde artış olur ve bu süreçte sert bir katıdan daha yumuşak bir jele, son olarak da bir “kolloit”e döner. Su emildiği sırada, kalan reaksiyon ürünü, çevreleyen imento hamuru içinde yıkıcı bir kuvvet ortaya koyar ve onu atlatır. Daha çok su konulduğu sırada da, çatlak harcın içine yayılır ve daha genişler. [8]

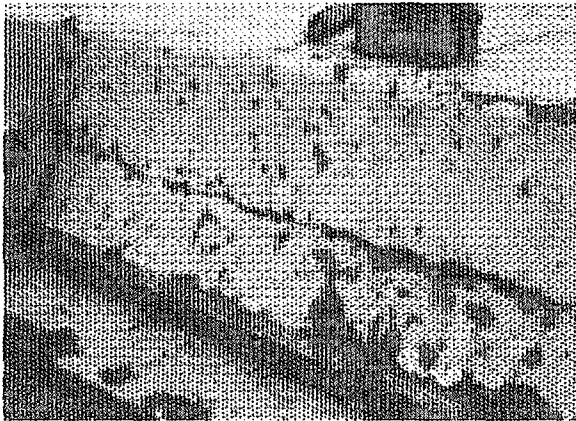
Reaktif silisin çözülebilmesi için ortamın pH'ı yani bazikliği çok önemlidir. PH, 7-8 olan bir suda SiO₂ çözülmesi sadece 100-150 ppm iken, pH 13 değerinden büyük olunca çözünürlük sonsuzdur. Çözünmenin olduğu ilk aşama sonunda agrega tanelerinin porozitesi artar ve mukavemetleri düşer. Silis tanelerinin küçük olması, alkalın solüsyonun daha yaygın biçimde difüzyonuna olanak sağlar. Öte yandan genişleme, jelin su alarak şişmesine yani üçüncü aşamaya bağlıdır. Üçüncü ve dördüncü aşamaları denetleyen parametreler ise reaktif silis ve alkali miktarları olmaktadır; örneğin yeni jel teşekkül edemeyecek kadar alkali azsa, jel sulanarak çatlaklardan dışarı sızacaktır.

Yapılan çalışmalar sonucu bulunan, oluşan jelin mineral ve kimyasal formülleri aşağıda yer almaktadır;

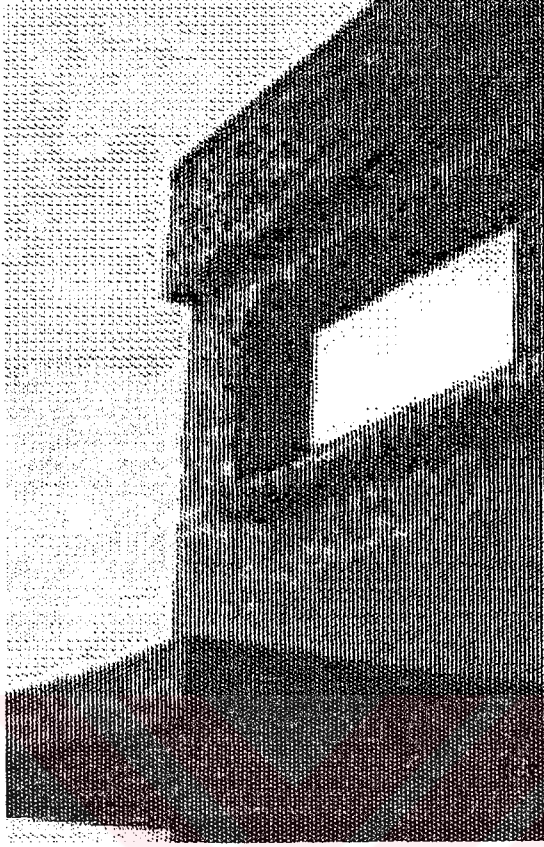


Deniz suyunun alkali-silis reaksiyonunu artırıcı bir etkisi olması doğaldır. Deniz suyundaki Na⁺ iyonları ortamın alkalinitesini yükselterek 1.ci ve 2.ci aşamaların oluşumuna imkan verir. Bu bakımdan alkali-silis reaksiyonu, beton deniz yapılarında önemle üzerinde durulan bir korozyon türüdür. Ayrıca; özellikle gelgit bölgesindeki betonlarda tekrar eden ıslak/kuru devirleri ASR'yi hızlandırır. [7]

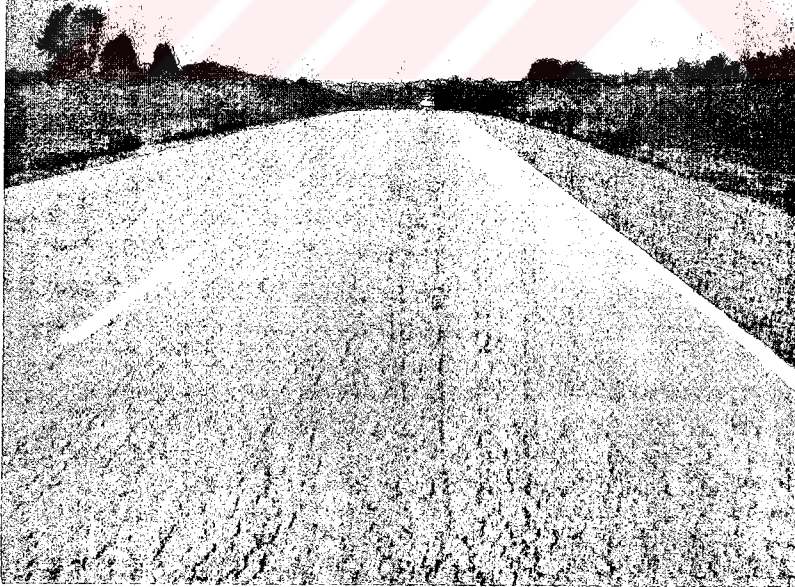
ASR'de reaksiyon hasarı, bir ile yirmibeş yıl arasında ortaya çıkmaktadır. Bu zaman farkı agreganın reaktivitesinin şiddetine bağlıdır. Çatlaklar, yüzeyi kaplayan bir ağ şeklinde oluşmakta, daha sonra çatlaklardan dışa doğru jel akmakta, yüzeyde kabarmalar ve parça atmalara rastlanmaktadır. [6] Şekil 2.8. ASR'nuna bağlı beton hasar örneklerini vermektedir.



Şekil 2.8.(a). ASR nin yol açtığı hasar örnekleri; [15]



(b)



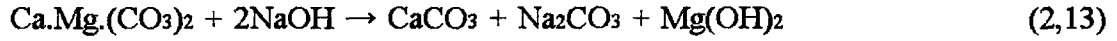
(c)

Şekil 2.8. ASR nin yol açtığı hasar örnekleri; [15]

Alkali – Karbonat reaksiyonu

Çimento hamurundan veya diğer kaynaklardan salıverilen alkalilerin karbonatlarla olan reaksiyonuna ve ortaya çıkan genleşme korozyonuna, Alkali-karbonat reaksiyonu adı verilir. Agregadaki kil minerallerinin oluşumu ve taşların billursu dokusu, bu reaksiyonların hızlarına tesir ettiği bilinmektedir. [8]

İçinde jeolojik zamanlardan kalma kil damarları içeren dolomitik taşlarda bu reaksiyona rastlanır. Dolomitik taşlar, NaOH (veya KOH) ile karşılaştıklarında aşağıdaki reaksiyon uyarınca bozulmaktadırlar



Reaksiyon ürünleri çok yavaş ve az miktarda da olsa suda çözünebilmektedirler. Ayrıca Mg(OH)₂ (brusit) bir miktar hacim genişlemesi de yapmaktadır. Yukarıdaki kimyasal reaksiyonlardan sonra taşların porozitesi artmakta ve su daha içerilere nüfuz ederek kil damarlarına erişmektedir.

Yapılan gözlemlere dayanarak, alkali-karbonat reaktivitesinin hasar yapması için aşağıdaki yargılara varılmıştır:

1. Dolomit ve kalsit kristallerinin ince taneli olması,
2. Asitte erimiyen illitik kilin çok miktarda bulunması,
3. Dolomit ve kalsit kristallerinin kil matris içinde dağınık bulunması. [6]

2.2.3.2. Uygun Olmayan Çimento Kullanımı

Aşırı kireç, manyezi ve kalsiyum sülfat içeren düşük kalitedeki belli çimentolarla yapılmış betonda, çimento priz yaptıktan sonra bir hacim değişikliğine uğrayacaktır. Bu genleşme, sertleşmiş çimentoda serbest kireç, manyezi veya kalsiyum sülfatın ertelenmiş veya yavaş hidrasyonuna bağlı olarak yer alır. Sertleşmiş çimento hamurunda oluşan genleşme, çatlamaya sebep veren zararlı kuvvetleri üretir. Bozuk çimento kullanmanın etkileri, aylar veya yıllar sonra ortaya çıkar. [6]

2.2.3.3. Biyolojik Korozyon

Betonların korozyonuna yol açan gözle görülebilen canlılar veya mikroorganizmalar vardır. Bunların bir kısmı doğrudan doğruya, bir kısmı ürettikleri kimyasal ürünlerle betonu tahrip ederler. [6]

Biyolojik korozyonun başlıca tipi, atıksu yapılarında beton korozyonudur ve bu korozyon, bakteri ve mantarların birkaç türünün metabolik aktivitesi sonucu oluşur. Atıksuda bulunan bu mikroorganizmaların çoğu sülfür ve sülfür içeren bileşikler okside etme eğilimindedir. Yine de; birkaçı sülfür ve sülfür içeren bileşikler, hidrojen sülfide(H_2S) indirger.

Anaerobik koşullar altında (çok düşük oksijen seviyeleri) atık sudaki sülfür bileşikler, bakteriyel hareketle sülfürlere indirgenir. Hidrojen sülfid gazı, borularda su seviyesi üzerinde yoğunlaşan nem içinde erir ve aerobik koşullar altında (yüksek oksijen seviyeleri) erimiş hidrojen sülfid, sülfürik asit'e (H_2SO_4) sülfür-oksitleyen bakteri tarafından dönüştürülür. Betona yüksek derecede agresif olan bu asit, beton içine emilebilir ve atıksu strüktürlerinin hızlıca tahribi başlar. Bakteriyel zararı teşvik eden bazı fiziksel ve kimyasal koşullar;

1. Biyolojik aktivite için optimum noktada atıksu sıcaklıkları ($35^{\circ}C-39^{\circ}C$ / $95^{\circ}F-102^{\circ}F$),
2. Atıksu ve endüstriyel atıklarda sülfür veya sülfür kaynağının bulunması,
3. Durgun ve tembel akma koşullarına bağlı olarak atıksuyun mikroplu hale geldiği bir sistem,
4. Ventilasyon eksikliği.

Bakteriyel tortular çamurludur. Bu tür zararlı etkiler; yağ, gaz, kağıt hamuru ve kağıt gibi endüstrilerde, kimyasal endüstri ve çoğu su depolama ve yayma sistemlerinde yaygındır. [8]

Deniz yapılarında da biyolojik korozyondan söz edilebilir. Büyük canlılar arasında bir tür deniz yumuşakçaları, kireçtaşını delip tüketerek hasar oluşturmaktadır. Bunların açtıkları delikler 50 mm derinliğe kadar inebilmektedir. Kalker kökenli agregalar kullanarak yapılan betonlar, bu canlılar açısından iyi bir yaşam ortamıdır. İran körfezinde ve Arap Yarımadası kıyılarında bu hayvanlara rastlanmaktadır. [6]

3. BETONARME YAPILARDA DONATI KOROZYONU

Donatı çeliğinin beton içinde neden korozyona uğradığı Türkiye’de özellikle 17 Ağustos depreminden sonra sıkça sorulan sorular arasındadır. Fakat bu sorudan ziyade asıl önemli bir soru, çeliğin beton içinde korozyona niye uğramadığıdır. Genel bilgilerle ve gözlemlerle; yumuşak çelik ve yüksek dayanımlı donatı çeliğinin, hava ve suyun bulunduğu ortamlarda korozyona uğradığı bilinmektedir. O zaman beton gözenekli ise ve nem ihtiva ediyorsa, beton içindeki donatı çeliği neden her zaman korozyona uğramaz? Bu sorunun cevabı alkalinite – baziklik’tir. Alkalinite, asitliğin tersidir ve metaller, asitlerin içinde korozyona uğrar, korozyondan da alkaliler tarafından korunurlar. [16]

3.1. Betonarme Yapılarda Donatı Korozyonu Mekanizması

Betondaki donatı çeliğinin korozyonu, oksidasyonun yer aldığı bir anot, elektrokimyasal indirgenmenin olduğu bir katot, bir elektriksel iletken ve sulu bir ortam gerektiren elektrokimyasal bir süreçtir. Korozyon olayı, basit bir elfeneri baterisinde süregelen hareketle benzerdir. [12,17]

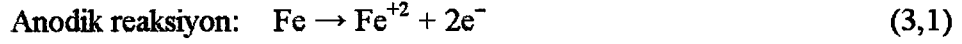
Beton, mikroskopik gözeneklerinde yüksek konsantrasyonlarda çözünür Ca, K ve Mg oksitlerin içerir. Bu oksitler, su eklendiğinde çok bazik olan hidroksitleri oluşturur. Böylece çok bazik bir ortam meydana gelir. Bazik ortam, çelik yüzey üzerinde “pasif” bir tabaka oluşmasını sağlar. Pasif tabaka; kararlı, koruyucu bir oksit tabakasıdır. Bu tabaka elektriksel direnci artırarak (n_R) ve/veya konsantrasyon polarizasyonuna (n_{kons}) yol açarak anodik akım yoğunluğunu kısıtlar, korozyona karşı sigorta görevi görür. [6]

Pasif koruyucu tabakanın oluşmasını sağlayan betondaki bazik ortamda minimum 12.5 derecesinde pH değeri mevcuttur ve çelik bu pH derecesinde paslanmaz. Eğer pH değeri bazı nedenlerde dolayı düşerse, (örn; pH 10 veya daha azı) korozyon oluşabilir. Korozyonun başlıca sebeplerinden karbonatlaşma olayında, pH 8 veya 9 seviyelerine düşebilir ve bu durumda korozyon kaçınılmazdır.[12] Donatı çeliğinin

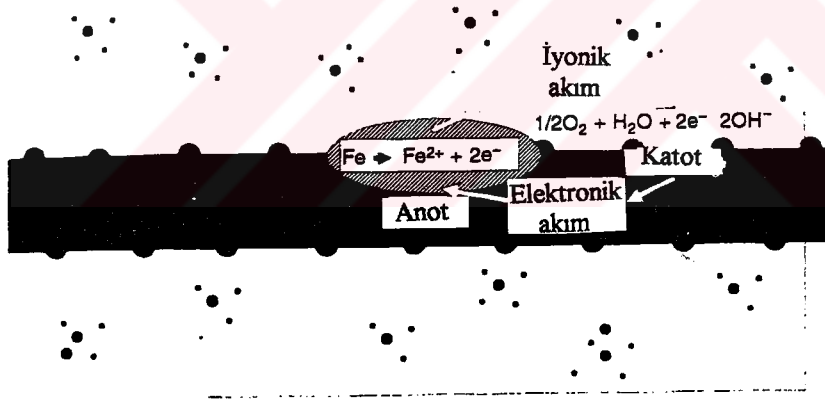
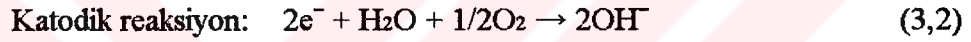
korozyonunda, öncelikle yüzey üzerindeki bu pasif tabakanın bozulması yani işlevini yerine getirememesi gerekir. Bu olay, iki türlü sebeble başlayabilir;

1. Klor etkisi
2. Karbonatlaşma

Her iki türlü korozyonda da kimyasal reaksiyonlar aynıdır. Beton içindeki çelik, korozyona uğradığında gözenek suyunda çözünür ve elektronlar verir.



Anodik reaksiyonda ortaya çıkan iki elektronun (2e^-) çelik yüzeyinde başka yerde “elektriksel nötrale”yi korumak için harcanması gerekir. Diğer bir deyişle; çelik üzerinde bir yerde yüksek miktarlarda elektriksel yükün birikmesi mümkün değildir; diğer bir kimyasal reaksiyon elektronları tüketmelidir. Bu olay, su ve oksijeni de kullanan bir reaksiyondur. (Şekil 3.1.)



Şekil 3.1. Anotta ve katotta yeralan tepkimeler.

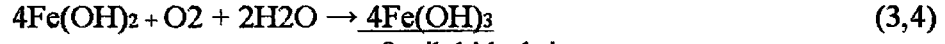
Hidroksil iyonları, katodik reaksiyonda oluşur. Bu iyonlar, lokal bazikliği artırır ve böylece katotta karbonatlaşma ve klor iyonlarının etkilerini geri çevirerek pasif tabakayı sağlamlaştırır. Korozyonda unutulmaması gereken; katotta reaksiyonun oluşması için su ve oksijenin de gerekli olduğudur.

Anodik ve katodik reaksiyonlar, pas oluşumunda sadece ilk adımlardır. Eğer demir gözenek suyunda sadece çözünmekle kalsaydı, betonun çatlaması ve parça kopması görünmezdi. “Pas”ın oluşması için birkaç aşamanın daha oluşması gerekmektedir.

Bu olay, birkaç yolla tarif edilebilir; ferro hidroksitin ferrik hidroksiti oluşması ve daha sonra hidrate ferrik oksit ve pas oluşumunu gösteren bir tepkime dizisi aşağıdaki gibidir.



demirli hidroksit

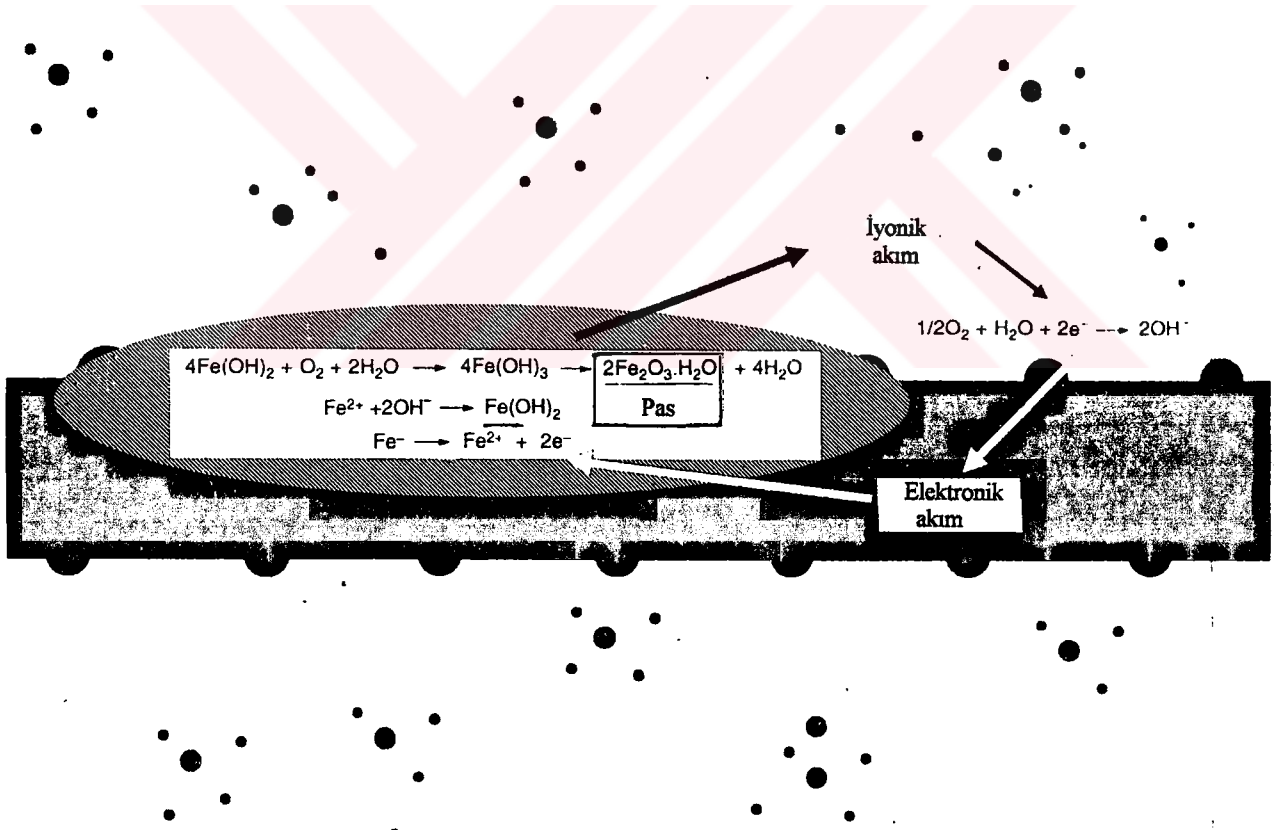


ferrik hidroksit



hidratlaşmış ferrik oksit (pas)

Hidratlaşmamış ferrik oksit Fe_2O_3 , büyük bir hacime sahiptir. Hidratlaştığı zaman, daha çok şişer ve gözenekli olur. Bu olayda, çatlamaya ve parça kopmalara yol açıp donatı üzerinde kırmızı/kahverengi, gevrek, ufak paslar ve beton çatlaklarında paz lekeleri gözlenebilir. Şekil 3.2.'de donatı çeliği üzerinde oluşan korozyon tepkimeleri detaylıca görülmektedir.

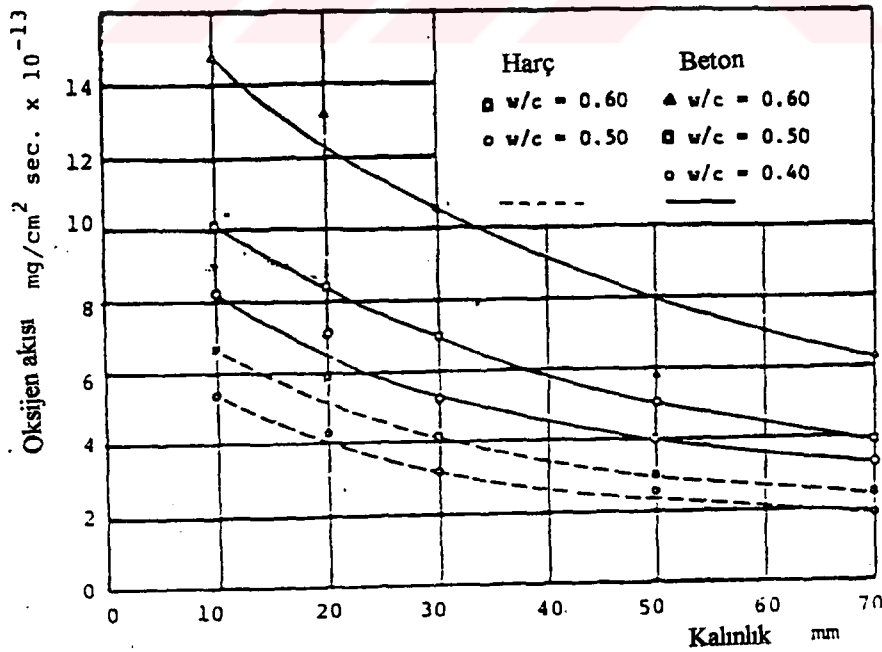


Şekil 3.2. Çelik donatı üzerinde oluşan korozyon tepkimeleri. [16]

3.1.1. Betonda Oksijen Faktörü ve Difüzyonu

Oksijen, donatı korozyonunun oluşması için temel bir faktördür. Betona doğru oksijen difüzyonu, betonun suya doymuşluk derecesinden ciddi bir biçimde etkilenir. Çelik pasivasyonu zarar görmüşse; ortam, beton yapının aralıklı olarak ıslak-kuru devirlerine maruz kalan kısımlarındaki donatı korozyonuna sebep olacaktır. Araştırmalar ayrıca; klor iyonları mevcut olsa da, beton sürekli olarak suya doymuşsa çelik korozyon hızının çok yavaş olacağını göstermiştir. Kısmen kuru bir betonda gaz halinde oksijen difüzyonunun daha hızlı olduğu sırada, ıslak betonda çözünmüş oksijen öncelikle çözelti içinde difüzyona girecektir. Katodik bir reaksiyon içinde tüketilen oksijen için, yinede oksijen çözünmüş durumda bulunmalıdır. Önemli olan erimiş oksijen konsantrasyonu olduğundan oksijen çözünürlüğünü etkileyen tüm faktörler bu konsantrasyonu da etkiler.[17]

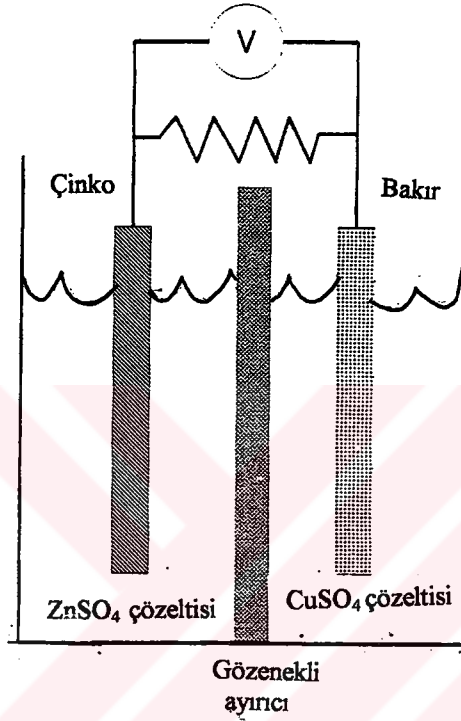
Oksijenin korozyondaki etkinliğini belirleyen faktörler özetlenirse; paspayı kalınlığı, yüzeydeki oksijen gazının konsantrasyonu, özellikle suda çözünmüş oksijen miktarı ve betonun rutubete doygunluk derecesidir. Örneğin; bir araştırmada, betonun suya doygunluk derecesi %50'den %100'e yükseldiğinde oksijen akısı 5 defa, s/ç oranının 0.6'dan 0.4'e indiğinde 2 defa, paspayı 10 mm'den 70 mm'e çıktığında 2.5 defa azalmıştır.[18 sf5] Şekil 3.3. paspayı ve s/ç oranının beton ve harçta oksijen akısına etkilerini göstermektedir. [17]



Şekil 3.3. Paspayı kalınlığı ve s/ç oranının beton ve harçta oksijen akısına etkisi.

3.1.2. KOROZYON RİSKİNİN ÖLÇÜLMESİ

Korozyon reaksiyonlarını tanımladığımız “anot” ve “katot” terimleri, elektriksel pillerin kimyasal çalışmasıdır. Şekil 3.4, kimyasal tepkimelerin nasıl elektrik ürettiğini gösteren esas bir Daniel pili. Pil, bakırsülfat içinde bakır ve çinkosülfat içinde çinko olarak iki yarımpilden oluşmaktadır. Pilin toplam voltajı, kullanılan metallerle, çözeltilerin doğası ve kompozisyonuyla tayin edilir.



Şekil 3.4. Bir Daniel pili. Pil voltajı = $0.34 - (-0.76) = 1.10$ V.

Herbir pilde metal çözünür ve iyonlar çöker;



Bakır bu reaksiyona çinkodan daha dirençlidir; böylece bu iki çözeltiyi yarıgeçirgen bir membranla biraraya getirip ve iki metali bir telle bağlarsak, çinko çözelti içine girer ve bakırsülfat çözeltisindeki bakır, elektrotta tortu bırakır.

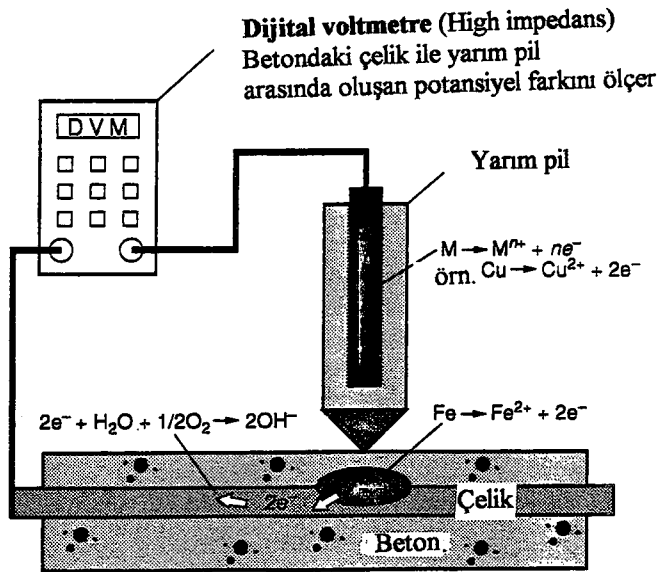
Tablo 3.1. de standart yarımpil potansiyel değerleri görülmektedir. Bu değerler; korozyon problemlerini değerlendirirken gereken değerlerdir. [16]

Tablo 3.1. Yarım pil potansiyelleri.

$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{+2} + 2\text{e}^-$	- 0,76 V
$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{+2} + 2\text{e}^-$	-0,44 V
$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{+2} + 2\text{e}^-$	+0,34 V

Tüm metallerin elektropotansiyel değerleri, 0 varsayılan standart hidrojen elektroduna göre ölçülmüş, elektromotif seri oluşturulmuştur.[18] Yarım pil potansiyelleri, metal ve çözelti kadar konsantrasyonunda bir fonksiyonudur. Daha konsantrasyonlu bir çözelti, sulu bir çözeltiden genellikle daha korosiftir yani, bir akım aynı çözeltinin iki farklı konsantrasyonunda tek metalden oluşan pil içinde akacaktır.

Betondaki donatı korozyonu, bir konsantrasyon pili olarak düşünülebilir. Bu pildeki korozyon riskini, dıştan bir yarım pil ilavesi ile ölçmek mümkündür. Şekil 3.5. de beton yüzeye bir yarım pil yerleştirilerek ve çeliğe bir voltmetre ile üzerinden bağlayarak Daniel piline benzer ufak bir devre gösterilmektedir. Elektriksel potansiyel farklılığı, gözenek suyu ortamında demirin bir fonksiyonu olacaktır. Pil, çelik boyunca hareket ettirilirse değişik potansiyeller görülür. Çünkü çelik farklı çevreler içindedir. Anotta ve katotta reaksiyonlar sonucu, anodik korozyona uğrayan alanlarda voltmetre daha yüksek potansiyeller, katodik yani pasif alanlarda daha düşük voltajlar ölçecektir. [16]



Şekil 3.5. Korozyon potansiyelinin yarım pil metodu ile ölçümü.

3.1.3. Betonarme Yapılarda Donatı Korozyonu Sonucu Çatlak Oluşumu

Beton alkalinitesi karbonatlaşma ile düşer ya da çelik üzerindeki koruyucu tabaka klor gibi agresif iyonlarla hasar görürse, betondaki donatı çeliği korozyona uğrayabilir. Çelik korozyonu, esas metalik demirden hacimce daha fazla olan oksit ve hidroksitleri oluşturur. Hacimdeki bu artış, donatı çubukları etrafında çatlakların patlak vermesine ve lokal radyal çatlaklara sebep olur. Bu keskin çatlaklar, donatı çubuğu boyunca çoğalır ve boylamasına çatlakların formasyonu ile -yani donatı çubuğuna paralel- veya betonun parça atmasıyla sonuçlanır. Geniş bir çatlak, beton yüzeye paralel olarak çubukların seviyelerinde oluşabilir. Ve köprü tabliyelerinde çok bilinen bir problem olan tabakaların ayrılması ile sonuçlanabilir.

Çatlaklar; oksijen, nem ve klorların betona kolay nüfuz etmelerini sağlar. Böylece küçük keskin çatlaklar, korozyonun devam edeceği ve daha fazla çatlak oluşacağı bir ortam yaratır.

Donatıya çaprazlama çatlaklar genellikle, betonun düşük geçirgenliğe sahip olduğu durumlarda donatı korozyonunun devamına sebep olmazlar. Çatlak olayında bir çubuğun açığa çıkan parçası anot görevi yapar. Önceki evrelerde, çatlak ne kadar genişse korozyon da o kadar büyük olur; çünkü basit bir ifadeyle donatı çubuğunun daha büyük bir parçası, pasif korumasını kaybeder. Yine de devam eden korozyonun oluşması için, aynı çubuğun diğer bölümlerinde de oksijen ve nemin sağlanması gerekir.

Korozyon donatıya paralel boylamasına bir çatlak oluştuğunda devam edebilir, çünkü; pasiflik çoğu bölgelerde kaybolur ve oksijen ile nem çubuğun uzunluğu boyunca kolaylıkla işe yarar duruma geçer. [19]

Korozyon sonucu oluşan yarıklara karşı en iyi koruma; düşük geçirimli beton kullanmaktır. Donatı üzerindeki beton tabakasının kalınlaştırılması, korozyon olayını geciktirmede etkili bir çözümdür. Çatlak formasyonun oluştuğu ortamın başlıca sebepleri ve önleyici tedbirler daha sonraki bölümlerde detaylıca ele alınacaktır.

3.1.4. Siyah Pas

Anot ile katot arası 100-200 mm gibi iyice ayrılmış ve anot oksijensiz kalmışsa (örn;su içinde) Fe^{+2} şeklinde demir çözeltide kalacaktır. Böylece betonu çatlatan genleşme kuvvetleri oluşmayacaktır ve korozyon tespit edilemeyecektir.

Bu tür bir korozyon patlak verdikten sonra havaya ilk maruz kaldığında donatı üzerinde görülen sıvı rengine göre “siyah” veya “yeşil” pas oluşur ve bu korozyon çeşidi, genelde zarar görmüş su yalıtım membranları, su altında ve suya doymuş diğer koşullar altında oluşur. Şekil 3.6. da bir su yalıtım membranının altından alınmış bu tür donatı örnekleri görülmektedir. Korozyonun oluştuğuna dair bir işaret bulunmadığından tehlikeli bir durum sözkonusudur. Donatı çeliği, korozyon tespit edilmeden önce defalarca zayıflamış olabilir. Betondaki pas lekeleri, bu tür korozyon için işaret verici olabilir. Fakat su, bir membranın altından girip, oksijeni dışarı atıyorsa, çözeltideki demirin pas lekelerini oluşturmak için çökeceği yerolan beton yüzeye gelmesi olası değildir. [16]



Şekil 3.6. Bir suyalıtım membranının altından alınan donatı örnekleri. Donatılar düşük oksijene maruz kalıp hiçbir genleşici oksit büyümesi olmadan lokal korozyon göstermektedirler.

3.2. Betonarme Yapılarda Donatı Korozyonu Çeşitleri

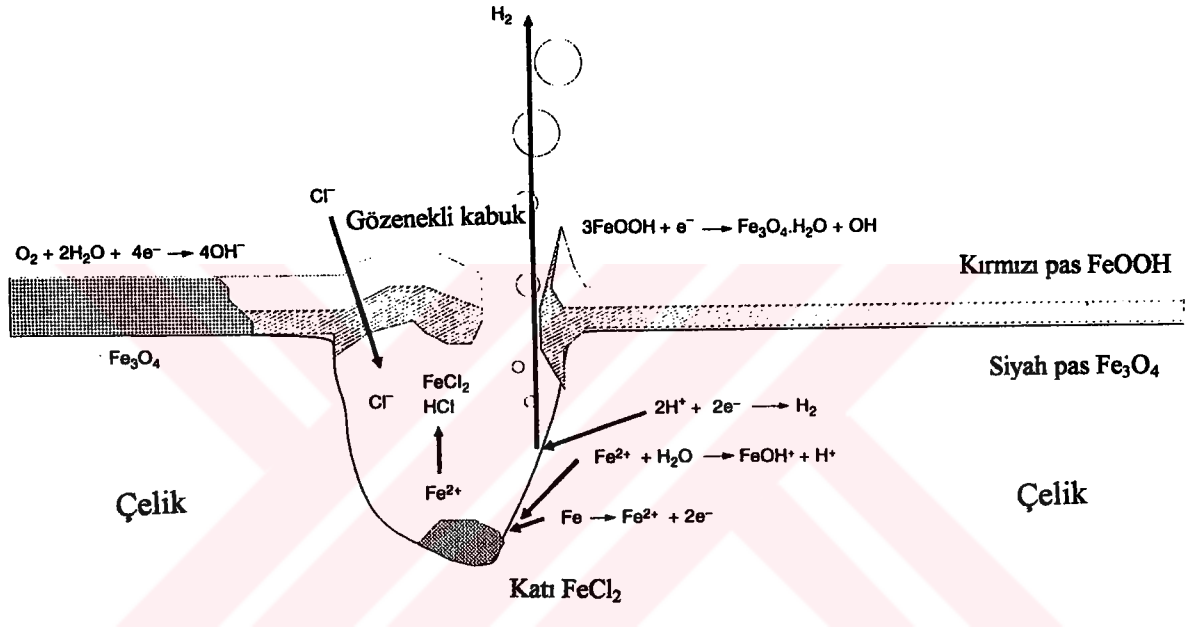
3.2.1. Çukurcuk Korozyonu

Korozyon olayının çok dar bölgeler üzerinde yoğunlaşması sonucunda çukurcuk korozyonu ortaya çıkar.[3 sf57] Betondaki donatı korozyonu, genellikle çukurcukların formasyonu ile başlar. Çelik yüzey üzerinde bazı müsait bölgelerde - çoğu zaman çimento hamurunda bir boşluk veya çelikte bir sülfid ilavesi olarak düşünülür, pasif tabaka zararlı etkilere karşı daha hassastır ve elektrokimyasal potansiyel farklılığı klor iyonlarını çeker. Korozyon başlar ve asitler oluşur: sülfid ilavesinden (MnS) hidrojen sülfid ve (ortamda klor iyonları varsa) klor iyonlarından HCl. Demir çözünür ve çözeltideki demir su ile tepkimeye girer.



Reaksiyon sonucu şekil 3.7' de gösterildiği gibi çukurcuk formasyonu oluşur. Pas, asiti (H^+) bir noktaya toplayarak ve oksijeni dışarı çıkarak çukur üzerinde oluşabilir. Böylece demir, koruyucu oksit tabakasının oluşmasını önlemek ve korozyonu hızlandırmak için çözeltide kalır. [16]

Havalandırılmış NaCl çözeltisi



Şekil 3.7. Çukurcuk korozyonu modeli.

3.2.2. Bakteriyel Korozyon

Bölüm 2.2.3.3. de anlatılmış olan biyolojik korozyonun bir çeşidi olan bakteriyel korozyonda, topraktaki bakteriler (thiobacilli) sülfatları, sülfürik asit ve sülfürlere dönüştürürler. Bu asit, çeliğe zarar vererek korozyona sebep olur. Sülfat indirgenmesi olayı aşağıdaki koşulların sağlanması durumunda gerçekleşir:

1. Ortam, sülfatların ve bakterilerin oluşumu için gerekli organik maddeleri içermelidir. Bunlar örneğin, zeminde mevcut olabilecekleri gibi toprak aktarımı sonucu da zemine girebilirler.

2. Ortam oksijen bakımından fakir olmalı ve oksijenin yayılmasına izin vermeyecek özellikleri bulunmalıdır. Koherent zeminler veya bataklık ve ekilmeye elverişli sulak araziler, bu koşulu yeterince yerine getirirler.
3. Ortamın pH değeri 5.5 – 8.5 arasında olmalıdır.
4. Ortam sülfat indirgeyen bakterileri içermelidir.

Bu tür korozyonda bozulma, genellikle çukurcuk korozyonu türündedir. [16, 3]

3.2.3. Rastgele Akımların Oluşturduğu Korozyon (stray current)

Rastgele akımlar, Amerika'da 1950 lerde klor etkeninin ortaya çıkmasına kadar korozyonun tek sorumlusu olarak gösteriliyordu. Bu korozyon tipinin ana sebebi, doğru akım çekme sistemlerine bağlı olarak (tramvay ve elektrikli trenlerdeki gibi) donatı çeliğine doğru akan doğrudan akımdı. Akım, metal iyonik bir ortam boyunca bir iletken den diğerine atlamak zorunda kalırsa, bir uç negatif (katot) diğer tarafta anot olur ve korozyona uğrar.[16] En genel akım kaynakları; elektrikli tren hatları, elektriksel yöntemle kaplama tesisleri ve katodik koruma sistemleridir. [17]

Rastgele elektriksel kaynaklardan oluşan elektrik akımı (strüktür içinde veya topraktan gelen yada strüktür içinde veya üzerinde deniz suyu hareketinden oluşan) direkt olarak korosif kimyasal reaksiyonlara neden olabilirler. Bu tür elektriksel akımlar sonucu oluşan elektrokimyasal korozyon etki alanı oldukça ender görülür, fakat oluştuğunda oldukça ciddi bir olaydır. [20]

3.3. Betonarme Yapılarda Donatı Korozyonunun Temel Sebepleri, Mekanizmaları

Çelik donatıların genellikle korozyonu önleyen ince, koruyucu bir pas tabakası ile kaplı oldukları daha önceki bölümde açıklanmıştı. Bu tabaka gamma FeO.OH lepidokrosit ve Fe_2O_3 'den oluşur, çeliğin elektrik direncini artırır, yüzeydeki oksijen konsantrasyonunu azaltır. Bu iki etki, polarizasyon eğrilerinin doğrusallığını ve eğimlerini değiştirerek anodik akım yoğunluğunu kısıtlar. Koruyucu tabakanın tahrip olmasını önleyen ortamın bazik yapısıdır ve bu yapıya çimento sahiptir. Üretimin başında betonun pH değeri 13 mertebesindeydir. Zamanla bu değer 8'e kadar düşer ve alkalinite giderek azalır. Bu düşüşü hızlandıran kimyasal ve fiziksel etmenler mevcuttur. Betonda alkaliniteyi düşüren iki kimyasal etmen karbonatlaşma ve klor

iyonlarının difüzyonudur. [18] Ek A'da korozyona uğramış betonarme elemanlarda donatı örnekleri verilmiştir.

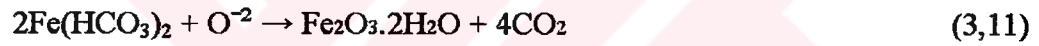
3.3.1. Karbonatlaşma

Beton korozyonunun başlıca sebeplerinden olan ve önceki bölümlerde mekanizması incelenmiş olan “karbonatlaşma” sürecinin başlamasıyla betonun pH değeri düşer. Başlangıçta; Cl^- , SO_4^{2-} gibi asidik özellik gösteren iyonların betona nüfuz etmesini engelleyen bazik ortam, nötürleşmeyi sağlamayarak betonarme çeliğini koruyamaz hale gelir. Nötürleşmenin sağlanamadığı ve çeliğin korozyona uğramaya başladığı bölgeye “aktivasyon” bölgesi” adı verilir. Aktivasyon bölgesinde pH değeri 9.5 ve daha aşağı değerlere ulaşır.

Çeliğin karbonik asitin etkisi ile korozyonu aşağıdaki reaksiyonlarla gerçekleşir.



Oksijenin etkisiyle de pas oluşur;



Korozyonun hacimce çoğalması demirin betona bağlanma özelliğini azaltır. Çelik ve beton, birlikte çalışamaz hale gelir. Çeliğin korozyona uğramasından sonra betonda çatlamlar ve dökülmeler başlar. Oluşan çatlaklar, çeliğin korozyonunun artmasına neden olur, kopan parçalar betonun durabilitesini azaltır. [13]

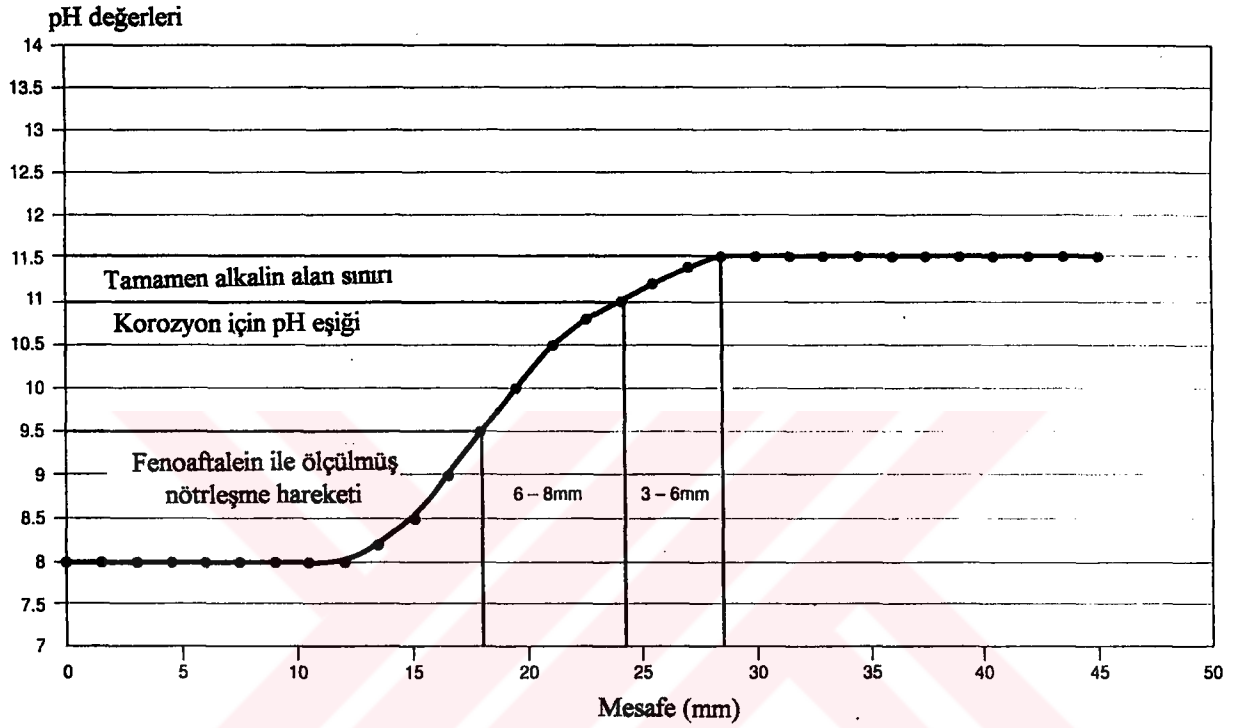
Karbonatlaşmanın etkisi, beton paspayı kalınlığı düştükçe artar fakat, paspayı kalınlığı yüksek olunca da karbonatlaşma etkileri görülebilir. Bu olay; beton gözeneklerinin çok açık olması, böylece gözeneklerin birbiri ile iyice birleşmiş duruma gelmesi ve CO_2 'nin hızlıca emilmesini sağlamasına bağlı olabilir. Ayrıca; gözeneklerdeki alkalın içeriğinin düşük olması da önemli bir faktör olabilir. Bütün bu problemler; düşük çimento içeriği, yüksek su/çimento oranı ve zayıf beton kürü söz konusu olduğunda oluşur.

Betonda karbonatlaşma olayı, difüzyon kurallarını takiben ilerler. Korozyon oranı, paspayı ile ters orantılıdır.

$$dx/dt = D_o/x$$

$x \rightarrow$ mesafe $D_o \rightarrow$ Difüzyon sabiti

Difüzyon sabiti, beton kalitesi ile belirlenir. Karbonatlaşma durumunda alkalinite, pH 11-13' den pH 8'e kadar keskin bir düşüş olur.(Şekil 3.7) Bu seviyede, alkalinite tarafından oluşan pasif tabaka, korozyon olayına daha fazla dayanamayacak duruma gelir.



Şekil 3.8. Karbonatlaşma hareketi ve korozyon eşiği ile fenoftaleindeki renk değişimiyle ilişkisi

Karbonatlaşma olayında önleyici faktörler olarak aşağıdaki faktörleri sıralayabiliriz;

- paspayının kalınlaştırılması,
- yüksek çimento içeriği,
- makroskopik ölçekte betonun iyi sıkışması,
- mikroskopik ölçekte iyi kürlenme sonucu küçük ve az gözeneklere sahip olma,
- düşük su/çimento oranı,.

Bütün bu faktörler detaylı bir biçimde diğer bölümlerde ele alınacaktır.

Karbonatlaşma, modern köprü ve yapılarda nadirdir. Çünkü; bu yapılarda s/ç oranı düşük, çimento yoğunluğu fazla, iyi sıkıştırma ve kürlenme sonucu yüksek mukavemetli beton kullanılır.

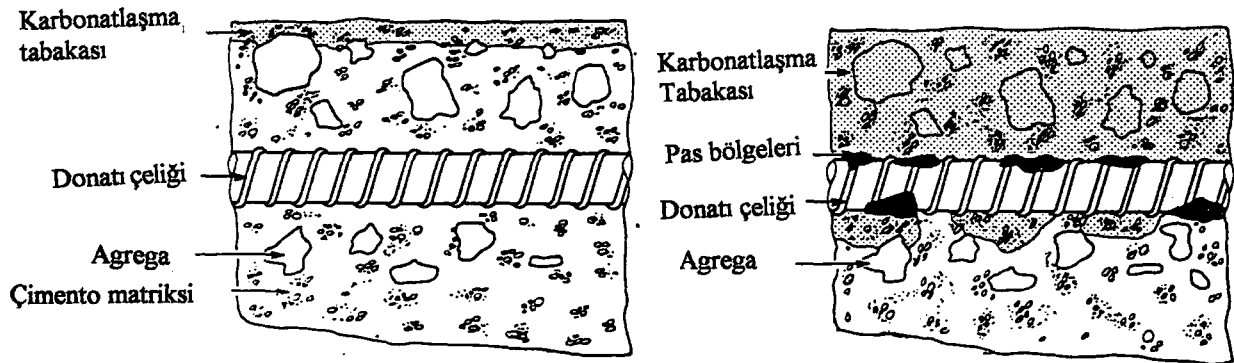
Bir korozyon mühendisi, bir korozyon probleminde “düşük paspayı” faktörünü ele alıyorsa, bu, betonun çelik etrafında karbonatlaştığı ve böylece korozyona liderlik ettiği anlamına gelir. Eğer beton yüksek kalitede ise, karbonatlaşma olası olmayabilir ve düşük paspayı birşey ifade etmez. [16]

3.3.1.1. Beton İçerisinde Karbonatlaşmanın İlerlemesi

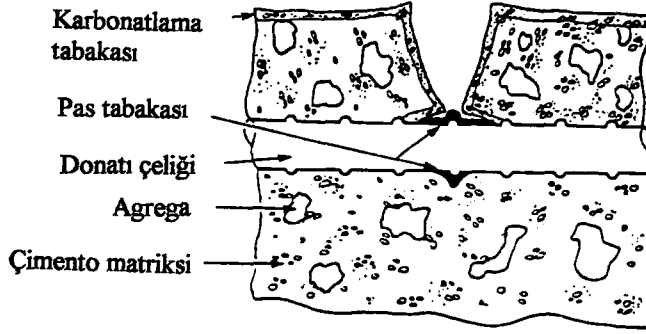
Karbonatlaşma sürecinde, CO_2 betona doğru nüfuz eder ve karbonatlaşmanın hareket hızı Fick's'in difüzyon kuralına yaklaşır. Bu olay da; hareket hızının yüzeyden olan uzaklıkla ters orantılı olduğu esasını vurgular. Çatlaklar, beton kompozisyonundaki değişimler ve derinlikle beraber nem seviyeleri, mükemmel difüzyon denkleminde sapmalara yol açacaktır. [16]

Karbonatlaşmanın boyutu, fenolaftalein çözeltisi kullanılarak yapılan basit bir test ile tespit edilebilir. Karbonatlaşmamış çimento ile fenolaftalein reaksiyonu pembe bir renk oluşturmaktadır. Bunun tersine; karbonatlaşmış çimento tepki göstermez ve renk değişikliği oluşmaz. [7 sf 50]

Karbonatlaşmanın derinliği, zamanla ve beton geçirimliliğinde artışlarla yükselir. Karbonatlaşma hızı, nemin %50-75 rh olduğu yerlerde en yüksek seviyeye ulaşır. Şekil 3.9. da (a) tamamen korunmuş çelikte (b) karbonatlaşmış betonda (c) çatlamış betonda ; çelik korozyonu gösterilmektedir.



Şekil 3.9.(a),(b) Kısmen ve tamamen karbonatlaşma etkisindeki donatı çeliğinin karşılaştırması ve betondaki çatlaklar.



Şekil 3.9.(c) Kısmen ve tamamen karbonatlaşma etkisindeki donatı çeliğinin karışılması ve betondaki çatlaklar.

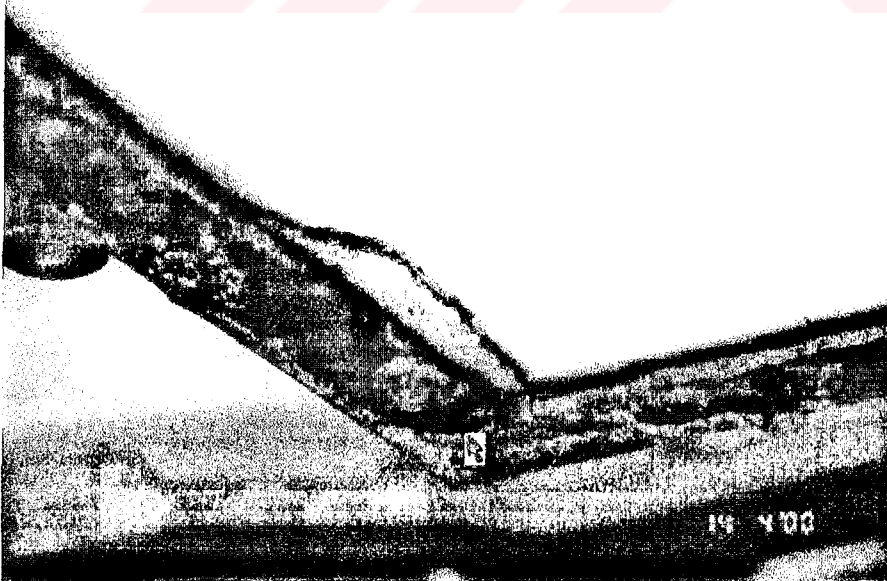
- (a) Yoğun bir beton, betonun etkilenen yüzeyinde nispeten ince bir karbonatlaşma tabakasıyla sonuçlanır. Betonun yoğunluğu, düşük hızlı bir karbonatlaşma olayıyla sorumludur. Yapı, ömrü boyunca korozyondan korunmuş şekilde kalır.
- (b) Yükselen karbonatlaşma derinliği, betonun geçirimsizliği ile doğru orantılıdır. Karbonatlaşma derinliği büyüdükçe atmosferik gazlar betona nüfuz eder ve daha ileri karbonatlaşma için de zemin oluşur. Önce karbonatlaşma tabakası çeliğe ulaşır, daha sonra da çelik korozyona uğrar. Korozyon zaman içinde yayılır.
- (c) Beton içinde çatlaklar, atmosferik gazların direkt çeliğe ulaşmasını sağlar ve çelik korozyona uğrar. İnce karbonatlaşma tabakasının çatlakların kenarlarına doğru yayıldığı görülür. [4]

Karbonatlaşma problemleri, mutfak, banyo gibi betonun yoğunlaşma veya su sızıntısından etkilenebileceği alanlarda ve dış cephelerde ortaya çıkar. [21]

Şekil 3.10 ve 3.11 da karbonatlaşma etkisi ile oluşan korozyon hasar örnekleri görülmektedir.



Şekil 3.10. Betonarme bir kolonda karbonatlaşma hasarı, [22]



Şekil 3.11. Balkon çerçevesinin ve donatı çeliğinin korozyonu. [23]

3.3.2. Klor Etkisi

Klor iyonları, çelik donatının korozyonunda en etkili faktörü teşkil ederler. Özellikle; deniz yapılarında, köprülerde ve buzlanmaya karşı buz çözücü tuzların kullanıldığı bölgelerde donatı korozyonunun başlıca sebebi klor iyonlarıdır. İyi bir betonda çelik, koruyucu pasif bir tabaka oluşturur. Fakat; çeşitli nedenlerle klor iyonları çelik yüzeye ulaşırsa, koruyucu tabakayı tahrip edecek ve çelik, korozyona uğrayacaktır.

3.3.2.1. Klor Kaynakları

Klor iyonları, birçok kaynaktan beton içine girebilirler. Beton içine savrulabilirler veya dışarıdan nüfuz edebilirler. Betona klor atılması, şu faktörlere bağlıdır:

- Kasti eklenmiş klorlu hızlandırıcılar (CaCl_2 1970 lerin ortalarına kadar yaygın olarak kullanılıyordu.),
- Karışımında deniz suyunun kullanılması,
- Kirli agregaların (genellikle yıkanmamış ya da yeterli derecede yıkanmamış deniz agregaları) veya gözenekli agregaların kullanılması,

Klorlar, ayrıca betona aşağıdaki olaylar sonucu nüfuz ederler;

- Deniz suyu spreysi (dalga olayı) ve direkt deniz suyu ile ıslanması,
- Buz çözücü tuzlar,
- Kimyasalların kullanımı (tuz depolama, deniz suyu tankları olarak kullanılan yerler).

Çözünür klorlar taze betona, klor içeren agregaların kullanılması ile girebilir. Örneğin; kış zamanında stok halindeki agregaları çözmek için kullanılabilirler veya agrega, mercan (coral) gibi tuzlu bir kaynaktan gelebilir. Tuzlu su, bazen beton karışım suyu olarak da kullanılabilir. Kalsiyum klorür (CaCl_2), priz hızlandırıcı olarak veya klor iyonları içeren bir beton katkı maddesi olarak kullanılabilir. Bazı çimentolar küçük miktarlarda klor iyonları ihtiva edebilirler. Klorlar ayrıca betona, ortamdan, buz çözücü tuzlardan, deniz suyundan vs. giriş yapabilir. [18, 24]

3.3.2.2. Betona Klor Taşınımı

Karbonatlaşma gibi, betona klor giriş hızı, genelde difüzyon kuralları ile olur. İç mekanizma özellikle yüzey kuruyrsa, emici bir özellikte ortaya çıkar. Tuzlu su hızlıca kuru beton tarafından emilir. Daha sonra; “doğru” difüzyon sayesinde gözeneklere doğru kapiler tuz yüklü su hareketi olur. Ayrıca; klorları yavaşlatan başka ters

mekanizmalar da vardır. Bunlar, gözenek yüzeylerinde kloroalüminat ve adsorpsiyon oluşturmak için kimyasal tepkimeye girerler.

Klor sızınıtısının tahminindeki diğer bir problem, baştaki konsantrasyonu tanımlamaktır. Klor difüzyonu, sadece bir konsantrasyon değişimi üretir, başlangıç üretmez. [16]

Betonun suya doygunluk derecesi, belirli bir kritik değerin altında iken iyonların hareketi basit bir difüzyon süreci ile gelişir ve Fick'sin birinci difüzyon yasası ile açıklanabilir. Yasadaki D difüzyon katsayısı laboratuvar deneyleri ile belirlenir.

$$J = -D \cdot dc/dx$$

J , $\text{mol/m}^2/\text{san}$ cinsinden akıyı, c , mol/m^3 cinsinden iyon konsantrasyonunu gösterir. dc/dx , iyon konsantrasyonu gradyanıdır. D 'nin yaklaşık değeri; $0.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{san}$ ile $5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{san}$ arasında değişmektedir. Beton tam kuru ise klor iyonlarının girişi, kapiler emme ile mümkündür.[18] Daha sonra, “doğru” difüzyon sayesinde gözeneklere doğru kapiler tuz yüklü su hareketi oluşur. [16]

Denizin çarpıntı bölgelerinde ise permeasyon (nüfuz) süresi geçerlidir. Bu bakımlardan iyon geçirimliliği konusunda kesin bir bilimsel yaklaşım vermek zordur. Fakat; klorürlerin beton boşluk ağında ve mikroçatlaklarında daha ağırlıklı olarak difüzyon süreciyle taşındıkları söylenebilir.

Klor taşınmasını; beton boşluk çaplarının incilmesi, boşluk çeperlerinin elektronegatifliği ve ortamın yüksek pH değeri zorlaştırmaktadır. [18]

3.3.2.3. Klor Etki Mekanizması

Klor iyonları, çelik donatının korozyonunda en etkili faktörü teşkil ederler. Öncelikle pasivasyonu sağlayan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ tabakasını tahrip ederek anodik korozyonun tekrar başlamasına yol açarlar.[6] Fakat; karbonatlaşma olayının aksine, pH da tam bir düşme oluşmaz. Klorlar, nervürlü çelikte pasif tabakayı kırarak kadar yeterli konsantrasyon olduğu zaman, korozyonda bir katalizör gibi hareket ederler. Bunlar, olayda tüketilmezler fakat, çelikte oksitin pasif tabakasını kırmaya yardım ederler ve korozyonun hızlanmasını sağlarlar. [16]

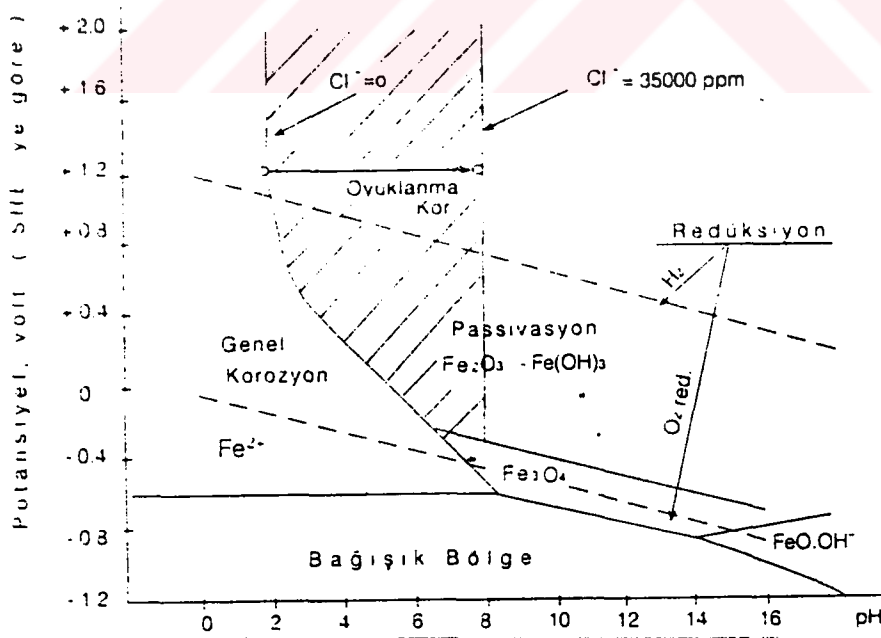
Klor iyonu donatıya ulaştığı zaman pasla birleşerek $3\text{Fe}(\text{OH})_2 \cdot \text{FeCl}_2$ gibi klor-demir kompleksleri oluşturur ve böylece koruyucu pas tabakasını söker, ortamın elektrolitliğini artırır, elektrik direncini azaltır. Klor iyonları, O_2 ve OH^- dan daha

öncelikle çelik tarafından adsorbe olurlar, bu durumda Fe^{2+} iyonlarının daha kolay çözölmeleri mümkün olur.

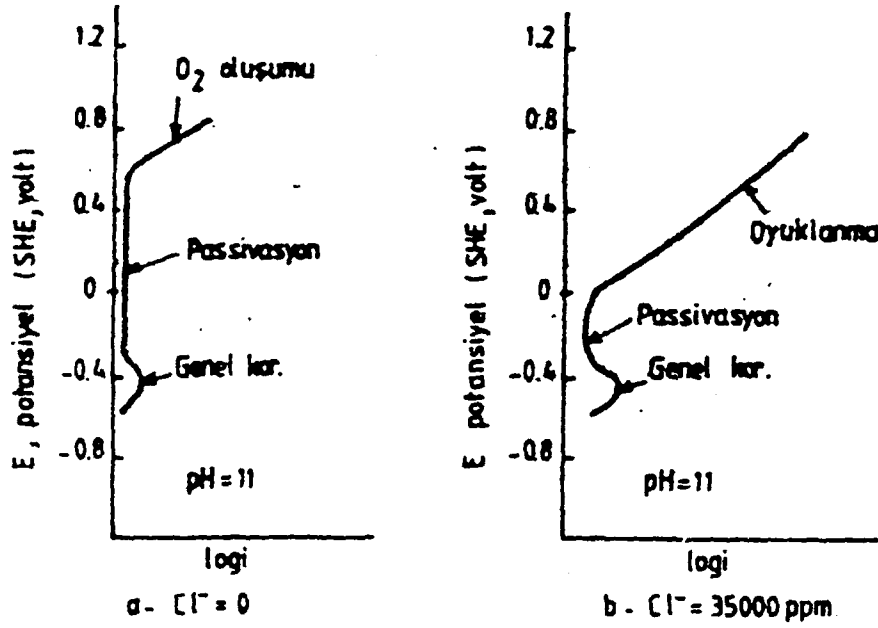
Demir-klor kompleksleri anottan uzaklaşırken, çelik yüzeyini koruyucu pasten arındararak açığa çıkarır ve korozyona süreklilik kazandırır. Bu klor kompleksleri sıvı ortamda çözöürler, açığa çıkan klor tekrar anoda dönerek tahrip işlevine devam eder. [18]

Klor, nötr ve asit solüsyonlarda koruyucu tabakayı daha kolay tahrip eder. Klor, bu tabakanın yeniden oluşmasını da önler. Böylece; pasivasyon bölgesinin sürekli olarak yeterli olma niteliği kaybolur, yer yer oyuklanma korozyonunun meydana geldiği yetersiz, bir pasivasyon bölgesi oluşur. [6]

Betonun alkalın pasivasyon yeteneği ve bu yeteneğin pH derecesine ve klor içeriğine göre değişimi Şekil 3.12. da gösterilen Pourbaix diagramları ile açıklanmıştır. Burada hangi gerilim değerlerinde hangi tür korozyonların oluştuğu belirtilmiştir. Klor iyonu konsantrasyonunun artması ile genel korozyon bölgesi pasivasyon bölgesine girmekte, ayrıca korozyon, yerel, derin ve daha tahrip edici olan çukurcuk (pitting) türü korozyona dönüşmektedir. [18] Bu şekle dayanarak çizilen Şekil 3.13 a ve b ise hiç Cl^- olmaması ve %3.5 (35000ppm) Cl^- olması durumunda ve pH=11 konumunda, polarizasyon eğrilerini göstermektedir. [6 sf 180]



Şekil 3.12. Pourbaix diyagramı ile alkalinite(pH) ve Cl^- konsantrasyonunun çeliğin pasivasyonu ve korozyonuna etkisi.



Şekil 3.13. Alkalin ortamda çeliğin anodik polarizasyonu.

Klor etkisine bağlı korozyonun başlama zamanı priz sürecine, w/c oranına ve çimento cinsine tamamen bağlıdır. W/c oranını düşürülmesi iki etkiye neden olur; öncelikle gözenek suyundaki daha yüksek pH değerine göre kritik varsayılan klorür içeriği artar ve beton gözenekliliği büyük ölçüde azalır. Bu iki etken de korozyonun başlama zamanını uzatır. [25]

3.3.2.4. Klor İyonlarının Zararları

Çelik ve betona gömülü çelik yapı elemanlarında, çeliğin korozyonu probleminde klor iyonlarının birinci derecede rol oynadıkları görülmektedir. Klorun zararlı etkileri aşağıdaki gibi özetlenebilir;

* Klor, çelik donatı üzerinde yeralan koruyucu $Fe(OH)_3$ pas tabakasını tahrip eder. Bazı minerolojik gözlemlerde Cl^- iyonlarının lepidokrosit adı verilen kararsız ve karmaşık kimyasak formüllü bir mineral ($\gamma - 8FeOOH - FeCl$) oluşturduğu saptanmıştır. Koruyucu tabakanın tahribi sırasında başka kararsız ara ürünlerin varlığı da gözlenmiştir. $Fe(OH)_2$, $FeOHCl$, $Fe(OH)_2.Cl$ gibi... Bu ürünlerin oluşmasında (Cl^-/OH^-) oranının büyük etkisi vardır.[6] Cl^-/OH^- oranı adı altında korozyon için bir "klor eşiği" vardır. Bu eşik, laboratuvar ortamında kalsiyum hidroksit solüsyonları ile ölçülür. Cl^- konsantrasyonu, OH^- konsantrasyonunun 0.6'sını geçtiği zaman, korozyon gözlenir. Bu klorlar, beton içine katkı halinde

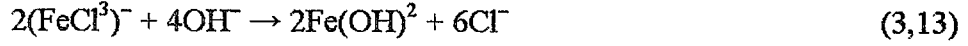
gelmişlerse, çimento ağırlığı bakımından %0.4 klor konsantrasyonuna, nüfuz etmişlerse %0.2 konsantrasyonuna yaklaşır.[16,26,7] OH^- iyonlarının sadece ortamdaki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nin çözülmesinden sağlanmadığı, oksijen redüksiyonundan da kaynaklandığı, O_2 miktarının fazla veya eksik olmasının farklı korozyon süreçlerine neden olacağı anlaşılr. O_2 nin az olduğu koşullarda Cl^- nin çözücü etkisi, Cl^-/OH^- oranı yüksek olacağından, çok olacaktır; ama öte yandan yetersiz O_2 durumunda ise genel korozyon sürekliliğini yitirecektir.[6]

Amerika'da kabul edilen genel eşik, beton yarda küpünde 1lb (0.7645m³) klordür. Bütün bunlar deneysel çalışmalar üzerine kurulmuşsa da, gerçek değerler gerçek yapı gözlemlerinin birer fonksiyonudurlar. Bütün bu eşikler, yaklaşık değerlerdir, çünkü;

1. Beton pH değeri, çimento cinsi ve karışımı ile çeşitlilik gösterir. Ufak bir pH değişimi, OH^- iyonlarında kütsel bir değişimi ifade eder ve böylece eşik değeri pH ile birlikte hareket eder.
2. Klorlar, kimyasal olarak (betondaki alüminatlar) ve fiziksel olarak (gözenek duvarlarında adsorpsiyonlar) tarafından bağlanmış olabilirler. Böylece; korozyon olayının dışında kalmış olurlar. Sülfat dayanımlı çimentolar daha hızlı difüzyona önderlik ederler ve düşük klor eşikleri vardır. Çünkü düşük alüminat (C_3A) içerirler.
3. Çok kuru betonda, yüksek Cl^- konsantrasyonuna rağmen korozyon oluşmayabilir. Çünkü; korozyon reaksiyonu için su eksikliği oluşur.
4. Yalıtılmış veya polimer emprenye edilmiş betonda yüksek Cl^- konsantrasyonu olsa da, korozyon oluşmayabilir. Çünkü; oksijen veya nem olmayan bir ortamda korozyon reaksiyonunu ateşleyen bir faktör kalmaz.
5. Korozyon, oksijen yokluğuna bağlı olarak toplam su doymu olduğu zaman engellenebilir. Fakat oksijen içeri girerse, çukurcuk korozyonu oluşur

Bu nedenlerden dolayı, beton kalitesinin zayıf ve yeterli su ve oksijenin bulunduğu ortamlarda, korozyon çimento ağırlığının %0.2 klor eşik seviyesinde görülebilir. Değişik koşullarda, oksijen ve su betona girmedığı zaman %1.0 klor seviyelerinde bile korozyon gözlenmeyebilir. Eğer beton çok kuru veya tamamen doymuşsa, durum değişiklikleri hızlı korozyona önderlik edebilir. [16]

* Klor henüz korozyona uğramamış metal üzerine etkiyerek, anodik reaksiyonun oluşmasında da bir katalizör rolü oynar.



Yukarıdaki reaksiyonlarda ortaya çıkan ara ürün $(\text{FeCl}_3)^-$ iyonu, metal Fe'nin oksitlenmesine ve kararsız $\text{Fe}(\text{OH})_2$ yeşil demir hidroksite dönüşmesine sebep olmaktadır. Bu hidroksit bilindiği gibi derhal kararlı sarı pasa yani, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 'e oksitlenir. Cl^- iyonlarının tekrar ortaya çıkması, (3,12) denklemiyle ifade edilen anodik reaksiyonun süreklilik kazanacağını da belirtmektedir. Klorun bu etkisi, pasivasyon bölgesinin daralmasına yol açar.

* Klor, asit karakteri nedeniyle ortamın pH değerini indirger. Pasivasyonun gerçekleşmesi için ortamın pH'nın alkalın bölgede ($\text{pH} > 11$) kalması gerekir.

* Klor iyonları betonun elektrolitliğini, yani elektriksel iletkenliğini artırır. Bu durum, katot-anot arasındaki iyon alışverişini kolaylaştırdığından, korozyon akım şiddetini ve dolayısıyla korozyonu artırır. [6]

Şekil 3.14 ve 3.15, klor etkisine dayalı donatı korozyon örnekleridir.



Şekil 3.14. Bir yüzme havuzunun boşaltma kanalında klor etkisine dayalı korozyon.



Şekil 3.15. 17 Ağustos depreminde hasar görmüş Petkim iskelesinin donatı korozyonuna uğramış kazıklarından biri. [27]

3.3.2.5. Özel Yapılarda Klor Sebepli Korozyon

Park Yapıları

Klor iyonları, farklı yapılar üzerinde donatı korozyonu başta olmak üzere birçok yapı hasarına yol açarlar. Bu yapılar içinde, park yapılarının özel bir durumu vardır. Bilindiği gibi, park yapıları bağımsız veya başka amaçlı diğer yapıların bir parçası olarak inşaa edilebilir. Bu yapılar; yerüstünde, yerde veya kısmen ya da tamamen mevcut zemin altında olabilir.

Park yapıları genelde diğer amaçlı yapıların çoğundan daha fazla hacim kaplar. Çoğu durumda bu yapılar, mevsimlik ve günlük çevre sıcaklık değişikliklerine maruz kalır. Bu durumda park yapılarında, plan olarak daha küçük, daha üniform sıcaklık, rutubet ve nem koşullarına maruz diğer yapılardan daha çok hacim değişiklik etkileri oluşur. Hacim değişikliklerinin baskısı sonucu; döşeme plaklarında, kirişlerde, kolonlarda çatlamalar oluşur ve eğer önlem alınmazsa yapısal bozulmalara yol açan hızlı su ve klor difüzyonu başlar.

Park yapıları sıkça kara, buza ve suya maruzdur. Bütün döşemeler, tekerleklerin altkısımlarında taşınan su ve kardan oluşan nemden etkilenir. Bu nem, soğuk iklim kuşağındaki bölgelerde park yapıları için en bozucu faktör olan “buz çözücü tuzları” içerebilir. Böylece betonarme elemanda önlem alınmazsa, yıkıma kadar gidebilecek bir korozyon süreci başlayabilir. [28-29]

Köprüler

Klor iyonlarına maruz diğer bir yapı türü de şüphesiz köprülerdir. Hem denizden gelen, hem de üzerinden geçen araçların bıraktıkları buz çözücü tuzlardaki klor iyonları sebebiyle özellikleri köprü tabliyelerinde korozyon problemlerine çok sık rastlanır.

Korozyon hasarı oluşmuş köprülerde en gerçekçi çözüm, eski betonun tamamen sökülüp yenisinin yapılmasıdır. Fakat ekonomik nedenlerde dolayı en fazla tercih edilen kaplama yöntemidir. Bu yöntemle yeni beton tabakası eskisi üzerine dökülür. Eski ve yeni kaplamalar, bağlı ve bağımsız olabilirler.

Diğer bir çözümde elektrokimyasal yöntemlerdir. Dıştan bir anotla korozyonu donatı üzerinden uzaklaştırmaya yarayan bu sistem bölüm 5.3 de detaylıca anlatılmıştır. [10]

3.4. Öngerilmeli Betonarme Yapılarda Korozyon

3.4.1. Öngerilmeli Betonarmenin Tanımı

1900’lerin başlarında büyük Fransız mühendisi Eugena Freyssinet tarafından tasarlanmış ve ilk uygulamaları yapılmış “Öngerilim Teknolojisi” ile inşaa edilmiş yapılar, taşıyıcı eleman veya sistemlere çeşitli süreçlerde kuvvetlerin tatbik edilmesi ve bir enerjinin depolanması sonucu beton ve donanım arasında karşılıklı etkileşim

ve hareketlerin oluştuğu üstün kaliteli ve yaşayan yapılardır. Öngerilim teknolojisinin esas itibariyle iki türde yapıldığı bilinmektedir;

Pretansiyon: Önceden germe (pretansiyon) metodunda teçhizat kalıplar içinde gerilmekte, beton dökölüp belirli bir dayanıma eriştikten sonra teçhizatın gevşetilmesi sonucu betona aderansla basınç verilmiş olmaktadır.

Post-tansiyon: Sonradan germe (post-tansiyon) metodunda ise beton dökölüp dayanımı aldıktan sonra uçlarında ankraj üniteleri bulunan kılıflar içinde yerleştirilmiş olan öngerilim teçhizatı gerilmekte, boşaltma sırasında ankrajda kilitleme sonucu betona basınç tatbik edilmiş olmaktadır. [30]

Köprü ve viyadükler, öngerilmeli betonun kullanıldığı başlıca yapılardır. Büyük açıklıkların geçilmesi, stabilite sorunlarının çözülmesiyle olağanüstü tasarımların gerçekteşirildiği çeşitli yapılar ve tesisler öngerilim teknolojisinin sağladığı olanakların diğer bir kanıtıdır. Bunların yanında, çeşitli binalar ve endüstri tesislerinde prefabrike elemanlarla veya öngerilimli yerinde dökme betonla sayısız uygulama yapılmıştır.

Nükleer santraller ve açık deniz petrol platformları adet itibariyle çok fazla olmamakla beraber özellikleri ile ilgili teknik sorunların çözömlenmesi, kullanılan yüksek miktardaki öngerilim çeliğinin gerektirmiş olduğu büyük kapasiteli kablolar ve yüksek düşey kabloların enjeksiyonu gibi konularda yol açtıkları gelişmeler açısından önem taşıyan yapılardır. Depolanan malzemenin çekme gerilmeleri oluşturduğu silolar, su ve akaryakıt depo ve tankları ve benzeri yapılar öngerilimin, betonda çatlakların önlenmesi ve geçirimsizlik sağlanması özelliklerinin değerlendirildiği yapılardır. 450/50/18 m. ye varan boyutta öngerilimli beton yüzer yapılar, yüzer adalar gerçekteştirilmiş bulunmaktadır. İstinat yapıları, barajlar, yüksek kuleler gibi yapılarda stabilite tesisi öngerilimin diğer yaygın bir uygulama alanıdır. [30]

3.4.2.Öngerilmeli Yapılarda Korozyon Problemi

Öngerilimli beton yapılar, normal betonarme yapılara göre mukavemet ve durabilite bakımından gelişmiş yapılardır. Fakat bu yapılarda, betonarme yapılardaki donatı korozyonu problemi gibi öngerilimli teçhizatın korozyonu da zaman zaman gündeme gelir. 1980’li yıllarda beton köprülerde, klor sebepli korozyonda hatırı sayılır bir artış

gözlenmiştir. Bu köprülerin çoğu da, sonradan germe metodu ile yapılmış strüktürlerdir.

Normalde, bu öngerme çelikleri bozulmaya karşı iyi korunmuş sayılır. Çünkü; bu çelikler etkileşim alanından uzakta, enjekte edilmiş kablo kanalları içine yerleştirilir. Yine de; öngerme çeliklerinin korozyonu ve hasarı hala oluşmaktadır.,

Gerili kabloların korozyonu özellikle tehlikelidir, çünkü kabloları yaklaşıp kontrol etmek mümkün olmaz, ikincisi kablo korozyonu aniden öngerme çeliğinin zayıflamasına ve böylece strüktürün aniden yıkılmasına neden olabilir. Öngerme çelikleri, kablo kılıfına yerleştirildiğinde pastan tamamen arınmışlardır.[31]

Gerildikten sonra, kılıf içine genellikle çimento şerbeti veya yağ reçine türünden bir malzeme enjekte edilir.[30] Bu enjeksiyon, kabloyu korozyona karşı korumakta ve kablo ile kılıf arasında kesin bir bağ sağlamakta kullanılır. Bu bağ, öngerme çeliği kırıldığı taktirde anlık yıkılma riskini sınırlar. Yine de; fiziksel olarak tüm kablo boyunca mükemmel bir enjeksiyon zordur. Kabloların kılıf ile temas halinde olduğu üst noktalar ve alanlar kritiktir. [31]

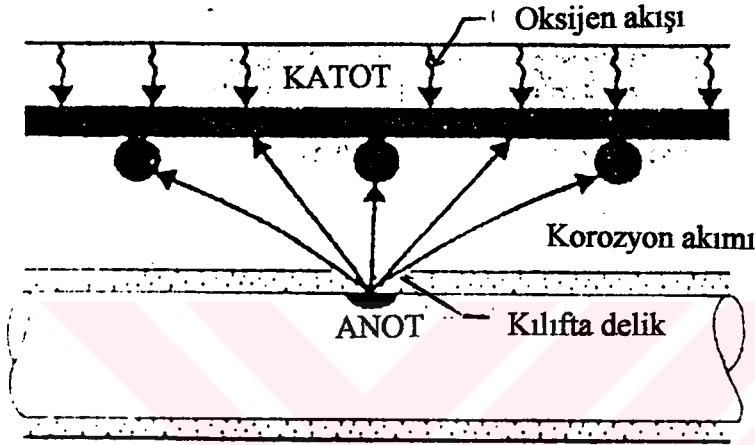
3.4.2.1. Korozyonun Başlaması

Kabloların ve kablo kılıflarının korozyonu, genellikle başlıca beton yüzeyinden klor penetrasyonu ile başlar. Kablo kılıfının kendisi öncelikle korozyon etkisine maruz kalmaz. Kablo kılıfına korozyon nüfuz ederse, kablo korozyonunun gelişimi Şekil 3.16., 3.17. ve 3.18 de farklı koşullara göre gösterilmektedir.

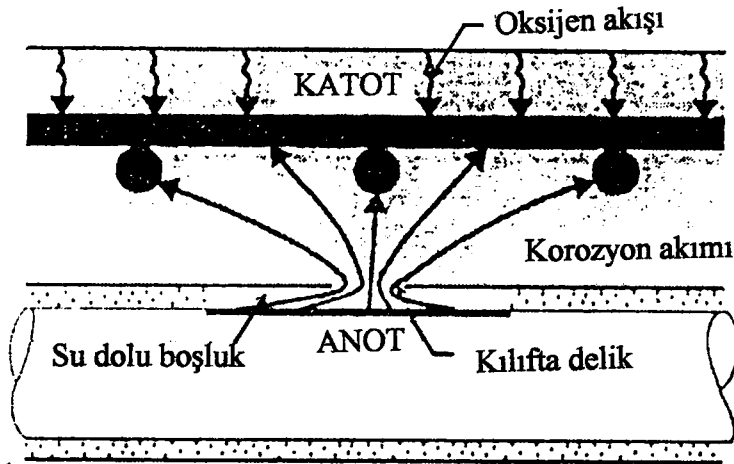
Kılıf tamamen enjekte edilmişse: Enjekte edilen çimento şerbeti, korozyonun, hidrojen gelişimi ve çeliğin gevrekleşmesiyle sonuçlanan kritik lokal korozyon gibi oluşmasını sağlar. Korozyon hızı yüksektir, çünkü; metalik kablo kılıfı üzerinden kablolar, çoğu zaman öngerilmemiş çelikle temas halindedir. Böylece çok büyük bir katot oluşur ve hızlanmış bir korozyon süreci başlar.

Kılıf kısmen enjekte edilmiş ve su doluysa: Kılıf içindeki boşluk su doluysa, korozyon daha genel bir etki olarak oluşur ve sonuçta herhangi bir hidrojen nötrale olur. Korozyon hızı yüksektir çünkü, suda elektriksel direnç düşüktür. Bağımsız kablo telleri, çok kısa bir periyot içinde korozyona uğrayabilir. (< 50-10 yıl) Yine de; hidrojen kırılabilirliği ve tellerin kopması olası olmaz.

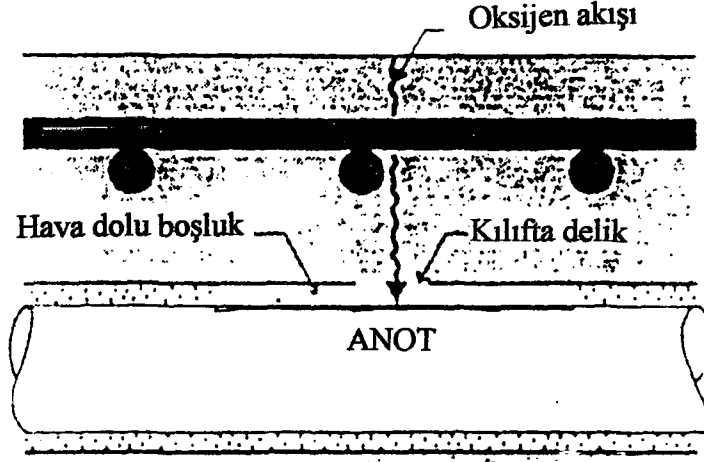
Kılıf enjekte edilmemiş ve hava doluysa: Kılıf içinde boşluk su dolu değilse, korozyon anodik ve katodik alanlar arasında bir ayırım olmaksızın genel korozyon oluşur. Korozyon, donatı ile temas halinde hızlanır ve hızı, korozyona uğrayan alana doğru indirgenen oksijen difüzyonu ile indirgenir. Galvanik korozyon, anot ile potansiyel katot (öngerilmemiş donatı tabakası) arasında elektrolit eksikliğinden dolayı gelişmeyecektir. Hidrojen kırılabilirliği beklenmez. Korozyon hızı, önceki iki durumdan daha düşük olacaktır, fakat yine de önemsiz sayılmaz.



Şekil 3.16. Kılıf tamamen enjekte edilmişse oluşan korozyon riski.



Şekil 3.17. Kılıf kısmen enjekte edilmiş ve su doluysa oluşan korozyon riski.



Şekil 3.18. Kılıf enjekte edilmemiş ve hava doluysa oluşan korozyon riski.

Bir strüktürün ömrü tahmin edilemiyorsa; beton kalitesini, paspayını ve özellikle ankrajlarda ve birleşim yerlerinde konstrüksiyon detaylarını değerlendirmek önemlidir. Deneyimler, bu alanların en kötü hasara maruz kalan yerler olduğunu göstermektedir. Kılıf korumasının yetersiz olduğu yerde bu alanlar su penetrasyonunun oluşmasına eğilimli hale gelir.

Çoğu kablolar, gerçekte kalın paspayı ile iyice korunmuş, ilave katkılarla desteklenmiştir. Yine de, bu tür koşullarda korozyon olasılığı gözardı edilmemelidir. [31]

Son yıllarda gittikçe yaygınlaşan bir uygulama ise dış öngerilimdir. Dış öngerilimde kablolar, beton kesitlerin dışına yerleştirilmekte ve deflektörlerle yönlendirilmektedir. Kılıflar genellikle PVC tipi malzemeden oluşmakta, korozyonu önleyici malzeme olarak kalın yağ veya reçine türleri kullanılmaktadır. Öngerilim teçhizatının yerleştirme kolaylığı, muayene, bakım ve gereğinde müdahale olanakları bu sistemin tercih sebebidir. [30]

3.4.2.2. Yüksek Dayanımlı Çeliğin Korozyonu

Çoğu yüksek dayanımlı çelikler, "hidrojen kırılabilirliği" na çok hassastır. Bu olayda çatlağın oluşması, anodik çözülme şeklinde gelişen korozyon çatlağı şeklinde değildir; çatlak hidrojenin metal içine penetrasyonu ve çekme gerilmesinin ortak etkisi sonucu ortaya çıkar. Atomik hidrojen kolaylıkla metal içindeki noktasal (atom

boşluğu) veya çizgisel (dislokasyon) kusurlara yerleşir ve buralarda moleküler hidrojene dönüşür. Hidrojen moleküllerinin birikmesi sonucu doğan yüksek basınç, çeliğin akma sınırını aşmasına, çatlamasına ve sünekliğini kaybetmesine yolaçar. Bu tür hasarlar özellikle çok yüksek dayanımlı ferritik çeliklerde gözlenir; bu çelikler ise önerilmeli betonda kullanılan artgerme kablolarının çelikleridir. [6 sf186]

Kablo kılıflarında tehlikeli aktif korozyonun bir özelliği de korozyonun siyah ve nispeten yumuşak-siyah ayakkabı boyası gibi olmasıdır. Bu olay, oksijen eksikliğine bağlı olur, çünkü kablolar çoğu zaman betonda derin bir seviyeye yerleştirilir ve oksijen difüzyonunu limitler. Kırmızımsı kahverengi yüzeysel korozyon, aktif korozyonun bir işareti değildir. [31]

3.4.3. Artgerme Kabloların Korozyona Karşı Korunması

Enjekte edilmiş çimento şerbetine gömülü çelik tellerin pasive olmaları yani korozyona karşı korunmaları beklenir. Çimento şerbetinin yüksek alkalinitesi, çelik üzerinde korozyona karşı koruyan bir pasif filmi oluşturur. Pasif filmin stabilitesi yine de oksijene bağlıdır. Kapalı bir kablo kılıfında, oksijen kademeli olarak tüketilir ve pasif film çözünür. Çelik daha sonra sadece korozyona karşı başlatıcı mekanizma yokluğuyla ve kılıfta korozyon için gerekli oksijen eksikliğiyle korunur.

Kablo kılıfının sıklığı yani geçirimsizliği, kablo koruması için önemli bir duruma gelir. Tellerin etrafında çimento şerbetinin olmadığı alanlarda, su çoğu kez geçici olarak şerbetin sızmasına bağlı olarak mevcut olur. Böylece bu alanlarda çelik korozyonu gelişir ve karakteristik kırmızımsı kahverengi renkle sonuçlanır. Bu olay, suyun etraftaki katılaşmış şerbet ile absorbe edilmesine kadar tüm çelik yüzeyde genel bir korozyon olarak gelişir. Pratikte, daha sonra nem ve oksijen eksikliğinden dolayı korozyon durur veya enazından yavaşlar. Dahası, korozyon akımını yöneten elektriksel direnç kılıf içinde fiziksel hapsedilme sonucu yüksektir ve düşük hızlı korozyon oluşur.

Sonuçta; yüzeysel korozyonun, eksik enjeksiyonlu kablo alanlarında oluşması muhtemeldir. Diğer yandan, kablo kılıfı sıkı ve kuruyorsa korozyon etkisi kritik bir seviyeye ulaşmaz. Eğer kablo yerleşmeden önce(placement) sınırlandırılmış korozyona (çukurcuk) maruzsa, erken yaşta korozyon kritik olabilir. Kötümser bir yaklaşımla, bu koşul çok erken yaşlarda yıkıma yol açabilir. [31]

3.5. Farklı Metallerin Korozyon Dirençleri

Yapılarda donatı çeliği dışında farklı amaçlarla çok çeşitli metaller kullanılır. Farklı amaçlarla kullanılan bu metallerin korozyon problemleri de çok önemli ve dikkat edilmesi gereken konulardır.

Herhangi bir metal ve alaşımın korozyona karşı direnci, çevresel koşullar bir yana, geniş ölçüde kullanılan metalin doğal halinden başkalaşma derecesine bağlıdır. Doğal veya orjinal hal, daha stabil bir durumu ifade eder ve metallerin geldikleri doğal hallerine dönme eğilimleri çok doğaldır. Metal korozyonunun ana sebebi, metallerin kimyasal olarak stabil olmadığı şekilde kullanılmaları ve bu metallerin kendi öz bünyelerine dönme eğilimleridir.[7] Böylece; platin, gümüş ve altın gibi soylu maddeler ile yarı soylu bir madde olan bakır, doğada metalik durumda bulunur ve korozyona çok dayanıklıdır. Diğer yandan, kullanılan demir ve çelikler metalik durumda bulunmazlar ve korozyona daha az dayanıklıdır.[8]

Korozyonun gerçekleşebilmesi için daima su ve oksijen gereklidir. Korozyon miktarını her ikisi de belirler. Örneğin, kuru havada çelikte korozyon görülmez. Havadaki nem oranı %30'un altında ise normal veya normalin altındaki sıcaklıklarda korozyon önemsenmeyecek kadar azdır. Korozyonun rutubeti giderme yoluyla engellenmesi buna dayanır. [16]

3.5.1. Alüminyum ve Alaşımları

Atmosfer koşullarına karşı direnci:

- 1) Alüminyum ve alaşımlarının, atmosferik koşullara direnci genellikle yüksektir. Bu direnç, alaşımın cinsine ve atmosferik kirlilik derecesine göre değişim gösterir.
- 2) Atmosferik kirliliğin yüksek olduğu durumlarda yüzey korozyonu ve çukurcuklar oluşabilir.
- 3) Alüminyum, baca gazlarına ve dumana direkt maruz durumda ise vasat bir direnç gösterir.

Diğer yapı malzemelerine karşı direnci:

- 1) Alüminyum, Portland ve yüksek alüminli çimentolarla olduğu gibi ıslak çimento bazlı ürünler ile temasında genellikle düşük direnç gösterir.

- 2) Alüminyum ve alaşımlar, magnezyum oksiklorür bazlı çimento ile temas halinde ya da çimento içine gömülü durumda iseler korozyona karşı düşük direnç gösterirler.
- 3) Batılı kırmızı dağselvisi, Douglas köknar, meşe ve tatlı kestane gibi bazı ahşapların , alüminyum ve alaşımlarına karşı zararlı etkileri olasıdır.
- 4) Alçı sıvaların tamamen kurumadan önce alüminyum ve alaşımlarına karşı zararlı etkileri olasıdır. Alçı sıvanın uzun süre için neme karşı önleminin alınması bu etkiyi engeller.

İletken suya karşı direnci:

- 1) Alüminyum ve alaşımlarının yağmur suyuna karşı dirençleri genellikle iyidir.
- 2) Atık suya karşı direnci, bilhassa suyun bakır içinde taşındığı veya yıkama bileşenlerinin atık su içinde bulunduğu durumlarda zayıftır.
- 3) Özellikle iyileştirilmiş suların taşınmasında mükemmel direnç gösterir. Alışılmış su teminleri için tavsiye edilmezler.
- 4) Alüminyumun bazı alaşımları, deniz suyuna karşı korozyon direnci bakımından iyi performans gösterebilir.

Diğer metallere direnci:

- 1) Temas halinde farklı alaşımları da içeren çoğu metale karşı direnci genellikle düşük olur.
- 2) Bakır veya bakır alaşımları ile temas halinde direnç bilhassa düşük olur. Alüminyumun zararlı etkisi hızlıdır.
- 3) Çinko veya kadmiyumla temas halinde iyi direnç gösterir.
- 4) Demire dayanımı, alaşımın cinsine ve elektrolit niteliğine göre çeşitlilik gösterir. Paslanmaz çelikle temas durumunda bile genelde etki önemsiz görülür. [4]

3.5.2. Dökme Demir

Atmosfer koşulların dayanım:

- 1) Demir üzerinde dökme demir yüzeyi hala sağlamsa, artış gösteren iyi bir dirence sahiptir.
- 2) Boğumlu grafit dökme demir ile ince grafit dökme demirin atmosferik koşullarda korozyon direnci iyidir.

Diğer yapı elemanlarına karşı dayanımı:

- 1) Dökme demir, normalde temas halinde olduğu yapı elemanlarına karşı iyi dirence sahiptir.
- 2) Toprak bileşenlerine direnci, esas olarak oksijen içeriği ile şekillenir. Kil gibi anaerobik toprak esaslı yapı elemanlarına karşı zayıf dirence sahiptir. (sülfat indirgeyici bakteri önemlidir) Asit esaslı toprak ürünleri agresif bir yapıya sahiptir.
- 3) Kül veya cüruf içeren yapma zeminde zayıf direnç gösterirler.

İletken suya karşı dayanım:

- 1) Dökme demirin korozyon direnci, kupro nikeller, alüminyum-bronzlar, topmadenleri, bakır, pirinç, kurşun, yumuşak lehimler, paslanmaz çelikler ve krom ile temas halinde oldukça düşer.
- 2) Korozyon dayanımı, alüminyum ve alaşımları ile temas halinde zaman zaman azalma gösterebilir. [4]

3.5.3. Bakır ve Alaşımları

Atmosfer koşullarına karşı direnci:

- 1) Çoğu atmosfer koşullarında mükemmel dayanım gösterir.
- 2) Baca gazlarına ve dumana karşı şiddetli temas halinde bakır ve alaşımları zarar görmeye başlar.

Diğer yapı elemanlarına karşı direnç:

- 1) Farklı alaşımları da içeren çoğu metale karşı mükemmel direnç gösterir.

3.5.4. Kurşun

Atmosfer koşullarına karşı direnç:

- 1) Esas kurşun karbonat veya sülfatın formasyonuna bağlı olarak çok yüksek direnç gösterir. Fakat; çevresel veya detaysal koşullar direnci epeyce azaltabilir.
- 2) Asidik asit dumanlarına karşı direnci zayıftır.

Diğer yapı elemanlarına karşı direnç:

- 1) Islak çimento bazlı ürünlerden gelen alkali etkilerine karşı kurşunun direnci düşüktür.

- 2) Belirli tipteki ahşaplara karşı direnci düşüktür.
- 3) Alçıtaşı, bazen de klor içeren killi topraklar ve küller içeren yapma zeminler dışında toprağa direnç genellikle yüksektir.

İletken suya karşı dayanım:

- 1) Yumuşak sular dışında hemen hemen tüm sulara karşı korozyon direnci yüksektir.
- 2) Çatılardan akan yağmur suları, organik maddeler (örn. liken, yosun, denizyosunu) tarafından asidik hale dönüşüyorsa korozyon büyük ölçüde düşer.

Diğer metallere karşı direnci:

- 1) Çelik veya galvanize çelik ile temas halinde ve atmosfere maruz durumda hava girişinin sınırlandığı hızlı korozyon başlayabilir.
- 2) Bakır ve alaşımları, krom, paslanmaz çelik ve nikel ile temas halinde korozyon direncinde değişen bir azalma görülür. [4]

3.5.5. Paslanmaz Çelik

Atmosfer koşullarına direnci:

- 1) Paslanmaz çeliğin atmosfer koşullarına dayanımı genellikle çok iyidir.

Diğer yapı elemanlarına karşı direnç:

- 1) Çoğu toprak koşullarına maruz kaldığı durumlarda genellikle mükemmel bir direnç gösterir.

İletken suya karşı dayanım:

- 1) Sıcaklık hesaba katılmadan, göl ve nehir sularının temininde bu sular kirli olsalarda genellikle mükemmellerdir.
- 2) Deniz sularında ve tuzlu solüsyonlarda direnç, klorların pasif film tabakasını kırma kabiliyetlerine bağlı olarak düşebilir.

Diğer metallere karşı direnci:

- 1) Genellikle, deniz sularında alüminyum alaşımları, normal çelik, çinko ve bazen bakır dışında diğer metallerle temas durumunda etkilenmez. [4]

3.5.6. Çelik (Paslanmaz Çelik Hariç)

Atmosfer koşullarına karşı direnci:

- 1) Genellikle direnç zayıftır fakat, az miktarda bakır ilavesi ya da krom gibi diğer alaşımlı elemanlar, yüksek fosfor ve silikon içerikleri ile korozyon direnci artırılabilir.

Diğer yapı elemanlarına karşı direnç:

- 1) Çelik, çimento veya lif bazı ürünlerden etkilenmez. Fakat aşırı miktarda kalsiyumklorür içeren veya kalsiyumklorür'ün eşit olarak dağıtılmadığı durumlarda gömülü çelik için direnç ciddi anlamda düşer.
- 2) Alçı sıvalar, magnezyum oksiklorür çimentolar ve bazı organik maddeler çelik üzerinde zararlı etkide bulunurlar.
- 3) Toprak esash ürünler dayanımı oksijen içeriğiyle şekillenir. Dayanım genellikle anaerobik topraklarda zayıftır.
- 4) Kül ve cürufıla yapılmış yapma zeminlere karşı zayıf dirençlidir.

İletken suya karşı dayanım:

- 1) Temiz suya direnci genellikle düşüktür fakat tahribat hızı; tuz konsantrasyonu, havalandırma ve sıcaklıkla yükselebilir.
- 2) Deniz suyunda çeliğin korozyon hızı su hareketlerindeki artışa bağlı olarak artış gösterir.
- 3) Korozyon hızı, yumuşak asitli sularda artış gösterir.
- 4) Kalkerli tortular zararlı korozyon etkisini yatıştırmaya yardım edebilirler. Bu olay, katodik koruma kullanıldığında önemli olabilir.

Diğer metallere karşı direnci:

- 1) Çeliğin korozyon direnci, kupro nikeller, alüminyum-bronzlar, topradenleri, bakır, pirinç, kurşun, yumuşak lehimler, paslanmaz çelikler ve krom ile temas halinde oldukça düşer.
- 2) Belli bazı yumuşak sularda, potansiyel değişimi 60° sıcaklık üzerinde oluşur ve çelik çinko tarafından hızlıca korozyona uğrar. [4]

3.5.7. Çinko

Atmosfer koşullarına karşı direnci:

- 1) Çinko, koruyucu filmin yoğun ve iyi tutuşa sahip olmadığı süreçte vasat bir direnç gösterir. Direnç, sülfürün ortama girmesi ile büyük ölçüde azalma gösterir.

Diğer yapı elemanlarına karşı direnç:

- 1) Çinko, ıslak çimento bazlı ürünlerden gelen alkali etkisine ve asidik sıvalardan gelen asit etkisine karşı düşük korozyon direnci gösterir.
- 2) Odunlifu içeren bazı çeşit ahşapla temasta düşük direnç gösterir.

İletken suya karşı dayanım:

- 1) Korozyon direnci büyük ölçüde çözünmüş tuzlara ve gazlara bağlı olarak değişim gösterir. Korozyon saldırısına ayrıca sıcaklıkta etkir. Yüksek sıcaklıklarda saldırı hızında yükselme gözükmiştir.

Diğer metallere karşı direnci:

- 1) Mg dışında çoğu metale karşı direnci genellikle düşüktür. Demir ve çelik için katodik koruyucu olarak elverişlidir.
- 2) Belli bazı yumuşak sularda, potansiyel değişimi 60° sıcaklık üzerinde oluşur ve çelik çinko tarafından hızlıca korozyona uğrar. [4]

4. BETONARME YAPILARDA KOROZYONA KARŞI BETON YAPISINA VE BİLEŞİMİNE İLİŞKİN ÖNLEMLER

4.1. Agregas Seçimi

Betonun önemli bir bileşeni olan, yapısının %70'ini meydana getiren taneli mineral malzemeler yani agregalar, hem beton korozyonunda hem de beton içinde gömülü donatı veya diğer metallerin korozyonunda önemli bir etkiye sahiptir. [2]

Agregaların temini; doğada dere, ocak gibi agregas kaynaklarından ya da bunlar yetersizse denizden olabilir. Beton agregalarında esas taşıyıcı iskelet iri tanelerden oluşur, bunlara çakıl veya II, III No kırmataş (mıcır) adı verilir, agregas yığınının %70 ini teşkil eder, kum ise 4 mm boyuttan ince tanelerin oluşturduğu agregas bölümüdür. Kum doğadan elde edildiği gibi kırma yoluyla da üretilebilir. [32]

Denizden sağlanan agregas incedir, içinde nadiren iri çakıl taneleri vardır. Bu agregalar olduğu gibi, iri agregas katılmadan kullanılırsa üretilen yapay taş, taşıyıcı iskelete sahip olmadığından beton olmaz.[2] Kıyı kentlerinde beton üretiminde kullanılacak agregaların denizden sağlanması zorunluluğu bazı teknik problemleri de beraberinde getirmektedir. Deniz agregalarını kara agregalarından ayıran en belirgin iki özelliği; kavkı ve tuz içeriğidir.

Kavkılar fiziksel yapı olarak genellikle yassı, uzun ve boşlukludurlar. Kimyasal bileşenleri genellikle CaCO_3 ve özgül ağırlıkları $2,7 \text{ gr/cm}^3$ dir. CaCO_3 ile çimento hamuru arasındaki aderansın iyi olmasına ve yoğunluklarının yüksek olmasına dayanılarak, kavkılarının kalite bakımından betonun basınç mukavemeti, elastisite modülü ve donmaya dayanıklılık özelliklerine zarar vermezler. Fakat; yassı ve uzun dane şekilleri ile uygun olmayan granülometreleri yüzünden yetersiz işlenebilme özelliklerine sahiptirler. [33]

Deniz suyundaki tuz nedeniyle deniz agregalarında bulunan Cl^- iyonları, betona gömülü çelik üzerinde ise korozyonu artırıcı etkiye sahiptir. Önceki bölümlerde de detaylı olarak açıklandığı gibi klor iyonları, betonda gömülü donatıyı saran koruyucu tabakayı yıkan ve korozyonu başlatan başlıca sebeplerden biridir. Çoğu kez düşük

miktarda klor taşıyan taş, çakıl ve doğal kumun oluşturduğu betonun önceden tanımlanan maksimum müsaade sınırlarını aşan klor değerlerine sahip olan örnekler rapor edilmiştir. Örneğin, %0,6 klor iyonu içeren kaba agregası, 815 kg/m³ lük bir beton içinde, 261 kg/m³ çimento ile kullanıldığında, çimento kütlesinin %0.2 si kadar klor iyonu ile sonuçlanır. Bu değer ACI 222R komitesi tarafından tavsiye edilen değerden yüksek bir limittir. [17]

Klor iyonları bakımından çoğu yayınlarda da, normal betonarme için, beton ağırlığına kıyasla %0,2 ve öngörülen betonarme için %0,1 sınırları görülmektedir. Aynı sınırlar betonlardaki agregalarda da geçerli olmalıdır.[33] Beton içine agrega katılırken, özellikle denizden çıkan yada tuzlu yeraltı suları ile temas halinde olmuş agregalardaki klor iyonlarını tespit etmek, müsaade edilen sınırlara göre kıyaslamak ve buna göre betona katmak gerekir. Ya da en sağlıklı yol olarak agregaların öncelikle iyice yıkayıp klor iyonlarından mümkün olduğunca temizlenmesi gerekmektedir. Tabii burada da agregaların porozitesi ve su emme kapasiteleri gözönüne alınmalı, agrega gözeneklerine yıkama esnasında giren su miktarı hesaplanmalıdır.

Beton için agrega seçerken dikkat edilmesi gereken diğer önemli hususlar; boşluk oranı, nem, büyüklük, muhteviyat ve betonun kullanılacağı yapının amacı v.s. dir. Yanlış agrega seçimi sonucunda beton yapısında kaynaklanan bozulmalar yada yapısal çatlaklar, beton ve donatı korozyonunu başlatabilir ya da içerde mevcut olan korozyon reaksiyonunu körükleyebilir. Bu sebeplerden dolayı betonun geçirimsizliği, mukavemeti ve stabilitesi doğru agrega seçimi ile desteklenir.

Agreganın beton içinde işlevlerinden dolayı fiziksel özelliklerinin saptanması, bu özelliklerinin değerlendirilmesinde bazı değişikliklerinin yapılması ve bazı özelliklerin bilinmesi gerekmektedir.

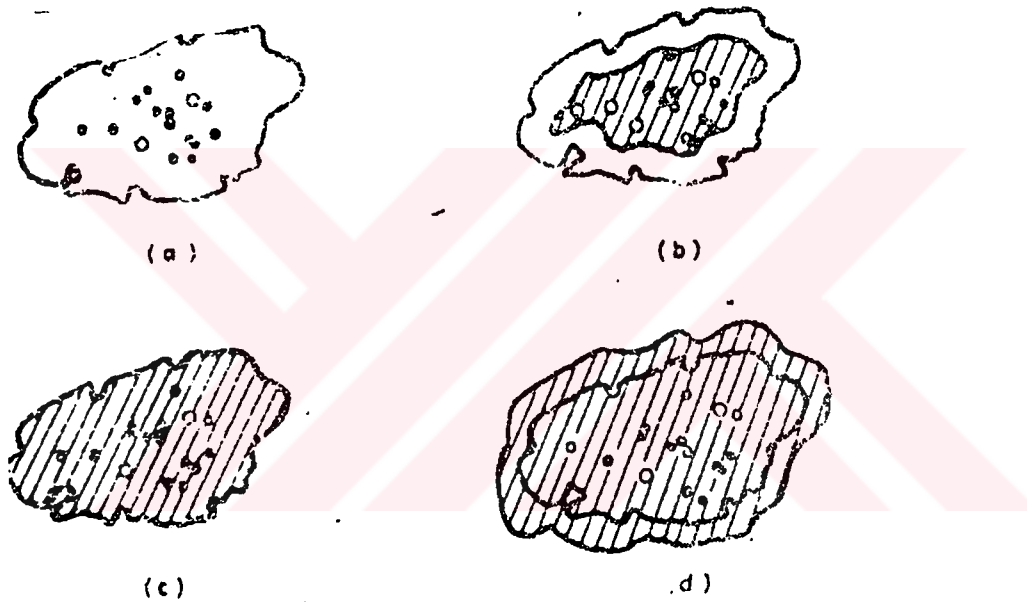
4.1.1. Agreganın Porozitesi [32]

Agrega tanelerinde bir miktar boşluk bulunması doğaldır. İri agrega tanelerinin porozitelerinin küçük olması, bu tanelerin mukavemetlerinin yüksek bir değer almasına sebep olabilir. Mukavemeti yüksek olan taneler kullanmakla da betonların mekanik mukavemetini artırır. Bu duruma göre beton üretiminde kullanılacak olan agregalarda (p)'nin yani porozite değerinin belirli bir değerden büyük olmaması

gerekir. Fransız standartında verilen değerlere göre p genel olarak %10 dan küçük olmamalı ve yüksek mukavemetli beton üretiminde ise %5 değerini aşmamalıdır.

Agreganın emdiği su miktarı tanelerin kökenine, yapısına ve granülometre bileşimine bağlı bulunmaktadır. Doğal kumların su emmesi, bazı hallerde %3 kadar büyük değerler alıyorsa da genel olarak bu karakteristik %2 nin üstüne çıkmamaktadır. İri agregalarda su emme miktarının, tanelerin daha büyük boyutta olması sebebiyle, çok daha büyük olması beklenir. Agreganın kökenine göre, bu cins agregada su emme miktarının %10 dolaylarında bulunması doğaldır.

Agrega tanelerinde boşluk bulunması bunların içinde suyun şu 4 şekilde bulunmasına neden olur.



Şekil 4.1. Agregatanelerinde suyun bulunması.

- a) Tamamen kuru taneler
- b) Kuru yüzeyli taneler
- c) Kuru yüzeyli doygun taneler
- d) Islak taneler

Taneler (a) durumunda bulunuyorsa, kullanılan suyun bir kısmı taneler tarafından emilecek, betonda gerektiğinden daha az miktarda su kalacaktır. Böylece çimento hidratasyonu normal bir seyir izleyemeyecektir.. Fakat burada arttırılacak miktarın saptanmasında büyük zorluklar vardır. Agregatanelerinin yüzeylerin çimento hamuru ile kısmen kaplanarak bunların beklenilenden daha az su emmesi kabildir.

Bunu düşünerek gerektiğinden daha fazla su kullanılması da mukavemetin düşmesine yol açacaktır. Bu zorluklardan iki şekilde kurtulma olanağı vardır.

1. Betona konulan suyun, agregâ tarafından emilmesi kısa bir süre devam eder. Bu nedenle betona konulan su miktarının, agreganın yarım saat zarfında emdiği su miktarı kadar artırılması problemin çözümü olabilir.
2. Agregalar kullanılmadan evvel kuru yüzey doygun duruma getirilir. Bu şekilde agregâ kullanılması halinde artık bu malzemenin su emmesi olası değildir.

4.1.2. Agreganın Rutubeti [32]

Agreganın rutubetli olması, beton üretiminde iki bakımdan gözönünde tutulmalıdır. Birincisi betona konulacak su miktarı, agregada bulunan su miktarı kadar azaltulmalıdır. Örneğin; 1m³ beton yapımında 160 lt su kullanılması gerekiyor. Bu miktar betonda 620 kg. kum yer alıyor. Kumun rutubeti %5 ise bu miktar kumu kullanmakla $620 \times 0,05 = 31$ lt suyu beton içine katmış oluruz. Bundan sonra ilâve edilecek su (160) tamamlayan 129 lt dir.

Rutubetli agregalarda ikinci önemli faktör rutubetin hacim kabarmasına neden olmasıdır. Burada söz konusu olan, taneler arasındaki boşluğu da içine alan görünen hacimdir. Yalnız ince agregalarda yani kumlarda rastlanılan bu olay hesaba katılmaz ise gerekli miktarlardan daha az kum kullanılmış olur. Böylece boşluk miktarı fazla olan bir beton elde edilir veya daha az miktarda beton üretilmiş olur.

Kum tanelerinin rutubetli olması halinde taneleri kaplayan su filmi tanelerin birbirine yaklaşmasına engel olarak hacmin artmasını veya kabarmasını oluşturur. Genel olarak başlangıçta hacimdeki kabarma, kumun rutubet miktarı ile birlikte artar.

4.1.3. Agreganın Donmaya Karşı Dayanıklılığı [32]

Betonun donma olayı sonunda parçalanmamasında birçok faktör etkilidir. Agregâ taneleri de en önemli rolü üstlenir. Bunların donma sonunda parçalanmaları, bu malzeme ile üretilen betonların donmadan zarar görmesine sebep olmaktadır. Böyle bir durum olmaması için, beton üretiminde kullanılacak olan agregaların donma etkisine dayanıklı olması gerekir.

Porozitenin veya su emmenin fazla olması, agregaların donmaya karşı dayanıklılığını azaltmaktadır. Agregaya ile çimento hamuru arasındaki aderans mukavemetinin yüksek olması halinde, betonlar donmaya karşı daha çok dayanıklıdır. Bu sebeple; kırmataşların kullanılması ile donmaya dayanıklılığı yüksek betonlar elde edilmesi kabildir. Agregaların ayrıca termik genişleme katsayılarının mümkün olduğu kadar çimentonunkine yakın olması gerekmektedir. Bu şekilde sıcaklık derecesinin düşmesi halinde iki malzeme ayrı ayrı deformasyon yapmaz ve bundan dolayı çatlamaya sebep olan parazit gerilmeler meydana gelmez.

4.1.4. Agregaya Bünyesindeki Zararlı Maddelerin ve Tanelerin Etkisi [32]

Agregalar içinde bulunabilen zararlı maddelerin bir kısmı, bağlayıcı maddenin ayrışmasına veya genişlemesine neden olarak betonun parçalanmasına veya zararlı derecede çatlamasına yol açarlar. Diğer bir kısım, agregaya ile çimento hamuru arasında kuvvetli bir aderansın meydana gelmesine engel olarak mukavemetin değerini düşürürler. Bazı agregaların da içinde yumuşak ve mukavemeti çok zayıf taneler bulunur ve bunlarda beton mukavemetini azaltırlar.

Organik maddeler: Birçok organik maddelerin çimentoların prizi ve sertleşmeleri üzerine belirli zararlı etkileri vardır. Bu zararlı etkiler; iki nedene dayanmaktadır. Birincisi organik maddelerin bir kısmının hidrofob yani suyu itmesi diğeri organik maddelerin bazılarının çözünmeyerek çimentoda hidrate kristallerin oluşmasını önlemesidir. Agregada organik maddelerin fazla miktarda bulunması, bunlarla üretilen betonun mukavemetinin %50 azalmasına ve hatta bazen çimentonun priz yapmamasına neden olabilir. Daha çok kumlarda fazla miktarda organik madde bulunma olasılığı vardır. Tüm bu sakıncalardan dolayı, kullanılacak agregalarda organik madde tespitinin yapılması gerekmektedir.

Sülfatlar: Sülfatların agregalar içinde bulunması, bu maddenin çimento ile sülfat-alüminat denilen genişleyen bir tuzun oluşmasına yol açması bakımından zararlıdır. Bu bakımdan agregaların içinde, Fransız normuna göre 1 dm³ betonda SO₄ miktarı 1,4 g. dan az olacak şekilde sülfat bulunmasına izin verilir.

Alkali-agrega reaksiyonu: Çimento içinde Na₂O+ K₂O nun toplamı, %0,6 sından küçük olmalıdır. Aksi takdirde meydana gelecek jel, zarar meydana getirir. Diğer taraftan reaksiyonun önemli miktarda bulması için agregalarda belirli miktar aktif silis bulunması gereklidir. Bu bakımdan içinde aktif silis bulunmakla tanınan, opalo,

riyolit, tridimit ve riyolit tüfleri, dazit ve dazit tüfleri ve fillatlar bu tür reaksiyonu yapmaya elverişlidir.

Alkali-agrega reaksiyonuna yol açan agregaların kullanılması zorunluluğunda kalınıyorsa, bağlayıcı maddeye bir miktar puzolan ilavesi tavsiye edilir. Beton içinde aktif silisin puzolan ilavesiyle artırılması alkali-agrega reaksiyonunu azaltır. Söz konusu reaksiyon sonunda oluşan silis jeli, öncelikle aktif silisle birlikte artarak bir maksimuma ulaştıktan sonra azalmaya başlar. Bundan dolayı belirli bir değerden sonra silis miktarının artması halinde zararlı etki azalmaktadır.

4.1.5. Özel Agregalar [32]

Bazı durumlarda üretilcek betonun normal özellikleri dışında bazı özelliklere sahip olması istenmektedir. Bu değişik özelliklere sahip bir beton ancak özel agregaların kullanılması ile elde edilebilmektedir.

Ağır Agregalar: Atom reaktörlerinde ve benzeri yerlerde meydana gelen ve organları tahrip eden γ ve X ışınlarından korunmak için birim ağırlığı $3,2 \text{ kg/dm}^3$ den büyük olan betonun üretimine gerek vardır. Bu amaçla kullanılan belli başlı agregaların cinsleri, bileşimleri ve bunların özgül ağırlıkları aşağıda verilmiştir:

Barit BaSO_4	Özgül ağırlık	$4,2 \text{ kg/dm}^3$
Magnetit Fe_2O_4	“	$4,6$ “
Limonit $2\text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$	“	$3,7$ “

Yüksek sıcaklığa dayanıklı agregalar: Bazı fabrikalarda strüktür malzemesi olarak kullanılan beton devamlı olarak yüksek sıcaklığa maruz kalmaktadır. Böyle bir durumda betonun çatlamaması ve sahip olduğu özellikleri kaybetmemesi gereklidir. Sıcaklık $300^\circ\text{C} - 800^\circ\text{C}$ dereceleri arasında şamat parçaları yani fazla pişirilmiş kil agreganın yerini almalıdır. 1300°C 'yi aşan sıcaklıklarda da aşağıdaki agregalar kullanılmak zorundadır.

Siliminat (Al_2SiO_2)

Korindon (Al_2O_3)

Kromit (FeCr_2O_4)

Hafif agregalar: Hafif betonu oluşturmak için kullanılan hafif agregalar da özel agregalar sınıfına girer. Hafif betonun taşıyıcı elemanlara gelen yükleri azaltmak,

termik iletkenlik katsayısının küçük bir değer almasını sağlamak ile ısı kaybının önlenmesi gibi önemli faydaları vardır. Süngertaşı, tüfler, puzolanlar doğal hafif agrega sınıfına, perlit, vermikulit, kiremit kırığı, letiye yapay hafif agrega sınıfına girer.

4.2. Su/Çimento Oranı ve Karışım Suyu

Su/çimento oranı, betonun geçirimsizliğini ve mukavemetini birebir ölçüde etkileyen bir faktördür. Kalıbına iyi, kolay ve boşluksuz yerleşen beton sulu betondur, fakat hidratasyon için gerekli olandan fazla konulan su sertleşme süresinde buharlaşarak veya kalıplardan süzülerek kaybolur, yerini hava boşluğuna bırakır ve genelde iri tanelerin çevresinde oluşan bu boşluklar dayanımı önemli ölçüde düşürür. [2]

Portland çimentosunun yaklaşık %95 ini oluşturan karmaşık bileşimlerinin hidratasyon yapmalarını sağlayan yaklaşık su miktarı aşağıda gösterilmiştir:

C ₃ S için gerekli su miktarı ağırlığının	%24 ü,
C ₂ S “ “ “ “ “	%21 i,
C ₃ A “ “ “ “ “	%40 ı,
C ₄ AF” “ “ “ “	%37 si,

Betona katılacak su miktarı hesaplanırken, yukarıdaki oranların dışında hidratasyon yapmış çimentoda buharlaşmayan su miktarını saptamak daha doğru olur. Belirli koşullar altında yapılan deneylerde, bu tür su miktarının çimento ağırlığının %23 üne eşit alınabileceği anlaşılmıştır.

Bir çimento hamurunda su/çimento oranı 0,42 değerinden az olmamalıdır. Oranın bu değerden az olması halinde suyun önemli bir kısmı adsorpsiyon yolu ile jel taneleri tarafından çimento boşluğunda bulunan jel boşluklarında tutulmuş olacağından geriye kalan su miktarı hidratasyonun tamamlanmasını sağlayamayacaktır. Jel boşluklarının tamamen su ile dolmaması pekala gerçekleşebilecek bir durumdur. Böyle bir halde w/c oranının 0,42 den daha küçük bir değer alabilir. Çimento hidratasyonunu sağlamak için gerekli su miktarı (W_h) 0,23C den mutlaka büyük olmalıdır.

Bunu şöyle bir denklemle ifade edebiliriz:

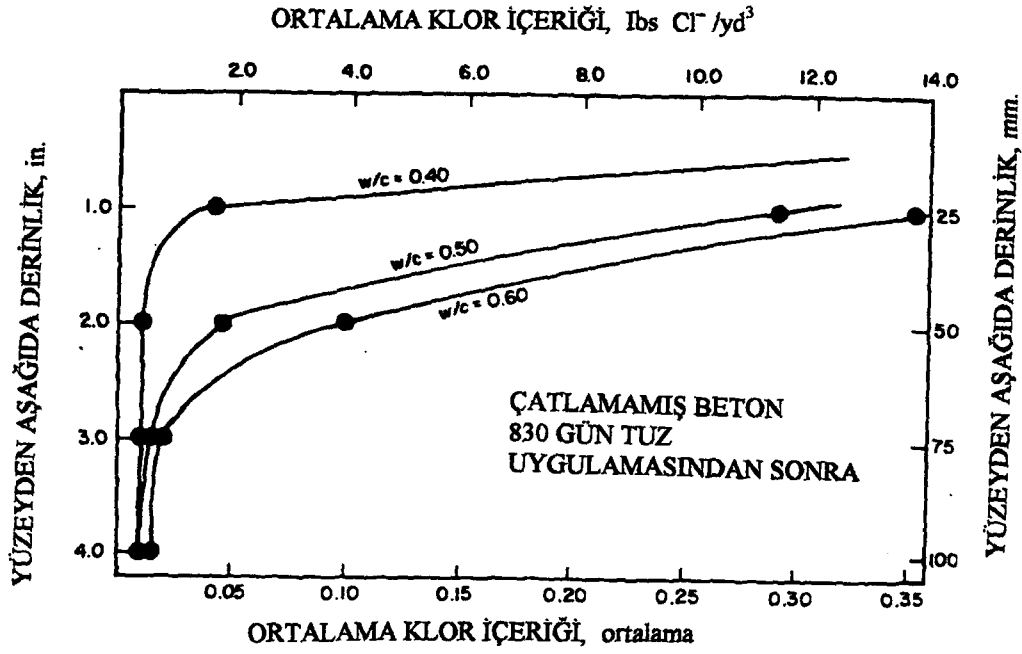
$$W_h = 0,23C + \alpha C$$

Burada αC jel suyu miktarını göstermektedir. Jel boşluklarının en az yarı yarıya su ile dolabileceğini kabul etmek gerçeğe aykırı bir sonuç değildir. Bu boşlukların tamamen de su ile dolması mümkündür. Buna göre; (α) nın (0,095 ile 0,19) arasında değiştiğini ileri sürülebilir. [11]

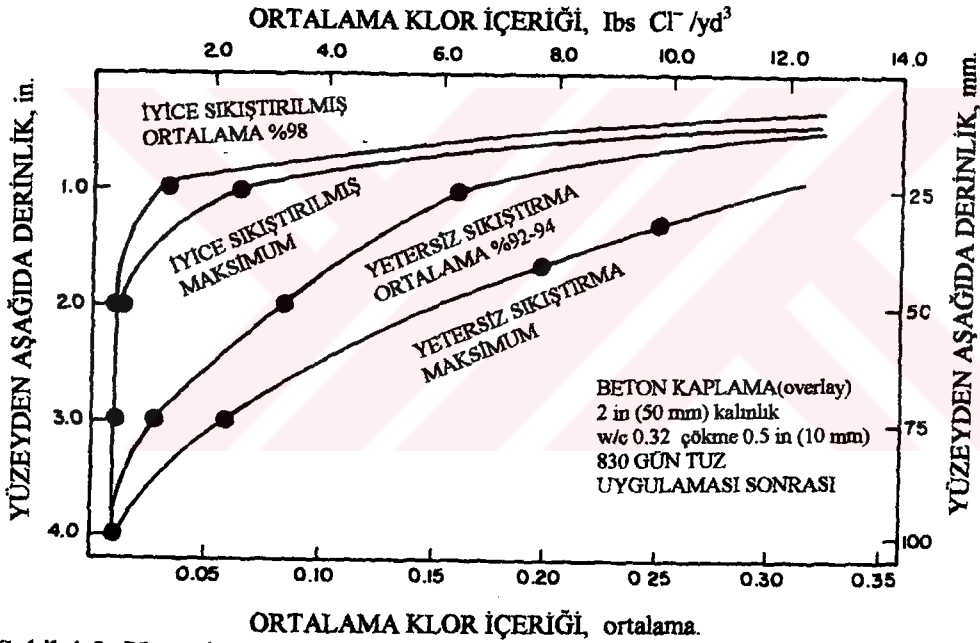
Deniz veya tuzlu suya maruz yada makul klor miktarlarından daha fazla klor miktarıyla temas halinde olan betonun w/c oranı mümkün olduğunca küçük olmalı ve tercihen 0,4 den az olmalıdır. Bu oranın sağlanamadığı durumlarda en yüksek 0,45 değeri olmalı ve paspayı kalınlığını artırarak beton geçirgenliği desteklenmelidir. Eşit miktarlarda çimento miktarlarına sahip hergün tuzlanan beton plakalar üzerinde yapılan testler sonucu 0,40 w/c oranı 0,50 ve 0,60 lık değerlere oranla korozyona karşı daha iyi bir koruma sağlamıştır. [12]

Korozyon olayının sıkça ve şiddetlice olduğu park yapılarında da, w/c oranı düşük beton kullanarak özellikle klor iyonlarının geçirimsizliğini sağlamak beton ve donatı korozyonuna karşı sağlıklı bir önlem sağlar. Düşük s/ç oranı ile ayrıca beton daha iyi mukavemet gösterecek ve az rötire oluşacak, böylece rötire bağlantılı çatlaklarda azalma olacaktır.[29] Şekil 4.2. ve 4.3., w/c oranını ve sıkıştırma derecesinin klor iyonlarının betona nüfuzuna etkisini göstermektedir.

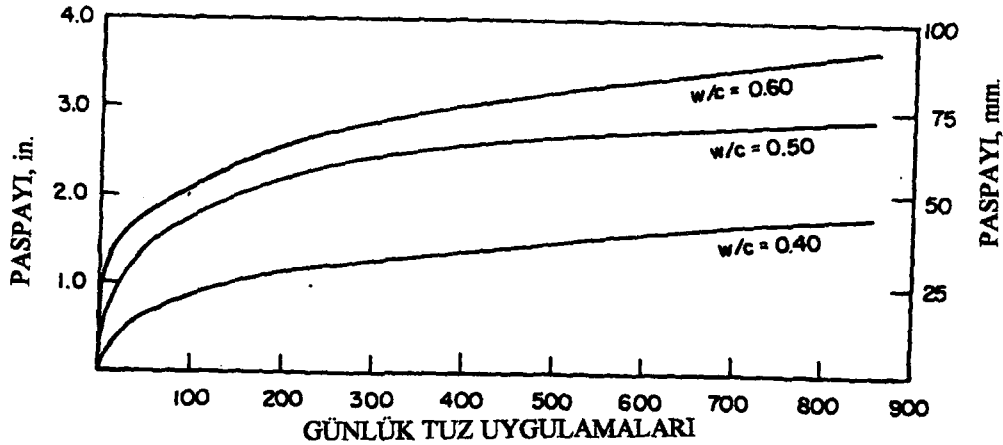
Düşük w/c oranı yinede her zaman düşük geçirimli beton sağlayamayabilir. Şekil 4.3 de gösterildiği gibi 0,32 w/c oranına sahip bir beton, düşük sıkıştırılması (consolidation) yüzünden klor iyonları penetrasyonuna 0,60 w/c oranına sahip bir betondan daha az direnç gösterir. W/c oranı ile paspayının kombinasyonu, Şekil 4.4. de gösterilmiştir. Klor içeriğinin çeşitli derinliklerde kritik değere (0,20 asit-çözücü) ulaşmadan önce tuzun günlük uygulamaları açıklanmış ve böylece 800 lük tuz uygulamaları için 40mm paspayı ve 0,40 w/c oranına sahip betonun gömülü donatı korozyonunu korumak için yeterli olduğu anlaşılmıştır. Eşit koruma 70 mm paspayı ile 0,50 mm w/c değeri olan ve 90 mm paspayı ile 0,60 w/c değeri olan betonlar içinde sağlanmaktadır. Bu çalışmadan çıkan sonuç; ACI 201 komitesi, köprü tabliyeleri için 0,40 lık w/c oranı ile minimum 50 mm paspayı ve 0,45 mm lık w/c oranı ile minimum 65 mm paspayını tavsiye etmektedir. [17]



Şekil 4.2. W/c oranının tuz penetrasyonuna etkisi.



Şekil 4.3. Yetersiz sıkıştırmanın tuz penetrasyonuna etkisi.



Şekil 4.4. W/c oranı ve paspayının günlük tuz uygulamalarına göre korozyona etkisi.

Geçirimsiz ve yüksek dayanıklılığa sahip bir beton üretmede birinci şart olan su/çimento oranını mümkün olan en alt düzeye indirmek, günümüzde süperakışkanlaştırıcıların katkıları ile sorun olmaktan çıkmıştır.[18] Eskiden ancak 0,60–0,70 w/c oranı ile yerleştirilebilen betonlar, süperakışkanlaştırıcı katılımı sayesinde 0,35-0,40 w/c oranı ile yerleştirilebilmektedir. Bu gelişmeler, şu sakıncalı yaklaşıma sebep olmuştur: oran bu kadar indirgenebildiğine göre çimento dozajı azaltılabilir ve ekonomik bir çözüme gidilebilir. İşte bu noktada betonun durabilite özelliği zedelenmiş olur. [2]

Süper akışkanlaştırıcılar, çimento partiküllerinin daha çok yayılmasını sağlayan ve suyu salıveren katılardır. Diğer türlü su, çimento topluluğu tarafından tutulur. Bu hareketin iki yanlı etkisi, istenen işçiliğin sağlanması için gereken su miktarında belirli bir azalma ve çimento partiküllerinin daha hızlı hidratasyonudur.

Bu tip katkıların kullanılması, su miktarını %30 kadar düşürebilir. Sonuçta; daha yoğun ve geçirimsiz betonda, normal betona göre büyük ölçüde rötire ve çatlama potansiyelinde azalma elde edilir. Süperakışkanlaştırıcı betonun özellikleri; zarar veren nemin, gazların ve kimyasalların betona girişine büyük ölçüde engel olmak ve koruyucu bazik çevrenin uzun zaman boyunca işlevini yerine getirmesini sağlamaktır. [34]

Betonda karışım suyu olarak endüstriyel atıklar veya organik maddelerle kirlenmiş suları üretimde kullanmak sakıncalıdır. Bazen deniz suyundan yararlanmak zorunluluğu doğar fakat olabildiğince bu yola başvurulmamalıdır. Deniz suyu beton kalitesinde önemli bir sakınca doğurmakla beraber donatı paslanmasında düşük ihtimal ile de olsa paslanmaya yol açabilir.[2] Ayrıca betona karışım suyu olarak katılan genellikle 20 ppm'den 100 ppm'e kadar seviyelerde temiz su (potable water), az miktarlarda klor içerirler. Bu gibi miktarlar ciddi miktarlar olarak sayılmazlar.[12] Karışımda kullanılacak karışım suyunu seçerken içerdiği agresif iyonların betona zarar verecek boyutta olup olmadıklarını tespit etmekte yarar vardır.

4.3. Betonda Yeterli Paspayı

Betonda paspayı, bir beton elemanın içinde bulunan en dış donatının dışından beton bitim yerine kadar olan mesafedir.[35.-36] Betonarme elemanlarda donatı korozyonunu önleyen mekanizmada paspayı önemli bir görev taşır. Paspayı

betonunun koruyuculuğu, doğal olarak onun nicelik ve niteliklerine bağlıdır. Paspayı betonunun yeterli kalınlıkta olması, makro ve mikro porozitesinin minimum değerde bulunması, çatlak içermemesi, donatıya aderansının mükemmelliği kendisinden beklenen niteliklerdir. [18]

Betondaki paspayının genellikle amaçları özetlenirse;

1. Bir kirişte donatı çeliğini etrafını betonla kaplayarak betondaki eğilme deformasyonunu çekme kuvveti üreten çeliğe transfer eder. Eğer çelikte çekme kuvveti oluşmazsa, betonarme çalışmaz. Paspayı aşırı kalınlıkta olursa çelik, çekme oluşturmayabilir. Paspayı, rötre çatlaması bakımından da önemlidir. Donatısız betonda, özellikle kısıtlanmışsa (restrained), çekme deformasyon artışlarına izin verecektir. Eğer bu deformasyon, betonun deformasyon kapasitesini aşarsa, rötre çatlakları oluşacaktır. Bu tür çekme deformasyonlarının oluşmasını önlemek için donatı, beton elemanın açık kuruyan yüzeyine yeterince yakın yerleştirilmeli ve yakın aralık bırakılmalıdır. Eğer paspayı aşırıysa, betonun dış kısmı donatısız kalacak ve rötre çatlamasına maruz kalacaktır.
2. Önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere; beton içine gömülü çelik, korozyondan yüzeyinin pasivasyonu ve hidratlaşmış çimento hamurundaki gözenek suyunun bazik çevresi ile korunur. Bu korumanın sağlanması için çimento hamuru alkalinitesinde azalma olmaması gerekir. Bu tür azalmanın genel bir sebebi de karbonatlaşmadır, başlıca çelik yüzeyinin yakınlığında beton paspayındaki hidratlaşmış çimentonun kalsiyum hidroksitidir. Karbonatlaşma, beton penetrasyonu arttıkça ve betonun dış yüzeyinden başlayarak hızlı bir ivme gösterir. Uygun bir paspayı, bu olayda çok önemlidir. Beton içine gömülü donatı, karbonatlaşmanın olmadığı fakat agresif iyonların beton yüzeye ulaştığı durumlarda da korozyona uğrayabilir. Bölüm 3.3.2. de anlatıldığı gibi bu iyonların başlıcası deniz suyundan yada buzçözücü tuzlardan gelen klor iyonlarıdır. [35]

Donatının korunması, paspayı kalınlığı ile içindeki betonun kalitesinin bir fonksiyonudur. Bu iki faktörün herbirinin diğerini telafi edebileceğine inanılır ve uygulama yönetmeliklerinde değişik koşullar altında beton durabilitesini sağlamak için alternatif paspayı ve beton kalitesi kombinasyonlarını verilir. Beton kalitesi, minimum basınç dayanımını veya w/c oranı ya da çimento içeriği ile tanımlanır.

Yine de, yüksek bir paspayı ile çok zayıf bir betonun kombinasyonu bütünüyle memnun edici olmaz. Bu durumda, paspayının ne kadar büyük olduğu önemli değildir. Eğer beton gözenekli ve geçirgen ise agresif iyonlar, donatı çelik yüzeyine doğru hızlıca nüfuz edebilirler.

Öngörülen paspayı kalınlıkları, betonun maruz kalacağı koşullara göre farklılık gösterir. Fakat; her zaman çok yüksek paspayı ile problem çözülmez. Eğer 100mm yada 120mm'lik bir paspayının uygulanması düşünülüyorsa, bu kadar kalın bir kaplama betonunun donatısız olacağı demektir ve bu da gözden kaçmaması gereken bir durumdur. Paspayı kalınlığının 80-90 mm'i geçmemesi doğru olur. Bu da yeterli değilse, beton geçirimsizliği bazı katkı maddeleri eklenerek de tamamlanabilir. [35] Paspayı çalışmalarında, her ülkenin veya teknik kurumun kendi yayınladığı değerler mevcuttur. Genelde çalışmaların çoğunda sert korozyif çevrelerde paspayı kalınlığının minimum 38 mm ve tercihen en az 50 mm olması tavsiye edilir. [12]

Deniz çevrelerindeki yapılar için sert koşullarda minimum 75 mm paspayı uygulanmalıdır. AASHTO yerinde dökme betonlar için 100 mm, prekast kazıklar için de 75 mm paspayı değerleri tavsiye edilir.[12] İngiliz Enerji Araştırma Bölümü, suya gömülü yapılarda paspayının, donatı çapının veya maksimum tane çapının ($\emptyset$ veya D) 1,5 katından az olmamasını ve 60 mm'nin altına düşmemesini önermektedir. Norveç, Det norske Veritas(DnV) da 1,5 D sınırını ve 50 mm değerini tavsiye etmektedir. 60 mm, FIP (Uluslararası Öngerilmeli beton federasyonu) tarafından da önerilen bir sınır olmaktadır. FIP'nin tavsiye ettiği diğer sınırlar; paspayı, ıslanma bölgesinde betonarme için en az 75 mm, öngerilmeli beton için 100 mm, batık bölgede ise betonarme için 60 mm ve öngerilmeli beton için 75 mm olmalıdır.[6] ACI 318 komitesinin buz çözücü klor iyonlarına maruz betonlar için tavsiye ettiği paspayı değeri de minimum 38 mm- 50mm'dir.

Ağustos ve Kasım 1999 yıllarında Türkiye'de yaşanmış olan iki büyük deprem sonrası yapılan gözlemlerde, bilhassa nemli bölgelerde beton elemanlarda bırakılan paspayı kalınlıklarının yetersiz oldukları tespit edilmiştir. 1985 yılında hazırlanmış TS 500 standartında paspayı ile ilgili çok geniş ve detaylı bilgi yoktu. Deneyimli proje mühendisliği bu açığı kapatmak için DIN 1045 adlı Alman normlarında yeralan konu ile ilgili koşulları gözönüne alıyorlardı. Fakat; Şubat 2000 tarihli TS 500 standartında beton örtü kalınlıkları ile ilgili olarak daha detaylı düzenlemeler getirilmiştir. Beton paspayı ile ilgili net bazı hükümler aşağıda yer almaktadır.

Madde 7.3: Kirişlerde net beton örtüsü, özel yapılar dışında, dıştaki elemanlarda 25 mm.'den, içteki elemanlarda 20 mm.'den az olmamalıdır. Elverişsiz çevre koşulları durumunda ve daha fazla yangın güvenliği gerektiren durumlarda bu değerler artırılmalıdır.

Madde 7.4.1: Kolonlarda net beton örtüsü, dıştaki elemanlarda 25 mm. den, içteki elemanlarda 20 mm.den az olamaz.

Madde 10.1: Betonarme temellerde beton örtüsü 50 mm.den az olamaz.

Madde 11.2.2. ve Madde 11.4.2: Bir veya iki doğrultuda çalışan betonarme döşemelerde, donatıyı koruyan net beton örtü kalınlığı en az 15 mm. olmalıdır.

Tüm bu maddelerin pekiştirilmesi için ayrıca bir çizelge de mevcuttur.

Tablo 4.1. En dış donatının dış yüzünden ölçülen gerekli beton örtülerinin minimum sınırları

Zeminle doğrudan ilişkide olan elemanlarda	Min 50 mm
Hava koşullarına açık kolon ve kirişlerde	Min 25 mm
Yapı içinde, dış etkilere açık olmayan kolon ve kirişlerde	Min 20 mm
Perde duvar ve döşemelerde	Min 15 mm
Kabuk ve katlanmış plaklarda	Min 15 mm

Yeni TS 500,eski normlara kıyasla daha kapsamlı ve detaylıdır. Fakat; yine de, ne tür mesafe tutucuların kullanılması gerektiğini, yangına karşı paspaylarının ne kadar artırılması gerektiği gibi soruları yanıtsız bırakmıştır. Örneğin; 1972 yılında hazırlanmış Alman Betonarme Şartnamesi olan DIN 1045 paspayı konusunda hazırlanmış olan yaklaşık 7 sayfalık maddeler, ilgili resimler ve detaylarla bu konuda TS 500 ün daha da detaylandırılması gerektiğini ortaya koyar. DIN 1045 ile ilgili hükümlerin özetleri aşağıda yer almaktadır:

Madde 13.1: Demirlerin kesitlerdeki yerleri, korozyondan zarar görmeyecek şekilde yerleştirilmiş mesafe tutucularla kuvvetle bağlanarak muhafaza edilmelidir. Bu bağlantı betonun sıkıştırılması esnasında demirlerin yerleri değişmeyecek şekilde sağlam olmalıdır. Mesafe tutucular, beton ve çimento harcından, asbest çimentodan, plastik ve çelikten yapılabilirler.

Madde 13.2.2: Paspaylarının artırılması: Beton agregası 32 mm. den daha büyük dane kullanılması halinde paspayları en az 5 mm. artırılır. Paspayları başka özel nedenlerle de artırılabilir. Motif olarak şekil verilmiş veya taraklanan, taş işçiliği gibi yontulan, kaplama nedeniyle derin biçimde pürüzlendirilen yüzeylerde paspayları artırılır.

DIN 1045'e göre paspaylarının kalınlıkları, aşağıdaki özelliklere göre tespit edilmektedir. [36]

- Donatının çapı,
- Çevre koşulları,
- Beton malzemesinin en büyük dane iriliği,
- Beton kalitesi,
- Betonun imal biçimi (yerinde dökme-prefabrik),
- Sistemin yük taşıma biçimine (çubuk veya yüzeysel taşıyıcı sistem).

Paspayı kalınlığının, betonun geçirimsizliği üzerinde gerçekten çok önemli bir etkisi olduğu için yerinde dökme betonlar içinde öngörülen paspayının harfiyen uygulanmasına dikkat edilmelidir. Aksi taktirde; gerçek paspayı yeterli olmadığı sürece standartlarda öngörülen paspayı miktarları birşey ifade etmezler. Kanada'da yerinde dökülen ve prekast betonlara yapılmış bir çalışmada yerinde dökülmüş plaklarda üst donatının alt donatıdan daha fazla hassas olduğu bulunmuştur. Öngörülen paspayından ortalama sapmalar, üst donatı için -20 mm, alt donatı için -8 mm bulunmuştur.

Avustralya'da yapılan bir çalışmada, 95 binadaki 227 arızalı bölgede ortalama paspayının 6 mm gibi çok düşük bir değer olduğu tespit edilmiştir. Gözlenen beton elemanlarda beton kaliteleri aynı fakat paspayları değişim göstermiştir. Aynı çalışmada, arızalı bölgelerin %18'inde gerçek paspayı öngörülen değeri 0,6 sından azdır. Köprülerde bu durum daha iyidir, öyleki; sadece %4 ü öngörülen paspayı değerinin 0,6 sından az paspayına sahiptir. [35]

4.4. Çimento Seçimi

Beton yapısının önemli bir bileşeni olan çimentonun seçimi, betonun geçirimsizliği ve beton ile donatının korozyonu açısından dikkatlice yapılmalıdır. Bütün çimento çeşitleri, özellikle beton içine gömülü çeliği korumada aynı beceriye sahip değildir.

Portland çimentosunun trikalsiyum alüminat bileşeni, Cl^- iyonları ile birleşerek Friedel tuzuna ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$) dönüşür ve böylece zararlı Cl^- iyonlarının bağlandıkları ve aktivitelerini yitirdikleri varsayılır.[6,17,18] Fakat; yüksek alkali içerikli beton, her zaman iyi bir performansı sağlamayabilir. Gerçek C_3A değeri, hesaplanmış değerden farklı olabilir. Total mevcut alkalinin kolaylıkla çözünebileceği değer, çimentolara göre değişebilir. Çimentonu inceliği, sülfat içeriği ve bunlar gibi diğer bazı etkenler, betonun geçirimsizliğini etkileyebilir. [20]

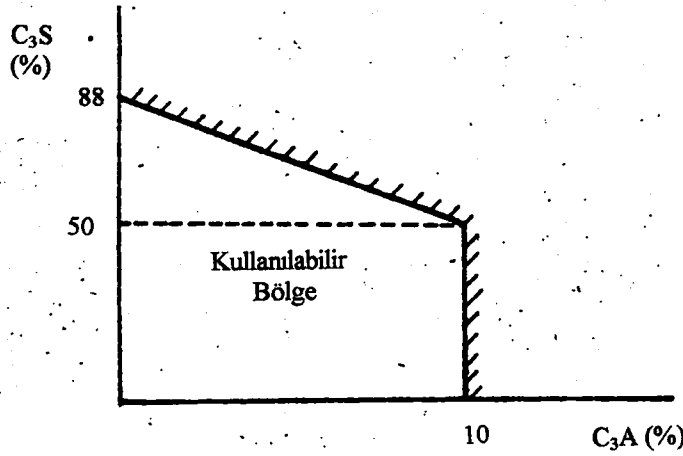
Deniz yapılarında kullanılacak çimento seçimini etkileyen parametreler mevcuttur. Öncelikle betonun hangi bölgede bulunduğu, donatı durumu saptanmalıdır. İklim koşulları, donma-çözülme olasılığı, suyun tuzluluk durumu, endüstriyel atıklara maruz kalıp kalmayacağı dikkatlice incelenmelidir. Fakat tüm bunlardan önce, çimentoda bulunması gereken esas özellik Cl^- iyonunu minimuma indirgeyen türden olmasıdır. $Ca(OH)_2$ nin de etkisini dikkate alan Fransız yayınları, en çok $Ca(OH)_2$ oluşmasına yol açan C_3S miktarını da kısıtlayarak deniz yapılarında kullanılacak çimentolarda aşağıdaki Sadran formülünü önermişlerdir.

$$C_3A + 0,27.C_3S \leq \%23,5$$

Deniz yapılarında kullanılacak normal portland çimentolarının birleşiminde aşağıdaki gibi bazı kısıtlamalar yapılmaktadır;

$$SO_3 \leq \%2,5, MgO \leq \%3, Al_2O_3 \leq \%8, C_3A \leq \%10$$

C_3S ve C_3A içerikleri açısından deniz yapılarında kullanılabilir çimentoların sınırları da belirlenmiştir.(Şekil 4.5.) [6 sf148] Deniz suyu etkisindeki beton ömrü üzerinde yapılan çalışmalar; %5-8 arası C_3A 'a sahip çimento kullanıldığı zaman donatı korozyonuna bağlı çatlamların, %5 C_3A 'a sahip çimentolara nazaran daha az olduğunu göstermiştir.[12] Bu nedenle; deniz yapılarında C_3A içeriği %5'in altında olan sülfata dayanıklı çimento kullanımından vazgeçilmiştir.[18] Arabistan Körfezi bölgesinde, betonarme yapılar yüksek klor iyon seviyelerine maruz kalırlar. Burada en yaygın kullanılan çimento, sülfat dayanımlı çimentodur. Fakat, bu tür bir çimento kullanarak sülfat zararı minimuma indirgendiği sırada artan bir klor sebepli korozyon riski ortaya çıkar. [37]



Şekil 4.5. Deniz yapılarında kullanılabilir normal portland çimentolarında (C₃A-C₃S) bölgesi.

Tip V çimento'nun daha pahalı olması nedeniyle daha toleranslı bir yaklaşımla deniz inşaatlarında Tip II çimentosunun kullanılması yeterli görülür. Tip II çimentolarında C₃A miktarı %8'le sınırlıdır.

Sülfatlı sularla etkileşim halindeki betonlarda, çimento seçiminde de ABD ve Kanada standartlarında bazı değerler gözönüne alınır. SO₄²⁻ iyonu 150 mg/l altında ise sülfatların zararsız olduğu; 150 ile 1500 mg/l arasında ise orta düzeyde etkinin bulunduğu ve Tip II portland çimentosunun veya traşlı yada cürufu çimentoların kullanılması gerektiği kabul edilir. İyon konsantrasyonu 1500 mg/l yi aşınca sülfat etkisi şiddetli varsayılır ve Tip V portland çimentosu gereklidir denilir. Tip V çimento içine ayrıca özel bir puzolanik katkı ilave edilmesi, w/c oranının 0,5'i aşmaması ve beton dayanımının en az 30 MPa olması önerilir. Sülfata dayanıklılıkta C₃A ve Ca(OH)₂ miktarlarını kısıtlamak şarttır.

Sülfata dayanıklılıkları yönünden çimento çeşitleri, kötüden iyiye doğru aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Normal ve hızlı sertleşen portland çimento
2. Yüksek fırın cürufu portland veya düşük hidrasyon ısıli portland çimento
3. Sülfata dayanıklı portland veya puzolanik çimento
4. Yüksek sülfatlı çimento
5. Alüminli çimento

Magnezyum tuzu yüklü sular için, katkılı ve traşlı portland çimentolarında magnezyum ion değişimi, korozyon normal portland'a göre daha yüksektir. Çünkü bunlarda serbest kireç bulunmadığından, koruyucu Mg(OH)₂ oluşumu

nispeten azdır ve Mg^{2+} daha ziyade silikatları çözererek büyük hasar oluşturmaktadır. [6]

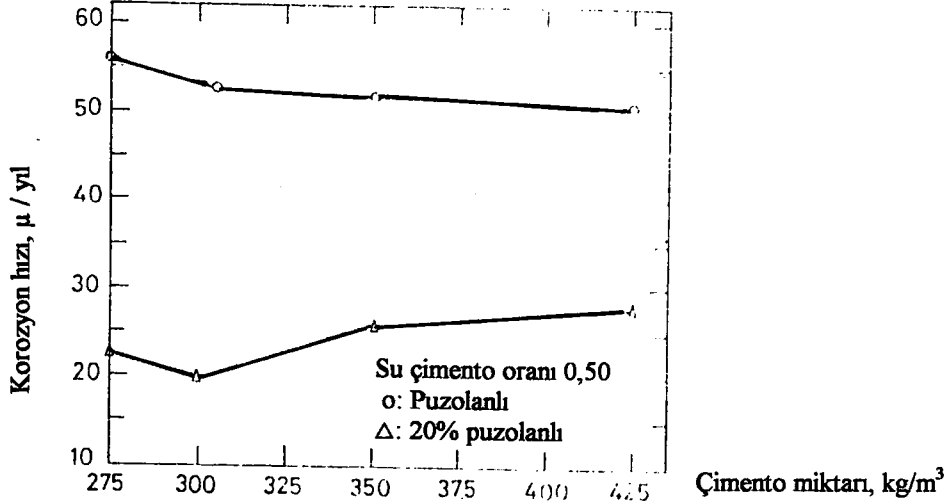
Deniz suları, magnezyumlu veya sülfatlı sulara karşı çimento içine puzolan katılarak beton geçirimsizliğini sağlamak çoğu Avrupa ülkesinde sıkça kullanılan bir yöntemdir. Bölüm 4.5.1. de puzolanın beton performansı üzerine etkisi detaylıca incelenmiştir.

4.5. Katkı Maddesi Olarak Puzolan Katılması

Betonun korozyona karşı mukavemetini artırmak için taze betona çeşitli maddeler katılır. Puzolan maddeler bunlardan biri olup betondaki boşluk oranını indirmek büyük yarar sağlarlar.[38,18] Puzolanlar, yalnız başına kullanılacağı vakit bağı madde olmayan fakat kireç veya çimento ile karıştırıldığı vakit su ile yaptığı reaksiyon sonunda bağlayıcı madde özelliği kazanan maddelerdir. Puzolan maddelerin içinde kolloidal halde reaktif silis ve alümin bulunmaktadır.[11] Bu maddeler, betonun hidrasyon ısısı ile sülfat etkisini azaltır ve betonda yoğun bir yapı elde edilir. Puzolan ara boşlukları doldurup geçirgenliği azaltır ve serbest $Ca(OH)_2$ ile reaksiyonu sonucu kalsiyum silikat hidrat oluşur. Böylece hidrasyona uğramış ürünün, betonarme çeliğe tutunma mukavemeti artar. Puzolan içeren taze betonun akışkanlığı da artarak kolay işlenebilir bir hal alır ve betonun fiziksel özelliklerine iyi yönde etki eder. [38]

Şekil 4.6.da, yapılmış bir deney sonucu çimento miktarına göre puzolanlı ve puzolansız betonda korozyon hızı görülmektedir. Bu deneyde, sabit bir w/c oranı ve farklı çimento miktarları için puzolansız betonarme numunelerle, daha sonra aynı koşullarda %20 oranında çimentonun yerini alacak şekilde puzolan katılarak betonarme numuneler hazırlanmıştır. Temperleme işleminden sonra bu numuneler yaklaşık 800 günden fazla süre ile %5 lik sodyum klorür çözeltisinde tutulmuştur. Belirli sürelerde betonarme çeliklerin yarım hücre potansiyellerini ve korozyon hızını ölçerek puzolansız ve puzolanlı bu nümunelerin korozyona karşı direnci saptanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; puzolansız nümunelerdeki çeliklerin korozyon hızı, puzolanlı nümunelerinkine göre daha fazladır. Böylece, betona belirli miktarda çimentonun yerine puzolan katmakla betonarme yapıların korozyona karşı direnci artırılır. [38]

Puzolanlar, portland çimentosu ile karıştırılarak ya da mineral katkı maddeleri olarak kullanılabilirler. Çoğunlukla bilinen puzolanlar; volkanik küller, killi şist, diatome toprağı, ponza taşı, uçucu kül, ve silis dumanıdır. Son üç maddeler betonda mineral katkı maddeleri olarak kullanılan en yaygın yapay puzolanlardır. [39]



Şekil 4.6. Korozyon hızının puzolanlı ve puzolansız çimento miktarına göre değişimi.

Bazı görüşlere göre; yüksek fırın cürufu, tek başına bağlayıcı bir madde olmadığından bir puzolan olarak kabul edilir. Çünkü bu malzeme bağlayıcılık özelliğini, kireç veya çimento ile beraber olduğu vakit kazanmaktadır. Fakat; çimentonun yapısına sahip bulunmakta olan cüruf, ancak az miktarda kireçle karşılaştığı vakit hidratasyon yapabilmektedir. Kireç veya çimento bir katalizör işlevini görerek hidratasyonu başlatmakta ve bu başlayan hidratasyon da kendiliğinden devam etmektedir.[11] Bu özelliklerinden dolayı; yüksek fırın cürufu, bazı araştırmacılara göre bir puzolan bazılarına göre de değildir. Bu çalışmada, yüksek fırın cürufu bir puzolan olarak ele alınmaktadır.

Amerika'da çimento ile karışarak kullanılan puzolanlar için gereken özellikler ASTM C-618-80 'de belirtilmiştir. Bunlar minimum silis, alümin ve ferrik oksit içerikleri ve maksimum SO₃ ve alkali içerikleri içerir. ASTM C-618 aşağıdaki minerak katkı madde sınıflarını ayırt eder.

Sınıf N – Diatome toprağı, bir çeşit opal kuvarzlı kaya, killeri, tüfler, volkanik küller gibi ham ve kirecimsi doğal puzolanlar

Sınıf F – Yanıcı antrasit veya ziftleşmiş kömürden üretilen uçucu kül

Sınıf C - %10 dan fazla CaO içeren linyit veya bitümlü kömürden normalde üretilen uçucu kül

Çimento ile puzolan karışımı içeren beton karışımları, genellikle portland çimentosu yalnız kullanıldığından daha düşük erken mukavemete sahiptir; fakat 3 ay içinde aralarında hiçbir mukavemet farklılığı kalmaz. Bir kural olarak, yine de, portland-puzolan karışımları mukavemeti yavaşça kazanır ve tam mukavemet için uzun zaman gereklidir. Dahası kopma dayanımları, %100 normal çimento karışımlarınkiyle hemen hemen aynıdır. Eğer eşdeğer mukavemetler sağlanırsa ve puzolan kullanımı şart koşulmuşsa, kısmi yerdeğiştirme yerine ilave tavsiye edilir.

Bazı koşullar altında, portland çimentonun puzolanla yerdeğiştirmesi (puzolanlı çimento) betonun geçirimliliğini azaltır: 7 kattan 10 kata kadar azalma raporlanmıştır. Bu değer, gözenekleri dolduran hidrat formasyonlarının devamına ve serbest kirecin tüketimine bağlıdır. Puzolan ayrıca; agrega/çimento arayüzü bölgesindeki kireci tüketir, böylece mukavemet artar.

Puzolanlar genellikle betonda çimento için kısmi yerdeğiştirme olarak (puzolanlı çimento) kullanılır. Yavaş hidratasyon ve böylece düşük ısı büyümesi kütle yapısında çok önemlidir. Puzolanik maddeler içeren beton, sülfat etkisine karşı dayanım artışı gösterir. Çoğu kez şantiyede bir katkı madde kullanımı, ilave masraflara sebep olur: bu nedenle puzolanlar ekonomik sebepler aksine teknik sebeplerden dolayı kullanılır. [39]

Puzolanlı çimentoların Portland çimentosuna nazaran üstün özellikleri, aşağıda belirtilmiştir:

- a- Kimyasal mukavemette önemli bir artış oluşur. Bundan dolayı puzolanlı çimentolar her türlü zararlı suların etkisine, karıştırıldığı çimentodan, çok daha fazla dayanıklıdır.
- b- Puzolanlı çimentolarda priz esnasında açığa çıkan ısı miktarı, çimentoda meydana gelenden çok daha azdır. Bu nedenle bu çimentolar, baraj inşaatında kullanılmaya çok elverişlidir.
- c- Puzolanlı çimentoları kullanmakla, serbest kirecin tespit edilmiş olmasıyla, geçirimliliği daha az olan harç ve beton üretmek mümkündür.
- d- Bu çimento ile üretilen betonlar, geçirimliliğin daha az olmasından dolayı donmaya karşı daha dayanıklıdır.

- e- Puzolanların çimentoya karıştırılması ile bağlayıcı maddenin maliyet bedelinde önemli bir azalma sağlanır.

Bu üstünlükler dışında puzolanlı çimentoların kullanılmasının bazı sakıncalı tarafları da vardır:

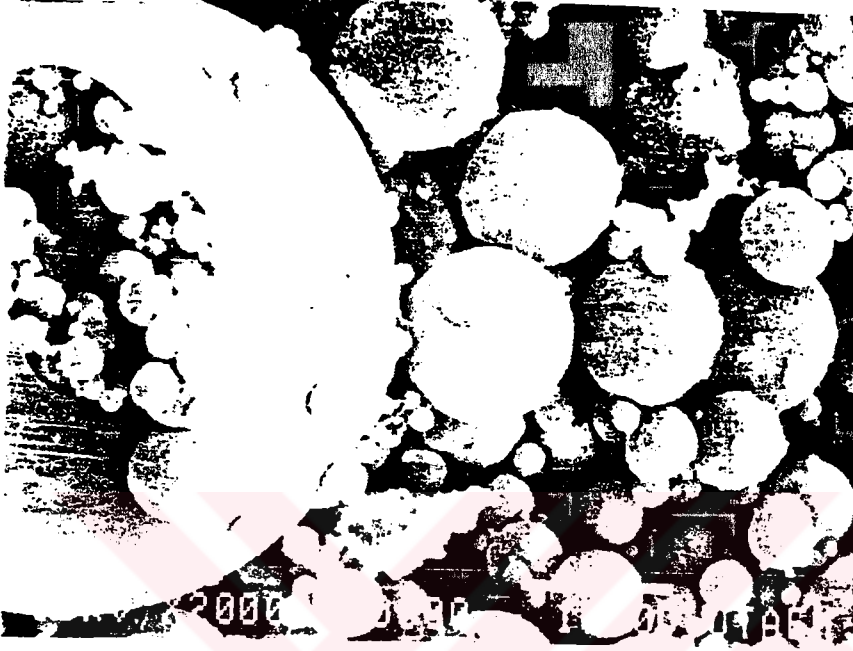
- a- Puzolanların çimentoya karıştırılması, mekanik mukavemetlerin zamanla artış hızını bir miktar düşürür. Bu durum; puzolanlı çimentolarda hidratasyon reaksiyon hızının daha düşük olmasından ileri gelmektedir. Bundan dolayı; bu çimentoların ilk günlerdeki mukavemetinin portland çimentosunun aynı günkü mukavemetlerinden küçük olması mümkündür. Mukavemetteki bu azalma, zamanla azalarak en sonunda tamamen kaybolur. Hatta puzolanlı çimentoların en son mukavemeti, kirecin tespit edilmiş olmasıyla, çimentonun mukavemetinden daha büyük bir değer dahi alabilir.
- b- Hidratasyon ısısının daha az olmasından dolayı puzolanlı çimentolar soğuk havalarda kullanılmaya elverişli değildir.
- c- Puzolanlı çimentolar kullanılarak üretilen betonların daha uzun süre ve daha iyi koşullar altında korunması gerekmektedir. [11 sf 66]

4.5.1. Uçucu Kül (Toz Haline Gelmiş)

Uçucu kül, termik santrallerde toz halinde özellikle yapay huy maden kömürün yanmasından geriye kalan malzemedir.[11] Uçucu kül partikülleri, küresel ve çimento ile yaklaşık aynı inceliktedir. Partiküllerde çok miktarda silis şekilsizdir ve bu nedenle çimento ile oldukça reaktiftir. Genelde, Şekil 4.7. de gösterildiği gibi uçucu kül 1 µm den 100 µm'a kadar büyüklüğe kadar değişen ebatlarda camsı küreler içerir.[40] Partikül ebatında, morfolojide ve yüzey özelliklerindeki farklılık uçucu külün reaktivitesini ve bir katkı maddesi olarak uçucu kül içeren betonda su ihtiyacını etkiler.

Uçucu kül mineralojik kompozisyona bağlı olarak sınıflandırılabilir. Farklılık esasen kalsiyum içeriğine göre şekillenir. Sınıf F olarak tanımlanan ilk kategori, analitik CaO olarak %5'den az kalsiyum içerir. Sınıf C olarak tanımlanan ikinci kategori %15-35 arası analitik CaO içerir. Sınıf F uçucu küller yüksek oranlarda silis ve alümin içerir ve bu nedenle esasen alüminsilikat camdan oluşurlar. Yüksek kalsiyumlu uçucu küller, yapısal olarak düşük kalsiyumlu küllere oranla daha komplekslerdir ve farklılık başlıca camsı bölge bileşiminde oluşur. Sınıf C'deki

kristal yapıda mineraller reaktiftir ve çimentomsu özelliklere meyillidir, oysa Sınıf F külleri reaktif değildir. İki uçucu kül arasındaki diğer fark, yanmamış karbon miktarlarıdır. Sınıf F'de karbonun tamamen ayrılması seyrek ve %2-10 arası karbon oluşumu daha yaygındır. Bu olay, hava sürükleyici maddeler kullanıldığında problem yaratır. [39,40]



Şekil 4.7. 2000 kez büyütülmüş uçucu küller.

Uçucu kül katılarak yapılmış betonda, klor iyonlarının içeri girişinde belirgin bir azalma gözükür, düşük w/c oranlarında daha iyi sonuçlara ulaşılır. Ayrıca; betonun basınç dayanımını iyileştirir.[41] Klor iyonları, emme yolu ile beton yüzey yakınlarına çabucak gelebilir, fakat uçucu kül sayesinde oluşan betonun mikrostrüktüründeki değişiklikler yüzünden daha derinlere nüfuz edemezler. Bu olay, uçucu kül içeren betona doğru klor difüzyonunu zorlaştıracaktır. [42]

Uçucu küllerden puzolan olarak kullanılmanın dışında aşağıdaki şekillerde de yararlanmak mümkündür:

- a- Uçucu külü çimentonun ilkel maddesi olarak kullanmak da mümkündür. Bu şekilde hareket edildiği vakit fırındaki sıcaklık derecesi 1450°C den 1350°C ye düşürülebilir ve böylece yakıttan bir ekonomi sağlanır. Ayrıca pişirme sonunda serbest CaO klinker içinde daha az bulunur.
- b- Uçucu kül beton üretilirken karışıma katılırsa, tanelerin küresel olması dolayısıyla taze betonun işlenebilme özelliği artar. Bu da daha az miktarda

yoğurma suyu kullanılmasını sağlar. Su miktarının azalması ise beton mukavemetini yükseltir.

4.5.2. Silis Dumanı

Silis dumanı, silikon veya ferrosilikan imalatının bir yan ürünüdür ve başlıca kristal yapıda olmayan silis içerir. Mükemmel bir puzolandır, çünkü; yüksek yüzey alanına sahiptir.(20-23 m²/g) Partiküller çoğunlukla küreseldir ve boyut olarak uçucu külden 100 kat daha küçüktür ve ortalama 0,1 µm çapındadır. Verilen bir w/c oranı için, genellikle çimento ağırlığının %2-5'i arası silis dumanının ilavesi betonun işlenebilirliğini geliştirir ve sızıntı ile ayrışmasını azaltır.[43] Yüksek dozajda bir superakışkanlaştırıcı yardımı dışında, %8'i aşan katkı maddeleri, işlenemez beton karışımları üretir. Bazı deney sonuçlarında da klor geçirimsizliğinin azaltılması için silis dumanı ilavesinde süperakışkanlaştırıcılarda kullanılarak çimento ağırlığının %10 oranı tavsiye edilmektedir. Silis dumanı, özellikle yoğun, yüksek mukavemetli beton ve harç gereken çoğu tamir bileşiklerinin hayati önem taşıyan bir bileşenidir.

Çimentolu bileşiklerde, silis dumanının iki fonksiyonu vardır. İlki “puzolanik” denilen kimyasal bir reaksiyondur. Portland çimentonun hidratasyonu(su ile karışımı) kalsiyum silikat hidratları(CSH) ve kalsiyum hidroksit(CH) içererek birçok bileşik üretir. CSH jeli, betonda mukavemetin kaynağı olarak bilinir. Silis dumanı taze betona katıldığında, CH ile kimyasal olarak reaksiyona girerek ekstra CSH üretir. Bu fonksiyonun yararı iki kattır; yükselen basınç dayanımı ve kimyasal direnç. Beton hamuru ve kaba agregası arasındaki bağ 15000 psi'yi aşan basınç dayanımlarıyla sonuçlanarak, yüksek bir artış gösterir. Silis dumanı ile üretilen, ilave CSH zayıf CH'dan daha çok agresif kimyasalların etkilerine dirençlidir.[44] Silis dumanı ile puzolanik reaksiyonlar için, uçucu küllü betonlardaki gibi uzun dönem gerekmez, hızlıca oluşur. [45]

Silis dumanının çimento bileşiklerinde gösterdiği ikinci fonksiyonu fizikseldir. Çünkü; silis dumanı, bir çimento partikülünden 100-150 kat daha küçüktür ve matriksde serbest su tarafından oluşturulan boşlukları doldurur. Dane yerleşmesi adı verilen bu fonksiyon, betonun mikrostrüktürünü iyileştirerek daha sıkı (denser) gözenekli beton oluşturur. Beton geçirimsizliği artar çünkü; silis dumanı, beton içindeki kılcalların sayısını ve boyutunu indirger. Silis dumanı ile modifiye edilmiş beton sadece güçlü değil ayrıca uzun ömürlüdür, çünkü; agresif çevrelere karşı

dayanımı oldukça yüksektir.[44] Fakat; silis dumanının beton geçirimsizliği üzerindeki etkisi w/c oranı ile ters orantılıdır. Silis dumanı katılmış bir betonda, w/c oranı büyüdükçe silis dumanı etkisini daha az gösterir. [46]

Yapılan testler ve gözlemler sonucunda, silis dumanlı betonlar buz çözücü tuzlara maruz kaldıklarında 16 yıllık şiddetli kış koşullarına yani sürekli donma-çözülme olaylarına maruz kaldıklarında bile yüksek bir basınç dayanımı ve düşük bir klor geçirimsizliği göstermişlerdir. [47]

Dünyada bir çok uygulamada kullanılmış silis dumanının, 1993 yılında Güney Kıbrısta Larnaka atıksu ve drenaj projesinde sülfat dayanımlı portland çimentosunun yerine kullanılması ilginç bir örnektir. Bu projede, öncelikle sülfat etkisi yoğun olduğundan sülfata dayanıklı bir beton için sülfat dayanımlı portland çimentonun kullanılmasına karar verilmiştir. Kıbrıstaki yerel fabrikalarda standart dışı olan bu çimentonun hem maliyet yönünden hemde iki yıl boyunca stoklama probleminden dolayı zorlukları vardı. Bu çözüme alternatif olarak, normal portland çimento içine %10 oranında silis dumanı karar verilmiştir. Kullanılan silis dumanlı betonlardaki ilk raporlarda, silis dumanlı betonun sülfat dayanımlı betona nazaran donatı korumasında daha etkili olduğu ve bu durumun silis dumanlı betonun düşük geçirimsizliği ve yüksek elektriksel direncinden kaynaklandığı belirtilmiştir. SDPÇ lu betonun düşük C₃A içeriği yüzünden, sülfat etkisine karşı daha iyi direnç gösterir, fakat; klor etkisine karşı silis dumanlı beton kadar direnci yoktur. [48]

4.5.3. Yüksek Fırın Cürufu

Demir üretiminde metal cevheri, kömür ve ergitici (genellikle kireç) yüksek fırının üst kısmına konulur. Bu maddeler ısınarak yavaş yavaş aşağıya doğru hareket eder ve ergime bölgesine ulaşır. Fırının alt kısmında sıvı halinde, fakat yoğunlukları birbirinden farklı iki madde elde edilir. Bunlardan biri folt, diğeri de yoğunluğu daha küçük olması nedeniyle bunun üstünde yer alan cüruftur. Cürufu oluşturan maddeler çimentoda bulunan kireç, silis ve alüminindir.[11] Cüruf esasen camsıdır. Cüruflarda cam fazın hem bileşimi hemde reaktivitesi Sınıf C uçucu küllere çok benzer. Uçucu külle cüruf arasındaki fark partiküllerin şekli ve yapısıdır. [39]

Cürufun içerdiği maddeler ancak amorf yapıya veya cam yapısına sahip olduğu vakit bağlayıcı madde özelliğine sahiptir. Yüksek fırından çıkan ve 1500°C civarında sıcaklıktaki cüruf kendi halinde soğumaya bırakıldığı takdirde, kristal yapıli cisimler

meydana gelir. Böyle bir durumda; cüruf herhangi bir şekilde bağlayıcı madde özelliği göstermez. Bu nedenle yüksek fırından ince hüzmeler halinde çıkarılan cüruf, su dolu geniş havuzlara sevk edilerek ani bir şekilde soğutulur. Bu işlem sonunda boyutları 1 – 5 mm arası taneler oluşur. Cürufun bağlayıcı madde olarak kullanılması içinde en az çimento inceliğinde öğütülmesi gereklidir.

Yüksek fırın cüruf çimentoları Türk Standartları tarafından iki sınıfa ayrılmıştır.

- 1- Demir Portland Çimentosu: Ağırlıkça %70-85 arasında portland çimentosu ve %15-30 arasında cüruf.
- 2- Cüruf Çimentosu: Ağırlıkça %15-69 arasında portland çimentosu ve %31-85 arasında cüruf.

Düz yüzey yapılarından dolayı, betona uçucu kül ilavesi, cürufa oranla daha iyi işlenebilirlik ve bitiş özellikleri sağlar. Genelde, portland çimentosu ile cürufun karışımı, uçucu kül ile portland çimento karışımına çok benzerdir. Yine de; bazı yüksek kalsiyum uçucu külleri, cürufli portland çimentolarına nazaran ciddi anlamda daha yüksek erken mukavemetler göstermektedir. [39]

İlk başlarda, yüksek fırın cürufunun portland çimentosu ile karıştırılarak kullanılması bazı kaygılara yolaçmıştı. Bu kaygıların nedeni yüksek fırın cürufundaki sülfürün zararlı etki olasılığıydı. Fakat; yapılan gözlem ve araştırmalar, bu kaygının yersiz olduğunu, yüksek fırın cürufunun donatı korozyonuna karşı negatif bir etki yapmadığı, tam tersine beton geçirimsizliğini azaltarak zararlı iyonların beton içine girişini büyük ölçüde engellediğini göstermiştir.

Yüksek fırın cürufu içeren portland çimentoları ile üretilen betonlarda kılcal su emme değerleri önemli ölçüde azalır. Özellikle; ıslanma-kuruma tekrarlarına maruz betonlar için bu özellik çok önemlidir. Fakat sıcak iklim bölgelerinde iyon difüzyonu kolaylaşır, alkali-agrega reaksiyonu şiddetlenir. Su gereksinimi artar, hidrate ürünlerin yıkanması çoğalır. Hidratasyon ısı da fazla ise bu olaylar daha da şiddetlenir. [49]

4.6. Donatı Seçimi

Betonarme elemanların korozyondan korunmasında, donatı çeliğinin paslanmaya dayanıklı türden olması önemlidir. Aslında beton düşük w/c oranı ile üretildiğinde ve betonda gerekli ek önlemler alındığında, çelik için öngörülen çözümler fazla önem

taşımaz. Ayrıca bunların maliyette sebep olacakları artışlarda pek küçüksenemez. Donatı çelikleri için kabul edilen önlemler, genelde donatının epoksi reçineleri ile kaplanması, çeliklerin galvanizlenmesi, paslanmaz çelik kullanılması ve çelik yerine kompozit donatılar kullanılmasıdır. [18]

Donatı üzerinde, yüksek klor konsantrasyonlarına bağlı olarak oluşan, hızlanmış korozyona karşı donatıyı koruyan kaplamanın önemli özellikleri aşağıda yer almaktadır.

- Portland çimentolu betonun içinde karşılaşacağı agresif akıcı çözeltilere karşı iyi bir kimyasal dirence sahip olmalıdır.
- İyi bir fiziksel durabilitesinin olması gereklidir. Kaplama, makul miktarda bakımlara dayanıklı olmalıdır. Kaplamaların göreceli durabiliteyi, çelik plakalar üzerinde çarpma ve aşınma dirençleri, kaplamalı donatı çubuklarının eğilmeleri ve sertlikleri ölçülerek değerlendirilir.
- Klor iyonu geçirimsizliğine karşı gerçek dayanımı, çok önemli bir özelliktir.
- Film kalınlığı ve sağlamlık önemlidir. Çünkü, küçük delikler ve kesilmeler(holiday), korozyon için potansiyel bölgelerdir. Genelde, donatı çubuğu üzerinde birkaç kesik olan yada hiç olmayan kaplamalar, iyi koruyucu özelliklere sahiptir. Kesilmeler, genellikle kaplamanın zayıflığından ve yetersiz film kaplamasından oluşur. Sürekli bir film tabakası, kalın film uygulaması ile sağlanabilir. Yine de, maksimum müsaade edilen film kalınlığı, iyi strüktürel ve esneklik gereksinimlerine uygun olmalıdır.
- Çeliğe iyi tutuş kuvveti, diğer önemli bir özelliktir. [50]

4.6.1. Epoksi Kaplamalı Donatı

Epoksi kaplamalı donatı sistemleri, çelik donatıyı koruyan füzyon reaksiyonu ile yapıştırılmış toz epoksi kaplamalar içerirler. Bu tip bir kaplamaların, klor iyonlarına karşı çok düşük bir geçirgenliği olduğu bilinir ve elektrokimyasal olarak aktif değildir. Kaplama kalınlığı, uygulama sırasında kritiktir çünkü kaplama, filmin eksikliklerini azaltacak kadar düşük bir minimum kalınlığa sahip olmalıdır, fakat düzgün küre engel olacak kadar kalın olmamalıdır. [50]

Epoksi kaplamaları, donatı çeliğine bir fabrikasyon sürecinde uygulanırlar. Çubuk, bir indüksiyon ocağında 232°C de sıcaklıkta ısıtılır ve çubuk, üzerine ince epoksi

tozu püskürten bir kaplama ünitesinden geçer. Toz, sıcak çubuk üzerinde erir, fakat işlemden çıkmadan önce kürlenir ve çeliğe su verilir.(quenche). Füzyon reaksiyonu ile yapıştırma, mükemmel çarpma ve aşınma dayanımı ile çeliğe yapışan sert bir kaplama üretir. Kaplamada, fabrikasyon sırasında maruz kalacağı streslere, davranışlara, yerleştirmelerde donatıdan ayrılmayacak özellikler sağlanmalıdır. Bazı kaplamalar, fabrikasyon ve taşıma sırasında hasara uğrayabilir ve hasarlı olanlar belirlenmiş limitleri aşarsa, kaplamaya uygun bir madde ile tamir edilmelidir. [50]

Epoksi kaplamalı donatı uygulaması ve kullanımı için alternatif bir metot, ilk defa Danimarka'da "Great Belt Bridge" tüneline ve ayrıca Amerika ile Kanada arasında St Claire tüneline kullanılmıştır. Bu projelerde, donatı çubuk kafesleri inşaa edilmiş ve çubuklar birbirlerine kaynaklanmıştır. Lineer bir üretim sürecinde kaplamaların uygulamasını yerine, hazırlanmış kafesler akışkanlaştırılmış bir epoksi toz tabakasına daldırılmıştır. Kafesleri kapladıktan sonra hemen sonra, kaplama çok minimum bir hasar riski ile betona yerleştirilmiştir. [16]

ASTM Standart Specification A775-81, epoksi kaplamalı donatılar için belli üretim ve performans standartları geliştirmiştir. Şartname, epoksi malzemenin kimyasal direncini, korozyon direncini ve fiziksel özelliklerini, kaplanacak donatı çubuklarının temizlenmesini, uygulama metodunu ve kalınlık limitlerini (0,125 – 0,300mm) içerir. Ayrıca; kaplanmış çubukların onay testlerini, müsaade edilecek hasar oranlarını ve tamirini şart koyar. Aderans mukavemeti, esneklik, akma özellikleri ve minimum korozyon koruma gereksinimleri üzerine laboratuvar testleri, optimum kalınlığın 0,125-0,225 olduğunu göstermişlerdir. Üst limit olarak kalınlık da 0,3 mm olarak belirtilmiştir. Çoğu kaplama uygulayıcıları, kaplama kalınlığını minimum 0,125 mm civarında tutmaya gayret eder ve genellikle 0,175 mm lik bir kalınlık sağlarlar. [50]

Epoksi kaplama metodunun birçok avantajı ve dezavantajları vardır. En önemli avantajı, korozyon korumasına karşı düşük maliyetli bir yaklaşım olmasıdır. Şantiye operatörlerince tercih edilen bir sistemdir ve Kuzey Amerika ile Orta Asya'nın bazı bölgelerinde artık rutin bir teknolojidir. Eğer iyi kalitede donatılar, beton içine yerleştirilirse, su yalıtım membranlarına ve diğer yüzey kaplamalarına nazaran daha önemsiz bir bakım gereksinimi vardır.

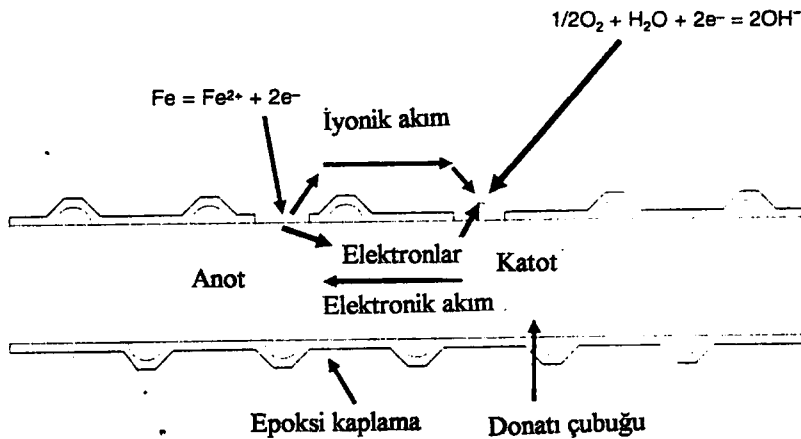
Kaplama üzerinde uygulamadan sonra ufak delikçikler oluşur, çünkü donatı çeliği düz değildir ve üzerinde deformasyonlar vardır. Üretim sahasında taşıma ve

fabrikasyon sırasında ufak miktarlarda hasar oluşur. Bazı hasarlar, sahaya nakliye sırasında kaçınılmazdır. Sonuç olarak; donatı üzerine ıslak betonun dökülmesi ve vibrasyonu, kaplama üzerinde tahribatlara yolaçar. Epoksi kaplama üzerine bütün mevcut standartların amacı; tahribat sayısını ve alanını düşük tutmak ve mümkün olursa tamir etmektir.

EKD üzerinde yarım pil potansiyel ölçümleri almak ve yorumlamak çok zordur. Ayrıca lineer polarizasyon tekniği ile alınan korozyon hız ölçümleri için korozyon alanın hesaplamak da zordur. Eğer korozyon sadece birkaç kusur üzerinde oluşuyorsa, korozyon alanını tespit etmek imkansız olabilir ve böylece birim yüzey alanı için korozyon akımını etkili bir korozyon hızına çevirir. Rehabilitasyon için bütün donatı çubukları arasında katodik koruma veya klor iyonlarının ortamdan uzaklaştırılması teknikleri için elektriksel bağlantı yapmak gerekir. Çünkü; donatılar elektriksel olarak izole edilmişlerdir. Bu problem, herbirinin sürekli olduğu kaynaklanmış kafeslerde ortaya çıkmaz.

EKD çubukları için fabrikasyon alanında özel taşıma teknikleri kullanılmalıdır. Kaplama tabakası üzerinde oluşacak kusurları minimize etmek gerekir. [16]

Sonuç olarak; çelik donatı olarak füzyon reaksiyonu ile yapıştırılmış epoksi kaplamalarının kullanılması pratikte yüksek seviyelerde klor iyonları içeren donatı betonunun bozulma hızını ciddi anlamda düşürse de, tam bir koruma sağlamazlar. Kaplamadaki kesiklerde veya fabrikasyon esnasında eğilme sonucu çatlaklarda, çelik korozyonu başlayabilir. [50] (Şekil 4.8.)



Şekil 4.8. Kusurlu bir epoksi kaplamalı donatı üzerindeki anot ile katot arasında oluşan korozyon.

4.6.2. Galvanize Çelik Donatı

Çelik donatı çubuklarını, çinko tabakasıyla kaplama tekniğine galvanizleme denir. Galvanizleme çoğu araştırmalarda, klor etkisine maruz kalınca füzyon reaksiyonu ile yapıştırılmış epoksi kaplamasına göre daha alt bir seçenek olarak gösterilmiştir. Fakat galvanizlemenin EKD ya göre önemli bir avantajı vardır. Galvanize çelik donatılarda kaplamalar “feda edici” olarak korozyona uğradığından, taşımada oluşacak hasarlar telafi edilebilir.

Galvanize donatılar, kaplama panelleri (cladding pannel) gibi karbonatlaşmanın risk olduğu yapılarda başarılı bir şekilde uygulanır. [16]

Galvanizli çeliğin sakıncaları da vardır. Soğuk işleme sırasında, örneğin etriye, pliye, kanca yapımında galvaniz çatlar ve bu bölge kaplanmış bölgeye nazaran anot durumuna geçer, dar olması nedeniyle oyuklanma korozyonuna yol açar. Fakat, sıcak ve kromatlaşmış galvanizasyon çatlamaya karşı daha dayanıklı olabilir.

Galvanizli ve çıplak çeliğin yakın olmaları da korozyona neden olur. Kaynak yapılamaz ve kaynak sırasında buharlaşan çinko sorun yaratır, çinko ile çimentonun sakıncalı kimyasal reaksiyonlara girmeleri olasıdır. Çinko çimentodaki serbest CaO ve Ca(OH)_2 ile birleşince, H_2 kabarcıkları oluşur, bunlar donatı-beton aderansını düşürür. Ayrıca çinkohidroksit Zn(OH)_2 , C_3S 'in hidrasyonunu yavaşlatır ve priz gecikir. Lokal olabilecek priz gecikmeleri prefabrike ürünlerin taşınmasında da hasara yol açabilir.[18] Tablo 4.2. de epoksi ile yaş galvanizleme donatı kıyaslamasını göstermektedir.

Galvanizli donatılara elektrokimyasal tedavi uygulamak çok tehlikelidir. Çok şiddetli çukurcuk korozyonu oluşabilir. Tekrardan alkalileştirme ve klor iyonlarını dıştan bir anota çekme teknikleri üzerinde patent sahipleri, galvanizli donatı içeren strüktürler üzerinde tekniklerinin kullanılmasını tavsiye etmezler.

4.6.3. Paslanmaz Çelik Donatı

Paslanmaz çelik donatı, özel koşullarda kullanılmaktadır. Fakat çok pahalı bir seçenektir. Bu nedenle alternatif olarak ortada yumuşak donatı çeliği olan ve dışta 1-2 mm kalınlığında paslanmaz çelik bulunan çift katlı bir çelik donatı önerilir. Bu alternatif daha ucuzdur fakat, diğer çözümlere göre gene de pahalı kaçır. Paslanmaz çelikler, çukurcuk etkisine karşı hassastır, buyüzden paslanmaz çeliğin doğru

derecelerde kullanılması gereklidir.[16] Paslanmaz çeliğin ayrıca, betona aderansı düşüktür. [18]

Paslanmaz çelik ve yumuşak çeliğin beraber kullanılması ve arada oluşan galvanik etki, yumuşak çeliğin korozyonuna sebep olur. Özellikle balkonlarda ve cephelerde bu problem sıkça görülmektedir. [16]

Tablo 4.2: Epoksi kaplamalı donatı ile yaş galvanize donatı karşılaştırması.

Çalışma koşulları (Laboratuvar harici)	Yaş galvanizleme	Epoksi kaplama
Beklenen ömür	İyi ile mükemmel arası tasarım zamanını karşılar.	İyi-saha sonuçları karıştırılmıştır.
Betona aderans kuvveti	Mükemmel-%20 ile siyah nervürlü çelik karşılar yada aşar.	Zayıf –siyah nervürlü çelikten %30-35 daha az
20 yıl sonar betona aderans(bonding) kuvveti	Mükemmel	Zayıf-Birçok eyelet ve dünya çalışmaları betonun epoksiye ve epoksinin çeliğe ayrılmasını göstermişlerdir.
UV dayanımı	Mükemmel-yıllarca dışkoşullarda depolama imkanı	90 gün
Normal saha klor seviyelerine dayanımı	İyi ile mükemmel arası-kesik bitişlere rağmen yıllarca hizmet olanağı	Laboratuvar testleri iyi. Yine de;çoğu saha çalışması elle taşınmayı,iş sahasını ve beton zedelenmesini bertaraf edecek yöntemler bulmayı başaramamışlardır.Hasarlı epoksiden girebilecek klor iyonlarını engelleyecek bir metod henüz bulunamamıştır.
Zeminde sürüklenebilirlik	Evet	Hayır
Engel koruyuculuğu var mı?	Evet	Evet
Katolik koruması var mı?(pası önlemek için kendinden feda edilen mi?)	Evet-çinko çelik donatıyı korozyondan korumak için kendini feda edecektir.	Hayır-kaplamanın altındaki klor ve su iyonları hızlı korozyon büyümesine yardımcı olacaklardır.
Kolay bükülüp katolik ve/veya engel koruyuculuğunu devam edecek mi?	Evet	Hayır-Epoksi katolik koruma veremez-imkansız
Kaplama uygulamasından sonra fabrikasyon	Evet	Evet-Epoksi kaplamayı tamir etmek gerekir.
Maliyet-kurma aşamasında baş maliyet	Kıyaslanabilir	Kıyaslanabilir
Maliyet-tüm ömür devir maliyet değerlendirilmesi-bugünkü standart	Asgari maliyet seçeneği	Daha masraflı

Temin Süresi	1-2 gün	2-3 hafta
Gereken çelik kalitesi	Siyah nervürlü çeliğe eşit	Binişmeler ve damlalar gereken çeliği siyah çelikten %5-10 yükseltir ve ilave epoksi donatının gizli maliyetidir.
Epoksiyi çelikten koparmak?	Hayır-aderans siyah çelik donatıdan %20 fazla yada eşittir.	Evet-epoksi sadece birkaç yüz pounds/sq in.lik kuvveti olan mekaniksek bir boya aderansıdır.Klor ve su iyonlarının bazı gölgelerden epoksi derisinden sızmaları kolaydır.
Konstrüksiyon hasar-karıştırıcı ve vibratörler	Hayır	Evet-Dünya çapında araştırmalar göstermiştir ki şantiye mükemmele yakında olsa karıştırıcı ve vibratör hasara yolaçacaktır. Vibrasyon ve sıkıştırma 0.5% den %3.0 e kadar hasara yol açabilecektir.
Fabrikasyon sırasında tabakalara ayrışma	Hayır-4 çinko tabakası nervürlü çeliği korur.Dış Çinko Eta tabakası hasar görmüş olsada çelikten sert olan üç çinko alaşım tabakası korumayı sağlar.	Olası-herhangi bir mikroskopik çatlak klor ve su iyonlarının girip çelik donatıya hucüm etmesini sağlayacaktır.
Rötüş edilebilme-düzeltililebilme	İsteğe bağlı-8 ve altı numaralı çelik ebatları için iyi sonuçlar rapor edilmiştir.Dünya çapı çalışmalar eğer ACI standartlarına göre tamirat yapılmışsa çok güçlü sonuçlar göstermiştir.	Evet-Şüpheli bir başarı ile yapı hasarları ve tamir bitişleri uygulaması için geniş kurallar yazılmıştır.
Şantiye ortamında kullanma ana bir problemmi?	Hayır	Evet
Kaplamada iğne delikleri denetimi	Hayır-nervürlü çelik çinko banyosuna %100 kaplama ile daldırılmıştır.Denetim kolaydır.	Evet-İğne deliklerini saptamak zordur.

4.1.6.4. Kompozit Donatı

Yapılan çalışmalara göre, donatı korunması denilince ilk akla gelen epoksi kaplama, kurallara göre kaplanıp düzgün şekilde taşınıp yerleştirilmesine rağmen klorlu çevrelerde sürekli bir performans göstermemektedir. Problem o kadar şiddetlidir ki Florida Ulaşım Departmanı (Florida Department of Transportation) toprakaltı projelerde bu tür donatıların kullanım onayını iptal etmiş. 1992 de Kanada Stratejik Karayolu Araştırma Programının yayınladığı diğer bir raporda “Epoksi kaplanmış donatı çeliğinin, klor hasarı beklendiği karayolu yapılarında başlıca koruyucu sistem olarak kullanılmaması gerektiği” sonucu çıkarılmıştır.

Diğer yaklaşımlar da denenmiştir. Paslanmaz çelik, mükemmel korozyon dayanım özelliklerine sahiptir ama yüksek maliyeti beton donatısı olarak geniş ölçekte kullanımını engellemiştir. Florida Ulaşım Departmanı, donatıya sızacak klor iyonları için gereken zamanı yükseltmek amacıyla donatı üzeri beton kalınlığının yükseltmeyi tavsiye etmiştir. Bu etkilidir ama probleme açıkça pahalı bir çözümdür. Diğer bir çözüm katodik korumadır; zorlanmış akım ve feda edilen anot teknolojisi gibi... Bu metodlar ciddi anlamda betonarme sistemin maliyet ve karmaşıklığını artırır.

Liflerle doymuş reçineden yapılmış lif takviyeli polimer(FRP), maliyet/performans boşluğunu dolduracak potansiyele sahiptir. Teoride FRP kompozitler sehim, makaslama ve basınçla karşı karşıya kalabilecek parçalar için betonda önerilmeli donatı olarak kullanılabilir.Klor iyon etki direncine tamamıyla için ilave olarak, çeliğin %25 ağırlığında 1 ½ -2 kat çekme kuvveti sunar.

Kompozitlerin mekanik ve fiziksel performanslarını muhafaza ederken, uzun dönem dayanıklılıkları gereklidir,bu da C-BAR® donatı çubuklarının oluşumuna öncelik eder. Genellikle cam lifinden yapılmış özel ve patentli metotlardan yararlanarak oluşturulmuş bu ürünlerin yüksek bazik ortamlara(pH 12-13) maruz kaldığı zaman uzun süre direnç gösterdikleri raporlanmıştır. Bu ürünler çelik donatının korozyonuna uygun maliyetli bir çözümü sağlar. [51]

C-BAR® özellikleri ve yararları

Çelik donatı ile karşılaştırıldığında C-BAR® özellikler/yararları özetle şu şekildedir:

1-Yüksek kuvvet/ağırlık oranı - ağırlık hassasiyeti olan uygulamalarda iyi takviye/donatı sağlar.

- 1-Yüksek kuvvet/ağırlık oranı - ağırlık hassasiyeti olan uygulamalarda iyi takviye/donatı sağlar.
- 2-Korosif değildir- klor iyonlarını da içeren geniş bir korosif elemanlara maruz durumlar altında paslanmaz.
- 3-İletken değildir – mükemmel elektrik ve termal izolasyon sağlar.
- 4-Mükemmel yorulma dayanımı – devirli yük durumlarında çok iyi performans gösterir.
- 5-İyi darbe dayanımı – Ani ve şiddetli nokta yüklere dayanımlıdır.
- 6-Manyetik saydamlık/şeffaflık – elektromanyetik etki alanlarından etkilenmez.
- 7-Termal yük altında boyutsal olarak kararlıdır – sıcaklık değişimlerine maruz betonda rötre yi azaltır.
- 8-Hafif ağırlık – kolayca taşıyıp monte edilir böylece sahada pahalı bir ağır taşıyıcı araca gerek kalmaz. [51]

Çeşitli Uygulamalar

- 1- Buz çözücü buzlara maruz donatılı beton: C-BAR, korozyon problemlerini otrtadan kaldırır ve yollarda, kaldırımlarda kuzey iklimlerde bakım ve onarım maliyetlerini azaltır. Uygulamalar; parkyapılarını, parapetleri, bordürleri, istinat duvarlarını ve temelleri; eğimli yollar v.s. dir.
- 2- Deniz suyu içerisinde yada yakınında inşaa edilmiş yapılar: Çelik donatının korozyonu, bu tür yerlerde genel bir problemdir.Mümkün uygulamaların örnekleri; rıhtımlar, istinat duvarı, iskeleler, dalgakıranlar, keson(su altı temel işlerinde kullanılan sandık), köprü tabliyesi, kazıklar, gemi bölmeleri(bulkheads), yüzen yapılar, kanallar, yollar, binalar, denize doğru platformlar(offshore platforms), yüzme havuzları, akvaryumlar ve diğerleridir..
- 3-Diğer korozif durumlara karşılık uygulamalar: Endüstriyel veya konut atık suları ve her çeşit kimyasal konulu endüstriler çelik donatı korozyonu için ana kaynakları oluşturur. Başlıca uygulamalar; atık su işlem yerleri(wastewater treatment plants), petrokimyasal tesisler, sıvı gaz tesisleri, fosil yakıt için petrol hatları ve tanklar, soğutma kuleleri, bacalar, değişik tipte maden çıkarma operasyonları, nükleer güç tesisleri ve nükleerboşaltım tesisleridir.
- 4-Düşük elektrik iletkenlik ve elektromanyetik nötrlük gerektiren uygulamalar: Bazı mümkün uygulamalar; alüminyum ve bakır eritme tesisleri, elektrik ve telefon

iletişim araçları için rögar, telekomünikasyon için aktarım kuleleri gibi elektronik araç destekleyen yapılar, havaalanı kontrol kuleleri, hastanelerde manyetik rezonans görüntüsü(magnetic resonance imaging), tren yolu çapraz bölümleri ve radar grlmezliği gerektiren askeri yapılarıdır.

5-Geçici olarak beton donatısı gereken tunel açma /delme uygulamaları: Uygulamalar; Maden ocak duvarları, yeraltı hızlı transit(geçiş) yapıları ve yeraltı düşey şaftlarıdır.

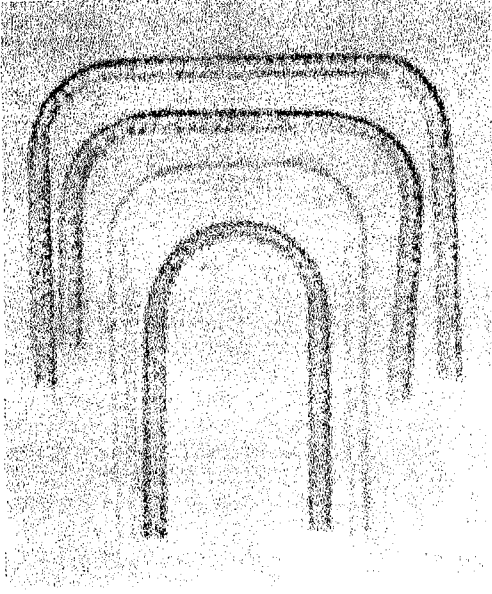
6-Ağırlığa hassas yapılar: Zayıf yük taşıma kapasitesi olan toprak durumlarında, zayıf coğrafik bölgelerde, hassas çevresel alanlarda bu tür donatılar kullanılabilir.

Tasarımlarda gözden kaçırılmaması gereken esas noktalar

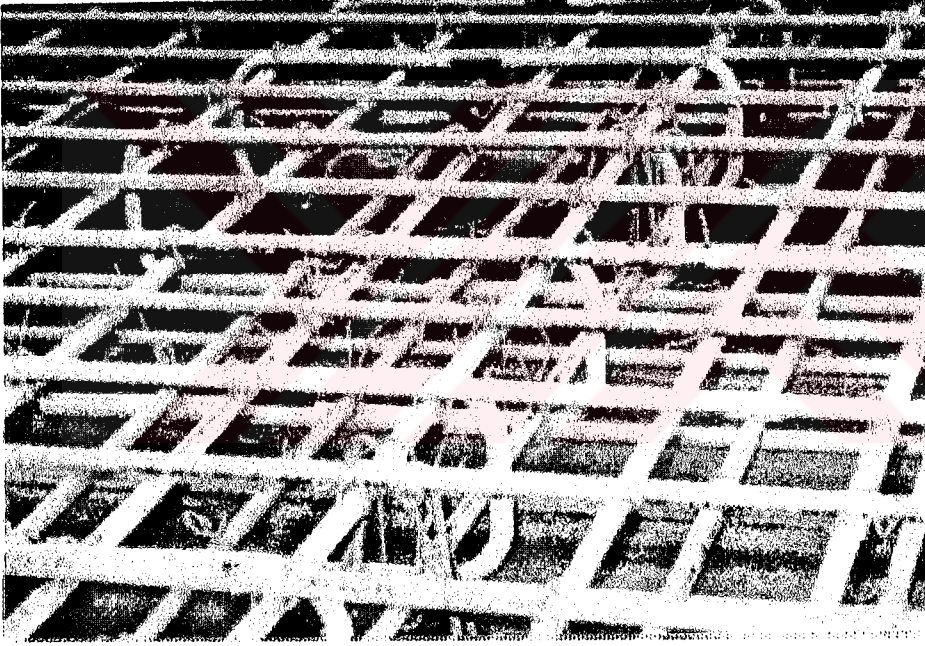
- ☐ çoğu durumlarda elik donatı ile tasarımı yapılmış bir beton elemanda direkt olarak elik donatı yerine C-Bar kullanımı mümkün değildir.
- ☐ Kompozit ubukların düşük esneklik katsayısı ve makaslama kuvveti,uygulamaları ikincil elemanların kısa mesafelerine kısıtlandıracaktır.
- ☐ Cam C-BAR donatılar, garanti edilmiş, tasarlanmış çekme mukavemetinin %252'i kadar maksimum dayanılan yüke limitlidir.
- ☐ Cam C-BAR donatı uygulamaları beton donatısıyla sınırlıdır ve öngerilmeli yada arttırılmeli bir eleman gibi kullanılamaz. [51]



şekil 4.9.(a) Kompozit donatı olarak C-BAR® rnekleri

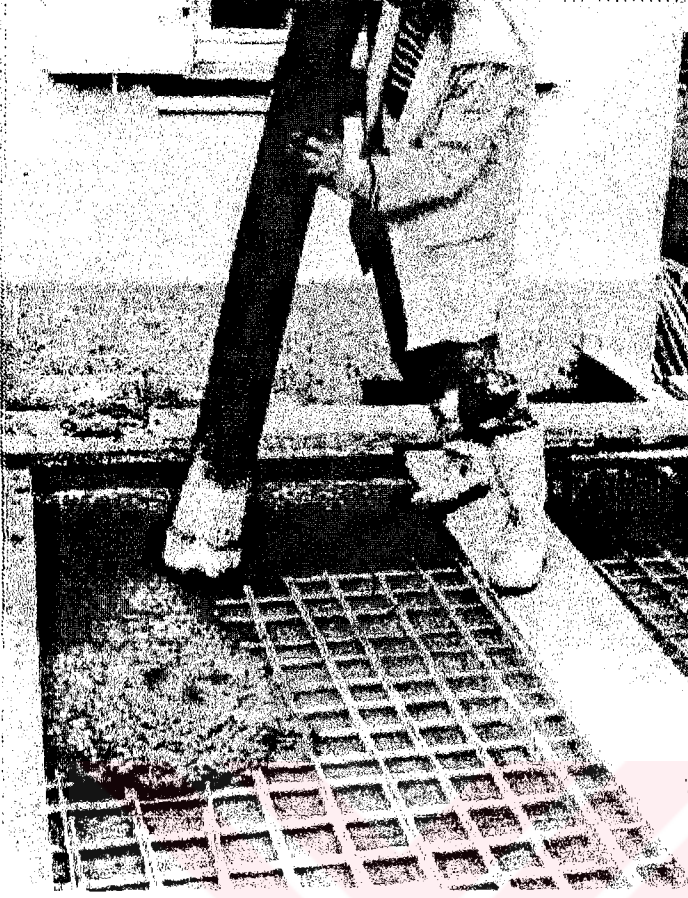


Şekil 4.9.(b) Kompozit donatı olarak C-BAR® örnekleri



a)

Şekil 4.10.(a) Kompozit donatı olarak C-BAR® uygulama örnekleri.



b)

Şekil 4.10.(b) Kompozit donatı olarak C-BAR® uygulama örnekleri.

4.1.6.5. Akrilik Lateks Sürülmüş Donatı

Beton içindeki donatıyı korozyondan korumak için kullanılan diğer bir yöntem de donatıları akrilik lateksle kaplamaktır. Genellikle beton içine katkı maddesi olarak kullanılan akrilik lateks, donatı üzerine silan gibi bir malzeme ile modifiye edilerek kaplandığında, çelik donatıların korozyon hızını büyük ölçüde düşürdüğü tespit edilmiştir. [53]

BÖLÜM 5. KOROZYON HASARI GÖRMÜŞ B.A. YAPILARDA HASAR ONARIM TEKNİKLERİ VE ONARIM PRENSİPLERİ

5.1. Yüzeysel Hasar Onarım Tekniği

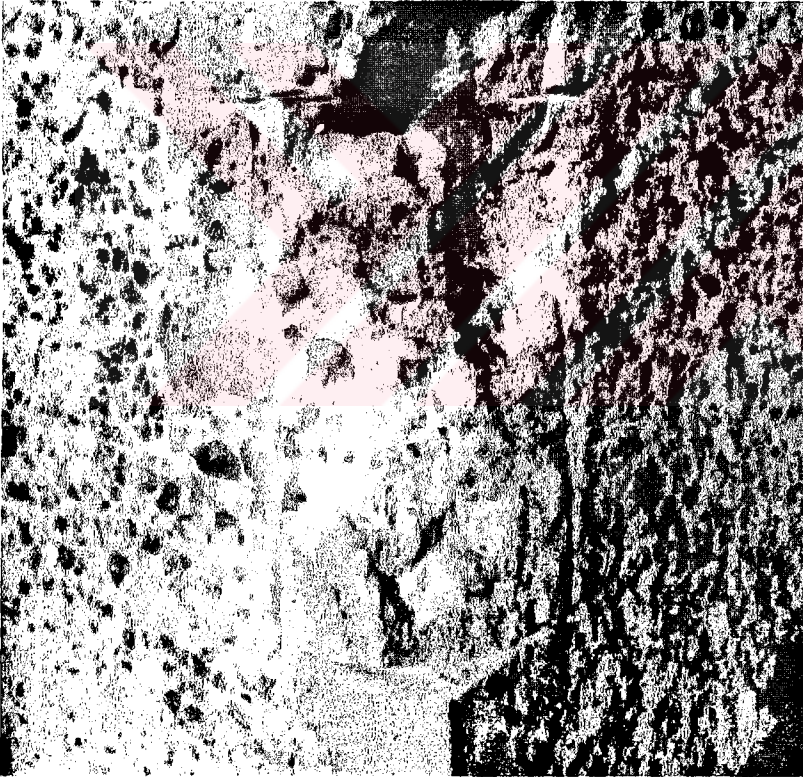
Yüzeysel hasar onarım tekniği; bozulmuş betonun çıkarılıp, gerekli onarım ve takviye işlemlerinin yapıp tekrardan yeni bir onarım malzemesiyle, hasarlı betonarme elemanı onarma şeklidir. Bu tekniğin nasıl uygulanacağı belirlenirken, öncelikle problemin kaynağına gidilmelidir. Bu işlem, tamiratın başarılı olması için bir temeldir ve en ufak eksik bir dikkatsizlik tüm yapılan işi başarısızlığa dönüştürebilir. [54]

Korozyon hasarına uğramış betonarme elemanlarda tamir işlemine başlamadan önce bozulmuş betonların ayrışması ve yüzey temizlenmesi tamirat işleminde çok önemlidir. Bozulmuş betonun tümünün sağlam strüktürden ayrışması gerekmektedir. Beton yüzeyde parça atmalar oluşmuşsa, Prof.Dr.Süheyl Akman'a göre çeliklerin çepeçevre betondan ayıklanması ve açığa çıkarılması gerekmektedir.[10 sf129] Özellikle, klor sebepli korozyon durumunda, donatı ile temas halinde bütün klorür bulaşmış beton çıkarılmalıdır. Yani paspayı tabakası ile donatıların arkalarındaki beton tabakasının ayrışması da sözkonusudur. Çünkü; ayrışacak beton miktarı yerine dökülecek yeni beton miktarının klor iyonlarına direnç sağlayabilecek miktarda olması gereklidir. Bu olay, kolon ve kirişlerin tamir esnasında ciddi yapısal zayıflığa düşmesine neden olabilir. Bu nedenle ilave destekler şarttır. Her iki yönde sıklıkla yerleşmiş donatılı döşemelerde bu operasyonun işleyebilirliği neredeyde imkansızlaşır. [21]

Karbonatlaşma sonucu hasara uğramış betonarme elemanlarda karbonatlaşmanın boyutunu ölçmek için düzenli testler yapılmalıdır. Çünkü; karbonatlaşma tüm yapı üzerinde eşit olarak oluşmaz. Bu işlem için, fenofalein sprej metodu kullanılabilir. Beton yüzey tamamen temizlendikten sonra, aşağıda belirtilen durumlarda çelik donatının arkasındaki betonun bir parmak girecek mesafeye kadar kırılması gerekir. Şekil 5.1. de yanlış gerçekleştirilmiş bir onarım örneği gösterilmektedir. Onarım

esnasında donatının arka kısmının çıkarılmamış veya korozyonun tamamen donatıdan uzaklaştırılmamıştır. Bu tür bir onarım uygulamasının ömrü çok kısadır.

- a. Açığa çıkmış donatı,
- b. Çekiçle hafifçe vurulduğunda boğuk ses çıkan alanlar (bunlar genellikle gerçek bozulmuş alanların etrafında bulunur ve problemin görünürden daha kötü olduğunu belirtir.),
- c. Paspayının 10 mm den az olduğu alanlar,
- d. Karbonatlaşma yüzünün donatı içinde 5 mm'e kadar işlediği alanlar (bu durum, en aza iki metrede bir karbonatlaşma testi gerektirir.),
- e. Petekli beton alanları (honeycombed)
- f. Yarım pil potansiyelinin -200 mV'i aştığı alanlarda (bakır/bakır sülfat).



Şekil 5.1. Karbonatlaşma etkisi ile korozyona uğramış bir betonarme kolonun hatalı onarımı.

Klor sebepli korozyon hasarlarında daha çok belirli alanlar hasara uğrar ve çukurcuk korozyonu ile sonuçlanır. Bu olay, çelik yüzeyde derin çukurlara yol açıp zararlı bir boyuta ulaşabilir. Hasar görmüş ve parçalanmış beton yüzeyler dahil tüm klor bulaşmış alanlar kaldırılmalıdır. Aksi taktirde Bölüm 5.1.4. de anlatılacak olan”başlangıç halindeki anot (incipient anode)” riski oluşabilir. [54]

Çatlaklar oluşmuşsa, bunların çok iyi teşhis edilmesi ve onarılması gerekmektedir. Orta ağırlıklı bir çekiç yardımıyla bu çatlakların yakın bölgesinin kendi zeminine ne kadar bağlanmış olduğuna veya olmadığına karar vermek gerekmektedir. Zayıf noktalar kesinlikle uzaklaştırılmalıdır.

Çıkan betonun yerine konulacak yeni beton veya harçlar genelde tekrar çimento esaslı karışımlar, reçine bazlı harçlar, magnezyum fosfat türü çimentolar, lifli betonlar ve lateksle modifiye edilmiş betonlardır. Beton onarımı için bir madde seçerken asıl önemle düşünülmesi gereken nokta, mevcut sistemle uyuşması ve performans ihtiyaçlarıdır. [14]

5.1.1. Altyapı Hazırlanması

Hasar görmüş betonarme elemanların tamir işlemi, birçok aşamadan sonra yapılmaktadır. Öncelikle hasar görmüş betonların çıkarılması, gerekirse donatı hazırlanması ve geri kalan beton yüzeyinin temizlenmesi gerekir.

5.1.1.1. Hasarlı Beton Kısımların Sağlam Betondan Ayrıştırılması

Bir betonarme elemanda, hasarlı kısımların çıkarılma işlemi için birçok teknik mevcuttur. Bu teknikler arasında seçim yaparken, geri kalan strüktüre ve hasarlı kısım donatıya kadar iniyorsa, donatıya zarar vermeyecek tekniklerin seçilmesi esastır. Öteyandan, hangi tekniğin kullanılacağına karar verirken ekonomi de gözönüne alınmalıdır.

Beton ayırma tekniklerini 5 gruba ayırabiliriz.

1. Püskürtme teknikleri,
2. Kesme teknikleri,
3. Darbe teknikleri,
4. Önceden yarma teknikleri,

kumlardır. Bu teknikle oluşan tozu önlemek amacıyla sulu kum püskürtme denilen bir teknikte geliştirilmiştir. [14 sf171]

Kesme metotları olarak da elmas testeresi, pnömatik delici veya çekiç gibi noktasal aletler kullanılır. Bu teknik, büyük agrega bileşenleri etrafında hiç bir hasar yaratmadan kesme işlemini yapmak için idealdir. Bu teknikte enerji, aletin küçük nokta alanında sınırlandırılır. İşlem yavaş sürer fakat; düşey ve yatay yüzeylerde hasarlı beton kısmının kontrollü şekilde etrafa zarar vermeden çıkarılması için ideal bir tekniktir.[10,14,55] Yüksek basınçlı su da kesme metotları içinde sayılabilir.

Beton yüzeyine tekrar eden darbeler uygulayan ve böylece hasarlı betonun kopmasına ve ayrılmasına yol açan mekanik aletler, darbe teknikleri olarak geçer. Yaygın olarak kullanılan teknikler elle kullanılan ve tekerlekli beton kırıcılarıdır. Havalı kırıcı (jackhammer), beton kırıcı olarak bilinen ve kullanılan en yaygın alettir. Fakat düşük üretim hızı ile büyük hacimli betonların çıkarılması için uygun değildir. Tekerlekli kırıcılar da havalı kırıcı ile aynı hareketi yapan fakat yüksek üretim hızına sahip aletlerdir.[55] Fakat; bu teknikte, yüksel devirli darbeler sonucu sağlam betonun zarar görme olasılığı yüksek gibi görülmektedir. Bu tür bir olasılık da yapı bütünlüğü için bir risk teşkil eder.

Önceden yarma işleminde hidrolik yarıcılar, su darbe cihazları veya patlayıcı parçalar kullanarak yüksek hacimli beton parçaların ayrılmasında kullanılır. Son olarak betonun kapak atmasını sağlayan tekniklerde de yüksek çekme stresleri oluşturulup ufalanmış beton sağlam kütleden çıkarılır. Betonda hasarlı küçük yüzeysel parçaları ayrıştırmak için daha uygun bir tekniktir. [55]

Sonuç olarak; kesme teknikleri ve kum püskürtme teknikleri, kolon ve kirişlerdeki büyük ölçekli olmayan hasarlı betonların ayrıştırılması için ideal çözümler olarak görülmektedir. Betonun kapak atmasını sağlayan teknikler de yüzeysel fakat küçük hacimli beton ayrışımı için en doğru çözüm olmaktadır. Darbe tekniklerinde geride kalan sağlam betonun darbelerden etkilenme riski çok fazladır. Büyük hacimli hasarlı betonun çıkarılması için önceden yarma metodu uygun gözükmemektedir. Fakat bu teknikte kaçınılmaz ikinci bir aşama olan parçaların ayrılıp taşınması, ilave bir maliyet olarak görülmektedir.

5.1.1.2. Yüzey Temizlenmesi

Hasar görmüş bir beton eleman üzerine tamir işlemine başlarken, yüzey hazırlanması çok önemli ve sonuçtaki performansı bire bir etkileyebilecek bir işlemdir. Yüzey

Sonuç olarak; kesme teknikleri ve kum püskürtme teknikleri, kolon ve kirişlerdeki büyük ölçekli olmayan hasarlı betonların ayrıştırılması için ideal çözümler olarak görülmektedir. Betonun kapak atmasını sağlayan teknikler de yüzeysel fakat küçük hacimli beton ayrışımı için en doğru çözümler olmaktadır. Darbe tekniklerinde geride kalan sağlam betonun darbelerden etkilenme riski çok fazladır. Büyük hacimli hasarlı betonun çıkarılması için öncedenyarma metodu uygun gözlmektedir. Fakat bu teknikte kaçınılmaz ikinci bir aşama olan parçaların ayrılıp taşınması, ilave bir maliyet olarak görülmektedir.

5.1.1.2. Yüzey Temizlenmesi

Hasar görmüş bir beton eleman üzerine tamir işlemine başlarken, yüzey hazırlanması çok önemli ve sonuçtaki performansı bire bir etkileyebilecek bir işlemdir. Yüzey hazırlanmasının amacı; kuru, toz, yağ ve kimyevi maddelerden arınmış, tamirat için düzgünce uygun bir yüzey hazırlamaktır.

Yüzey hazırlama, genelde yaygın olarak kullanılan teknikler aşağıda yer almaktadır.

1. Kimyasal Temizleme → Yağ ve kire karşı iyi bir metottur. Bu işlem için deterjanlar, trisodyumsülfat ve çeşitli özel beton temizleyicileri uygundur. Yüzey olarak temizlenir ve su ile durulanır. [55]
2. Mekanik Temizleme → Bu işlem için iki çeşit mekanik alet uygundur. Birincisi dönen disklerle ve öğütücüye sahip aletlerdir. Bunlar sert, yoğun beton üzerine çok etkili değildir. İkinci çeşit de, vurmali aletlerdir. Dişengi, iğne uçlu tabanca gibi.. Beton yüzeyinde birkaç mm'lik yüzeyin kaldırılması için uygundur.[55] Ayrıca mekanik yöntemle çalışan tel fırçalama sistemi il de beton yüzeyi temizlenebilir. [10]
3. Püskürtmeli Temizleme →
 - i. Islak ve kuru kum püskürtme → Yüzey temizlenmesinde en yaygın kullanılan tekniklerden biri kum pskrtmedir. Fakat bu teknikte kuru kum kullanıldığı takdirde yüzeyde tekrardan kum kırıntıları ve toz oluşacaktır. Bu nedenle ikinci bir aşama olan su ile temizleme şarttır. Son zamanlarda ıslak kum püskürtme tekniğı kullanılarak bu sorun giderilmeye çalışılmıştır.[21,55] Diğer alternatif bir çözüml de;

püskürtme ağzın etrafına bir vakum aparatı takarak yüzeydeki tozların hemen vakumlanmasıdır. [55]

- ii. Aşındırıcı püskürtme → Yüzeysel 3 mm'lik derinliğe kadar temizleme sağlar. Maden kırıntıları püskürterek perdahlama yapar.[55] Bu sistem, kum püskürtme tekniği gibi yüzeyde kalan toz ve maden kırıntılarından kurtulmak için vakumlu bir sistem olarak geliştirilmiştir. Pnömatik olarak işleyen vakum, toz ve maden kırıntılarını yüzeyden toplayıp filtreden geçirip işeyarak maden kırıntılarını tekrardan operasyona sokarak hem sürekli, işleyen hem de kendi içinde maliyet dengesi oluşturan bir sistem yaratır. Sonuçta; tamir için düzgün ve kuru bir yüzey elde edilir. Bu sistemlere çoğu kaynakta; tozsuz püskürtmeli sistemler denir. [14]
- iii. Su püskürtme → Yüzey hazırlamada son adım olarak çok etkili olur. Özellikle köprü ve park yapılarında 50-75 mm arası derinliklere kadar temizleme sağlar. Yüksek basınçlı su ile temizleme tek başına ya da aşındırıcı ince çakıllarla karıştırılarak uygulanır. Bu şekilde yüzeydeki bozulmuş beton tabaka aşınarak kalkar ve suyla da uzaklaştırılır. Su püskürtmeli temizlemenin en büyük avantajı yüzeyde toz bırakmamak, gürültüyü minimum düzeye indirmektir.[55] Bazı koşullarda, yüksek basınçlı su püskürtmenin sağlam betona zarar verebileceği ve zedeleyebileceği düşünülür. Fakat; doğru şekilde uygulandığı takdirde bu riskin ortadan kalkacağı öngörülmektedir. [14]

Buraya kadar anlatılan teknikler; yaygın olarak kullanılan ve hasarlı beton parçaların çıkarılmasından arta kalan yüzeyin temizlenmesi ve tamirat için düzgün hale dönüştürülmesi için ideal tekniklerdir. Fakat; zaman zaman yüzey hazırlama teknikleri arasında gösterilen asitle aşındırma ve alevle temizleme teknikleri sağlam beton yapısına zarar verebilecek riskli işlemler olarak görülüyor. ACI Committee 515, asitle temizleme tekniğinin ancak başka alternatif bir metodun uygulanamayacak olması durumunda kullanılması gerektiğini tavsiye etmektedir. Alevle temizleme işlemi de özel çokalevli oksiasetilenin beton yüzeye üniform bir hızda yaklaşık 3100°C sıcaklıkta

uygulanması ile oluştuğundan bu derece yüksek bir sıcaklığın beton yapıya zarar verebileceğİ riski gözardı edilmemelidir.

5.1.1.3. Donatı Yüzeyinin Hazırlanması

Çelik donatı etrafında bozulmuş beton, hafif bir delici çekiç yardımıyla temizlenir ve böylece hasarlı alan etrafındaki sağlam betonun hasarı önlenmiş olur. Ayrıca; bu temizleme esnasında, donatı çeliğine zarar vermek için büyük bir özen harcanmalıdır. Bu nedenle; donatının yerini tespit etmek için betonarme projesi üzerinde çalışılmalı ve çeliğın beton içinde ne kadar derinlikte olduğunu tespit etmek için bir paçometre kullanılmalıdır. Büyük parçalar halinde hasarlı beton çıkarılacağı zaman donatı aralarının beton parçalarından temizlenmesi için daha küçük bir yontucu çekiç kullanılmalıdır. Su püskürtme tekniğı de donatı etrafındaki betonun çıkarılması için kullanılabilir. [55]

Bütün sağlam olmayan betonlar çıkarıldıktan sonra donatı çubukları tam olarak açığa çıkmazlarsa, çelik çubukları açığa çıkarmak için ilave beton çıkarılması gerekli değildir. Bazı kaynaklarda öngörülen teknik, bozulmuş betonların temizlenmesinde çubuk çevresinin yarısından fazlası açığa çıkmışsa, donatı arkasında 1 ¼ in.lik yani 6.25 mm lik temiz bir yüzey ve maksimum boyutta agrega bulunana kadar temizleme işlemi devam etmesi, eğer beton çıkarılması esnasında bir çubuk çevresinin yarıdan azı açığa çıkmışsa, çubuk kontrol edimelli gerektiğinde temizlenmeli ve tamiratlar daha fazla beton çıkarılması ile sürdürölmesidir.[55] Yine de; eğer kontrol bir çubuğun yada çubukların değıştirilmesi gerektiğini belirtiyorsa, donatıyı açığa çıkarmak için beton çıkarılmalıdır. Hasarlı betonların ayrıştırılma aşamasından sonra donatı açığa çıkmışsa, donatı kontrol edilmeli, gereken yerlerde mevcut donatı yeni donatıyla kaynakla bağlanmalı veya filiz ekilmelidir.[21]

Çelik çubukların değıştirilmesi gerekmiyorsa çelik çubuklar, pastan ve tozdan ve yabancı maddelerden iyice temizlenmeli ve yeni beton bu aşamalardan sonra dökölmalıdır. Sınırlı alanlar için, tel fırça ile temizleme veya diğér elle temizleme metotları kabul edilebilir. Daha büyük alanlar için aşındırıcı püskürtme tercih edilir. Çelik donatının temizlenmesi için diğér bir alternatif metot da tazyikli su ile temizlemektir. Fakat bu metotla temizlenmiş çelikte korozyonu başlatmak için gerekli

oksijen ve su sağlanabilir. Temizlenmiş donatı ile yeni dökülecek beton arasındaki zamanda donatı paslanma potansiyeli, çeliği kaplayarak azaltılabilir. Bazı bir çimento şerbeti veya bir epoksi kaplaması çelik üzerine fırça ile sürülebilir ve yeni beton dökülene kadar paslanma engellenebilir. (Ek B)

5.1.2. Yüzeysel Hasar Onarımında Kullanılan Harç ve Betonlar

5.1.2.1. Çimento Esaslı Malzemeler

Portland çimentolu beton veya harçlar, onarımlar için yaygın kullanılan ve iyi sonuç veren malzemelerdir. Fakat; rötre olayının hafifletilmiş olması şarttır. Mümkün olabilecek en düşük su ile yapılmış karışımlarda bu olay minimum dereceye iner. Zorunlu koşullarda da yeterli düşük su/çimento oranını yakalamak için süperakışkanlaştırıcı ve su-indirgeyici malzemelerin kullanılması zorunlu olur.[14] Ayrıca; daha yoğun, sızdırmaz ve mukavemetli betonun elde edilmesi için priz geciktiriciler, çabuk tıkama hallerinde priz hızlandırıcılar ve genişleyen harçlar kullanılabilir.

Yüzey temizleme işlemi sonrasında bazı uygulayıcılar, temizlenmiş yüzeye bağlayıcı bir tabaka (bonding agent) sürülmesini tavsiye eder. Kum/çimento, çimento-lateks şerbetleri veya epoksi maddeler bağlayıcı maddeler olarak kullanılırlar. Fakat şüphesiz bunlar içinde en yaygın olarak kullanılan epoksi bağlayıcılardır. Bağlayıcı madde sürülmüş yüzeye ilk onarım tabakası, yüzey hala ıslakken hemen uygulanır. Eğer bağlayıcı maddenin kuruması beklenirse düşük bir bağ kuvveti oluşur. Çoğu yerde, çimento esaslı beton veya harçla onarım yapılırken sürülen her katman bir sonraki katman dökülmeden önce bir yada iki gün boyunca nemli tutulur. [55]

Yüzeysel hasar durumlarında püskürtme beton yada püskürtme harç da kullanılır. Bu tekniği gerektiren durumlar, genelde donatının paspayı betonunu patlatması durumundaki hasarlardır. Fakat; püskürtme betonun bazı sakıncaları vardır. Öncelikle malzeme boşluklu olur ve normal betondan daha çok rötre yapar. Üretilen beton altında cepler, boşluklar saklanabilir.[10] Yapısal değeri ve bitmiş yüzey dokusu, büyük ölçüde işçilerin becerileriyle orantılı olduğu için sadece kalifiye işçiler tarafından uygulanması gerekir.

Bütün bu dezavantajların yanında püskürtme betonun önemli avantajları da vardır. Daha düşük su/çimento oranı gereklidir. Uygulama tekniği sonucunda, daha yüksek basınç dayanımlı ve yoğun yerleşmiş bir beton elde edilir. Ayrıca; gene yerleştirme metodu ile elde edilen yoğunluk ve karışımın sertliği, kalıp kullanmadan çoğu şekli oluşturmayı mümkün kılar. [56]

5.2.1.2. Reçine Bazlı Harçlar

Reçine bazlı maddelerden en yaygın olarak kullanılan epoksi reçinelerdir. Bu maddeler genellikle iki veya daha fazla bileşenin birarada kullanılması ile oluşur. Hızlı bir kür zamanı ve kuvvetli bir aderans istendiğinde, epoksi reçineler tercih edilmesi gereken maddelerdir. Epoksi uygulamasından önce, yüzey hazırlığı tamamlanmış betonda özel bir reçine uygulaması yapılır. Genelde tek tabaka olarak sürülen primer, yüzey pürüzlülüğü durumunda iki tabakaya kadar çıkabilir ve esas önemli olan onarım malzemesinin, yüzeye sürülen primer hala cıvık halde iken uygulamasıdır.[57] Epoksi formülasyonların termal genleşme katsayıları, betonunkinden farklıdır. Bu nedenle; eğer beton ile birlikte epoksi kullanılacaksa istenen sonuca ulaşmak için mümkün olan en küçük ve en ince parçalar halinde kullanılması gereklidir. Genelde söylenen; 1/4 in. veya maksimum 3/8 in. kalınlıktan fazla epoksi yada epoksi harçlarının kullanılmamasıdır. [14]

Reçine bazlı malzemeler, donatı için bazik bir ortam sağlayamazlar. Fakat oksijeni, nemi ve diğer korozif etkenleri dışlayarak donatıyı korozyona karşı korurlar. Prof.Dr.Süheyl Akman'ın "Yapı Hasarları ve Onarım İlkeleri" kitabında da anlattığı üzere; reçine betonların agregalarının çok temiz ve sert olması şarttır. Genellikle kesikli granülometri istenir, böylece daha az bağlayıcı kullanılmış olur. Karışımında diğer bir husus da; reçine kompazanları karıştırdıktan sonra agregaların karışıma katılmasıdır. Sertleşme zamanı sıcaklık uygulayarak hızlandırılabilir. Ayrıca diğer önemli bir gerçek de, reçine betonlarının düşük sıcaklıklarda kırılganlaştığı yani dış şartların malzeme performansına birebir etkidiğidir. Aynı durum, yüksek sıcaklıklar içinde geçerlidir. Bir yapı sıcaklığa karşı dirençli olmalıysa, reçine ile onarım yapılmasında sakıncalı olur. [10]

Çoğu epoksiler, hava ve gazı karşı geçirimsizdirler, bu nedenle betonu nefes almasını uygulamalarda kullanılmalarından kaçınılmalıdır. Epoksiler çoğu zaman, yeni beton ile eski beton arasında bağlayıcı bir madde olarak da kullanılır. [14,57]

Bir yapıştırıcı olarak epoksi şüphesiz çoğu kaynağa göre en güçlü bağlayıcı maddedir. Ayrıca, aşınmaya ve kimyasal etkilere karşı oldukça dirençlidir. Bu özelliklerinden dolayı gerekli yerlerde yüzey kaplaması olarak yada kumla karışıp harç şeklinde üst beton kaplaması olarak kullanılabilir.

Diğer reçine bazlı maddeler, epoksiye çok benzeyen fakat yüksek rötreye maruz kalan polyesterlerdir. Ayrıca, epoksinin gösterdiği kadar bağlayıcı özelliği göstermezler. Beton ile karşılaştırılınca kimyasal etkilere karşı daha dirençlidirler fakat bu değer epoksi derecesine ulaşmaz. Yine de; polyesterler az problemli ve kolay uygulanabilen maddelerdir.

Üretanlar, kaplama malzemesi, elastomerler, kimyasal derz doğu harçları ve köpükler olarak formüle edilebilen reçineli maddelerdir. Kaplama maddesi olarak üretanlar aşınmaya ve kimyasal etkilere oldukça dayanıklıdır. Elastomerler olarak; yüksek kaliteli mastik ve membranları sağlar. Üretan kimyasal derz dolgu harçları, beton çatlaklarına veya gözeneklerine doğru su sızıntısını durduracak en iyi maddelerdir. Ve köpük olarak izolasyon maddelerini oluştururlar.

Üretanlar tek komponentli ya da çift komponentli olarak uygulanırlar. Tek komponentli üretanlar, atmosfer nemimi alarak zamanla kürlenir. Çift komponentli üretanlar ise her iki bileşenin birbiri ile kimyasal reaksiyonu sonucu kürlenirler. Büyük kütlelerde, kalın katmanlarda, yada nemin çok yüksek ya da çok düşük olduğu koşullarda çift komponentli sistemler tercih edilir. [14]

5.2.1.3. Magnezyum Fosfat Betonu

Magnezyum fosfat betonu, basitçe kağıt torbalarda temin edilebilen magnezyum fosfat karışımının su ile karışımından elde edilir. Çok hızlı kürlenir ve bir saatte 2000 psi lik bir mukavemete ulaşabilir. Boyutsal olarak stabildir, yüksek bağlanma kuvvetine sahiptir, bu nedenle bağlayıcı bir madde yada primer gerektirmez.[14,57] Madde, yüzeyi yeteri kadar ıslatır ve güçlü bir bağ oluşturur. Islak küre ihtiyaç duymaz. Bu

özelliklerinden dolayı özellikle, yüksek trafikli alanlarda acil onarım için en iyi maddelerden biridir. [14]

5.2.1.4. Lif Katkılı Betonlar

Çimentolu karışıma çelik veya plastik esashı lifler katılarak, çatlamaya ve geniş rötreye karşı dirençli bir onarım betonu oluşturulabilir. Lif ilavesi ayrıca betona kırılma olmadan deforme olabilme yeteneğini sağlar ve birleşimin direncini pekiştirir. [14]

Lifli betonların yararları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Plastik çatlamayı azaltır.
2. Plastik oturma çatlamasını minimuma indirir.
3. Yangın dayanımı sağlar.
4. Kuruyan ve engellenmiş rötre çatlamasını azaltır. [58]
5. Korozyona karşı yüksek direnç gösterir.

Tamir betonunda lifli çimento kullanımı, korozyon direnci için doğru bir çözüm olabilir. Genellikle uygulamalarda kaplanmamış çelik teller kullanılır. Bu teller ve beton mükemmel birleşirler. Tek olumsuz etki, beton yüzeylerde kırmızı lekelerle sebep olmalarıdır. Özel durumlarda; aşırı paslanmaya müsait ortamlarda galvanizli teller tavsiye edilir. Isıya dayanımlı betonlarda ise, paslanmaz çelik teller kullanılır. [59]

5.2.1.5. Lateksle Modifiye Edilmiş Beton

Lateksle modifiye edilmiş çimentolu kompozisyonlar, normal beton veya harca benzerler fakat, ayrı olarak gereken suyun lateks bir çözelti ile yer değiştirdiği bir kısma sahiptir. Bağlı neme bağlı olarak 15-20 dak. arasında çok hızlı karışım, yerleştirme ve bitiş gereklidir. Bu nedenle; büyük hacimler için, özel karışım ve yerleştirme ekipmanları gereklidir.[14] Lateksle modifiye edilmiş harç ve betonların karışıma hava girişini sağlama eğilimleri vardır. Bu nedenle; karışıma giren havayı azaltmak için yavaş bir mikserle yada elle karıştırılmaları zaman zaman tavsiye edilir. [57]

Çimento, kum, bazen katkılar ve lateks sütünün karışımı ile elde edilen lateksle modifiye edilmiş harçlara büyük onarımlarda çakıl veya diğer büyük agregalar da ilave edilebilir. [14]

Korozyon hasarına uğramış köprülerde koruyucu beton katman olarak yaygın olarak kullanılan lateksle modifiye edilmiş beton, özellikle klorür etkisinin yoğun olduğu deniz yapılarında da iyi sonuçlar verir.[60] Bu tür betonlarda, lateks katkısı kullanarak su içeriği minimuma indirilip böylece rötre ve bağlayıcılık problemleri büyük ölçüde azalmış olmaktadır.

Lateks maddesi, sadece birgünlük ıslak kürleme gerektirir ve düz betona oranla su sızıntısına, kimyasal etkiye ve aşınma hasarlarına karşı daha dayanıklıdır.[14] Ayrıca; betona özellikle akrilik lateks ilavesi, çelik üzerindeki pasif tabakanın kırılmasına engel olduğu anlaşılmıştır. [57]

Lateksle modifiye edilmiş betonu tüm bu özellikleri ve avantajları yanısıra normal betona karşı oldukça maliyetli olduğu gözardı edilmemelidir. Bu yüzden özellikle köprülerde kaplama uygulaması (overlay) yapılırken öncelikle hızlandırılmış bir korozyon pili uygulaması yapmak ve bu doğrultuda optimum beton kalınlığını tespit etmek hem maliyetli bir çözüm olacak ve fazla ölü yükün oluşmasına engel olacaktır.

5.1.3. Donatı Takviyesi

Betonda oluşan korozyon tahribatı nedeniyle, bazen donatı ilavesi gereklidir. Genelde kullanılan metot, yeni donatıyı eski donatı ile kaynaklamak veya betonda oyuklar açıp yeni çubukları derz dolgu macunu ile oyuklar içine yerleştirmektir. [21]

Durateks firması, beton içine filizleme işlemi için GSM 509 kodlu ankraj macununun piyasaya sürmektedir. Solventsiz, epoksi reçine içeren iki komponentli bir sistem olan GSM 509 kısa sürede sertleşerek betona çok iyi bir aderans sağlamaktadır. Bu malzeme ile ilgili bazı teknik özellikler, Tablo 5.1. de yer almaktadır.

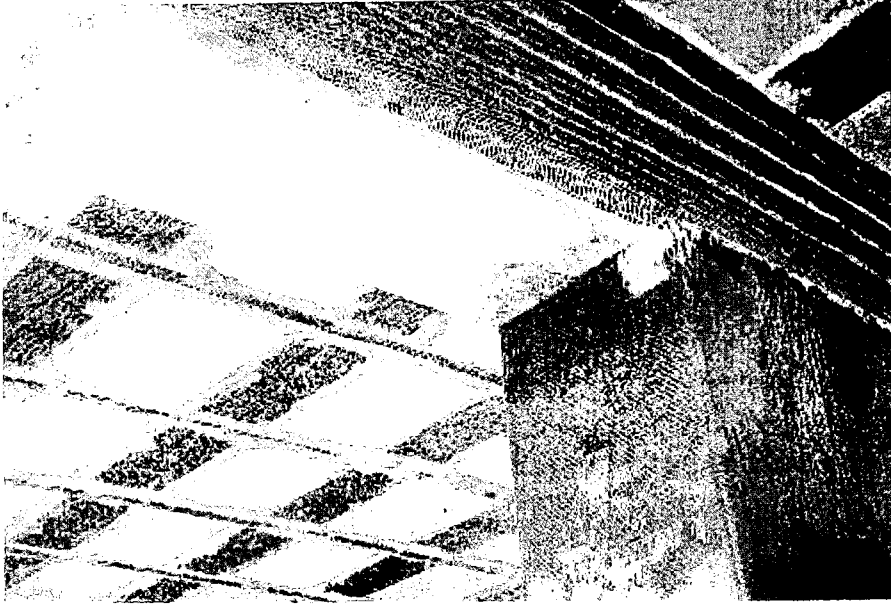
Tablo 5.1. GSM 509 Ankraj macununun teknik özellikleri.

KOMPONENT SAYISI	3
KARIŞIM ORANI	A/B/C : 25/25/50 (ağırlıkça)
YOĞUNLUK (20°Cc, 500g)	1.80 ± 0.10
POT-LIFE (karışım ömrü)	15-20 dakika
KURUMA SÜRESİ (20°C)	
Toz tutma 120 mikron, camda	Yaklaşık 40 dakika
Dokunma “ “ “	Yaklaşık 4 saat
Tam Sertleşme “ “	Yaklaşık 1 hafta
KAPLAMA ALANI	Tek katta 1 mm kalınlık elde etmek için asgari 1800 g/m ² kullanılmalıdır. Bu miktar A + B+ C nin tamamının karıştırılması halinde geçerlidir.

Kaynak özellikle donatı tor çeliği olduğu takdirde yapılamaz. Kaynak ileride korozyona zemin oluşturacağı için de sakınılmalıdır. Böyle durumlarda Duratek'in önerdiği metot, iki ucdan gelen donatıyı birbiri üzerine 30-40 cm bindirmek, telle gevşek bağlamak ve bu şekilde donatıları Duratek'in beton yapıştırıcı macunu olan GSM 510 ile yapıştırmaktır.

Onarım görmüş betonların donatı ilavesi dışında başka metotlarla da güçlendirilmesi mümkündür. Kolon ve kirişlerin karbon elyafı ile güçlendirilmesi, örgü şeklinde karbon elyaf bandının epoksi yapıştırıcı ile çatlakları tamir edilmiş ve enjeksiyonu tamamlanmış beton kiriş ve kolonlara yapıştırılmasıdır. Fakat; bu uygulama yapılmadan önce Duratek firması beton kiriş ve kolonların önce AV 32 beton emprenye reçinesiyle 100-150 g/m² sarfiyatla emprenye edilmesini böylece yüzeyin sağlamlaşmasını ve beton ile karbon elyaf arasında bir yapışma köprüsü kurulmasını öngörür.(şekil 5.2.)

Şekil 5.2. de karbon elyaf uygulaması görülmektedir.



Şekil 5.2. Bir beton elemanın karbon elyaf kullanarak güçlendirilmesi.

Burda yapılan işlem, beton elemanın dıştan karbon elyaf örgüyle takviye edilmesidir. Bunun için karbon elyaf örgü, beton üzerine lamine edilmeyip, yapıştırılır. Karbon elyafı çeliğin çekme kuvvetleri;

Çelik 9500 kg/cm²

Karbon elyaf 55000 kg/cm² 'dir. [61]

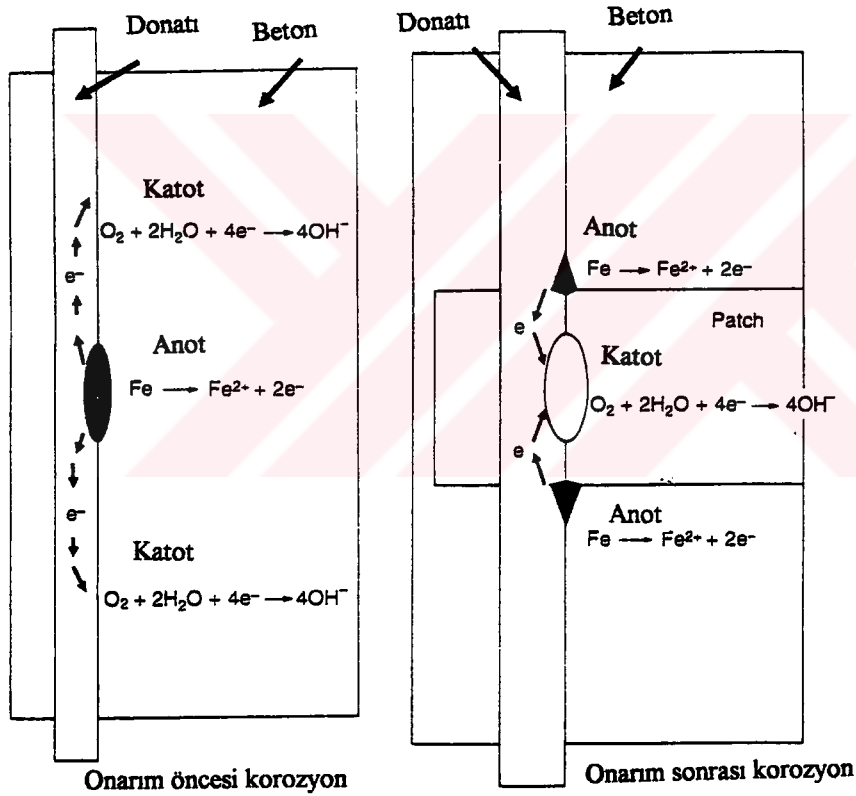
5.1.4. Yüzeysel Hasar Onarımı Görmüş Betonarme Elemanlarda Korozyon Riski

Betonarme bir kiriş, kolon veya döşeme üzerinde oluşan korozyon hasarları genellikle “yüzeysel hasar onarım” metodu ile tamir edilir. Hasarlı beton parçaların sağlam yapıdan koparılıp yerine tekrar bir harç veya çimento esaslı bir karışım doldurulması şeklinde olan yüzeysel hasar onarım metodunda, yapılan gözlemler ve deneyler özellikle klorür etkisi ile oluşan korozyon hasarlarında tam bir çözüm olmadığı, onarım olduktan bir süre sonra tekrardan korozyon riski ile karşı karşıya kalacağı göstermişlerdir.

Geniş klorür etkisinde olan bir yapı, yüzeysel hasar onarım tekniği ile onarılsa, korozyona uğramış alanları tamir etmek başka yerde korozyonu hızlandırabilir. Anodik reaksiyon durduğu zaman katotta hidroksil iyonların oluşması da engellenmiş olur. Böylece, korozyondan korunmuş alanlar kritik Cl/OH⁻ oranını aşacak ve korozyon genellikle yama çevresinde başlayacaktır. Çünkü, korunmuş bu alanlar tamir olmuş anot

tarafından katota dönüştürülmüştür. Bu başlangıç halinde anot (incipient anode) problemi, ancak elektrokimyasal rehabilitasyon teknikleri ile önlenabilir. (Şekil 5.3.) [16]

Basit bir ifadeyle, tamir edilmiş beton galvanik hareketlerin yükselmesini mümkün kılan “tamir edilmiş” ve “tamir edilmemiş” kısımlara sahiptir. Sıradan bir çelik donatı üzerinde bile oksijen, pH ve çelik donatı üzerinde mikroskobik yüzey farklılıkları galvanik korozyonun oluşmasına yardım eder. Tamir olmuş betonda çelik donatı, üzerinde aynı anda iki farklı ortam, mikroskobik ve makroskobik yüzey farklılıkları taşıyacağından galvanik korozyon daha sert oluşur. Betonarme yapıların onarımları için bir dizi rehber bulunsada, bazı durumlarda onarım şekli ve içeriği öznelidir. [62]



Şekil 5.3. Yüzeysel hasar onarımı sonrası “başlangıç anotların/incipient anode” oluşumu.

Bazı uygulayıcılar, bu problemi azaltmak için donatı üzerine koruyucu olarak çinko epoksi kaplama(zinc rich epoxy coating) kullanmaktadır. Fakat bu çözümün etkisi de çinko kendini feda edip bitene kadar sürer. Diğer kullanılan bir sistem de donatı üzerine

feda edici bir anot bağlamaktır. Labaratuvar testlerinde çok etkili olarak kabul edilmesine rağmen bu sistemin gerçek saha koşullarında etkisi belli değildir. [50]

Tekساس Üniversitesi, Mekanik Mühendisliği Bölümünde “assistant professor” görevini yapan Hanovel G.Wheat’ın “Tamir görmüş betonarme örneklerinde korozyon hız gözlemi” adlı deneyinde, onarım görmüş betonarme numuneler %3.5 NaCl çözeltisi içinde 1 hafta tutulmuş ve ıslanma/kuruma tekrarlarına maruz bırakılmıştır. Bu sert koşullar, tamir görmüş alana komşu yerlerde galvanik korozyonu başlatmış ve sonuç olarak, yama etrafındaki bölgelerde pas lekeleri ve tabakalaşmanın ortaya çıktığı gözlenmiştir.

Yüzeysel hasar onarım tekniği ile korozyon tamiri, karbonatlaşma için daha etkilidir. Çünkü, karbonatlaşmış betonda bazikliği tekrar sağlamak, korozyonu durdurmak için gerekli tek şeydir ve bir anti- karbonatlaşma tabakası, CO₂ göçünü yavaşlatacaktır. Klorlar için yüzeysel hasar onarım tekniği, klorür girişi lokal ve klorürler tamamen ortadan kalkabilecekse etkili olur. Hasarlı bölgeleri sadece onarmak, kısa vadede rahatlatıcı bir rehabilitasyondur. [59]

5.4. Betonarme Elemanlarda İnhibitör Kullanılması

5.4.1. Betonda Katkı Maddesi Olarak Kullanılan İnhibitörler

İnhibitörler, betona ufak konsantrasyonlarda katıldığı zaman beton içine gömülü çeliğin çevre ile reaksiyonunu kontrol eden, azaltan veya önleyen kimyasal bileşiklerdir. İnhibitörler, kimyasal reaksiyonların kinetiğine ve/veya termodinamiğine etkir, korozyon hızını düşürür ve ayrıca kritik değerden yüksek miktarda klor iyonlarının varlığı durumunda çeliğin korunmasını sağlarlar.[63] Korozyon inhibitörleri, genellikle suyun donatı çeliği ile temas etmesini önleyen ince bir koruyucu film oluşturur. Korozyon inhibitorları, korozyonu tamamen durdurmazlar, fakat korozyon başlangıç zamanın epey yükseltirler ve korozyon oluştuğu vakitte de hızını düşürürler. [64]

Klor sebepli donatı korozyonu için kullanılan bir inhibitor, özetle aşağıdaki gibi görevlendirilir: [65]

- a) Çelik donatı üzerinde koruyucu pasif filmin, klor iyonlarına karşı direncini artırmak,

- b) Çelik donatı üzerinde bir film engeli oluşturmak,
- c) Klorların göçünü bloke etmek,
- d) Betonda bağlı olan klor iyonlarının miktarlarını artırmak,
- e) Gözenek çözeltisinde erimiş oksijeni temizlemek
- f) Oksijen difüzyonunu bloke etmek.

İnhibitörler, korozyonu önleme metotlarına göre sınıflandırılırlar.

5.4.1.1. Anodik İnhibitörler

Bu inhibitörler, ferro demirin oluşmasını durdurarak anodik yüzeylerde koruyucu filmler oluşturur. Tek başına kullanıldıklarında, yüksek dozajlarda gereklidirler çünkü yetersiz miktarda inhibitör kullanımı, bütün anodik bölgelerin tedavisinde başarısızlıkla sonuçlanır ve yüksek katot/anot oranına bağlı olarak çukurcuk korozyonu oluşabilir. [34-64]

En yaygın kullanılan anodik inhibitörler; kalsiyum nitrit, sodyum nitrit, sodyum benzoat ve sodyum kromattır.[34] Amerika'da en yaygın kullanılan CaNO_2 , korozyon inhibitörü olduğu kadar ayrıca klorsuz bir priz hızlandırıcısıdır. Ayrıca, betonun işlenebilmesini artırmaktadır. En çok kullanılan priz hızlandırıcı CaCl_2 dir, ancak klor iyonu içerdiği için donatı korozyonuna yol açabildiğinden deniz yapılarında, öngerilimli betonda kullanılmaları yasaktır. Bu yapılarda hızlandırıcı olarak CaNO_2 kullanmak akılcı bir davranıştır.[63] %25-30 oranında konsantrasyonlarda çimento ağırlığının %2-4 oranları arasında kullanılır.[34] CaNO_2 normal portland, traslı veya cürufu çimentolarla kullanılabilir. Uçucu kül, silis dumanı gibi mineral katkıları ve süperakışkanlaştırıcılarla birlikte CaNO_2 kullanımı daha kaliteli ve durabilitesi yüksek betonlar elde etmeye imkan vermektedir. CaNO_2 beton karmasuyuna karıştırılarak ya da enjeksiyon yoluyla kullanılabilir.[63] CaNO_2 lu beton numuneleri üzerinde korozyon testleri 1970'lerin ortalarından beri Amerika'da özel sanayi laboratuvarlarında ve Federal Highway Administration tarafından yapılmaktadır. Tüm bu testlerin sonucu şu cümle ile özetlenebilir: Kalsiyum nitrit, korozyona karşı korozyon hızındaki bir güç azalmasından daha çok şey sağlar ve anodik inhibitörler arasında en iyi sonuç verenlerin başında gelir. [41]

CaNO₂ kritik klor iyon içeriği varsayılan 0,89 kg/m³ değerini 10 katına kadar yükseltir. Karışıma katılacak CaNO₂ değeri, NO₂⁻/Cl⁻ molar oranının sınır değerine bağlıdır. Yeterli bir koruyuculuk sağlanması için bu oran 0,6 ile 1,0 arasında bir değer almalıdır. Tablo 5.2. de inhibitör üreticisi İtalyan Grace Construction Products firmasının 13 yıllık labaratuvar ve 16 yıllık arazi deneylerine dayanarak oluşturduğu, 1 m³ betonda gerekli CaNO₂ dozajları gösterilmektedir. [63]

Tablo 5.2. Mevcut klor iyonu miktarına göre 1 m³ betonda gereken CaNO₂ dozajı.

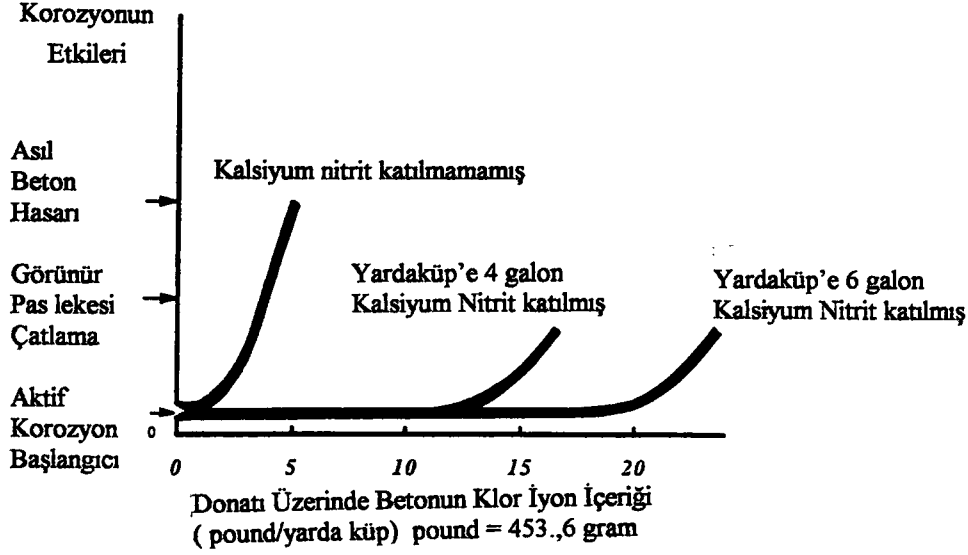
CaNO ₂ li inhibitör katkı miktarı l/m ³	Beton içinde mevcut klor iyonu miktarı kg/m ³
10	3,6
15	5,9
20	7,7
25	8,9
30	9,5

(*) Betona katılan CaNO₂ li inhibitörde CaNO₂ konsantrasyonu %30'dur. [63]

Betonda kalsiyum nitrit tarafından oluşturulan korozyon engelleyici etki, Şekil 5.4. de gösterilmiştir.

NaNO₂, genellikle pudra şeklinde kullanılan ince, akıcı bir inhibitördür. Çimento ağırlığının %1-2 dozajlarında hem normal hemde buhar kürlü betonlarda klor iyonlarının yokluğunda etkili bir şekilde kullanılır. Ortamda klor iyonları mevcutsa, dozaj %2'i geçerek nitrat oksidasyonu ve aktif çukurcuk korozyonunun teşvikini engeller. [34]

Sodyum ve potasyum kromatlar, %2-4 oranlarında kullanılır. Yeşil renginin dışında, korozyon olayına etkileri NaNO₂'e benzerdir. Sodyum benzoat %6-8 oranlarında beton içine katılır. Sodyum benzoatın inhibitör etkisi, sodyum nitritinkinden daha sürekli dir. [34]



Şekil 5.4. Betonda klorür iyon içeriklerine göre farklılaşan kalsiyum nitritin ürettiği korozyon önleyici etki.

5.4.1.2. Katodik inhibitörler

Katodik inhibitörler, yüksek pH seviyelerinde çözülmeleyen bir bileşik üretimi sayesinde bazik katodik yüzeylerde koruyucu bir film tabakası oluşturur. Katodik reaksiyonda oksijen mevcudiyetini engellenir.[64] Katodik inhibitörler ya katodik reaksiyonu yavaşlatarak ya da katodik bölgede çökerek görev yaparlar. Bu gruptaki maddeler, güçlü proton kabuledicilerdir (proton acceptor) ve anodik inhibitörlere farklı, genellikle dolaylıdır. Çoğunlukla kullanılan katodik inhibitörler, NaOH, Na₂CO₃ veya NH₄OH'dır. Bunlar, ortamın pH'ını yükseltir ve böylece demirli iyonunda çözünürlüğünü azaltır. Anilin, kloroalkil ve aminoatanol grubu, %1-2 CaCl₂ olduğu ortamda çimento ağırlığının %1-2 dozaj seviyelerinde kullanılır. NaOH, Na₂CO₃ ve NH₄OH gibi inorganik tuzlar genellikle %2-4 arası dozaj seviyelerinde kullanılır. [34]

5.4.1.3. Karma inhibitörler

Karma inhibitörler, eşzamanlı olarak hem anodik hem de katodik süreçleri etkilerler. Bu özelliklerinden dolayı, diğer inhibitörlerden daha etkilidirler ve tercih edilirler. [34,64] Etkisi, metal yüzeylerdeki mikropillere bağlı olan korozyon kadar klor etkisi ile oluşan korozyonu da kapsar. Mikropil korozyonu, anodik ve katodik alanları ayıran mikroskopik mesafeler ile nitelendirildiğinden donatı üzerinde hem anodik hemde katodik alanları donatı üzerine yerleştirmek imkansızdır. Karma inhibitör kullanılması,

böylece etkili bir korumayı mümkün kılar. Karma inhibitörler, içlerindeki elektron yoğunluk dağılımının, inhibötörün hem anodik hem de katodik bölgelere çekilmesine sebep olan moleküller içerir. Moleküller birden fazla yönlendirme molekülüne sahip olabilirler, örn. $-NH_2$ ve $-SH$. Karma inhibitörler, %1-2 katkı oranlarında kullanılır. [34]

5.4.2. Kaplamalar (Coatings)

Kaplamalar, betonu koruyan ve strüktürün ömrünü uzatan koruyucu maddelerdir. İyi bir koruyucu kaplama sistemi, suyun betona sızmasını önler ve betonu kimyasal etkidenden korur. Bir kaplamanın başarılı uygulamasını ve performansını etkileyen beton özellikleri (1) gözeneklilik, (2) nem içeriği, (3) yüzeye bulaşmış kimyasallar' dır. [66]

Bir beton yüzeye bir beton kaplama uygulandığı zaman, beton yapısına ilişkin yukarıda belirtilen özellikler ve koşullar sonuç performansı için iyice analiz edilmelidir. Yeterli yüzey hazırlaması yapılmalı, doğru bir uygulama metodu seçilmeli ve son olarak uygulama esnasında iyi bir işçilik sağlanmalıdır.

Yüzey hazırlanması, önemli bir adımdır. Yüzey hazırlanması için metot seçimi, çevre koşullarına, yüzey özelliklerine ve kaplama sisteminin beklenen servis ömrüne bağlıdır. Beton yüzeyi toz, yağ, leke, ve diğer parçacıklardan fırça ya da vakumla temizlenmelidir. Yüzey üzerindeki boşluklar, çukurlar, çimentomsu bir malzeme, epoksi ya da kum dolgusu ile kapatılmalı ve düz, sürekli bir yüzey sağlanmalıdır. Yüzey temizleme işlemi bittikten sonra, kaplama çeşidine göre astarlama işlemi yapılır ve yüzey hazırlanması tamamlanır.

Kaplama uygulanması, birçok teknikle yapılabilir. Teknik seçiminde malzeme ile uyumluluğu kadar maliyetler, uygulama ortam koşulları ve pratikliği de önemlidir. Kaplama metotları; (1)sprey tekniği,(2) rulo uygulaması,(3) fırça uygulaması,(4) mala veya lastik süpürge uygulaması' dır. Kaplama uygulanmasından önce ve sonra; hava, yüzey ve malzeme sıcaklıkları gözönüne alınmalıdır. Çoğu kaplamalar, $10^{\circ}C - 32^{\circ}C$ arası sıcaklıklarda uygulanmalı ve %90' dan büyük bağıl nemli koşullarda hiçbir kaplama uygulaması yapılmamalıdır. [50] Kullanılan kaplama malzemeleri, epoksi, ürethan, polyester ve vinilester, bitümlü kaplama ve mastik, neopren, kömür katranı epoksi(coal tar epoxy), akrilikler'dir. [66]

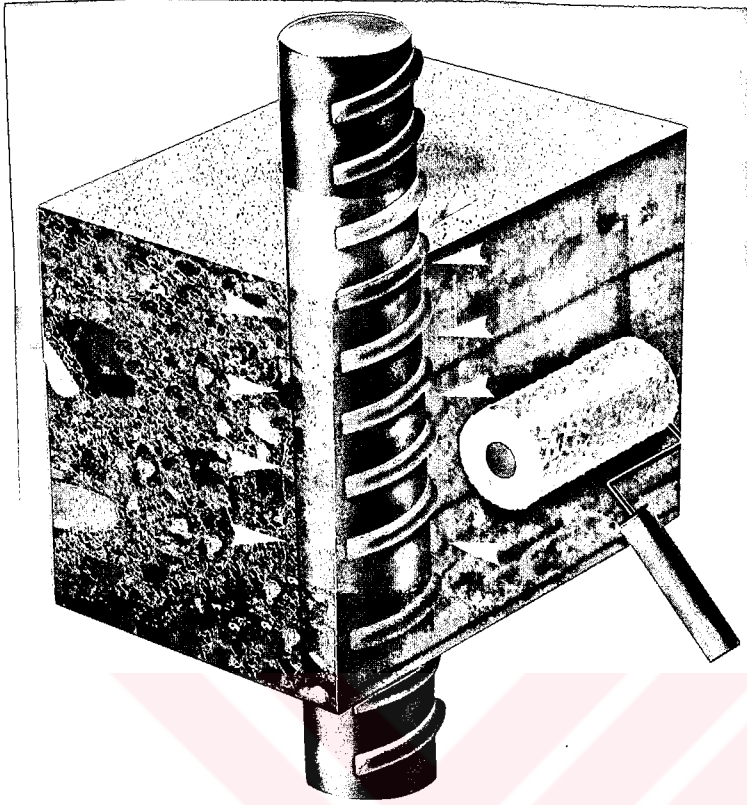
5.4.2.1. Beton İçine Nüfuz Eden Sıvı veya Buhar Bazlı İnhibitörler (Penetrating Sealers)

Silan, siloksilsilan ve benzer kimyasallar, beton yüzeye sürüldüğü zaman betonun gözeneklerine nüfuz ederler. Gözeneklerde su ile temasa geçerek suyun girmesini engelleyen fakat, su buharının betonun içinde ve dışında olmasına yani betonun nefes almasına müsaade eden hidrofob bir tabaka oluşturur.

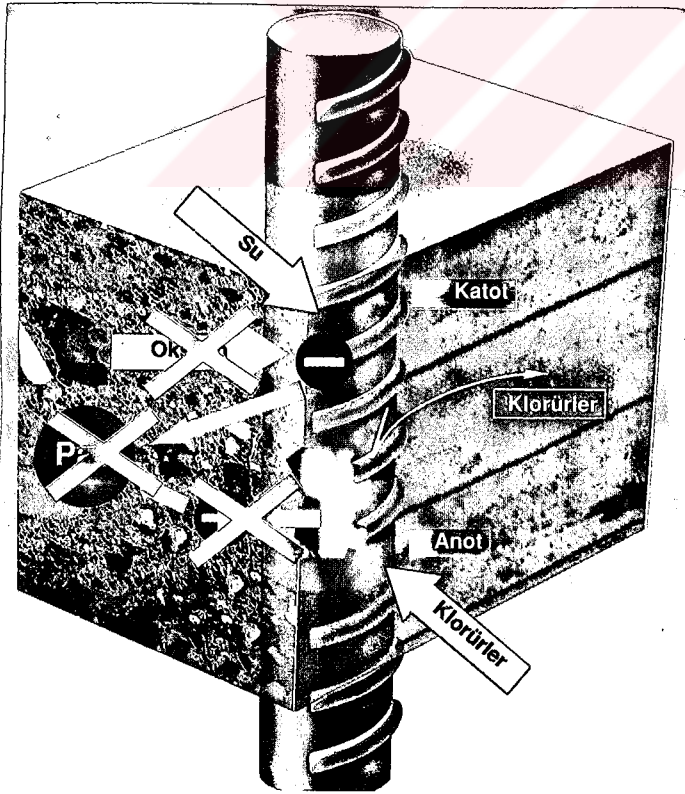
Amerika’da ve İngiltere’de klor iyonlarına maruz köprü tabliyelerine “penetrating sealers” uygulanmaktadır. Almanya Ulaşım Departmanı da yıllardan beri bu uygulamayı yaptırmaktadır. Bu metot, korozyon başlamadan önce klor göçünü yavaşlatan ucuz bir metot olarak tanımlanmaktadır. [16]

Sika Deteks firmasının FerroGard -903 adıyla piyasaya sürdüğü malzemede bir emprenye ile beton yüzeyine uygulandığında, betona nüfuz eden ve elik yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturan inhibitör bir malzemedir. Şeffaf ve renksiz bir sıvı olan bu madde, günde 2,5 – 20 mm hızla su gibi kılcal emişle, klörürler gibi suyun penetrasyonu yoluyla da CO₂ gaz difüzyonu yolu ile çeliğin yüzeyine ulaşır. Donatı üzerinde 100-1000 Angström kalınlıkta bir adsorbe kalınlık oluşur. Bu elik ile beton arasında bir bağ oluşturmaz. Sika FerroGard –903 temiz, kuru ve sağlam beton yüzeylere 3-5 kat ve toplam 0,5 kg/m² uygulanır. Uygulamada düşük basınçlı spre, fırça veya rulo kullanılabilir

.Aşağıdaki şekillerde yeni yapı, korozyon riski olan fakat gözle görölü korozyon hasarı olmayan ve gözle görölü korozyon hasarı ve beton onarım gereksinimi olan betonlar üzerindeki FerroGard -903 işlevi görölmektedir. (Şekil 5.5.,5.6.,5.7.,5.8.) [67]

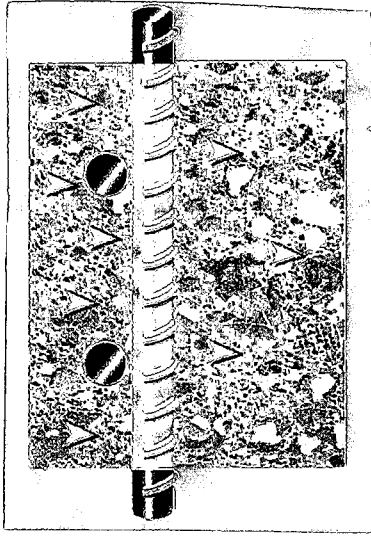


a)

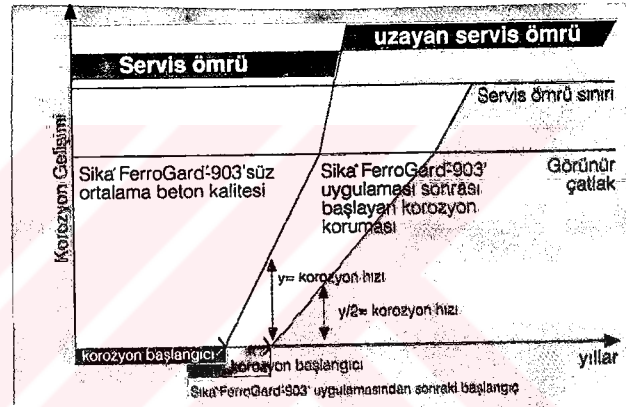
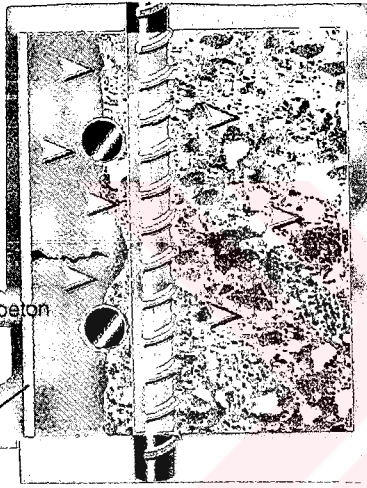


b)

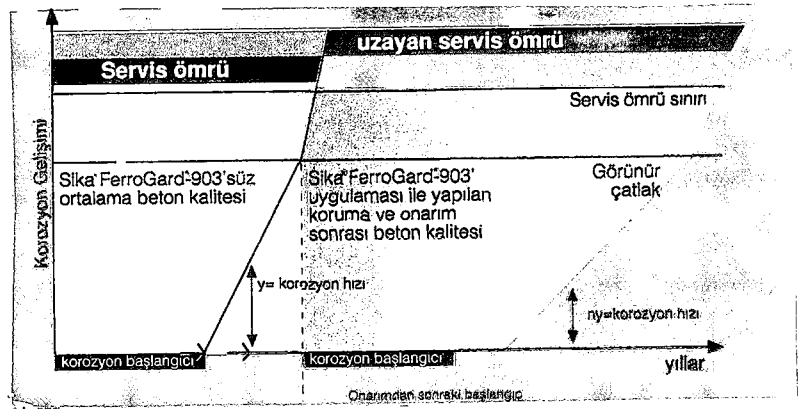
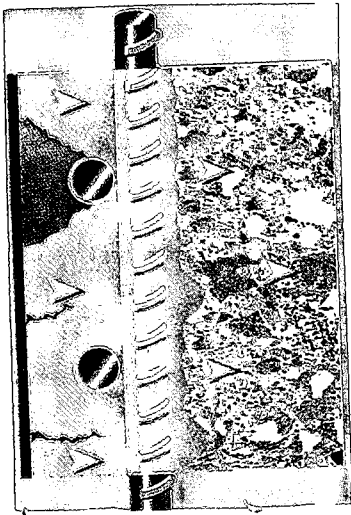
Şekil 5.5. Sika® FerroGard – 903 uygulaması.



Şekil 5.6. Yeni yapılarda Sika FerroGard-903 uygulaması.



Şekil 5.7. Oldukça ileri korozyon riski, fakat gözle görülür korozyon hasarı olmayan yapılarda Sika FerroGard-903 uygulaması.



Şekil 5.8. Gözle görülür korozyon hasarı ve beton onarımı gereksinimi olan yapılarda Sika FerroGard-903 uygulaması.

5.3.Elektrokimyasal Koruma

Korozyon olayı, elektriksel bir yükün anottan katota hareketi ile oluşmaktadır. Burada hem elektriksel hem de kimyasal bir süreç söz konusudur. Korozyona uğramış alanlarda bölgesel tamiratlar, ancak korozyonun genel sürecine de ancak sınırlı çözümler sunmaktadır. Ayrıca; yüzeysel koruma sistemleri, tedavigörmüş bölgelere yakın yerlerde yeni bir korozyon piliyle sonuçlanabilir. Bu da birkaç yıl içinde korozyonun başlamasına ve ciddi beton hasarının oluşmasına sebep olabilir. [68]

Özellikle yeni yapılar için paspayı, doğru donatı seçimi, geçirimsiz beton yapımı gibi beton bileşenleri ile ilgili baştan çözümler korozyona karşı iyi sonuçlar verebilir. Fakat; halihazırda zarar görmeye başlamış beton için en uzun ömürlü sistem katodik korumadır.

Korozyon problemine bir başka alternatif çözümde, korozyonu kontrol altına alacak geniş çerçeveli elektrokimyasal bir tedavi uygulamaktır. Elektrokimyasal metotlar, dıştan bir anot uygulamakla ve anottan çeliğe akım geçirmekle böylece de tüm donatı çeliğini bir katota dönüştürmekle çalışır. Elektrokimyasal koruma adı altında birçok teknik uygulanmaktadır. Bunların başlıcaları;

1. Katodik Koruma,
2. Klörün dıştan bir anot tarafından ortamdan uzaklaştırılması,
3. Yeniden alkalileştirme.

Katodik koruma, bu teknikler içinde en yaygın olarak kullanılandır. Bu teknikler içinde başlıca farklılık, katodik korumanın sürekli bir, diğer tekniklerinde 1-8 hafta arası bir süreçte uygulanan teknikler olmasıdır. [16]

5.3.1. Katodik Koruma

Katodik koruma, elektrokimyasal koruma tekniklerinin en yaygın kullanılandır. Federal Highway Administration, katodik korumanın tuz ile kirlenmiş betonda korozyonu durdurmak için kanıtlanmış tek metot olduğunu ve U.S. Department of Transportation'a çok ekonomik bir yarar sağlayacağını rapor etmiştir. [68–69]

Katodik Korumanın, genel avantajları;

- Etki süreci maruz kaldığı koşullara bağlı değildir.

- Yapının ömrü boyunca betonda biriken klor kirlenme seviyeleri, performansı etkilemez.
- Geleneksel beton, korozyon için özel olarak dizayn edilmeden kullanılabilir.
- Donatı çeliğinin korozyonu , beton çatlasa bile korunabilir.
- Donatı çeliği yeterli paspayı gerektirmediği için rötire çatlaması için az bir olasılıktır. [69]

Katodik koruma, 2 farklı metotla uygulanabilir. İlki olan Feda Edilen Anot Sistemi'nde korunacak metal daha aktif bir metale yani bir anota bağlanıp katoda dönüştürülür. Zorlanmış Akım Sistemi denilen ikinci sistemde de duşta bir direkt akım üreten güç kaynağı, gerekli akımı üretir. [16]

5.3.1.1. Zorlanmış Akım Sistemi

Zorlanmış Akım Sistemi, beton yüzeyine yada içine monte edilmiş sürekli bir anottan küçük bir direkt akım geçirmekle çalışır. Güç sağlayıcı, anottan donatı çeliğine yeterli akım geçirerek anot reaksiyonunu durmaya çalışır ve katodik reaksiyonun çelik üzerinde oluşacak yalnız tek reaksiyon olmasını sağlar. Katodik reaksiyon, donatı ağı boyunca oluşur.



Fakat, potansiyel farkının çok düşük olduğu durumlarda, anot reaksiyonu hidrojen gazı reaksiyonuna dönüşebilir.



Bu hidrojen değişim reaksiyonu donatı çeliğinin hidrojen kırılganlığına yolaçabilir. Tek atomlu molekülü olan hidrojen (monatomic) çeliğe difuzyon yoluyla nüfuz edebilir ve damarlar içinde kalabilir veya çeliğin kristal yapısındaki diğer çukurcuklarda kalarak çeliği zayıflatıp yük altında kırılmasına yol açabilir. Bu problem, özellikle normal çelik donatılı betonlarda ihmal edilebilir fakat yüksek çekme gerilmeli çeliğinin hidrojen kırılganlığına hassas olduğu öngerilmeli yapılarda çok önemlidir. Bu nedenle; öngerilmeli beton yapılarda katodik koruma uygulanması tehlikelidir.[16,18] Bu

problemler, genellikle çelik potansiyelini hidrojen evrim potansiyelinin altında limitleyerek kontrol edilir. Yine de, asitli çukurlarda veya çatlaklarda, potansiyel hidrojen gelişim potansiyelini (hydrogen evolution potential) aşabilir. Öngerilmeli yapıların katodik koruması, sadece büyük bir dikkatle ve deneyimli korozyon uzmanlarının gözetiminde yapılmalıdır.

Katodik korumayı kontrol ederken aşağıdaki etkenler gözönüne alınmalıdır.

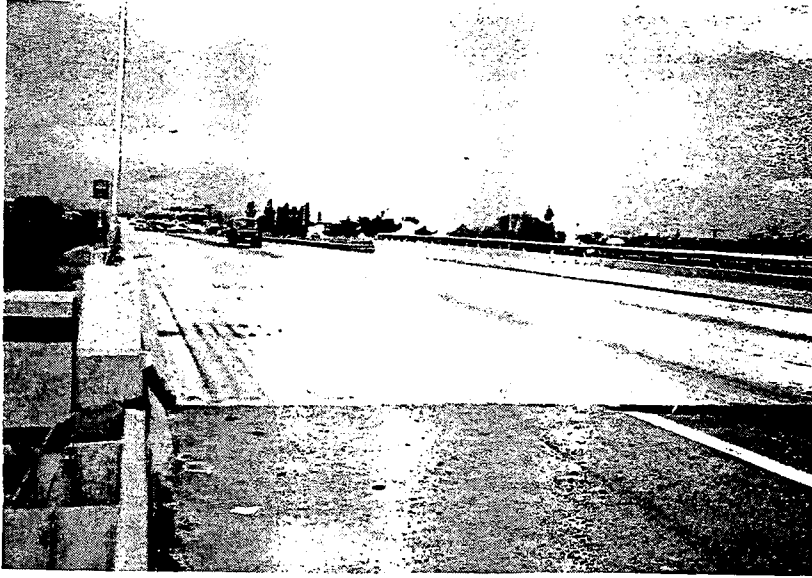
1. Anodik korumayı bastırıp durduracak veya korozyon hızını azaltacak kadar yeterli bir akım akışı olmalıdır.
2. Akım, anot etrafında asidifikasyonu minimize edecek kadar düşük olmalıdır.
3. Çelik, özellikle öngerilmeli çelikte hidrojen kırılganlığını önlemek için hidrojen gelişim potansiyelini aşmamalıdır.

Etkili bir katodik koruma, özetle katotların potansiyelini anotların potansiyel seviyelerine indirgeyerek anodik ve katodik alanlar arasındaki mevcut akımı durdurmaştır.

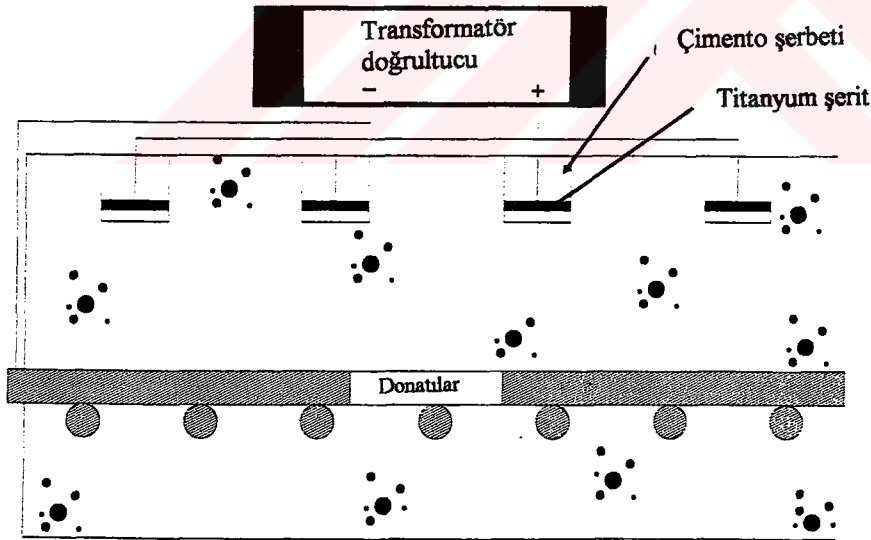
Kullanılan Anot Sistemleri

Döşeme anot sistemleri, genellikle bir beton tabakanın altına gömülür ya da döşemede kesilen yarıklar içine yerleştirilir. Her iki uygulamasında belirli avantaj ve dezavantajları vardır. Beton kaplamalar döşeme kalınlığını artırır, böylece ölü yükleri artırır. Yarıklar içine yerleşmiş anotlarda bu tür problemleri önler fakat yeterli akım yayılımı için birbirlerine yakın olmak (300 mm civarı) zorundadırlar.

Bu sistemin ilk başlarında döşeme üzerinde açılan yarıklara iletken polimer harç (karbon yüklü reçine) uygulanırdı.(şekil 5.9) Bu sistemin amacı anodun ağırlığını azaltmak ve döşeme kalınlığında bir artışa neden olmamaktır. Yine de; bu sistem, anotla donatı çeliği arasında kısa devreleri önlemek için donatı üzerine iyi paspayı gerektirir. Ayrıca polimer her koşulda betona iyice bağlanmayıp bölgesel tamiratlar etrafında yüksek tüketim göstermiştir. Bu sistem daha sonra kaplanmış titanyum şeritle değişime uğramıştır. (Şekil 5.10)



Şekil 5.9. Virjinya’da yarıklara yerleştirilmiş bir karbon bazlı anot sistemi.

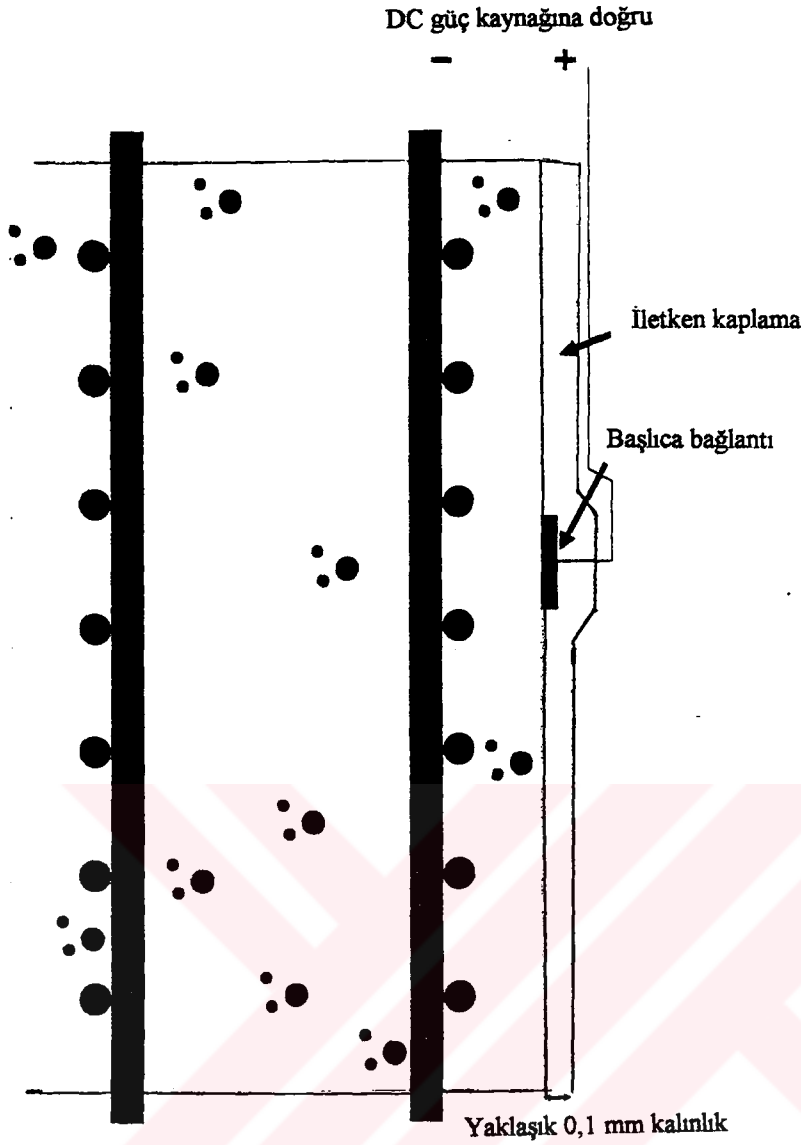


Şekil 5.10. Titanyum şerit anotlu katodik sistem.

Döşemelerde ilk ticari ve özel anotlardan biri bakır bir iletkenin etrafında iletken bir plastikte esnek bir kabloydu. Kablo, döşeme üstünde dokunuyordu ve üstüne daha sonra beton bir örtü uygulanıyordu. Bu sistem ayrıca, altyapıda püskürtülmüş bir beton kaplamayla da uygulanıyordu. 1980'li yıllarda çok yaygın olarak kullanılan bu sistem artık uygulanmamaktadır. Çünkü yapılan uygulamalarda iletken plastiğin 5 yıllık bir periyot sonrasında işlevini yerine getiremez hale geldiği görülmüştür.

İtalya'da yaygın şekilde kullanılan çok yeni bir anot sistemi de iletken lifli betondur. Tek komponentli bir sistem olması en önemli avantajıdır. Doğrudan eski betonun hazırlanmış ve tamir görmüş yüzeyi üzerine uygulanır. Yaygın olarak kullanılan diğer anot da titanyum ağdır. Yüzeye genelde plastik esaslı malzemelerle sabitlenir ve üzerine çimento esaslı kaplama uygulanır. Bu sistem ayrıca düşey yüzeylerde de uygulanır.[16] Kullanılan ağın cinsine göre; akım yoğunluk dereceleri yüksek olabilir ve 25-100 yıl arası ömür iddia edilir. [54]

İletken kaplamalar da zaman zaman anot olarak uygulanırlar. Bu kaplamalar reçine bağlayıcılarında grafit içerirler ve ikincil bir anot olarak 250-400 mikron arası kalınlıklarda uygulanabilirler. Esas anot, kaplamanın altında yüzey içine serilmiş olan ince telleri veya titanyum şeritleri ihtiva eder. Kaplama siyahtır fakat boyanabilir. Bu sistem orta derecede bir akımla işler ve 5-15 yıl arası tahmini ömrü vardır.[54] Bu kaplamaların diğer anotlara karşı durabilite bakımından üstün bir tarafı yoktur hatta çoğundan durabiliteleri daha az bile sayılabilir. Fakat ucuzlardır, kolay uygulanırlar ve tamir ile bakımları kolaydır. Sürekli ıslak, aşınan ve trafikli yüzeyler için uygun değildir. Genellikle fırça, silindir veya havasız spreyle uygulanırlar.(Şekil 5.11) Avrupa'da yüzlerce köprüde bu sistem uygulanmaktadır. Ayrıca, Amerika ve Kanada'da yüzlerce park yapısında da bu sistem uygulanır. Diğer bazı anot sistemlerde, termal çinko spreyleneşmesi ve kenetlenmiş anot sistemleridir.

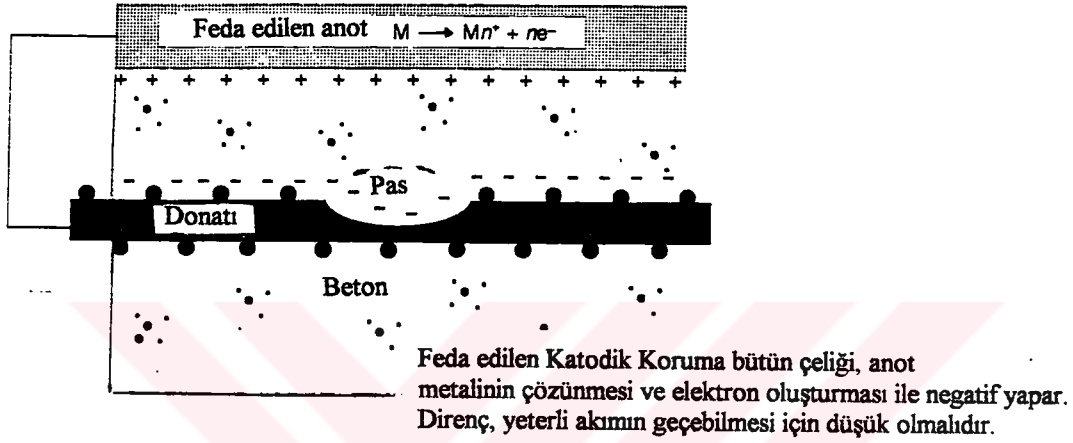
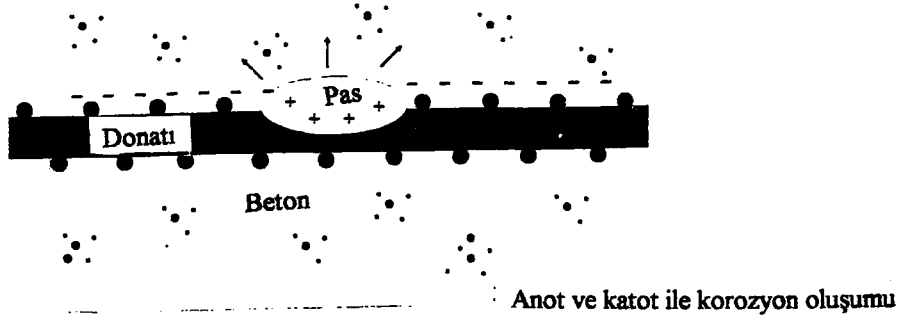


Şekil 5.11. İletken kaplamalı anot sistemleri.

5.3.1.2. Feda Edilen Anot Sistemleri

Feda Edilen Anot Sisteminde amaç; çeliği genellikle çinko olan daha reaktif bir metale bağlanarak bir galvanik pil oluşturmaktır. Böylece; çinko anodik reaksiyona uğrar ve korozyon oluşur. Bu sırada da tüm çelik yüzeyi katodik reaksiyona uğrar, çelik tamamen aktifliğini yitirir ve çeliğin çözünmesi durur. [54]

Bu sistem Şekil 5.12. de şematik olarak gösterilmiştir. Çelik üzerindeki potansiyel üniform değildir. Fakat; bu sistem iyi işlediği takdirde, tüm yüzey ilave anottan daha negatif, yani katot olacaktır.



Şekil 5.12. Feda edilen anotlu katodik korumanın sistem şeması.

FEAS, çelik üzerine galvanizlemeye benzer. Fakat, çinko, çelik ile birleşince sadece küçük işleyen bir voltaja sahiptir. Bu değer, pasif çelik ile ilgili olarak 1000 mV ve aktif olarak korozyona uğrayan çelik için de 600 mV'dur. Galvanizleme sistemi, iki metali direkt temasa sokarken FEAS inde, akımı taşıyan bir elektrolit vardır. Elektrolitin direnci, sistemin performansı için çok önemlidir. Florida'da, deniz içinde öngerilmeli beton kazıklarda hala büyük ölçüde kullanılmaktadır. Çünkü, deniz koşullarında öngerilmeli betonların hidrojen kırılma riski ihmal edilebilir ve beton direnci düşüktür.

FEAS için sınırlayıcı faktörler betonun elektriksel direnci ve anodun performansındır. Çinko, çelik ile birleşince yaklaşık 1V electromotive force(emf) üretir. Betonun ve anodla beton arayüzünün direnci düşük tutulabilirse, çeliği korumak için yeterli akım sağlanacaktır. Eğer kimyasal değişimler sonucu direnç yükselir ve emf düşerse, çelik daha fazla korunamayacak duruma gelir.

FEAS'nin avantajı, bir güç sağlayıcısının olmayışıdır; bu da maliyeti önemli ölçüde düşürür. Akım ve voltajın düzenlenemez olması da kontrol (monitoring) gereksinimlerini en aza indiririr.,

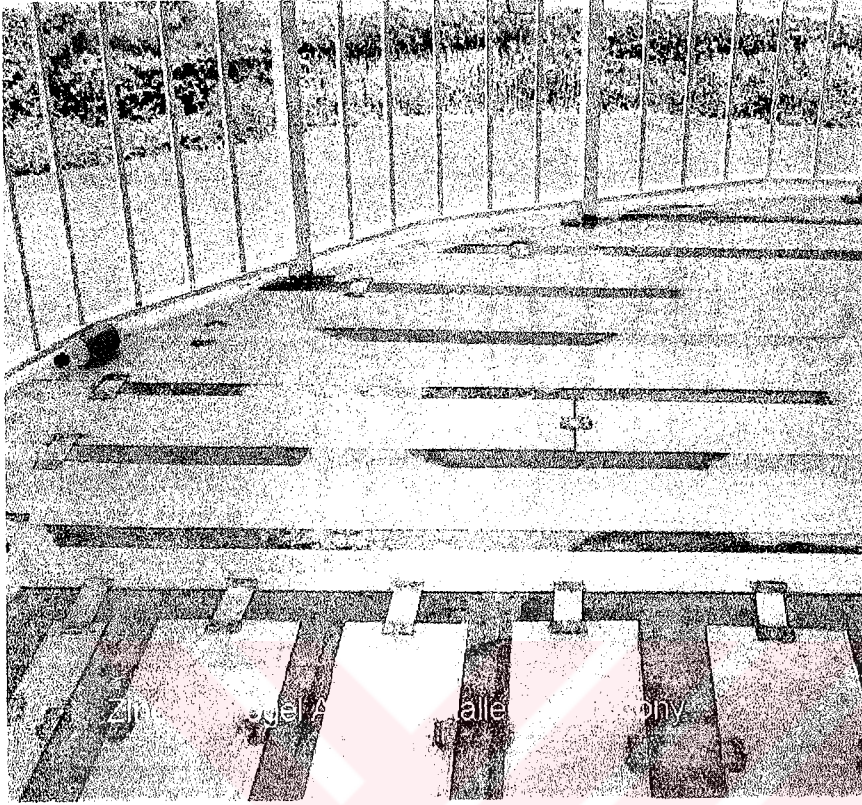
Elektrokimyasal seride, çelikten daha aktif bir dizi element ve alaşımlar vardır. En pratik metaller çinko, alüminyum ve magnezyumdur. Bu metallerin çoğu genelde alaşım şeklinde deniz içindeki çelik yapının feda edilen anotları olarak kullanılır. Şekil 5.13'de genişlemiş alüminyum hasırın kullanımı ile ilgili deneysel bir sistem gösterilmektedir. Bu sistemde birçok uygulama metodu uygulanabilir.



Şekil 5.13. Genişlemiş alüminyum hasır kullanılması.

Alüminyum, magnezyum ve alaşımları, bu sistemde anot olarak çok kullanılırlar. Bunların alaşımlarının bir avantajı, çinkodan daha hafif olmalarıdır. Yinede, oksitleri ve diğer korozyon ürünleri çok hacimlidir ve betona zarar verebilirler. [68]

3M firmasının ürünlerinden olan 3M Çinko-Hidrojel Anot 4727, iyonik olarak iletken yapışkanlı çinko bir folyodur. Bu ürün korunacak betonun yüzeyine uygulanır. Daha sonra bu çinko anot, elektriksel olarak donatı hasırına telle bağlanmaktadır. Bu iki farklı metalin birleşimi –çinko anot ve çelik donatı çubuğu- ufak bir elektriksel akım üretir. Şekil 5.14 ve 5.15 de 3M Çinko-Hidrojel Anot 4727 uygulaması ile ilgili örnekler yer almaktadır.



Şekil 5.14. Bir balkona 3M Çinko-Hidrojel Anot 4727 uygulaması.

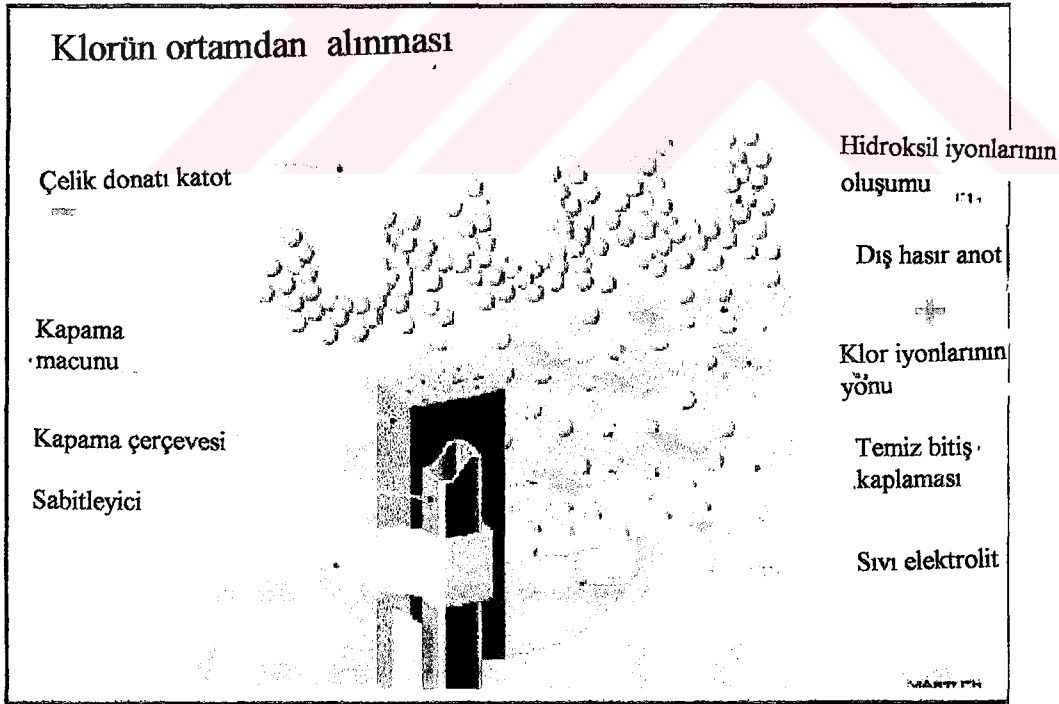


Şekil 5.15. Bir balkonun 3M Çinko-Hidrojel Anot 4727 uygulamasından sonraki görünüşü.

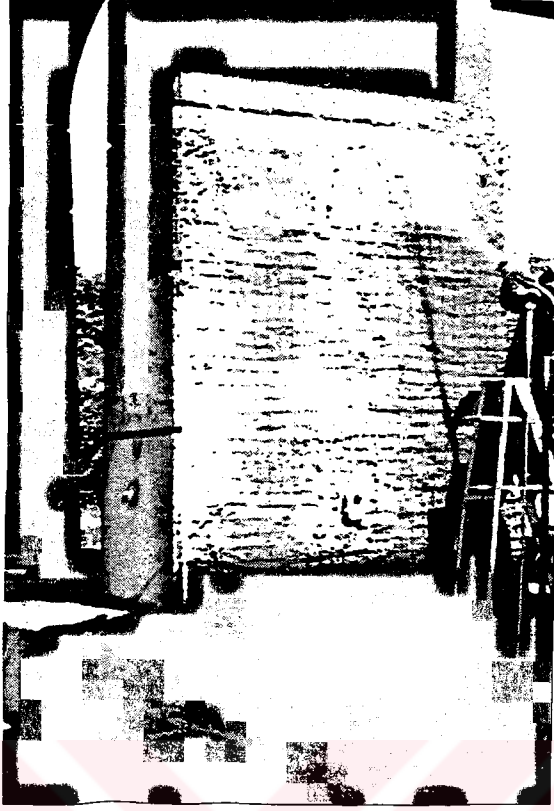
5.3.2. Klorün Dıştan Bir Anotla Ortamdan Alınması

Klor iyonlarının donatı korozyonu için bir katalizör görevi yaptığı, daha önceki bölümlerde işlenmişti. Eğer klor iyonları negatif olarak yüklenirlerse, elektrokimyasal olayı klor iyonlarını çelik yüzeyden uzaklaştırmak için ve dış bir anota hareketini sağlaması için kullanabiliriz. Bu olay, 4–6 hafta gibi sınırlı bir zaman içinde geçici bir anot ve katodik korumadan daha yüksek bir elektriksel güç yoğunluğu gerektirir. [16,54]

En çok kullanılan anot, kaplanmış titanyum ağıdır. Sürekli olarak çimento esaslı bir kaplama içine gömmek yerine geçici bir anot sistem uygulanır. Şekil 5.16 de bu sistemin mekanizması görülmektedir. Norveç'te geliştirilmiş özel bir sistem, ıslak bir kağıt kompres (papier mâche) elde etmek için parça parça edilmiş bir kağıt ve suyun yüzeye sıkılmasını kapsar. Ağ şeklinde anot, ahşap sopalarla yüzeye sabitlenir ve 'papier mâche' uygulanır. Bu sistem operasyon süresi boyunca ıslak tutulur. Şekil 5.17 de bir yumuşak çelik ağ anotunun kullanılması gösterilmektedir. Bu işlem artık çok nadir kullanılmaktadır. Çünkü çelik uygulama boyunca tüketilerek düzensiz bir akıma ve yetersiz uygulamaya yolaçabilir.



Şekil 5.16. Klorün dıştan bir anotla ortamdan uzaklaştırılma mekanizması.



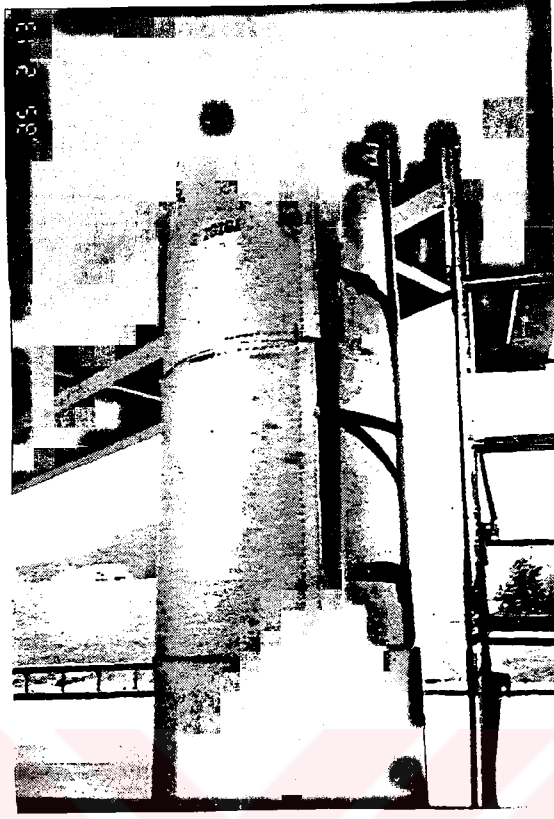
Şekil 5.17. Çelik ağ anot kullanılarak klor iyonlarının ortamdan uzaklaştırma işlemi.

Battaniyeler kullanarak düşey yüzeylerde uygulanan bir “ elektrolit çözeltili dolaşım sistemi” Florida’da, Ohio’da, New York’da ve Ontario’daki köprülerde kullanılmaktadır.(Şekil 5.18) Beton yüzeye sabitlenen tank sistemi de İngiltere’de bu işlemler için geliştirilmiştir.[16]

KOAS’nde elektrolit olarak genellikle kalsiyum hidroksit kullanılır. Suyu nazaran üstün tarafı; bazik olması ve klorür-gaz gelişimini (chlorine gas evolution) durdurmasıdır. Ayrıca ASR durdurmak için lityum tuzları da kullanılmaktadır. [54]

Bu sistemin en büyük avantajı 6-8 hafta gibi geçici bir süreçte uygulanmasıdır. Geçici olarak bir güç kaynağı kullanılır bu da maliyeti katodik sistemlerdeki gibi fazlaca etkilemez.

Fakat; bu sistemin en büyük dezavantajı da çok yeni bir teknoloji olmasıdır. Bu konuda çok az standart ve araştırma mevcuttur. Çok aşırı yükleme katodik korumadan daha çok probleme yolaçabilir. Ayrıca; bu tedavi şeklinin ömrü tam olarak belli değildir. Bu sistem, önerilmeli yapılara uygulanmamalıdır. Çünkü; hidrojen kırılabilirliği riski vardır.



Şekil 5.18. Klor iyonlarının ortamdan uzaklaştırılması için battaniyeli anot sistemi uygulaması.

5.3.2.1. Alkali-Silis Reaksiyonu

İngiltere’de Aston Üniversitesinde ve Amerika’da Eltech Araştırma Grubu’nun yaptığı çalışmalarda; ASR’nin çelik yüzeylerde aşırı alkali üreten katodik reaksiyonlar tarafından oluşabileceği tespit edilmiştir. Bu olay; Na^+ ve K^+ gibi alkali metal iyonların, negatif yüklenme etkisinde çelik yüzeye hareketi ile şiddetlenir. Japonya’da bazı araştırmacılar; pH’in silis jeli çözecek ve genleşme kuvvetlerini durduracak kadar yüksek olabileceğini beyan etmişlerdir.

Lityumun, ASR yi azalttığı yada durdurduğu bilinir ve bu olay, laboratuvar testlerinde de onaylanmıştır. Bu nedenle elektrolit içine lityum tuzu katılarak ASR üzerinde durdurucu etki oluşturulmaya çalışılır. [16,54]

5.3.2.2. Aderans Kuvveti (bond strength)

Betondaki çeliğin aderans kuvvetine akımın etkisi uzun yıllardır tartışılan bir konudur. İngiltere’nin kuzeyinde uzun bir köprü yapısında fizibilite çalışması yapılmış ve bazı

testler KOUS'nin betonda donatı aderansını %50 seviyelerine kadar düşürdüğünü göstermiştir. [16,54]

5.3.3. Tekrardan Alkalileştirme

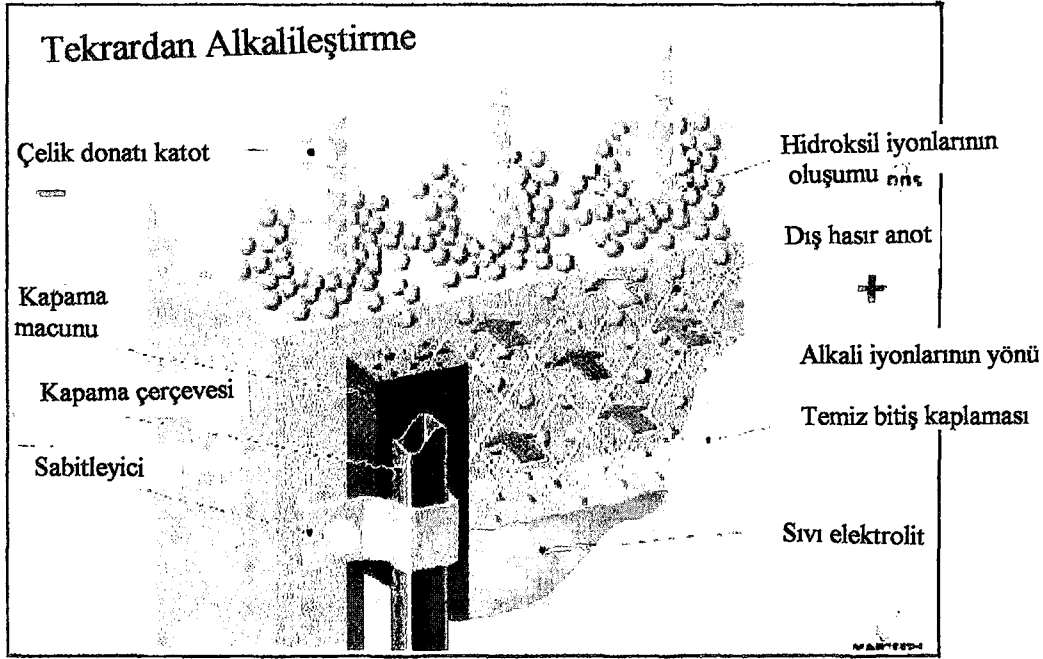
Karbonatlaşma olayında, CO₂'nin su ile birleşip karbonik asiti oluşturduğu daha sonra da bu asitin kalsiyum hidroksitle reaksiyona girip kalsiyum karbonatı oluşturduğu daha önceki bölümlerde anlatılmıştı. Bu olay sonucu, hidroksil iyonları çözeltiden uzaklaştırır ve pH düşer. Böylece pasif tabaka daha fazla dayanamaz ve korozyon başlayabilir.

Katodik reaksiyon, çeliğe elektronları uygulayarak çelik yüzeyde yeni hidroksil iyonlarının üretilbileceğini göstermiştir. Bazılik tekrar oluşur ve pH'ı 12 seviyelerine yükselir.

Tekrardan Alkalileştirme olayı, karbonatlaşma olayı için önemli bir çözümdür. Kullanılan anotlar, KOUS a benzer, klor iyonlarını uzaklaştırmak için geliştirilmiş spreylene selüloz veya tank anot sistemleridir ve yumuşak çelik veya kaplanmış titanyum ile kullanılır.(Şekil 5.19) Hidroksil iyon üretimine ilave olarak üreticiler sodyum karbonat elektrolit kullanarak karbonatlaşmaya karşı tedavinin daha dirençli olacağını iddia etmişlerdir. Sodyum karbonat elektroosmotik basınç altında betonun içine hareket edecektir. Belirli bir miktar, gelen fazla karbondioksitle reaksiyona girecektir.



Tekrardan Alkalileştirme sırasında, daha küçük yük yoğunluğu uygulanır. Bu yüzden KOUS'e göre riski daha azdır. Öngerilmeli yapılarda sadece donatı üzerinde uygulanır. Kablolar akımdan kılıflar içinde bulunarak korunur ve kılıflar da betonda derine gömülü haldedir. [16] Tekrardan Alkalileştirme Sistemi, Avrupa'da ve Orta Doğu'da gittikçe yaygınlaşan bir sistemdir. TA'm en büyük avantajı, uygulama süresinin 2-4 hafta arasında olmasıdır. Ayrıca geçici olarak güç kaynağına gereksinim vardır. Tedavi aşamasında yama tekniğine göre vibrasyon ve gürültüyü önemli ölçüde azaltır. Fakat; en büyük dezavantajı da KOUS'da olduğu gibi yeni bir teknoloji olması ve bu sistemle ilgili çok az standart ve spesifikasyon olmasıdır. [16,54]



5.19. Tekrardan Alkalileştirme Mekanizması.

DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Betonarme yapılarda korozyon problemi, tüm dünyada yapıları tehdit eden bir unsurdur. Türkiye’de 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi, yanlış yapılan bir betonun, standartlara uymayan yapıların nasıl bir tehlikeye dönüşeceğini apacık ortaya koymuştur. Yapılmış olan bu çalışma; beton ve donatı korozyonunu önlemenin en doğru yolunun, yapının başlangıç aşamasında, maruz kalacağı ortamları analiz edip uygun betonarmeyi oluşturmak olduğunu göstermektedir. Betonarme yapılarda ana sebeplere göre korozyon çeşitleri aşağıda yer almaktadır.

FİZİKSEL-MEKANİK KOROZYON

- DON ETKİSİ VE DONMA ÇÖZÜLME TEKRARLARI
- ISIL GERİLMELER
- KURUMA RÖTRESİ
- SÜNME
- ŞOK DALGALARI
- AŞINMA
- EROZYON VE KAVİTASYON
- YANGINA DAYALI KOROZYON

DIŞ ETKİLER SONUCU KİMYASAL KOROZYON

- TATLI SU ETKİSİ
- ASİT ETKİSİ
- KARBONİK ASİTLİ SU ETKİSİ
- MAGNEZYUM TUZLARI İLE YÜKLÜ SULARIN ETKİSİ
- SÜLFATLI SU ETKİSİ
- DENİZ SUYU ETKİSİ
- TUZ ETKİSİ
- KARBONATLAŞMA

BETON İÇİNDEKİ REAKSİYONLARA BAĞLI OLUŞAN KİMYASAL KOROZYON

- ALKALİ-AGREGA ETKİSİ
- UYGUN OLMAYAN (BOZUK) ÇİMENTO KULLANIMI
- BİYOLOJİK KOROZYON

Betonarme yapılarda beton korozyonu ve hasarına yolaçan tüm bu faktörler; hasar etkisi büyüdükçe, gerekli önlemler ve doğru onarımlar yapılmadığı takdirde beton

içindeki donatıya kadar ulaşır ve yapıların mukavemetini birebir tehdit eden donatı korozyonunun başlaması kaçınılmaz olur.

Betonarme Yapılarda donatı korozyonuna birebir neden olan asıl etkenler ise karbonatlaşma ve klor etkisi dir.

Genellikle beton kavramı; çimento, su ve agrega birleşiminden oluşan bir karışım olarak anlatılmaktadır. Fakat, unutulmuş bir gerçek vardır ki; o da bu karışım doğru koşullarda ve analizle yapılmadığı takdirde basit bir karışımdan öteye gitmez. Beton, iyi beton olduğu takdirde” beton” ifadesini almalıdır. Yanlış yapılmış bir beton, mukavemetten yoksun, çok fazla miktarda su içeren, geçirimli bir bileşim olacaktır. Bu tür bir beton kullanımı da korozyonun başlıca sebebidir.

Beton geçirimsizliği, korozyona karşı sağlanması gereken işlemlerin başında gelir. Böyle bir beton gereksinimi, özellikle deniz çevresindeki yapılarda çok önemlidir. Klor penetrasyonun karşı betonun geçirimsiz hale dönüştürülmesiyle korozyon riski minimum iner. Beton geçirimsizliğini sağlamak amacıyla beton içine çeşitli katkı maddeleri katılabilir. Bunlar, genellikle puzolanlardır. Puzolanlar özelliklerine göre Tablo 6.1. de özetlenmiştir.

Tablo 6.1. Beton içine katılan puzolanların özellikleri

Puzolanlar	Özellikler
Silis Dumanı	Silis dumanı bir çimento partikülünden 100-150 kat daha küçüktür ve matriksde serbest su tarafından oluşturulan boşlukları doldurur, böylelikle daha sıkı ve geçirimsiz bir beton oluşur.
Uçucu Kül	Uçucu kül katılarak yapılmış betonda klor iyonlarının içeri girişinde belirgin bir azalma gözükür, düşük w/c oranlarında daha iyi sonuçlara ulaşılır.
Yüksek fırın cürufu	Klor difüzyonuna karşı dirençlidir fakat özellikle uçucu külle karşılaştırılırsa, uçucu kül katılmış beton daha erken yüksek mukavemet gösterir.

Betona katılan belli başlı inhibitörler de korozyona karşı donatıyı korumaktadır. Bu katkılar; çelik donatı üzerinde koruyucu pasif filmin, klor iyonlarına karşı direncini artırır. Ayrıca; çelik donatı üzerinde bir film engeli oluşturur, klor iyonlarının

göçünü bloke eder, betonda bağlı olan klor iyonlarının miktarlarını artırır ve gözenek çözeltisinde erimiş oksijeni temizlerler. Belli başlı inhibitörler, Tablo6.2. de gösterilmiştir.

Tablo 6.2. Beton yapısında kullanılan inhibitörler.

Anodik İnhibitör	Katodik İnhibitör	Karma İnhibitörler
CaNO ₂	NaOH	- NH ₂
NaNO ₃	Na ₂ CO ₃	- SH
CaCl ₂	NH ₄ OH	-

Anodik inhibitörler arasında yeralan CaCl₂, yakın zaman kadar çok kullanılan bir priz hızlandırıcıyken ancak klor iyonu içerdiği için donatı korozyonuna yol açabildiğinden betonda kullanılmaları çoğu ülkede yasaklanmıştır. Bu inhibitör yerine CaNO₂ kullanımı yaygınlaşmıştır.

Tüm bu inhibitörler; beton yapısına yapım aşamasında katılacağı gibi korozyon hasarına uğramış betonarme bileşenlerde yüzeysel hasar onarım esnasında ayrıştırılmış hasarlı beton yerine ya da koruyucu bir beton tabakası içinde kullanılabilir.

Betonarme yapıların korozyona karşı dirençlerinde betonu oluşturan temel bileşenlerinde fonksiyonu oldukça fazladır. Bu bileşenleri sıralarsak;

1. Agregalar ↔ Deniz agregaları iyice temizlenmeli ve klor lekelerinden ayrıştırılmalıdır.
2. w/c oranı ve karışım suyunun niteliği ve miktarı ↔ w/c oranı mümkün olduğu kadar küçük bir değerde olmalı, gerektiğinde beton içine süperakışkanlaştırıcılar katarak fazla su ilavesi engellenmelidir. Gerekli olmadığı sürece karışım suyu olarak deniz suyu kullanılmamalıdır.
3. Paspayı betonu ↔ Paspayı kalınlığı, dış ortamdaki agresif iyonların beton içine nüfuzuna birebir etkileyen bir husustur. Bu nedenle, paspayı kalınlığını tespit etmeden önce betonun ilerde maruz kalabileceği ortamlar tespit edilmeli ve bu koşullarda yönetmeliklerde öngörülen değerler uygulanmalıdır.
4. Çimento seçimi ↔ Çimento seçimi, betonun geçirimsizliği ve beton ile donatının korozyonu açısından dikkatlice yapılmalıdır. Portland

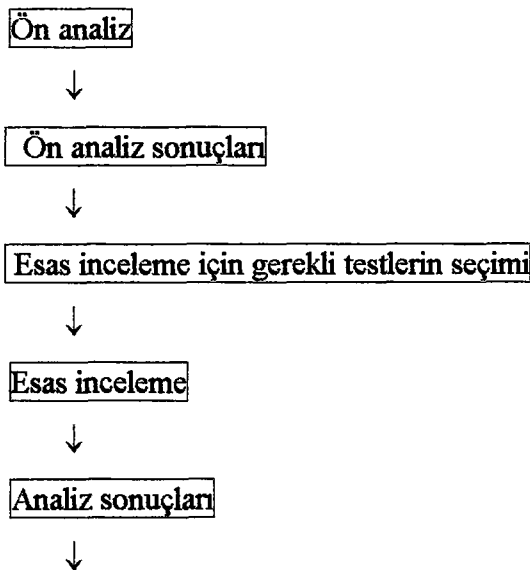
çimentosunun trikalsiyum alüminat bileşeni, Cl^- iyonları ile birleşerek Friedel tuzuna dönüşür ve böylece zararlı Cl^- iyonlarının bağlandıkları ve aktivitelerini yitirdikleri varsayılır. %5-8 arası C_3A içeren portland çimentolu betonların donatı korozyonuna karşı dirençlerinde büyük yükselmelere yol açtığı tespit edilmiştir. [6,17,18]

Yukarıda anlatıldığı gibi başlangıç aşamasında çevresel analiz yapıp yapı bileşenin maruz kalacağı sorunlar ve tehlikeler gözönüne alınıp yapısal bazı önlemler alınmadıkça korozyon problemi kaçınılmaz olacaktır.

Korozyona uğramış ve hasar oluşmuş yapı bileşenlerinde onarım için doğru analiz yapılması da şarttır. Onarım görmüş betonarme bileşenler üstünde korozyon olayının tekrardan ortaya çıkabilir. Yanlış yapılan yüzeysel onarımlar sonucu ortaya çıkabilecek bu olay, korozyon onarımının da ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Tüm bu çalışmadan çıkan diğer bir sonuçta; özellikle sürekli klor iyonlarına maruz köprülerde, deniz yapılarında ve park yapılarında en doğru çözümün elektrokimyasal tedavi uygulamak olduğudur. Fakat, öngörülmesi yapılarında elektrokimyasal tedavilerin hidrojen kırılma gerilimine ulaşabileceği de gözden kaçırılmaması gereken bir gerçektir.

Yukarıda anlatılanlar gözönüne alınarak, korozyon hasarlı bir yapıda en uygun onarım metodunu seçmek için aşağıda oluşturulan yöntem izlenebilir.



Hayır ← Problem korozyon mu?



Evet → Karbonatlaşma sebepli korozyon



Klor sebepli korozyon

Klor sebepli Korozyon



Sürekli klora maruz bir durum mu? Hayır

Evet ↓

Önerilmeli Beton mu? Evet

Hayır ↓

Elektriksel sürekliliği var mı? Hayır

Evet ↓

Elektrokimyasal tedavi isteniyor mu? Hayır

Evet ↓

Kısa süreli bir tedavi? Hayır

Evet ↓

Sürekli bir güç kaynağı sıkıntısı var mı? Hayır

Evet ↓

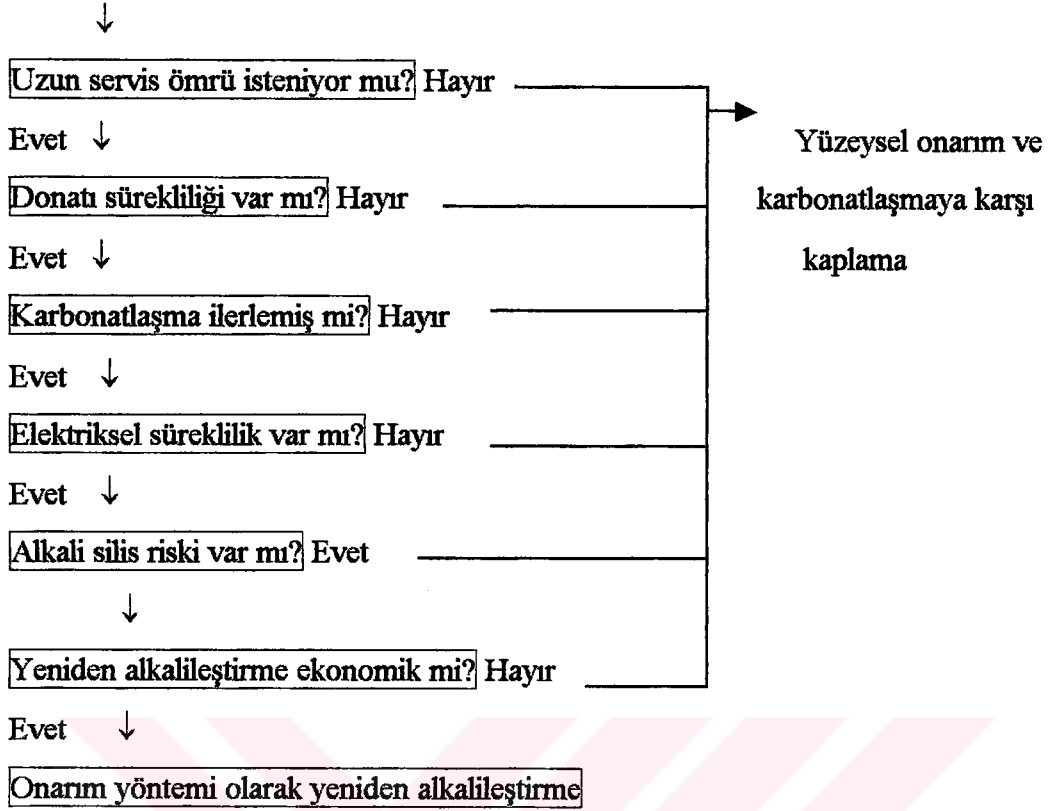
Klorün dıştan bir anotla ortamdan uzaklaştırılması

Yüzeysel onarım ve
geçişine karşı
yalıtım

Katodik koruma

Maliyet analizi

Karbonatlaşma sebepli korozyon



Yukarıda oluşturulmuş olan metot izlenerek, hasarlı yapılar için en uygun onarım tekniğine ulaşılamaya çalışılmıştır. Uygun olan tekniğede ulaşırken yapısal ve çevresel parametreler ve riskler gözönüne alınmıştır. Tüm bu tekniklerin belli başlı özellikleri aşağıda yer almaktadır.

Klor sebepli korozyona karşı onarım teknikleri

Yüzeysel onarım ve dış sıva ↔ Onarım yapılan yerde lokal bir etki gösterir. Ekstra onarımlar gerektiğinde maliyet artar. Hasarlı betonlar kaldırılırken donatıya kadar inildiğinde yapısal destek gerekebilir.

Yüzeysel onarım ve dış yüzey kaplama (overlay) ↔ Bu tekniğin etkisi, çıkarılan betonun klor seviyesine ve miktarına göre değişir. Hasarlı betonlar kaldırılırken, daha çok tabakalar kaldırılmak zorunda kalınırsa maliyet artar. Bu teknik; köprü tabliyeleri için doğru bir çözüm olabilir.

Katodik koruma ↔ Tedavi edilen alan boyunca olumlu sonuç verir. Periyodik olarak inceleme ve bakım gerektirir. Alkali silis reaksiyonunu ve öngerilmeli betonun hidrojen kırılganlığını kötüleştirebilir.

Klorün dıştan bir anotla ortamdan uzaklaştırılması ↔ Tedavi edilen alan boyunca olumlu sonuç verir. Çok yeni bir teknik olduğu için etki ömrü tam olarak

henüz bilinmemektedir. Bu metotla da alkali silis reaksiyonunun ve öngerilmeli betonun hidrojen kırılabilirliğinin artma riski vardır.

İnhibitörler ↔ Tedavi edilen alan boyunca olumlu sonuç verir. Çoğu inhibitörde çelik yüzeye ulaşma hızı bilinmemektedir. Düşük dozla uygulama çukurcuk korozyonuna yolaçabilir.

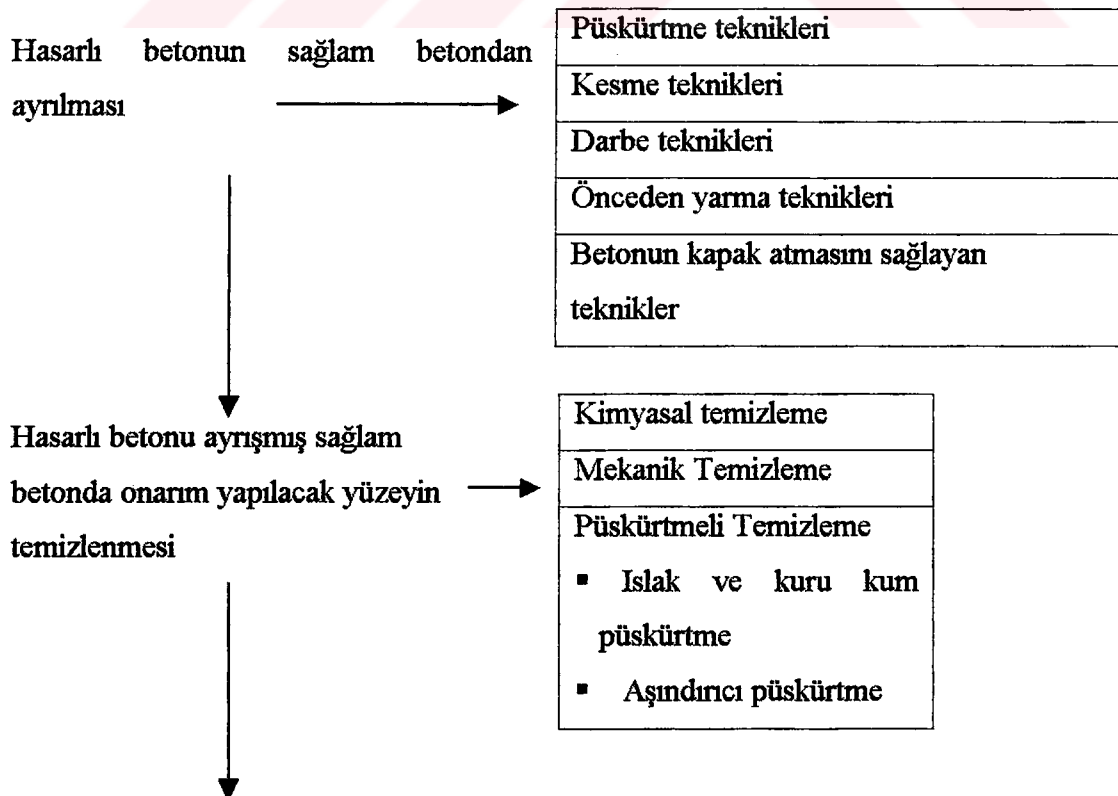
Karbonatlaşma sebepli korozyona karşı onarım teknikleri

Yüzeysel onarım ve dış yüzeyin sıvılaşması ↔ Onarım yapılan yerde etkili fakat lokal bir çözüm sunar. Ekstra onarımlar gerektiğinde maliyet artabilir. Hasarlı betonlar ayrıştırılırken donatıya kadar inildiğinde yapısal destek gerekebilir.

Tekrardan alkalileştirme ↔ Tedavi edilen alan boyunca olumlu sonuç verir. Yaklaşık 10 sene içinde tekrarlanması gerekebilir. Çünkü servis ömrü henüz tamamen bilinmemektedir. Bu tekniğin kullanılmasında Alkali silis reaksiyonunu ve öngerilmeli betonun hidrojen kırılabilirliğini kötüleştirebilir.

İnhibitörler ↔ Tedavi edilen alan boyunca olumlu bir sonuç verir. Çoğu inhibitörde çelik yüzeye ulaşma hızı bilinmemektedir. Düşük dozla uygulama çukurcuk korozyonuna yolaçabilir.

Onarım analizi sonucunda yüzeysel onarım yapılacaksa aşağıdaki adımları izlemek gerekir.



Hasarlı betonun ayrışmasından sonra
donatı ortaya çıkmışsa donatı
etrafındaki betonun temizlenmesi



Mekanik temizleme
Aşındırıcı püskürtme
Tazyikli su ile temizleme



Temizlenmiş donatıya korozyon
koruyucu bir katman sürülmesi



Epoksi
Çimento şerbeti
Akrilik lateks



Gerekliyse ek donatı ile takviye



Mevcut donatı ile kaynak yapma
Filiz ekme
Epoksi ile yapıştırma – karbon elyaf ile takviyede



Onarım beton veya harcının seçilmesi



Çimento esaslı malzeme
Reçine bazlı madde
i. Epoksi
ii. Üretan
iii. Polyester
Magnezyum fosfat betonu
Lif katkılı beton
Lateksle modifiye edilmiş beton



Yüzeysel onarım yapıldıktan sonra en üst
katman olarak korozyonun sebeplerine göre
koruyucu bir katman uygulaması

Yukarıda yeralan metodu izleyerek, yüzeysel hasar onarımı yaparken hangi yolların izlenmesi gerektiğini ve ne tür tekniklerin yer aldığı görülebilir. Burada en önemli olay; her aşamada sağlam betona zarar vermeyecek, durabilitesini bozmayacak teknikleri kullanmaktır. Ancak bu şekilde doğru bir onarım gerçekleşir ve yapıdan istenen performans sağlanabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Sağlam, A.**, 1999. “Deprem değil korozyon yıkacak”
www.hurriyet.com.tr/ozel/turk/99/10/08/ozehab/09oze.htm, 08 Ekim.
- [2] **Akman, S.**, 1999. “Deprem Hasarları ve Yapı Malzemeleri”, Hazır Beton, Eylül – Ekim.
- [3] **Doruk, M.**, 1982. “Korozyon ve Önlenmesi”, ODTÜ Mühendislik Fakültesi, Yayın No: 70, Ankara.
- [4] **Addleson, L. and Rice C.**, 1991. “Performance of Materials in Buildings”, Butterworth – Heinemann, London.
- [5] **Çakır A. F.**, 1994. “Türkiye’nin Metalik Korozyon Kaybı”, IV. Korozyon Sempozyumu, İTÜ, İstanbul, 25-27 Ekim.
- [6] **Akman, S.**, 1992. “Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi”, İTÜ Gemi İnşaat ve Deniz Bilimleri Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul.
- [7] **Hinks J. and Cook G.**, 1997. “The Technology of Building Defects”, E & FN Spon, London.
- [8] **Mailvaganam, N. P.**, 1992. “Durability”, Repair and Protection of Concrete Structures, sf 131-191, CRC Press, London.
- [9] **Anonim.**, 2000. “Frost damage to poor repair-detail”, Richard Birchall Associates, www.surveyor.dircon.
- [10] **Akman, S.**, 2000. “Yapı Hasarları ve Onarım İlkeleri”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul.
- [11] **Postacıoğlu, B.**, 1986. “Beton Cilt 1”, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- [12] **ACI Committee 201 Report**, 1991. “Guide to Durable Concrete”, ACI Manual of Concrete Practice Part 2, American Concrete Institute, Detroit.
- [13] **Cebeci, E.**, 1988. “Betonda Karbonatlaşma”, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [14] **Matulionis, R. C., Freitag, J. C.**, 1991. “Preventive Maintenance of Buildings”, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, New York.
- [15] **Anonim.**, 20001. G.M. Idorn Consult Homepage, www.gmic.dk.
- [16] **Broomfield, J. P.**, 1997. “Corrosion of Steel in Concrete”, E & FN Spon, London.
- [17] **ACI Committee 222 Report**, 1989. “Corrosion of Metals in Concrete”, ACI Manual of Concrete Practice1, American Concrete Institute, Detroit.
- [18] **Akman, S.**, 2000. “Betona Gömülü Çeliğin Korozyonu, Riskin Saptanması, Önlemler ve Onarımı”, Sika Teknik Bülten, sayı 4, 3-10.

- [19] **ACI Committee 224 Report**, 1990. "Causes, Evaluations, and Repair of Cracks in Concrete Structures", ACI Manual of Concrete Practice 3, American Concrete Institute, Detroit.
- [20] **Verbeck, G. J.**, 1996. "Mechanism of Corrosion of Steel in Concrete", Concrete Repair and Protection Training Seminar, Sika Corporation, London, 16 – 17 April.
- [21] **Beckmann, P.**, 1995. "Structural Aspects of Building Conservation", McGraw Hill Book Company, London.
- [22] **Anonim.**, 2001. Institute of Corrosion and Protection Pontifical Catholic University of Peru Homepage, www.pucp.edu.pe.
- [23] **Anonim.**, "Corrosion to balcony frame and concrete reinforcement", Richard Birchall Associates, www.surveyor.dircon.co.
- [24] **Nanni, A., Lista, W. L.**, 1988. "Concrete Cracking in Coastal Areas: Problems and Solutions", Concrete International, volume 10, number 12, 67-73.
- [25] **Hansson, C. M., Sorensen, B.**, 1990. "The Threshold Concentration of Chloride in Concrete for the Initiation of Reinforcement Corrosion", Corrosion Rates of Steel in Concrete", ASTM STP 1065, N. S. Berke, V. Chaker, and D. Whiting, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 3-16.
- [26] **Chandler K. A.**, "Marine and Offshore Corrosion", Butterworths, London.
- [27] **Anonim.**, 2001. "Repairing and strengthening of Near Shore Structures and Pile Renovations", İzomas Teknik Broşür, İstanbul.
- [28] **Walker, H. C.**, 1998. "Parking Structures Durability", Concrete International, volume 20, number 7, 53-55.
- [29] **ACI Committee 362.**, 1993. "State-of-the-Art Report on Parking Structures", ACI Manual Of Concrete Practice Part 4, American Concrete Institute, Detroit.
- [30] **Etiman, Rasin.**, 1995. "Türkiye’de Öngerilim Uygulamalarına Genel Bakış", İ.T.Ü. Ayazağa Kampüsü, İstanbul.
- [31] **Henriksen C. F., Knudsen A., Braestrup M.W.**, 1998. "Cable Corrosion: Undetected?", Concrete International, volume 20, number 10, 69-93.
- [32] **Postacıoğlu, B.**, 1987. "Beton Cilt 2", Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- [33] **Karagüler, M. E., Kocataşkın, F.**, 1980. "Deniz Agregalarının Betonda Kullanılma Olanakları", Tübitak VII. Bilim Kongresi, Kuşadası-Aydın, 915 - 928
- [34] **Mailvaganam, N. P.**, 1992. "Admixtures", Repair and Protection of Concrete Structures, sf 121-128, CRC Press, London.
- [35] **Neville, A.**, 1998. "Concrete Cover To Reinforcement -or Cover-Up?", Concrete International, volume 20, number 11, 25-28.
- [36] **Kaya, Y.**, 2001. "Beton Örtüsü (PasPayı) Konusunda Bilgiler", Yapı Malzemesi ve Deprem Sempozyumu, İTÜ Taşkışla, 14-16 Mart.
- [37] **Matta, Z. G.**, 1998. "Concrete Practices In The Arabian Gulf Region", Concrete International, volume 20, number 7, 51-53.

- [38]**Avcı, Eşref**, 1998. "Betonarme Yapılardaki Çeliklerin Korozyonuna Puzolanın Etkisi", I.Korozyon Sempozyumu, Ankara.
- [39]**Mailvaganam, N. P., Hemmings, R. T.**,1992."Science of Concrete and Polymeric Building Materials", Repair and Protection of Concrete Structures, sf 8-25, CRC Press, London.
- [40]**ACI Committee 226.**, 1987. "Use of Fly Ash in Concrete", ACI Manual of Concrete Practice Part 1, American Concrete Institute, Detroit.
- [41]**Berke, N. S., Pfeifer, D. W., Weil, T. G.**, 1988. "Protection Against Chloride Induced Corrosion", Concrete International, volume 10, number 12, 45-56.
- [42]**Scanlon, J. M., Sherman, M. R.**, 1996. "Fly Ash Concrete: An Evaluation of Chloride Penetration Testing Methods", Concrete International, volume 18, number 6, 57-63.
- [43]**Marusin, S. L.**, 1988. "Influence of Superplasticizers, Polymer Admixtures, and Silica Fume in Concrete on Chloride Ion Permeability", Permeability of Concrete, sf 19-35, American Concrete Institute, Detroit.
- [44]**Anonim.**, 2001. "How silica fume works", <http://www.norchem.com>.
- [45]**Ozyildirim, C., Halstead, W.**, 1988. "Resistance to Chloride Ion Penetration of Concretes Containing Fly Ash, Silica Fume, or Slag, Permeability of Concrete", sf 19-35, American Concrete Institute, Detroit.
- [46]**Perraton, D., Aitcin, P. C., Vezina, D.**, 1988. "Permeabilities of Silica Fume Concrete, Permeability of Concrete", sf 63-85, American Concrete Institute, Detroit.
- [47]**Lachemi, M., Li, G., Tagnit-Hamou, and Aitcin, P. C.**, 1998. "Long-Term Performance of Silica Fume Concretes", Concrete International, volume 20, number 1, 59-66.
- [48]**Soutsos, M. N., Panteli, F., Kyriacos, K. K.**, 1996. "Examples of Silica Fume Usage in Cyprus", Concrete International, volume 18, number 4, 37-43.
- [49]**ACI Comitte 226.**, 1987. "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete", ACI Manual of Concrete Practice Part 1, American Concrete Institute, Detroit.
- [50]**Mailvaganam, N. P., Deans, J. J., Cleary, K.**, 1992. "Corrosion Protection, Repair and Protection of Concrete Structures", sf 271-286, CRC Press, London.
- [51]**Anonim.**, 2001. "RustFree Hot Dip Galvanized Rebar Excels Over Epoxy Rebar", www.rustfreetrucks.com/rebar/.
- [52]**Anonim.**, 2001. "C-Bar® Reinforcement Bars", Marshall Industries Homepage, www.c-bar.com/intcnar.htm.
- [53]**Wang, S. X., Lin, W. W., Ceng, S. A., and Zhang, J. Q.**, 1998. "Corrosion Inhibitors of Reinforcing Steel By Using Acrylic Latex", Cement and Concrete Research, volume 28, number 5, 649-655.
- [54]**Anonim.**, 2000. "Patch Repairs", Mg Associates Homepage, www.mgassoc.co.uk/concrete.htm.

- [55]Mailvaganam, N. P., Deans, J. J., Cleary, K., 1992. "Substrate Preparation", Repair and Protection of Concrete Structures, sf 231-240, CRC Press, London.
- [56]Deans, J., Mailvaganam, N. P., 1992. "Special Techniques, Repair and Protection of Concrete Structures", sf 306-337, CRC Press, London.
- [57]Mailvaganam N. P., Deans, J., 1992. "Patching and Resurfacing", Repair and Protection of Concrete Structures, sf 241-254, CRC Press, London.
- [58]Anonim., 2001. "Fiber reinforcement", SI® Concrete Systems Homepage, www.fibermesh.com.
- [59]Acun, S., 2000. "Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Dizayn Parametresi Olarak Lifsel Katkıların İrdelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [60]Okba, S. H., El-Dieb, A. S. and Reda, M. M., 1997. "Evaluation of The Corrosion Resistance of Latex Modified Concrete", Cement and Concrete Research, volume 27, number 6, 861-869.
- [61]Anonim., 1999. "Beton Elemanların Onarımında Epoksi Sistemleri ve Uygulamaları", Duratek ® Koruyucu Malzemeler San. ve Tic. A.Ş., İstanbul.
- [62]Wheat, H. G., 1990. "Corrosion Rate Determination on Repaired Reinforced Concrete Specimens", Corrosion Rates of steel in Concrete, ASTM STP 1065, N. S. Berke, V. Chaker, and D. Whiting, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 52-65.
- [63]Gianetti, F., Akman, S., 1994. Betonarmenin Dayanıklılığını Geliştirmek Üzere Korozyon İnhibitörü Olarak Kalsiyum Nitrit Kullanımı, IV. Korozyon Sempozyumu, İstanbul, 25-27 Ekim.
- [64]Schnerch, D. A., 1999. "Investigation of Steel Reinforcement Corrosion Protection by Chemical Admixture in Repaired Structural Concrete", *Ms Thesis*, The Department of Civil and Geological Engineering, Faculty of Engineering, The University of Manitoba, <http://home.cc.umanitoba.ca/~umschne/corrosion/theis.html>
- [65]Hansson, C. M., Mammoliti, L., and Hope, B. B., 1998. "Corrosion Inhibitors In Concrete – Part I: The Principles", Cement and Concrete Research, volume 28, number 12, 1775-1783.
- [66]Mailvaganam, N. P., Deans, J. J., 1992. "Patching and Resurfacing Materials", Repair and Protection of Concrete Structures, sf 44-85, CRC Press, London.
- [67]Anonim., 2001. "Sika FerroGard® - 903, Sika Deteks Teknik Broşürü, İstanbul.
- [68]Anonim., 2001. "The Problem: Corrosion of Steel in Concrete", Southern Cathodic Protection Company Homepage, www.cathodicprotection.com.
- [69]Funahashi, M., 1995. "Cathodic Protection Systems For New RC Structures", Concrete International, volume 17, number 7, 28-32.

EKLER

EK A. BETONARME YAPILARDA KOROZYON ÖRNEKLERİ

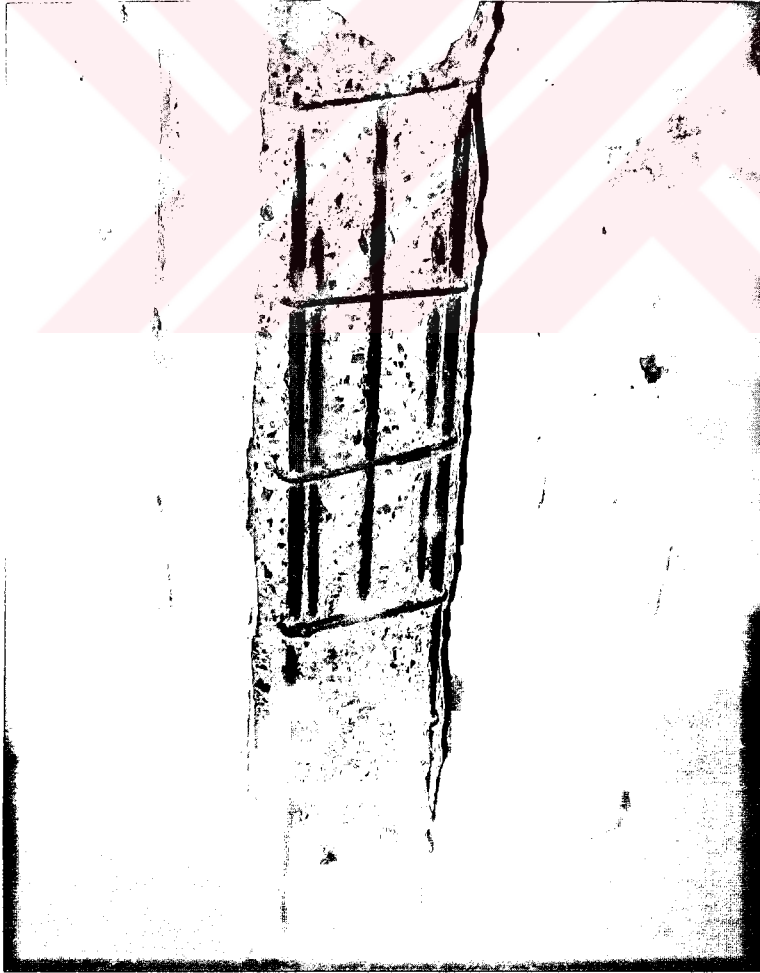




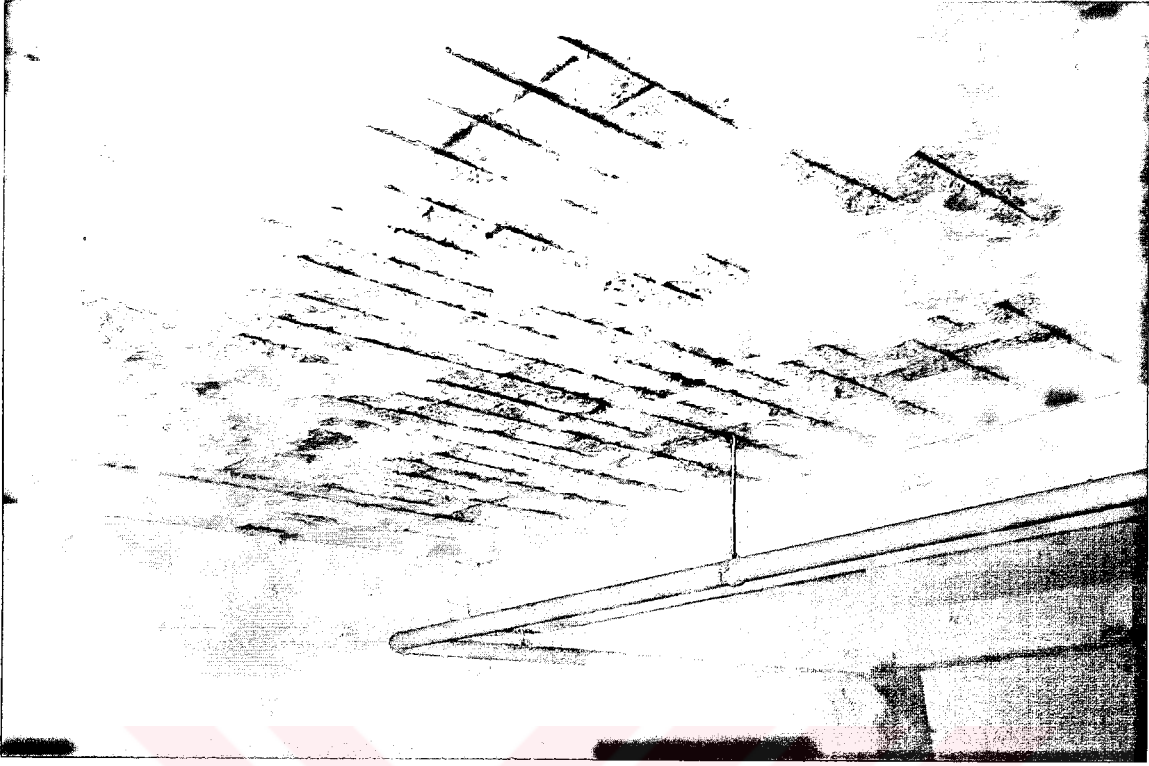
Şekil A.1. Bir betonarme kolonda, hasarlı betonun çıkarılmasından sonra ortaya çıkmış, korozyonlu donatılar.



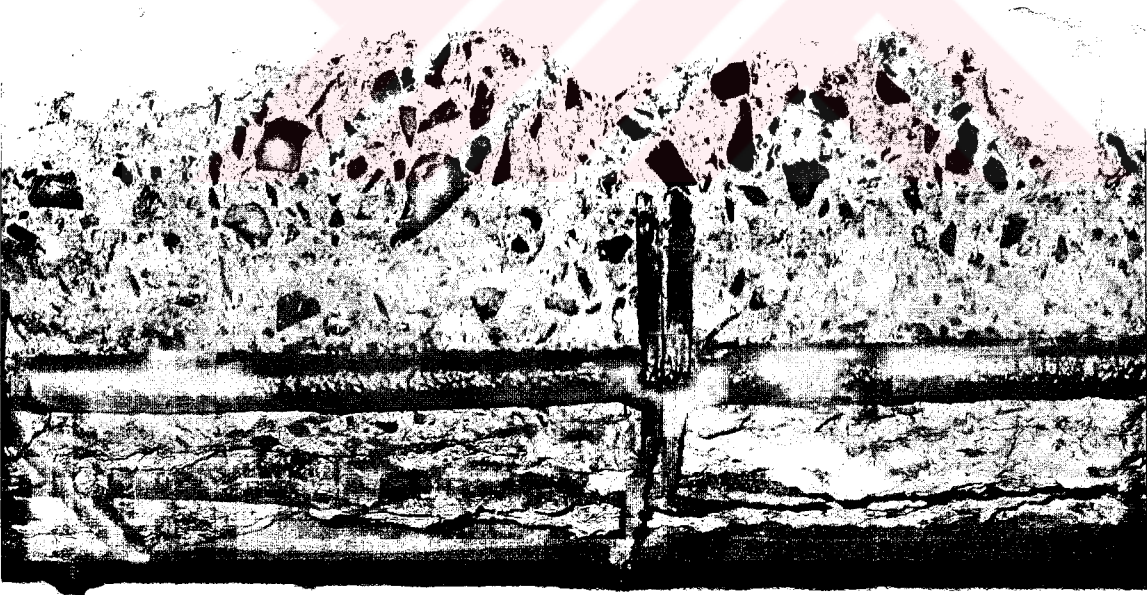
Şekil A.2. Korozyona uğramış betonarme bir elemanda, paspayının atması ve açığa çıkan donatılar.



Şekil A.3. Korozyona uğramış kolon örneği .



Şekil A.4. Korozyona uğramış döşeme örneği.



Şekil A.5. Korozyona uğramış kiriş örneği.

**EK B. TAŞKIŞLA'DA YÜZEYSEL HASAR
ONARIM TEKNİĞİ KULLANIMI**

