

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

**BETON YAPILARDA DONATI KOROZYONUNUN
ÖNLENMESİNE YÖNELİK TEDBİRLERİN ARAŞTIRILMASI**

ÖZLEM AYDIN

**DOKTORA TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ÜRETİM PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. ZEKİ ÇİZMECİOĞLU**

İSTANBUL, 2012

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

**BETON YAPILARDA DONATI KOROZYONUNUN
ÖNLENMESİNE YÖNELİK TEDBİRLERİN ARAŞTIRILMASI**

ÖZLEM AYDIN

**DOKTORA TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ÜRETİM PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. ZEKİ ÇİZMECİOĞLU**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETON YAPILARDA DONATI KOROZYONUNUN ÖNLENMESİNE
YÖNELİK TEDBİRLERİN ARAŞTIRILMASI

Özlem AYDIN tarafından hazırlanan tez çalışması 14.09.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Zeki ÇİZMECİOĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Zeki ÇİZMECİOĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet EKERİM

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Muhlis Nezihi SARİDEDE

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Eşref AVCI

Yalova Üniversitesi

Doç. Dr. Recep ARTIR

Marmara Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanması sırasında bana yol gösteren ve yardımları ile çalışmalarımı yönlendiren çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Zeki ÇİZMECİOĞLU'na, deneysel çalışmalarım esnasında yardım ve desteklerini esirgemeyen İstanbul Büyükşehir Belediyesi İston Fabrikası Genel Müdürü Sn.Ahmet AĞIRMAN'a, ARGE Laboratuvarı Şefi Sn. Fatih ÖZALP'e ve ARGE Laboratuvarı sorumlusu Sn. Rıza YEŞİL'e, Bimtaş Genel Müdürü Sn. Arif Peyami BAŞKARACA'ya, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Öğretim Üyelerinden Sayın Y. Doç. Dr. Özgür ÇAKIR'a, Araştırma Görevlilerinden Sn. Mansur TÜFEKÇİ'ye, Alper Isıl İşlem A.Ş. Fabrika müdürü değerli arkadaşım Sn. Sinan YILDIZ'a, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. Ürün Mühendisi Sn.Yavuz ŞAHİN'e, korozyon deney düzeneğinin kurulmasında yardımcı olan İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Öğretim Üyelerinden Sayın Y. Doç. Dr. Ünal Anıl DOĞAN'a ve İnşaat Mühendisliği Bölümü Teknisyenlerinden Sn. Mahmut Şamlı'ya, İGDAŞ A.Ş. Ar-Ge Müdürü Sn.Bülent DEMİRCAN'a çalışmalarım sırasında beni maddi ve manevi olarak her zaman destekleyen babam Ali AYDIN'a ve annem Semra AYDIN'a en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım.

Eylül, 2012

Özlem AYDIN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xvii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	4
1.3 Hipotez.....	4
BÖLÜM 2	
KOROZYON TEORİSİ.....	6
2.1 Korozyonun Tanımı.....	6
2.2 Korozyona Etki Eden Faktörler ve Korozyon Mekanizması.....	6
BÖLÜM 3	
BETON YAPILARDA DONATI KOROZYONU.....	12
3.1 Betonun Yapısı, Bileşenleri ve Durabilitesi.....	12
3.1.1 Betonun Kılcal Su Emme Miktarının Belirlenmesi.....	14
3.1.2 Hızlı Klorür Geçirimsizliği Yöntemi.....	15
3.1.3 Aderans Kavramı.....	17
3.2 Korozyon Kontrolünde Etkili Olabilecek Beton Bileşenleri ve İşlem Parametreleri.....	19
3.2.1 Çimento Cinsi ve Dozajı.....	19
3.2.1.1 Pozolanlı Çimentolar.....	22
3.2.1.1.1 Traslı Çimentolar.....	22
3.2.1.1.2 Uçucu Küllü Çimentolar.....	22
3.2.1.1.3 Yüksek Fırın Cüruf Çimentoları.....	23

3.2.1.1.4 Silis Dumanı (Silica Fume) Katkılı Çimentolar.....	24
3.2.2 Mineral Katkı Tipi.....	27
3.2.3 Agregat Tipi.....	28
3.2.4 Su/çimento oranı.....	29
3.2.5 Beton dökümü.....	30
3.2.6 Beton kuru.....	31
3.2.7 Beton Rutubeti.....	32
3.3 Beton Yapılarda Donatı Korozyonunun Mekanizması.....	32
3.4 Beton Yapılarda Donatı Korozyonuna Etki Eden Faktörler.....	38
3.4.1 Pasifliğin Klorür İyonu Etkisi ile Bozulması.....	38
3.4.2 Karbonatlaşma Reaksiyonunun Beton İçerisindeki Donatı Korozyonuna Etkisi.....	42
3.5 Korozyon Riskinin Belirlenmesi.....	43
3.5.1 Potansiyel Ölçümü.....	44
3.5.2 Lineer Polarizasyon Direnç.....	49
3.5.2.1 Galvanostatik Yöntemle Polarizasyon Ölçümleri (I) Üç Elektrot Yöntemi (II) İki Elektrot Yöntemi.....	50
3.5.3 Beton Rezistivitesinin Ölçülmesi.....	51
3.5.4 Korozyon Sunucu Donatılarda Oluşan Ağırlık Kayıplarının İncelenmesi.....	52
BÖLÜM 4	
BETON YAPILARDA DONATI KOROZYONUNUN ÖNLENMESİNE	
YÖNELİK TEDBİRLER.....	54
4.1 Beton Karışımında İnhibitör Kullanılması.....	54
4.2 Donatının Kaplanması.....	65
4.2.1 Epoksi Kaplamalı Donatı.....	67
4.2.2 Galvanize Çelik Donatı.....	71
4.2.3 Paslanmaz Çelik Donatı.....	76
4.2.4 Nikel Kaplamalı Donatı.....	78
4.3 Betonda Tıkayıcılar Kullanılması.....	80
4.3.1 Bezir Yağı (Linseed Oil).....	82
4.3.2 Epoksi.....	82
4.3.3 Silan ve Siloksan.....	83
4.3.4 Metakrilat.....	84
4.4 Su Geçirimsiz Kalitede Beton Üretimi.....	85
4.4.1 Pas Payı.....	86
4.4.2 Düşük Su/Çimento Oranı.....	86
4.4.3 Mineral Katkılar.....	87
4.4.3.1 Silis Dumanı.....	90
4.4.3.2 Yüksek Fırın Curufu.....	92
4.4.3.3 Uçucu Kül.....	93
4.5 Katodik Koruma Teorisi ve Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma.....	97
4.5.1 Katodik Koruma Teorisi.....	97
4.5.2 Minimum Potansiyel Yaklaşımı.....	100
4.5.3 Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma (Etkin Akım).....	100
4.5.4 Galvanik Anotlu Katodik Koruma.....	102

4.6	Beton Örtüleri.....	105
4.6.1	Latex Modifiyeli Beton Örtüsü.....	105
4.6.2	Düşük Akma Yoğunluklu Beton Örtüsü.....	105
4.6.3	Silis Dumanlı Beton Örtüsü	106
4.6.4	Polimer Beton Örtüsü.....	106
4.7	Betonun Kılıf (membran) İçerisine Alınması.....	106
4.7.1	Sürülerek sıcak uygulanan termoplastik malzemeler (Sıcak bitüm).....	107
4.7.2	Soğuk uygulanan solüsyon ve emülsiyonlar.....	108
4.7.2.1	İki Bileşenli Polimer Yalıtım Malzemeleri	108
4.7.3	Polimer örtüler.....	108
 BÖLÜM 5		
DENEYSEL ÇALIŞMA.....		110
5.1	Kullanılan Malzemeler.....	112
5.1.1	Çimento.....	112
5.1.2	Çelik Donatılar.....	114
5.1.3	Sanayi Tuzu.....	114
5.1.4	Betonarme Numunelerde Kullanılan Katkı Malzemeleri.....	115
5.1.4.1	Sika Ferro Gard 901.....	115
5.1.4.2	Tekno Bond 650.....	116
5.1.4.3	Sika Gard -703 W.....	116
5.1.4.4	Sika Ferro Gard -903.....	116
5.1.4.5	Sika Mono Top -610.....	116
5.1.4.6	Tecno Silica.....	117
5.1.4.7	Sıcak Daldırma Galvaniz Kaplama.....	117
5.1.5	Agregalar.....	118
5.2	Beton Karışım Oranları.....	118
5.3	Üretilen Numune Tipleri ve Kür Süresi.....	120
5.4	Yapılan Deneyler	120
5.4.1	Yarı Hücre Potansiyel Ölçümü Deney Düzeneği.....	121
5.4.2	Korozyon Hızı Ölçümleri Deney Düzeneği.....	123
5.4.3	Betonarmeye Gömülü Çelik Donatıların Mikro Yapı İncelemesi Deney Düzeneği.....	126
5.4.4	Aderans Ölçümü Deney Düzeneği.....	128
5.4.5	Basınç Dayanımı Deney Düzeneği.....	128
5.4.6	Yarmada - Çekme Dayanımı Ölçümü Deney Düzeneği.....	129
5.4.7	Katodik Koruma Deney Düzeneği.....	130
5.4.7.1	Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Deney Düzeneği.....	130
5.4.7.2	Galvanik Anotlu Katodik Koruma Deney Düzeneği	131
5.5	Yarı Hücre Potansiyel Ölçümü Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	132
5.6	Korozyon Hızı Ölçümü Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	151
5.7	Mikro Yapı İncelemeleri Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	169
5.8	Aderans Dayanımı Ölçümü Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	178
5.9	Basınç Dayanımı Ölçümü Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	191

5.10	Yarmada-Çekme Dayanımı Ölçümü Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	192
5.11	Betonarme Numunelere Katodik Koruma Uygulanması.....	194
5.11.1	Betonarme Numunelere Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Uygulanması.....	194
5.11.2	Betonarme Numunelere Galvanik Anotlu Katodik Koruma Uygulanması.....	198
5.12	Ekonomik Değerlendirme.....	200
5.12.1	Korozyon Önleyici Katkı Malzemelerinin Ekonomik Değerlendirmesi.....	200
5.12.2	Katodik Korumanın Ekonomik Değerlendirmesi.....	220
5.12.2.1	Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma İçin Ekonomik Değerlendirme.....	220
5.12.2.2	Galvanik Anotlu Katodik Koruma İçin Ekonomik Değerlendirme.....	222
5.13	Betonarme Yapılarda Korozyona Karşı Alınabilecek Önlemlerin Seçimi.....	225
5.14	Kentsel Dönüşüm.....	228
BÖLÜM 6		
SONUÇ VE ÖNERİLER.....		233
KAYNAKLAR.....		238
ÖZGEÇMİŞ.....		246

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Köprü Ayağında Görülen Hasar.....	2
Şekil 1.2 Korozyonun Betonun Dışına Çıkmaya Başlaması Hali.....	2
Şekil 1.3 İncelenen Binaların Korozyon Durumuna ve Yaşlarına Göre Dağılımı.....	3
Şekil 2.1 Korozyon Hücresi.....	9
Şekil 3.1 Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deney Düzenegi Şeması.....	17
Şekil 3.2 Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deney Düzenegi.....	17
Şekil 3.3 Porozite ve Geçirimsizlik Arasındaki Farkın Gösterimi.....	31
Şekil 3.4 Betondaki Çeliğin Korozyonunun Şematik Gösterimi.....	35
Şekil 3.5 Çelik Donatı Üzerinde Oluşan Korozyon Tepkimeleri.....	36
Şekil 3.6 Donatı Çeliğinde Klor Kaynaklı Korozyon Oluşumu.....	39
Şekil 3.7 Yarı Hücre Potansiyel Ölçümü.....	44
Şekil 3.8 Lineer polarizasyon Direnç Ölçüm Düzenegi.....	51
Şekil 4.1 Tipik Katodik Koruma Sistem Tertibatı.....	98
Şekil 5.1 Küp ve Lolipop Silindirik Numunelere Ait Fotoğraf.....	120
Şekil 5.2 Lolipop Silindirik Numunelerin NaCl Çözeltisindeki Görünüşü.....	122
Şekil 5.3 Yarı Hücre Potansiyel Ölçümü Deney Düzenegi.....	122
Şekil 5.4 Gecor 8 Korozyon Ölçüm Cihazı.....	124
Şekil 5.5 Lineer polarizasyon eğrisi (η :Potansiyel fark, i : Uygulanan akım)	125
Şekil 5.6 Olympus Optik Mikroskobu.....	126
Şekil 5.7 Bakalite Alınmış Numuneler.....	127
Şekil 5.8 Kesilmiş Numuneler.....	127
Şekil 5.9 Otomatik Polisaj Cihazı.....	127
Şekil 5.10 Aderans Ölçümü Deney Düzenegi.....	128
Şekil 5.11 Beton Pres Makinesi.....	129
Şekil 5.12 Yarmada Çekme Deney Makinası.....	130
Şekil 5.13 Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Deney Düzenegi.....	131
Şekil 5.14 Galvanik Anotlu Katodik Koruma Deney Düzenegi.....	132
Şekil 5.15 Sika Mono Top -610 Kaplamalı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Yarı Hücre Potansiyel-Zaman Grafiği.....	133
Şekil 5.16 Katodik Proses Kütle Transferi Kontrolü Altındayken Korozyon Potansiyelleri ve Akımlarını Gösteren Polarizasyon Diyagramı.....	136
Şekil 5.17 Sika Ferro Gard 901 Katkılı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Yarı Hücre Potansiyel-Zaman Grafiği.....	137

Şekil 5.18	Sika Ferro Gard 903 Kaplamalı(Sürmeli) Numuneler ve Kontrol Numuneleri Yarı Hücre Potansiyel-Zaman Grafiği.....	138
Şekil 5.19	Sika Ferro Gard 703 Kaplamalı (Sürmeli) Numuneler ve Kontrol Numuneleri Yarı Hücre Potansiyel-Zaman Grafiği.....	140
Şekil 5.20	Tekno Bond 650 Epoksi Kaplamalı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Yarı Hücre Potansiyel-Zaman Grafiği.....	142
Şekil 5.21	Sıcak Daldırma ile Donatıları Çinko Kaplamalı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Yarı Hücre Potansiyel-Zaman Grafiği.....	143
Şekil 5.22	pH'ın Saf Çinkonun Korozyon Hızına Etkisi.....	145
Şekil 5.23	Harca Daldırılmış Galvanize Çeliğin Yarı Hücre Potansiyel Profili...	146
Şekil 5.24	Tekno Silica Silis Dumanı Katkılı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Yarı Hücre Potansiyel-Zaman Grafiği.....	147
Şekil 5.25	Donatıları Kaplamalı Numunelerin ve Müşahit Numunelerin 90 Gün Sonundaki Yarı Hücre Potansiyel Değerleri Karşılaştırması.....	149
Şekil 5.26	Beton Harçlarında Katkı İçeren Numunelerin ve Müşahit Numunelerin 90 Gün Sonundaki Yarı Hücre Potansiyel Değerleri Karşılaştırması.....	150
Şekil 5.27	Beton Yüzeyleri Sürme Esaslı Kaplamalı Numunelerin ve Müşahit Numunelerin 90 Gün Sonundaki Yarı Hücre Potansiyel Değerleri Karşılaştırması.....	150
Şekil 5.28	Sika Mono Top -610 Kaplamalı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Korozyon Akım Yoğunluğu($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) -Zaman Grafiği.....	152
Şekil 5.29	Sika Ferro Gard 901 Katkılı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Korozyon Akım Yoğunluğu($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) -Zaman Grafiği.....	154
Şekil 5.30	Sika Ferro Gard 903 Kaplamalı (Sürmeli) Numuneler ve Kontrol Numuneleri Korozyon Akım Yoğunluğu($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) - Zaman Grafiği..	156
Şekil 5.31	Sika Ferro Gard 703 W Kaplamalı (Sürmeli) Numuneler ve Kontrol Numuneleri Korozyon Akım Yoğunluğu($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) - Zaman Grafiği...	157
Şekil 5.32	Tecno bond 650 Epoksi Kaplamalı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Korozyon Akım Yoğunluğu($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) - Zaman Grafiği...	160
Şekil 5.33	Sıcak Daldırma Galvaniz Kaplamalı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Korozyon Akım Yoğunluğu($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) - Zaman Grafiği...	161
Şekil 5.34	Tecno Silica Silis Dumanı Katkılı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Korozyon Akım Yoğunluğu($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) - Zaman Grafiği.....	163
Şekil 5.35	Donatıları Kaplamalı Numunelerin ve Müşahit Numunelerin 90 Gün Sonundaki Korozyon Akım Yoğunluğu Değerleri Karşılaştırması.....	165
Şekil 5.36	Beton Harçlarında Katkı İçeren Numunelerin ve Müşahit Numunelerin 90 Gün Sonundaki Korozyon Akım Yoğunluğu Değerleri Karşılaştırması.....	167
Şekil 5.37	Beton Yüzeylerinde Sürme Esaslı Kaplama Bulunan Numunelerin ve Müşahit Numunelerin 90 Gün Sonundaki Korozyon Akım Yoğunluğu Değerleri Karşılaştırması.....	168
Şekil 5.38	Sika Monotop 610 ile Kaplamalı Numunenin Optik Mikroskop Görüntüsü (X 200 ve dağlanmış).....	169
Şekil 5.39	Sika Ferro Gard 901 Katkılı Numunenin Optik Mikroskop Görüntüsü (X200 ve %3 Nital ile dağlanmış).....	170
Şekil 5.40	Sika Ferro Gard 903 Kaplamalı (sürmeli) Numunenin Optik Mikroskop Görüntüsü (X200 ve %3 Nital ile dağlanmış).....	171
Şekil 5.41	Sikagard-703 W Kaplamalı (sürmeli) Numunenin Optik Mikroskop Görüntüsü (X 200 ve %3 Nital ile dağlanmış).....	172

Şekil 5.42	Tecno Bond 650 Epoksi Kaplamalı Numunenin Optik Mikroskop Görüntüsü (X 200 ve %3 Nital ile dağlanmış).....	173
Şekil 5.43	Sıcak Daldırma ile Çinko Kaplamalı Numunenin Optik Mikroskop Görüntüsü (X200 ve %3 Nital ile dağlanmış).....	174
Şekil 5.44	Tecno Silica Silis Dumanı Katkılı Numunenin Optik Mikroskop Görüntüsü (X200 ve %3 Nital ile dağlanmış).....	175
Şekil 5.45	Katkısız Kontrol Numunesinin (müşahit) Optik Mikroskop Görüntüsü (X200 ve %3 Nital ile dağlanmış).....	175
Şekil 5.46	Katkısız Kontrol Numunesinin (müşahit) Optik Mikroskop Görüntüsü (X200 ve dağlanmamış).....	176
Şekil 5.47	Katkısız Kontrol Numunesinin (müşahit) Optik Mikroskop Görüntüsü (X200 ve %3 Nital ile dağlanmış).....	176
Şekil 5.48	Katkısız Kontrol Numunesinin (müşahit) Optik Mikroskop Görüntüsü (X200 ve dağlanmamış).....	176
Şekil 5.49	Donatıları Kaplamalı Numunelere ve Müşahit Numunelere Ait 90 Günün Sonunda Ölçülen Oksit Tabaka Kalınlıkları.....	177
Şekil 5.50	Beton Harçlarında Katkı İçeren Numunelere ve Müşahit Numunelere Ait 90 Günün Sonunda Ölçülen Oksit Tabaka Kalınlıkları.....	177
Şekil 5.51	Beton Yüzeylerinde Sürme Esaslı Kaplama İçeren Numunelere ve Müşahit Numunelere Ait 90 Günün Sonunda Ölçülen Oksit Tabaka Kalınlıkları.....	178
Şekil 5.52	Sika Monotop 610 Kaplamalı Numunelerin ve Bunlara Ait Kontrol Numunelerinin Aderans Dayanımı (Mpa) Karşılaştırma Grafiği.....	179
Şekil 5.53	Sika Ferro Gard-901 Katkılı Numunelerin ve Bunlara Ait Kontrol Numunelerinin Aderans Dayanımı (Mpa) Karşılaştırma Grafiği.....	180
Şekil 5.54	Sika Ferro Gard-903 Kaplamalı (Sürmeli) Numunelerin ve Bunlara Ait Kontrol Numunelerinin Aderans Dayanımı (Mpa) Karşılaştırma Grafiği.....	182
Şekil 5.55	Sika Ferro Gard-703 W Kaplamalı (Sürmeli) Numunelerin ve Bunlara Ait Kontrol Numunelerinin Aderans Dayanımı (Mpa) Karşılaştırma Grafiği.....	183
Şekil 5.56	Tecno Bond 650 Epoksi Kaplamalı Numunelerin ve Bunlara Ait Kontrol Numunelerinin Aderans Dayanımı (Mpa) Karşılaştırma Grafiği.....	185
Şekil 5.57	Sıcak Daldırma Çinko Kaplamalı Numunelerin ve Bunlara Ait Kontrol Numunelerinin Aderans Dayanımı (Mpa) Karşılaştırma Grafiği.....	186
Şekil 5.58	Tecno Silica Silis Dumanı Katkılı Numunelerin ve Bunlara Ait Kontrol Numunelerinin Aderans Dayanımı (Mpa) Karşılaştırma Grafiği.....	188
Şekil 5.59	Tüm Betonarme Numunelerin Kür Süresi (28 gün) Sonunda Aderans Dayanımı Değerleri Karşılaştırması.....	189
Şekil 5.60	Tüm Betonarme Numunelerin Hızlandırılmış Korozyon Süresi (90 Gün) Sonunda Aderans Dayanımı Değerleri Karşılaştırması.....	190
Şekil 5.61	Sika Ferro Gard-901 Katkılı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Kür Sonrası Basınç Dayanımları.....	191
Şekil 5.62	Tecno Silica Silis Dumanı Katkılı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Kür Sonrası Basınç Dayanımları.....	192

Şekil 5.63	Sika Ferro Gard-901 Katkılı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Kür Sonrası Yarmada-Çekme Dayanımları.....	193
Şekil 5.64	Tecno Silica Silis Dumanı Katkılı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Kür Sonrası Yarmada-Çekme Dayanımları.....	194
Şekil 5.65	Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Sistemi.....	197
Şekil 5.66	Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Uygulanmadan Önce Betonarme Numunedeki Çelik Donatıların Yarı Hücre Potansiyel Ölçümü.....	197
Şekil 5.67	Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Uygulanırken Betonarme Numunedeki Çelik Donatıların Yarı Hücre Potansiyel Ölçümü.....	198
Şekil 5.68	Galvanik Anotlu Katodik Koruma Uygulanmadan Önce Betonarme Numunedeki Çelik Donatıların Yarı Hücre Potansiyel Ölçümü.....	199
Şekil 5.69	Korozyon Önleyici Çelik Donatı Kaplamalarının Bina Üretim Maliyetini Arttırma Değerleri Karşılaştırma Grafiği.....	203
Şekil 5.70	Korozyon Önleyici Beton Harç Katkılarının Bina Üretim Maliyetini Arttırma Değerleri Karşılaştırma Grafiği.....	205
Şekil 5.71	Korozyon Önleyici Betona Sürme Esaslı İnhibitör Kaplamalarının Bina Üretim Maliyetini Arttırma Değerleri Karşılaştırma Grafiği.....	207
Şekil 5.72	Korozyon Önleyici Çelik Donatı Kaplamalarının Betonarme Binanın Üretim Maliyetini Arttırma Yüzdeleri Karşılaştırma Grafiği.....	208
Şekil 5.73	Çelik Donatı Kaplama Malzemelerinin Bir Dairenin Üretim Maliyetini Arttırma Değerleri.....	209
Şekil 5.74	Önlem Malzemeli Numuneler ve Kontrol Numunelerinin 90 Günlük Hızlandırılmış Korozyon Süresi Sonundaki Korozyon Akım Yoğunluğu-Korozyon Tabaka Kalınlığı Karşılaştırma Grafiği.....	210
Şekil 5.75	Betonarmede Çelik Donatı Kaplama Malzemelerinin Binanın Kullanım Ömrü Süresince Bir Dairenin Yıllık Ortalama Maliyetini Düşürme Yüzdeleri.....	214
Şekil 5.76	Korozyon Önleyici Beton Katkı Malzemelerinin Betonarme Binanın Üretim Maliyetini Arttırma Yüzdeleri Karşılaştırma Grafiği.....	214
Şekil 5.77	Beton Katkı Malzemelerinin Bir Dairenin Üretim Maliyetini Arttırma Değerleri.....	215
Şekil 5.78	Beton Katkı Malzemelerinin Binanın Kullanım Ömrü Süresince Bir Dairenin Yıllık Ortalama Maliyetini Düşürme Yüzdeleri.....	217
Şekil 5.79	Korozyon Önleyici Beton Kaplama Malzemelerinin Betonarme Binanın Üretim Maliyetini Arttırma Yüzdeleri Karşılaştırma Grafiği.....	217
Şekil 5.80	Beton Kaplama Malzemelerinin Bir Dairenin Üretim Maliyetini Arttırma Değerleri.....	218
Şekil 5.81	Beton Yüzey Kaplama Malzemelerinin Binanın Kullanım Ömrü Süresince Bir Dairenin Yıllık Ortalama Maliyetini Düşürme Yüzdeleri.....	220
Şekil 5.82	Katodik Koruma Proseslerinin Bir Dairenin Üretim Maliyetini Arttırma Değerleri.....	224
Şekil 5.83	Katodik Koruma Proseslerinin Binanın Kullanım Ömrü Süresince Bir Dairenin Yıllık Ortalama Maliyetini Düşürme Yüzdeleri.....	224

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 25 °C’de Metal İyonlarının Elektrod Potansiyelleri.....	8
Çizelge 3.1 Toplam Yük ile Klorür Geçirimsiliği Arasındaki İlişki.....	16
Çizelge 3.2 ASTM C 876’ya Göre Potansiyel Kriterler.....	45
Çizelge 3.3 LPR Ölçümlerine İlişkin Yorumlama Kriterleri.....	51
Çizelge 3.4 Beton İçinde Bulunan Klorür Konsantrasyonuna Göre Betonarme Donatılarının Korozyon Riski.....	52
Çizelge 4.1 Elli Çevrimlik Maruziyet Sonrası Numunelerdeki Klor Konsantrasyonları (çimento ağırlığının yüzdesi).....	95
Çizelge 4.2 Çeşitli Çelik Ortamları için Pratik Katodik Koruma Akım Yoğunluk Gereklilikleri.....	100
Çizelge 5.1 Çimentonun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.....	113
Çizelge 5.2 Deneylerde Kullanılan Betonarme Çeliğin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.....	114
Çizelge 5.3 Sanayi Tuzunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	115
Çizelge 5.4 Kontrol Numuneleri Beton Karışım Oranları, kg/m ³	118
Çizelge 5.5 Silis Dumanı İçeren Numunelerin Beton Karışım Oranları, kg/m ³	119
Çizelge 5.6 Sika Ferro Gard 901 inhibitörü içeren Numunelerin Beton Karışım Oranları, kg/m ³	119
Çizelge 5.7 ASTM C 876’ya Göre Potansiyel Kriterleri.....	223
Çizelge 5.8 LPR Ölçümlerine İlişkin Yorumlama Kriterleri.....	225
Çizelge 5.9 Betonarme Yapılarda Korozyon Önleme Uygulamaları Karşılaştırma Tablosu.....	228

ÖZET

BETON YAPILARDA DONATI KOROZYONUNUN ÖNLENMESİNE YÖNELİK TEDBİRLERİN ARAŞTIRILMASI

Özlem AYDIN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zeki ÇİZMECİOĞLU

Korozyona karşı daha dayanımlı betonarme ürünler geliştirmek amacı ile yaptığımız bu çalışmada, çeşitli katkı malzemeleri içeren betonarme numuneler üretilerek, kullanılan katkı malzemelerinin betonarme numunelerde donatı korozyonunu engellemedeki etkinlikleri değerlendirilmiştir ve eski yapılardan çıkarılmış kısmen korozyonlu çelik donatılar kullanılarak betonarme numuneler üretilip bu numunelere dış akım kaynaklı ve galvanik anotlu katodik koruma prosesleri uygulanarak katodik koruma proseslerinin yapılarıdaki korozyonu engellemedeki etkinlikleri değerlendirilmiştir.

Katkı malzemelerinin etkinliklerini değerlendirmede kullanılan betonarme numuneler, beton içine çelik donatılar dikilerek, silindir lolipop şeklinde 70x140 mm ölçülerinde dökülmüştür. Her bir korozyon önlem katkı malzemesi için toplam yedi farklı numune grubu ve bunlara ait kontrol numune grupları her bir gruptan üçer tane olacak şekilde üretilmiştir. Birinci grup numunelerde Tecno Silica ticari isimli silis dumanı, beton harç karışımına katılmıştır. İkinci grup numunelerde Sika Ferrogard-901 ticari isimli nitrojen içeren organik ve inorganik esaslı karışım inhibitörü beton harç karışımına katılmıştır. Üçüncü grup numunelerde Sika Gard -703 W ticari isimli silan ve siloksan bileşimli emülsiyon betonun dış yüzeyine sürülmüştür. Dördüncü grup numunelerde Sika Ferro Gard -903 ticari isimli özel amino alkol esaslı organik ve inorganik karışım inhibitörü betonun dış yüzeyine sürülmüştür. Beşinci grup numunelerde Tecno bond 650 ticari isimli epoksi reçine esaslı, iki bileşenli solventli epoksi kaplama malzemesi çelik donatının dış yüzeyine sürülmüştür. Altıncı grup numunelerde çelik donatılar sıcak daldırma galvaniz yöntemi ile çinko kaplanmıştır. Yedinci grup numunelerde Sika

Monotop 610 ticari isimli çimento esaslı, silis dumanı ve korozyon inhibitörü içeren, polimer modifiyeli kaplama malzemesi çelik donatının dış yüzeyine sürülmüştür. Geri kalan gruplar ise önlemsiz yani katkı malzemesi içermeyen kontrol numuneleri olarak üretilmişlerdir.

Numuneler 50 gr Cl- / litre konsantrasyondaki tuzlu su çözeltisi içinde üç ay süre ile bekletilerek hızlandırılmış korozyona uğratılmıştır. Üç ay süresince düzenli olarak yarı hücre potansiyel ölçümleri, korozyon akım yoğunluğu ölçümleri yapılmıştır. Korozyon akım yoğunluğu ölçümlerinde Gecor 8 cihazı kullanılmıştır. Üç aylık hızlandırılmış korozyona tabi tutulan lolipop numuneler, deneyin sonunda kırılarak, donatıları çıkarılmış ve yüzeyleri temizlendikten sonra Olympus optik mikroskobunda 200 büyütmede mikro yapıları incelenmiştir.

Katkı malzemelerinden beton harç karışımı içine katılanların betonun basma dayanımlarına ve yarmada çekme dayanımlarına olan etkileri 28 günlük kür süresi sonunda değerlendirilmiştir. Çelik donatıların yüzeyine yapılan kaplamaların betonarme numunelerin aderans dayanımlarına olan etkileri 28 günlük kür sonunda ve 90 günlük hızlandırılmış korozyon deneyleri sonunda belirlenmiştir.

Sika Ferro Gard-901 ve Tecno Silica silis dumanı katkılı numunelerin basınç dayanımları sırası ile 33,5 Mpa ve olarak 30,6 Mpa tespit edilmiştir. Bu numunelere ait kontrol numunelerinin basınç dayanımları sırası ile 28,5 Mpa ve 27 Mpa olarak tespit edilmiştir. Sika Ferro Gard-901 ve Tecno Silica silis dumanı katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımları sırası ile 3,85 Mpa ve 4 Mpa olarak tespit edilmiştir. Bu numunelere ait kontrol numunelerinin yarmada çekme dayanımları sırası ile 2,9 Mpa ve 2,9 Mpa olarak tespit edilmiştir. Basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri sonucunda, Sika Ferro Gard-901 ve Tecno Silica beton katkısının kontrol numuneleri ile karşılaştırma yapıldığı zaman, betonun basma dayanımını ve yarmada çekme dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir.

Kür süresi tamamlandıktan sonra yapılan aderans dayanımı deneyleri sonucunda, Sika Ferro Gard-901'in, çinko kaplamanın, Tecno Silica silis dumanının, betonarme numunelerin aderans dayanımını arttırdığı, Tecno Bond 650 epoksi esaslı kaplamanın ve Sika Monotop 610 kaplamanın betonarme numunelerin aderans dayanımını düşürdüğü, Sika Ferro Gard-903 inhibitörünün ve Sika Gard -703 W emülsiyonunun betonarme numunelerin aderans dayanımını pek değiştirmedığı tespit edilmiştir. Hızlandırılmış korozyon süresi sonunda, Sika Ferro Gard-901, çinko kaplama, Tecno Silica silis dumanı, Tecno Bond 650 epoksi kaplama, Sika Monotop 610 kaplama, Sika Ferro Gard-903 ve Sika Gard -703 W içeren numunelerin aderans dayanımları sırası ile 5,27 Mpa; 5,44 Mpa; 4,88 Mpa; 4,16 Mpa; 4,18 Mpa; 5,22 Mpa; 5,29 Mpa olarak tespit edilmiştir. Bu numunelere ait kontrol numunelerinin aderans dayanımları sırası ile 3,88 Mpa; 3,8 Mpa; 4,17 Mpa; 3,83 Mpa; 3,74 Mpa; 3,91 Mpa; 4,03 Mpa olarak tespit edilmiştir.

Hızlandırılmış korozyon süresi sonunda, Sika Monotop 610, çinko kaplama, Tecno Bond 650 epoksi kaplama, Sika Ferro Gard-901, Sika Ferro Gard-903, Sika Gard -703 W, Tecno Silica silis dumanı içeren numunelerin korozyon akım yoğunlukları sırası ile $0,14 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0,36 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0,19 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0,29 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0,42 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0,20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0,31 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak tespit edilmiştir. Bu numunelere ait kontrol numunelerinin korozyon akım yoğunlukları sırası ile $0,56 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0,57 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0,60 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0,56 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0,76 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0,52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0,68 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak tespit edilmiştir. Ayrıca hızlandırılmış korozyon süresi sonunda, Sika Monotop 610, çinko kaplama, Tecno Bond 650 epoksi kaplama, Sika Ferro Gard-901, Sika Ferro Gard-903, Sika Gard -703 W,

Tecno Silica silis dumanı içeren numunelerin yarı hücre potansiyel değerleri sırası ile -411 mV, -666 mV, -192 mV, -542 mV, -575 mV, -315 mV, -433 mV olarak tespit edilmiştir. Bu numunelere ait kontrol numunelerinin yarı hücre potansiyel değerleri sırası ile -619 mV, -502 mV, -543 mV, -611 mV, -605 mV, -631 mV, -543 mV olarak tespit edilmiştir.

Elde edilen verilere göre, çelik donatıları, Sika Monotop 610 kaplamalı, sıcak daldırma çinko kaplamalı ve Tecno Bond 650 ticari isimli epoksi kaplamalı betonarme numunelerde korozyon tespit edilmemiştir. Sika Ferro Gard 901 inhibitörü katkılı betonarme numunelerde çok ince (0 - 4 µm arası) oksit tabakasına rastlanmıştır ancak ölçülen korozyon akım değerlerinin betonun dayanıklılığı açısından risk oluşturmeyen bölgede kaldığı tespit edildiğinden, Sika Ferro Gard 901 katkının betonarme yapıları uzun süre yüksek klorür içerikli çevre koşullarına maruz kalındığında bile oldukça etkili bir şekilde koruyabildiği ve betonarmenin dayanıklılığı açısından bir tehlike oluşmasına engel olabildiği görülmüştür. Tecno Silica silis dumanı katkılı ve Sika Ferro Gard 903 inhibitör katkılı, betonarme numunelerde ince (sırasıyla, 5 - 10 µm arası ve 5-15 µm arası) oksit tabakasına rastlanmıştır. Fakat kontrol numuneleri için yapılan mikro yapı incelemelerinde bu numuneler üzerinde 20-30 µm arası korozyon tabakasına rastlanması Tecno Silica silis dumanı ve Sika Ferro Gard 903 katkılarının betonarme numuneleri beton yapının dış çevresinden gelebilecek agresif klor iyonlarına ve oksijene karşı kontrol numunelerine göre oldukça etkin bir şekilde koruduğunu göstermiştir. Sikagard-703 W ile kaplamalı betonarme numunelerde genel olarak korozyona rastlanmamıştır. Sadece ufak bir bölgede lokal olarak ve çok ince (0-3 µm arası) oksit tabakasına rastlanmıştır. Ayrıca Sikagard-703 W içeren betonarme numunelerde ölçülen korozyon akım değerlerinin betonun dayanıklılığı açısından risk oluşturmeyen bölgede kaldığı tespit edilmiştir. Kontrol numunelerinde ise 20-30 mikron aralığında oksit tabakasına rastlanmış ve donatıların bazı bölgelerinde lokal korozyon oluşumu görülmüştür.

Katodik koruma prosesleri için eski betonarme yapıları temsilen kullanılmış durumda olan Ø14'lük nervürlü donatı çelikleri kullanılarak 200x200x200 mm ölçülerinde küp şeklinde betonarme numuneler üretilmiştir. Dış akım kaynaklı katodik koruma için üretilen betonarme numunenin henüz akım verilmeden önce Cu-CuSO₄ referans elektrodu ile ölçülen yarı hücre potansiyel değeri -475 mV olarak tespit edilmiştir. Bu değer numunede kullanılan çelik donatıların kullanılmış olması sebebi ile korozyona uğradığını göstermektedir. Numuneye dış akım verdikten sonra betonarme numunenin yarı hücre potansiyel değeri -851 mV olarak ölçülmüştür. Elde edilen değer, betonarme demirleri için potansiyel kriteri olarak kabul edilen -770 mV potansiyelinden daha negatif ve aşırı koruma başlangıç sınırı olan -950 mV potansiyelinden pozitif olduğu için katodik korumanın tam olarak gerçekleştiğini ve korozyonun tamamen durdurulduğunu da doğrulamıştır. Galvanik anotlu betonarme numunedeki çelik donatıların çinko anot ile metalik bağlantıları henüz yapılmadan önce Cu-CuSO₄ referans elektrodu ile ölçülen yarı hücre potansiyel değeri -235 mV olarak tespit edilmiştir. Bu değer numunelerde kullanılan çelik donatıların kullanılmış olması sebebi ile korozyonla ilgili belirsizlik bölgesinde olduğunu göstermektedir. Numuneye galvanik anotlu katodik koruma uygulandıktan sonra betonarme numunenin yarı hücre potansiyel değeri -363 mV olarak ölçülmüştür. Elde edilen değer, numuneye galvanik anotlu katodik koruma yapılmadan önce ölçülen -235 mV'luk yarı hücre potansiyelinden daha negatif olması, çinkonun galvanik anot olarak çözüldüğünü ve çelik donatıları katodik olarak koruyabilmek için donatılara elektron sağladığını göstermiştir. Ancak kullanılan çinko anodun gücünün kullanılan donatı sayısına karşı

tam yeterli gelmemesi sebebi ile elde edilen değer -770 mV' un altına inememiştir. Fakat yapılan çalışma çelik donatılar için yeterli büyüklük ve güçte çinko anot kullanılması durumunda katodik korumanın tam olarak gerçekleşeceğini ve her ne kadar çelik donatılar korozyona uğramış ve uğramaya devam ediyor olursa olsun galvanik anotlu katodik koruma uygulanarak betonarme demirlerinin devam eden korozyonunun tam olarak önlenebileceğini göstermektedir.

Betonarme numunelerde kullanılan korozyon önleyici malzemelerin ve uygulanan katodik koruma proseslerinin ekonomik değerlendirmeleri yapılmıştır. Betonarme yapıları korozyona karşı koruma amacı ile çelik donatı kaplama malzemelerinin kullanılması %0,06 (70 TL) – %0,33 (367 TL) aralığında çok az bir ek maliyet getirirken kullanım ömrü boyunca yıllık maliyette %33 (747 TL) - %41 (920 TL) aralığında tasarruf sağlanabileceği öngörülmüştür. Yine betonarme yapıları korozyona karşı koruma amacı ile beton harç katkı malzemelerinin kullanılması %0,1 (123 TL) – %0,6 (671 TL) aralığında çok az bir ek maliyet getirirken kullanım ömrü boyunca yıllık maliyette % 33 (747 TL) - %37 (834 TL) aralığında tasarruf sağlanabileceği ve sürme esaslı kaplama malzemelerinin kullanılması %0,019 (21 TL) – %0,022 (24 TL) aralığında çok az bir ek maliyet getirirken kullanım ömrü boyunca yıllık maliyette %33 (747 TL) - %37 (834 TL) aralığında bir tasarruf sağlanabileceği öngörülmüştür. Betonarme yapıları korozyona karşı koruma amacı ile katodik koruma proseslerinin uygulanması %0,6 (625 TL) – %0,6 (653 TL) aralığında çok az bir ek maliyet getirirken kullanım ömrü boyunca yıllık maliyette %36,7 (834 TL) - %36,9 (834 TL) aralığında oldukça iyi bir tasarruf sağlanabileceği öngörülmüştür. Gerek ekonomiklik gerekse uygulanma şartları bakımından dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminin yeni yapılacak yapılarda ve galvanik anotlu katodik koruma sisteminin ise eski yapılarda kurulması uygun görülmüştür.

Beton içine katkı olarak ilave edilen Tecno Silica silis dumanının diğer katkı malzemesi ile yapılan karşılaştırmasına göre yapılarda kullanımının daha uygun olduğu görülmüştür. Donatı kaplamaları arasında yapılan karşılaştırmada yapının kullanım ömrü süresince ekonomiklik açısından epoksi kaplama ile sıcak daldırma galvaniz kaplama ön plana çıkmıştır. Diğer değerler birbirine yakın olmakla birlikte aderans dayanımı olarak sıcak daldırma galvaniz kaplama üstünlük göstermiştir. Bu nedenle aderansın çok önemli olduğu uygulamalarda çinko kaplamanın daha uygun olduğu düşünülmektedir. Betonarmenin dış yüzeyinde kullanılan kaplamalar arasında karşılaştırma yapıldığında ise Sika Gard 703 W kaplamasının kullanımının korozyondan korunma ve maliyet açısından daha uygun olduğu görülmüştür.

411,6 metrekarelik temel alanına sahip 20 katlı ve 80 daireli yeni yapılacak betonarme bir binada korozyon hasarlarından korunma amacı ile gerekli önlem malzeme ve prosesleri bir paket halinde uygulandığında ortalama 112.322 TL olan dairenin maliyeti 1164 TL yani sadece %1 değerinde artmakta fakat binanın kullanım ömrünün artmasına bağlı olarak bir dairenin yıllık maliyeti yüksek oranda düşebileceği öngörülebilir. Dolayısı ile binalarımızda korozyona karşı önlem paketi uygulandığı takdirde daire başına yapılan harcama birkaç yıl içerisinde geri kazanılabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme, korozyon, yarı hücre potansiyel ölçümleri, basma dayanımı, korozyon akım yoğunluğu ölçümleri, mikro yapı, inhibitör, silis dumanı, aderans, sıcak daldırma çinko kaplama, epoksi reçine

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MEASURES FOR THE PREVENTION OF CORROSION OF STEEL IN CONCRETE STRUCTURES

Özlem AYDIN

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Phd. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Zeki ÇİZMECİOĞLU

In this study, which was done with the intention of developing reinforced concrete products that are resistant against corrosion, efficiencies of additives in the inhibition of reinforcement corrosion in reinforced concrete samples evaluated by producing reinforced concrete samples that contain various additives and partially corroded steel reinforcements from old buildings were used to build reinforced concrete samples. Cathodic protection processes with external current and galvanic anode were applied on these samples; and the efficiency of cathodic protection on preventing corrosion is evaluated.

Reinforced concrete samples were poured in the form of a cylinder lollipop with measurement of 70x40 mm by planting steel reinforcements into the concrete. A total of seven different sample groups for each and every corrosion inhibiting additive were produced. Also, three control sample groups for each one these different sample groups were also produced. In the first group of samples, silica fume which has the trademark of Tecno Silica, was added to the concrete mortar mixture. In the second group of samples, organic and inorganic based mixture inhibitor which contained nitrogen and which has the trademark of Sika Ferrogard-901, was added into the concrete mortar mixture. In the third group of samples, emulsion which is of silane and siloxane composition and which has the trademark of Sika Gard-703 W was spread on the outer surface of the concrete. In the fourth group of samples, special amino alcohol based, organic or inorganic mixture inhibitor which has the trademark of Sika Ferro Gard-903 was spread on the outer surface of the concrete. In the fifth group of samples, epoxy resin based coating material which has a solvent with two components and which has

the trademark of Tecno bond 650 was spread onto the outer surface of the steel reinforcement. In the sixth group of samples, steel reinforcements were covered with zinc by the use of hot dipped galvanize method. In the seventh group of samples, cement based, polymer modified coating material which has the trademark of Sika Monotop 610 and which contains silica fume and corrosion inhibitor was spread onto the outer surface of the steel reinforcement. Rest of the groups were produced as control samples that do not contain additives.

Samples were put through accelerated corrosion by being kept in a salty water solution which had a concentration of 50 gr. Cl⁻ /liter for three months. During this three month period, half-cell potential measurements and corrosion current density measurements were taken regularly. Gecor 8 apparatus was used when measuring the corrosion current density. Lolipop samples which were put through the three month long accelerated corrosion test were broken at the end of this test. Reinforcements were removed and the surfaces of these samples were cleaned. Then, the micro structure of these samples were studied under an Olympus optic microscope with 200 enlargement.

The affects of those additives which had been added to the concrete mortar mixture on the compressive strength and splitting tensile strength of concrete were evaluated at the end of a 28 day curing time. The affects of the coating material that were spread on the surface of steel reinforcements on the adherence durabilities of reinforced concrete samples were determined at the end of both 28-day curing period and 90-day accelerated corrosion experiments.

Pressure endurances of samples that have Sika Ferro Gard-901 and Tecno Silica trademarked silica fume additive were determined to be 33.5 Mpa and 30.6 Mpa respectively. Pressure endurances of control samples, that belong the samples mentioned above, were determined to be 28.5 Mpa and 27 Mpa respectively. Splitting tensile strengths of samples that have Sika Ferro Gard-901 and Tecno Silica trademarked silica fume additive were determined to be 3.85 Mpa and 4 Mpa, respectively. Splitting tensile strength of control samples that belong to the samples mentioned above were determined to be 2.9 Mpa and 2.9 Mpa, respectively. It has been determined at the end of pressure endurance and splitting tensile strength experiments that Sika Ferro Gard-901 and Tecno Silica concrete additive increased both the pressure endurance and splitting tensile strength of the concrete. This conclusion was reached when Sika Ferro Gard-901 and Tecno Silica additives were compared to the samples.

At the end of the adherence strength experiments which were performed after the end of the curing period, it was determined that Sika Ferro Gard-901, Zinc coating and Tecno Silica silica fume increased the adherence strength of reinforced concrete samples, Tecno Bond 650 epoxy based coating and Sika Monotop 610 coating decreased the adherence strengths of reinforced concrete samples and Sika Ferro Gard-903 inhibitor and Gard-703 emulsion did not change adherence strengths of reinforced concrete samples very much. At the end of the accelerated corrosion period, adherence strengths of samples that contain Sika Ferro Gard-901, zinc coating, Tecno Silica silica fume, Tecno bond 650 epoxy coating, Sika Monotop 610 coating, Sika Ferro Gard-903 and Sika Gard-703 W were determined to be 5.27 Mpa; 5.44 Mpa; 4.88 Mpa; 4.16 Mpa; 4.18 Mpa; 5.22 Mpa; 5.29 Mpa respectively. The adherence strengths of control samples that belong to the samples mentioned above are determined to be 3.88 Mpa; 3.8 Mpa; 4.17 Mpa; 3.83 Mpa; 3.74 Mpa; 3.91 Mpa, 4.03 Mpa respectively.

At the end of the accelerated corrosion period, corrosion current density of samples that contain Sika Monotop 610, Zinc coating, Tecno Bond 650 epoxy coating, Sika Ferro

Gard-901, Sika Ferro Gard-903, Sika Gard-703 W and Tecno Silica silica fume were determined to be $0.14 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0.36 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0.19 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0.29 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0.42 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0.20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0.31 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, respectively. The corrosion current density measurements of control samples that belong to samples mentioned above were determined to be $0.56 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0.57 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0.60 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0.56 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0.76 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; $0.52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, $0.68 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ respectively. Additionally, at the end of accelerated corrosion period, half-cell potential values of samples that contain Sika Monotop 610, Zinc cladding, Tecno Bond 650 epoxy cladding, Sika Ferro Gard-901, Sika Ferro Gard-903, Sika Gard-703 W and Tecno Silica silica fume were determined to be -411 mV, -666 mV, -192 mV, -542 mV, -575 mV, -315 mV, -433 mV, respectively. The half-cell potential measurements of control samples that belong to samples mentioned above were determined to be -619 mV, -502 mV, -323 mV, -611 mV, -605 mV, -631 mV, -543 mV, respectively.

According to the data that has been obtained, no corrosion has been observed on steel reinforcements and on reinforced concrete samples that are Sika Monotop 610 coated, hot dipped zinc coated and Tecno Bond 650 trademarked epoxy coated. A very thin layer (between $0 \mu\text{m}$ and $4 \mu\text{m}$) of oxide was observed on reinforced concrete samples that have Sika Ferro Gard 901 inhibitor additive. However, it was observed that the corrosion current density values which were measured remained at a level that did not create a risk in terms of the endurance of the concrete. Because of this, it was also observed that Sika Ferro Gard 901 additive was able to protect reinforced concrete structures very effectively even when these structures are exposed to environments that contained high levels of chloride for extended periods of time and was also able to prevent any danger from arising in terms of the endurance of the reinforced concrete. A thin layer of oxide (between $5 \mu\text{m}$ and $10 \mu\text{m}$, between $5 \mu\text{m}$ and $15 \mu\text{m}$, respectively) was observed in reinforced concrete samples that have Tecno Silica silica fume and Sika Ferro Gard 903 inhibitor additives. However, in micro structure studies that were done on control samples, a thicker layer of corrosion (between $25 \mu\text{m}$ and $30 \mu\text{m}$) was observed on these samples. This has proven that Tecno Silica silica fume and Sika Ferro Gard 903 additives is able to protect reinforced concrete samples from aggressive chloride ions and oxygen that can come from the surrounding area of a concrete structure very effectively. Generally, no corrosion has been observed in reinforced concrete samples that are coated with Sikagard-703 W. A very thin layer of corrosion (between $0 \mu\text{m}$ and $3 \mu\text{m}$) was observed in a very small area. Additionally, it was also observed that corrosion current density values that are measured in reinforced concrete samples that contain Sikagard-703 remained at a level that did not pose a risk in terms of the endurance of the concrete. Whereas, a relatively thick layer of corrosion (between $20 \mu\text{m}$ and $30 \mu\text{m}$) was encountered in control samples and local corrosion formations were observed in some areas of reinforcements.

$\Psi 14$ used rebars are used to produce $200 \times 200 \times 200$ mm cubic reinforced concrete samples to represent old reinforced concrete structures.

Manufactured reinforced concrete sample is tested before switching on the external current and the half cell potential is measured -475 mV with Cu-CuSO₄ reference electrode. This value indicates that the steel reinforcements were corroded. After switching on the external current the halfcell potential is mV. This value indicates that cathodic protection is fully covered and corrosion is stopped completely, because it is lower than potential criteria for reinforcement steels, which is -770 mV, and higher than the over protection limit, which is -950 mV.

Reinforced concrete sample is tested before connecting with zinc anode and the half cell potential is measured -235 mV with Cu-CuSO₄ reference electrode. This value indicates that the steel reinforcements are in the corrosion uncertainty zone. After applying the galvanic anode protection the halfcell potential is measured as -363 mV. This value indicates that anodic dissolution of zinc is taking place and providing electrons for cathodic protection of steel reinforcements. However the power of zinc anode is not sufficient for the amount of reinforcements and because of this, the value is not lower than -770 mV. But studies indicate that in case of using a zinc anode, which is big enough, a full cathodic protection can be attainable and on going corrosion of reinforcements can be prevented.

Economic evaluation of anti corrosion agents and cathodic protection processes, that are applied to reinforced concrete samples, is done. Coating of steel reinforcements with anti corrosion agents brings a small incremental cost around 0.06% (70 TL) - 0.33% (367 TL), but during service life a high saving ratio around 33% (747 TL) - 41% (920 TL) can be obtained annually. Concrete grout additives cost around 0.10% (123 TL) – 0.6% (671 TL), but during service life a high saving ratio around 33% (747 TL) - 37% (834 TL) can be obtained annually. Splash coating of steel reinforcements with anti corrosion agents brings a small incremental cost around 0.019% (21 TL) - 0.022% (24 TL), but during service life a high saving ratio around 33% (747 TL) - 37% (834 TL) can be obtained annually. Cathodic protection processes which are applied to protect constructions from reinforcement corrosion brings a small incremental cost around 0.6% (625 TL) – 0.6% (653 TL), but during service life a high saving ratio around 36.7% (834 TL) - 36.9% (834 TL) can be obtained annually. External current source a cathodic protection system should be established in the new buildings and galvanic anode cathodic protection system should be established in the old buildings in terms of affordability and application requirements.

Tecno Silica silica fume inhibitor which added in concrete as an additive were more appropriate according to the comparison of the other additives. During the life of comparisons made between the structure of reinforcement coatings epoxy coating and hot dip galvanizing in terms of affordability came to the fore. Other values are close to each other, although the hot-dip galvanized coating adhesion strength showed superiority. Therefore zinc plating is thought to be more suitable for applications where adherence is very important. Comparison was made between Coatings used on the outer surface of reinforced concrete, Sika Gard 703 W showed a more favorable in terms of cost and corrosion protection.

When necessary prevention process and materials applied to the building which has 411,6 square meters floor area, eighty flat and twenty storey in order to protect it from reinforcement corrosion, the building cost that is 112.322 TL will be increased 1164 TL or 1% more but increasing the service life of building, annual cost of per flat may be decreases high amount. So, if prevention methods are applied to our buildings, cost for per building will be recovered within a few years.

Key words: Reinforced concrete, corrosion, half-cell potential measurements, compressive strength, corrosion current density measurements, micro-structure, inhibitor, silica fume, adherence, hot dipped zinc coating, epoxy resin.

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Beton; çimento, agrega, su ve gerektiğinde katkı maddelerinin uygun oranlarda karıştırılması ile başlangıçta plastik kıvamlı olup zamanla çimentonun hidratasyonu sonucu katılaşp sertleşen kompozit bir yapı malzemesidir [1].

Betonun çekme ve eğilme gerilmeleri karşısında çatlayıp kırılmasını önleyebilmek için, çekme gerilmelerine maruz kalacak bölgelerine çelik çubuklar yerleştirilmektedir. Çelik ve beton arasında iyi bir aderans olduğu takdirde, bu iki malzeme tek bir malzeme gibi davranış göstermektedir. Çekme dayanımı yüksek olan çelik çubuklar, çekme dayanımı düşük olan betonu takviye etmektedir [1].

Yapılarda yaygın olarak kullanılan ve çok önemli görevi olan çelik donatı, zamanla paslanma da denilen korozyon olayı ile karşı karşıya kalabilmektedir [1].

Betonarme yapılarda kullanılan çelik donatılardaki korozyon gelişimi, yapılardan beklenen emniyet ve servis ömrü ile ilgili gereksinimleri büyük ölçüde etkilemektedir. Klorür etkileri, karbonatlaşma gibi çeşitli agresif şartlara maruz kalan betonarme elemanlar kısa sürede kullanım dışı kalabilmektedir. Betonarme yapılarda kullanılan çelik donatılar çeşitli süreçler sonunda korozyona maruz kalabilir. Betonarme yapılarda pas payı tabakasının yeterli olmaması sebebi ile çelik donatılarda, nem ve oksijen ile gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucu atmosferik korozyon görülür. Beton bünyesinde elektron ve iyon akışını sağlayan beton boşluk suyunun oluşturduğu elektrolitik ortam ile birbirine bağlı anodik ve katodik reaksiyonlar ile gelişen korozyon ise elektrolitik korozyon olarak tanımlanır. Betonun alkali ortamında çelik donatılar üzerinde oluşan pasif tabakanın çözünmesine yol açan klorür iyonlarının katalizör

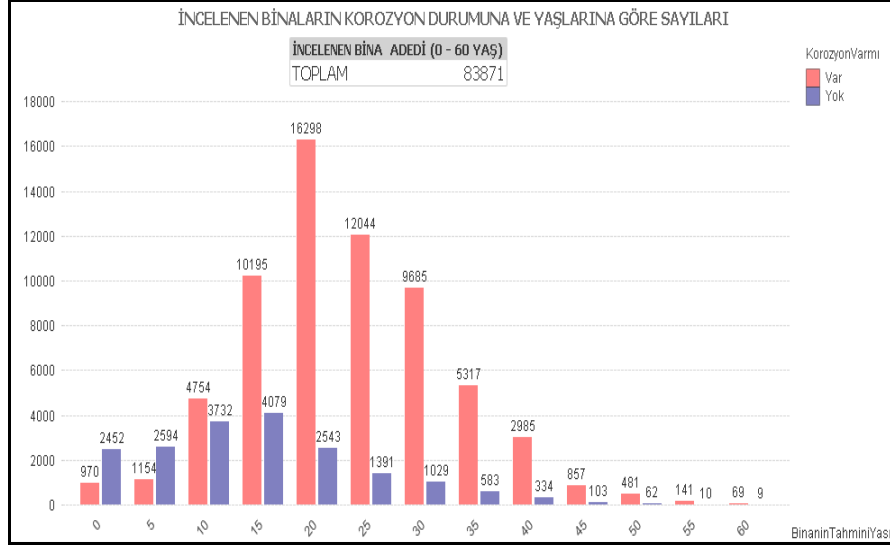
görevi yaparak demirin hızla iyonlaşmasını sağladığı ve tehlikeli lokal hasarlara sebebiyet veren korozyon türü ise klorür korozyonu olarak adlandırılmaktadır. Betonarme sistemlerde çelik donatı korozyon sonucu kesit ve düktilite kaybına uğramaktadır [2]. Demir yüzeyinde oluşan korozyon ürününün hacmi, içerdiği demirin 12-14 katı kadardır [1]. Oluşan reaksiyon ürünleri nedeniyle betonda meydana gelen genleşme etkisi önceleri pas payı tabakasının çatlamasına, ilerleyen aşamalarda ise tamamen dökülmesine yol açar. Bu durumda hiçbir fiziksel ve kimyasal koruması kalmayan donatının çok daha hızlı şekilde kesit kaybetmesi, zamanla tamamen yok olması mümkündür [2].



Şekil 1.1 Köprü Ayağında Görülen Hasar [3]. Şekil 1.2 Korozyonun Betonun dışına çıkmaya Başlaması Hali [3].

Zararlı dış ortam koşullarında korozyon gelişimini tamamen durdurmak mümkün olmasa da, başlangıç zamanını geciktirmek veya gelişim hızını yapının servis ömrü boyunca kabul edilebilir limitlerin altına düşürmek için birçok yöntem başvurulabilir. Bu amaçla yeni yapılacak yapılarda beton teknolojisine uygun kalitede malzeme seçimi, çeşitli mineral ve kimyasal katkı maddelerinin kullanımı, yalıtım önlemleri ön plana çıkmaktadır [2].

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Kuruluşu olan Bimtaşın yaptığı araştırmalarda binaların hasar durumları incelenmiş, binalarla ilgili toplanan bilgilerle bir veritabanı oluşturulmuş ve bilgiler analiz edilebilecek şekle getirilmiştir. Binalardan alınan verilerdeki korozyon durumunun bölgelere, yaşa, bina yapım kalitesine v.b. göre sınıflandırılması sonucu korozyonun çok ciddi bir tehlike olduğu görülmüştür [4].



Şekil 1.3 İncelenen binaların korozyon durumuna ve yaşlarına göre dağılımı [4].

Türkiye’deki korozyon kayıplarının GSMH’nın %4,36’sına eşit olduğu araştırmalar sonucu elde edilmiştir. 2010 yılı başı itibarı ile İstanbul’daki toplam konut sayısı İBB’nin açıkladığı rakamlara göre 2.291.228 adettir. Sayı her geçen gün artmaktadır. Bu konutların ortalama birim maliyeti 50.000 TL olduğu kabul edilirse, İstanbul’daki yapı stoğunun toplam maliyeti 114.561.400.000 TL olmaktadır. Bimtaş’tan alınan verilerden elde edilen sonuçlarla 50 yıl olarak öngörülen bina ömrünün 28 yılda ciddi korozyon hasarları sebebiyle ekonomik olarak sona erdiği anlaşılmıştır. Bayrampaşa, Güngören ve Bahçelievler ilçelerindeki 0-45 yaş arası 43.783 adet binadan alınan veriler göstermiştir ki 28 yılda korozyon hasarının yüksek seviyede olduğu bina sayısı 12.597’dir. Korozyon seviyelerinin de detaylı incelendiği bina sayısı 43.783 olduğuna göre %28,7 oranında korozyondan ciddi etkilenmiş bina vardır. Toplam inşaat maliyetinin %28,7’si 32.879.121.800 TL parasal kayba tekabül etmektedir. Bu ülkemiz için çok ciddi bir ekonomik kayıp ve kaynak israfıdır, aynı zamanda insan hayatını da tehlikeye sokmaktadır, bu yönden bakıldığında da insan hayatı hiçbir maddi ölçüyle değerlendirilemeyecek kadar değerli olduğu göz önüne alınırsa, korozyonla ilgili alınması gereken tedbirlerin önemi daha da iyi anlaşılabilecektir. Hâlbuki alınabilecek önlemlerin bina maliyetlerine oranının %1-%2’yi geçmeyeceği göz önüne alınırsa korozyona karşı alınabilecek önlemlerin İstanbul’a ve ülkemize sağlayacağı ekonomik katkı da oldukça önem taşımaktadır [4].

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, korozyona karşı daha dayanımlı betonarme yapılar elde edebilmek için, beton harç karışımına silis dumanı ve karışım inhibitörleri katılması, beton dış yüzeyine hidrofobik yapıcı emülsiyonlar, çeşitli karışım inhibitörleri sürülmesi ve çelik donatıların çeşitli kaplamalarla kaplanması ve ayrıca eski yapılardan çıkarılmış kısmen korozyonlu çelik donatılar kullanılarak betonarme numuneler üretilmesi bu numunelere dış akım kaynaklı ve galvanik anotlu katodik koruma prosesleri uygulanması ile kullanılan katkı malzemelerinin ve uygulanan proseslerin betonarme numunelerde donatı korozyonunu engellemedeki veya geciktirmedeki etkinliklerini değerlendirmek, korozyonu engelleyici katkı malzemelerinin ve proseslerin betonarme yapıların maliyetine olan etkilerini ortaya koymak ve katkı malzemeleri ile proseslerin ülke genelinde kullanımını yaygınlaştırmak için bir kılavuz oluşturmaktır.

1.3 Hipotez

Betonarme yapılarda bina ömrünü uzatabilmek için çelik donatı korozyonu önleme tedbirleri uygulanmalıdır. Donatı korozyonunu önleme betonarme yapılarda ekonomik ömrü uzatmak için uygulanabilecek en önemli tedbirdir. Bu çalışma ile betonarme yapılarda düşük maliyetlerle kullanım ömrünün uzatılabileceği karşılaştırmalı ve maliyet analizleri ile ortaya koyulacaktır. Belirli literatür çalışmalarında var olan katkı maddeleri ve korozyon önleme teknikleri ile korozyon azaltılarak yapının ekonomik ömrü uzatılabilecektir. Betonarme yapılarda korozyon önleyici tedbirler birçok literatür çalışması ile ortaya koyulmuştur fakat bu çalışmalarda bina maliyetlerini ve ekonomik ömürlerini tam olarak ortaya koyan çalışmalar oldukça azdır. Bilhassa kentsel dönüşüm açısından korozyon önleme tedbirlerinin etki ve maliyetlerini karşılaştırabilmek için beton harcına katkı malzemelerinin katılması, betonun dış yüzeyine kaplamalar yapılması, çelik donatıların kaplanması, dış akım kaynaklı katodik koruma ve galvanik anotlu katodik koruma deneysel uygulamalarının sonuçları incelenmiştir. Bu çalışmayla farklı beton katkı maddeleri ve bazı korozyondan koruma önlemlerinin uygulanabilirlik açısından karşılaştırması yapılabilecektir.

Betonarme yapılarda korozyona sebep olan etkiler farklı teknikler kullanılarak azaltılabilir. Bu teknikler yüksek maliyetli olan betonarme yapılarda maliyetleri en

asgari düzeyde arttırarak uygulanabilir. Korozyonu önleyici tedbirler deneysel çalışmalarla karşılaştırılabilir ve uygulanabilirlik açısından optimum çözümler bulunabilir.

Betonarme yapılarda korozyonu engellemek için betona ilave edilen katkı maddeleri betonun mukavemetini düşürebilmektedir. Bu sebepten dolayı seçilecek katkı maddeleri betonun mekanik özelliklerini azaltmayarak çelik donatıyı korozyondan korumalıdır. Yatırım ve işletme maliyeti en düşük olan katkı maddeleri ile korozyonu önleme tercih edilebilecek en önemli yöntemlerdendir.

Korozyonu önleme amaçlı değişik donatı kaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Donatı kaplama yöntemlerinde en kritik durum donatı ve beton arasındaki uyumdur. Korozyonu önleme amaçlı kullanılan kaplama yöntemlerinde en ekonomik ve uygulanabilir yöntem deneysel sonuçlar irdelenerek karşılaştırılabilir ve optimum özelliklere sahip kaplama yöntemi bulunabilir.

Korozyon önleme yöntemlerinden en önemlisi ve etkilisi olarak bilinen katodik koruma yöntemi betonarme yapılarda da uygulanabilmektedir. Katodik koruma yöntemi betonarme yapıya uygun olarak projelendirilmeli ve bina kullanım müddetince işletilebilmelidir. Katodik koruma yüksek yatırım ve işletme maliyetlerinin yanında en kesin çözümler arasında yer almaktadır. Betonarme yapılarda proje bazında maliyetler açısından değerlendirilip uygulanabilmektedir.

BÖLÜM 2

KOROZYON TEORİSİ

2.1 Korozyonun Tanımı

Korozyon metallerin çevreleri ile girdikleri bir elektrokimyasal reaksiyon sonucu bozunmaya uğrayarak niteliklerini kaybetmesi olarak tanımlanabilir [5].

2.2 Korozyona Etki Eden Faktörler ve Korozyon Mekanizması

Korozyonun sebebi, kararsız haldeki metalin serbest elektronlarını vererek pozitif iyon oluşturması, elektronları alan mukabil malzemenin ise negatif iyon oluşturması neticesinde pozitif iyonlarla negatif iyonlar arasındaki çekim kuvveti ile iyonik bağlı kararlı bir metal bileşiğinin metalin yüzeyinde bir korozyon ürününe, yani pasa dönüşerek metali tahrip etmesidir [6].

Kimyasal reaksiyonlarının ayrıntısına girmeden söylenebilir ki korozyon için hem oksijen hem de su (rutubet) gereklidir, bunların ikisi birden olmadan reaksiyon ilerlemez [6].

Çeliğin pasif durumda olmadığı bazı durumlarda oksijen yetersizliği sayesinde katodun polarizasyonu ile korozyon akımı sınırlandırılabilir. Anotta akım, katotta eş bir akım olduğu zaman akabilir. Bundan dolayı, anodik bölgede tuz içeriği veya başka bir sebepten dolayı korozyon potansiyeli olsa bile, korozyon duracaktır. Bu durumda korozyonun katodik kontrol altında olduğu söylenebilir. Bu durum oksijen girişi olan birimler arasında hiçbir elektriksel bağlantının olmadığı tamamen doymuş hatta deniz suyu ile doymuş izole birimler arasında sıklıkla görülebilmektedir [7].

Islak atmosferde, yeraltında, beton içinde ya da su altında metallerdeki korozyon; bir metalden diğerine, aynı metalin yüzeyinden bir noktadan diğer bir noktaya geçen galvanik akımlarından kaynaklanır. Bu elektrik akımlarının gerçekleşebilmesi için elektrik akımının geçişine izin veren ortamda ıslak bir iletken veya elektrolit olmak zorundadır. Korozyonun görülebilmesi için elektrolitin varlığı vazgeçilmez bir koşuldur. Sulu ortam özellikle de tuzlu su mükemmel bir elektrolittir [6].

Korozyon reaksiyonları, bir çift anodik ve katodik reaksiyonların toplamıdır [6].

Oksidasyon reaksiyonu (korozyon) anod yüzeyinde hidrojen çıkışı da katod yüzeyinde meydana gelir [8].

Anot reaksiyonu da denen oksidasyon, sulu ortamdaki metalin elektron kaybederek katyona dönüşmesidir. Elektron kaybeden metal elemana anot denir. Anodik olay elektron üretir. Bu elektronların olay yerinden uzaklaştırılması olanaksızsa veya bu işlem yeterli hızda gerçekleşmiyorsa anodik olayın tamamen durması veya hızından kaybetmesi gerekir. Başlangıçta yüksek enerjiye sahip olan metal iyonları belirli sayıda su molekülü ile bağ kurarak alçak enerji durumuna geçer ve kararlılık kazanırlar [9].



Redüksiyon yani katot reaksiyonu ise oksidasyonda açığa çıkan elektronların sarf edilerek birikmesini önleyen bir reaksiyondur. Katot reaksiyonları arasında en yaygın olanı, hidrojen gazının açığa çıkması ve oksijen gazının redüklenmesidir. Katodik olayın oluşabilmesi için elektron yüklenebilen iyon veya moleküllere gerek vardır [9].



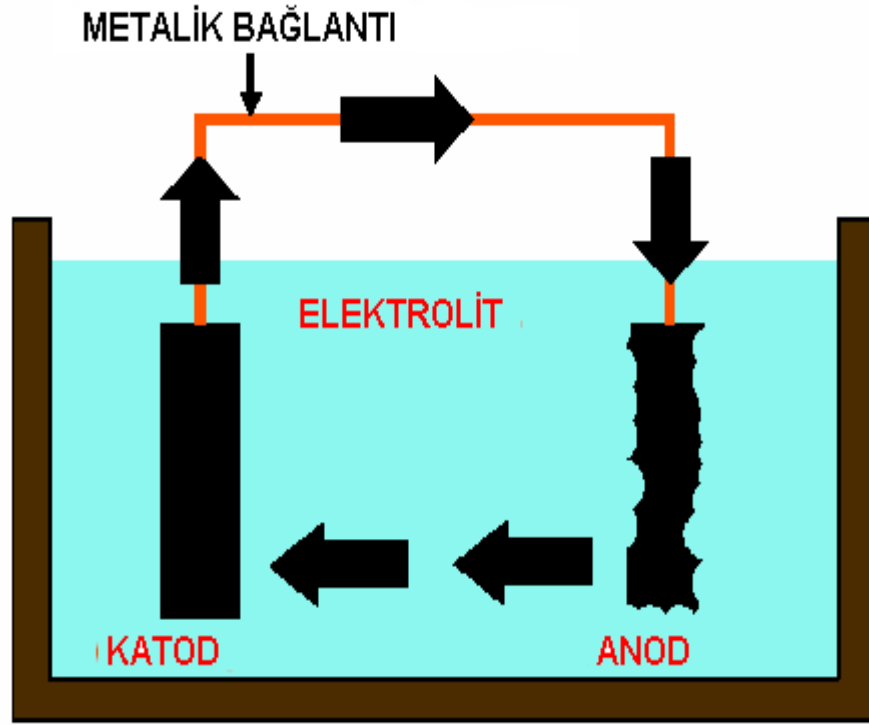
Anot reaksiyonunda oluşan metal iyonu, bulunduğu sulu ortam içinde çözülür, dağılır veya çökelen bir korozyon ürünü meydana getirir, böylece anot olan metalde malzeme kaybı oluşur. Korozyonun sürekliliği için katot ve anodun elektriksel akım geçişini sağlayan bir iletkenle bağlı olması ve anotta açığa çıkan elektronların katoda iletilmesi gerekir. Elektrik akımının katı içindeki yönü, katotdan anoda doğrudur; yani elektronların akış yönünün tersidir. Korozyon hızı olarak tanımlanan anodun çözünüm hızı, hücreden geçen akım ile doğru orantılıdır [9].

İyon ve elektronların ortaya çıkması elektrod potansiyeli adı verilen bir potansiyeli oluşturur. Elektrod potansiyeli metal cinsine ve çözeltinin türüne göre değişir. Bir metalin elektrod potansiyelini (dolayısı ile korozyon eğilimini) ölçmek için öncelikle metal ile standard olarak alınan hidrojen elektrodu arasındaki voltaj farkının ölçülmesi gerekir. Bazı metallere ait elektrokimyasal serisi Çizelge 2.1’de verilmiştir [10].

Çizelge 2.1 25⁰C’de metal iyonlarının elektrod potansiyelleri [10].

Metal iyonları	Standard elektrod potansiyeli (Volt)
Li⁺ (baz)	-2.96 (Anodik korozyon eğilimi)
K⁺	-2.92
Ca²⁺	-2.90
Na⁺	-2.71
Mg²⁺	-2.40
Al³⁺	-1.70
Zn²⁺	-0.76
Cr²⁺	-0.56
Fe²⁺	-0.44
Ni²⁺	-0.23
Sn²⁺	-0.14
Pb²⁺	-0.12
Fe³⁺	-0.045
H⁺	0. 00(referans)
Cu²⁺	+0.34
Cu⁺	+0.47
Ag⁺	+0.80
Pt⁴⁺	+0.86
Au⁺ (Soy)	+1.50 (Katodik daha koruyucu)

Elektrokimyasal işlem dört ayrı bölümden meydana gelir. Bu bölümler anod, katod, elektrolit ve metalik bağlantıdır. Elektrokimyasal korozyon sadece bu dört bölüm görüldüğünde meydana gelir [8].



Şekil 2.1 Korozyon Hücresi [8].

Anod

Korozyon hücresinin en fazla göze çarpan bölümü anodlardır. Bu kısım korozyonun meydana geldiği bölgedir. Bu kimyasal reaksiyon, bir oksitlenme reaksiyonu olup metalden elektron kaybı sonucu metalin diğer elementle birleşmesidir. Bu metal çelik ise sonuçta malzemede demir pası oluşur [8].

Katod

Bu bölge korozyon hücresinin korunan bölümüdür. Buradaki kimyasal reaksiyon bir azaltma reaksiyonudur [8].

Anod/Katod ilişkisi

Bir elektrokimyasal korozyon hücresinde meydana gelen potansiyele göre, bir elektrod diğer elektroda göre ya anod dur veya katod dur. Bu elektriksel potansiyel farkı anod ve katod arasındaki potansiyel farkıdır. Elektriksel olarak daha aktif veya daha negatif olan elektrod anod olarak belirlenir, diğer elektrod da katoddur. Katod da oksidasyon reaksiyonuna maruz kalmayıp korunan bölümdür [8].

Elektrolit

Korozyon hücresinin üçüncü bölümüdür. Bu bölümde iyon akışı vardır. Elektrolit hem anoda hemde katoda temas eden bir materyaldir ve burada hem anoda hemde katoda iyon akışı vardır [8].

Metalik Bağlantı

Korozyon hücresinin dördüncü bölümü olup elektriksel devreyi tamamlar ve elektron akışını sağlar. Metalik bağlantı hem anoda hemde katoda temas eden ve elektron akışını sağlayan bir metaldir. Bu elektron akışı elektrokimyasal reaksiyon oluştuğunda görülür [8].

Hemen hemen tüm korozyonlar elektrokimyasal reaksiyonlar olduğundan kimyasal reaksiyonun hızı veya akım akış değeri korozyonun miktarına etki edecektir. Korozyon miktarı üzerindeki etkenler aşağıda belirtilmiştir.

- Devreden akan akımın değerine etkili olabilecek herhangi bir faktör elektrokimyasal reaksiyon yani korozyon miktarı üzerinde etkilidir.
- Anotla katot arasındaki potansiyel farkı bir elektro motor kuvvet meydana getirir. Daha büyük miktarda potansiyel farkı veya gerilim daha büyük değerde korozyon potansiyelidir [8].
- Elektrolitin direnci normal olarak korozyon miktarının belirlenmesinde önemli bir faktördür. Elektrolit, içinde iyonların hareket ettiği bir malzeme olduğundan direncin değeri de iyonların hareketini belirlemektedir. Direnç akımla ters orantılı olup, bundan dolayı elektrokimyasal hücredeki korozyonla da ters orantılıdır. Eğer elektrolitteki direnç iki katına çıkarsa diğer faktörler aynı kalmak kaydıyla korozyon yarı yarıya azalır [8].
- Anot ve katodun elektrolite olan geçiş dirençlerinin etkisi elektrolitik direncinin etkisiyle aynıdır. Düşük dirençlerde yüksek akım yani yüksek miktarda korozyon oluşur [8].
- Yapılardaki polarizasyon, elektrot potansiyelinde sonuçta elektrokimyasal akım akışındaki değişimdir ve genellikle polarizasyon filmi adı verilen bir film tabakası oluşumudur. Bu polarizasyon tabakası ve buna bağlı diğer değişimler katot üzerinde faydalı etkiler yapar. Katot üzerindeki hidrojen yayılımı, ilave kaplama

gibi etki yaparak, suyu katot yüzeyinden uzaklaştırır, elektrolitteki iyon konsantrasyonunu azaltır, elektrotla elektrolit arasındaki direnç artar [8].

- Genellikle sıcaklığın artmasıyla korozyon miktarı artar [8].
- Korozyon bir elemanın konsantrasyon etkisine yani, tuzun varlığı, çözünebilir oksijen miktarı, pH derecesi ve sıcaklık gibi çevresel değişikliklere bağlıdır [8].

BETON YAPILARDA DONATI KOROZYONU

3.1 Betonun Yapısı, Bileşenleri ve Durabilitesi

Beton doğal agregalar kullanılarak, çoğu zaman şantiyelerde veya arazi koşullarında büyük miktarlarda üretilen yapay bir malzemedir. Amaç mümkün olduğu kadar boşluksuz ve yüksek mukavemetli bir beton elde etmektir. Standartlara uygun bir beton elde edebilmek için, beton karışımına giren çimento, agrega ve su oranlarını iyi ayarlamak, üniform hale gelinceye kadar karıştırmak ve kurallara uygun olarak kalıplara yerleştirmek gerekir. Ancak bunlar yeterli olmaz, bunun ötesinde dökümden sonraki ilk günlerde belli süre kür uygulanması da gerekir [11].

Yeni yapılarda iyi kalitede beton donatıyı korozyona karşı servis ömrü boyunca koruyabilmektedir [12]. İyi kalitede(düşük miktarda klor içeren ($<0,15/m^3$) ya da hiç içermeyen, karbonatsız ve çatlaksız) betondaki çeliğin pasive edildiği ve korozyona uğramadığı veya çok düşük oranda korozyon olabileceği beklenebilmektedir [12].

Yapı, yapı elemanı ve yapı malzemelerinin işlevlerini uzun yıllar boyu bozulmadan yerine getirebilme özelliği dayanıklılık, kalıcılık veya dürabilite olarak tanımlanır [9]. Betonlarda aranan en önemli özellik yüksek bir mekanik mukavemet ve bunun yanında fiziksel ve kimyasal dış etkilere dayanıklılıktır [11].

Yapıların uzun ömürlü olması sadece doğru taşıyıcı sistemin seçimi, projelendirilmesi ve imal edilmesine bağlı değildir. Aynı zamanda, yapının mantıklı bir zaman süreci içerisinde kalıcı denecek kadar uzun ömürlü olmasını sağlayacak önlemler alınmalı ve en az bakımı gerektirecek şekilde yaşlanması yavaşlatılmalıdır. Betonun hizmet gördüğü süre boyunca karşılaştığı kimyasal ve fiziksel olaylar karşısında yeterli direnci gösterebilmesi, yeterince dayanıklı olması, betonun dayanımı kadar önemlidir. Özellikle

deniz atmosferine veya suyuna maruz yapılarda ve endüstri yapılarında kalıcılık, en önemli sorunlardan biridir. Yapıların inşası çok zor ve pahalı olduğu için, yapı sahipleri, yapı için uzun bir servis ömrü talep ederler. Örneğin, bundan 50 yıl önce, geleneksel bir betonarme yapı için, 25 yıllık bir servis ömrü çok makul bir istek iken, bugün birçok yapı 100 yıllık bir servis ömrü için tasarlanmakta, bu nedenle dayanıklılık gittikçe artan bir önem kazanmaktadır [9].

Beton, bünyesinde veya hemen yakın çevresindeki sıcaklık değişimi, nem ve kimyasal maddelerin varlığı ve taşınım mekanizması betonun kalıcılığını etkileyen önemli faktörlerdir. Zararlı kimyasal reaksiyonlar, betonun yumuşamasına, gözenekliliğinin ve geçirimliliğinin artmasına neden olur [9].

Mukavemet, betonun diğer bütün özelliklerini az çok belirleyen bir parametre olarak kullanılır. Bu nedenle betonlar standartlarda basınç mukavemetleri esas alınarak sınıflandırılır [11].

Betonun mekanik mukavemet bakımından ilginç bir özelliği de, çekme mukavemetinin basınç mukavemetine göre çok küçük olmasıdır. Mühendislikte büyük önem taşıyan bu husus, betonarme demiri kullanılması ile giderilmeye çalışılır. Yol, köprü, baraj, vb. birçok yapıda beton basınçtan başka çekme ve eğilme gerilmelerine de maruz kalmaktadır. Bu nedenle bu yapılarda kullanılan betonların çekme ve eğilme mukavemetlerinin de mümkün olduğunca yüksek olması gerekir. Ayrıca bu tür kritik yapılarda betonların darbe ve aşınma etkilerine karşı da dayanıklı olmaları istenir. Yapılan araştırmalar, betonun basınç mukavemetinin yüksek olduğu oranda diğer (çekme, eğilme ve aşınma gibi) mekanik mukavemetlerinin de yüksek olduğunu göstermiştir. Bu durumda, basınç mukavemeti yüksek bir beton elde edildiğinde, bir ölçüde diğer mekanik mukavemetleri de yüksek olan beton elde edildiği kabul edilebilir. Pratikte basınç mukavemeti beton kalitesini belirleyen ölçü olarak kullanılır [11].

Betonda kimyasal reaksiyonlara ve zamanla bozulmaya neden olan iyon veya molekül halindeki zararlı maddeler çoğunlukla çevreden taşınır; bazı hallerde zararlı maddeler betonun kendi bünyesinden de kaynaklanabilir. Bu durumda da zararlı maddelerin reaksiyona girecekleri yere taşınması gerekir; madde transferi olmaz ise zararlı reaksiyonlar gelişemez. Dolayısı ile beton bünyesinde kimyasal reaksiyonların oluşmasının ön koşulu, taşınmaya neden olan su veya su buharının varlığıdır. Zararlı

maddelerin taşınım hızı yavaş olduğundan, bazı reaksiyonların zararlı etkileri yıllar sonra ortaya çıkabilir. Tüm kimyasal reaksiyonlarda olduğu gibi betondaki reaksiyonlarda da sıcaklık, reaksiyon hızını arttıran önemli bir faktördür. Kimyasal reaksiyonlar, çoğunlukla fiziksel ve biyolojik etkenler ile bir arada veya bunları izleyen süreçte gelişir ve betonun bozulmasına neden olurlar [9].

Betonun boşluksuz ve geçirimsiz olması dayanıklılık yönünden yararlıdır. Başka bir ifadeyle dayanıklılık ve geçirimsizlik birbiriyle yakından ilgili olan iki olaydır. Beton ne kadar boşluksuz olursa geçirimsizliği de buna bağlı olarak düşük olur; bu da betonarme yapılarda, beton içerisindeki çeliğin kimyasal etkilere maruz kalmadan servis süresi boyunca sağlıklı bir şekilde hizmet vermesini sağlar [9].

Çimentodan daha ince olan silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi pozolanik malzemelerin süper ve hiper akışkanlaştırıcı olarak bilinen yeni nesil akışkanlaştırıcılarla birlikte kullanılması daha dayanıklı betonlar üretilmesine olanak sağlamıştır. Ultra incelikteki malzemeler ve süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların birlikte kullanılması betondaki su-çimento oranının düşmesini sağlayarak ortaya çıkan artan su ihtiyacı problemini ortadan kaldırmıştır. Betonun durabilitesini ve dayanımını arttıran pozolanik malzemelerin bu olumlu etkilerinin görülebilmesi için kür koşullarına da titizlikle uyulması gerekmektedir [9].

Beton malzemeleri; çimento, agrega, su ve kimyasal katkı malzemeleridir [13].

3.1.1 Betonun Kılcal Su Emme Miktarının Belirlenmesi

Betonda kılcal su emme, betonun suya değen yüzünden zamanla emilen su miktarı ile belirlenir. Üretilen beton, prizma şeklindeki kalıplara yerleştirilir. Deney zamanı geldiğinde, numuneler önce 70 °C’lik etüvde 24 saat bekletilerek tamamen kurumaları sağlanır. Numunelerin su yüzüne temas eden yüzeyi dışındaki yüzeylerinden su emmesini önlemek için parafinle kaplanır ve kuru ağırlığı belirlenir. Daha sonra numunenin bir yüzü su ile temas edecek şekilde tepsiye yerleştirilir ve belirli aralıklarla ağırlığı ölçülür. Yapılan çalışmalarda emilen suyun hacminin zamanın karekökü ile doğru orantılı olduğu belirlenmiş ve aşağıdaki eşitlik kabul edilmiştir [9].

$$\frac{\Delta Q}{A} = k \cdot \sqrt{dt} \quad (3.1)$$

Burada;

ΔQ : Numune ağırlığındaki değişim (g)

A: Numunenin su yüzeyine temas eden taban alanı (cm²)

k: Kılcallık katsayısı

dt: Son okumanın yapıldığı zamanı temsil etmektedir (dk)

3.1.2 Hızlı Klorür Geçirimsiliği Yöntemi

Betonun dayanıklılığını etkileyen en önemli etmenlerden biri beton içerisine çeşitli yollardan giren klor iyonlarıdır. Betonun dayanıklılığını koruyabilmesi ve betonarme donatının korozyona uğramasını önlemek için, klor geçirimsiliği düşük betonlar üretilmektedir. Bunun için beton üretiminde bağlayıcı madde olarak bir miktar puzolanın (uçucu kül, silis dumanı vb.) konulması olumlu sonuçlar verebilmektedir. Aynı zamanda çimento içerisinde C₃A (trikalsiyum aluminat) oranının artması sonucunda, betonda klor iyonunu etkisi ile oluşan korozyon başlangıcı engellenmiş olur. Bunun nedeni C₃A'nın klor iyonlarını bağlayabilmesidir. Beton içerisinde puzolan kullanımı sonucu C₃A miktarının arttığı ve bu nedenle klor iyonu bağlama kapasitesinin yükseldiği belirtilmektedir. Betonda C₃A oranının %2'den %14'e çıkması sonucu, klor iyonlarını bağlama kapasitesi ve donatı korozyonu başlama süresi 2,43 ve 2,45 kat daha artmaktadır [9].

Betonun klor iyonu geçirimsiliğini belirlemek için ASTM 1202 standardında verilen yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu standartta anlatılan metot, betonun elektriksel iletkenliğinin incelenerek, betonun klor iyonu geçişine karşı göstereceği direncin belirlenmesine dayanır. Bu deney yönteminde 50 mm kalınlığında, 10 mm çapında silindirik numuneler hazırlanır. Bu numunelerin yüzeyleri elektrik iletmeyen silikon malzemesi ile kaplanır. Yüzeydeki silikon 24 saat süre kurumaya bırakıldıktan sonra numuneler vakum pompasının kabına yerleştirilerek ağzı hava almayacak şekilde kapatılır ve vakum pompası çalıştırılır. Pompa çalıştırdıktan kısa bir süre sonra kabın içerisindeki basınç 1 mm Hg'nin altına düşer. Numuneler bu basınç altında 3 saat süre ile tutulur. Üç saatin sonunda kap tamamen saf su ile doldurularak numuneler su içerisinde 1 saat daha vakumda tutulur. Vakumlama işleminden sonra numuneler 18±2 saat süre ile saf su içerisinde bekletilir. Bu işlemden sonra numuneler Şekil 3.1'de yer alan hücrelerin arasına yerleştirilir ve sızıntıya engellemek için numuneyle hücreler

arasına hızlı kuruma özelliğine sahip silikon malzeme sürülür. Deneye hazır hale gelen düzenekte (Şekil 3.1) hücrelerden bir tanesine %3'lük NaCl çözeltisi, diğerine ise 0.3 N NaOH çözeltisi doldurulur. Bu iki hücre arasında 60 V'luk potansiyel fark oluşturmak için, güç kaynağının (–) kutbu NaCl hücresine, (+) kutbu ise NaOH hücresine bağlanır ve güç kaynağı çalıştırılır. Bu deney toplam 6 saat sürmektedir. Deneyin başlangıcında, bitimine kadar, her 30 dakikada bir ampermetre yardımı ile devreden geçen akım ölçülür ve kaydedilir. Kaydedilen akım değerleri standartta yer alan aşağıdaki formüle (Denklemler 3.2) yerleştirilerek devreden geçen toplam yük hesaplanır [9].

$$Q = 900 (I_0 + I_{30} + \dots + I_{360}) \quad (3.2)$$

Q: Yük (coulomb)

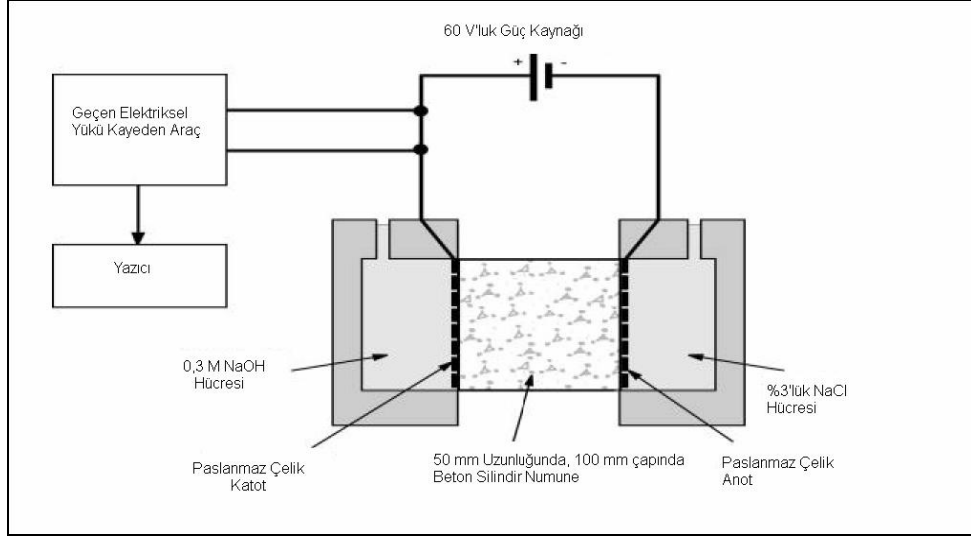
I_0 : Düzeneğe akım uygulandığı anda ölçülen akım (amper)

I_t : Düzeneğe akım uygulanmasından t dakika sonra ölçülen akım (amper)

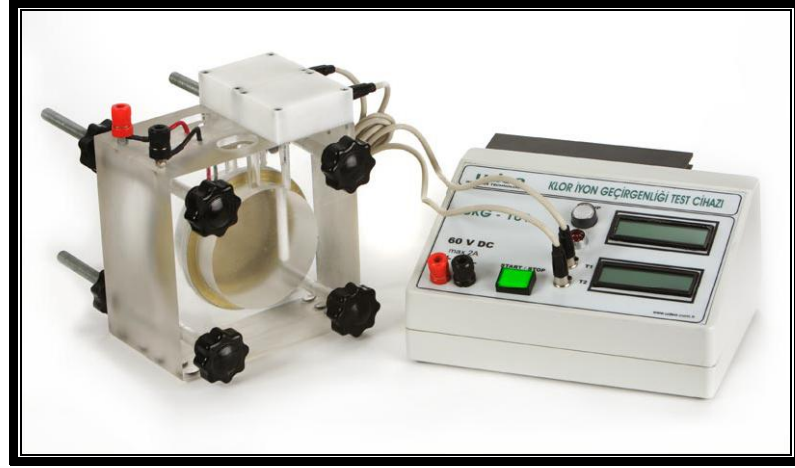
Bulunan toplam yük değerleri ile Çizelge 3.1'de yer alan değerler karşılaştırılarak betonun klor geçirimsizliği değerlendirilir [9].

Çizelge 3.1 Toplam Yük ile Klorür Geçirimsizliği Arasındaki İlişki [9].

Geçen Akım (Coulomb)	Klorür Geçirimsizliği
>4.000	Yüksek
2.000-4.000	Orta
1.000-2.000	Düşük
100-1.000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir



Şekil 3.1 Hızlı Klorür Geçirirnililiği Deney Düzenegi Şeması [9].



Şekil 3.2 Hızlı Klorür Geçirirnililiği Deney Düzenegi [9].

3.1.3 Aderans Kavramı

Beton ve çelik çubuklardan oluşan bir yapı elemanının betonarme olarak davranabilmesi için çubukların betona kenetlenmesi gerekir. Kenetlenmeyi sağlayan çelik çubukla beton arasındaki kayma gerilmelerine “Aderans” denir [14].

Beton ve çelik arasındaki aderans, betonarmenin varlığının doğrudan doğruya bağlı olduğu bir ana olaydır. İç kuvvetlerin beton ve çeliğin birinden ötekine geçişi bu şekilde gerçekleşir. Aderans çözülmediği sürece, çelik çevresini saran betonla aynı uzama ve kısalmayı gösterir [14].

Aderans birçok değişkene bağlıdır. Aderans dayanımında, kesme-aderans etkileşimi ve boyut etkisi çok önemli rol oynadığından, bazı deneysel bulguların genelleştirilmesi

yanlış ve sakıncalı olmaktadır. Bu nedenle burada sayısal değerlendirme yapılmadan, aderans dayanımını etkileyen başlıca değişkenler kısaca sıralanacaktır [14].

- 1- Betonun çekme dayanımı. Nervürlü çubuklarla donatılmış elemanlarda kırılma yarılma ile olacağından, çekme dayanımı özellikle önemlidir [14].
- 2- Çeliğin akma dayanımı kenetleme boyunca aderans gerilmesi dağılımını etkileyeceğinden önemlidir [14].
- 3- Çubuğun yüzey geometrisi (nervürlü, nervürsüz) [14].
- 4- Donatı çapı. Çap değiştikçe, kenetlenmeyi sağlayan çevrenin, uygulanan kuvveti etkileyen alana oranı değişmektedir. Ayrıca, yarılma kırılmasında betonda oluşan çekme gerilmeleri de çapla orantılı olmalıdır [14].
- 5- Aderans kenetlenme boyu ile değişir. Ancak aderans dayanımı, kenetlenme boyu ile orantılı değildir, yani kenetlenme boyunun iki katına çıkarılması, aderans dayanımının iki kat arttığı anlamına gelmez [14].
- 6- Donatı etrafındaki beton örtünün kalınlığı (pas payı). Beton örtünün kalınlığı, özellikle nervürlü çubukla donatılmış elemanlar için önemlidir. İç basınç altındaki boru analogjisinden hareket edilirse, çekme dayanımının (yarılma dayanımı) et kalınlığı (pas payı) ile ters orantılı olduğu görülür [14].
- 7- Betonarme çubuğunun betonun dökümü sırasındaki konumu önemlidir. Beton dökümü sırasında üst yüzeye yakın çubukların altında biriken hava kabarcıkları bu çubukların aderansını zayıflatır [14].
- 8- Yerel gerilmeler de aderansı etkileyebilir. Örneğin, mesnetin uygulandığı yerel basınç gerilmeleri, özellikle nervürlü donatı kullanılan durumlarda yarılmayı geciktirebilir [14].
- 9- Sargı donatısı. Sargı donatısı özellikle nervürlü donatı kullanıldığında etkilidir. Sargı donatısı beton kütleyle sararak, yarılmaya karşı dayanımı önemli ölçüde arttırabilir [14].
- 10- Kullanılan agreganın cinsi ve katkı maddeleri de aderansı etkiler. Örneğin, hafif agrega ile yapılan betonun aderans dayanımı, normal agregayla yapılabilecek orana daha düşüktür [14].

3.2 Korozyon Kontrolünde Etkili Olabilecek Beton Bileşenleri ve İşlem Parametreleri

Aşağıda değiştirildiği takdirde korozyon kontrolünde etkili olabilecek beton bileşenleri yer almaktadır [12].

- çimento cinsi ve dozajı
- mineral katkı tipi
- ince agrega tipi
- iri agrega tipi
- su-çimento oranı
- hava içeriği
- Beton Dökümü
- Beton Kürü
- Beton Rutubeti

3.2.1 Çimento Cinsi ve Dozajı

Betonun en önemli hammaddesi çimentodur. Hidrolik bağlayıcı özelliği gösteren maddelere çimento denilmektedir. Bütün çimentolarda ana bileşen klinkerdir. Klinker bileşiminde esas olarak CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 oksitleri bulunur. Ayrıca kil ve kalkerden gelen bazı minör bileşenler de klinker bileşimine girebilir [11].

Hidratasyon reaksiyonları ile oluşan çimento hamuru daima farklı büyüklüklerde olan birbirine bağlı gözenekler içermektedir. Gözenekler, makro gözenekler, kapiler gözenekler ve jel gözenekler olarak ayrılır. İç tabaka aralıklarındaki C-S-H (kalsiyum silikat hidrat jel gözenekleri), jelin yaklaşık %28 hacmini kaplayıp ölçüsel olarak birkaç veya çok sayıda nm aralığındadır. Bunlar zararlı iyonların taşınımına imkan sağlamak için çok küçük olduklarından dolayı betonun dayanımını ve donatıyı korumasını etkilememektedirler. Kapiler gözenekler, sertleştirilmiş çimento hamurunun hidratasyonunun katı ürünleri tarafından doldurulmayan boşluklardır. Bunlar, çimento hamuru iyi hidrate edilir ve düşük su-çimento oranı ile üretilirse 10-50 nm arasında ölçülere sahip iken, eğer beton iyi hidrate edilmez ve yüksek su-çimento oranı ile üretilirse 3-5 μm aralığına kadar ulaşabilirler. Birkaç mm'ye kadar ulaşabilen daha

büyük gözenek boyutları, beton karışımı sırasında havanın içeri hapis olması ve taze betonun sıkıştırılması esnasında çıkartılamaması sonucu olur. Hem kapiler gözenekler hem de sıkışmış hava, betonun dayanımı ve donatıyı koruması ile bağlantılıdır. Sıkışmış hava taze betonun yeterli işlenebilirliğinin sağlanması ve doğru sıkıştırma ile azaltılabilir [15].

Çimento tipinin klorun beton içerisinden difüzyonuna etki ettiği düşünülmektedir. Bunun klorların bağlanması sayesinde başarıldığı düşünülmektedir. Klor bağlama reaksiyonu çözeltideki klor iyonları ile çimento hidrasyon ürünleri arasındaki reaksiyonla gerçekleşmektedir. Bu kalsiyum kloraalüminat oluşumu ile sonuçlanmaktadır. Çözülmez bir klorür fazıdır ve korozyona sebep olan serbest klor iyonlarını azaltmaktadır [12].

Çimento kimyası üzerinde yapılan korelasyonlara göre magnezyum fosfat çimentosu; klorürleri çok az yada hiç bağlayamazken kalsiyum alüminat çimentosu; klorürleri büyük miktarda bağlar. Yüksek miktarda trikalsiyum alüminat ve toz haline getirilmiş yüksek fırın cürufu karıştırılarak oluşturulan çimentoyu içeren betonun klorür bağlama yeteneğinin daha da çok arttığı görülmüştür [12]

Sakr yaptığı çalışmada, %5 NaCl ve %5 MgSO₄ çözeltileri mevcudiyetinde çimento bileşenlerinin C₃A (trikalsiyum alüminat) farklı yüzdelerinin betonarme donatı çeliğinin korozyonu üzerine etkilerini değerlendirmiştir. Yarı hücre potansiyel ölçümleri, etkin voltaj metodu ve etkin akım metodu olarak isimlendirilen farklı elektrokimyasal teknikler kullanılmıştır. Çimento içerisindeki trikalsiyum alüminat, klor veya sülfat çözeltisindeki betona gömülü donatı çeliğinin korozyonunu önemli bir biçimde azaltmıştır. Klorlu çözeltide çimentodaki C₃A yüzdesi %2'den %10'a arttırıldığında çeliğin korozyonu orantılı olarak azalmıştır. C₃A yüzdesi %2'den %6'ya arttırıldığında %5 MgSO₄ çözeltisi içindeki çeliğin korozyon hızı azalmıştır. %6'dan %10'a arttırıldığında korozyon hızı hızlı bir şekilde hızlanmıştır. Klor ve sülfatı birlikte içeren ortamda donatı çeliğinin korozyon kontrolü için C₃A'nın optimum yüzdesi %6 olarak bulunmuştur [16].

Beton yapımında kullanılan çimentonun türü, geçirimsizlik üzerinde etkili olmaktadır. Çimentonun karma oksitlerinden C₃S'de açığa çıkan Ca(OH)₂, C₂S'de açığa çıkanın iki katıdır. Buradan iki önemli sonuç çıkar. Ca(OH)₂, su içinde çözünür, yeri boş kalır ve

betonun dayanımı düşer. Su, beton içine kolaylıkla girer ve hasara yol açar. Bu durumda C_3S 'i fazla çimento ile üretilen betonları su yapılarında kullanmak doğru olmaz [9].

Betonun geçirimliliğinde çimentonun kimyasal bileşiminden başka inceliği, dozajı, su oranı ve betonun kürü çok önemlidir. Örneğin aynı su-çimento oranı için, kaba çimentolar ince çimentolara göre daha geçirgen yapı oluşturmaktadır. Diğer değişkenlerin aynı tutulması halinde, yüksek çimento dozajı veya düşük su-çimento oranının geçirimliliği azalttığı bilinmektedir [9].

Çimento hamuruna agrega taneleri katıldıkça geçirimliliğin arttığı gözlenir. Bu artışın nedeni, agrega-çimento hamuru ara yüzünde oluşan mikro çatlaklardır. Diğer koşulların aynı kalması ve aynı çimentonun kullanılması halinde, agreganın türüne bağlı olarak betonun geçirimliliği değişir. Agreganın geçirimsiz olması, akım alanını azaltır. Akım yollarının agrega çevresinden geçip uzaması nedeniyle betonun geçirimliliği azalır [9].

Mineral katkıları betonun geçirgenliğini düşürmek suretiyle korozyon kontrol potansiyelini arttırmak için kullanılabilirler [12].

Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı kullanılan bazı genel yaygın katkılarıdır. Mineral katkıları için ilave kalsiyum silikat hidrat betonun geçirimliliğinin azaltılmasına ve klor difüzyon hızının azaltılmasına yardımcıdır [12].

Çimento denilince ilk akla gelen portland çimentosudur. Portland çimentosu esas olarak, killi ve kalkerli maddelerin uygun oranlarda karıştırılması ve yaklaşık 1400–1500°C sıcaklıkta pişirilmesi sonucu katı parçacıklar halinde elde edilen klinkerin, uygun oranda alçı taşı ile birlikte öğütülmesi ile elde edilir [11].

Yapı malzemelerinde portland çimentolu beton geniş kullanım alanına sahiptir. Bunun başlıca sebepleri arasında ekonomik üstünlüğü ve minimum bakım onarım gerektirmesi gelmektedir [17].

Dünyada ve ülkemizde çimento olarak başlangıçta yalnızca portland çimentoları üretilmiştir. Daha sonra, tras, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı gibi puzolanik maddeler klinkere katılarak farklı özellikler taşıyan çimento tipleri de üretilmeye başlanmıştır [11].

3.2.1.1 Puzolanlı Çimentolar

Klinker içine yeterli oranda puzolan katılarak portland çimentosundan farklı çimentolar elde edilmektedir. Genel ilke olarak çimento içine katılacak puzolan oranı, hidrasyon sırasında klinkerdeki kalsiyum silikatların serbest bıraktığı tüm kalsiyum hidroksiti bağlamaya yeterli olacak şekilde ayarlanır.

Genellikle klinker içine %20-40 oranında doğal veya yapay puzolan katılmak suretiyle puzolanik çimentolar elde edilebilir. Hidrasyon sırasında açığa çıkan serbest kireci kimyasal olarak bağlamaya yetecek miktardan daha düşük oranlarda puzolan katılması halinde puzolanlı çimento değil, katkılı çimento elde edilebilir. Bu çimentoların bileşimleri ve karakteristik özellikleri aşağıda açıklanmaktadır [11].

3.2.1.1.1 Traslı Çimentolar

İlk olarak ve en çok kullanılan doğal puzolan bir volkanik tüf olan trasdır. Bundan başka volkanik küller ve opal gibi aktif silis içeren mineraller de puzolanik özellik gösterirler. Doğal puzolanlar içinde bulunan silis genellikle amorf haldedir. Doğal puzolanların çoğu içerdiği fazla miktarda su nedeniyle doğrudan puzolan olarak kullanılamaz. Bu tip puzolanların önceden 550⁰C-1100 C'e kadar kızdırılması ve aktif hale getirilmeleri gerekebilir [11].

Yapılan araştırmalar, asit karaktere sahip olan puzolanların başka bir deyimle ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) toplamı yüzdesi fazla olan puzolanların, kuvvetli bir baz olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile daha kolay reaksiyona girdiğini göstermiştir. Bir puzolanın reaksiyon sonunda bağlamış olduğu kireç miktarı ne kadar fazla ise, reaktivitesi o kadar büyüktür veya puzolanik özelliği de o kadar yüksektir. Bu özellik puzolanın özgül yüzeyine de bağlıdır. Bunu sağlamak için trasın çok ince bir şekilde öğütülmesi gerekir [11].

Traslarda aranılan en önemli özellik $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamının en az %70 olmasıdır. Ancak bir trasın puzolanik özellik göstermesi için yalnızca bu koşulu sağlamış olması yeterli olmaz. Ayrıca puzolanda silis ve alüminin reaktif halde bulunması gerekir. İçerdiği SiO_2 ve Al_2O_3 amorf yapıya sahip değilse, o maddenin puzolanik özelliği göstermesi beklenemez [11].

3.2.1.1.2 Uçucu Küllü Çimentolar

Uçucu küller, toz kömür yakan termik santrallerde baca gazı içine karışan toz halindeki küllerin baca çıkışında elektrostatik olarak tutulması ile elde edilir. Yaklaşık çimento

inceliğinde olan bu küller yanma bölgesinden çabucak uzaklaştığı için ani olarak soğurlar ve puzolanik aktivite kazanırlar [11].

Uçucu kül puzolan olarak kullanılmasının dışında çimento hammaddesi olarak da kullanılabilir. Böylece fırında klinkerin pişirme sıcaklığı yaklaşık 100°C düşürülebilir. Ayrıca pişirme sonunda elde edilen klinker içinde daha az serbest CaO bulunur [11].

Çimento inceliğinde olan uçucu kül, bu özelliği nedeniyle beton içine doğrudan katılarak da kullanılabilir. Böylece büyük ölçüde çimento tasarrufu yanında, (uçucu kül özgül ağırlığının çimentodan düşük olması nedeniyle) hacim büyümesi de sağlanmış olur. Çok ince uçucu kül partikülleri beton boşluklarını doldurur ve beton permeabilitesini azaltıcı etki yapar [11]. Bunun sonucu olarak beton bünyesine çevreden O₂, CO₂ ve Cl⁻ iyonu gibi betonarme demirlerinin korozyon hızını artırıcı bileşenlerin girmesini güçleştirmektedir [9]. Ancak çimento yerine uçucu kül katılarak elde edilen betonların başlangıç mukavemetleri oldukça düşüktür [11].

Örneğin beton içine %30 oranında uçucu kül katılması halinde, başlangıç periyodundaki basınç mukavemeti, aynı dozajda ve uçucu kül katılmamış olan betonların mukavemetinden daha düşük olmaktadır. Ancak 90 gün sonunda çimento yerine kütleli olarak %30 oranında uçucu kül katılmış olan beton, hiç uçucu kül katılmamış olan betonun mukavemetine erişmekte ve 1 yıl sonunda onu geçmektedir [11].

Uçucu küllü betonların başlangıç mukavemetinin düşük oluşundan ileri gelen sakıncasını gidermek üzere, beton dozajında azaltılan çimento kütlesi yerine daha fazla uçucu kül katılması yoluna gidilir. Örneğin 1 m³ betondan 50 kg çimento azaltılırken, onun yerine 100 kg uçucu kül katılır. Böylece ilk 28 günlük mukavemette herhangi bir azalma görülmez. Buna karşılık nihai mukavemette artış elde edilir. Ayrıca, çimento yerine uçucu kül katılmak suretiyle beton permeabilitesi yaklaşık olarak 10 kat azaltılmış olur [11].

3.2.1.1.3 Yüksek Fırın Cüruf Çimentoları

Bu tip çimentolar portland klinkeri ile %65'i aşmamak üzere granüle yüksek fırın cürufunun birlikte öğütülmesi ile üretilir. Bu amaçla kullanılan granüle yüksek fırın cürufu, pik demiri üretimi sırasında yan ürün olarak oluşan cürufun su ile ani soğutulmasıyla granüle hale getirilmesiyle elde edilir [11].

Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre, granüle yüksek fırın cürufunun puzolanik özelliğinin, belirli bir sınır değere kadar, CaO/SiO_2 oranı ile artmakta olduğu görülmüştür. Ancak, bu sınır değeri aşıldığında, diğer bir deyişle, CaO miktarının çok yüksek olması durumunda granülasyon güçleştiğinden puzolanik özellikte azalma olmaktadır. Sabit bir CaO/SiO_2 oranı için Al_2O_3 miktarının artması cürufun aktivitesini artırıcı olarak rol oynamaktadır [11].

Diğer puzolanlı çimentolarda olduğu gibi, cürufu çimentoların da başlangıç mukavemetleri oldukça küçük olmasına rağmen, zamanla portland çimentolarına erişmekte ve onları geçmektedir [11].

3.2.1.1.4 Silis Dumanı (Silica Fume) Katkılı Çimentolar

Silisyum metalinin veya silisyumlu metal alaşımlarının üretiminde, yüksek saflıktaki kuvars minerali, elektrik ark fırınlarında yaklaşık 2000°C sıcaklıkta kömür ile indirgenir. Bu işlemler sırasında bir kısım silisyum metali oksitlenerek SiO halinde gaz fazına geçer. Gaz halindeki SiO fırının soğuk bölgelerinde havayla temas edip ani soğuma yaparak amorf yapıda SiO_2 haline dönüşür. Böylece bileşiminde %85-98 oranında reaktif SiO_2 içeren bir çökelti meydana gelir. Amorf yapıda ve çok ince taneli olan bu çökeltiye dumandan oluştuğu için "silis dumanı" denir. Silis dumanı hem amorf yapıda oluşu, hem de inceliğinin çok yüksek olması nedeniyle mükemmel puzolanik özellik gösterir. Bu malzeme klinker içine %6-10 oranında katılarak silis dumanlı çimento olarak kullanılır. Ayrıca doğrudan beton içine, çimento yerine yaklaşık %10 oranında katılmak suretiyle yüksek mukavemetli beton elde edilebilir [11].

Silis dumanı, puzolanik aktivitesinin çok yüksek oluşu nedeniyle bilinen en üstün özellikteki puzolandır. Aktivite indeksi diğer bütün puzolanlarda %75 olduğu halde silis dumanında kontrol numunesinin %110'u düzeyindedir. Bu üstün performansı nedeniyle silis dumanı yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılmaktadır [11]. Silis dumanı çimento içine %6-10 oranında katılması halinde yeterli puzolanik etkiyi gösterebilmektedir [11].

Ancak, silis dumanının özgül yüzeyinin fazla oluşu nedeniyle, silis dumanı katkısı betonun su ihtiyacını artırıcı etki yapmaktadır. Çimento yerine %10 silis dumanı katılması halinde, aynı akıcılığı sağlamak için, 1 m^3 betona yaklaşık 100 kg fazla su katılması gerekir. Genel olarak, 1 m^3 betona 1 kg silis dumanı ilave edildiğinde, betonun su ihtiyacı 1 kg/m^3 artmaktadır. Silis dumanı içeren betonlarda su/çimento

oranını 0,35-0,40 arasına düşürmek için mutlaka süper plastikleştirici katkı maddesi kullanılması gerekmektedir [11].

Silis dumanı katkısı süper plastikleştirici katkısı ile birlikte kullanılması halinde betonun bütün özelliklerinde iyileştirici etki yapmaktadır. Bu etkilerin önemli olanları aşağıdaki şekilde özetlenebilir [11].

Silis dumanı katılmış olan betonlar daha yoğun ve boşluksuz olduğundan, beton permeabilitesinde belirgin şekilde azalma görülür. Bunun doğal sonucu olarak zararlı iyonların beton içine girmesi güçleşir. Betonun sülfat korozyonuna dayanıklılığını artırır, alkali-agrega reaksiyonunun zararlı etkilerini azaltır. Beton basınç mukavemetinde artışa neden olur. Bu artış yalnız puzolanik etki yoluyla değil, çok ince bir malzeme olan silis dumanının beton boşluklarını doldurmasından ileri gelir [11].

Çimento yerine %10'a kadar silis dumanı katılmış ve süper plastikleştirici kullanılarak aynı kıvama getirilmiş olan betonların 7 ve 28 günlük mukavemetleri, yalnız portland çimentosu kullanılarak katkısız olarak yapılmış betonlara göre daha yüksektir. Ancak silis dumanı katkısının olumlu etkisi %10 civarında maksimum değere ulaşmakta, %10'dan daha fazla silis dumanı katılması halinde basınç mukavemetinde azalma görülmektedir [11].

Silis dumanının beton basınç mukavemetini artırıcı etkisi başlıca şu iki nedene dayandırılmaktadır [11].

1. Silis dumanı çok ince taneli malzeme olduğundan, beton boşluklarını doldurarak betonun daha kompakt olmasını sağlamaktadır [11].
2. Çok yüksek puzolanik aktiviteye sahip olan silis dumanı, hidrasyon sonucu açığa çıkan serbest kireci kolaylıkla bağlayabilmektedir [11].

Daha önce belirtildiği üzere, optimum puzolanik etki portland çimentosu içine puzolan katkı oranının, hidrasyon sırasında oluşan serbest kirece yetecek derecede olması ile sağlanabilmektedir. Puzolan katkısının daha fazla olması halinde aktif silis reaksiyona girecek serbest kireç bulamayacak ve yalnızca dolgu maddesi olarak hareket edecektir. Pratikte çimento yerine %6,0-%8,5 oranında silis dumanı katkısı kullanılmaktadır [11].

Çimento cinsi yanında çimento miktarı (dozaj) da beton kalitesine doğrudan etki yapar. Çimento dozajı, yani 1 m³ betonda kullanılan çimento miktarı, başta mukavemet olmak

üzere, beton özelliklerine etki yapan en önemli faktördür. Çimento dozajının hem mukavemeti artırıcı, hem de boşluk yüzdesini azaltıcı yönde etkisi vardır. Ancak yaklaşık olarak 400 kg/m^3 den sonra beton dozajının artırılması halinde artık rötre nedeniyle çeşitli sorunlar ortaya çıkar. Diğer taraftan ekonomik nedenlerle çimento dozajı istenildiği kadar artırılamaz. Çimento dozajının yüksek oluşu yalnız beton mekanik mukavemetlerini artırmakla kalmayıp, beton yapıyı daha homojen hale getirir ve böylece kapilarite yoluyla meydana gelen geçirimsizliği de azaltır [11].

Çimento dozajı artırıldığında beton yoğunluğu artar ve porozitesi azalır. Kullanılan çimento cinsi de önemlidir. Puzolanlı çimentolar, beton boşluklarında bulunan serbest kireci silikat bileşikler halinde bağlayarak beton boşluklarını doldurur. Böylece beton permeabilitesinde azalma meydana gelir. Ancak puzolanların bu etkisi uzun süre içinde ortaya çıkar [18].

Beton geçirimsizliği esas olarak çimento tarafından sağlanır. Çimento, kum ve çakıl tanelerine yapışarak bu tanecikleri birbirlerine sıkıca bağlar. Böylece suyun beton içine girmesi önlenir. Bu nedenle mekanik mukavemetin sağlanması için gerek olmasa bile, salt geçirimsizliği sağlayabilmek için çimento dozajının belli bir değerden aşağıya düşmemesi gerekir. Diğer taraftan rötre, çimento dozajı ile artış gösterdiğinden, dozaj belli bir değeri de geçmemelidir. Genellikle çimento dozajının en uygun değerleri $250-400 \text{ kg/m}^3$ arasındadır [11].

Saraswathy ve Song'un yaptığı çalışmada, iki çeşit beton ile üç çeşit farklı çimentonun geleneksel portland çimento (OPC), puzolan portland çimento (PPC) ve %25 uçucu kül katkılı geleneksel portland çimentodan (FA) dizayn edilen M 20 ve M 40 karışımları hızlandırılmış korozyona tabi tutularak korozyon karakteristiklerinin analiz edilmiştir. Donatılı beton numuneler $900\text{mm} \times 180\text{mm} \times 100\text{mm}$ ölçülerinde dökülmüş, kürlenmiş ve 0-0,10 mm çatlak genişlikli olarak çatlatılmış ve %3 NaCl ortamında hızlandırılmış korozyona tabi tutularak ve korozyon dirençleri; açık devre potansiyeli, lineer polarizasyon tekniği, serbest klor-alkalinite-ağırlık kaybı ölçümleri gibi çeşitli elektrokimyasal testler kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda puzolan portland ve uçucu külün kısmi oranda katıldığı beton, geleneksel portland çimentolu betona göre daha iyi korozyona direnç özelliği göstermiştir. Performans sıralaması $\text{OPC} + \text{FA} > \text{PPC} > \text{OPC}$ olarak bulunmuştur. Uçucu kül betonun korozyon karakteristiğini iyileştirmiş, korozyon başlangıç zamanını geciktirmiş ve hem çatlaklı hemde çatlaksız durumda korozyon hızını azaltmıştır [19].

Ann ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, yüksek alüminalı çimentolu (HAC) betonun klor kaynaklı korozyon direncini, korozyon davranışı, klor iyonlarının bağlanması ve taşınımı ile değerlendirmişlerdir. Korozyon direnci donatı çelikli betonarme numuneler tuzlu ortama maruz bırakılarak değerlendirilmiştir. Klor iyonlarının bağlama kapasitesi 28. ve 91. günlerde suyun ekstraksiyonu metodu ile değerlendirilmiştir. Klor taşınım oranı, difüzyon katsayısı ve yüzey klor içeriğine göre açıklanmıştır. Dayanım testleri 365 güne kadar uygulanmıştır. HAC betonda 28. günde dayanımda bir azalma gözlenmesine rağmen basma dayanımı geleneksel portland çimentolu betona göre daima daha yüksek bulunmuştur. HAC harç ve betonda, harcın daha düşük klor bağlama kapasitesine rağmen, korozyon hızı geleneksel portland çimentolu betona göre daha düşük değerler göstermiştir [20].

Kayalı ve Zhu yaptıkları çalışmada, basma dayanımı 70 Mpa olan yüksek dayanımlı silis dumanlı çimentolu betonarme numuneleri %2 lik klorlu çözeltiye kısmı olarak daldırdıktan sonra klor difüzyonunu ve korozyon aktivitesini test etmişlerdir. 32 Mpa'lık geleneksel betonlarda aynı koşullarda test edilmiştir. Yüksek dayanımlı betonda klor difüzyonu son derece düşük bulunmuştur. Buna karşılık 32 Mpa'lık betonda çelik derinliklerinde klor konsantrasyonu yüksek seviyeli olarak not edilmiştir. 32 Mpa'lık betonda korozyon potansiyelleri 350 mV'dan daha negatif değerler elde etmeyi sürdürmüştür. Yüksek dayanımlı betonda potansiyel değerleri kararlı olarak kalmış ve 200 mV civarında bulunmuştur. 32 Mpa'lık betonda korozyon akım değerleri kısa zamanda aktif değerlere çıkmıştır. Yüksek dayanımlı betonda akım yoğunlukları klor eşik aktivasyon değerine ulaşamamıştır. Bu durum, 32 Mpa'lık betonda herhangi bir ilerleme olmazken 28 günlük kür süreci sonrasında yüksek dayanımlı betonda korozyon direnç özelliklerindeki ilerlemeyi kanıtlamıştır. %10 silis dumanı içeren yüksek dayanımlı betonun son derece yüksek korozyon direnç özelliklerine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır [21].

3.2.2 Mineral Katkı Tipi

Donatıyı korozyondan korumanın en etkili yolu, donatının yeterli kalınlıktaki, geçirimsiz beton ile kapatılmasıdır. Betonda geçirimsizliğin sağlanması için yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı gibi mineral katkıların pozolanik reaksiyonları sonucu, daha küçük ve süresiz boşluk yapısı oluşturduğu, mineral katkı içeren betonların klorür difüzyonunun ve permeabilitesinin daha düşük olduğu bilinmekte

ancak katkılı betonların kür koşullarına ve çevresel etkilere karşı, normal portland çimentosu ile üretilen betonlara göre çok daha hassas olduklarına dikkat çekilmektedir [9].

Katkılı çimento tiplerinde de klinker esas bağlayıcı bileşendir, ancak bu çimentolar içine puzolanik özellikte veya inert karakterde değişik oranlarda mineral katkı maddeleri katılır [11].

3.2.3 Agrega Tipi

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 [22].

Beton üretiminde ince agregası (kum), ve kalın agregası (çakıl) olmak üzere iki tip agreganın karışımı kullanılır. Agregalarda aranan birinci özellik, agregası içinde kil toprakları, organik maddeler, klorür ve sülfat tuzları gibi zararlı bileşenlerin bulunmamasıdır [11]. Klor iyonları bakımından normal betonarme için, beton ağırlığına kıyasla %0,2 ve önerilmeli betonarme için %0,1 sınırları bulunmaktadır. Beton içine agregası 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 yıkanıp klor iyonlarından mümkün olduğunca temizlenmesidir [22].

Beton için agregası seçerken dikkat edilmesi gereken diğer önemli hususlar boşluk oranı, nem, büyüklük, muhteviyat ve betonun kullanılacağı yapının amacıdır [22].

Agregası geçirgenliği de klor iyonlarının hareketini önemli ölçüde etkiler [12] Betonun permeabilitesi ve porozitesini azaltmak üzere her şeyden önce iyi bir agregası ve uygun bir granülometri seçilmelidir [18].

Agregası tanelerinde bir miktar boşluk bulunması doğaldır. Porozite genel olarak %10 dan küçük olmalı ve yüksek mukavemetli beton üretiminde ise %5 değerini aşmamalıdır. Agreganın emdiği su miktarı genel olarak karakteristik %2'nin üstüne çıkmamaktadır. İri agregalarda su emme miktarının %10 dolaylarında bulunması doğaldır. Agreganın rutubetli olması durumunda betona konulacak su miktarı, agregada bulunan su miktarı kadar azaltılmalıdır. Betonun donma olayı sonunda parçalanmasında

agrega taneleri de en önemli rolü üstlenir. Böyle bir durum olmaması için beton üretiminde kullanılacak agregaların donma etkisine dayanıklı olması gerekir [22].

Yung Wang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, agrega yerine %0-10 – 20-30 oranlarında sıvı kristal cam kumu kullanılan kendinden yerleşen betonun özellikleri araştırılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki kendinden yerleşen betonda çökme akışı cam kumu içeriği arttıkça yükselmektedir. Ayrıca, %20 oranında agrega yerine kullanılması ile en yüksek basma ve eğilme dayanımı sağlanmaktadır. Kendinden yerleşen cam beton en yüksek ultrases hızına sahiptir. Elektrik direnci 56 gün sonra 20 k Ω cm'den daha yüksektir. Sonuç olarak, cam hacmi %30'a çıkarıldığı zaman klor iyonu penetrasyon miktarı azalmıştır ve kendinden yerleşen cam betonun dayanıklılığı iyileşmiştir [23].

3.2.4 Su/Çimento Oranı

Diğer değişkenlerin aynı tutulması halinde, yüksek çimento dozajı veya düşük su-çimento oranının geçirimsizliği azalttığı bilinmektedir [9].

Hidratasyon reaksiyonları sırasında 100 kg çimento, 25-30 kg su tüketir. (Su/çimento oranı ~0,25–0,30) Betona işlenebilir, yerleştirilebilir bir kıvam kazandırmak için kattığımız ilâve su reaksiyona girmediğinden, zamanla buharlaşıp kaybolarak arkasında boşluk bırakır. Boşlukların yük taşıma kapasitesi olmadığından hem dayanım (mukavemet) açısından zararlıdır hem de bu boşluklardan betona veya donatıya zararlı maddeler (rutubet, oksijen, karbondioksit, klor, vs.) içeri girebileceğinden, durabilite (zaman içinde dış tesirlere dayanıklılık, uzun ömür) açısından zararlıdır. Özetle gerek dayanım gerekse durabilite için, korozyon açısından temel parametre su/çimento oranının düşük tutulabilmesidir [24].

Beton karışımı içine bazı özel katkı maddeleri katılarak su/çimento oranı düşürülebilir. Böylece beton içindeki boşluklar minimuma indirilmiş olur. Çimentonun hidratasyonu için kimyasal olarak gerekli su miktarı %30'dan daha azdır. Pratikte bu oran genellikle %40-50 arasında alınır. Fazla su betonun boşluklu olmasına neden olur [18].

Çimento hamurunda su-çimento oranının 0,3'ten 0,7'ye çıkarılması durumunda hamurun geçirgenliği 100 kat artmaktadır. Örneğin, su-çimento oranı 0,4 değerini aştığında, kapiler boşluklar arasındaki bağlantıların kesilmediği ve geçirimsizliğin hızla arttığı görülmektedir. Özetle, karma suyunun fazlalığı çimento hamuru fazının

geçirimsizliğini etkileyen en önemli faktördür; fazla su, buharlaşabilen suyu içeren boşluk sistemini belirler. Su-çimento oranı çok düşük ise, iyi yerleşmeyen betonda büyük ve birbiri ile bağlantılı boşluklar oluşur, geçirimsizlik artar [9].

Su çimento oranının düşürülmesi ve latex polimer modifiyeler ya da mineral katkıları özellikle silis dumanı; sertleştirilmiş betonun geçirimsizliğini düşürmede çok etkin yöntemlerdir [12].

Latex modifiyeli betonlarda modifiye olarak daha çok styren-butadien modifiyeleri yaygın olarak kullanılır. Maliyeti minimize etmek için 40-50 mm kalınlıkta genellikle kullanılırlar [12].

Soleymani ve İsmail'in yaptığı çalışmada, geleneksel ve yüksek performanslı olmak üzere iki tip betondaki donatı çeliklerinin korozyon aktivitesi farklı tipte korozyon ölçüm metotları kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, lineer polarizasyon direnci (LPR), yarı hücre potansiyel ölçümü (HCP), klor içeriği ve tafel (TF) metodlarının numunelerin sadece %24'ünün korozyon aktivitesini aynı düzeyde belirlediğini göstermiştir. Farklı korozyon aktiviteleri tahmin edilen numunelerde klor içerik metodu genellikle en düşük korozyon aktivitesi öngörürken TP ve LPR metodları en yüksek korozyon aktivite seviyelerini öngörmüştür. HCP ise diğer metodlarla belirlenen korozyon aktivite seviyeleri arasında bir değer belirlemiştir. Yüksek dayanımlı betonlar geleneksel betonlara göre düşük korozyon test sonuçları göstermiştir. Düşük su-çimento oranı ve silis dumanının kullanılması düşük korozyon aktivite düzeyinin ana sebepleri olabilir [25].

3.2.5 Beton Dökümü

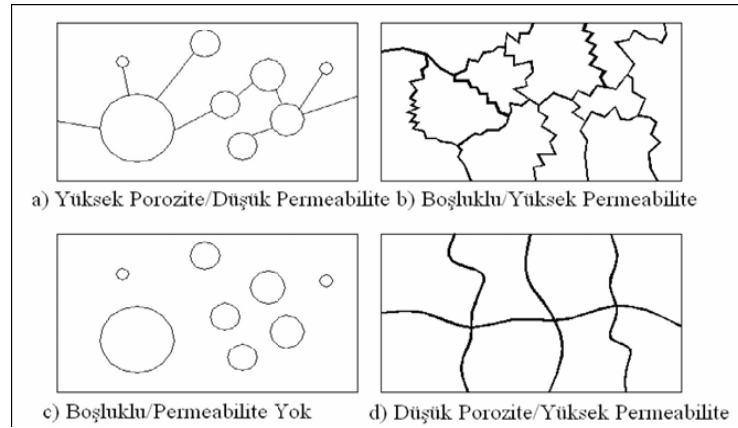
Beton kalıplara yerleştirilirken, vibrasyon yapılarak tam olarak kalıp içine yerleşmesi sağlanmalıdır. Beton içindeki boşluğun yüzdesi kadar, bu boşlukların bir biri ile bağlantılı olmaları da beton permeabilitesi açısından çok önemlidir [18].

Geçirimsizlik betonun dayanımını, kimyasal ve fiziksel olaylara karşı dayanıklılığını etkilemektedir. Sertleşmiş betonun geçirimsizliği ve su emme özelliği boşluk yapısının bir göstergesidir. Su, çözünebilen agresif iyonları beton içerisine taşımakta ve kimyasal hasarın kaynağı olmaktadır. Geçirimsizliği yüksek olan betonlarda su ve zararlı maddeler beton içerisine kolayca sızacağı için geçirimsizlik hem betonun hem de beton içerisine gömülü çeliğin hasar görmesine veya birden fazla hasarın birlikte oluşmasına neden

olur. Sertleşmiş betonun su emmesinde, önce büyük boyutlu boşluklar, daha sonra da küçük boyutlu kapiler boşluklar su ile dolu duruma gelmektedirler [9].

Betondaki boşlukların hacmini (poroziteyi) etkileyen bütün faktörler, geçirimsiliği de etkileyen faktörlerdir, ancak porozite ile geçirgenlik her zaman birbirleri ile ilişkili değildir; örneğin çok boşluklu bir cisim geçirgen olmayabilir. Önemli olan boşlukların çapı, dağılımı, birbirleri ile bağlantısı ve dışa açık olup olmadığıdır. Porozite, boşlukların iç boyutunun değişik olması, boyutların ani olarak değişmesi, boşluk iç yüzeylerinin pürüzlülüğü, dolambaçlılık gibi boşluk özellikleri geçirimsiliği etkileyen belli başlı faktörlerdir. Betonda, genellikle geçirimsiliği belirleyen porozite değil, boşluk yapısıdır. Ayrıca matriste bulunan mikro çatlaklar geçirimsiliği önemli oranda artırır [9].

Porozite ile geçirimsilik arasındaki farkın şematik olarak gösterildiği Şekil 3.3’de, boşluk sistemindeki bağlantının geçirimsilik için ön koşul olduğu açıktır. Örneğin, boşluklar süreksiz ise betonun porozitesi yüksek olsa bile geçirimsiliği düşük olmaktadır [9].



Şekil 3.3 Porozite ve geçirimsilik arasındaki farkın gösterimi [9].

Beton içindeki boşlukların kapalı hücreler halinde kalmasını sağlayabilmek ve beton permeabilitesini azaltmak için özel hava katkı maddeleri katılabilir [18].

3.2.6 Beton Kürü

Dökümden sonraki ilk günlerde, betonun içinde bulunduğu ortamın sıcaklığı ve relatif rutubeti beton kalitesi açısından büyük önem taşır. Dökümden sonra sıcak ve kuru ortamlarda bekletilen betonlar uygun şekilde kristalleşemediklerinden boşluk yüzdeleri fazladır [18].

Güneyisi, Özturan ve Gesoğlu'nun çalışmaları, betonun basma dayanımı, elektriksel direnci ve çelik donatının korozyonu üzerine yapılmış deneysel araştırma sonuçlarını içerir. İki farklı su çimento oranına (0,65 ve 0,45) ve iki farklı çimento dozajına (300 ve 400 kg/m³) sahip betonlar katkısız ve dört farklı katkılı portland çimentosu ile üretilmiştir. Beton numuneler üç farklı (kontROLSÜZ, kontrollü ve ıslak kür) kür prosedürüne tabi tutulmuştur. Katkılı ve katkısız çimento kullanımının donatı korozyonu sonucundaki hasarların beton direnci üzerine etkisini değerlendirmek için hızlandırılmış etkin voltaj testi ile araştırma yapılmıştır. Beton direnci beton yüzeyine elektrotlar yerleştirilerek hasarsız olarak ölçülmüştür. Betonun basma dayanımı, elektriksel direnci ve korozyon direnci 180 gün içerisinde farklı zamanlarda saptanmıştır. Test sonuçları ıslak kürün hem katkısız hem de katkılı çimentolu betonlarda yüksek dayanım ve dayanıklılık için önemli olduğunu göstermiştir. Yetersiz (kontROLSÜZ) kürden alınan betonlar dayanım ve korozyon direnci açısından zayıf performans göstermiştir [26].

3.2.7 Beton Rutubeti

Önceden açıklandığı üzere, betonarme demirlerinin korozyonu için hem oksijene, hem de suya ihtiyaç vardır. Sürekli kuru halde bulunan betonlar içinde korozyon hızı son derece azdır. Beton rutubeti arttıkça korozyon hızında da artış olur. Ancak %100 doygun rutubetli betonlarda, beton boşlukları tamamen su ile dolu olduğundan atmosferden oksijen difüzyonu güçleşir ve bunun sonucu olarak korozyon hızında önemli ölçüde azalma olur. Betonarme demirlerinin korozyonu için en uygun ortam betonun kısmen rutubetli olması, veya zaman zaman ıslanıp kurumasıdır. Beton yapının bir bölgesinin rutubetli diğer bölgelerinin kuru oluşu da, farklı havalanma nedeniyle tehlikeli korozyon hücrelerinin oluşmasına ve rutubetli olan bölgenin anot olarak korozyona uğramasına neden olur [18].

Elektrokimyasal olarak bakıldığında, beton rutubetinin korozyon üzerine iki şekilde etki yaptığı görülür. Her şeyden önce su korozyon hücrelerinin elektroliti olarak gereklidir. Rutubetin ikinci etkisi, betonun iletkenliğini artırıcı olarak rol oynamasıdır [18].

3.3 Beton Yapılarda Donatı Korozyonunun Mekanizması

Çimento ile su arasındaki hidratasyon reaksiyonları sonucu oluşan Ca(OH)₂ (sönmüş kireç) betonun pH'ını yüksek tutar. (yaklaşık 12~13) [24]. Beton içindeki yüksek alkali ortamı, donatı çeliğine sıkıca yapışarak bir film oluşturur [27]. Betondaki çelik, normal

olarak elik imento ara yüzeyinde alkalın imento matris içerisinde oluşan bu pasif film tarafından korozyondan korunmaktadır [28].

Pasif tabaka; kararlı, koruyucu bir oksit tabakasıdır. Bu tabaka elektriksel direnci artırarak ve/veya konsantrasyon polarizasyonuna yol açarak anodik akım yoğunluğunu kısıtlar, korozyona karşı sigorta görevi görür [22].

Herhangi bir ortamdaki çeliğin korozyon prosesi Fe atomlarının paslanan (aşınan) elikten sürekli olarak uzaklaşması ile gerçekleşir [29].

Bu pasif film deniz atmosferi veya tuzlar ile gelen klor ile veya betonun atmosferdeki karbondioksit ile reaksiyonu sonucunda karbonasyon ile pH'nın düşmesi sonucunda zarar görerek depassivasyona uğrayabilir [30].

Korozyon her zaman birbirini tamamlayan iki elektro-kimyasal reaksiyonla meydana gelir. Bunlar oksidasyon ve redüksiyon reaksiyonlarıdır. Oksidasyon atom halindeki metalin (eliğin) elektron kaybederek iyonla dönüşmesi, redüksiyon ise atomdan ayrılan elektronların başka bir ortamda harcanmasıdır. Oksidasyona anot reaksiyonu, redüksiyona katot reaksiyonu adları verilir [14].

Bunlardan birinin önlenmesi korozyon sürecini durdurur. Kendi tuzlarından biriyle hazırlanmış elektrolitik sıvıya daldırılmış metal, bir yarı hücre oluşturur. Onun belirli bir elektro potansiyeli mevcuttur, başka bir yarı hücreye iletken aracılığıyla bağlandığında tam hücreye yani pile dönüşür [14].

Elektrik akımı, reaksiyonların ilerlemesi için iki bölge arasında kapalı dnė olarak akmalıdır. Genel proses elektriğin üretildiği kuru pil hücresine çok benzerdir. Bu tür piller teknik olarak galvanik hücre olarak tanımlanırlar. Bu nedenle korozyon prosesi bazen galvanik korozyon olarak da isimlendirilir [29].

Betonarmedeki elik çubuğun korozyonu için başka bir iletkene gerek yoktur; aynı elik çubuk üzerinde elektrokimyasal tam hücre kendiliğinden oluşur. Nem, elektrolitik ortamı, çeliğin kendisi de elektronları ileten elektronik iletkeni oluşturur. Oksijen konsantrasyonundaki farklılık elik üzerinde anot ve katot bölgelerini oluşturur. Bunlardan oksijeni az olan bölgeler hasar gören anot, çok olan bölgeler ise korunan katottur. Oksijen paradoksuna göre, paslanma, oksijenin oranla az bulunduğu bölgelerde daha belirgindir [9].

Oksijenin betona giriş hızı betonun suya doygunluk derecesinden etkilenir; ıslanma-kuruma etkisindeki elemanlarda korozyon çok daha hızlı gelişirken, tamamen suya doygun elemanlarda ihmal edilebilir seviyesindedir. Oksijen, katodik reaksiyonda harcandığı için su içinde çözünmüş olmalıdır. Dolayısı ile oksijenin suda çözünürlüğünü etkileyen tüm faktörler reaksiyonun hızını da etkilerler [9].

Beton içindeki çelik, korozyona uğradığında gözenek suyunda çözünür ve elektronlar verir [22]. Bu çözünme prosesi sonucunda çelik kütle kaybeder ve enine kesiti küçülür [29].

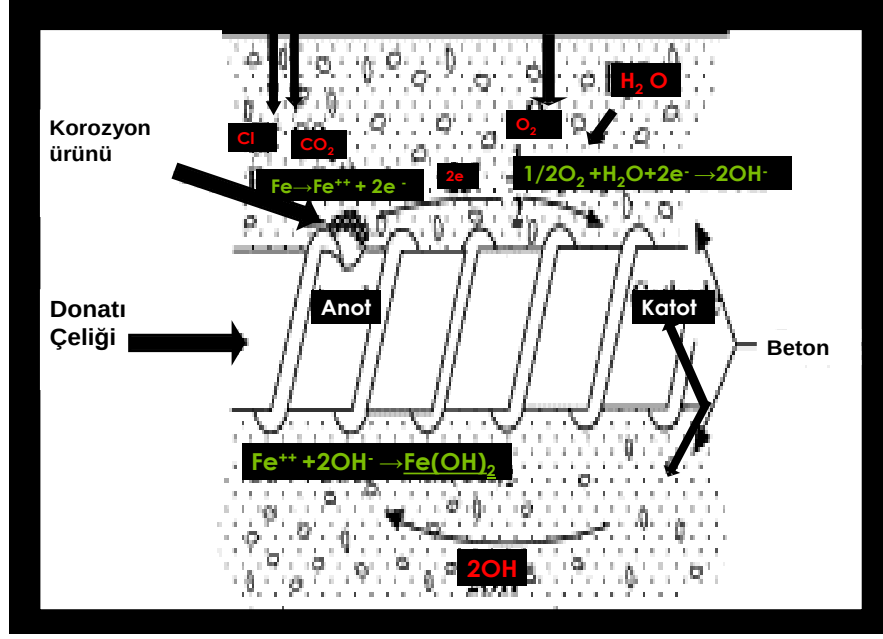
Anot elektron üreten ünitedir, katot üretilen elektronları (emen) ünitedir, elektrolit ise içerisinde elektron akımının yer alabildiği ortamdır. Demirin anot ve katot reaksiyonları bazı tepkimeler ile oluşmaktadır. Bu tepkimeler sırasıyla aşağıda gösterilmiştir [14].



Anodik reaksiyonla üretilen elektronlar, anodik bölgeden kullanılacakları katodik bölgeye akarken, dış beton gözenek suyu çözeltisindeki karşı akım iyonik akışı korozyon akımını oluşturur. Bu akış son derece önemlidir çünkü bunun kesintisi korozyon prosesinin durmasına sebep olabilir [29].

Anodik reaksiyonda ortaya çıkan iki elektronun (2e^-) çelik yüzeyinde başka yerde "elektriksel nötralize"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 [22].





Şekil 3.4 Betondaki çeliğin korozyonunun şematik gösterimi [9].

Hidroksil iyonları, katodik reaksiyon da oluşur. Bu iyonlar, lokal bazikliği artırır ve böylece katotta karbonatlaşma ve klor iyonlarının etkilerini geri çevirerek pasif tabakayı sağlamlaştıracaktır [22]. Katotta (3.4) reaksiyonu sonucu ortaya çıkan (OH)⁻ iyonlarının elektrolitik sıvı sayesinde anoda gelmesiyle tam hücrenin elektrik devresi kapanır [14].

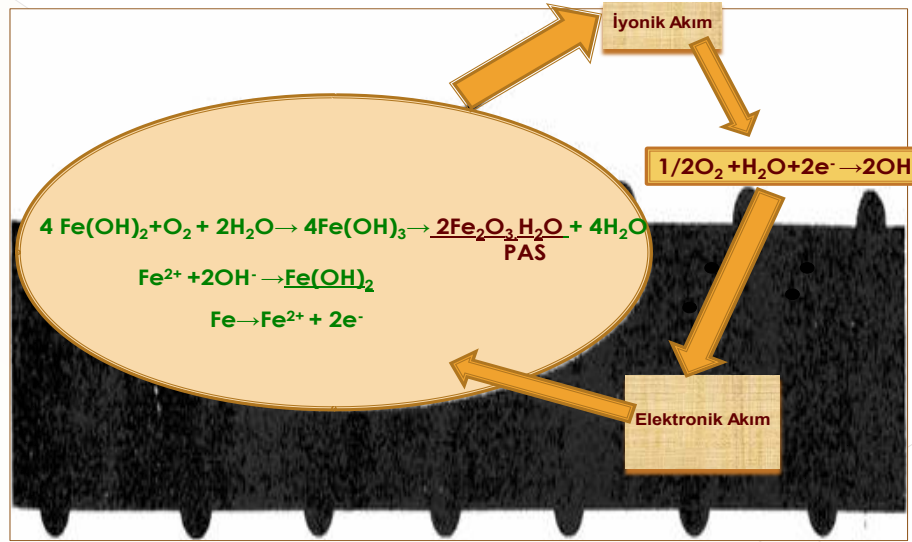
Korozyonda unutulmaması gereken; katotta reaksiyonun oluşması için su ve oksijenin de gerekli olduğudur. Betona doğru oksijen difüzyonu, betonun suya doymuşluk derecesinden ciddi bir biçimde etkilenir. Örneğin; bir araştırmada, betonun suya doygunluk derecesi %50'den %100'e yükseldiğinde oksijen akışı 5 defa, s/ç oranı 0, 6'dan 0, 4'e indiğinde 2 defa, paspayı 10 mm'den 70 mm'e çıktığında 2, 5 defa azalmıştır [22].

Korozyon prosesinin devam edebilmesi için katodik bölgedeki reaksiyonda kabul edilen elektronların anodik bölgeden verilen elektronların sayısına eşit olması gerekmektedir. Böylece katodik bölgede reaksiyona giren her çözünmüş oksijen molekülü için iki demir atomu iyonize olmalı ve anodik bölgede çözünmelidir. Gerçek metal giderim prosesi olan anodik reaksiyon eğer sadece anodik bölgede üretilen elektronları azaltıcı olarak davranan bir katodik reaksiyon var ise sürdürülebilecektir. Bu nedenle katodik bölgede oksijen ve su yok ise korozyon prosesi sona erecektir. Çelikteki elektriksel akım, anottan katoda elektron akımının bir sonucudur. Dış akım çeliği çevreleyen betondaki porlardaki çözelti içerisinde akmaktadır. Dış akım, katottan anoda doğru hareket eden negatif yüklü hidroksit iyonlarından ve anottan katoda doğru hareket eden

pozitif yüklü demirli iyonlardan oluşur. Beton gözeneklerindeki suyun alkali ve kalsiyum hidroksitlerin seyreltik bir solüsyonu olduğunu ve iyonik akışta bir araç olarak hizmet verdiğini anlamak önemlidir. Eğer gözenekler kurutulursa ya da beton gözenekleri içerden bağlantılı olmayacak şekilde oldukça yoğun olursa gözeneklerin içinden iyon akışı zorlaşır [29].

Anodik ve katodik reaksiyonlar, pas oluşumunda sadece ilk adımlardır. Eğer demir gözenek suyunda sadece çözünmekle kalsaydı betonun çatlaması ve parça kopması görünemezdi. Pas'ın oluşması için birkaç aşamanın daha oluşması gerekmektedir [22].

Anoda gelen bu hidroksil iyonları ile elektrolit solüsyonun içerisinde Fe^{+2} iyonları reaksiyona girerek ferro hidroksiti oluşturmaktadır [14]. Ferro hidroksitin ferik hidroksidi oluşması ve daha sonra hidrate ferik oksit ve pas oluşumunu gösteren tepkime dizisi aşağıdaki gibidir ve şekilde donatı çeliği üzerinde oluşan korozyon tepkimeleri detaylıca görülmektedir [22].



Şekil 3.5 Çelik Donatı Üzerinde Oluşan Korozyon Tepkimeleri



Demirli hidroksit



Ferrik hidroksit



Hidratlaşmış ferik 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 pas lekeleri gözlenebilir [22]. Buradaki su, korozyon olayının devamına yardımcı olabilmektedir [14].

Pas genellikle beton içindeki çeliğin etrafındaki dar bölgelerde birikir. Bu dar bölgelerdeki pas oluşumu betonun çatlamasına neden olabilecek olan gerilimin artmasına neden olur [29].

Çelik donatı korozyon sonucu kesit ve süneklik kaybına uğrar. Oluşan reaksiyon ürünleri nedeniyle betonda oluşan hacim artışı önceleri örtü betonunun çatlamasına, ilerleyen aşamalarda ise tamamen dökülmesine neden olur [9].

Bazen metal oldukça homojen bir yapıda olsa bile etrafını kuşatan farklı bölgelerden dolayı yerel korozyona uğrayabilir. Böyle korozyon genellikle çözülmüş oksijenin bölgesel konsantrasyon farklılıklarından kaynaklanır. Eğer çelik boyunca belirli bölgeler, diğer bölgelere göre daha çok havaya maruz kalıyorsa korozyon açığa çıkabilir. Çözülmüş oksijenin konsantrasyonunun daha yüksek olduğu havalandırılan bölgeler katodik olmaya eğilimlidir ve daha az havalandırılan bölgeler anodik olmaya eğilimlidir. Bu bölgesel tipteki korozyon genel olarak havalandırma hücre korozyonu olarak isimlendirilir. Havalandırma hücre korozyonu, konsantrasyon hücre korozyonu genel adı ile bilinen genel sınıftaki korozyon çeşitlerinden biridir. Hatta konsantrasyon hücre korozyonuna, çelik donatıyı kuşatan betonun farklı bölgelerindeki nem içeriklerindeki farklılıklar sebep olabilir [29].

Eğer korozyon hızı kontrol edilebilir ve düşürülebilirse, korozyon uygulamada ciddi bir problem olmadan oluşabilir. Korozyon hızını kontrol etmede en önemli faktör katodik bölgeyi saran çözülmüş oksijen mevcudiyetidir. Oksijen katodik reaksiyonla tüketilir ve metalin katodik bölgesini kuşatan çözeltide sürekli sağlanabilirliği engellenebilirse korozyon engellenebilir. Bu oluşumun birinci yolu çözülmüş veya gaz halindeki oksijenin çevreden difüzyonunu engellemek veya yavaşlatmak için çeliğin yüzeyini koruyucu bir tabaka ile (mesela beton örtüsü) sarmaktır. Korozyon hızı düzenleme prosesinin başında oksijenin düşük difüzyonu ile anodik ve katodik bölgelerdeki

potansiyel farkında önemli bir düşüş elde edilir. Bu etki polarizasyon etkisi ve proses polarizasyon prosesi olarak isimlendirilir [29].

3.4 Beton Yapılarda Donatı Korozyonuna Etki Eden Faktörler

3.4.1 Pasifliğin Klorür İyonu Etkisi ile Bozulması

Korozyonun başlıca sebeplerinden biri olarak klor iyonları gösterilmektedir [27].

Klorür iyonu beton bünyesine başlıca iki yolla girebilir [18].

- Beton prizini çabuklaştırmak veya beton karışım suyunu azaltmak amacıyla beton içine katılan katkı maddeleri içinde klorür bulunabilir. Veya beton karışımında kullanılan agrega ve su ile birlikte istenilmeden beton içine klorür girebilir.
- Beton içine sonradan difüzyon yoluyla giren klorür korozyon açısından daha tehlikelidir. Bu yolla giren klorürün en büyük kaynağını, yollara buzları eritmek amacıyla atılan tuz oluşturur. Ayrıca deniz atmosferinde bulunan betonlarda, rüzgarların taşıdığı klorür iyonları da beton içine girerek orada birikebilir.

Betonun permeabilitesi ve porozitesi ne derece yüksek ise, çevreden beton içine klorür iyonları difüzyonu da o derece kolay olur. Zaman zaman ıslanan ve kuruyan betonlarda bu olay daha şiddetli olarak kendini gösterir [18].

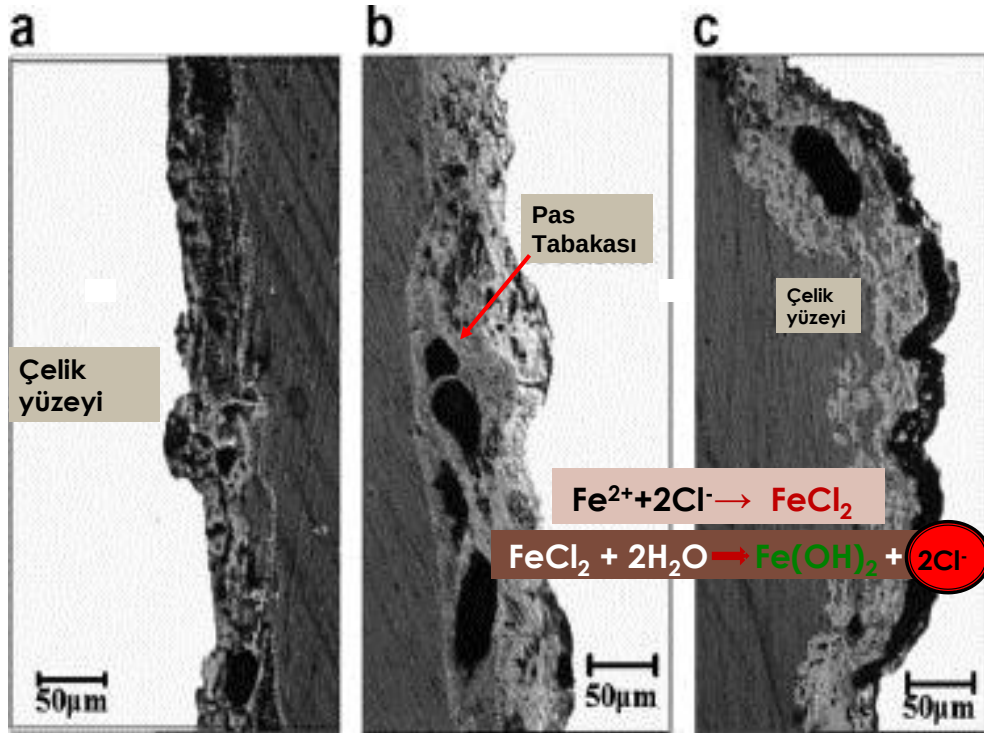
Tekrarlı ıslanma-kuruma etkisindeki deniz yapılarında deniz suyu ile beton içine sızan klorür iyonları, suyun buharlaşması sonucu beton içinde kalmakta, tekrar sayısı arttıkça klorür yoğunluğu da artmaktadır. Bu durumda deniz suyundaki klorür iyonu konsantrasyonundan daha fazla miktarda klorür iyonu beton içinde birikebilmektedir [9].

Su klor iyonlarının beton yüzeyinden içeriye doğru girebilmesinde en büyük taşıma aracıdır. Dolayısı ile klor iyonları betonun daha iç bölgelerine su aracılığıyla kılcal olarak çok hızlı bir şekilde girebilmektedir. Etüv kurusu durumunda olan bir beton tuzlu suya değdirildiğinde birkaç saat içerisinde beton birkaç mm yüksekliğinde tuzlu suyu emer. Buna karşı, yüksek miktarda doygun veya nemli olan bir betonda klor iyonlarının beton içerisine girmesi çok yavaş olmaktadır. Genel olarak tam olarak doygun bir çimento pastasının difüzyon katsayısı 10^{-12} m²/s.'dir. Klor iyonlarının beton içinde

taşınmaları oldukça karmaşıktır. Betonun suya doygunluk derecesi belirli bir kritik değerin altında iken iyonların hareketi basit bir difüzyon süreci ile gelişir ve Fick'in birinci difüzyon yasası ile açıklanabilir. Yasadaki D difüzyon katsayısı laboratuvar deneyleri ile belirlenir. 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 [14].

Beton tam kuru ise klor iyonlarının girişi kapiler emme ile oluşmaktadır. Denizin çarpıntı bölgelerinde ise permeasyon (nüfuz) süreci geçerlidir. Bu bakımdan iyon geçirimsizliği konusunda kesin bir bilimsel yaklaşım vermek zordur. Fakat klorun derin beton boşluk ağında ve mikro çatlaklarında daha ağırlıklı olarak difüzyon süreciyle taşındığı söylenebilir. Klor taşınmasını beton boşluk çaplarının incelenmesi, boşluk çeperlerinin elektro negatifliği ve ortamın yüksek pH değeri zorlaştırmaktadır. Betonda klor içeriğinin $0,6-0,9 \text{ kg/m}^3$ veya boşluk suyunda $300-1200 \text{ g/l}$ olmasının pasif tabakanın çözülmesi için yeterli olduğu kabul edilmektedir [14].

Çelik donatı yüzeyine ulaşan klorürün pasif filmin bozulmasında oynadığı rol ile ilgili değişik teoriler vardır. Bunlardan oksit film teorisine göre, klorür iyonu pasif film tabakasına nüfuz eder, filmi parçalayarak korozif element olan oksijen ve suyun metal yüzeyine erişerek metalin korozyona uğramasına neden olur [9].



Şekil 3.6 Donatı Çeliğinde Klor Kaynaklı Korozyon Oluşumu

Su emilim teorisine göre ise, metal yüzeyine adsorbe olan klorür iyonları metal iyonlarının daha çabuk çözünmesine, çözünebilir bileşikler oluşturmaya veya pasifleştirici elemanların yerlerinden uzaklaştırılmasına neden olur. Bir başka teoriye göre ise korozyon sonucu oluşan iki değerlikli demir iyonları OH^- iyonları yerine Cl^- ile birleşir ve çözünebilir FeCl_2 oluşturur; bu bileşik, anottan uzaklaşırken koruyucu Fe(OH)_2 katmanını tahrip ederek korozyonunun sürekliliğine neden olur. Yüzeyden biraz uzakta bulunan bu bileşik ayrışır, Fe(OH)_2 çöker, Cl^- daha fazla demir taşımak için anot yüzeyine geri döner. Klorür iyonlarının donatıya ulaştıklarında, yüzeydeki kararlı tabaka ile reaksiyona girerek FeCl_2 gibi kararsız klorürlü bileşikler oluşturdıkları sanılmaktadır [9].

Yukarıda açıklandığı gibi klorür iyonları, metal tarafından O_2 ve OH^- iyonlarına kıyasla daha çok ve daha kolay adsorbe edilir, anodik reaksiyonun oluşmasını kolaylaştırır, demirin iyonlaşmasını hızlandırır. Özetle klorür iyonları aşağıdaki bağıntılar ile gösterildiği gibi katalizör görevi yapar [9].



Betondaki çeliğin, klorun mevcudiyeti ile anotta oksijen olmadığında, korozyon reaksiyon adımları aşağıdaki gibi gerçekleşir [12].

1. Anotta demir, klor iyonları ile orta çözünürlükte bir demir-klorid kompleksi oluşturmak için reaksiyona girer.



2. Demir-klorid kompleksi pH ve oksijen konsantrasyonu daha yüksek bir bölgeye çelikten difüze olduğu zaman, hidroksil iyonları ile Fe(OH)_2 oluşturmak için reaksiyona girer.



3. Sonrasında hidrojen iyonları elektronlarla hidrojen gazı oluşturmak için bağlanır [12].



$\text{Fe}(\text{OH})_2$ (kararsız yeşil demir hidroksit) derhal kararlı sarı pasa yani $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 'e oksitlenir. Cl^- iyonlarının tekrar ortaya çıkması yukarıdaki anodik reaksiyonun süreklilik kazanacağını da belirtmektedir [22].

Klor iyonu donatıya ulaştığı zaman pasla birleşerek $3\text{Fe}(\text{OH})_2$. FeCl_2 gibi klor-demir kompleksleri oluşturur ve böylece koruyucu pas tabakasını söker, ortamın elektrolitliğini artırır, elektrik direncini azaltır. Demir-klor kompleksleri anottan uzaklaşırken, çelik yüzeyini koruyucu pastan arındırarak açığa çıkarır ve korozyona süreklilik kazandırır. Bu klor kompleksleri sıvı ortamda çözülürler, açığa çıkan klor tekrar anoda dönerek tahrip işlevine devam eder. Cl^-/OH^- oranı adı altında korozyon için bir klor eşiği vardır [22]. Korozyon, demirde klor konsantrasyon seviyesi kritik eşiği aştığında başlar. Korozyon sonucunda betonarme örtüsü çatlar ve parçalanır [30].

Klor asit karakteri nedeniyle ortamın pH değerini indirger. Pasivasyonun gerçekleşmesi için ortamın pH'ının alkalın bölgede ($\text{pH} > 11$) kalması gerekir [22].

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. Amerika'da kabul edilen genel eşik, beton yada (1 yada=0, 9144 metredir) küpünde $0,7645 \text{ m}^3$ klordur [22].

Beton içine başlangıçta döküm sırasında girmiş olan klorür ile, sonradan sertleşmiş beton bünyesine çevreden difüze olarak giren klorür iyonlarının etkisi farklıdır. Başlangıçta beton henüz prizini almadan karışım içinde bulunan klorür iyonlarının bir kısmı, çimento klinker bileşiklerinden tri kalsiyum alüminat ile reaksiyona girerek çözünmeyen bir bileşik (Friedel Tuzu) oluşturur. Bu şekilde kimyasal olarak bağlanmış olan klorür artık korozyon açısından etkili olamaz. Bu nedenle beton içinde bulunan klorür konsantrasyonunun biri suda çözünen, diğeri asitte çözünen (toplam) klorür konsantrasyonu olmak üzere farkı olarak değerlendirilmesi gerekir. Beton içinde suda çözünebilen klorür için %0,15 (3,5 kg klorür/1 m^3 beton) ve toplam klorür konsantrasyonu için de %0,20 (4,5 kg klorür/1 m^3 beton) değerleri limit olarak verilmektedir [18].

Cl^- iyonları yerel, derin paslanmalara yol açabilir, bu paslanma şekline oyuklanma (pitting) korozyonu denir [9].

Teorik ve deneysel çalışmalara göre, betonun elektriksel direnci ile klorür girişi ilişkilidir; genel olarak, betonun klorür difüzyon katsayısı beton direnci ile ters orantılıdır, geçirimli bölgelerin direnci daha az, klorür penetrasyonu daha yüksektir. Örneğin aynı doygunluk derecesi için, cüruf ve uçucu külün betonun elektriksel direncini arttırdığı bilinmektedir [9].

3.4.2 Karbonatlaşma Reaksiyonunun Beton İçerisindeki Donatının Korozyonuna Etkisi

Betonun sertleşmesi sırasında, klinker bileşiklerinin hidratasyonu sonucu kalsiyum hidroksit oluşur. Bu bileşik doygun halde beton boşluklarını doldurur. Beton boşluk suyunun yüksek pH derecesi bu doygun kireç çözeltisinden ileri gelir. Ancak zamanla atmosferde bulunan karbon dioksit beton içine girerek burada bulunan kalsiyum hidroksit ile birleşir ve kalsiyum karbonat oluşturur [18].



Böylece hidroksil iyonları nötrleşerek, beton pH derecesini düşmesine neden olur. Bu olaya karbonasyon denir. Buna benzer olarak kirli atmosferlerde bulunan SO_x ve NO_x gibi asit anidriti olan gazlar da kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek beton pH derecesini düşürebilir. Gazların beton içine difüzyonu daha kolay olduğu için bu olaylar kuru halde bulunan betonlarda daha etkilidir. Karbonasyon sonucu beton pH derecesi 9'a kadar düşebilir. Bu pH derecesindeki beton artık pasifleşme özelliği gösteremez [18].

Karbonatlaşma reaksiyonunun kendisi betonun bozulmasına yol açmaz ancak betonun iç yapısında meydana getirdiği değişiklikler nedeniyle önemli sonuçlar doğurur. Karbonatlaşma, beton yüzeyinden iç bölgelere doğru hızı azalarak devam eder. Betonun iç bölgelerine doğru CO₂ girişinin zorlaşması da reaksiyonun yavaşlamasının bir diğer nedenidir [9].

Donatı çeliğinde korozyon; beton yeterli kalitede değilse, yapı çevre koşullarına göre tasarlanmamışsa (korozyona karşı yalıtım önlemleri alınmamışsa) veya betonun hizmet ömrü boyunca değişiklikler varsa oluşur [27].

Sertleşmiş bir beton bünyesine çevreden klorür penetrasyonu hızı, betonun fiziksel yapısı ile doğrudan ilgilidir. Betonun porozitesi ve permeabilitesi ne derece az ise, beton içine penetre olabilen klorür miktarı da o derece az olur. Beton permeabilitesi başta

su/imento oranı olmak üzere, beton yapımında kullanılan agrega granülometrisine, imento dozajına, çimentonun kalıp içinde sıkıştırılmasına ve dökümden sonraki ilk günlerde uygulanan kr koşullarına bağlıdır. Pratikte betonarme demirlerinin korozyonunun başlaması için geçen süre de büyük önem taşır. Demirler mümkün olduğunca beton içinde derine konularak korozyonun etkisi azaltılmaya çalışılır. Ancak betonarme demirleri üzerinde bulunan beton tabakası kalınlığını (pas payı) ok fazla artırabilmek mümkün olmaz. Betonun su/imento oranı azaltılarak betonarme demirlerinde korozyon olayının başlama süresi geciktirilebilir [18].

zet olarak betonarme yapılarda donatı korozyonu iki şekilde başlayabilmektedir [5].

Betonarme elemanlardaki pas payı betonun (pas payı “net beton rts”: “Bir beton elemanın içinde bulunan en dış donatının dışından beton bitim yerine kadar ölçülen kalınlık” olarak tanımlanmaktadır) yeterli geçirimsizliğe sahip olmaması nedeniyle karbonatlaşarak bazikliğini yitirmesi, böylece koruyucu tabakanın bozulması sonucu donatının korozyona açık hale gelmesi durumunda donatıda korozyon klor iyonlarının etkisi sonucu da meydana gelmektedir. Özellikle deniz kenarındaki yapılarda klor iyonları pas payını geçerek, donatıya ulaşabilmektedir [5].

3.5 Korozyon Riskinin Belirlenmesi

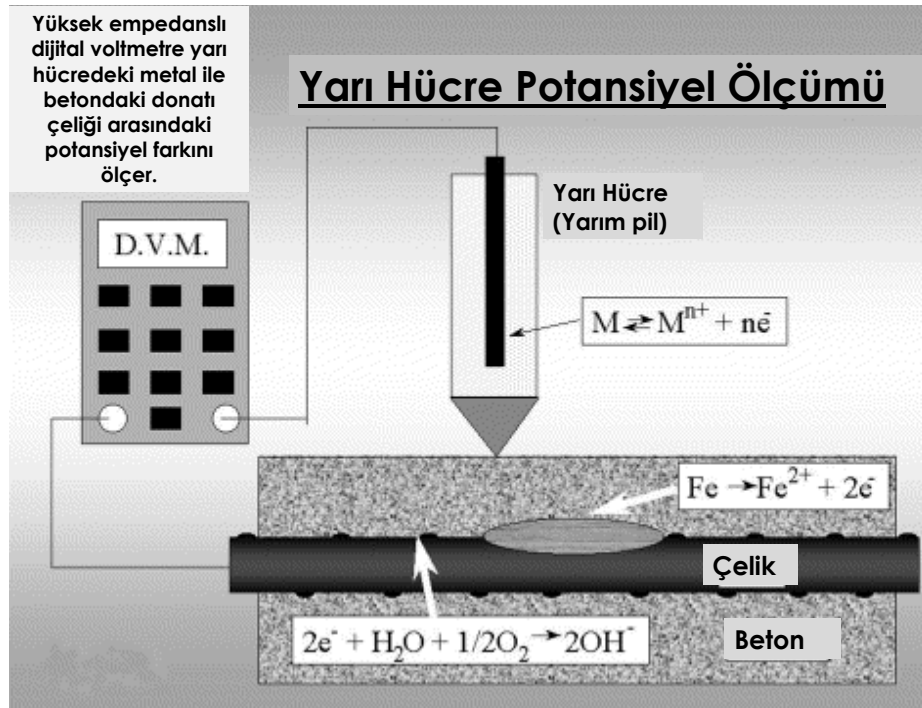
Betonda donatının korozyon aktivitesini belirlemek ve şiddetini ölçmek için son yıllarda yaygın olarak elektro-kimyasal teknikler kullanılmaktadır. Hasarsız olmaları ve periyodik olarak ve uzun süreli ölçümlere olanak sağlamaları, bu yöntemlerin yaygın kullanımı için ciddi bir avantaj sağlamaktadır. Elektro-kimyasal tekniklerle, donatı korozyonu ile ilgili zaman içinde ortaya çıkan değişimler gözlemlenebilmekte, hatta elde edilen veriler yorumlanarak gelecekte betonda olabilecek çatlama anı tahmin edilebilmektedir. Elektro-kimyasal teknikler, betonda donatı korozyonu aktivitesi ile ölçüm yapıldığı anda korozyon hızı hakkında fikir veren tekniklerdir. Günümüzde kullanılan yöntem ve teknikler arasında potansiyel ölçümü, lineer polarizasyon ve AC empedans tekniği en yaygın kullanılanlarıdır [9]

3.5.1 Potansiyel Ölçümü

Bu yöntem tahribatsızdır ve hızlı gerçekleştirilebilmektedir [31].

Potansiyel ölçümleri korozyon aktivitesi hakkında bilgi sağlarken korozyon hızı hakkında bilgi vermemektedir [32].

Potansiyel ölçümü ile beton yüzeyinde pas lekeleri, çatlama ve parçalanma gözle görülür hale gelmeden önce donatının korozyon aktivitesi gözlemlenebilmektedir. Bu teknik söz konusu amaç için kullanılan elektro-kimyasal tekniklerin uygulama bakımından en kolayıdır. Bunun için yüksek empedanslı ($\geq 10^8 \Omega$) bir voltmetre ile donatı potansiyeli bir referans elektroda göre ölçülür. Betona gömülü donatının elektro potansiyeli, belirli bir yarı hücrenin donatı ile bağlantısı kurularak saptanır. Referans elektrotu olarak en çok Cu/CuSO₄ (bakır/bakır sülfat)(CSE), Ag/AgCl (gümüş/gümüş klorür), Hg/Hg₂Cl₂ (kalomel) ve hidrojen elektrot kullanılır. Bunlardan KCl eriğine daldırılmış Hg/Hg₂Cl₂ Kalomel elektrotu, KCl çözeltisinin normalitesine bağlı olarak 0, 1 N; 1N veya doymuş kalomel elektrot adlarını alır. Yapılması ve saklanması kolaylığı bakımından ve 1 mV'luk hassasiyet yeterli olduğundan doymuş kalomel elektrot (SCE) daha yaygın olarak kullanılır ($E=0,2425$ volt) [9].



Şekil 3.7 Yarı Hücre Potansiyel Ölçümü [33].

Şekilde şematik olarak gösterilen düzenekteki gibi elektrot altında ıslak bir sünger olacak şekilde beton yüzeyine yerleştirilir. Elektrotun diğer ucu açığa çıkartılan ve pastan temizlenen donatıya lehimlenir. Beton içerisinde hareket eden iyonlarla devre tamamlanır ve donatı çeliğinin elektro potansiyeli saptanmış olur. Ölçülen potansiyelde gözlemlenen sapmalar korozyon aktivitesinin zamanla değiştiğini gösterir. Ölçüm ve yorumlama ASTM C 876’da belirtilen kriterlere göre yapılır ve değerlendirme kriterleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir [9].

Çizelge 3.2 ASTM C 876’ya göre potansiyel kriterleri [9]

Bakır/Bakır Sülfat (CSE)	Kalomel Elektrot (SCE)	Korozyon Riski
$E > -200 \text{ mV}$	$E > -126 \text{ mV}$	Korozyon olasılığı %10
$-200 \text{ mV} > E > -350 \text{ mV}$	$-126 \text{ mV} > E > -276 \text{ mV}$	Korozyon belirgin değil
$E < -350 \text{ mV}$	$E < -276 \text{ mV}$	Korozyon olasılığı %90
$E < -500 \text{ mV}$	$E < -426 \text{ mV}$	Şiddetli korozyon hakim

Yarı hücre potansiyelinin yorumlanmasında iki ana problem mevcuttur [31].

Cu/CuSO₄ referans elektroduna göre yarı hücre potansiyel ölçümü -200 mV’luk potansiyel değerinden daha pozitif ise çeliğin pasif durumda olduğunu göstermektedir. Çeliğin yarı hücre potansiyel ölçümü -350 mV’luk potansiyel değerinden daha negatif ise genellikle korozyonun başlamış olduğunu göstermektedir. Yarı hücre potansiyel ölçümü -200 mV ile -350 mV arasında ise korozyon durumu hakkında açık bir bilgi sağlamamaktadır. Ne yazık ki ölçümlerin %50’sine yakını genellikle bu bölgede kalmaktadır [31].

Yarı hücre potansiyel ölçümleri bazı faydalı bilgiler sağlamaktadır fakat çoğu durumda güvenilir bir yorumlama yapmak güçtür [31].

Klor ve nem içeriği, hücre yerleştirme, elektriksel akım ve sıcaklık yarı hücre potansiyel okumalarını önemli bir biçimde etkilemektedir [34].

-350 mV sınır değerine kadar olan yarı hücre potansiyel ölçümleri beton içinde makro hücreler varsa ve beton içindeki nemde değişimler var ise bu değişimlere tabi olur. Aktif anot ile kuşatılan donatı çeliği katodik olarak korunmaktadır ve potansiyel aktif bölge içinde olsa bile korozyona uğramaz. Nem içeriğindeki artış potansiyeli düşürmektedir bu sebeple nem içeriği arttırıldığında aktif bölgede potansiyele sahip

olan elik korozyona uğramayabilir. En sonunda çok yüksek nem içeriğinde suya doymuğ betondaki dğk oksijen içeriği nedeniyle korozyon oluğmaksızın potansiyel -1000 mV potansiyel değerlerine kadar dğebilir [31].

Kayalı ve Zhu'nun yaptıkları alığmada, dğk ağırlıklı agregalı yüksek dayanımlı ve uçucu kül içeren betonarme numuneler 15 aylık bir süre %2 lik klor çözeltisine tabi tutulmuğtur. Klor iyon girişi, korozyon potansiyeli, korozyon akım yoğunluğu ve elektriksel direnç ölçümleri gerekleştirilmiğtir [35].

Betona gömülü çeliğin yarı hücre potansiyel değerleri korozyonun olup olmadığını saptamak için yeterli gelmemektedir. Çünkü oksijen mevcudiyeti, beton direnci ve beton porozitesi bu değerlere etki etmektedir. Korozyon potansiyeli, korozyon akımı pasif durumdaki korozyon akımının altında iken -1000 mV gibi dğk bir değer çıkabilmektedir [35].

Sodyum klorid çözeltisine daldırılmığ olan uçucu kll betonarme numunelerde 5-6 ay sonrasında yarı hücre potansiyel değerleri sonuçları -600 mV dolaylarında kalmığtır. Dğk ağırlıklı yüksek dayanımlı betonlarda bu değerler normal dayanımlı ve normal ağırlık ile yüksek dayanıma sahip betonlardan oldukça farklı ıkmığtır. Dğk ağırlıklı ve yüksek dayanımlı betonlardaki değerler yaklaşık -750 mV'dan bağlamaktadır. Uzun daldırma sürelerinde ister tuzlu su isterse içme suyu olsun bu değerler çok daha az negatif değerlere ıkmığtır. Buna rağmen tüm değerler yüksek negatiflikte bulunmuğtur ve tüm değerler yüksek korozyon eğilimi göstergesi olarak kabul olunmaktaydı. Buna karşın tüm dğk ağırlıklı yüksek dayanımlı betonarme numunelerde korozyon akım yoğunluğu değerleri dğk korozyon aktivitesi olduğunu göstermektedir. Hatta numunelerin korozyon akım yoğunluğu değerleri çok dğk ve normal ağırlıklı yüksek dayanımlı beton numunelerin değerlerine çok benzer bulunmuğtur. Böyle dğk potansiyellerin sebebi oksijenin elik yüzeyine difüzyonunu engelleyen aşırı nem mevcudiyeti olabilmektedir [35].

Daha önce yapılmığ benzer bir alığmada da bu durum elik yüzeyine zayıf oksijen difüzyonuna bağlanmığtır. Bu durumun agregaların doymuğ olması ve imento matrisinin yoğunluğundan kaynaklandığına inanılır. Normal ağırlıklı yüksek dayanımlı beton ile dğk ağırlıklı yüksek dayanımlı betonun korozyon akım yoğunlukları arasında önemli bir fark görülmemekle birlikte korozyon potansiyel değerleri önemli bir şekilde farklıdır. Yüksek dayanımlı betonun korozyon potansiyel değerleri çok

düşüktür. Bu değerlere son derece düşük korozyon akım yoğunluğu değerleriyle eşlik edilmektedir. Bu değerler klor iyon konsantrasyonu ile bağlantılı olabilir. Düşük klor iyonu konsantrasyonunun betondaki çok küçük ve süreksiz poroziteler sayesinde sağlandığına inanılır. Böylelikle klor iyonu geçirimsizliği ile çok düşük potansiyel ve korozyon akım değerlerine ulaşılmıştır [35].

Düşük ağırlıklı yüksek dayanımlı betonda düşük ağırlıklı agrega etkin bir şekilde çelik donatıyı korumada tampon olmaktadır. Matriks de bununla birlikte yoğun ve düşük porozitelidir. Bu özellik de içten bağlı porların azaltılması ve böylelikle klor kaynaklı korozyonun azaltılmasına etki eden silis dumanı ve uçucu kül ilavesi ile geliştirilebilir. Buna karşılık normal ağırlıklı ve orta dayanımlı betonda korozyon akım hızı daldırma süresi uzadıkça artmış ve bu da çelik çevresindeki klor iyon konsantrasyonundaki artışı yansıtmıştır ve yarı hücre potansiyel değerleri daha negatif değerler almıştır [35].

Farklı mekanizmalar ile farklı onarım ilkeleri uygulanabilir. Fakat bunlarla ilgili tartışmaya geçmeden önce betondaki çeliğin elektrokimyası ile ilgili iki ana nokta dikkate alınmalıdır [36].

Bunlardan ilki, betondaki pasif donatının potansiyeli, por çözeltisindeki pH ve donatıdaki oksijen içeriği tarafından kontrol edilir. pH'ın düşmesiyle potansiyel daha pozitif olur, oksijen eksikliği (çok ıslak, yoğun ya da epoksi modifiyeli harç ve betonda) potansiyeli daha negatif değerlere kaydırır [36].

İkincisi, klor kaynaklı korozyon veya karbonasyon sonrası donatının pasivasyonunun bozulmasından sonra potansiyel çok negatif değerlere düşer. (yaklaşık -0,6 V). Beton yüzeyinde ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri beton örtüsü sebebi ile bu kadar negatif olmaz [36].

Organik ve inorganik inhibitör karışımları, sıvı karışımın kapiler emmesiyle betonun içine taşınır ve por çözeltisinin iletkenliğini ve pH'ını değiştirmesi beklenir. Organik esaslı inhibitörün (örneğin alkanolamin esaslı inhibitörler için) solventinin değerlerine göre pH 11'in üzerine yükselebilir. Bu pH değişimlerine bağlı olarak karbonatlı yapılarda inhibitör uygulamasından sonra beton yüzeyinde yarı hücre potansiyel ölçüm değerleri düşebilir (pasif donatıda) veya sabit kalabilir (korozyonlu donatıda) [36].

İnorganik inhibitörler örneğin monoflorofosfat, beton por çözeltisinin iletkenliğini artırır ve bu nedenle beton yüzeyinde yarı hücre potansiyel değerleri düşme eğilimi gösterir [36].

Elsener yaptığı çalışmada, köprü elemanlarında yapılan onarım ve iyileştirme sonrasında hasarsız kontrol tekniklerinden olan yarı hücre potansiyel haritalama metodunun bir değerlendirme tekniği olarak başarılı kullanımını ve sınırlamalarını değerlendirmiştir. Yüzeyden uygulanan korozyon inhibitörleri, elektrokimyasal klor giderme, elektrokimyasal realkalizasyon, geleneksel onarım (klor içeren betonun değiştirilmesi) gibi örnekler sunulmuş ve tartışılmıştır. Elsener bu çalışmada, onarım işlemi kaynaklı olası direnç değişimlerine ve beton por çözeltisindeki pH değişimlerine bağlı olarak onarım işlemi sonrasında yarı hücre potansiyel okumalarının doğru yorumlanması için, onarım yönteminin korozyondan koruma mekanizması hakkında kesin bilgiye sahip olunması ve yapılardaki yarı hücre potansiyel haritalama üzerine güçlü tecrübeye sahip olunması gerektiğini belirtmiştir [36].

Shiyuan ve Daniel'in yaptıkları çalışmada, sekiz farklı ticari korozyon engelleyici sistemin köprülerdeki betonarme çelikleri için etkileri incelenmiştir. Beş yıllık saha ve laboratuvar çalışmaları sunulmuş ve bu sistemlerin test metodları ve prosedürleri de tartışılmıştır. Yapılan çalışmada ilk yıl (1997) numunelerde (epoksi kaplı donatılı numuneler ile organik esaslı beton katkısı ve beton kılıflı numuneler haricinde) yarı hücre potansiyel değerleri Yaklaşık -350 mV bulunmuştur. 1998'de değerler -350 mV'dan daha negatif bulunmuştur. ASTM standardına göre tüm numuneler yüksek olasılıkla korozyona uğramış olarak görülmüştür. . Açıkçası beton içindeki donatıların 1 ya da 2 yıl içerisinde korozyona uğraması uygun bulunmamıştır. Çünkü bariyer duvarı olarak yüksek yoğunlukta beton kullanılmıştır ve betonda oksijen tükenişinin potansiyeli negatif yöne doğru değiştirmiş olabileceği düşünülmüştür. Betonlarda erken yaşta çatlaklar görülmüştür. Bu çatlaklar da donatı çeliği yakınına nem, oksijen ve tuz girişine bağlı olarak erken korozyona sebep olabilir bunun da potansiyelin negatif yöne kaymasına yol açabileceği düşünülmüştür. Bir diğer olası faktör olarak da farklı tipteki korozyon inhibitörlerinin numunelerde bulunması dikkate alınmıştır. Bazı engelleyici sistemler, organik ve inorganik beton kimyasal katkılarıdır. Bazıları donatı kaplaması veya beton kaplamasıdır. İyon içeren beton katkıları da yarı hücre potansiyel okumalarını etkileyebilir. Beton yüzeyine kaplama uygulanması oksijen tükenişini destekleyebilir. 1999 ve 2001 yıllarında da yarı hücre potansiyel ölçümleri yapılmıştır ve potansiyellerin(epoksi kaplı numuneler hariç) 1997 yılında 1999 yılına göre daha az negatif ve daha dar yayılmalara sahip olduğu görülmüştür. Yarı hücre potansiyeli 2001 yılında daha yüksek negatif değerlere ve yayılmalara sahip olmuştur. Bu korozyonun

geliştiğini ya da ilerlediğini gösterir. Epoksi kaplı betonarme numuneler epoksi kaplamanın betonarme yüzeyindeki direncine bağlı olarak 1997 yılında diğer tüm numunelere göre daha az negatif yarı hücre potansiyeli göstermiştir. Bu yarı hücre potansiyel eğrisi 2001 senesine doğru önemli bir düşüş göstermiştir. Bunun sebebi epoksi kaplamalı donatının üzerindeki korozyonun galvanik etkisi olabileceği düşünölmüştür. Bazı hasarlı veya çizikli kaplamalı bölgelerin veya çatlaklı bölgelerin yakınları diğer bölgelerden daha fazla korozyona uğrayarak potansiyellerde yayılmaya sebep olabilecekleri düşünölmüştür. 2001 yılında organik esaslı beton katkılı beton en negatif potansiyel değerini göstermiştir ve bunu epoksi kaplamalı donatılı numune izlemiştir. Bunları organik esaslı beton katkılı numune takip etmiştir. Kontrol numunesi ortalama yarı hücre okuma değerleri gösterirken hem çimento esaslı donatı kaplaması hem de çimento esaslı beton kaplaması içeren numune ile hem organik esaslı beton katkısı hem de su esaslı beton tıkayıcısı içeren numuneler daha düşük negatif değerler göstermiştir. Bu sebeple bu numunelerin korozyon değerlendirilmesinde yarı hücre potansiyel ölçümü esas alınamamıştır. Diğer korozyon ölçüm yöntemleri ile birlikte sonuçları analiz etme gerekliliği ortaya çıkmıştır. Korozyon hızı ölçümlerinde, bazı numunelerde 1997 ve 1998 yıllarında korozyon hızları büyük olasılıkla pasif filmin oluşumuna bağlı olarak nispeten yüksek çıkmasına rağmen 2001 yılında tüm numunelerde düşük çıkmıştır. Korozyon hızları zaman içinde hemen hemen tüm numunelerde korozyon engelleyici sistemlerin varlığına ve donatı yüzeyindeki oksijen eksikliğine bağlı olarak azalmıştır. Epoksi kaplamalı donatılı betonda korozyon hızının düşük olması (özellikle çatlaksız bölgelerde) fakat zamanla birlikte sürekli artmasının kaplamanın hasarlı veya çizikli olan bölgelerindeki metal çözünmesine bağlı olabileceği kanısına varılmıştır. Beton direnç ölçümlerine göre 1997 de çoğunluk numunelerde dirençler betondaki yüksek nem içeriğine bağlı olarak düşüktür. Epoksi ve kontrol numunesi haricindeki numunelerde zamanla dirençler yükselmiştir. Epoksi numunelerde büyük olasılıkla donatı yüzeyindeki epoksinin bozulması nedeniyle direncin zamanla düşmüş olabileceği kanısına varılmıştır [37].

3.5.2 Lineer Polarizasyon Direnç

Lineer polarizasyon direnç (LPR) tekniğine ilişkin prensipler ilk kez 1950 yıllarında Stern ve Geary tarafından geliştirilmiştir. Teknik, 1970’li yıllardan bu yana betonda donatı korozyonu hızını belirlemede yaygın kullanım alanı bulmuştur [9].

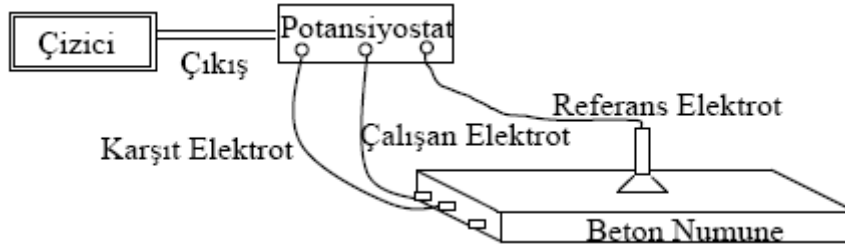
Prensip olarak, beton içindeki donatıya istenilen sabit potansiyeli sağlayan bir potansiyostat aracılığıyla küçük bir elektrik akımı verilerek donatı polarize edilir ve polarizasyonun açık-devre potansiyeli üzerindeki yansıması gözlemlenir. Polarizasyon genellikle korozyon potansiyeli (E_{corr}) değerinden itibaren ± 10 mV aralığında (Tafel bölgesi) gerçekleştirilir [9].

Bu deney galvanostatik veya potansiyostatik olmak üzere iki yöntem ile yapılmaktadır. Galvanostatik yöntemde uygulanan akım yoğunluğu sabit tutularak potansiyel düzgün aralıklarla değiştirilir. Potansiyometrik yöntemde ise elektrot potansiyeli bir potansiyostat yardımıyla sabit tutularak bu potansiyele karşılık gelen uygulanan akım yoğunlukları ölçülür [38].

3.5.2.1 Galvanostatik Yöntemle Polarizasyon Ölçümleri (I) Üç Elektrot Yöntemi (II) İki Elektrot Yöntemi

Galvanostatik yöntem biri 3 elektrot diğeri iki elektrot yöntemi olmak üzere iki şekilde uygulanır. 3 elektrot yönteminde biri çalışma elektrotu, biri yardımcı elektrot ve biri de referans elektrodu olmak üzere 3 elektrot bulunur. İncelenmekte olan elektroda inert bir yardımcı elektrot ile anodik veya katodik yönde sabit bir dış akım uygulanır. Bu akım altında belli bir süre beklenerek elektrot potansiyeli referans elektroda karşı ölçülür. Daha sonra değişen bir reosta ile uygulanan akım yoğunluğu değiştirilerek elektrot potansiyeli yeniden ölçülür. 2 elektrot yönteminde birbirinin aynı olan iki çalışma elektrotu kullanılır. Bu yöntemde referans elektrotu bulunmaz. Galvanostatik yöntem ile deney şöyle yapılır. Başlangıçta devreye dış akım uygulanmadan önce iki elektrot arasındaki korozyon potansiyelleri farkı okunur. Daha sonra anodik ve katodik yönde bir dış akım uygulanarak her iki elektrot arasındaki potansiyel farkı yeniden ölçülür. Bu işleme $-/+20$ mV potansiyel farkı elde edilinceye kadar dış akım yoğunluğu arttırılarak devam edilir. Böylece lineer polarizasyon bölgesi için (E-i) eğrisi elde edilebilir. Lineer bölge dışında anodik ve katodik polarizasyon eğrilerinin simetrikliği bozulacağı için bu yöntemin kullanılması uygun olmaz [38].

LPR ölçümleri için kullanılan düzenek şematik olarak Şekil 3.8’de gösterilmektedir [9].



Şekil 3.8 Lineer polarizasyon direnç ölçüm düzeneği [9].

Bu düzenek; çalışan elektrot (working electrode), yardımcı veya karşıt elektrot (counter electrode) ve referans elektrottan oluşmaktadır. Çalışan elektrot (donatı) anot konumundaysa karşıt elektrot katot fonksiyonu görür. Polarizasyon sırasında uygulanan tarama hızları genellikle 2, 5-10 mV/min arasında değişir [9].

LPR Ölçümlerine ilişkin yorumlama kriterleri çizelgede verilmiştir [3].

Çizelge 3.3 LPR Ölçümlerine İlişkin Yorumlama Kriterleri [38].

Korozyon Akım Yoğunluğu	Korozyon Durumu
$I_{kor} < 0,1 \mu A/cm^2$	Pasif korozyon hali
$0,1 \mu A/cm^2 < I_{kor} < 0,5 \mu A/cm^2$	Hafif-orta arası korozyon
$0,5 \mu A/cm^2 < I_{kor} < 1,0 \mu A/cm^2$	Orta-yüksek arası korozyon
$I_{kor} > 1 \mu A/cm^2$	Yüksek korozyon hız

Uygulaması son derece basit ve hızlı olması yanında düzeneğin ucuz olması LPR tekniğini diğer yöntem ve tekniklere göre avantajlı kılmaktadır. Ölçüm birkaç dakika içinde yapılabilmekte ve korozyon yoğunluğu ve dolayısıyla korozyon hızı basit bir biçimde hesaplanmaktadır. Buna karşın tekniğin bir kısmı kendine özgü ve bir kısmı deneysel koşullarla ilgili bazı dezavantajları vardır. Örneğin, Tafel sabitlerinin numuneye ve zamana bağlı olarak değişkenlik göstermesi, elektrolitin ve/veya korozyon ürünlerinin yüksek ohmik rezistans göstermesi, korozyon reaksiyonlarının sınırlı oksijen difüzyonu kontrolünde olması gibi faktörler ölçülen korozyon hızı büyüklüğüne doğrudan etkiyebilmektedir [9].

3.5.3 Beton Rezistivitesinin Ölçülmesi

Aynen zemin içindeki korozyon olayında olduğu gibi, beton içindeki korozyon hızı da beton rezistivitesine büyük ölçüde bağlıdır. Düşük rezistiviteli betonlarda makro

korozyon hücrelerinin etkili olarak çalışması nedeniyle korozyon hızı daha yüksektir [38].

Beton rezistivitesi Wenner dört elektrot yöntemi ile ölçülür. Bu cihazda beton yüzeyine eşit aralıklarla uygulanan dört elektrot vardır. Akım iki dış elektrottan uygulanır ve iki iç elektrot arasındaki potansiyel farkı ölçülür. Rezistivite ölçümlerinin donatıların durumu göz önüne alınmadan yapılması halinde uygulanan akımın beton yerine donatılardan geçmesi nedeniyle yanıltıcı sonuçlar elde edilebilir. Bunun için cihazın betonarme donatılarının dışında kalacak şekilde kullanılması uygundur [38].

Çizelge 3.4’de beton rezistivitesi ile betonarme donatıların korozyonu arasındaki bağıntı verilmektedir [38].

Çizelge 3.4 Beton İçinde Bulunan Klorür Konsantrasyonuna Göre Betonarme Donatılarının Korozyon Riski [38].

Beton Rezistivitesi	Betonarme donatıları korozyonu
$P > 20.000 \text{ Ohm. Cm}$	Korozyon ihmal edilebilir.
$10.000\text{-}20.000 \text{ Ohm. Cm}$	Orta derecede korozyon
$5.000\text{-}10.000 \text{ Ohm. Cm}$	Yüksek hızda korozyon
$P < 5.000 \text{ Ohm. Cm}$	Şiddetli korozyon

3.5.4 Korozyon Sonucu Donatılarda Oluşan Ağırlık Kayıplarının İncelenmesi

Donatıda korozyonun oluşturduğu kesit kaybını araştırmak için ağırlık kaybından yararlanılarak penetrasyon derinliği belirlenebilir. Bunun için korozif ortamda bekletilen metal numunenin, belirli süre sonunda, yüzeyinde meydana gelen malzeme kaybı bulunarak malzemenin ortalama yıllık penetrasyon hızı (3.15) bağıntısı ile hesaplanır [14].

$$P = \frac{W_K}{\Delta \cdot S \cdot t} \times 24 \times 365 \quad (3.15)$$

Bu ifadede P, cm / yıl olarak penetrasyon hızını; W_K metalin korozyonla ağırlık kaybını (g); S, korozyonun olduğu yüzeyi (cm^2); t, deney süresini (saat); Δ ise metalin yoğunluğunu göstermektedir [14]

Korozyon nedeni ile birim zamanda, metal yüzeyinden taşınan tabakanın kalınlığını ifade eden ve literatürde korozyon hızı olarak tanımlanan (3.16) bağıntısı, mpy (mil/yıl: 25,4 µ/yıl) cinsinden standartlarda da yer almaktadır. Korozyon hızı, ağırlık kaybının oranı olarak (%) veya yüzeyden ağırlık kaybı olarak (mg/cm²) ya da ortalama kesit kaybı (mikron) olarak ifade edilmektedir. Ancak literatürde hem zamanı hem de yüzeyi dikkate alan ve en sık kullanılan ifade mpy'dir [14].

$$K.H.(mpy) = \frac{3,45 \times 10^6 W_K}{\Delta.S.t} \quad (3.16)$$

Korozyon nedeni ile oluşan ağırlık kaybı, pas tabakasının Clarke Çözeltisi olarak bilinen kimyasal sıvı (1000 mL HCl, 24 g Sb₂O₃ ve 71,3 g SnCl₂. 2H₂O) ile temizlenmesinden sonra belirlenir [14].

Darwin ve Scantlebury'nin yaptığı çalışmada, düşük kaliteli beton ile dökülmüş füzyon bağlı epoksi kaplamalı donatılar 12 ay boyunca %3,5 NaCl veya demineralize edilmiş suda aylık olarak ıslak kuru çevrimine maruz bırakılmıştır. Devam eden ölçümler esnasında yarı hücre potansiyel ölçümleri ile birlikte düzenli görsel incelemeler yapılmıştır. İncelenen değişkenler süresiz kaplamaların varlığını ve yokluğunu ve kromat dönüşümlü kaplamaların varlığını ve yokluğunu kapsamaktadır. Testin sonunda, donatılar görsel inceleme için çıkarılmıştır ve ağırlık kayıpları ölçülerek korozyon hızları değerlendirilmiştir. Donatılar betondan çıkarıldıktan sonra korozyon ürünlerinin temizlenmesi için %50 hidroklorik asit içeren hegzamin inhibitörü kullanılmıştır ve sonra ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Tuzlu suya maruz bırakılan kaplamasız donatılarda önemli bir miktarda ağırlık kaybı tespit edilmiştir. Ağırlık kaybının derecesi korozyon hızının yaklaşık 0,02–0,035 g/cm²/yıl olduğunu göstermektedir. Bu değerler 0,025–0,045 mm/yıl olan genel korozyon işleme hızına karşılık gelir. Epoksi kaplamalı donatılarda ağırlık kaybı ise ölçüm için çok küçük bulunmuştur. Çalışmanın sonucunda füzyon bağlı epoksi kaplamanın, kromat değişimli kaplamaların mevcudiyetinde, farklı şekilde desteklenen, korozyon direncinde önemli ilerlemeler sağladığı tespit edilmiştir [39].

BETON YAPILARDA DONATI KOROZYONUNUN ÖNLENMESİNE YÖNELİK TEDBİRLER

Korozyon, çeliğin en kesit kaybına ve beton-çelik aderansının azalmasına, böylece betonarme elemanın taşıma gücünün azalmasına yol açar. Korozyon nedeniyle yapının deprem güvenliğinin kaybolması, zamanla yapının kullanılamaz hale gelerek servis ömrünü tamamlaması olasıdır. Küçük en kesit kayıplarında bile çeliğin deformasyon karakteristikleri ve kopma dayanımı önemli ölçüde azalabilir. Bu olumsuzlukları en aza indirmek için korozyona karşı çeşitli önlemler almak gerekir [14].

4.1 Beton Karışımında İnhibitör Kullanılması

Beton yüzeyindeki karbonasyon veya klor tuzlarının mevcudiyeti depasivasyona neden olabilmekte ve böylece çelik yüzeyinde büyük çapta korozyon başlamakta ve sonuç olarak beton çevresinde büyük bir hasara sebep olmaktadır [30].

Mevcut metodların arasında korozyon inhibitörleri, öncelikli olarak klor nedenli korozyonu önlemek ve durdurmakta basit ve maliyet etkin önleme tekniği olarak sunulabilmektedir [30]. Korozyon inhibitörleri korozyon hızını düşürmede, başlangıç aşamasında veya yayılım aşamasında klor eşik değerini arttırarak ya da klor geçirim oranını düşürerek çalışabilmektedir [30].

Son onbeş yılda donatı korozyonuna karşı inhibitörler pek çok yerde deniz yapılarında, köprülerde, otoparklarda vs. kullanılmaktadır [17].

Korozyondan korumada inhibitörün avantajları, betonarme içerisinde eşit olarak dağılması ile çelik tüm yüzeyini koruması ve betonu geçirimsiz kılmasıdır [17].

İdeal korozyon inhibitörü kimyasal bileşimiyle, betona yeterli miktarda eklendikten sonra donatıyı korozyona karşı koruyabilen ve aynı zamanda taze veya setleştirilmiş betonun özellikleri üzerinde olumsuz etki yapmayandır [17].

Son dönemlerde piyasada bir takım karışımlar mevcuttur. Örneğin nitrit esaslı inorganik bileşimler özellikle katkı maddesi olarak kullanılmaktadırlar ve sodyum mono florofosfat yüzeyde kullanılıp, sertleştirilmiş beton yüzeyine sıvı olarak uygulanmaktadır [30]. Son on yılda korozyonu önlemek veya durdurmak için yeni bileşimler üzerinde çalışılmıştır. Çalışmalar hem inorganik (çinko oksit, molibdatlar, boratlar, stanatlar) hemde organikler (benzoat ve onun türevleri, karboksilat iyonları, kuaterner amonyum tuzları, sitrat vs.) üzerine gerçekleştirilmiştir [30].

Seksenden fazla organik esaslı inhibitörler üzerinde yapılmış olan deneylere göre aminler zayıf engelleyici etki gösterirler. Aminoasitler bir miktar koruyucu etki gösterebilirler de endüstriyel uygulamalar için yeterli değildirler. Karboksilatlı maddeler özellikle poli karboksilatlar oldukça iyi koruma özelliği gösterirler [30].

Inhibitör kategorisi aşağıdaki gibi sınıflandırılır [12].

- ✓ Organik korozyon inhibitörleri
- ✓ İnorganik korozyon inhibitörleri
- ✓ Karışık korozyon inhibitörleri[12]

Her üç tipteki korozyon inhibitörü de donatı korozyonunu aşağıdaki mekanizmalarla azaltabilecek maddeler içerir [17].

- Bariyer tabakası oluşturarak
- Yüzeyin pasivasyonu yoluyla oksidasyon
- Metal ile temas eden çevreye etki ederek[17].

Etkin bir korozyon inhibitörü için seçilen kimyasal kompozisyon, aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır [17].

- Moleküller güçlü elektron alıcı ve /veya verici özelliklerine sahip olmalıdır.
- İstenilen sistemle uyumlu olmalı aksi yan etkili ürünler oluşmamalıdır.
- Elektrotların düşük akım yoğunluğunda polarizasyonunu desteklemelidir [17].

Anodik inhibitörler, kromatlar, nitritler, alkali fosfatlar, molibdatlar, silikatlar ve karbonatlardan yapıp korozyon reaksiyonunun anodik kısmını minimize edecek şekilde davranırlar. Bu inhibitörler çeliği pasive etmek için anodik yüzeyde çözünmez koruyucu bir film oluştururlar. Nitritler gibi bazı anodik inhibitörler yeterli miktarda kullanılmazlar ise bazen hızlandırılmış korozyona ve çukurcuk korozyonuna sebep olabilirler [40].

Katodik inhibitörler, çinkodan ve antimon, manganez, magnezyum ve nikel tuzlarından oluşup çeliğin katodik yüzeyinde çözünmez bir film oluştururlar. Bunlar genellikle anodik inhibitörlerden daha az etkindirler fakat daha güvenlidirler [40].

Aminler, esterler, sülfonatlar gibi organik inhibitörler, çeliğin tüm yüzeyindeki anodik ve katodik reaksiyonları bloke ederler. Organik inhibitörler betonun geçirimsizliğini azaltan por tıkaçıcılar olarak da davranırlar [40].

Korozyon inhibitörlerinin kullanımında üç ana konu önemlidir. Birincisi inhibitörlerin uzun dönemde kararlılığı ve performansı ikincisi korozyonun başlamasından sonra inhibitörlerin korozyonun yayılmasına ve çoğalmasına olan etkileri, üçüncüsü yapının servis ömrü boyunca inhibitörlerin betonun fiziksel özelliklerine olan etkisidir [12].

İnhibitörün servis ömrü boyunca korozyona karşı etkili olabilmesi için uzun dönem kararlılığını sürdürmesi gerekir. Buda fiziksel ve kimyasal kararlılığını koruması ile mümkündür [12]. İnhibitör korozyon başlamasından sonra korozyon üzerinde etkisini gösterir. İnhibitörün yetersiz dozajda kullanımı korozyona aksi tesir yapmasına neden olabilir [12].

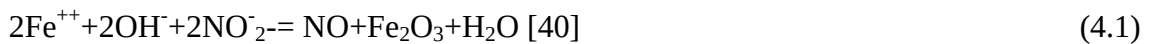
İnhibitörler betonun özelliklerine de negatif etki yapmamalı mesela çatlak oranında artış vs. gibi. Bazı inhibitörlerde betonun korozyon eğilimine karşı olan direncini düşürebilir. Bu durum da aksi yönde etki yapan korozyon inhibitörü ilaveleri ile dengelenebilir. Korozyon inhibitörleri her iki tipin koruma mekanizmalarına da sahip olabilir. Bunlar anodik reaksiyonların ve katodik reaksiyonların karışım etkisi ile koruma gerçekleştirir. Bir aktif inhibitör (anodik) donatı üzerinde oksit film oluşumunu kolaylaştırır. Pasif sistem klor iyonlarının göç oranı azaltılarak korunur. Kalsiyum nitrit bir inorganik inhibitördür. Donatıyı çelik yüzeyindeki oksidasyon–redüksiyon reaksiyonları aracılığıyla korur. Organik inhibitörler, donatı üzerinde bir koruyucu film oluştururlar ve bazen klor iyonlarının donatıya ulaşmasını geciktirirler [12].

Şimdiye kadar olan çalışmalarda en çok sodyum nitrit, potasyum kromat, sodyum benzoat, kalay klorid, sodyum molibdat üzerine yoğunlaşmıştır. Kalsiyum nitritin faydalı etkileri literatürde raporlanmıştır. Sodyum nitritin iki tane dezavantajı olabilir. Birincisi dayanımı düşürmesidir, ikincisi de sodyum tuzları nedeni ile alkali –agrega reaksiyonuna sebep olabilir [17].

Dört ana ticari korozyon inhibitörü mevcuttur [12].

- ❖ DCI (Darex corrosin inhibitor) ve DCI –S
 - ❖ Rheocrete 222 ve Rheocrete 222+
 - ❖ Armatec 2000, Ferrogard 901 ve MCI 2000
 - ❖ Catexol 1000 Cl
- **DCI (Darex corrosin inhibitor) ve DCI–S**

DCI (kalsiyum nitrit) bir inorganik (anodik) kalsiyum beton inhibitör katkısıdır. DCI yaklaşık %30 kalsiyum nitrit ve %30 su konsantrasyonludur [40]. Nitrit tuzları beton yüzeyine konsantre çözelti olarak uygulanmaktadır [28]. DCI-S, DCI ile aynıdır sadece ilave olarak geciktirici içerir. Silis dumanı bileşimde kalsiyum nitrit ile birlikte kullanıldığı zaman silis dumanı klor iyonlarının içeri nüfuziyetini azaltır ve kalsiyum nitrit korozyon başlangıç için eşiği yükseltir [12] Kalsiyum nitrit betonun direncini indirger fakat silis dumanı bu indirmeyi dengeler, dirençte net bir artış sağlanır [12] DCI inhibitörün anodik tipidir ve anodun pasivasyonu ile çalışmaktadır. Oksidasyon–pasivasyon mekanizması elektrokimyasal ve doğaldır. Klor ve nitrit iyonları aynı anda komplike bir şekilde yer almakta ve donatı yüzeyinde pasivasyon ve korozyon reaksiyonları birbiri ile yarışmaktadır. Klor iyonları, korozyonu Fe^{++} iyonlarının oluşumu ile hızlandırmaktadır. Nitrit iyonları ise pasif Fe_2O_3 'ün oluşumu ile korozyonu geciktirmektedir. Kalsiyum nitrit aşağıdaki reaksiyon ile Fe^{++} iyonlarını ortamdaki çıkararak korozyonu engellemektedir [12].



DCI birincil etkilidir çünkü anodik ve katodik bölgeler arasında büyük elektriksel potansiyelin oluşmasını engellemektedir. Anodik ve katodik bölgeler arasında büyük elektriksel potansiyel korozyon akışına ve demirde bozunmalara sebep olur. Datalar göstermektedir ki DCI'nin etkin bir korozyon inhibitörü olması için $Cl/NO_2^- = 1,1$ 'den az yada eşit olmalıdır [12].

Zararlı ortama maruz kalındığında kalsiyum nitritin etkin performansı için betonun aşağıdaki sınırlara uygun olarak iyi kalitede olması büyük öneme sahiptir [17].

- Su –çimento oranı 0, 5 ten fazla olmamalıdır ve tercih edilen 0,4'tür.
- Minimum çimento içeriği 300 kg /m³ olmalı tercih edilense 350 kg /m³ tür.
- Donatı örtü kalınlığı minimum 30 mm olmalıdır. 38 mm tercih edilendir veya maximum agrega ölçüsü +18 mm den büyük olmalıdır [17].

Kalsiyum nitrit için yapılan kapsamlı testler aşağıdaki sonuçları göstermektedir.

- ✓ Klor kaynaklı korozyona karşı çeliği korumaktadır.
- ✓ Beton kalitesini arttırarak verimliliği arttırır.
- ✓ Basma dayanımını arttırır.
- ✓ Korozyon başlar başlamaz korozyon hızını düşürür.
- ✓ Çatlakların önünde çalışır [17].

Genellikle tahmin edilen klora maruz kalma ortamına bağlı olarak betonda 10-30 l/m³ oranında kullanılır. [40].

Rheocrete 222 ve Rheocrete 222+

Rheocrete 22 bir organik korozyon engelleyici beton inhibitör katkısıdır. Amino ve esterlerden oluşan bir bileşime sahiptir. Anodik ve katodik inhibitörlerin kombinasyonudur. (pasif-aktif karışık tiptedir). Çeliği iki şekilde korur [12]

1. Çelik yüzeyinde absorbe edilen korozyon dirençli organik film oluşturarak [12]
2. Beton matristeki boşlukları kaplayarak ve dolayısı ile klor iyonlarının geçişini yavaşlatarak çeliği korumaktadır [12]

Armaterc 2000, Ferroguard 901 ve MCI 2000

Bu inhibitörler sulu ortamda yüzey aktif maddelerin ve amin tuzların (özellikle dimetil metanolamin, alkanol aminler, amino alkoller) karşımıdır. İmalatçılara göre çelik yüzeyinde sürekli monomoleküler film oluşturarak donatı koruması yaparlar ve anodik ve katodik bölgeleri kaplarlar. Bu film amino alkolün absorbe edilmiş tabakasında oluşur ve çözünmez demir oksit yapılarının oluşmasına etki eder. Bu oksit yüzeyini sağlamlaştırmakta ve korozyonu engellemektedir [12]. Bu film tipik olarak 10⁻⁸ m

kalınlıkta olup beton içerisinde geçecek olan agresif iyonlara karşı bir bariyer vazifesi görür [12].

- **Catexol 1000 Cl**

Bu inhibitör amin türevlerinin su bazlı oluşumudur. Koruma, koruyucu bariyerin oluşumu ile sağlanmaktadır. Bu bariyer pasif demir oksit tabakasını sağlamlaştırmaktadır. Bu inhibitör organik film oluşturan inhibitör karakteristiği göstermektedir. Çoğu nitrit temelli inhibitörlerdir [12].

Al-Amoudi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, dört farklı korozyon inhibitörü (kalsiyum nitrit 2 ayrı dozda, kalsiyum nitrat 3 ayrı dozda, 2 organik inhibitör tavsiye edilen dozlarda) beş farklı kötü içerikli (%0,8 klor, %0,8 klor+%1,5 SO₃, deniz suyu, hafif tuzlu su, yıkanmamış agregalar) betonda denenmiştir. Beton numuneleri, korozyon inhibitörlerinin, betonun basma dayanımı ve betonarme donatı (çelik) korozyonu üzerine etkilerini belirlemek için kullanılmıştır. İnhibitörlerin donatı korozyonunu azaltmadaki performansı korozyon potansiyelleri ve korozyon akım yoğunluğu ölçülerek değerlendirilmiştir [17].

Kaplamasız, silindirik 75 mm çap 150 mm yüksekliğindeki ASTM C150 tip 5 portland çimentosu kullanılarak donatılı beton numuneler hazırlanmıştır. Tüm beton numuneleri, etkin su-çimento oranı 0,45 ve çimento içeriği 350 kg/m³ olarak oranlanmıştır. Tüm beton karışımlarında kaba-ince agrega oranı ağırlıkça 1, 63 olacak şekilde ayarlanmıştır. Kaba agrega olarak maksimum 12,5 mm ölçülerinde öğütülmüş kireçtaşı kullanılmıştır. Deniz suyu ve %0,8 klor içeren beton numuneleri %5 lik sodyum klorid çözeltisine batırılırken, %0,8 klor+%1,5 SO₃ içeren beton numuneleri de %5 sodyum klorid+%3,11 sodyum sülfat çözeltisine batırılmıştır. Acı su ve yıkanmamış agregalar içeren numuneler acı suya daldırılmıştır. Numuneler seçilen çözelti ortamına kısmen (76 mm) daldırılmıştır. Kısmen daldırmanın amacı betonarme korozyonu için gereken nemi sağlamaktır [17].

Korozyon potansiyeli yüksek empedanslı voltmetre ve SCE referans elektrodu kullanılarak ölçülmüştür. Korozyon akım yoğunluğu DC doğrusal polarizasyon direnç metodu kullanılarak ölçülmüştür. Lineer polarizasyon direnci metodu ile belirlenen, korozyon akım yoğunluğu ve gravimetrik ağırlık kaybı arasında iyi bir korelasyon olduğu belirtilmiştir. Bu araştırmada bir potentiostat / galvanostat çeliği 0,1 mV/s. hızla polarize etmek için kullanılmıştır. Korozyon akım yoğunluğu değeri 0,1 µA/cm² den

küçük ise korozyonun dikkate alınmayacak kadar önemsiz olduğunu göstermekte iken bu değer $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ den büyük ise aktif korozyonun varlığını gösterir. Bundan dolayı bu çalışmada korozyon başlangıç eşik kriteri olarak $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ akım yoğunluğu dikkate alınmıştır [17].

Al-Amoudi ve arkadaşlarının belirli bir zaman dilimi içinde yaptığı çalışmada inhibitör katkılı tüm numunelerin basma dayanımı kontrol numunelerinkinden büyük bulunmuştur. Dayanımdaki artış organik ClI katkılı numunelerde %4 oranından başlayarak, %4 kalsiyum nitrat katkılı numunelerde %14,5 oranına kadar değişmektedir. Bu da kullanılan korozyon inhibitörlerinin betonun basma dayanımı üzerine olumsuz bir etki yapmadığını göstermiştir. Kullanılan dört korozyon inhibitörünün de donatı korozyonunun başlamasını geciktirici etkisi olmasına rağmen kalsiyum nitrit klor, klor+sulfat ve deniz suyu katkılı betondaki korozyon başlangıcını geciktirmede baskın bir şekilde etkili bulunmuştur. Korozyon akım yoğunluğu datası, korozyon inhibitörlerini içeren tüm beton numunelerdeki çelikler 122 gün sonunda bile pasif durumda iken inhibitörsüz numunelerin 31-98 gün arasında korozyon bakımından aktif duruma geçtiğini göstermiştir. Tüm korozyon inhibitörlerinin klor katkılı numunelerde korozyon geciktirmede genel olarak eşit etkinlikte olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte bazı katkılı numunelerde bazı tip ve dozajlarda inhibitörler daha iyi performans gösterebilmektedir. Tipik olarak %3 kalsiyum nitrat ve %4 kalsiyum nitrit içeren %0,8 klor+1,5 sülfatlı numunelerde betonarme içindeki donatıda minimum korozyon akım yoğunluğu değerleri kaydedilmiştir. Deniz suyu ile hazırlanan beton numunelerde betonarme korozyonunu geciktirmede %2 kalsiyum nitrit diğer inhibitörlerden daha etkin bulunmuştur. Acı su ve yıkanmamış agregalarla hazırlanan beton numunelerde korozyonu azaltmada tüm inhibitörler etkin bulunmuştur. Yıkanmamış agregalarla hazırlanan beton numunelerdeki donatının pasivasyonunun sürdürülmesinde kalsiyum nitrat daha kullanışlı iken acı su ile hazırlanan numunelerde kalsiyum nitrit daha üstün bulunmuştur [17].

Muralidharan, Saraswathy, Merlin Nima ve Palaniswamy yaptıkları çalışmada ağırlık kaybı ölçümleri, potansiyel-zaman davranış çalışmaları, potansiyodinamik polarizasyon çalışmaları ve elektrokimyasal impedans ölçümleri ile hidroksit, sitrat, stanat gibi kompleks ve inhibitif iyonların betondaki donatı korozyonuna etkilerini değerlendirmişlerdir. Bu araştırmaların belirgin özelliği %100 portland puzolanik çimentoda 10.000 ppm klorid mevcudiyetinde donatının pasifliği hızlı bir şekilde

bozulmaktadır. Bununla birlikte hidroksit, sitrat, stanat gibi inhibitif ve kompleks iyonlar içeren %100 portland puzolanik çimentoda donatı 30.000 ppm klorid mevcudiyetinde bile pasifliğini sürdürmektedir. Hidroksit, sitrat, stanat gibi inhibitif iyonların katkısı betonarme donatı korozyonunu azaltmaktadır. Sitrat, stanat ve kalsiyum oksitleri portland puzolanik çimentoda çeliğin korozyon hızının kontrolünde çok etkili bulunmuşlardır ve hiçbir zararlı etkileri tespit edilememiştir [41].

Saraswathy ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, mineral ve kimyasal katkıların her ikisinden oluşan kompozit bir korozyon önleyici katkı sisteminin dizayn edilmesi ve bu katkı sisteminin makro hücre korozyon koşulları altındaki beton içindeki performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Yeni dizayn edilen korozyon önleyici katkı sistemi klor içerikli betona çok iyi bir şekilde uygulanmıştır. Bu konuda çalışılan farklı sistemler; (OPC): %100 geleneksel portland çimentosu; (FA): %75 geleneksel portland çimentosu-%25 uçucu kül; OPC-FA-%1 sodyum hidroksit; OPC-FA-%1 sodyum hidroksit-%1 sodyum sitrat; OPC-FA-%1 sodyum hidroksit-%1 sodyum sitrat, %1 sodyum stanat; OPC-FA-%1 sodyum hidroksit-%1 sodyum sitrat, %1 sodyum stanat, %0,5 kalsiyum oksittir. Çalışmada geleneksel portland çimentosu ile üretilen betonarmeye donatının şiddetli korozyona uğradığı tespit edilmiştir. Betonun basma dayanımı katkılardan etkilenmemiştir. Betonun alkalitesi katkılardan etkilenmemiştir. Hidroksit, sitrat ve stanat içeren katkı sistemleri sadece donatının korozyon hızını azaltmakla kalmayıp aynı zamanda betonun basma dayanımını da yükseltmiştir. Hidroksit, sitrat ve stanat içeren katkı sistemleri hızlandırılmış makro hücre korozyon şartları altında betona gömülü donatının korozyon hızını 10 kat azaltmıştır. Sitrat, stanat ve kalsiyum oksit kompozit katkı sistemleri etkin bir şekilde donatının korozyon hızını kontrol altına almıştır ve makro hücre korozyon şartları altında donatının dayanıklılığını garantilemektedir. Betonun alkalitesi katkılardan etkilenmemiştir [42].

Kondratova ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, iki çeşit ticari korozyon inhibitörünün beton karışımına katılması ile inhibitörlerin korozyonu önlemedeki performansları değerlendirilmiştir. Donatılı beton numuneler 20 mm pas payı (beton örtü) ile dökülmüştür. Su-çimento oranı 0, 40 ve beton numuneler ön çatlaklı ya da çatlaksızdır. 0,2 veya 0,4 mm genişliğinde çatlaklar döküm esnasında donatı çeliğinin eksenine çapraz olarak oluşturulmuştur. İki çeşit ticari korozyon inhibitörü beton karışımına katılmıştır. Bu inhibitörlerden OCI (ticari organik korozyon inhibitörü) anodik ve katodiktir ve sudaki amin ile esterlerin kombinasyonudur. Diğer inhibitör ise CNI

kalsiyum nitrit esaslı korozyon inhibitörü olup minimum %30 kalsiyum nitrit içerir ve anodik korozyon inhibitörüdür. Numuneler ABD de doğal deniz ortamına maruz bir adaya bırakılmıştır. Numuneler göz ile denetlenip korozyon hızları da yıllık olarak lineer polarizasyon metodu ile ölçülmüştür. Bazı beton numuneler 12 ay sonra kırılmış ve korozyon hasarı değerlendirilmiştir. Aynı zamanda suda çözünebilen klorür içeriği analizi yapılmıştır. Üç yıllık maruziyet sonucunda çatlaksız beton numunelerde her iki korozyon inhibitörünün de korozyon hızını düşürmekte etkin olduğu ve OCI nin CNI'ya göre korozyon hızını düşürmede biraz daha etkili olduğu fakat ön çatlaklı numunelerde donatı çeliğinin çatlak bölgesindeki bölgesel korozyonunu önlemede nispeten etkisiz oldukları tespit edilmiştir [43].

Ormellese ve arkadaşları, alkalın ortamdaki karbon çelik donatının klor kaynaklı korozyonuna karşı organik maddelerin engelleyici davranışı üzerine çalışmışlardır. Karbon çelik donatının klor kaynaklı korozyonunun en önemli sebebi betonarme yapılarıdaki zamanından önce oluşmuş hatalardır. Birincil korozyonun önlenmesinde ve klor kaynaklı korozyonun durdurulmasında korozyon inhibitörleri mevcut metodlar arasında basit ve maliyet etkin bir önlem tekniğidir. Bununla beraber ticari inhibitörlerin performansı sadece kısmen tatmin edicidir. Bu çalışmada organik esaslı inhibitörler değerlendirilmiştir. Beton por çözeltisi içinde klor mevcudiyeti simüle edilerek aminik ve karboksilik gruplardaki seksenden fazla sayıda inhibitörlerin donatı korozyonunu önlemedeki etkileri elektrokimyasal potansiyodinamik testlerden yararlanılarak araştırılmıştır. Potansiyodinamik eğrilerden aminlerin zayıf korozyon engelleyici etki gösterdiği tespit edilmiştir. Amino asitler kısmen korozyon engelleyici etki göstermiştir fakat bu da endüstriyel uygulamalar için yeterli değildir. Karboksilat esaslı maddeler özellikle poli karboksilatlar çok iyi korozyon engelleyici etkinlik göstermiştir bu da onları test edilen inhibitörler arasında en gelecek vaad eden adaylar yapmaktadır. Karboksilat esaslı maddeler alkalik zincir ile bir çeşit fiziksel bariyer oluşturup klor iyonlarını bloke etmekte veya metal yüzeyine ulaşmasını geciktirmektedir [44].

Söylev, Mc Nally ve Richardson'ın yaptıkları çalışmada, yüzey uygulama esaslı iki jenerasyon amino alkol (AMA) korozyon inhibitörlerinin (SACI) etkinliği araştırılmıştır. İnhibitörler sertleştirilmiş betonun yüzeyine uygulanmıştır. Grup 1'deki numuneler 70 gr/l konsantrasyonlu NaCl çözelti havuzunda dört gün bekletilme sonrasında üç gün laboratuvar şartlarında kurutulma çevrimine tabi tutulmuştur. Her iki inhibitörde aynı yöntemle uygulanmıştır. Bu yöntem inhibitörlerin imalatçıların tavsiye

ettiği gibi numunelerin havuza temas ettiği yüzeylerine fırça ile ve 500 gr/m² dozajlı olarak sürülmesidir. İnhibitörler klor uygulanmadan önce ve ilk klor çevrimi sonrasında olmak üzere iki farklı şekilde uygulanmışlardır ve bunların korozyon üzerine etkinlikleri kontrol numuneleri ile karşılaştırılmıştır. Numuneler bu sebeple ORG1a, ORG1b, ORG2a and ORG2b olarak isimlendirilmiştir ve sayılar inhibitör tipini, harfler ise uygulama zamanını ifade etmektedir. İlk jenerasyon inhibitörü ORG1 olarak belirtilirken yeni jenerasyon ORG2 olarak belirtilmiştir. Bunlar amino alkol esaslı tescilli yüzeyden uygulanan korozyon inhibitörleridir. Grup 2 numuneleri kontrol, ORG1 ve ORG2 den oluşup bu numuneler sadece tek bir fakat konsantrasyonu yüksek olan havuz çevrimine (5M NaCl çözeltisi) maruz bırakılmışlardır. Bu gruptaki numuneler için inhibitör klor havuzu sonrası uygulanmıştır ve sonuçlar herhangi bir ilave klor eklenmeksizin test periyodunun sonuna kadar kontrol numunelerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Numunelerin korozyonu korozyon potansiyelleri, korozyon akım yoğunlukları ve betonun direnci aynı anda ölçülerek değerlendirilmiştir. Yeni jenerasyon amino alkol esaslı inhibitör klor tatbikinden önce uygulandığında veya ilk klor havuz çevriminin hemen sonrasında uygulandığında korozyona karşı etkinlik göstermiştir. Korozyon akımını da donatı çeliğinde yüksek klor içerik seviyesine rağmen korozyon başlangıç eşik değeri olarak kabul edilen 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerinde tutmuştur. Diğer amino alkol esaslı inhibitör (ORG1) ve kontrol numunesi yaklaşık yeni jenerasyon amino alkol esaslı inhibitörün iki katı korozyon akımına sahip olmuştur. Eğer beton klor içeriyorsa ve inhibitör yüksek korozyon hızı oluştuktan sonra uygulanınca (2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) her iki inhibitörde etkisiz kalmaktadır. ORG2 uygulanan numunelerin korozyon direncinin daha yüksek olmasının sebebi inhibitörün beton porlarını bloklayıcı etkisine kısmen bağlı olabileceği düşünülmüştür. Yeni jenerasyon amino alkol esaslı inhibitörler korozyon başlamadan önce veya korozyon hızı nispeten düşük iken uygulandıkları zaman iyi bir onarım stratejisi olarak değerlendirilebilirler [45].

Sarıçimen ve arkadaşları, inhibitörlerin betondaki çelik donatının korozyonu üzerine etkilerini anodik polarizasyon, kimyasal analiz için elektron spektroskopisi ve auger elektron spektroskopisi kullanarak değerlendirmişlerdir. Temiz (kirletilmemiş) numunelerin donatı korozyonu, çelik donatının hızlandırılmış korozyonu için +4 V'luk anodik potansiyel uygulanması ve beton numunelerin çatlamasına kadar geçen zamanın ölçümü ile değerlendirilmiştir. İnhibitörlerin kirletilmiş beton numunelerdeki donatı

korozyonunu geciktirmedeki etkinliği, korozyon potansiyelleri ve korozyon akım yoğunlukları ölçölerek değlerlendirilmiştir. M2 tescilli bir alkanol amin inhibitörü olup beton içinde hareket ederek çelik donatı yüzeyinde koruyucu bir mono katman oluşturacak şekilde dizayn edilmiştir. Beton içerisine katkı olarak kullanılmaktadır. R2 ise betondaki çeliğin korozyonunu engellemek için yapılmış su esaslı inorganik bir malzemedir. Yığın suyuna eklenir. Sonuçlar, M2 ve R2 korozyon inhibitörleri içeren temiz (kirletilmemiş) beton numunelerin çatlamasına kadar geçen zamanın kontrol numunelerinin çatlamasına kadar geçen zamandan fazla olduğunu göstermiştir. M2 içeren beton numunelerinin çatlamaya kadar geçen zaman artışı marjinal (az) iken R2 içeren beton numunelerin korozyon direnç karakteristiklerinde kontrol numunelerine göre önemli bir ilerleme kaydedilmiştir. Saf beton numunelerin çatlamasına kadar geçen zaman ve kirletilmiş beton numunelerdeki çeliğin korozyon hızı dataları, R2 korozyon inhibitörünün korozyon hızını geciktirmede yararlı olduğunu göstermektedir. R2 korozyon inhibitörü ile M2 korozyon inhibitörü elektrokimyasal test sonuçları ve yüzey analiz sonuçlarına göre karşılaştırıldığı zaman klor iyonlarının mevcut olduğu doymuş kalsiyum hidroksitli ortamdaki çeliğin korozyonunu geciktirmede R2' nin daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir [46].

Son yıllarda göç eden korozyon inhibitörleri (MCI) hasarlı betonarme yapıları iyileştirmede olası kimyasallar olarak önerilmektedirler. İnhibitörler betonun içerisinden donatı çeliğine göç ederler ve MCI molekülleri çelik donatı yüzeyinde ince film şeklinde koruyucu bir kaplama oluşturarak donatıyı korozyondan korurlar. Malik ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, dimetil etanol amin esaslı MCI-A ve trietanol amin esaslı MCI-B'nin yüzey kaplaması olarak performansları araştırılmıştır. MCI-A ve MCI-B kaplı donatılı beton numuneler tuzlu çözelti içerisinde testlere tabi tutulmuşlardır. Testler numunelerin 6-12 ay aralığı boyunca %5 NaCl çözeltisine daldırılması (laboratuar testleri) ve açık deniz suyu veya yüksek gelgite maruz bırakılması ile yapılmıştır. Bu şartlara maruz bırakılan numunelerin durumları donatıların fiziksel olarak incelenmesiyle ve elektrokimyasal ölçümlerin yapılması ile değlerlendirilmiştir. Elektrokimyasal alışmalar açık devre potansiyeli ve korozyon ölçümlerinden oluşmaktadır. Elektrokimyasal polarizasyon (potansiyodinamik) alışmaları, MCI-A ve MCI-B kaplı donatılı beton numunelerin deniz suyundaki korozyon hızlarının kaplamasız (kontrol) numunelerinin korozyon hızından daima daha düşük olduğunu göstermektedir. MCI-B kaplı donatılı beton numuneler deniz suyunda

veya %5 NaCl çözeltisi içinde MCI-A kaplı donatılı beton numunelerine göre her zaman daha yüksek korozyon hızı ve korozyon akım yoğunluğuna sahip olarak bulunmuştur. Deniz suyunda korozyon akım yoğunluğu MCI-A ve MCI-B'nin ilavesi ile azalmaktadır fakat MCI-A'nın mevcudiyetinde bu azalma çok önemli şekilde gerçekleşmektedir [47].

Mechmeche ve arkadaşlarının yaptığı çalışma, amino alkol esaslı korozyon inhibitörlerinin etkinlik biçimini belirlemek ve amino alkol esaslı karışım inhibitörü olan Ferro Gard 903 'ün en iyi kullanım modunu araştırmak için yapılmıştır. Taze beton porlarında test yapılmıştır. Korozyon inhibitörlerinin etkinliği, korozyon potansiyel ölçümleri, polarizasyon eğrileri, mikroskobik gözlemler yoluyla araştırılmıştır. Harç numuneler için donatının elektrokimyasal davranışı, korozyon potansiyel ölçümü ve korozyon akım gelişimi metodlarıyla değerlendirilmiştir. En iyi engelleyici kapasite inhibitör sulu çözeltiye klor katılmadan önce ilave edilerek sağlanmıştır [48].

Tommaselli ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, sülfirik asit ve nitrik asit ile kirletilmiş bir doymuş kalsiyum hidroksit çözeltisinde sodyum nitrit ve sodyum molibdat inhibitörlerinin etkileri değerlendirilmiştir. Konsantrasyona bağlı olarak her iki inhibitörde önemli engelleyici etkiler göstermişlerdir. Düşük konsantrasyonlarda (%0,013 toplam çözelti kütlesi) sodyum molibdat sodyum nitritten daha fazla verimlilik göstermiştir fakat yüksek konsantrasyonlarda (%0,040 toplam çözelti kütlesi) inhibitif etkiler benzer bulunmuştur [49].

4.2 Donatının Kaplanması

Geleneksel betonarme kaplama malzemeleri çeliği korozyondan korumak için dizayn edilmektedirler. İlk olarak metalik veya metalik olmayan kaplama malzemesi çeliği yerel ortamdan izole ederek bariyer tipi koruma sağlar. Yüzey üzerindeki kaplamanın yapışması ve sürekliliği hem de maruz olduğu ortamla reaktivitesi kaplama tarafından sağlanan koruma düzeyinin temel özelliklerdir. Boyalar, füzyon bağlı tozlar gibi organik kaplamalar, kalay, krom, bakır, paslanmaz çelik gibi çelik yüzeyine soy metal kaplamalar örnek olarak verilebilir. Diğer yandan çelik yüzeyine yapılan çinko, kadmiyum, alüminyum gibi aktif metallerin kaplamaları sadece basit bir bariyer koruma sağlamaz ayrıca kurban anot olarak davranarak katodik koruma da sağlarlar. Tahmin edileceği gibi çelik yüzeyindeki aktif metal kaplamanın performansı kaplamanın

kalitesine ve uygulanma metoduna (yapışma, kalınlık) ve kaplama metalinin yerel çevre ile reaktivitesine bağlıdır [50].

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.
- Klor iyonu geçirimsizliğine karşı gerçek dayanımı, çok önemli bir özelliktir.
- Film kalınlığı ve sağlamlık önemlidir. Çünkü; küçük delikler ve kesilmeler, korozyon için potansiyel bölgelerdir.
- Çeliğe iyi tutuş kuvveti, diğer önemli bir özelliktir [22].

Donatının metal ile kaplanmasında, metalik kaplamalar, üzerine kaplandıkları metali ortamın etkisinden iki ayrı şekilde korurlar:

- a. Kaplama metali ortama daha dayanıklıdır.
- b. Kaplama metali alt metale tercihli olarak çözünür ve kendisini harcayarak alt metali korur [10].

Trejo ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, klorlu çözeltiye maruz düşük alaşımlı donatı çeliği (ASTM A 706) ve geleneksel donatı çeliği (ASTM A 615) gömülü betonarme numunelerin laboratuvar koşullarında ağırlık kaybı, makro hücre korozyon hızı ve kritik klor eşiği sonuçları sunulmuştur. Betonarme yapılarda çoğunlukla geleneksel donatı çeliği kullanılmaktadır. Bu yapılarda kullanılan donatılar ASTM A 615 şartnamelerine uyumludur. ASTM A 706 düşük alaşımlı donatı çeliği ASTM A 615 donatı çeliği ile bağlantılı olarak süneklik ve kaynaklanabilirlikteki yetersizlikleri iyileştirmek için geliştirilmiştir ve pazarlanmaktadır. ASTM A 706 düşük alaşımlı donatı çeliğinin korozyon özellikleri üzerine sınırlı sayıda araştırma yapılmıştır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre ASTM A 706'nın ASTM A 615'e göre daha düşük kritik klor eşiği ve daha yüksek korozyon hızı değeri gösterdiği tespit edilmiştir [51].

Zivica ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, klor kaynaklı korozyonda betonarmenin korozyon hızı ve korozyon hassaslığında, içinde bulunan ortamın sıcaklığı ve donatı

elik eşidi önemli faktörler olarak belirtilmektedir. Ortam sıcaklığının 40⁰C'ye kadar yükseltilmesi durumunda korozyon hızının önemli bir biçimde arttığı bulunmuştur. Sıcaklığın 40⁰C'nin üzerine çıkarılması ile korozyon hızının yavaşlaması neticesinde ters etki yaptığı görülmüştür. Bu etkinin olası sebepleri analiz edilmiştir. Farklı kimyasal kompozisyon, yapı ve mekanik özelliklerdeki üç tip elik malzeme önemli derecede farklı korozyon hassasiyetleri göstermiştir. Korozyon hassaslıklarına göre elik malzemeler değerlendirildiğinde 10216 eliğı düşük hassasiyet göstermiş, 11373 eliğı orta hassasiyet ve 10425 eliğı yüksek hassasiyet göstermiştir. 10216 eliğı düşük korozyon hassasiyetinde nispeten düşük akma dayanımı, çekme dayanımı ve yüksek yumuşaklık göstermiştir. Verilen özelliklerin aynı değerlerinde 11373 eliğı orta korozyon hassasiyeti göstermiştir. 11373 çeliğinin korozyon hassasiyetinin artmasında Mn içeriğinin düşürölmesi ve iki elik arasındaki yapısal farklılıklar etkili olmuş olabileceğı düşünölmektedir. Yüksek hassasiyetli 10425 eliğı nispeten yüksek akma noktası ve çekme dayanımı göstermiştir. Bununla birlikte düşük yumuşaklık değerleri göstermiştir. Bununla birlikte oksitli inklüzyonlar ve sülfidik bir yapı içermektedir. Buna göre yapı ve inklüzyonların varlığı korozyonda önemli faktörlerdir. Inklüzyonların elik yapısındaki varlığı ve bunun yumuşaklığı azaltması veya gevrekliğı arttırması korozyon artma tehlikesi olan hassaslık sinyalleri olarak kabul edilebilir. Sonuçlara göre ortam sıcaklığı donatı korozyon prosesinde en önemli faktör olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar ortam sıcaklığının belirli bir limite kadar artmasıyla beraber korozyon hızının da arttığını göstermiştir. Söz konusu durumla ilgili harçtaki porlardaki sıvı içerisindeki oksijen içeriğinin düştüğü kabul edilebilir. Porlardaki sıvı içerisindeki oksijen çözünürlüğü sıcaklığın artması ile birlikte önemli ölçüde azalmaktadır [52].

4.2.1 Epoksi Kaplamalı Donatı

Epoksi kaplamalı donatı, betonarme yapıdaki donatıda daha iyi korozyondan koruma ihtiyacına cevap olarak 1970'lerin başında geliştirilmiştir [40].

Epoksi kaplama, donatıda korozyonu başlatan ve sürdüren kloridleri ve diğer kimyasal ajanları tutan ve engelleyen bir bariyer sistemi olarak dizayn edilmiştir. Aynı zamanda elik ve beton ara yüzeyinde fiziksel bir bariyer sağlar [53].

Epoksi reçineler beton içinde uzun dönem iyi dayanıklılığa sahip ve solventlere, kimyasallara ve suya dirençli termoset plastiklerdir. Araştırmalar birkaç kötü ortam şartlarında dahi oksijen ve klor iyonlarının yeterli kalınlıktaki (177 um) kaliteli

kaplamadan difüzyon hızının son derece düşük olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte epoksi esaslı kaplamalar su geçirmez değildir. Epoksi kaplamaların iki tür fonksiyonundan birincisi bir bariyer gibi davranarak oksijen ve klor iyonlarının çelik yüzeyine ulaşmasını engellemesi ve ikincisi çeliğin birbirine yakın olan bölgeleri arasındaki elektriksel direnci arttırmasıdır. Epoksi kaplamalı donatının performansı betonun kalitesinin arttırılması ve yeterli pas payının kullanımı ile yükseltilir. Epoksi kaplamanın çelik donatıya yapışma özelliği nem dolayısı ile azalır. Bunun donatının korozyonunun esas nedeni olup olmadığı halen tartışma konusudur. Epoksi kaplamalı donatının performansı, üzerindeki kusurların sayısı ile bağlantılıdır. Bu hatalar donatının elektriksel direncini direkt olarak etkilemektedir. Epoksi kaplamalı olarak kullanılan donatılarda görülen pek çok sorun betonun nemli, sürekli ıslak olduğu ya da ortamın sıcaklıklarının yüksek olduğu yerlerde tespit edilmiştir [40].

Normal çelikte korozyon, eşik konsantrasyonu aşıldığı zaman, tüm bölgelerde başlar iken epoksi kaplamalı donatıda korozyon, sadece klor iyon konsantrasyonu eşik değerinin aşıldığı ve kusurlu olan bölgelerde başlar [53].

Kaplamadaki kusurlar genel olarak kaplamanın uygulanması esnasında, depolanması, ambalajlanması, taşınması ve betonun yerleştirilmesi esnasında oluşmaktadır. Epoksi kaplamalı donatıda korozyon kusurlu bölgelerde çatlak korozyonu şeklinde başlar [53].

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 elektro kimyasal 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 [22].

Epoksi kaplamaları, donatı çeliğine bir fabrikasyon sürecinde uygulanırlar [22]. Öncelikle çelik çubuk kum püskürtülerek pas ve diğer pisliklerden temizlenir [40]. 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 işlemiden çıkmadan önce kürlenir ve çeliğe su verilir. Aderans mukavemeti, esneklik, akma özellikleri ve minimum korozyon koruma gereksinimleri üzerine laboratuvar testleri, optimum kalınlığın 0,125-0,225 mm olduğunu göstermişlerdir. Üst limit olarak kalınlık 0,3 mm olarak belirtilmiştir. Epoksi kaplama metodunun birçok

avantajı ve dezavantajları vardır. En önemli avantajı, korozyon korumasına karşı düşük maliyetli bir yaklaşım olmasıdır. Eğer iyi kalitede donatılar, beton içine yerleştirilirse, su yalıtım membranlarına ve diğer yüzey kaplamalarına nazaran daha önemsiz bir bakım gereksinimi vardır. Sonuç olarak çelik donatı olarak füzyon reaksiyonu ile yapıştırılmış epoksi kaplamalarının kullanılması pratikte yüksek seviyelerde klor iyonları içeren donatı çeliğinin bozulma hızını ciddi anlamda düşürse de, tam bir koruma sağlamazlar. Kaplamadaki kesiklerde veya fabrikasyon esnasında eğilme sonucu çatlaklarda, çelik korozyonu başlayabilir [22].

Saravanan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, yeni geliştirilen epoksi esaslı ve polyanilin içeren kaplama sistemi, donatı çeliğini korozyondan korumak için sunulmuştur. Donatı çeliğinin epoksi-polyanilin sistemi ile kaplanması sonucu korozyon direnç özellikleri elektrokimyasal empedans spektroskopisi, potansiyel-zaman çalışmaları, katodik soyulma testi, anodik polarizasyon çalışmaları, tuz sprej testi ve elektrokimyasal direnç testleri ile değerlendirilmiştir. Epoksi polyanilin kaplama sisteminin korozyon direnci, kaplamalı donatılı betonarmelere hızlandırılmış zaman çatlak çalışmaları yapılarak da değerlendirilmiştir. Elektrokimyasal empedans çalışmaları kaplamanın başlangıçtaki direncinin düştüğünü fakat sonra polyanilin pigmentlerinin pasive edici yeteneğine bağlı olarak arttığını açığa çıkarmıştır. Farklı tekniklerin sonuçları esas alındığında polyanilin pigmentli epoksi kaplamanın çevre etkisindeki donatılı beton numuneleri korozyondan korumada etkili olduğu bulunmuştur [54].

Selvaraj ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, dünyada özellikle deniz çevreleri ve endüstriyel kirliliğin olduğu bölgelerde betonarme yapılarındaki en önemli problemlerden birinin donatı çeliği korozyonu olduğunu vurgulamışlardır. Kötü koşullardaki bu yapıların içindeki donatıların uygun bir koruyucu kaplama ile kaplanması ile dayanımlarının geliştirildiği tespit edilmiştir. Akrilik polyol aromatik izosiyanat, polyester polyol aromatik izosiyanat, akrilik reçine gibi farklı tipteki reçineler; epoksi, silikon, polyamid içeren geleneksel portland çimentosu veya uçucu kül gibi genişleticiler; çinko fosfat ve titanyum dioksit gibi ana pigmentler esaslı birkaç polimerik kaplamanın, betondaki donatının üzerindeki performansı mekanik dayanım testleri ve hızlandırılmış korozyon testleri kullanılarak değerlendirilmiştir. 16 çeşit formülasyondan dört tanesinde etkili ve dayanıklı kaplama olarak iyi performans tespit edilmiştir. 16 çeşit kaplamayı içeren dört çeşit kaplama sisteminin performans

değerlendirmesine göre iki paket sistem esaslı kaplamalardan epoksi-silikon-poliamid reçineleri diğer üçlü kullanılan reçine sistemlerinden daha iyi performans göstermiştir. Akrilik reçine gibi tek paket sistemleri iyi bir donatı kaplayıcı olarak kullanılamamaktadır. Akrilik polyol aromatik izosiyanat, polyester polyol aromatik izosiyanat gibi diğer iki paket sistemleri donatı kaplaması olarak orta performans sergilemiştir. Kaplamalarda iyi yapışma performansı sağlanabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan kaplamalar arasında sadece A1, B2, D2 ve D4 kaplamaları iyi performans göstermiştir ve performans sıralaması $D4 > A1 > B2 > D2$ olarak tespit edilmiştir. D4; epoksi-silikon-poliamid reçine ile çinko fosfat ve uçucu kül pigmentlerinden oluşur. A1; Akrilik polyol aromatik izosiyanat reçineleri ve çinko fosfat ve titanyum dioksit ve geleneksel portland çimentosu pigmentlerinden oluşur. B2; polyester polyol aromatik izosiyanat reçineleri ve çinko fosfat, titanyum dioksit ve uçucu kül pigmentlerinden oluşur. D2; epoksi-silikon-poliamid reçine ile çinko fosfat, titanyum dioksit ve uçucu kül pigmentlerinden oluşur [55].

Venkatesan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Mannar'ın Gulf bölgesindeki doğal deniz ortamına maruz, 28 günlük basma dayanımı 40 Mpa olan betondaki çıplak imalat donatı çeliğinin korozyon davranışı üzerine çalışmışlardır. Çalışma üç farklı seviyede maruziyete sahip betonarme numunelerin 1 yıllık sonuçlarını raporlamaktadır. Açık devre potansiyel ölçümleri periyodik olarak yapılarak üç farklı tipte korozyondan koruma amaçlı çimento polimer kompozit (CPCC), içe işleyen polimer ağ kaplama (IPN) ve epoksi kaplama (EC) olarak isimlendirilen donatı kaplamalarının performansı değerlendirilmiştir ve sonuçlar tartışılmıştır [56].

Atmosferik seviyede, CPCC kaplamalı donatı 362 günlük deniz ortamına maruziyet sonrası empedans metoduna göre daha düşük korozyon hızı göstererek nispeten iyi performans sergilemiştir. Bu metoda göre sonuçlar $CPCC > IP \text{ ağ} > epoksi > control$ olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar lineer polarizasyon metodu ve açık devre potansiyeli tekniklerinde de benzer eğilim göstermiştir. Gözle inceleme kaplamalı donatılarda maruziyet esnasında çimento polimer kompozit (CPCC), içe işleyen polimer ağ kaplama(IPN) ve epoksi kaplamanın (EC) tam koruma sağladığını göstermektedir [56].

Yüksek gelgit seviyesinde, CPCC kaplamalı donatı 362 günlük deniz ortamına maruziyet sonrası empedans metoduna göre daha düşük korozyon hızı göstererek nispeten iyi performans sergilemiştir. Bu metoda göre sonuçlar $CPCC > epoksi > IP \text{ ağ} > control$ olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar lineer polarizasyon metodu ve açık devre

potansiyeli tekniklerinde de benzer eğilim göstermiştir. Kaplamasız imalat çeliği donatının 362 günlük doğal deniz ortamına maruziyet sonrası ağırlık kaybı metoduna göre korozyon hızı 0,0087 mm/yıl'dır. Gözle inceleme, çimento polimer kompozit (CPCC), içe işleyen polimer ağ (IPN) ve epoksi (EC) kaplamalı donatıların maruziyet sırasında hasara uğramadığını meydana çıkarmıştır [56].

Deniz tabanı seviyesinde, CPCC kaplamalı donatı 362 günlük deniz ortamına maruziyet sonrası empedans metoduna göre daha düşük korozyon hızı göstererek nispeten iyi performans sergilemiştir. Bu metoda göre sonuçlar CPCC> epoksi> IP ağ> control olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar lineer polarizasyon metodu ve açık devre potansiyeli tekniklerinde de benzer eğilim göstermiştir. Kaplamasız imalat çeliği donatının 362 günlük doğal deniz ortamına maruziyet sonrası ağırlık kaybı metoduna göre daha yüksek korozyon hızına (0,0090 mm/yıl) sahip olduğu tespit edilmiştir. Gözle inceleme çimento polimer kompozit (CPCC), içe işleyen polimer ağ (IPN) ve epoksi (EC) kaplamalı donatıların maruziyet sırasında hasara uğramadığını meydana çıkarmıştır [56].

4.2.2 Galvanize Çelik Donatı

Metal kaplamalı çelik donatılarda çinko, bakır, nikel gibi pek çok kaplama sistemi kullanılmaktadır. Çinkonun sıcak daldırma galvaniz kaplaması bu amaç için en yaygın kullanılan kaplamadır [50].

Çelik donatı çubuklarını, çinko tabakasıyla kaplama tekniğine galvanizleme denir [22].

Kaplama metali genelde ortama karşı alt metalden daha dayanıklıdır. Fakat aynı zamanda ona göre daha aktif olduğu için alt metalin açığa çıktığı fiziksel süreksizliklerin bulunduğu noktalarda kendisini feda ederek yani çözünerek koruma görevini gerçekleştirir. Kaplama metali çözünen yani “anot” (elektron veren), alt metal ise çözünmeyen yani “katot” olarak davranır. Bu tip kaplamalara “anodik kaplamalar” denmekle birlikte koruma mekanizması korunacak metalin “katot” yani elektron alan olarak davranmasını gerektirdiği için koruma “katodik koruma” olarak bilinir [10].

Kaplama metalinin daha dayanıklı olmasına rağmen alt metale tercihi olarak çözünmesi kavramları termodinamik olarak birbirine zıt gözükmemektedir. Fakat burada kaplama metalini korozyona daha dayanıklı kılan unsur korozyon ürünleridir. Örneğin çinko yüzeyinde bileşik bir katman bu direncin nedenidir [10].

Çinko kaplamalar korozyondan korumada her ortamda yani atmosferde, toprak altında, tatlı veya tuzlu suda korunmada başarılı olarak kullanılmaktadır. Deniz suyunda korozyon hızı artmakta ise de nötral sularda bazik tuzların oluşumu ile metal yüzeyinin örtülmesi korozyon hızını azaltır. Yumuşak ve asidik sularda hızı çok artar. Ayrıca bakır ve bakırlı çözeltilerle temas eden çinkonun korozyonu hızlanır. Çinko değişik ortamlarda dahi zamanla sabit kalan bir korozyon hızı ile çözünür. Bu nedenle kaplama kalınlığı ile korozyon dayanım süresi doğru orantılıdır. Fakat çinko yüzeyinde oluşan ve çok karmaşık bir yapıya sahip olan katı korozyon ürünleri kaplamanın korozyon direncini arttırabilirler. Buna örnek olarak atmosferik koşullarda oluşan çinko hidroksit ve özellikle CO₂ oranı yüksek ortamda oluşan bazik çinko karbonatları gösterebiliriz. Kükürt dioksitli ortamlarda çinko kaplamaların çeliği koruma özelliği yüksektir [10].

Çelik gibi çinko da orijinal metal hacminden daha büyük hacme sebep olan korozyon ürünlerine sahiptir ve bunun neticesinde beton çatlayabilir. Galvanize donatının avantajı çinko kurban olarak yıprandığı zaman yüzeyde elektriksel yalıtkan olarak davranan bir hidrat oksit [Zn(OH)₂] oluşur. Bu izolatör aktif korozyon bölgesinde yeni bir korozyonun oluşmasını engelleyici bir bariyer olarak düşünülür [40].

Galvanize çelik donatılarda kaplamalar "feda edici" olarak korozyona uğradığından, taşımada oluşacak hasarlar telafi edilebilir. Galvanize donatılar, kaplama panelleri gibi karbonatlaşmanın risk olduğu yapılarda başarılı bir şekilde uygulanır. Galvanizli çeliğin sakıncaları da vardır. Soğuk işleme galvaniz çatlar ve bu bölge kaplanmış bölgeye nazaran anot durumuna geçer olması nedeniyle oyuklanma korozyonuna yol açar. Galvanizli ve çıplak çeliğin yakın olmaları da korozyona neden olur. Çinko ile çimentonun sakıncalı kimyasal reaksiyonlara girmeleri olasıdır. Çinko çimentodaki serbest CaO ve Ca(OH)₂ ile birleşince, H₂ kabarcıkları oluşur, bunlar donatı-beton aderansını düşürür. Galvanizli donatılara elektrokimyasal bakım 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 [22].

Çinko çelik yüzeyine çeşitli yollarla uygulanabilir fakat yapı çeliklerinde (genel olarak > 5 mm kalınlık), sıcak daldırma tercih edilir ve en yaygın kullanım metodudur. Sıcak daldırma galvanizleme, temizlenmiş çeliğin, çinko ile çelik arasında metalurjik reaksiyonun oluşmasına imkan tanıyan 450 °C'deki erimiş çinko banyosuna daldırılması işlemini kapsamaktadır. Bu reaksiyon ile demir çinko ara yüzeyinde büyüyen ve çelik

yüzeyinde oluşan demir çinko alaşım tabakaları (gama, delta ve zeta) ile esasen dış tabakada saf çinkodan (eta) oluşan kaplama meydana gelir. Galvanizlemenin, elektro kaplama, toz kaplama ve boyalar gibi diğer çelik yüzeyine yapılan kaplama türlerinden farklı olmasının sebebi kaplamanın çeliğe metalurjik olarak bağlı olmasıdır. Sonuç olarak galvanizleme, bozuk taşıma koşulları ve aşınmaya dirençli ve kaplamaya önemli zararı olmayan ve korozyona sebep olmayan eğilmelerle ve bükülmelerle üretilebilir. Çoğu durumda galvanize çelikler geleneksel çelikler gibi taşınabilir ve muamele edilebilir. Üretim ve taşıma esnasında oluşabilecek dış hasarlardan kaplamayı korumak için özel önlemler gerekmez. Betonarmenin tasarım ve inşasında kullanılan galvanize donatı esasen geleneksel çelik donatı ile aynıdır ve galvanize çelik donatı kullanıldığı zaman en iyi uygulama uygun olarak tasarlanmış ve yerleştirilmiş betonun genel yapılar da uygulandığı gibi kullanımıdır [50].

Galvanizleme, çeşitli çevresel koşullara maruz olan çok çeşitli betonarme yapılar da kullanılmaktadır. Saha uygulamalarından bulgular, galvanizlemenin betonarmenin ömrünü arttırdığını, ön çatlaklara ve paslanmaya karşı koruma sağladığını göstermiştir. Galvanizleme ile sağlanan korozyondan koruma şu yararlı etkilerin kombinasyonuna bağlıdır. Bunlardan ilki esasen geleneksel kaplamasız çelikte karşılaştırıldığında çinko kaplamalı betonarme çeliğinin daha yüksek klor eşiğidir. Buna ek olarak galvanize donatı çeliği betonun karbonasyon etkilerine karşı dirençlidir. Çinko kaplama varlığının net etkisi sadece korozyon prosesini başlatmayı geciktirme etkisi değildir ayrıca sonraki periyotta da bariyer koruma sağlamayı sürdürmektedir [50].

Kaplanacak metal ile kaplama metali arasındaki reaksiyon, alaşım tabakaları oluşturur, bu da kaplama metali ile alt metal arasında iyi bir fiziksel bağlantı sağlar. Fakat birçok halde yüzeydeki saf metal ile alttaki alaşım tabakasının özelliklerinde farklılık gözlenir [10].

Çözelti içindeki çinko güçlü asidik ve bazik yapılar da tepkir, saldırı en çok pH'ın 6 dan küçük ve pH'ın 13 ten büyük olduğu durumlarda gerçekleşir. Bu değerlerin arasında çinko yüzeyindeki koruyucu tabakaların oluşumuna bağlı olarak saldırının hızı çok yavaştır. Betondaki çinko 8 ile 12,5 pH değerleri arasında nispeten çözünmeyen korozyon ürününün koruyucu yüzey filmi oluşumuna bağlı olarak pasif durumdadır. Çinko ıslak çimento ile kuvvetlice tepkir fakat bu reaksiyon etkin bir şekilde beton sertleşince sona erer. Bu reaksiyonun sonucu, bariyer tabakası olan kalsiyum hidroksi zinkat'ın oluşumudur [50].

Tipik olarak, galvanize donatı kaplama sonrası çinko yüzeyi pasive etmek ve çinkonun taze çimento harmanındaki hidroksit ile reaksiyonunu önlemek amacıyla kromat banyosuna daldırılır [40].

Geleneksel betonda çelik, pH seviyesi 11,5'un altına düştüğü zaman aktifleşse de klor içerikli betonda bu aktifleşme daha yüksek pH seviyelerinde oluşur. Aksine, betondaki çinko kaplamalı çelik yaklaşık 9,5 pH seviyelerine kadar pasif durumda kalır ve böylece beton karbonasyonunun etkilerine karşı da önemli koruma sağlar. Çinko kaplamalı betonarme, siyah donatı çeliğinde korozyona sebep olan klor iyon konsantrasyonun değerlerinden birkaç kez daha fazlasına maruz kaldığında korozyona direnebilmektedir [50].

Kor içerikli betonda yapılan hızlandırılmış korozyon çalışmaları galvanize donatının korozyon davranışında siyah çeliğe göre iyileşme ve üstünlük olduğunu ortaya koymuştur. Aynı kötü ortam koşulları altında galvanize donatı siyah çeliğe göre klor seviyesine en az 2,5 kez daha fazla direnç göstermiştir ve altındaki çeliğin korozyon başlangıç zamanını siyah çeliğe göre 4-5 kez geciktirmiştir. Klor içerikli betonda galvanizlemenin, donatının aktifleşmesi için gereken zamanı arttırması yoluyla orta ve düşük klor içerikli çevrelerdeki betonarme yapıların servis ömrü önemli bir şekilde arttırılır [50].

Betondaki çinko alaşımlı kaplamaların reaksiyon mekanizmalarını ve korozyon ürün karakteristiklerini anlamak için dikkate değer çalışmalar yıllardır yapılmaktadır. Başlangıçta pasif durumda olan ve ıslak çimento ile ilk defa temas eden galvanize kaplamada yaklaşık 10 mikron çinko, başlangıç kalınlığı 180 mikron olan kaplamanın, saf çinko (eta) tabakasından çözünür. Bu durumda ortalama 164 mikronluk kalınlıklı kaplama kalır ve kaplama parlak ve pürüzsüz yüzeyini korur. Çalışmalar, sahadaki yapılardan toplanan galvanize donatıların uzun bir süre beton içinde bu durumda kaldığını ve önemli bir değişime uğramadığını göstermektedir. Böyle durumlarda çinkonun pasifliği bozulana kadar ve aktif korozyon başlayana kadar çok ufak ilave metal kaybı oluşur. Betonarme derinliklerinde yüksek düzeyde klor birikimine bağlı olarak çinkonun aktif korozyonu başladığı zaman eta alaşım tabakasından sürekli çözünme oluşur ve bunu alttaki alaşım tabakalarında gelişen çözünmeler takip eder. Oluşan bu saldırıların sonucunda alaşım tabakalarında özellikle delta fazı etrafında ve boyu boyunca derin tüneller ve delikler oluşur. Kaplama bu durumda parçalanacak gibi görünse de gama ve delta fazlarının yoğun katmanlarında çinkonun korozyonu

oluşmasına rağmen kırmızı pas korozyonu eş şartlardaki siyah çelik donatı ile karşılaştırıldığında çok daha azdır [50].

Betonarme binalarda korozyon hasarının maliyeti ve sonuçları analiz edildiği zaman, galvanizlemenin ekstra maliyeti küçük bir para yatırımı olarak görülmektedir. Galvanizlemenin başlangıç maliyeti, ülke menşesine, ülke içerisinde galvaniz fabrikalarının mevcudiyetine ve ulaşımına bağlı olarak donatının maliyetini %50 ye kadar arttırabilir. İnşaatçıların maliyet analizleri, donatının galvanizlenmesinin betonarmenin toplam maliyetini %6-10 arasında arttırdığını ortaya koymaktadır. Gerçek değer, donatı tipi ve galvanizleme fiyatı, betonun birim maliyeti ve dökülen her metre küp betonda kullanılan çelik miktarı gibi pek çok faktöre bağlı olarak değişecektir. Ortalama olarak çeliğin maliyeti, betonun toplam maliyetinin %25'inden fazla olmaz. Yapı içerisindeki çeliğin tamamını galvanizlemenin nadiren gerekli olduğu yapısal çerçeve ve bina kaplamasının maliyetinin normal olarak toplam bina maliyetinin %25-30'unu temsil ettiği dikkate alınarak, galvanizlemenin ek maliyeti binanın toplam maliyetinin %1,5-3'üne kadar azaltılabilir. Bununla birlikte galvanizleme sadece belirli kolay zedelenabilir kritik elemanlara, örn yüzey panelleri gibi, yapılar ek maliyeti %0,5-1 oranına kadar düşürülebilir. Toplam yapı maliyetlerine bağlı olan bu oranlar toplam proje maliyetlerine ve son satış fiyatlarına karşı dikkate alındığında galvanizlemenin ek maliyeti gerçekten çok küçük olmakta ve sıklıkla %0,2 den az olmaktadır. Bu korunmasız korozyona uğramış donatılı betonun tamir maliyetinin çok küçük bir kısmını temsil etmektedir [50].

Gowripalan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, betonarmenin korozyonunu azaltmada yüksek performanslı betonun (HPC) ve galvanize çeliğin kullanımının etkinliğini belirlemek için deneysel bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, 28 günlük basma dayanımları 30 MPa ve 40 MPa olan iki normal dayanımlı beton (NSC) karışımı ve 28 günlük basma dayanımları 50 MPa ve 80 MPa olan iki yüksek dayanımlı beton karışımı kullanılmıştır. İyon nüfuziyetini incelemek için hızlandırılmış klor iyon nüfuziyet testi yapılmıştır ve %4'lük NaCl çözeltisine 1 yıllık uzun dönemli daldırma testi sonuçları ile hızlandırılmış test sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu iki testin sonuçları arasında ilişki kurulamamıştır. Yarı hücre potansiyel ölçümleri korozyon başlangıcını izlemek için kullanılmıştır. Yüksek dayanımlı betonun hamur ve harcının pH 'ı silis dumanının betonun pH 'ına ve korozyon başlangıcına etkilerini değerlendirmek için 90 gün boyunca izlenmiştir. Sonuçlar yüksek dayanımlı betonun klor iyon geçirimsizliğini

önemli bir şekilde azalttığını göstermiştir. Bununla birlikte kötü ortam koşullarında yeterli kalınlıkta beton örtüsünün olması gerektiği tespit edilmiştir. Silis dumanının %10 yer değiştirme ile kullanımının beton pH 'ını 90 günlük periyotta 14,0'dan 12,8'e indirdiği görülmüştür. Fakat %20 oranına kadar yer değişimi ile kullanımı ile pH'daki düşmenin endişeye sebep olabilecek bir büyüklükte oluşmadığı görülmüştür. Galvanize çeliğin klor iyon kaynaklı korozyon ataklarını geciktirebileceği ve yüksek performanslı beton ile galvanize donatının birlikte kullanımının klor kaynaklı korozyonu oldukça geciktirebileceği tespit edilmiştir [57].

4.2.3 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. Paslanmaz çelikler, çukurcuk etkisine karşı hassastır, bu yüzden paslanmaz çeliğin doğru derecelerde kullanılması gereklidir. Paslanmaz çeliğin ayrıca, betona aderansı düşüktür. 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 [22].

García-Alonso ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, inşaat sektöründeki ana problemin kötü çevre koşulları altındaki betonarme yapıların donatı korozyonuna bağlı olarak dayanımının sınırlı olması üzerine dikkat çekilmiştir. Klor içeren betonarme yapılarda korozyondan kaçınmak için paslanmaz çeliklerin yeterli olduğunu göstermek için iki ayrı klorid dozlu harçtaki AISI 304 ve AISI 316L paslanmaz çeliklerinin korozyon davranışı; düşük nikel içerikli ve maliyeti düşürülmüş üç yeni paslanmaz çeliğin korozyon davranışı ve geleneksel karbon çeliğinin korozyon davranışı ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada aktif durumdaki donatı karbon çeliği içinde korozyona neden olmak için en az %2 oranında klor içeriği kullanılırken en yüksek klor içeriği olan %5 lik klor kullanımı ile deniz suyu içeren doğal ortamlardaki beklenen klor seviyesi aşılmaktadır. Yeni paslanmaz çelik her iki durumdaki klor içerikli harç numuneleri içinde de pasif durumda kalmıştır [58].

Gu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, iki yıllık paslanmaz çelik donatılı betonarme numunelerin klor içeren agresif sulu çözelti içerisine yerleştirilmesi sonucu performansları araştırılarak sonuçları sunulmuştur. Bu çalışma normal donatı çeliği ve

paslanmaz donatı çeliği ile üretilen betonarme numunelerin korozyon hız testlerinin empedans spektroskopisi vasıtası ile ölçümünü kapsamaktadır. Klor içeren betondaki paslanmaz çeliğin korozyonu engellemedeki etkinliği ve performansı değerlendirilmiştir. Sonuç olarak klor içerikli betonda paslanmaz çelik donatıların korozyon hızının normal çelik donatıya göre en az elli kez daha düşük olduğu ortaya çıkmıştır [59].

Ostenitik paslanmaz çeliklerin kullanımı, zararlı ortama maruz betonarme yapıların dayanıklılığını sağlamada en güvenilir metodlardan biridir fakat malzemenin başlangıçtaki maliyeti pratikte kullanımını sıklıkla sınırlandırmaktadır. Bautista ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, düşük nikelli 204Cu donatıların korozyon dirençlerini, 304, 304 L, 316, 316L ve 316 Ti gibi geleneksel ostenitik paslanmaz çeliklerin korozyon dirençleri ile karşılaştırmışlardır. Farklı klor konsantrasyonlu karbonatlı ve karbonatsız por çözeltileri ile simüle yapılarak polarizasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar 204 Cu paslanmaz çeliğinin karbonatlı ortamda ve karbonatsız klor içerikli ortamda çok iyi korozyon direnci gösterdiğini kanıtlamıştır. Düşük nikel tipi 204 Cu paslanmaz çeliği klor içerikli karbonatsız çözeltide geleneksel ostenitik paslanmaz çeliğe benzer davranış göstermiştir. Eğer başka deneysel sonuçlarda beton veya çimentodan sağlanan bu dataları doğrularsa bu tipin 304 tipi yerine bu şartlara maruz yapılarda kullanımının paslanmaz çelik donatının maliyetinde %35-40 azalma sağlayacağı bildirilmektedir [60].

Alvarez ve arkadaşları, iki fazlı paslanmaz çeliklerin (SAF 2001 ve 2304 kaliteleri) sekiz ayrı alkalın çözeltideki (karbonatlı, karbonatsız, Ca(OH)_2 ye doymuş farklı klor içerikli) korozyon davranışları üzerine çalışmışlardır. 2001 paslanmaz çeliği kompozisyonu dolayısı ile pazardaki yeni bir çeşittir. 2304 farklı şartlar altında önceden çalışılmıştır. Bununla birlikte betonda donatı olarak kullanımı yenidir. Çalışmalar, polarizasyon eğrileri, taramalı elektron mikroskobu ve optik gözlemlerle gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, aynı şartlar altındaki karbon çeliği ve ostenitik AISI 304 çeliği ve çift fazlı SAF 2205 çeliği ile karşılaştırılmıştır. Klorlu alkalın ortamdaki korozyon testleri sonrasında ferrit 2304 iki fazlı çeliği seçici olarak korozyon eğilimi göstermiş iken aynı şartlar altında 2001 çeliğinde ostenit seçmeli olarak korozyona uğramıştır. Saldırı gelişimine çift fazlı mikro yapıların etkisi ve morfolojisi analiz edilmiştir. Polarizasyon eğrilerinden sağlanan elektrokimyasal parametreler, 2001'in yapının korozyon performansını koruyarak ve açık bir şekilde ekonomik olarak 304'ün

yerine kullanılabileceğini göstermiştir. 2304 çift fazlı çeliğinin 304 çeliğinden açık bir şekilde daha iyi korozyon davranışı gösterdiği, 2304'ün korozyon direncinin, ostenitik cins ile 2205 çift fazlı çeliği arasında olduğu tespit edilmiştir [61].

4.2.4 Nikel Kaplamalı Donatı

Nikel kaplamalı çelik donatılar ilk defa 1960 yılında kullanılmaya başlanmıştır [40]. Nikel, çelik ve diğer metallere korozyona ve sürtünmeye dirençli yüzey kazandırmak için kaplanır. Nikel kaplamalar gerek atmosferik gerekse sulu ortam korozyonuna çok dirençlidir. Nikel yüzeyindeki pasif film bu direncin nedenidir [10]. Nikelin, alkalik klor çözeltisi içinde, korozyon direnci yüksektir ve çelik nikelden daha az soy olmasına rağmen bariyerde bir çatlak oluşursa altta bulunan çelikte korozyon hız kazanmaz [40]. Nikel yüksek sıcaklıklara da çok dayanıklıdır. Sulu ortamdaki klorür iyonları ise pasif filmin oyuklaşmasına neden olabilirler. Oksijen konsantrasyonunun düştüğü aralıklarda da nikel aralık korozyonuna maruz kalır [10].

Nikel elektrolitik veya akımsız olarak kaplanır. Nikel en az iki katman halinde kaplanmaktadır. Alttaki katman düşük kükürtlü bir nikel tabakasıdır. Bunun üzerine korozyon bakımından aktif parlak nikel tabakası kaplanır. Bu tabakanın kükürdü yüksektir. Kükürt içeriği dolayısı ile parlak nikelde göre anodik olarak davranır. Nikel üzerine yapılan krom kaplama çok çatlaklı veya gözenekli ise bölgesel korozyon hücrelerinin şiddeti azalmakta ve parlak nikel krom tabakası altında yavaş yavaş çözünerek yarı parlak nikeli ve bunun altındaki çeliği korumakta, korozyonun alt yüzeye erişmesini engellemektedir [10].

Elektrolitik nikel kaplamalarda nikelin kaplama kalınlığı 5 ile 40 mikron arasında değişir. Mühendislik amacı ile yapılan nikel kaplamalar ise 120-130 mikron kalınlıktadır [10].

Şimdiye kadar yapılmış olan araştırmalar çelik donatılarda korozyon hasarını önlemek amacı ile nikel kaplama oranının arttırılmasına bağlı olarak maliyetin yükseldiğini doğrulamaktadır [40].

Jalili ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, kaplamasız donatılı ve inorganik kaplamalı betonarme numunelerin performansını araştırmışlardır. Donatıların korozyon direnci ve donatı beton ara yüzeylerindeki bağ dayanımı kaplamasız donatılarda ve üç farklı inorganik kaplama ile kaplı donatılarda değerlendirilmiştir. Sonuçlar, kaplamasız

geleneksel donatılı çelikli numunelerle karşılaştırıldığında üç farklı inorganik kaplamanın donatıların korozyon direncinde önemli gelişimler sağladığını ve ara yüzey bağ dayanımını arttırdığını göstermiştir. Bununla birlikte her üç inorganik kaplamanın donatıların korozyon dayanımını geliştirmekteki ve bağ dayanımını arttırmadaki etkisinin derecesi uygulanan inorganik kaplamanın kimyasal kompozisyonuna kaçınılmaz bir şekilde bağlı olduğu belirlenmiştir. Donatıları kaplamak için kullanılan kaplamalardan CC1 olarak isimlendirilen üç katyonik Zn-Ni-Mn fosfat kaplamasıdır. CC2 olarak isimlendirilen iki katyonik Zn-Ni fosfat kaplamasıdır. CC3 olarak isimlendirilen iki katyonik Zn-Ca fosfat kaplamasıdır. Kullanılan Zn-Ca fosfat sisteminde donatı ile beton arasındaki bağ dayanımındaki ilerleme maksimum bulunmuştur. (%74 artış). Bu ilerleme üçlü bağ mekanizması ile açıklanabilmektedir. Korozyon çalışmalarından sağlanan sonuçlar fosfat kaplama uygulamalarının donatının korozyon direncini önemli bir şekilde geliştirdiğini ispatlamıştır. Minimum korozyon akımı ve maksimum korozyon potansiyel değerleri Zn-Ni fosfat kaplama sisteminde sağlanmıştır ve bu da bu sistemin mükemmel korozyon direncine sahip olduğunu göstermektedir [62].

Singh ve Ghosh yaptıkları çalışmada, klor içerikli beton por çözeltisi simüle edilerek, çelik yüzeyinde akımsız nikel-fosfor kaplama biriktirme yönteminin normal kaplamasız çelik ile karşılaştırıldığında korozyona karşı ileri derecede koruma sağladığını tespit etmişlerdir. Elektrokimyasal AC (alternatif akım), empedans spektroskopisi (EIS), ve DC (direkt akım) polarizasyon teknikleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM), x-ray difraksiyonu (XRD) yöntemleri korozyon koruma mekanizmalarını değerlendirmek ve korozyon ürünlerinin karakterize etmek için kullanılmıştır. Ortalama fosfor içerikli (%8 fosfor) akımsız nikel-fosfor kaplamanın, yüksek fosfor içerikli kaplamadan (%16) çok daha iyi korozyon koruması sağladığını tespit etmişlerdir [63].

4.3 Betonda Tıkayıcılar Kullanılması

Beton yapıları korozyondan korumada tıkayıcılar önemli avantaja sahiptir ve yapının beton yüzeyini maruz kalınan her ortamda koruyabilmektedirler. Şu anda pazarda pek çok tıkayıcı mevcuttur. Tıkayıcı kullanmanın amacı, su ve klor iyonlarının betona nüfuz etmesini engellemek için kapiler (kılcal) hareketi önleyerek beton içerisindeki çeliğin korozyonunu azaltmaktır [40].

Tıkayıcılar mikroskopik olarak beton yüzeyinde ince (2 mm ye kadar) geçirimsiz tabaka

oluşturaran por bloklayıcılar, ya da çok hafif betonun içine (1,5-3 mm arası) nüfuz ederek hidrofobik yapıcılar olarak davranırlar [40].

Tıkayıcıların en önemli özellikleri buhar iletim karakteristikleridir. Çünkü beton içerisindeki nemin tıkayıcı içerisinden geçmesi ve kuruma esnasında betondaki yüksek buhar basıncının kaplamayı kabartmaması için uzaklaşması gerekmektedir [40].

Hou ve Chung'un yaptıkları çalışmada; latex, metilselüloz, silis dumanı ve kısa karbon fiber katkılarının (çeşitli kombinasyonlarda) beton içerisindeki çelik donatının korozyon direncine olan etkileri, beton NaCl ve Ca(OH)_2 çözeltisine daldırılmış halde iken korozyon potansiyeli ve korozyon akım yoğunluğu ölçülerek değerlendirilmiştir. Silis dumanı (çimento ağırlığınca %15) su absorpsiyonunu azaltması ile ve çok fazla olmamakla birlikte elektriksel direnci artırması sonucu korozyon direncini iyileştirmede en etkin olmuştur. Latex (çimento ağırlığınca %20) su emmeyi azaltıp elektriksel direnci arttırarak korozyon direncini arttırmıştır. Metilselüloz (çimento ağırlığınca %0,4) korozyon direncini küçük porları doldurması suretiyle çok az iyileştirmiştir. Kısa karbon fiberler (çimento ağırlığınca %0,5) elektriksel direnci düşürmesine bağlı olarak korozyon direncini düşürmüştür. Bununla birlikte karbon fiberlerin negatif etkisi silis dumanı veya latex ilavesi ile telafi edilebilir. Karbon fiberli betonun korozyon direncini iyileştirmede silis dumanı latex'den daha etkili bulunmuştur. Bunun ana sebebi silis dumanının su absorpsiyonunu azaltması olarak belirlenmiştir. Silis dumanı ve latex'in eklenmesi sonucu elektriksel dirençteki küçük artışlar korozyon üzerinde çok az etkili bulunmuştur. Latex'in su emmeyi azaltıp elektriksel direnci arttırdığından dolayı donatının korozyon direncini iyileştirdiği görülmüştür. Latex korozyon direncini arttırmada silis dumanından daha az etkili bulunmuştur. Bunun nedeni, latex katkısının silis dumanına göre su emmeyi daha az azaltması olarak düşünülmektedir [64].

El-Hawary ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, deniz ortamının olduğu sıcak bölgelerde epoksi takviyeli betonarmelerin korozyon direncinin değerlendirilmesi ve betonda epoksinin kullanımı ile betonun dayanıklılığının geliştirilebilmesi imkanının tanıtımı amaçlanmaktadır. Epoksi, çimentonun yerine farklı yüzdelerde (%0-10-20-40-60-100 oranlarında) kullanılmıştır. Numuneler deniz suyu, ıslak ve sıcak hava kurutma maruziyet çevriminin olduğu özel olarak imal edilmiş hızlandırılmış deniz dayanım sistemi olan tankların içerisine konulmuştur. Epoksi katkısının korozyon direncini arttırdığı, geçirimsizliği azalttığı ve klor geçirimsizliğini düşürdüğü ve dayanımı arttırdığı

bulunmuştur. Bu iyileşmelerin epoksi yüzdesinin artması ile arttığı tespit edilmiştir. Polimerlerin fiyatları düşmekte olup bunların inşaat alanında kullanımları kaçınılmazdır. Sıcak deniz ortamlarında kabul edilebilir korozyon direncinin sağlanabilmesi için epoksinin %20 oranında çimento yerine kullanımı tavsiye edilmektedir [65].

Batis ve arkadaşlarının yaptığı çalışmanın amacı, korozif ortama maruz olan hafif harç numunelerin korozyon direncini araştırmaktır. Hafif harçlar iki çeşit Yunan çimentosu kullanılarak üretilmiştir. Üç farklı kaplama ve cila bunların üzerine uygulanmıştır. Harç numuneler izomerize lateks reçine içeren cila ile ve ya üç farklı kaplama ile kaplanmıştır. Bunlardan ilki ana pigmentleri Fe_2O_3 ve Fe_3O_4 olan izomerize lateks reçine, ikincisi ana pigmentleri Fe_2O_3 ve Fe_3O_4 olan sulu akrilik dispersiyon, üçüncüsü ana pigment olarak TiO_2 içeren sulu akrilik dispersiyondur. Kaplamasız numuneler de referans olarak kullanılmıştır. Kaplamalar numunelerin yüzeyine fırça ile sürülmüştür. Numuneler %3,5'lik NaCl çözeltisine kısmen daldırılmıştır ya da açık havaya maruz bırakılmıştır. Bu sistemlerin anti korozif performansları, korozyon potansiyelleri ve karbonasyon ve klor difüzyonu ağırlık kayıpları izlenerek araştırılmıştır. Sonuçlar, her durumda koruyucu kaplamaların donatıların korozyonunu önemli bir şekilde azalttığını açığa çıkarmıştır. İncelenen sistemler arasında en iyi korumanın titanyum dioksit içeren sulu akrilik dispersiyon tarafından sağlandığı bildirilmiştir [66].

Okba ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, lateks modifiyeli beton ile geleneksel betonun korozyon direncini hızlandırılmış korozyon hücresi kullanarak karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Polimer lateks olarak sitren-bütadien kauçuk çimento ağırlığınca %15 oranında katılmıştır. Korozyon hücresi, özellikle klor iyon penetrasyonuna bağlı olarak beton dayanıklılığını değerlendirmede ve donatıyı korozyona karşı korumada basit ve iyi bir yöntem olarak kanıtlanmıştır. Lateks modifiyeli betonun, geleneksel betona göre korozyon direnci karşılaştırıldığında üstünlüğü kanıtlanmıştır ve pek çok kötü çevreye maruz yapılarda kullanımı önerilmektedir [67].

Al-Zahrani ve arkadaşları, iki polimer esaslı, bir çimento esaslı ve polimer mofidiyeli, bir çimento esaslı su geçirmez kaplama ile kaplanan beton numunelerin bazı fiziksel özelliklerini ve çelik donatıların korozyonunu değerlendirmek için yaptıkları çalışmanın sonuçlarını raporlamışlardır. Kaplamalı ve kaplamasız beton numuneler korozyon başlangıç zamanını belirlemek için hızlandırılmış korozyona tabi tutulmuşlardır. Beş ay boyunca sıcak-soğuk ve ıslak-kuru çevrimlerine tabi tutulan beton numunelerin fiziksel

özellikleri de değerlendirilmiştir. Değerlendirilen fiziksel özellikleri, su emme, su geçirimsizliği, klor geçirimsizliği ve yapışmadır. Hızlandırılmış korozyon test sonuçları, poliüretan elastomer esaslı su geçirmez kaplama ile kaplanan numunelerin diğer su geçirmez numunelerle kaplanan numunelerden daha iyi performans gösterdiğini açıkça göstermiştir. Bunu, sırası ile alçalarak çimento esaslı ve polimer modifiyeli kaplamalı numune, epoksi esaslı ve çimento esaslı kaplamalarla kaplanan numuneler takip etmiştir. Fiziksel özellikler açısından değerlendirildiğinde iki polimer esaslı kaplamanın, çimento esaslı polimer modifiyeli ve çimento esaslı kaplamadan daha iyi performans gösterdiği görülmüştür [68].

4.3.1 Bezir Yağı (Linseed Oil)

Bezir yağı su buharının betondan dışarı çıkmasına izin verirken su ve klor iyonlarının beton içerisine nüfuz etmesine engel olur. Bezir yağının kullanım nedeni çok iyi bilinen bir ürün olması, kullanımı ile ilgili çoğu müteahhitin bilgi sahibi olması ve mevcut olan en düşük maliyetli korozyondan koruma stratejilerinden biri olmasıdır. Bununla beraber bezir yağının performansını sürdürebilmesi için her 2-5 yılda bir tekrardan uygulanması gerekmektedir [40].

4.3.2 Epoksi

Epoksiler hem tıkayıcı olarak hem de kaplama olarak kullanılmaktadırlar. Epoksilerin tıkayıcı olarak seçilmelerinin sebebi betona, agregalara ve çeliğe iyi yapışmaları, kimyasallara ve suya dirençli olmaları ve yüksek sıcaklık ve basınç gerekmeden çabucak kürlenmeleridir [40].

4.3.3 Silan ve Siloksan

Silan ve siloksan hidrofobik fonksiyonlu silika esaslı malzemelerdir. Silan ve siloksanlar betonun porlarını çoğu yapı esaslı tıkayıcı gibi bloklamazlar fakat betonun yüzeyi ile kimyasal olarak reaksiyona girerler ve betonun yüzeyinin altında su ve klor iyonlarını geçirmeyerek geri çeviren ve su buharının geçişine izin veren bir hidrofobik tabaka oluştururlar. Porozite ve kılcal ölçülere bağlı olarak farklı tipteki betonlara farklı tıkayıcı miktar ve çeşitleri gerekmektedir [40].

Silanlar ve siloksanlar uygulanırken doğru yüzey hazırlaması önemlidir. Yüzey temizlenmeli genel yağ ve kirlerden arındırılmalıdır. Ayrıca yüzey silan veya siloksanın

beton içine nüfuz etmesi ve betonla kimyasal olarak bağlanması için kuru olmalıdır. Her beş yıllık süreçte tavsiye edilen yeniden silan ve siloksan uygulamaları için önceki uygulamaların giderilmesine gerek duyulmamaktadır. Silan ve siloksanın avantajları uygulamalarının kolay olması, yapının herhangi bir parçasına uygulanabilmeleri, inşa yapım aşamasında veya yapımdan sonra herhangi bir zamanda uygulanabilmeleridir. Dezavantajları ise yüzey hazırlama gerekliliği, izleme zorluğu ve küçük miktarlarda satın alındığında pahalı olmasıdır [40].

Tittarelli ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, silan esaslı hidrofobik katkıların beton içerisindeki donatı çeliğinin korozyon direncine etkileri araştırılmıştır. Çatlaksız ve çatlaklı olarak ve su çimento oranı 0,45-0,80 olan silan içerikli ve içeriksiz beton numuneler üretilmiştir. Numuneler %3,5 NaCl sıvı çözeltisine tam olarak daldırılmıştır. Elektrokimyasal ölçümlere, görsel gözlemlere ve donatının ağırlık kaybı ölçümlerine bakılarak elde edilen sonuçlar göstermiştir ki silan çatlaksız numunelerde korozyon prosesini engellemektedir. Diğer yandan çatlaklı beton numunelerin hidrofobik olanlarında hidrofobik olmayanlara göre donatının korozyonunun beklenmedik bir şekilde çok daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin, korozyon prosesini desteklemek için gerekli olan oksijenin hidrofobik beton içerisindeki açık beton porozitelerindeki gaz fazından daha hızlı difüze olması ve silansız betonda doymuş betonun içerisindeki su dolu porlardan oksijenin çok daha yavaş difüze olması olduğuna inanılmaktadır [69].

Tittarelli ve Moriconi'nin yaptığı çalışmada, 0,5 mm ve 1 mm genişliğinde çatlaklı ve su-çimento oranı 0,45 ile 0,75 olan her iki grupta da silan katkılı ve silan katkısız betonarme numuneler üretilmiştir. Numuneler %10 NaCl sıvı çözeltisi içinde ıslak-kuru çevrimine tabi tutulmuştur. Daha önce yapılmış bir çalışmada hidrofobik çatlaklı numunelerin donatı korozyonunun hidrofobik olmayanlara göre çok daha fazla olduğu tespit edilmiştir ve bunun sebebinin de doymamış hidrofobik çimento matrisi içerisinde daha fazla oksijen difüzyonu olduğu ve bu şekilde korozyon prosesini kontrol eden katodik reaksiyonun desteklendiği belirlenmiştir. Bununla birlikte galvanizli çelik donatı kullanılması durumunda pasivasyonun oksijen tarafından esas olarak desteklendiği çoktan ispatlanmıştır. Bunun için hidrofobik katkıların korozyon prosesini engelleyeceğini önceden söylemek kolaydır. Bunun için bu çalışmada, klorürlü ortamda hidrofobik çatlaklı ve çatlaksız betonarmedeki galvanize çelik donatının korozyon davranışını izleyerek belirtilen önsezinin geçerliliğini doğrulamak

amaçlanmıştır. Numunelerden çıkarılan galvanize çelik donatılar üzerinde elektrokimyasal ölçümler, görsel ve metalografik gözlemler gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar hidrofobik betonun galvanize çelik donatıyı çatlak mevcudiyetinde ve özellikle yüksek su-çimento oranı kullanıldığında bile korozyondan koruyabildiğini göstermiştir [70].

4.3.4 Metakrilat

Yaygın olarak kullanılan diğer bir tıkayıcı da yüksek molekül ağırlıklı metakrilattır. Metakrilat çatlak kapayıcı ya da ince kaplama olarak işlevini yapabilir. Metakrilatlar genellikle bir monomer, bir düzenleyici ve bir aktive edici olarak üç bileşenli sistemler olarak uygulanır ve uygulama öncesi bunlar karıştırılır. Bu kılıflar genelde düşük viskoziteli malzemelerdir ve püskürtülerek ya da fırça veya lastik süpürge ile uygulanır. Yüksek molekül ağırlıklı metakrilatların kullanımında bazı önemli problemler vardır. Zaman içinde metakrilatın etkinliği azalarak polimerize malzeme içinden çatlaklar yeniden açılma eğilimi gösterir. Şu da dikkate alınmalıdır ki yapılan tedavi çatlakları tamamı ile yeniden doldurmayacak ve çatlaklarla oluşan beton dayanım kaybını eski haline getirmeyecektir [40].

Wang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; akrilik lateks, donatıyı korozyondan korumak için betonarmede beton katkısı olarak veya çelik donatı kaplaması olarak tanıtılmıştır. A numunesi kaplamasız çıplak çelik ve katkısız beton ile kontrol betonarmesi olarak hazırlanmıştır. B numunesi çimentoya ağırlıkça %20 akrilik lateks ilave edilerek hazırlanan betonla üretilmiştir. C numunesinde çıplak çelik yerine lateks kaplamalı çelik kullanılmıştır. Kullanılan akrilik lateks; metil metakrilat, bütıl metakrilat ve akrilik asidin (50:50:1) bir kopolimeridir. Katı içeriği %42'dir. Tüm numuneler kireç suyunda 28 gün kürlendikten sonra %3'lük NaCl çözeltisinde hızlandırılmış korozyon testine maruz bırakılmıştır. Her numunedeki çelik donatının korozyon durumunu tespit etmek için elektrokimyasal empedans spektroskopisi kullanılmıştır. Test 60 gün süresince periyodik olarak gerçekleştirilmiştir. A numunesinde, daldırmadan 20 gün sonra NaCl çözeltisi çelik beton ara yüzeyinden donatı yüzeyine ulaşmış ve pasif tabaka ciddi bir şekilde hasar görmüştür. Direnç hızla $28 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ 'ye düşmüştür. 60 günün sonunda direnç sadece $2,5 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ 'lerde olup genel korozyon oluşmuştur. 20 günün sonunda A numunesinin pasif tabakası ağır hasara çoktan sahip olmuşken B numunesi pasif durumda kalmıştır. Bu durum akrilik lateksin betona katkı olarak eklenmesinin donatı

çeliğinin korozyon davranışına etki edebileceğini göstermektedir. C numunesinin durumu A ve B den dikkat çekici şekilde farklıdır. Kaplamalı donatı kullanımında çelik yüzeyi lateks film ile betondan izole edilir. Başlangıçta por çözeltisi içindeki su, oksijen ve elektrolit kaplamaya nüfuz ederek kaplama direncini düşürür. Başlangıçta 7000 $k\Omega cm^2$ 'lerde iken 60 günün sonunda 120 $k\Omega cm^2$ 'lere düşer. Fakat A numunesinden halen 2 kat daha fazla güçlüdür ve A numunesine göre korozyon hızı onlarca kez daha azaltılmıştır. Sonuç olarak betona akrilik lateks katkısının çelik donatı yüzeyindeki pasif tabakanın bozulmasını engellediği görülmüştür. Akrilik lateks kaplamaların donatı çeliğinin korozyonunu çok azalttığı tespit edilmiştir. Akrilik lateksin betondaki donatı çeliğinin korozyon kontrolü sahasında bir geleceğe sahip olduğu düşünülmektedir [71].

4.4 Su Geçirimsiz Kalitede Beton Üretimi

Donatılı beton yapıda en önemli gerekliliklerden biri iyi kalitede beton kullanımıdır. Beton pek çok içten bağlantılı, şebeke ağı şeklinde oluşmuş ve su ile oksijenin malzemeye sızmasına izin veren porlar içermektedir. Düşük su çimento oranı ve gerekli takviyelerin sonucunda porlar azaltılmalı ve küçültülmeli ve bunun sonucunda da beton geçirgenliği düşürülmelidir [40].

Buna ek olarak su, oksijen ve klor iyonlarının betona sızıntısının yavaşlatılmasının yanında geçirgenliğin düşmesi elektriksel iletkenliğin düşmesini sağlamaktadır. Çünkü nem ile beton içerisine daha az klor iyonu taşınmaktadır [40].

4.4.1 Pas Payı

Korozyon için gerekli unsurlar (rutubet, oksijen, karbondioksit, klor) pas payı beton tabakasını geçerek donatıya ulaştığından bu geçişi önlemenin birinci yolu pas payı betonunu; yoğun, boşluksuz, geçirimsiz kılmaktır [30].

İyi yapı dizaynı, servis ortamı ve maliyet limitleri dahilinde donatının örtü kalınlığı mümkün olduğunca yüksek tutulmalıdır. Klor iyonlarının çimento hamuruna girişi ile fiziksel adsorbsiyon ve kimyasal bağlanma gerçekleştiğinden beton örtü kalınlığının klor konsantrasyonu üzerindeki etkisi lineer değildir. Beton örtü kalınlığının etkinliği çatlak olmayışına, poroziteye, betonun difüzyon hızına bağlıdır. Difüzyon hızı düşük su-çimento oranı kullanılarak ve silis dumanı gibi puzolanlar ilave edilerek azaltılabilir [40].

ACI 318 şartnameleri hava ortamına maruz kalan yapılarda minimum örtü kalınlığını 38 mm olarak belirleyerek 50 mm örtü kalınlığının ise tercih edilmesi gerektiğini bildirir [40].

1998 AASHTO LRFD köprü şartnameleri direkt deniz ortamına maruz kalan beton için minimum beton örtü kalınlığının 100 mm olması gerektiğini, sahil şeridindeki betonlarda 75 mm ve tuza maruz kalan betonlarda da 65 mm olması gerektiğini belirtir. Şartname epoksi kaplamalı donatılı betonarmede minimum örtü kalınlığının 40 mm ye indirilmesine izin verir [40].

4.4.2 Düşük Su/Çimento Oranı

Düşük su çimento oranı beton geçirgenliğini düşürür ve betonun dayanımını artırır. Bu, hem beton içerisine nüfuz edebilecek su, oksijen ve klor iyonlarının sınırlanması ve hem de betonda çatlaklara sebep olan stres kaynaklı korozyonun başlaması için geçecek zamanı uzatarak servis ömrünü uzatacaktır [40].

Çalışmalar geleneksel su çimento oranı karışımının 0,30-0,32 arasında kullanılmasıyla üretilen betonun esasen geçirimsiz olduğunu göstermiştir [40].

ACI 318 şartnamesi kimyasallara maruz kalan betonarme donatının korozyondan korunması için maksimum su çimento oranını 0,40 ile sınırlamaktadır. Hatta düşük su çimento oranı ile birlikte uygun takviye de, düşük geçirimli beton sağlamak için önemlidir [40].

4.4.3 Mineral Katkılar

Betonda puzolanların kullanılmasının avantajı sert karışımların işlenebilirliğini artırması, daha düşük hidratasyon ısısı, geçirimliliği düzenlemesi, sertleştirilmiş betonun dayanıklılığını arttırmasıdır. Puzolanlar betonda kullanıldığı zaman dayanım oranı başlangıçta azalır fakat zaman içerisinde dayanım artar.

Çimento katkı malzemeleri, yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı beton karışım dizaynında tamamlayıcı bir rol almaktadırlar. Yaygın olarak kullanılan çimento katkı malzemelerinden bazıları uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü ve metakaolindir. Metakaolin, kaolinitin kalsinasyonu ile elde edilir. Harç ve betonda çok yaygın bir şekilde kullanılmakta olan puzolanik bir malzemedir ve çimento ile harcın mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin arttırılmasında önemli bir etki

sağlamaktadır. Siddique ve Klaus yaptıkları çalışmada, harç ve betondaki çimentonun yerine kısmen metakaolin kullanılarak yapılan çalışmalara genel olarak değinmişlerdir. Gözden geçirilen literatür metakaolinin etkin bir puzolan olduğunu açıkça sergilemektedir. Metakaolin çimento hamuru, harç ve betonda uzun dönemde dayanım özelliklerinin arttırılmasına destek olduğu kadar erken dönemde de dayanımın arttırılmasına yardımcı olur. Metakaolinin çimento yerine kısmen kullanımı suyun kapiler hareketle beton içine nüfuziyetini azaltmaktadır. Çimento yerine metakaolinin kısmen katkısı çimento hamuru içinde por çözeltisinin hidrate malzeme fazının içinde kimyasal kompozisyonda önemli değişiklikler yapar. Metakaolin çimento, harç ve betonun por yapısını değiştirerek, matrisin bozulmasına sebep olan zararlı iyonların ve suyun difüzyonuna direnç göstererek geçirimsizliği önemli bir şekilde azaltır. Metakaolinin betona sülfat atak direncinin geliştirilmesinde etkinlik gösterdiği, sülfat direncinin metakaolin miktarının arttırılması ile arttığı ve %10 ile %15 çimento yerine metakaolin kullanımı ile mükemmel sülfat dayanımı görüldüğü bildirilmiştir [72].

Horsakulthai ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, şeker kamışı sapı küspesi, pirinç kabuğu ve odun külü (BRWA) içeren betonun basma dayanımını, klor geçirim direncini ve korozyonunu test etmişlerdir. Su-bağlayıcı oranı 0,45-0,60 olan normal dayanımlı beton kullanmışlardır. Bağlayıcı ağırlığının %10, %20 oranında şeker kamışı sapı küspesi, pirinç kabuğu ve odun külünü portland çimentosunun yerine kullanmışlardır. Su-bağlayıcı oranı 0, 60 olan beton ağırlıkça %40'lık şeker kamışı sapı küspesi, pirinç kabuğu ve odun külü katkısı yapılarak da test edilmiştir. Betonun klor geçirim direnci, kararsız durumdaki klor difüzyon katsayısının hızlandırılmış tuz havuzu kullanılarak ölçülmesi ile değerlendirilmiştir. Bulunan sonuçların doğrulanması ve korozyon karakteristiğinin, ilk çatlak zamanının ve donatının ağırlık kaybının araştırılması için etkin voltaj yöntemi (ACTIV) ile hızlandırılmış korozyon testi de uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda, en yüksek basma dayanımını 7-180 gün yaş aralığındaki %20 BRWA'lı betonda bulmuşlardır. Hızlandırılmış tuz testi sonuçları da iyi bir uyum içinde bulunmuştur ve etkin akım voltajlı hızlandırılmış korozyon test sonuçları ile de uyumludur. BRWA katkısının artışı klor geçirimsizliğini azalttığını tespit etmişlerdir. Kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığı zaman %10 ve %20 BRWA içerikli betonda difüzyon katsayısının %30-40 ve %65-70 oranında azaldığını belirlemişlerdir. Etkin akım voltajlı hızlandırılmış korozyon test sonuçlarının da betonda BRWA oranı

arttıkça ilk akım ve donatı ağırlık kaybının azaldığını ve ilk çatlak başlama süresinin uzadığını gösterdiğini bildirmişlerdir [73]

Din H. Seleem ve arkadaşlarının yaptığı çalışmanın amacı; metakaolin, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanının çimentoya ikili ve üçlü kombinasyonlar halinde katılması ile elde edilen betonun deniz suyu direncini araştırmaktır. Üç puzolanın herbiri çimentoya ağırlıkça %20 oranında katılarak kullanılmıştır. Farklı karışımların geçirgenliği ölçülmüştür. 3-6-12 ay suni deniz suyuna maruziyetten sonra dayanım-bozulma oranları belirlenmiştir. Test edilen numunelerin yüzeyindeki ve çekirdekindeki klor iyon konsantrasyonları 6 ve 12 aylık maruziyetten sonra belirlenmiştir. 12 aylık maruziyet sonrası ve öncesinde test edilen tüm numune karışımlarının yüzeylerindeki ve çekirdeklerindeki minerolojik kompozisyonları X-ray (XRD) difraksiyonu ile araştırılmıştır. Sonuçların, çimento-silis dumanı ikili kombinasyonlarının deniz suyu ataklarına karşı dirençte en etkili puzolan olduğunu kanıtladığını bildirmişlerdir. Çimento-silis dumanı-kaolin üçlü kombinasyonlarının ikinci sırada yer aldığını bildirmişlerdir. Çimento-silis dumanı-yüksek fırın cürufu üçlü kombinasyonlarının üçüncü sırada yer aldığını belirtmişlerdir. Çimento-metakaolin ikili kombinasyonlarının dördüncü sırada yer aldığını belirtmişlerdir. Çimento-yüksek fırın cürufu ikili kombinasyonlarının beşinci sırada yer aldığını belirtmişlerdir. Çimento-metakaolin-yüksek fırın cürufu üçlü kombinasyonlarının altıncı sırada yer aldığını bildirmişlerdir. Saf çimentonun ise en son sırada yer aldığını belirtmişlerdir [74].

Ahmadi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, bir çeşit puzolanik malzeme olan doğal zeolitin betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerini arttırmadaki etkinliği değerlendirilmiştir. Deneysel testler üç kısmı içermektedir. Birinci kısımda, doğal zeolitin ve silis dumanının reaktivitesi termogravimetrik bir metod ile değerlendirilmiştir. Sonuçların doğal zeolitin silis dumanı kadar reaktif olmadığını fakat iyi bir puzolanik reaktiviteye sahip olduğunu gösterdiğini bildirmişlerdir. İkinci kısımda zeolit ve silis dumanı beton karışımı içinde çimento ile farklı oranlarda yer değiştirmiştir ve betona birkaç tane dayanım ve fiziksel test uygulanmıştır. Doğal zeolit çimento ile ağırlıkça %5-10-15-20 oranında ve silis dumanı 5-10-12,5 oranında yer değiştirmiştir. Bu deneysel testler çökme, basma dayanımı, su emme, oksijen geçirimsizliği, klor difüzyonu ve beton elektriksel direncidir. Test sonuçlarına göre farklı oranlarda zeolit içeren betonların performansının iyileştiğini ve hatta silis dumanlı

betonların durumuna benzer ve bazı durumlarda daha bile iyi bulunduğunu bildirmişlerdir [75].

Chindaprasirt ve Rukzon'un yaptıkları çalışmada; geleneksel portland çimentosu (OPC), öğütülmüş pirinç kabuğu külü (RHA) ve sınıflandırılmış uçucu külün (ince uçucu kül, FA) üçlü karışımı ile yapılan harcın korozyon direnci, porozitesi ve dayanımı incelenmiştir. Basma dayanımı, porozite ve hızlandırılmış korozyon etkin voltaj (ACTIV) ile test edilmiştir. Sonuçlara göre geleneksel portland çimento-öğütülmüş pirinç kabuğu külü-sınıflandırılmış uçucu külün üçlü karışımı ile üretilen harcın dayanımında, düşük oranlı öğütülmüş pirinç kabuğu külü-sınıflandırılmış uçucu külün ilavesinde bile, artış görüldüğü bildirilmiştir. Düşük puzolan katkı oranlarında (%20 ye kadar) harcın porozitesinde azalma görülmüştür fakat %40 oranlarında porozitenin arttığı bildirilmiştir. Harcın, etkin voltaj (ACTIV) ile ölçülen, klorid kaynaklı korozyon direncinde, puzolanların tekli kullanımı ile ve geleneksel portland çimento- öğütülmüş pirinç kabuğu külü- sınıflandırılmış uçucu külün üçlü karışım sisteminin her ikisinde de önemli ilerlemeler görülmüştür. Öğütülmüş pirinç kabuğu külü (RHA), sınıflandırılmış uçucu külden (FA) korozyon direnci konusunda biraz daha etkin bulunmuştur. Korozyon direnci üçlü karışımda puzolanların tekli kullanımı ile hazırlanan harca göre daha yüksek bulunmuştur. Üçlü karışımın kullanımının klor kaynaklı korozyon direncinin arttırılmasında çok etkili olduğu bildirilmiştir [76].

Parande ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, metakaolinin %5-20 aralığında geleneksel portland çimentosu yerine kullanımının mekanik özellikler ve karbon donatı çeliği davranışı üzerine etkileri araştırılmıştır. Basma dayanımı, öz direnç, açık devre potansiyeli, su emme, ağırlık kaybı, ultra titreşim hızı üzerine çalışılmıştır. Sonuç olarak metakaolinin %15 oranına kadar geleneksel portland çimentosu yerine kullanımı ile mekanik özelliklerin geliştirildiği tespit edilmiştir. Donatı çeliğinin korozyon davranışının %15 oranına kadar metakaolin katılımı ile iyileşme geösterdiği bildirilmiştir. Basma dayanımının %15 oranına kadar metakaolin katılımında yükseldiği fazla katıldığında ise düşme gösterdiği bildirilmiştir. %15'e kadar metakaolin katılımında korozyon hızının azalma gösterdiği bildirilmiştir. %15'den fazla metakaolin katılımında korozyon hızının hafifçe daha yüksek değerler aldığı bildirilmiştir [77].

Boddy ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, yüksek reaktiviteli metakaolin içeren betonun klor nüfuziyet direnci ile ilgili uzun dönemli araştırma sonuçları sunulmuştur. Çalışmalarında, değerlendirilen kaolin'i yüksek puzolanik aktivite sağlanması için

kontrollü şartlar altında ısıtılma tabii tutmuşlardır. Kaolin'i kütlece %0-%8-%12 oranlarında portland çimentosu yerine kullanılarak ve su-çimento oranını 0,30-0,40 olacak şekilde ayarlayarak altı beton karışımı dökmüşlerdir. Erken yaştaki test sonuçları özetlenmiştir ve bunlar dayanım, 28.-90. günlerde difüzyon, hızlı klor nüfuziyeti ve direnç testlerini içermektedir. Tüm süreçte su-çimento oranının azalması ve kaolin miktarının artması ile dayanımın ve direncin arttığını ve difüzyon, geçirimsizlik ve iletkenliğin azaldığını bildirmişlerdir [78].

4.4.3.1 Silis Dumanı

Silis dumanı; silisyum metalinden ya da ferro silisyum alaşımından elde edilen bir yan üründür [12] Çoğu silis dumanı en az %85 amorf silisyum dioksitten oluşur. Silis dumanı toz, yoğunlaştırılmış toz ve sıvı bulamaç olarak mevcuttur [40] Silis dumanı ince camsı kürelerden oluşmakta olup özgül yüzey alanı 20.025 m²/kg'dır. Portland çimentosunun özgül yüzey alanı 300-400 m²/kg'dır [12].

Silis dumanı yüksek silis içeriğinden ve ince partikül boyutu (0,1 mikron) ve geniş yüzey alanı dolayısı ile yüksek etkinlikte bir puzolandır. Silis dumanı betona katıldığı zaman malzemenin daha güçlü ve daha az geçirimli olmasını sağlayan fazla kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat bağı oluşturur. Küçük silis dumanı partikülleri bunların çimento hamurundaki ve çimento ile agrega arasındaki boşlukları doldurmasına olanak sağlar. Sonuç olarak silis dumanı ile üretilen beton daha az boşluk dolayısı ile daha az geçirimsizliğe sahiptir [40].

Amerika'da ilk silis dumanlı beton, çimentonun kütlece %15'ini silis dumanı oluşturacak şekilde yapılmıştır fakat silis dumanının yüksek yüzde oranına bağlı olarak beton pahalıya gelmiştir, karıştırılması ve son hale getirilerek tamamlanması oldukça zorlaşmıştır. Daha sonraki çalışmalar köprülerde optimal silis dumanı yüzdesini %6-8 arası olarak belirlemiştir [40]. Luther'e göre betonda silis dumanı kullanılmasının dört sebebi vardır. Çeliği klor iyonlarının girişinden koruması, yüksek son dayanım, aşınma ve yıpranma dayanımı amacıyla yapışma ve bağlanma dayanımının artırılması içindir [40]. Silis dumanlı betonlar eğer doğru kürlenmezse priz öncesi çatlamaya duyarlıdır. Doğru kürlenme beton yüzeyinin çok hızlı bir şekilde kurumasını engellemektedir. Pratikte silis dumanı içeren betonun saha yerinde dökümünde su-çimento oranı genellikle 0,40-0,45 aralığında kullanılır [40].

Laboratuvar çalışmaları klor iyonları geçirgenliğinin uygun şekilde azaltılması için çimentonun ağırlıkça en az %5 silis dumanı içermesi ile başarılabilceğini göstermiştir. Geçirgenliğin azaltılması su-çimento oranının düşürülmesi ya da silis dumanı oranının artırılması vs. ile de desteklenebilir. Saha uygulamalarında dış çevreye ve kullanılan kimyasalların miktarına bağlı olarak silis dumanı yüzdesinin %5'ten daha yüksek olmasına gerek duyulur [40].

Dotto, Abreu, Dal Molin ve Müller ortak çalışmalarında, silis dumanı katkılı betonarme numuneler üreterek silis dumanı katkısının, numunelerdeki donatının korozyon direncini geliştirmedeki etkisini değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında farklı oranlarda silis dumanı katkılarının (%0, %6 ve %12) basma dayanımı, porozite, elektriksel direnç üzerine etkilerinin belirlenmesi deneysel olarak planlanmıştır. Farklı su-bağlayıcı oranlı çimento ve silis dumanlı betonlar (0,50, 0,65 ve 0,80) kullanılmıştır. Elde ettikleri veriler %6 silis dumanı katkısının betonun elektriksel direncini 2,5 kez ve %12 silis dumanı katkısının 5 kez arttırdığını göstermiştir. Genel sonuç olarak, silis dumanı katkısı ile beton özelliklerinde önemli iyileşmeler olduğu görülmüş olup, silis dumanı katkısının kötü çevre koşullarında kullanılması önerilmektedir [79].

Türkmen ve Gavgalı yaptıkları çalışmada, betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek ve betona gömülü donatının korozyon direncini arttırmak için farklı oranlarda silis dumanı ve yüksek fırın cürufunu portland çimentosu yerine kullanmışlardır. Donatısız beton numunelerde işlenebilirliği, kuru birim ağırlığı, basma dayanımını, kılcallık katsayısını belirlemişlerdir. Korozyon akım yoğunlukları 28.-75.-150.-250. günlerde lineer polarizasyon tekniği ile ölçülmüştür. Sonuçta, %10 silis dumanı ve %20 yüksek fırın cürufu içeren numunelerde en yüksek basma dayanımını ve en düşük kılcallık katsayısını tespit etmişlerdir. %10 silis dumanlı ve %40 yüksek fırın cürufu ve 0,35 su/bağlayıcı oranlı beton numunelerde en düşük korozyon akım yoğunluğunu tespit etmişlerdir. Buradan mineral katkıların basınç dayanımını, kılcallık katsayısını ve korozyon akım yoğunluğunu iyileştirici etki yaptığı sonucuna ulaşmışlardır [80].

Civjan ve arkadaşları, kalsiyum nitrit, silis dumanı, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve DSS' nin betondaki donatının korozyonunu azaltmadaki etkinliğini belirlemek için uzun dönemli çalışma yapmışlardır. Karışım oranları, bu katkıların tekli, ikili ve üçlü kombinasyonlarını içermektedir. Çatlaksız ve ön çatlaklı numuneler gözle kontroller, makro hücre okumaları, yarı hücre potansiyelleri ve otopsiler ile

değerlendirilmiştir. Kalsiyum nitrit, silis dumanı ile ya uçucu kül ya da yüksek fırın curufunun üçlü kombinasyonlarının yanı sıra kalsiyum nitrit ve granüle yüksek fırın curufunun ikili kombinasyonlarının çok iyi performans gösterdiği bildirilerek ve çoğu korozif çevrede beton katkıları olarak kullanımları tavsiye edilmiştir [81].

4.4.3.2 Yüksek Fırın Curufu

Yüksek fırın cürufu demir çelik endüstrisinin bir yan ürünüdür. Kireç, silis, alümin, magnezyum oksit, alkali oksitler ve demir oksitlerden meydana gelir. Kompozisyonu endüstriyel prosese ve kullanılan hammaddeye bağlıdır fakat çimento olarak kullanmak için en az %40 kireç içermelidir. Çimento olarak etkin olabilmesi için hızla soğutulmalıdır çünkü fiziksel yapısı soğutma hızına bağlıdır. Curuf kalsiyum hidroksit, kalsiyum sülfat gibi ilave bileşenlerle aktive edilmedikçe hidratlaşmayacaktır. ASTM C 595 IS tip çimentoda %25-65 oranında curufun portland çimentosu ile karıştırılmasına izin verir. Çalışmalar yüksek fırın cürufunun betonun geçirgenliğini düşürebildiğini göstermiştir [40].

Binici ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, granüle yüksek fırın cürufu (GBS) ve öğütülmüş bazaltik pomzayı (GBP) ayrı ayrı ve birlikte içeren betonun, deniz suyu direncini değerlendirmek amaçlanmıştır. Yaptıkları çalışmada ince agrega ile yer değiştirecek GBS ve GBP seviyesi araştırılmıştır. Yaptıkları çalışmada test için dört numune grubu hazırlanmıştır. İlk grup R ile isimlendirilen ve hiçbir katkı içermeyen referans gruptur. Kalan 3 grup farklı miktarlarda GBS ve GBP içermektedir. Aynı ağırlıkta GBS ve GBP ince agrega (kum) ile yer değiştirilmiştir. İnce agrega ile yer değiştirilme oranları 40, 60 ve 80 dir. Bunlar CSP40 (%20 GBS+%20 GBP), CSP60 (%30 GBS+%30 GBP), CSP80 (%40 GBS+%40 GBP), CP40 (%40 GBP), CP60 (%60GBP), CP80 (%80 GBP), CS40 (%40GBS), CS60 (%60 GBS) ve CS80 (%80 GBS) olarak dizayn edilmişlerdir. 3 yıl boyunca deniz suyu etkisine maruz bırakılan beton numunelerdeki mekanik özelliklerin değişimini değerlendirmek için 150 mm'lik kübik numuneler üzerinde basma dayanımları ölçülmüştür. Deniz suyu atağı altındaki numunelerin mikro yapılarını değerlendirmek için diferansiyel taramalı kalorimetre kullanılmıştır. Harca batırılmış çelik donatıların ağırlık kayıpları 1.-2.-3. yılın sonunda direkt ölçülerek maruziyetin etkileri belirlenmiştir. Betonun aşınması da numunelerin kütle kayıplarına göre belirlenmiştir. Araştırma sonuçları, GBS ve GBP katkılarının deniz suyu zararlı etkisine bağlı olarak oluşan basma dayanımı kayıpları ve aşınma

değerleri üzerinde olumlu etkisinin olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, beton dayanıklılığının katkı miktar ve tipine bağlı olduğu yönünde bakış açısı oluşturmuştur. Ayrıca CSP 80 (%40 GBS+%40 GBP içeren) numunesinin referans betondan daha yüksek deniz suyu atak direncine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu iyileşmenin numunelerin geçirimsizliğinin kısmen azalması ile ve katkıların deniz suyu direnci ile açıklanabileceği belirtilmiştir. Ek olarak referans numunede bulunan korozyon yüzdesi diğer tüm numunelerin korozyon yüzdesinden fazla bulunmuştur. CSP betonun kısa ve uzun dönemde deniz suyunda mükemmel basma dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. CSP betonda referans betona göre klor seviyesinin önemli bir biçimde azaldığı ve bu azalmanın GBS+GBP içeriği arttıkça daha fazlaştığı tespit edilmiştir [82].

4.4.3.3 Uçucu Kül

Uçucu kül yanan kömür tozunun yan ürünüdür. Esasen reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)'den oluşmuştur. Geri kalan kısım demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer oksitlerdir. Reaktif SiO_2 miktarı kütlece %25'den az olmamalıdır. Uçucu kül çok iyi bir puzolandır çünkü çoktan incecik bölünmüş ve pek çok doğal puzolanlardan farklı olarak genellikle küçücük küreler şeklindedir ve bu da gerekli su miktarını arttırmadan betonun işlenebilirliğini arttırabilir. Popüler olmasının diğer bir nedeni de kolayca elde edilebilir olmasıdır [40]. Uçucu küller, taze betonda su kusmayı azaltmakta, betonun hidratasyon ısını azaltarak sıcak havalarda kütle betonu dökümüne olanak sağlamaktadır. Puzolanik reaksiyon sonucunda betonun dayanımını arttırmakta, betonun geçirimsizliğini azaltmakta ve betonun iç ve dış kaynaklı yıpratıcı etkilere dayanıklılığını arttırmaktadır [9].

Uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri incelendiğinde, bunların inşaat sektöründe rahatlıkla kullanılabileceği söylenebilir ve dolayısıyla bir yandan malzeme ve enerji üretiminde ekonomi sağlanırken diğer taraftan çevre kirliliğinin önlenmesi ile ekolojik dengenin korunması da sağlanmış olur. Uçucu külün beton içindeki performansını etkileyen en önemli özeliği inceliğidir. Uçucu küllü betonların dayanım, aşınma direnci, donma çözülme dayanıklılığı gibi özelliklerin kullanılan uçucu külün inceliğinin bir fonksiyonu olduğu anlaşılmıştır. Uçucu kül tane boyutu aralığının 1 mikronun altından, 150 mikronun üstüne çıkabildiği kabul edilmektedir [9].

Swamy ve Laiw'in yaptıkları çalışmada uçucu kül, silis dumanı ve garanüle yüksek fırın cürufu içeren betonun klorid direnci karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir.

Karışımlar çimento yerine kütlece %65 curuf, %30 uçucu kül, %10 silis dumanı kullanılarak dizayn edilmiştir. Tüm karışımlarda su/çimento oranı 0,60 olarak ayarlanmıştır. Her karışım için geniş beton plakaların ölçüleri 1000X500X150 mm ve yüksek çekme dayanımlı çelik takviye kullanılmıştır. Su çimento oranı klora maruz kalan beton için tavsiye edilen değerden daha yüksektir fakat yüksek su çimento oranında ve hatta kötü saha koşullarına uyarlama yapılarak puzolanların maksimum faydasından yararlanılmıştır.

Uçucu kül ve yüksek fırın curufu karışımının işlenebilirlik ve kayganlığını arttırdığı görülmüşken silis dumanı portland çimentolu betonla karşılaştırıldığı zaman %70 oranında kayganlığı azalttığı tespit edilmiştir. Numuneler 7 günlük çevrimler boyunca %4 sodyum klorid içeren çözeltide tutulmuş sonra 3 gün kurutulmuştur. Klor içerikleri 5-25, 25-45, 45-65, 65-85, 85-105 mm derinliklerde 10,20 ve 50 maruziyet çevrimi sonucu ölçülmüştür. Aşağıdaki tablo (4.1) ölçülmüş klor konsantrasyonlarını çimento ağırlığı yüzdesi olarak verir. Korozyon eşik değeri çimentonun ağırlıkça hemen hemen %0,20 sidir (yaklaşık her m³ betonda 0,75 kg kloriddir).

Çizelge 4.1 Elli Çevrimlik maruziyet sonrası numunelerdeki klor konsantrasyonları (çimento ağırlığının yüzdesi) [40].

Karışım	Klor Konsantrasyonu Yüzeyde derinlik (mm)				
	5-25	25-45	45-65	65-85	85-105
Kontrol	4,52	2,32	1,39	0,87	0,47
Cüruf (%65)	2,58	1,05	0,59	0,21	0,08
Uçucu Kül(%30)	5,02	1,41	0,81	0,32	0,17
Silis Dumanı(%10)	2,05	0,20	0,10	0,00	0,00

Derinliklerdeki klor iyon konsantrasyonu, silis dumanı içeren test edilen karışımda en düşük, bunu takiben sırası ile cürufllu karışım, uçucu küllü karışım ve kontrol numunelerinde oran artarak bulunmuştur [40].

Maslehuddin ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, geleneksel portland çimentolu ve silis dumanı ve uçucu kül katkılı çimento içeren elektrik ark fırın tozu ile hazırlanan beton numunelerin mekanik özelliklerini ve dayanıklılık karakteristiklerini değerlendirmişlerdir. Beton numuneler elektrik ark fırını tozlu ve tozsuz olarak hazırlanmışlardır. Silis dumanı içeren çimentolu betonda silis dumanı toplam çimento malzemesinin %8'ini oluştururken uçucu küllü betonda uçucu kül toplam çimento malzemesinin %30'unu oluşturmuştur. Elektrik ark fırın tozu geleneksel portland çimentolu betonda çimentonun %2'si oranında ve katkılı çimentolu betonda toplam çimento içeriğinin %2'si oranında katılmıştır. Basma dayanımı, kuruma esnasında çekme, başlangıç ve bitiş ayar süresi, çökme gibi mekanik özellikler belirlenmiştir. Su emme, klor geçirimi ve donatı korozyonunun ölçümü ile dayanım karakteristikleri değerlendirilmiştir. Başlangıç ve bitiş ayar süresinin ve çökme değerinin elektrik ark fırın tozunun geleneksel portland çimentolu ve silis dumanı ve uçucu kül katkılı çimento içeren numune gruplarına katılma miktarının artmasıyla birlikte arttığı tespit edilmiştir. Kuruma esnasında çekme elektrik ark fırın tozunun katıldığı numunelerde katılmadığı numunelere göre daha fazla olarak bulunmuştur. Geleneksel portland çimentolu betona katılan elektrik ark fırın tozu ile numune dayanımı açısından kazanç sağlanırken katkılı çimentolu betonda kazanç sağlanamamıştır. Bununla birlikte elektrik ark fırın tozu katılan katkılı çimentolu beton numuneler ile elektrik ark fırın tozu

katılmayan ilgili numuneler arasında önemli bir dayanım farkı tespit edilmemiştir. Klor geçiriminin ve su emmenin elektrik ark fırın tozu katılımına bağlı olarak hem geleneksel portland çimentolu hem de katkılı çimentolu beton numunelerde azaldığı tespit edilmiştir. Korozyon direncinin hem geleneksel portland çimentolu hem de katkılı çimentolu beton numunelerde elektrik ark fırın tozu katılımına bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir [83].

Hyun Ha ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, uçucu külün harç ve beton içindeki çeliğin korozyon performansına etkileri üzerine çalışılmış ve sodyum klorid çözeltisi içerisinde bazı hızlandırılmış kısa dönem teknikleri değerlendirilmiştir. Açık devre potansiyeli ölçümleri ve anodik polarizasyon çalışmaları gibi elektrokimyasal teknikler gerçekleştirilmiştir. Daha iyi korozyon direnç özelliklerinin sağlanabilmesi için optimum uçucu kül seviyesinin anlaşılabilmesi için etkin voltaj tekniği ve makro hücre korozyon çalışması da gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, geleneksel gravimetrik ağırlık kaybı ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Alkalinite ve serbest klor içeriği değerlendirilmiştir. Geleneksel portland çimentosu ile uçucu külün %10 -20 -30-40 oranında yer değiştirmesi sağlanmıştır ve sonuçlar sade geleneksel portland çimentolu betonla karşılaştırılmıştır. Yapılan araştırmanın sonucunda mineral katkı ilavesinin betonun pH değerini düşürmesine rağmen en son değerlerin çelik üzerindeki pasif filmin kırılacağı kritik pH değerinin hala üzerinde olduğu görülmüştür. %30 oranına kadar uçucu kül ilavesinin betondaki çeliğin korozyon direnç özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir. Uçucu külün betonun geçirim karakteristiğini iyileştirmekte ve korozyon başlama zamanını geciktirmekte, korozyon hızını azaltmakta olduğu tespit edilmiştir. Makro hücre korozyon çalışmaları, uçucu külün betonda daha iyi performans sağladığını ve betonda uçucu kül kullanıldığı zaman klor bağlama kapasitesinin arttırıldığını göstermiştir [84].

Chindaprasirt ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, öğütülmüş hurma yağı yakıt külü (POA), öğütülmüş pirinç kabuğu külü (RHA) ve ince uçucu kül (FA) içeren portland çimento harcı karışımının klor geçirim direnci incelenmiştir. Geleneksel portland çimentosu (OPC), puzolanlar ile çimentolu malzemelerin ağırlığına %20 ve %40 dozajlarında yer değiştirilmiştir. Su-çimento oranı 0,5 olarak sabitlenmiş ve harcın akıcılığı süper plastikleştirici yardımı ile 110 +/- %5 olarak sağlanmıştır. Harcın %3'lük NaCl çözeltisine daldırılmasından 30 gün sonra basma dayanımı, hızlı klor nüfuziyet testi (RCPT), hızlı göç testi ve klor nüfuziyet derinliği belirlenmiştir. Test sonuçlarının,

POA, RHA ve FA'nın OPC'nin yerine kısmi olarak kullanılmasının, harcın klor nüfuziyet direncini oldukça geliştirdiğini, açıkça ortaya koyduğu belirtilmiştir. Kullanım oranının artması ile direncinde arttığı bildirilmiştir. Öğütülmüş pirinç kabuğu külü en etkili puzolan olarak bulunmuştur bunu öğütülmüş hurma yağı yakıt külü ve ince uçucu kül takip etmektedir. Öğütülmüş hurma yağı yakıt külü ve öğütülmüş pirinç kabuğu külü katkısının, harç akışkanlığının muhafazası için gerekli olan süper plastikleştirici miktarını arttırdığı ve uçucu kül kullanımının SP miktarını azalttığı belirlenmiştir. Eşit ağırlık oranlarında kullanılan POA ve FA veya, RHA ve FA harmanı ile üretilen karışımların kullanımında iyi dayanım ve klor nüfuziyet direnci elde edildiği bildirilmiştir. Bunların, ayrıca normal geleneksel portland çimentolu harçla karşılaştırıldığında, daha az SP gerektirdiği belirlenmiştir [85].

4.5 Katodik Koruma Teorisi ve Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma

4.5.1 Katodik Koruma Teorisi

Korozyon bir elektrokimyasal olay olduğu için etrafta elektron alışverişi olur. Doğada bulunan elementlerin birbirlerine göre kimyasal olarak zayıf ve kuvvetli olanları vardır. Kuvvetli olan elementler zayıf olanlardan elektron koparırlar ve böylece zayıf olan elementleri korozyona uğratırlar. Zayıf olan elementleri korozyondan korumak için kuvvetli olan elementlere dışarıdan elektron verilerek bu denge sağlanır veya elektron alış verişinin olduğu ortam ile yapı arasında polarizasyon sağlanarak bağlantısı kesilir. Bu olaya katodik koruma denilir. Katodik korumanın temeli korunacak metali bir pilin katodu haline getirmektir [6].

Bu korunacak metali daha aktif bir metal ile (galvanik anot veya kurban anot) eşleyerek sağlanacağı gibi dıştan akım uygulayarak da gerçekleştirilebilir [10].

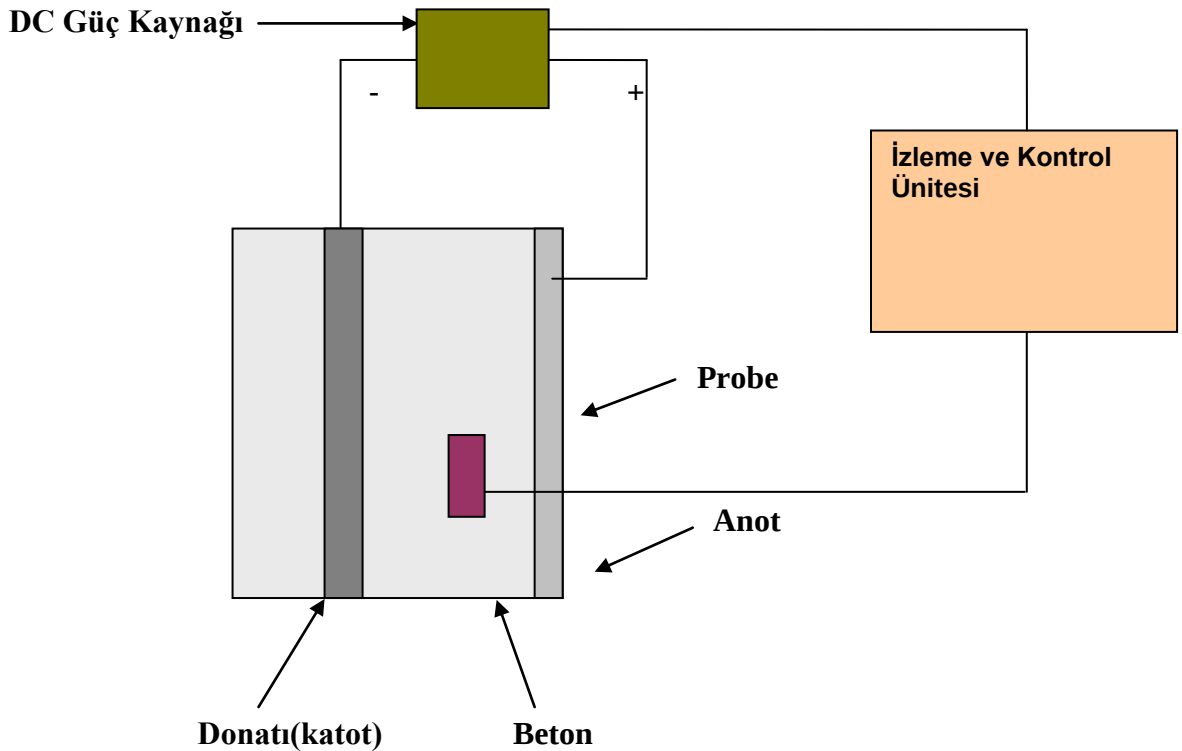
Günümüzde betonarme demirleri vb. birçok metalik yapı katodik olarak korunmaktadır [6]. Katodik koruma zemin, su ve deniz suyu gibi değiştirilmesi veya saldırganlığı sınırlama yönünde işlemlere genellikle olanak bulunamayan ortamlarda, geniş yüzeyli çelik yapıları (su veya zemine gömülü köprü ayakları vs.) korozyona karşı korumak için rakipsiz yöntemdir [10].

Katodik korumanın başarılı olabilmesi için onarım malzemeleri yapıdaki betona benzer elektriksel dirence sahip olmalı, akım yapıda üniform olarak dağıtılmalı, sistem düzenli

olarak izlenmeli ve polarizasyonun istenilen aralıkta gerçekleşmesinin sağlanması için denetlenmelidir [40].

Betonarme donatının katodik koruma sisteminin bir numaralı ana bileşenleri, korunacak donatı, bir anot, bir güç kaynağı, çeliğin etrafını kuşatacak beton, bir izleme sistemi, sistem gücünü ve izleme sinyallerini taşıyacak kablolamadır [40]. Her katodik koruma sistemi iki tip anot içerir. Birinci anot veya “anot kondüktör” temas noktası ve ikinci anot için güç sağlama hattı olarak davranır. İkinci anot genellikle “anot” olarak anılır ve akımı yapının yüzeyi üzerinde dağıtan bir malzemedir. Genel olarak, mevcut yapılar için, betonun bozulan yüzeyi onarılır, anot yeni yüzeyin üzerine yerleştirilir [40].

Güç kaynağının pozitif ucu anoda bağlanır ve negatif ucu katod olan donatıya bağlanır. Elektrolit sayesinde, anottan donatıya akımın akışına neden olan ve donatıyı katot haline getiren, küçük bir miktar doğru akım uygulanır. Genellikle elektrolit, akımın anottan donatıya transferine izin veren alkalileri içeren beton içerisindeki gözenek suyudur. Aşağıdaki şekil tipik katodik koruma sisteminin temel kuruluşunu göstermektedir. Katodik koruma sisteminin çalışabilmesi için betonda oksijen ve nem mevcut olmalıdır. Anot donatıyı koruyucu olarak hareket ederken bozulmaya karşı dirençli olarak dizayn edilmelidir [40].



Şekil 4.1 Tipik Katodik Koruma Sistem Tertibatı [40].

Koruma uygulanacak yapıya gereken akım veya potansiyel farkının miktarına karar verilmesi ve uygun DC çıkış voltajında, anodun akımı yapı içerisinde üniform olarak sağlayabileceğinden emin olmak önemlidir [40].

Problar, referans hücreleri ve kontrolörler gibi ölçüm ve kontrol cihazları katodik koruma sistemlerinin izlenmesi ve kontrolünde kullanılmaktadır. Beton içerisine çelik numuneleri problar olarak gömülebilmektedir. Katodik koruma sistemi tarafından sağlanan korozyon potansiyeli ve akım için problar izlenir ve sistemin işleyip işlemediğini bildirebilir fakat etkinliği konusunda sınırlandırılmış bilgi sağlar. Katodik koruma sisteminde kullanılan ortak kriter olan depolarizasyonları belirlemek için bir referans elektrodu gerekmektedir [40].

Katodik korumanın amacı genel olarak donatıyı -850 mV 'den (CSE) $[-770\text{ mV(SCE)}]$ daha negatif bir potansiyele polarize etmektir. Yapı içerisinde örneğin nem, klor içeriği, geometri gibi önemli değişimler var ise birbirinden ayrı alanlar ayrı katodik koruma bölgeleri ile korunmalıdır. Katodik koruma sistemleri, yapının çevresine ve anodun akım gerekliliğine bağlı olarak genelde $50\text{-}500\text{ m}^2$ lik bölgeler içerisinde uygulanır. Mesela deniz yapılarında genel olarak birkaç farklı bölge vardır. Örneğin su altı, düşük ve yüksek su seviyeleri arası, su sıçrayabilen bölgeler ve suyun ulaşamayacağı bölgelerdir [40].

Aşağıdaki tablo çeşitli malzeme ve çevresel şartlar için katodik koruma makul akım yoğunluğu gereksinimlerini listelemektedir [40].

Çizelge 4.2 Çeşitli Çelik Ortamları için Pratik Katodik Koruma Akım Yoğunluk Gereklilikleri [40].

Çelik Donatıyı Saran Çevre	Donatının m ² sinin başına akım yoğunluğu (mA)
Alkalın, korozyon oluşmamış, düşük oksijen tedariki	0,1
Alkalın, korozyon oluşmamış, korumasız yapı	0,3
Alkalın, klor mevcut, kuru, iyi kalitede beton, yüksek beton örtüsü, donatıda hafif korozyon gözlenmiş	3-7
Klor mevcut, ıslak, zayıf kalitede beton, orta-düşük beton örtüsü, yaygın çukurcuk ve genel korozyon mevcut donatı	8-20
Yüksek klor seviyesi, ıslak dalgalı ortam, yüksek oksijen seviyesi, sıcak, çelikte şiddetli korozyon, düşük beton örtüsü	30-50

4.5.2 Minimum Potansiyel Yaklaşımı

Katodik koruma, akımı kullanarak donatının potansiyelini negatif yönde değiştirmek için çalışır. Eğer potansiyel yeterli olarak değiştirilirse tüm çelik donatılar katodik olur ve korozyon durdurulur. Standart koruma kriteri genel olarak çeliği -850 mV'den (CSE) daha negatif bir potansiyele polarize etmektir [40].

4.5.3 Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma (Etkin Akım)

Atmosfere maruz betonda dış akımla katodik koruma genel olarak kurban anotla katodik korumaya göre daha uygundur. Dış akım sisteminde güç, bir trafo doğrultucudan düşük voltaj (<24 V) ve düşük akım (<10 A) ile gelir [40].

Doğrultucu sayesinde beton içine gelen akım burada por çözeltisi vasıtasıyla iyonik transfer olur. Malzemenin kompozisyonu, şekli, tipi, anotların uyumunun tamamı katodik korumanın performansında ana öneme sahiptir. Dış akım sisteminde kullanılan pek çok anot vardır [40].

Anotla katot arasındaki potansiyel farkı doğrultucu tarafından yapılan ilave bir enerji aktivitesi vasıtasıyla anotlar tarafından meydana getirilir [8].

Dış akım sisteminde DC güç kaynağı yapının dışındadır ve jeneratörlerden veya elektrik sistemlerinden elde edilir. Sistemlerin bazıları güneş veya rüzgar enerjisi ile çalışırlar [40].

Dış akımlı katodik koruma sisteminde, ya oksijenin serbest bırakılışını (a) veya klor gelişimini (b) içeren kimyasal reaksiyonlar anoda komşu olarak oluşur. İyi dizayn edilmiş sistemlerde oksijen gelişimi en yaygın reaksiyondur [40].



Anodik reaksiyon sırasında oluşan H^+ iyonları betonun pH'ını düşürür ve asit oluşumuna yol açabilir. Anot malzemesine ve yüzey alanına bağlı olarak anotlar için maksimum akım yoğunluğu çıkış gücü asit oluşumunu minimize etmek için sınırlandırılmıştır [40].

Bu yöntem akım gereksiniminin yüksek olduğu yerlerin korozyona karşı korunmasında öncelikle kullanılır [10].

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi, galvanik anotlu katodik koruma sisteminden daha güçlüdür ve potansiyel ayarlaması mümkündür [6].

Kok külü kaplamalı anot sistemleri, oluklu (delikli) anot sistemleri, iletken polimer anot sistemleri, ızgara (kafes) anotlar dış akımlı katodik koruma sisteminde kullanılır [40].

Kok külü kaplamalı anot sistemlerinde, birincil anotlar 32 mm kalınlığında 254 mm çapında merkezleri arası 3,6 m aralıklı demir alaşımlı disk dizilerinden oluşur. Diskler betona hızlı sertleşen epoksi yapışkanlarla birleştirilmiş ve bir doğrultucuya bir kablo ile bağlanmıştır. Kok külü asfalt karışımından oluşan ikincil anot sistemi akım akışını yükseltmek ve anotların servis ömrünü arttırmak için anotların üzerindeki 50 mm tabakanın içine yerleştirilir. 50 mm' lik kalın geleneksel agregalı asfalt örtü kok külü asfalt tabakasının üzerine yerleştirilmiştir. Kok külü iyi bir elektriksel iletken olmakla beraber zayıf yapılıdır [40].

Oluklu(yarıklı) anot sistemleri 1970 li yıllarda geliştirilmiş olup yarıkların içerisine yerleştirilen yakın aralıklı platin kaplı tellerden ve bunları örten iletken dolgu malzemesinden oluşmuştur. Tellerin çekirdeği farklı malzemelerden yapılmış olup genellikle 0,78-1,6 mm çaplı ve 0,06-0,13 mm kalınlıkta platin tabakası ile

kaplanmıştır. Yarıklar 305 mm den fazla aralıklı değildir. Anot tellere örtü olarak bir polimer harç dolgu malzemesi yerini almıştır. Yarıklı anot sistemleri kaplamalı anot sistemlerine göre avantajlıdır çünkü kuruluşu kolaydır, kalın bir kaplama tabakası gerektirmemektedir ve yapıdaki gereksiz yükleri azaltır [40].

İletken polimer anot sistemi de platinli niobyum-bakır tellerin oluklu anot sistemindeki gibi kafes paternli yerleştirilmesi ve iletken polimer beton ile örtülmesidir. Örtü genelde 33 mm genişlikte ve 12,5 mm yükseklikte [40].

Izgara (kafes) anotların ilk ticari olanı Raychem Farex 100 anodu 8 mm çaplı anot bir kablo oluşturmak için bakır tellerin esnek, elektriksel iletken bir polimer ile sarılması ile oluşturulmuştur. Bu kablolar bir panelin içerisine dokunmuştur. Köprü üzerinde sabitlenmiş ve üzeri rijit bir örtü ile örtülmüştür. Fakat uygulama esnasında anodun betona bağlanmaması, bakır telin asit ataklarına duyarlı olması, bakır telin bazı ortamlarda aşınması gibi sorunlarla karşılaşmış ve ürün 1990 ların başından itibaren üretilmemiştir [40].

Titanyum ağ anotlarının donatılı betondan çok daha fazla akım çıkışı gerektiren ortamlarda başarılı şekilde kullanılması dolayısı ile donatılı betonda uzun servis ömrüne sahip olması beklenir. Anotlar yüksek anot beton alanı oranına sahiptir. Böylece akımı yapı üzerinde daha üniform dağıtabilirler. Bunlarda Farexte olduğu gibi bağlanmama problemine sahiptirler fakat bu problemler bu anotların daha ince olmasına bağlı olarak daha az olur. Rijit örtülerle kullanıldıklarında diğer anotlara göre donatılı betonda daha iyi performans sergilerler [40].

4.5.4 Galvanik Anotlu Katodik Koruma

Galvanik anod sisteminde gerekli katodik koruma aktif olan bir metali korozyona uğratarak sağlanır. Bu sistem korozyon hücresi potansiyelindeki farklılıklara göre çalışır. Örneğin demirin Bakır/bakır sulfat referans elektroduna göre arasındaki potansiyel farkı -0,4 ve 0,6 dir. Çinkonun bakır/bakır sulfat referans elektroduna göre potansiyel farkı -1,1 Volt dur. Eğer bu iki metal elektriksel olarak birbirleriyle bağlanırsa demir ve çinko arasında 0,5-0,7 volt potansiyel farkı olacak ve çinko anod olarak çalışarak korozyona uğrayacak ve aynı zamanda koruma akımı sağlayan bir akım kaynağı olacak ve demiri katod haline geçirerek demirin korozyona uğraması önlenecektir [8].

Alüminyum, magnezyum, çinko gibi metaller çelikte karşılaştırıldığında anodiktir. Bu metallerin elektrik potansiyeli herhangi bir dış kaynaktan yardım alınmadan katodik koruma akımı sağlanarak çeliği galvanik olarak korumalarına izin verir. Kullanım voltajı, koruma akım miktarı galvanik anotlardan sağlandığı için metalin potansiyeli içerisinde sınırlandırılmıştır [40].

Mesela termal püskürtülmüş çinko denizdeki betonun suyun sıçradığı yada gelgit olan bölgelerini galvanik olarak koruyabilirdi fakat anot yeterli koruma akımını sağlayabilmek için periyodik olarak ıslak olmalıdır. Kurban anotlarla ilgili problem koruma akımlarının zamanla azalmasıdır sonunda pasif duruma gelirler buna bağlantılı olarak pek çok sistemin kullanım ömrü kısadır. Kurban anotlu katodik koruma sisteminin su altı yapılarda kullanımı genel olarak kısıtlanmıştır fakat son dönemlerde atmosfere maruz köprülerde kullanımına başlanmıştır. Etkin akımlı katodik koruma sisteminde çıkış gücünün kontrol edilebilmesi gerçekten bir avantajdır fakat etkin akım sistemi bazen yapıyı aşırı koruyabilir buda anot ömrünün azalmasına ve hidrojen gevrekliğine neden olur. Pek çok elektriksel parça izleme ve bakım gerektiren etkin akım sistemine karşı galvanik anotlu katodik koruma sistemi dış güç kaynağı gerektirmemektedir [40].

1996 yılında FHWA tarafından yapılan çalışmada, çinko hidrojel anot sistemi çinkonun iyi akım verimliliğine ve buna bağlı olarak pahalı olmamasından dolayı çinko anotları denenmiştir. Yaptıkları çalışmada çinko hidrojel, anot sistemleri için en uygun bulunmuştur. Alüminyum ve alüminyum alaşımları için yapılan denemede bunlar kararsız davranmış ve hidrojel yapışkanlarla yeterli çalışma potansiyeli gösteremediklerinden uygun bulunmamışlardır. Saha testlerinde üç yapıda, iletken yapışkan ile çinko anodun en iyi kombinasyonu kurulmuştur. Burada 10-20 mm kalınlıkta çinko levhalar kullanılmıştır. Hidrojel olarak özel bir formülasyon kullanılmıştır. Çinko hidrojel anodu beton yüzeyinde 300 m² lik bir alan üzerine yerleştirilmiştir. Operasyonun ilk 20 ayında sistem 100 mV katodik koruma polarizasyon gereksinimini karşılamıştır fakat dokuzuncu ve yirminci aylar arasında sistem polarizasyonu 120 mV'den 108 mV'ye azaldığı görülmüştür [40].

Missouri taşıma departmanı Kasım 1999'da Franklin ilçesinde iki köprü ayağı ve rıhtımına betonun 200 m² lik alanı üzerine 3M çinko hidrojel anotlarını kurmuştur. Şubat 2000'de her bölgede oluşturulmuş akım 0,1 A olarak ölçülmüştür. Bu değer, iyi kalitede, kuru ve klor bulaşmış beton için tavsiye edilen ve donatının hafif korozyon

işaretleri gösterdiği değer aralığı içerisinde yer alan beton yüzeyinde 3,5 mA/m² akım yoğunluğuna karşılık gelir [40].

Çinko hidrojel anot sistemlerinin saha çalışmalarında, sistemlerin kuruluşunun kolay, uzmanlık gerektirmemesi, üç yıldan fazla beton ile iyi bağlanma ve uyum görülmüştür. Çalışan sistemlerde yapışkanın su ile direk temasının önlenmesi gerekir [40].

1997 yılında FHWA tarafından yapılan çalışmada, geleneksel metalizasyon, alev veya ark sprey ile uygulanabilen kurban anotların bulunması üzerine yoğunlaşmıştır. Saf çinko, saf alüminyum, çinko-alüminyum ve magnezyumun kombinasyonlarını içeren on beş farklı tipte ticari anodik malzeme anot kapasitesi, verimliliği, periyodik polarizasyon, atmosferik korozyon karakteristikleri, sıcaklık ve neme hassasiyet ve pH'nın performans üzerine etkileri için test edilmiştir. Test edilen tüm anotlar sıcaklık ve nemin artışına bağlı olarak daha fazla akım sağlamışlardır. Test edilen kurban anotların tümü yüksek sıcaklıklarda (>32⁰C) ve yüksek nem (>%90) içeriğinde yeterli akımı sağlamışlardır. Bununla beraber çinko alaşımları ve pek çok alüminyum alaşımı düşük sıcaklık ve düşük nem şartlarındaki donatıyı korumak için yeterli akımı üretememiştir. Ortamın pH'ı düşürüldüğü zaman özellikle pH değeri 12'nin altında iken tüm anotlar düşük akım çıkışı ve potansiyel göstermiştir. Sıcaklık ve nem ve pH'ın düşmesine bağlı olarak akım çıkışı ve potansiyeldeki azalma alüminyum-çinko alaşımlarında en az bulunmuştur. Çalışmanın en son bölümünde bu tip sistemler için yeni bir alaşım geliştirilmesi amaçlanmıştır çünkü orijinal malzemelerin hiçbirinin özellikle düşük pH ortamında donatılı betonda kurban anot olarak kabul edilebilir özelliklere sahip olmadığı düşünülmüştür. Yeni anot malzemelerinde en iyi performans alüminyum-çinko-indiyum alaşımı tarafından sağlanmıştır. Bu alaşım tüm ortamlarda statik (sabit) potansiyelini korumuştur ve test edilen tüm alaşımlar içinde en düşük anot polarizasyonunu göstermiştir. Düşük anot polarizasyonu istenmesinin nedeni yüksek polarizasyon anodik reaksiyon esnasında yüksek hızla anot çözünmesini ifade eder. Bu sistemin saha denemeleri Florida, Pennsylvania ve Virginia' da yapılmıştır [40].

FHWA tarafından yapılan Florida saha çalışmalarında, karşılaştırma yapmak amacıyla alüminyum-çinko-indiyum sprey anot ile saf geleneksel çinko sprey anot yapılmıştır. Her iki anotta 300 mikron kalınlıkta uygulanmıştır. Sistem iki yıl boyunca incelenmiş ve sonra numuneler değerlendirme için alınmıştır. Saha denemelerinde alüminyum-çinko-indiyum anottan çıkan akım diğer anoda göre yüksek ve donatıyı korumak için gereken değer üzerinde bulunmuştur. Sıcaklık, rutubet ve betonun nem içeriğindeki

değişimler her iki anodunda çıkış akımında değişikliğe sebep olmuştur. Alüminyum-çinko-indiyum alaşımlı anottaki daha yüksek akım çıkışı polarizasyonun daha yüksek olmasına sebep olmuştur. İki yıllık periyodun tamamı boyunca 100 mV'luk kriter aşılmıştır. Çinko anodu gereken 100 mV polarizasyonu sağlayamamıştır. Her iki anotta betonla iyi bağlanmış ve 300 mikronluk kalınlıkta uygulandıklarında 15 yılın üzerinde servis ömrüne sahip olmaları beklenir [40].

4.6 Beton Örtüleri

Son araştırmalar, yararlı derecede nem azaltmanın (bağıl nemi düşürmenin) suyun sıvı halde içeri geçişini engelleyen fakat buharın kaçışına izin veren kaplamalarla veya yüzey işlemleri ile başarılabilirdiğini göstermektedir. Sonuç olarak direncin artması ile korozyon kabul edilebilir seviyede kontrol edilebilmektedir [7].

4.6.1 Latex Modifiyeli Beton Örtüsü

Latex modifiyeli beton örtüsü geleneksel portland çimentosuna genellikle stiren-butadien lateksi gibi bir polimerik emülsiyonun takviye edilmesi ile oluşur. Polimer ek bağlayıcı özellikler sağlarken emülsiyondaki su çimentoyu hidrate eder. Bunun sonucunda düşük su/çimento oranlı, yüksek dayanımlı, bağlanma özelliği iyi olan, klor iyonlarını düşük geçiren bir beton elde edilir [40].

Yüksek maliyeti ve iyi performansı nedeni ile latex modifiyeli beton örtü tipik olarak 40-55 mm kalınlığındadır ve diğer pek çok örtüden incedir [40].

Su geçirmez olmasına rağmen, latex modifiyeli betonun geçirimsizliği geleneksel betonun yaklaşık %12 si kadardır [40].

Virginia'da 16 yıl içerisinde yapılan testlerde Latex modifiyeli beton örtü geleneksel ve düşük slump yoğunluklu örtüden kalıcı bir şekilde üstün bulunmuştur. Korozyonu tamamen durduramalarına rağmen servis ömrünü uzatmışlardır. Latex modifiyeli beton örtünün 25 yıla kadar kullanılabileceği beklenir daha çoğunlukla sonra genel yıpranma dolayısı ile değiştirilmesi gerekir [40].

4.6.2 Düşük Akma Yoğunluklu Beton Örtüsü

Yoğun beton örtü kavramı, temel olarak karışımın çimento içeriğinin 470 kg/m^3 'e artırılması ve su/çimento oranının 0,30-0,32'ye düşürülmesi ile betonun doğal kılcal

boşluk sisteminin düşürülmesidir. Bu yöntem geçirgenliğin düşürülmesi ve dayanımın artırılmasını sağlar. Yoğun beton örtüsünün işlevi klor iyonları ve nemin içeri nüfuziyetini engellemektir. Düşük akma yoğunluklu beton örtünün ana problemleri yerleştirilmesinin zor olması, pahalılığı ve yüzey çatlama sorunlarıdır. Ayrıca kayma direnci de latex modifiyeli beton örtüsünden daha düşüktür. Bazı inşa problemlerinin süperplastikler denilen su azaltıcı katkılarla üstesinden gelinebilir. Amerikada bazı uygulamalarda çelik donatı üzerine 50 mm kalınlıkta örtü olarak kullanılmıştır [40].

4.6.3 Silis Dumanlı Beton Örtüsü

Çalışmalar tuzlu suya maruz kalan betonda silis dumanlı beton örtüsünün klor iyonlarının betona girişini azaltabildiğini göstermiştir [40].

4.6.4 Polimer Beton Örtüsü

Polimer beton, yapısındaki (içindeki) portland çimentosunun polimerle değiştirildiği betondur. Çünkü bunlar hemen hemen tamamıyla su geçirmezdirler ve yapıları su ve klor iyonları girişine karşı korurlar. Genellikle kalınlıkları 12 mm'den azdır ve sürtünme özelliklerinin iyileştirilmesi için ince taneli agrega veya kum ile kullanılırlar. Tamir amacı ile kullanımda kısa hazırlanma süresi ve çabuk sertleşmesi dolayısı ile daha büyük boyutlu agrega ile kullanılırlar [40].

4.7 Betonun Kılıf (membran) İçerisine Alınması

Betonun kılıf içerisine alınması da korozyondan korunması amacı ile uygulanan bir yöntemdir [40].

Betonun dış yüzüne geçirimsizliği sağlamak için uygulanan izolasyonun çatlamadan, bozulmadan yıllar boyunca işlevini sürdürmesi kusursuz gerçekleştirilmesine bağlıdır [24].

Wheat'ın yaptığı çalışmada, beton gibi çimento esaslı malzemelerde çeliğin korozyon hızındaki değişime neden olan klor taşınımını sınırlandırmak için iki temel potansiyel metod incelenmiştir. Bunlar polimer fiberlerin betona karıştırma esnasında eklenmesini ve polimer reçine veya polimer kompozit kullanılarak önceden kirli olan betonu kılıflamayı içerir. Birinci metod klorun başlangıç serbest girişini minimize etmekte, ikinci metod eğer numune tuz ile kirlenmişse ilave klor serbest geçişini engellemektedir. Bu yöntemlerin korozyonu minimize etmekteki etkinliği polarizasyon

direnç (korozyon hızı ile ters orantılı) ölçümlemlerini kullanarak saptanan korozyon hız değışimleri esasına dayanarak değeriendirilmiştir ve yapılan çalışmalarda fibersiz numunelerde korozyon hızının biraz daha yüksek olmasından dolayı elverişsiz ortam maruziyet süresi ve çatlak olasılığı arttığında fiber katılımının faydalı olabileceğı sonucuna ulaşılmıştır [86].

Fedrizzi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, ağırlıkça %1 klor içeren ve su-çimento oranı 0,6 olan, geleneksel portland çimentosu ile üretilmiş beton numunelerdeki donatı korozyonuna karşı onarım harcı ve göç eden inhibitörlerin (MCIs) etkinlikleri değeriendirilmiştir. Geleneksel harç ve iki tamir harcına ilave edilen bir alkanolamin esaslı inhibitör test edilmiştir. Tamir harcı üzerine %3,5 luk NaCl çözeltisi uygulandıktan sonra numunelerin korozyon davranışına karar vermek için elektrokimyasal teknikler, korozyon potansiyeli ölçümü ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi kullanılmıştır. Onarım harcının toplam porozite karakteristiğini belirlemek için civa nüfuziyet porozimetresi kullanılmıştır ve harç tabakası içerisine nüfuz eden ve beton altına giren klor miktarının tespiti için bir kimyasal analiz yapılmıştır. Sonuçlar, iyi bir bariyer kaplama ile beraber eş zamanlı olarak alkanolamin esaslı inhibitörün kullanımı ile donatı korozyonuna karşı koruma sağlandığını ve bozulan beton yapıların eski haline iyileştirme yapılmasına izin verdiğini göstermiştir [87].

4.7.1 Sürölerek Sıcak Uygulanan Termoplastik Malzemeler (Sıcak bitüm)

Bu grupta ele alınan yalıtım malzemeleri çevrede doğal olarak bulunan bitümün yanısıra, taş kömürünün damıtılmasından elde edilen zift, petrolden elde edilen asfalt çimentosu (bitüm) ve belirli bir sıcaklığa kadar ısıtıldığında akışkan ve yapışkan özellikler gösteren termoplastik maddelerdir [88].

Bu gruptaki yalıtım malzemeleri örtü ya da pestil şeklinde olup, belli genişliklerde ve boylarda üretilmektedir. Bunlara örnek olarak polimer bitümlü örtüler verilebilir. Polimer bitümlü örtüler plastomerik ve elastomerik olarak iki gruba ayrılırlar [88].

Plastomerik bitümlü örtüler, inorganik taşıyıcılı, APP ve diğer termoplastiklerle modifiye edilmiş polimer bitüm kaplı, alt ve üst yüzü eriyebilen, şalımo alevi ile uygulamaya yönelik su geçirmez örtülerdir [88].

Elastomerik polimer bitümlü örtüler ise inorganik taşıyıcılı SBS ve diğer

termoplastiklerle modifiye edilmiş elastomerik polimer bitüm kaplı, alt ve üst yüzü eriyebilen film örtülü, şalümo alevi ile uygulamaya yönelik su geçirmez örtülerdir [19].

4.7.2 Soğuk Uygulanan Solüsyon ve Emülsiyonlar

Bu gruba giren malzemelerin genel özelliği bir çözücüde inceltilmiş solüsyon ya da suda dağıtılmış dispersiyon-emülsiyon halinde termoplastik nitelikte olmalarıdır. Bitüm emülsiyon ve solüsyonlarının yanısıra PVA emülsiyonlar ile akrilik emülsiyonlar en yaygın uygulanan türlerdir. Bunlar herhangi bir ısıtma işlemine gerek kalmadan ortam sıcaklığında uygulanırlar.

Su geçirmezlik sağlamaları, çözücü ya da taşıyıcı maddenin buharlaşması sonucu geride kalan yalıtıcı maddenin sürekli bir film tabakası oluşturmasıyla gerçekleşir [88].

4.7.2.1 İki Bileşenli Polimer Yalıtım Malzemeleri

Bu gruba giren ve termoset diye adlandırılan polimer yalıtım malzemeleri iki bileşenden oluşur. Birbirine karıştırılınca sıvı faz özelliğini bir süre devam ettiren ve sonra sertleşen yalıtım malzemeleridir. (örneğin, epoksi reçineleri). Bu iki bileşen birbiriyle belirtilen oranlarda karıştırılır. Karışım bu aşamada yapışkan ve akışkan bir sıvı faz özelliği gösterir. Sıvı fazı takip eden katılaşmanın ardından malzeme su ve buhar geçirimsiz hale gelir. Bu amaçla kullanılan iki bileşenli polimer türleri poliüretan, epoksi, polyester gibi polimerlerdir [88].

4.7.3 Polimer Örtüler

Su geçirimsizlik özelliğinin ve uygulama kolaylığının yanı sıra boyutsal kararlılığı, yaşlanmaya karşı direnci, ısı etkilerine direnci, mekanik mukavemeti gibi nedenlerde bu malzemeye geniş bir kullanım alanı sağlamıştır.

Bu yalıtım malzemeleri, plastik endüstrisindeki gelişmeye bağlı olarak gelişen plastik pestillerin derzlerinin yapıştırılarak veya sıcak mala ile kaynaklanarak tek parça halinde serilmesi ile uygulanırlar.

Polimer örtülerin en çok kullanılanları PVC (polivinilklorür), EPDM (etilen proplen dien terpolimer) ve Poli-izobütilendir.

Pestil olarak uygulanan plastik yalıtım malzemelerinin özellikleri şunlardır:

- Farklı boyutlarda bulunan plastik pestillerin kalınlıkları genel olarak 1,5-2 mm arasında değişir.
- Sıcaklık dayanımları yüksektir, sıfırın altındaki sıcaklıklarda bile iyi performans gösterirler.
- Ultraviyole ve ozondan etkilenmezler.
- Eskimez, çürümez, yüksek kimyasal dayanım gösterirler.
- Benzin, benzol, mazot, gibi maddelere karşı dayanıklı değildirler.
- Uygulamaları kolaydır ve uygulamada hava koşullarından etkilenmezler.
- Bu tür malzemelerle yapılan yalıtımlarda uygulama miktarı ve ustalık önemlidir.

Polimer örtülerin bazıları şu şekilde özetlenebilir:

PVC örtüler: Bu örtüler yumuşatılmış polivinilklorürden yapılır ve 1m eninde ve 10-25 m boyunda rulolar halinde bulunurlar. Kalınlıkları 0,5–0,8–1,0–2,0 mm arasındadır. Sıcaklık dayanımları yüksek olmakla birlikte uygulama limitleri -20°C ile +80°C arasındadır.

EPDM örtüler; Sentetik kauçuk olarak bilinen bu örtüler 1,7-15 m en ve 15-60 m boy ebatlarında bulunur. 1,15 mm kalınlığındaki EPDM 'nin ağırlığı metrekarede 1,40 kg'dır. Elastikiyeti %400'dür.

Poli-izobütülen örtüler: Bu tür malzemelerin kalınlıkları 1-1, 5-2 mm arasındadır. 1 m eninde 10-20 m boyunda bulunurlar. Uygulamadaki limitleri -30°C ile +70°C arasındadır [89].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMA

Korozyon, su ve oksijenin bulunduğu ortamda, metallerin çevreleri ile girdikleri bir elektrokimyasal reaksiyon sonucu bozunmaya uğrayarak niteliklerini kaybetmesidir.

Betonun alkali ortamında, çelik donatılar üzerinde oluşan pasif tabakanın çözünmesine yol açan klorür iyonlarının katalizör görevi yaparak, demirin hızla iyonlaşmasını sağladığı ve tehlikeli lokal hasarlara sebebiyet veren korozyon türü ise klorür korozyonu olarak adlandırılmaktadır.

Betonarme yapılarda kullanılan çelik donatılardaki korozyon gelişimi, yapılardan beklenen emniyet ve servis ömrü ile ilgili gereksinimleri büyük ölçüde etkilemektedir. Klorür etkileri gibi agresif şartlara maruz kalan betonarme elemanlar kısa sürede kullanım dışı kalabilmektedir. Betonarme sistemlerde çelik donatı korozyon sonucu kesit ve duktilite kaybına uğramaktadır. Oluşan reaksiyon ürünleri nedeniyle betonda meydana gelen genleşme etkisi önceleri pas payı tabakasının çatlamasına, ilerleyen aşamalarda ise tamamen dökülerek betonarme yapıların servis ömrünü tamamlayamadan kullanım dışı kalmasına sebep olmaktadır.

Zararlı dış ortam koşullarında korozyon gelişimini tamamen durdurmak mümkün olmasa da, başlangıç zamanını geciktirmek veya gelişim hızını yapının servis ömrü boyunca kabul edilebilir limitlerin altına düşürmek için bir çok yöntem denenebilir.

Korozyona karşı daha dayanımlı betonarme ürünler geliştirmek amacı ile yaptığımız çalışmada, beton harç karışımına silis dumanı, organik ve inorganik esaslı ticari karışım inhibitörü katılması, beton dış yüzeyine silan-siloksan bileşimli emülsiyonlar, özel amino alkol esaslı karışım inhibitörleri sürülmesi ve çelik donatıların sıcak daldırma çinko kaplama, epoksi reçine esaslı kaplama ve inhibitör içeren kaplamalarla kaplanması yöntemleri denenerek, kullanılan katkı malzemelerinin betonarme

numunelerde donatı korozyonunu engellemedeki etkinlikleri değerlendirilmiştir ve eski yapılardan çıkarılmış kısmen korozyonlu çelik donatılar kullanılarak betonarme numuneler üretilip bu numunelere dış akım kaynaklı ve galvanik anotlu katodik koruma prosesleri uygulanarak katodik koruma proseslerinin yapılardaki korozyonu engellemedeki etkinlikleri değerlendirilmiştir.

Ayrıca katkı malzemelerinden, beton harç karışımına katılanların, betonun basma dayanımlarına ve yarmada çekme dayanımlarına olan etkileri 28 günlük kür süresi sonunda değerlendirilmiştir. Bununla birlikte betonarme numunelerde çelik donatı yüzeyine yapılan kaplamaların, betonarme numunelerin aderans dayanımlarına olan etkileri 28 günlük kür sonunda ve 90 günlük hızlandırılmış korozyon deneyleri sonunda belirlenmiştir.

Katkı malzemelerinin etkinliklerini değerlendirmede kullanılan betonarme numuneler, beton içine çelik donatılar dikilerek silindir lolipop şeklinde 70x140 mm ölçülerinde dökülmüştür. Her bir korozyon önlem katkı malzemesi için toplam yedi farklı numune grubu ve bunlara ait kontrol numune grupları üretilmiştir. Farklı katkı malzemeleri ile üretilen numunelerden üçer tane üretilerek test sonuç değerlerinin ortalamaları alınmıştır.

Birinci grup numunelerde Tecno Silica ticari isimli silis dumanı, beton harç karışımına katılmıştır. İkinci grup numunelerde Sika Ferrogard-901 ticari isimli nitrojen içeren organik ve inorganik esaslı karışım inhibitörü beton harç karışımına katılmıştır.

Üçüncü grup numunelerde Sika Gard -703 W ticari isimli silan ve siloksan bileşimli emülsiyon betonun dış yüzeyine sürülmüştür. Dördüncü grup numunelerde Sika Ferro Gard -903 ticari isimli özel amino alkol esaslı organik ve inorganik karışım inhibitörü betonun dış yüzeyine sürülmüştür.

Beşinci grup numunelerde Tecno bond 650 ticari isimli epoksi reçine esaslı, iki bileşenli solventli epoksi kaplama malzemesi çelik donatının dış yüzeyine sürülmüştür. Altıncı grup numunelerde çelik donatılar sıcak daldırma galvaniz yöntemi ile çinko kaplanmıştır. Yedinci grup numunelerde Sika Monotop 610 ticari isimli çimento esaslı, silis dumanı ve korozyon inhibitörü içeren, polimer modifiyeli kaplama malzemesi çelik donatının dış yüzeyine sürülmüştür. Geri kalan gruplar ise önlemsiz yani katkı malzemesi içermeyen kontrol numuneleri olarak üretilmişlerdir.

Numuneler 50 gr Cl⁻/litre konsantrasyondaki tuzlu su çözeltisi içinde 3 ay süre ile bekletilerek hızlandırılmış korozyona uğratılmıştır. Üç ay süresince düzenli olarak yarı hücre potansiyel ölçümleri, korozyon akım yoğunluğu ölçümleri yapılmıştır. Korozyon akım yoğunluğu ölçümlerinde Gecor 8 cihazı kullanılmıştır. Üç aylık hızlandırılmış korozyona tabi tutulan lolipop numuneler deneyin sonunda kırılarak donatıları çıkarılmış ve yüzeyleri temizlendikten sonra Olympus optik mikroskopunda X 200 büyütmede mikro yapıları incelenmiştir.

Katodik koruma prosesleri için eski betonarme yapıları temsilen kullanılmış durumda olan Ø14'lük nervürlü donatı çelikleri kullanılarak 200x200x200 mm ölçülerinde küp şeklinde betonarme numuneler üretilmiştir.

Ayrıca bu çalışmanın sonunda, betonarme numunelerde kullanılan korozyon önleyici malzemelerin ve uygulanan katodik koruma proseslerinin ekonomik değerlendirmeleri yapılmıştır ve aynı sınıfa giren tüm korozyon önlem malzemelerinin ve korozyondan koruma proseslerinin kendi aralarında karşılaştırması yapılarak, eski ve yeni betonarme yapıları korozyondan koruyacak en uygun önlem malzemeleri ve prosesler tespit edilmiştir.

5.1 Kullanılan Malzemeler

5.1.1 Çimento

Deneysel Çalışmalarda Aslan Çimento Fabrikasının (OYAK A.Ş.) üretmiş olduğu TS EN 197-1 standartlı CEM I 42.5 R Portland Çimentosu kullanılmıştır.[90] Bu çimentoya ait fabrikadan elde edilen kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşim, %	Çimento Tipi
	CEM I 42. 5 R
S. CaO (%)	0,90
SO ₃ (%)	3,25
MgO (%)	1,53
Çöz. Kalıntı (%)	0,29
Klorür (%)	0,02
K ₂ O (%)	0,71
Na ₂ O (%)	0,12
Kızdırma Kaybı (%)	3,71
C3S (%)	64,33
C2S (%)	5,88
C3A (%)	8,50
Fiziksel Özellikler	
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,12
Blaine (cm ² /g)	3400,00
Priz Başı (dak)	185,00
Priz Başı (Sonu)	217,50
Su/Çimento (%)	29,75
Genleşme (mm)	0,50
Basınç Dayanımları, MPa	
Dayanım 2 Gün (Mpa)	28,23
Dayanım 7 Gün (Mpa)	47,67
Dayanım 28 Gün (Mpa)	60,47

5.1.2 Çelik Donatılar

Korozyon ölçümleri için kullanılacak olan TS 708'e uygun III-a B420, Ø10 nervürlü betonarme çeliği, EFESAN Demir Çelik AŞ. 'den temin edilmiştir.[91]

Bu çelik donatılara ait fabrikadan elde edilen kimyasal analiz sonuçları Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 Deneylerde kullanılan betonarme çeliğin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Element	C	Mn	Si	P	S	Mo	V	Cu	Ti	N	Fe
(%)	0,20	0,85	0,16	0,030	0,033	0,03	0,003	0,50	0,01	0,011	98,173
Akma Mukavemeti											
>420 Mpa											
Çekme Mukavemeti											
>550 Mpa											
Uzama (%)											
20,30											

Dış akım kaynaklı ve galvanik anotlu katodik koruma prosesleri için Ø14 nervürlü betonarme çeliği kullanılmıştır.

5.1.3 Sanayi Tuzu

Deneyisel çalışmalarda Kartal Birlik Tuz Ltd. Şti' nin üretmiş olduğu aşağıdaki fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip sanayi tuzu kullanılmıştır.

Çizelge 5.3 Sanayi tuzunun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Fiziksel ve Kimyasal Özellikler		
Sodyum Klorür (NaCl)	Min.	%98,4
Nem	Max.	%0,01
Sertlik (Kıvam)	Max.	20 AS
Ca	Max.	%0,2
Mg	Max.	%0,05
Asitte Çözünmeme	Max.	%0,1
Suda Çözünmeme	Max.	%0,2
Alkalileşmiş Suda Çözünürlük	Max.	%0,3
Sülfat (SO₄)	Max.	%0,2
pH	Max.	8,5-9
Demir	Max.	4-6 mg/kg
Tane Boyut Dağılımı		
0-3 mm		%95
4-5 mm		%5

5.1.4 Betonarme Numunelerde Kullanılan Katkı Malzemeleri

5.1.4. 1 Sika Ferro Gard 901

Nitrojen içeren organik ve inorganik esaslı bir karışım inhibitörüdür. Çelik yüzeyinde bir film oluşturarak korozyonun başlangıcını geciktirir ve korozyon hızını azaltır. Klor kaynaklı korozyona karşı koruyucu etki sağladığından ve korozyon başlangıcını geciktirerek korozyon hızını düşürdüğünden özellikle klorca zengin deniz yapılarında, köprülerde, beton yollarda, tünellerde, istinat duvarlarında, endüstriyel tesislerde, çok katlı otoparklarda kullanılabilir.

Sıvı beton harç katkısı olup 1 m³'lük beton harcına 12 kg Ferro Gard 901 katkı malzemesi katılmıştır.

5.1.4.2 Tekno Bond 650

Epoksi reçine esaslı, iki bileşenli, yüksek performanslı, pigment içerikli solventli epoksi kaplamadır. Yüksek mekanik dirence, ve aşınma direncine sahiptir. Donma çözünme olaylarına karşı dirençlidir. Sert ve camsı bir görünüme sahiptir. Su ve diğer sıvıları geçirmez niteliktedir.

Bu epoksi boya, çelik donatıların yüzeylerine sürülerek kaplanmıştır.

5.1.4.3 Sika Gard-703 W

Silan/siloksan birleşimli kaplamadır. Bu kaplama kuvvetli su itici özelliğe sahiptir. Dış cephelere su iticilik sağlaması, yapı malzemelerini ve elemanlarını yüzeyden akan sulara karşı koruması, olumsuz hava koşullarına karşı dayanıklı olması ve rüzgar kaynaklı yağmur sularına karşı yüksek direnci, buzlanmaya ve don tuzlarına karşı direnci ve dış cephelerin yüzey sularından oluşan zararlı etkilere karşı dayanımını arttırması sebebiyle her türlü beton, yığma yapılar, sıvalı yüzeyler, tuğla ve doğal taş gibi çeşitli yüzeyler üzerine uygulanabilir.

Betonarme numunelerin dış yüzeyine 200 gr/m² miktarında fırça ile sürülerek uygulanmıştır.

5.1.4.4 Sika Ferro Gard-903

Özel amino alkollerin, organik ve inorganik inhibitörlerin birleşimi ve karışımıdır. Şeffaf bir emprenye malzemedir. Uygulandığı yüzeyde betona nüfuz ederek donatının yüzeyine etki ederek, donatının korozyon başlangıcını ertelemekte ve korozyon hızını yavaşlatmaktadır. Buz çözücü tuzlar ve hava gibi korozif çevreye maruz olan betonarme yapılarda, köprülerde, karayollarında, bina cepheleri ve balkonlarda, denize yakın ortamlardaki betonarmelerde, otoparklarda, iskeleler ve beton rıhtım yapılarında, bina ve sistem yaklaşımının bir parçası olarak mühendislik yapılarında kullanılabilir.

Betonarme numunelerin dış yüzeyine 400 gr/m² miktarında fırça ile sürülerek uygulanmıştır.

5.1.4.5 Sika Mono Top-610

Çimento esaslı, silis dumanı ve korozyon inhibitörü içeren, polimer modifiye, tek bileşenli, kaplama malzemesidir. Su ve klorür penetrasyonuna dirençli olması ve çeliğe

iyi yapışma sağlaması sebebi ile özellikle deniz çevrelerinde bulunan binalarda, liman ve deniz yapılarında, betonarme köprülerde, demir ve çelik boruların etrafında, zemin altındaki ve üstündeki her türlü yapının su sızdırmasından kaynaklanan su ve rutubet penetrasyonunun olduğu bölgelerde kullanılabilir.

Çelik donatıların dış yüzeyine 2 kg/m² toz malzeme kullanılmıştır.

5.1.4.6 Tecno Silica

Silis dumanıdır. Silis dumanı katkısı betonarmenin gücünü arttırmakta, çok yüksek dayanım ve düşük geçirim sağlamakta, yüksek tokluk, yüksek elektriksel direnç ve basma dayanımı sağlamakta, aşınmaya, korozyona ve kimyasallara (klor, asit, sülfat, nitrat) karşı direncini arttırmakta ve kullanım ömrü süresince maliyet verimliliği sağlamaktadır. Klor ve suyun ve diğer kimyasalların geçirimliliğini düşürerek korozyona karşı direnç sağladığından karayolu köprülerinde, deniz yapılarında, iskelelerde, rıhtımlarda, köprü ayaklarında, tünellerde, garajlarda, yüksek katlı binalarda örn. gökdelenlerde, nükleer atık depolama tesislerinde, maden tesislerinde ve kulelerde ve su altındaki yapılarda kullanılabilir.

1 m³'lük beton harcına 15 kg Tecno Silica katılmıştır.

5.1.4.7 Sıcak Daldırma Galvaniz Kaplama

Çinko kaplamadır. Sıcak daldırma galvaniz kaplama genel olarak geçirimsiz olması çeliğe ve betona çok iyi yapışması, yüksek sertlik ve aşınma dayanımı, yüksek klor eşik seviyesi, korozyon oluşması durumunda kesinlikle çelikten kaplamanın ayrılmasından, betonda pas lekeleri çatlama ve parça kopmalara neden olan donatı korozyonu riskini önemli bir şekilde azaltması, kaplamada oluşabilecek olası bir bozulma veya bir çatlakta çeliğin korozyonunu önleyerek kendini feda etmesi, kullanım, yerleştirme, nakliye esnasında zarar görmemesi ve klor, sülfidler gibi agresif korozyon elementlerini önemli bir şekilde fazla içeren endüstriyel ve deniz lokasyonlarında yapıya yaklaşık 70- 100 yıl servis ömrü sağlaması ve dolayısı ile kullanım ömrü açısından ekonomikliği ve görsel açıdan estetikliği sebebi ile düşük ağırlıklı cephelerin kaplamalarında, mimari yapıların yüzlerinde, betonarme köprülerde, tünel duvarlarında, rıhtımlar, iskeleler ve deniz platformlarında, marinalarda, deniz surları ve kıyı korkuluklarında kolon-kiriş ve plakaların kötü ortama maruz yüzlerinde, yer altı suları etkilerine veya gelgit

dalgalanmalarına maruz kalan daldırılmış veya gömülmüş elemanlarda, sahil veya deniz yapılarında ve agresif çevre içerisindeki yüksek riskli yapılarda kullanılabilir.

Çelik donatılar çinko'ya daldırılarak 100 mikron kalınlıkta kaplama yapılmıştır.

5.1.5 Agregalar

Kullanılan agregalar, Gebze Taş Ocaklarından temin edilmiştir.

5.2 Beton Karışım Oranları

Çalışmada, kontrol (katkısız) numunelerine ait 1 m³'lük betonda kullanılan malzeme miktarları Çizelge 5.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 Kontrol Numuneleri Beton Karışım Oranları, kg/m³

1 Metreküplük Karışım	Reçete Değeri	Toleranslar +/- %3	
		MAX.	MİN.
Çimento Miktarı (CEM I 42.5 R)	300 Kg	309	291
Kırmataş No 1 (Yıkanmamış)	806 Kg	827	779
Kum (0-4 mm)	432 Kg	445	419
Taştozu (Yıkanmış)	525 Kg	541	509
Kullanılan Su	263 Kg	271	255
Toplam	2323 Kg	2392	2253

Çimento ağırlığınca %5'lik Tecno Silica silis dumanı içeren numunelere ait 1 m³'lük beton karışım reçetesi Çizelge 5.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 Silis Dumanı içeren Numunelerin Beton Karışım Oranları, kg/m³

1 Metreküplük Karışım	Reçete Değeri	Toleranslar +/- %3	
		MAX.	MİN.
Çimento Miktarı (CEM I 42. 5 R)	285 Kg	309	291
Kırmataş No 1 (Yıkanmamış)	806 Kg	827	779
Kum (0-4 mm)	432 Kg	445	419
Taştozu (Yıkanmış)	525 Kg	541	509
Kullanılan Su	263 Kg	271	255
Silis Dumanı Miktarı	15 Kg	-	-
Toplam	2323 Kg	2392	2253

Sika Ferro Gard 901 ticari isimli nitrojen içeren organik ve inorganik esaslı karışım inhibitörü katılmış numunelere ait 1 m³'lük beton karışım reçetesi Çizelge 5.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.6 Sika Ferro Gard 901 inhibitörü içeren Numunelerin Beton Karışım Oranları, kg/m³

1 Metreküplük Karışım	Reçete Değeri	Toleranslar +/- %3	
		MAX.	MİN.
Çimento Miktarı (CEM I 42. 5 R)	300 Kg	309	291
Kırmataş No 1 (Yıkanmamış)	806 Kg	827	779
Kum (0-4 mm)	432 Kg	445	419
Taştozu (Yıkanmış)	525 Kg	541	509
Kullanılan Su	263 Kg	271	255
Sika Ferro Gard 901	12 Kg	-	-
Toplam	2335 Kg	2392	2253

Betonarme numunelerde, korozyona etkilerini değerlendirmek amaçlı kullandığımız, diğer katkı malzemeleri beton harcı içine katılmadığı için onlara ait beton karışım reçeteleri olarak, kontrol numunelerinin reçeteleri geçerlidir.

5.3 Üretilen Numune Tipleri ve Kür Süresi

Üretmiş olduğumuz betonların basma ve yarmada çekme dayanımlarını belirlemek amacıyla 150x150x150 mm boyutlarında küp numuneler üretilmiştir.

Üretilen betonların korozyona karşı dayanıklılıklarını ve aderans gerilmelerini belirlemek amacıyla da içerisine Ø10'luk bir donatının 110 mm'lik bölümünün gömüldüğü lolipop şeklinde 70x140 mm boyutlarında silindirik numuneler üretilmiştir.

Betonun basma, yarmada çekme ve aderans dayanımlarının belirlenmesi amacıyla üretilen numunelere 23±2°C sıcaklığa sahip laboratuvar koşullarında 28 gün boyunca hava kürü uygulanmıştır. Korozyon deneyi için üretilen numunelere de 23±2°C sıcaklığa sahip laboratuvar koşullarında 28 gün boyunca hava kürü uygulanmıştır.



şekil 5.1 Küp ve Lollipop Silindirik Numunelere Ait Fotoğraf

Dış akım kaynaklı ve galvanik anotlu katodik koruma proseslerini uygulamak için 200x200x200 mm boyutlarında betonarme küp numuneler üretilmiştir.

5.4 Yapılan Deneyler

Yarı hücre potansiyel ölçümleri, korozyon hızı ölçümleri ve hızlandırılmış korozyon prosesi sonrasında aderans ölçümleri için, yedi farklı çeşit katkılı numunelerin her

birinden 3'er adet ve 3'er adette her bir katkılı numunenin müşaiti olmak üzere her korozyon önlem malzemesi için 6'şar adet numune dökülmüştür. Ayrıca 28 günlük kür süresinin sonunda aderans gerilmelerini ölçmek için katkı malzemeli yedi grup numunenin her birinden 3'er adet ve 3'er adette her bir katkılı numunenin müşaiti olmak üzere her korozyon önlem malzemesi için 6'şar adet numune dökülmüştür. Toplam lolipop şeklinde silindirik betonarme numunelerden 84 adet dökülmüştür.

Küp şeklinde ve 150x150x150 mm boyutlarında üretilen beton numunelere 28 gün hava kürü sonunda basınç dayanımı ve yarmada-çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır.

Üretmiş olduğumuz beton serilerinin korozyona karşı dayanıklılığını belirlemek amacıyla 70x140 mm boyutlarında silindirik lolipop şeklinde üretilen numunelerde hızlandırılmış korozyon deneyleri yapılmıştır.

Ayrıca hızlandırılmış korozyon deneylerinden sonra korozyon sonrası aderans kayıplarını belirlemek amacıyla lolipop numuneler üzerinde aderans deneyleri yapılmıştır. Hızlandırılmış korozyon deneyleri hem 28 günlük numunelerde hem de 28 günlük kür süresinden sonra 90 gün hızlandırılmış korozyon şartlarına maruz bırakılan numunelerde yapılmıştır. Silindirik betonarme lolipop numuneler 50 gr Cl⁻/litre konsantrasyonundaki NaCl çözeltisine kısmi olarak daldırılmıştır ve kür süresinin tamamlanmasından itibaren her hafta düzenli olarak yarı hücre potansiyel ölçümleri yapılmıştır ve kaydedilmiştir. Ayrıca korozyon hızını belirlemek için korozyon akım yoğunluğu ölçümleri her ay düzenli olarak yapılmıştır.

Betonun basınç dayanımını ve yarmada-çekme dayanımını belirlemek amacıyla yapılan deneyler ise sadece 28 günlük numunelerde yapılmıştır.

5.4.1 Yarı Hücre Potansiyel Ölçümü Deney Düzeneği

Silindirik betonarme lolipop numuneler 50 gr Cl⁻/litre konsantrasyonundaki NaCl çözeltisine kısmi olarak daldırılmıştır.



Şekil 5.2 Lolipop Silindirik Numunelerin NaCl Çözeltisindeki Görünüşü

Betonarme donatılarının potansiyeli ölçülerek, korozyonun varlığı hakkında fikir edinilebilir.

Beton içerisine dikilen donatı çubuğunun yarı hücre korozyon potansiyelinin incelenmesinde Şekil 5.3’de görülen hızlandırılmış korozyon deney düzeneğinden yararlanılmıştır.



Şekil 5.3 Yarı Hücre Potansiyel Ölçümü Deney Düzeneği

Yarı Hücre potansiyel ölçümü metodunda, yüksek empedanslı bir voltmetre ile donatı potansiyeli Cu/CuSO_4 (bakır/bakır sülfat) (CSE) referans elektroduna göre ölçülmüştür. Şekilde şematik olarak gösterilen düzenekteki gibi elektrot altında ıslak bir sünger olacak şekilde beton yüzeyine yerleştirilmiştir. Elektrotun diğer ucu açığa çıkartılan ve pastan temizlenen donatıya klamp ile tutturulmuştur. Beton içerisinde hareket eden iyonlarla devre tamamlanmış ve donatı çeliğinin elektro potansiyeli saptanmıştır. Ölçüm ve yorumlama ASTM C 876’da belirtilen kriterlere göre yapılmıştır ve değerlendirme kriterleri Çizelge 5.7’de gösterilmiştir. [92]

Çizelge 5.7 ASTM C 876'ya göre potansiyel kriterleri

Bakır/Bakır Sülfat (CSE)	Kalomel Elektrot (SCE)	Korozyon Riski
$E > -200 \text{ mV}$	$E > -126 \text{ mV}$	Korozyon olasılığı %10
$-200 \text{ mV} > E > -350 \text{ mV}$	$-126 \text{ mV} > E > -276 \text{ mV}$	Korozyon belirgin değil
$E < -350 \text{ mV}$	$E < -276 \text{ mV}$	Korozyon olasılığı %90
$E < -500 \text{ mV}$	$E < -426 \text{ mV}$	Şiddetli korozyon hakim

Cu/CuSO₄ referans elektroduna göre yarı hücre potansiyel ölçümü -200 mV'luk potansiyel değerinden daha pozitif ise çeliğin pasif durumda olduğunu göstermektedir. Çeliğin yarı hücre potansiyel ölçümü -350 mV'luk potansiyel değerinden daha negatif ise genellikle korozyonun başlamış olduğunu göstermektedir. Yarı hücre potansiyel ölçümü -200 mV ile -350 mV arasında ise korozyon durumu hakkında açık bir bilgi sağlamamaktadır.

Yorumlamada aşağıdaki hususların da göz önüne alınması uygun olur. Betona gömülü çeliğin yarı hücre potansiyel değerleri korozyonun olup olmadığını saptamak için yeterli gelmemektedir. Çünkü oksijen mevcudiyeti, beton direnci ve beton porozitesi, inhibitörlerin mevcudiyeti bu değerlere etki etmektedir.

5.4.2 Korozyon Hızı Ölçümleri Deney Düzeneği

Lineer polarizasyon yöntemi ile korozyon hızı ölçümü yapabilen GECOR 8 adındaki cihaz ile betona gömülü çelik donatıların korozyon hızları ($I_{kor} = \mu\text{A}/\text{cm}^2$) ölçülmüştür.

İlki çözelti havuzuna yerleştirmeden hemen önce olmak üzere numuneler üzerinde en az onbeş günde bir ölçümler alınmıştır. Alınan ölçümler neticesinde katkılı numunelerin ve kontrol numunelerinin korozyon hızı (I_{kor}), değerlerinin zamana bağlı değişim grafikleri çizilmiştir.

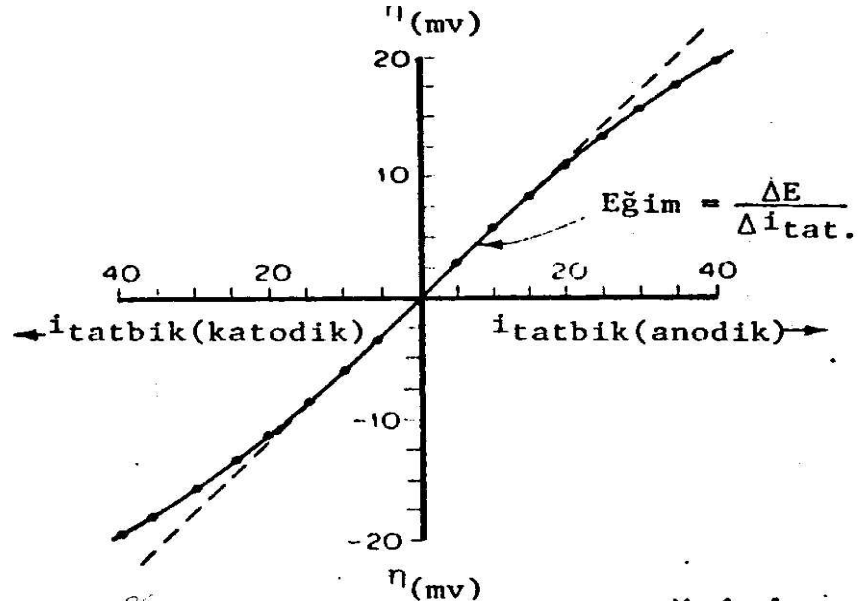
Beton içerisine dikilen donatı çeliklerinin korozyon hızlarının incelenmesinde Şekil 5.4'de görülen korozyon hızı ölçüm deney düzeneğinden yararlanılmıştır.



Şekil 5.4 Gecor 8 Korozyon Ölçüm Cihazı

Doğrusal akım kullanılarak uygulanan polarizasyon direnci tekniği, korozyon hızı ölçümlerinde en çok kullanılan yöntem olmuştur. Çünkü, korozyon potansiyeli civarında akım ile potansiyelin logaritmik ilişkisinin doğrusal davranışı sayesinde basit, hızlı ve hasarsız bir yöntem oluşturulmuştur.

Bir potansiyostat ve bazı yardımcı aletler gerektiren bu ölçüm yöntemi ASTM G59 (1991) standardında anlatılmıştır.[93] Polarizasyon direnci yönteminde, korozyon potansiyeli civarında polarizasyon oluşturacak (genellikle ± 10 mV'luk sınır içinde kalır) dış akımlar uygulanır ve çizilen polarizasyon eğrilerinin doğrusallığı incelenir, yani şekil 5.5'de gösterilen eğrinin doğrusal kısımlarının eğimi bulunmaya çalışılır.



Şekil 5.5 Lineer polarizasyon eğrisi (η: Potansiyel fark, i:Uygulanan akım)

Şekil 5.5’de görüldüğü gibi Ekor civarındaki birkaç mV’luk polarizasyon bölgesinde meydana gelen potansiyel fark ile tatbik edilen akım değerleri birbiriyle doğrusal olarak orantılıdır. Polarizasyon direnci değerine eşit olan bu doğrusal bölgenin eğimi korozyon hızı ile ters orantılıdır.

$$\Delta E / \Delta i \big|_{i=0} = R_p \text{ veya } I_{kor} = B / R_p \quad (5.1)$$

Burada i uygulanan akımı, I_{kor} korozyon hızını ($\mu A/cm^2$), R_p polarizasyon direncini ($ohm \cdot cm^2$) ve B de bir sabiti (yaklaşık 26 mV) gösterir.

LPR Ölçümlerine ilişkin yorumlama kriterleri Çizelge 5.8’de verilmiştir.

Çizelge 5.8 LPR Ölçümlerine İlişkin Yorumlama Kriterleri

Korozyon Akım Yoğunluğu	Korozyon Durumu
$I_{kor} < 0,1 \mu A/cm^2$	Pasif korozyon hali
$0,1 \mu A/cm^2 < I_{kor} < 0,5 \mu A/cm^2$	Hafif-orta arası korozyon
$0,5 \mu A/cm^2 < I_{kor} < 1,0 \mu A/cm^2$	Orta-yüksek arası korozyon
$I_{kor} > 1 \mu A/cm^2$	Yüksek korozyon hızı

5.4.3 Betonarmeye Gömülü Çelik Donatıların Mikro Yapı İncelemesi Deney Düzenneği

Tüm katkılı betonarme numunelerin ve kontrol numunelerinin 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartlarına maruz bırakıldıktan sonra mikro yapı incelemeleri için numuneler hazırlanmıştır. Çelik donatılar kesme sıvısı ile Şekil 5.8'deki gibi kesilmiştir. 180°C de Şekil 5.7'deki gibi bakalite alınmıştır ve sonra aşağıda belirtilen 1, 2, 3 ve 4 numaralı sıralama ile zımparalanmıştır ve Şekil 5.9'daki otomatik polisaj cihazı ile polisaj yapılmıştır. Bu işlemlerden sonra numunelere %3'lük nital ile dağlama yapılmıştır. Sadece birkaç numune ise hem dağlamalı hem de dağlama yapılmadan fotoğraflanmıştır ve incelenmiştir.

1. 125 mikron elmas diskle zımpara (SU) --- 300 dev/dk. 35 N yük 300 sn.
2. 75 mikron elmas diskle zımpara (SU) --- 300 dev/dk. 35 N yük 300 sn.
3. 15 mikron elmas diskle zımpara (SU) --- 300 dev/dk. 35 N yük 300 sn.
4. 3 mikron mono kristalin elmas süspansiyon ile polisaj ---- 200 dev/dk. 20 N yük 600 sn.

Bu işlemlerden geçirilen numuneler Şekil 5.6'daki Olympus optik mikroskobuyla X 200 büyütmede incelenmiştir ve fotoğraflanmıştır.



Şekil 5.6 Olympus Optik Mikroskobu



Şekil 5.7 Bakalite Alınmış Numuneler



Şekil 5.8 Kesilmiş Numuneler



Şekil 5.9 Otomatik Parlatma Cihazı

5.4.4 Aderans Ölçümü Deney Düzeneği

Aderans dayanımını belirlemek amacı ile Şekil 5.10'da görüldüğü gibi 70x140 mm boyutlu silindir numuneye, Ø10 nervürlü donatı 110 mm kenetlenme boyu (mm) ile numunenin içine yerleştirilmiştir. Üniversal çekme aleti kullanılarak donatının sıyrılma kuvveti (F, kgf) belirlenmiştir. Aderans dayanımı (τ , MPa) aşağıdaki 5.2 bağıntısı ile hesaplanmıştır.

$$\tau = \frac{\text{Aderans Kuvveti}}{\pi \times \phi \times l} \quad (5.2)$$

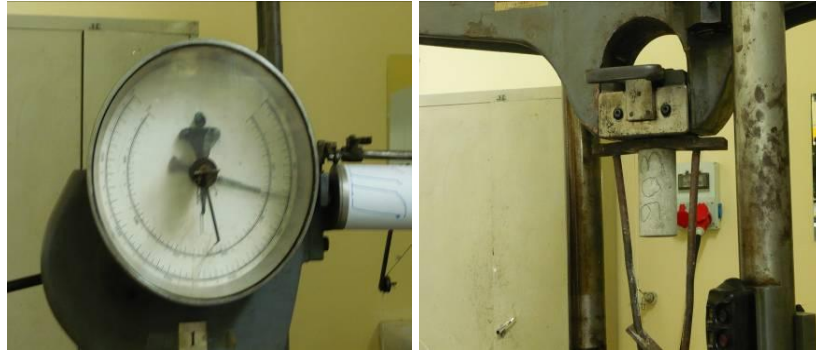
Bu formülde;

τ = Aderans gerilmesi

ϕ =Donatı çapı

l = Aderans boyu (Betona gömülü donatı uzunluğu)

(Donatı çapı 10 mm ve donatının toplam uzunluğu 200 mm ve donatının beton içinde kalan uzunluğu 110 mm'dir).



Şekil 5.10 Aderans Ölçümü Deney Düzeneği

5.4.5 Basınç Dayanımı Deney Düzeneği

Tüm beton harcına katkılı küp numuneleri ile katkısız şahit numune olan OPC küp numunelerinin basınç dayanımları İston A.Ş. Ar-Ge laboratuvarında beton pres makinesi ile TS EN 12390-3/NİSAN 2010'a göre Şekil 5.11'deki gibi ölçülmüştür.[94]



Şekil 5.11 Beton pres makinesi

Numune, deney makinesine yerleştirilmeden önce yükleme başlıklarının yüzeyleri silinerek temizlenmiş ve numunenin başlıklarla temas edecek yüzeyleri taneciklerden arındırılmıştır. Küp numuneler, yük uygulama yönü beton döküm yönüne dik olacak konumda ve makinenin alt yükleme başlığı üzerine merkezlenerek yerleştirilmiştir.

Basınç dayanımı, aşağıda verilen bağıntı kullanılarak hesaplanır:

$$F_c = F / A_c$$

Burada;

F_c = Basınç dayanımı, Mpa (N/mm^2),

F = Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N,

A_c = Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı, mm^2 dir.

5.4.6 Yarmada-Çekme Dayanımı Ölçümü Deney Düzeneği

Beton küp numunelerinin yarmada-çekme dayanımları İston A.Ş. ar-ge laboratuvarında TS-EN 12390-6 (2010)'a göre ölçülmüştür.[95]



Şekil 5.12 Yarmada Çekme Deney Makinası

Numuneler pres altına çelik şerit ve kontroplaka yardımı ile yerleştirildikten sonra yükleme yapılmaya başlanmıştır. Numuneye yükün ilk uygulanması esnasında, numunenin merkezlenmiş konumu muhafaza etmesi sağlanmıştır. Yükleme hızı, sabit gerilme hızı sağlanacak şekilde ayarlanmıştır. Otomatik kontrollü deney makinesi kullanılarak yükleme hızının sürekli kalıp kalmadığı kontrol edilmiş ve darbe etkisi oluşturulmadan numune kırılıncaya kadar kesintisiz yük uygulanmıştır. Otomatik kontrollü deney makinesi kullanılarak ulaşılan en büyük yük kaydedilmiştir.

Yarmada çekme dayanımı, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanır:

$$f_{ct} = 2 \times F / \pi \times L \times d$$

Burada;

f_{ct} Yarmada çekme dayanımı, Mpa (N/mm^2),

F En büyük yük, N,

L Numunenin yükleme parçasına temas çizgisinin uzunluğu, mm,

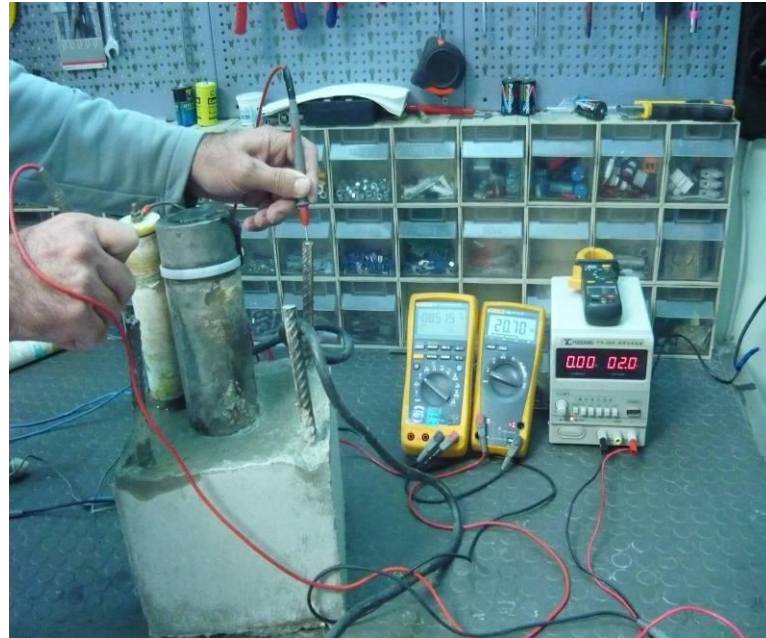
d Numunenin seçilen en kesit ölçüsüdür, mm.

5.4.7 Katodik Koruma Deney Düzeneği

5.4.7.1 Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Deney Düzeneği

Betonarme küp numunenin dış akım kaynaklı katodik koruması İgdaş A. Ş. laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Eski betonarme yapıları temsilen eski betonarme yapıdan çıkarılan ve kullanılmış durumda olan Ø14'lük nervürlü donatı çelikleri kullanılarak 200x200x200 mm ölçülerinde küp şeklinde betonarme numune üretilmiştir. Küp şeklinde betonarmenin dökümü esnasında donatı çelikleri çelik tellerle birbirine bağlanarak elektriksel akımın geçişine olanak sağlanmıştır. Nervürlü çelik donatılar betonarme numunenin dört köşesine yerleştirilmiştir. Demir-silisyum anot ise betonarme küp numunenin tam ortasına yarıyı biraz geçecek şekilde gömülmüştür. Betonarme numune ölçüm yapılmadan önce betonun direncini düşürmek için ıslatılmıştır. Şekil 5. 13'de görüldüğü gibi doğru akım kaynağının negatif ucu korunacak olan çelik donatılara bağlanıp çelik donatıların ortamdaki agresif iyonlar sebebi ile kaybettikleri elektronlar akım kaynağı ile çelik donatılara dışarıdan verilmiştir.



Şekil 5.13 Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Deney Düzenegi

Uygulamada verilecek akım, katodun doymuş bakır/bakır sülfat referans elektroduna göre potansiyelinin -770 mV dan daha negatif ve -1150 mV dan daha pozitif yarı hücre potansiyel değerleri arasında olmasını sağlayacak şekilde doğru akım güç kaynağı üzerinde ayarlanmıştır. Potansiyel ölçüm cihazının yani dijital voltmetrorenin negatif ucu doymuş bakır-bakır sülfat referans elektroduna ve pozitif ucu donatıya bağlanmıştır.

5.4.7.2 Galvanik Anotlu Katodik Koruma Deney Düzenegi

Betonarme küp numunenin galvanik anotlu katodik koruması İğdaş A.Ş. laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Galvanik anotlu katodik koruma sistemini kurmak için hazırlanan betonarme numune, dış akım kaynaklı katodik koruma sistemini kurmak için hazırlanan betonarme numune ile bire bir aynıdır. Buradaki tek fark anot olarak demir-silisyum anot yerine çinko galvanik anodunun kullanılmasıdır. Galvanik çinko anot, betonarme numunenin tam ortasına yarıyı geçecek şekilde gömülmüştür. Çinko anodun betonarme numunede bulunan çelik donatılar ile metalik bağlantısı sağlanarak numune üzerine galvanik anotlu katodik koruma sistemi Şekil 5.14’de gösterildiği gibi kurulmuştur.



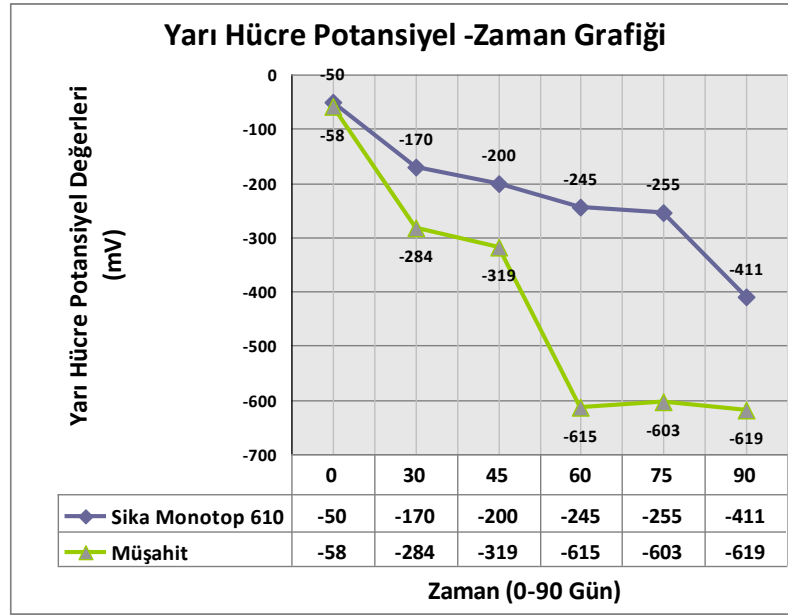
Şekil 5.14 Galvanik Anotlu Katodik Koruma Deney Düzenneği

Katod yani donatı çeliğinin reaksiyonu için gerekli olan elektronlar galvanik anot olarak bağlanan çinkonun kendiliğinden yükseltgenme reaksiyonu ile sağlanmıştır. Böylece korunan metalin yüzeyinde anodik reaksiyonların durdurulmasına destek sağlanmıştır.

5.5 Yarı Hücre Potansiyel Ölçümü Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Sika Mono Top-610 malzemesi ile donatı kaplamalı 3 adet ve kontrol (kaplamasız) 3 adet numunenin 50 gr Cl-/litre konsantrasyona sahip sodyum klorür (NaCl) çözeltisine kısmi olarak daldırıldıkları gün ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -50 mV ve müşahit numuneler için -58 mV olarak tespit edilmiştir. NaCl çözeltisine daldırıldıktan bir ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -170 mV ve kontrol numuneleri için -284 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan bir buçuk ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -200 mV ve kontrol numuneleri için -319 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan iki ay sonra ölçülen yarı

hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -245 mV ve kontrol numuneleri için -615 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan iki buçuk ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -255 mV ve kontrol numuneleri için -603 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan üç ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -411 mV ve kontrol numuneleri için -619 mV olarak tespit edilmiştir ve Sika Monotop 610 malzemesi ile donatı kaplamalı 3 adet ve kontrol (kaplamasız) 3 adet numunelerine ait ölçülen potansiyel değerleri Şekil 5.15'te sunulmuştur.



Şekil 5.15 Sika Mono Top -610 Kaplamalı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Yarı Hücre Potansiyel-Zaman Grafiği

Yarı hücre potansiyel ölçüm yöntemi ile çelik donatıların potansiyelleri ölçülerek korozyonun varlığı hakkında fikir edinilebilmektedir. Dhira ve Newlands'ın yaptığı yayında da belirtildiği üzere yarı hücre potansiyel ölçümleri bazı faydalı bilgiler sağlamaktadır fakat çoğu durumda güvenilir bir yorumlama yapmak güçtür [31]. Kayalı ve Zhu'nun yayınlarına göre betona gömülü çeliğin yarı hücre potansiyel değerleri korozyonun olup olmadığını saptamak için yeterli gelmemektedir [35]. Beton içinde bulunan çeliğin potansiyeli, çözünmüş donatı iyon konsantrasyonuna bağlıdır. Ancak Ramachandran ve Beaudoin'in yayınlarında belirtildiği üzere elektrot potansiyelinin artması yalnızca iyon konsantrasyonuna bağlı olmayıp, betonun elektriksel direnci, betonun pH'ı, betonun nem içeriği, hücre yerleştirme, inhibitör katkıları, donatı çeliğini saran ve koruyan aktif anot vs. gibi faktörlere bağlı olarak da değişmektedir [34]. Organik ve inorganik inhibitörler beton porları içinde sıvı karışımın kılcal olarak emme

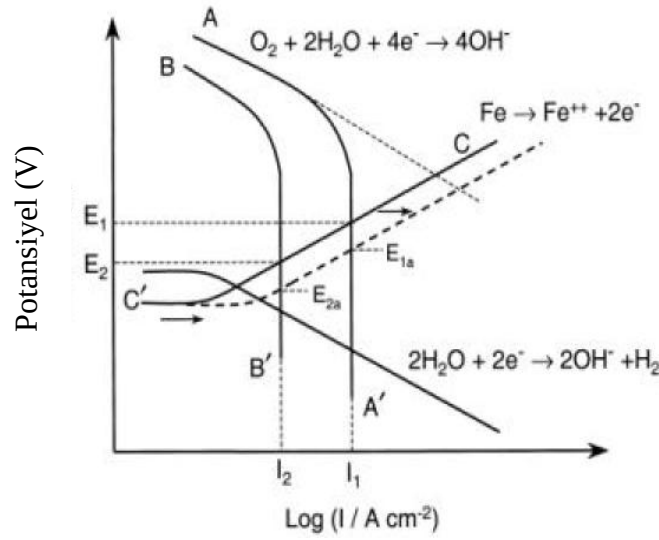
kuvveti ile taşınmaktadır ve bu durumun por çözeltisinin pH' ını ve iletkenliğini değiştirdiği kabul edilmektedir. İnorganik inhibitörler beton por çözeltisinin iletkenliğini arttırarak beton yüzeyindeki potansiyel değerlerini azaltabilmektedirler. Ayrıca potansiyel değerleri donatı çevresindeki oksijen içeriğine bağlı olarak da değişmektedir. Oksijen eksikliğinde potansiyel değerleri negatif yöne doğru kayar. Oksijen eksikliğine ise, çok ıslak, yoğun veya epoksi modifiyeli harç veya beton sebep olmaktadır. Yalçın ve Koç'un yaptıkları araştırmalar neticesindeki yayınlarında da belirtildiği üzere sürekli kuru halde bulunan betonlar içinde korozyon hızı son derece azdır. Beton rutubeti arttıkça korozyon hızında da artış olur. Ancak %100 doymuş rutubetli betonlarda, beton boşlukları tamamen su ile dolu olduğundan atmosferdeki oksijen difüzyonu güçleşir [18]. Dhir ve Newlands'ın yaptığı yayında belirtildiği üzere betondaki çok yüksek nem içeriğinde suya doymuş betondaki düşük oksijen içeriği nedeniyle korozyon oluşmaksızın potansiyel -1000 mV değerine kadar düşebilmektedir [31].

Şekil 5.16'da oksijen konsantrasyonunun elektrot potansiyeline nasıl etki ettiği gösterilmiştir. Hava girişinin olduğu şartlarda betonarmenin korozyon reaksiyonları aşağıdaki gibi yazılabilir.



Ferro hidroksit olarak tanımlanan reaksiyon ürünü ya magnetite ya da hidrate ferik okside, okside olur. Sırası ile aşağıdaki anodik ve katodik reaksiyonlar gerçekleşir.





Şekil 5.16 Katodik Proses Kütle Transferi Kontrolü Altındayken Korozyon Potansiyelleri ve Akımlarını Gösteren Polarizasyon Diyagramı [96]

Hava girişinin olmadığı durumlarda 3 numaralı reaksiyon aşağıdaki 4 numaralı reaksiyon olan suyun indirgenmesi şeklinde meydana gelir.



Korozyon reaksiyonları olduğu zaman anodik reaksiyondan serbest kalan tüm elektronlar katodik reaksiyonda tüketilir.

Hava girişi şartlarında katodik reaksiyon şekil 5.16'da AA'çizgisi ile gösterilen bir oksijen indirgenmesidir. Şekil 5.16'da CC'çizgisi ile gösterilen katodik ve anodik reaksiyon hızları E1 korozyon potansiyelinde elektriksel olarak eşittir ve bunlara karşılık gelen I1 akımı ilgili potansiyel değerindeki anodik ve katodik reaksiyonların ortak hızını elektriksel olarak temsil eder. Eğer beton örtüsü su ile doymuş ise oksijen sulu çözeltide çok çözünemediğinden (örneğin soğuk suda 10 ppm çözünür) metal yüzeyinde serbestçe kullanılamaz. Katodik redüksiyon hızı oksijenin metal yüzeyine varış hızı tarafından kontrol edilir ve bu durumda bu hız önemli bir şekilde azalır ve sonrasında katodik reaksiyon hızı AA'çizgisi ile gösterilen değerlerden BB'çizgisi ile gösterilen değerlere değişir. Anodik ve katodik reaksiyon hızları E2 korozyon potansiyelinde elektriksel olarak yeni bir eşitliğe sahip olur ve bunlara karşılık gelen I2 akımı ilgili potansiyel değerindeki anodik ve katodik reaksiyonların ortak hızını elektriksel olarak temsil eder. Oksijen konsantrasyonunun azalması sebebi ile korozyon potansiyeli E1 değerinden daha negatif bir potansiyel değeri olan E2'ye değişir [96].

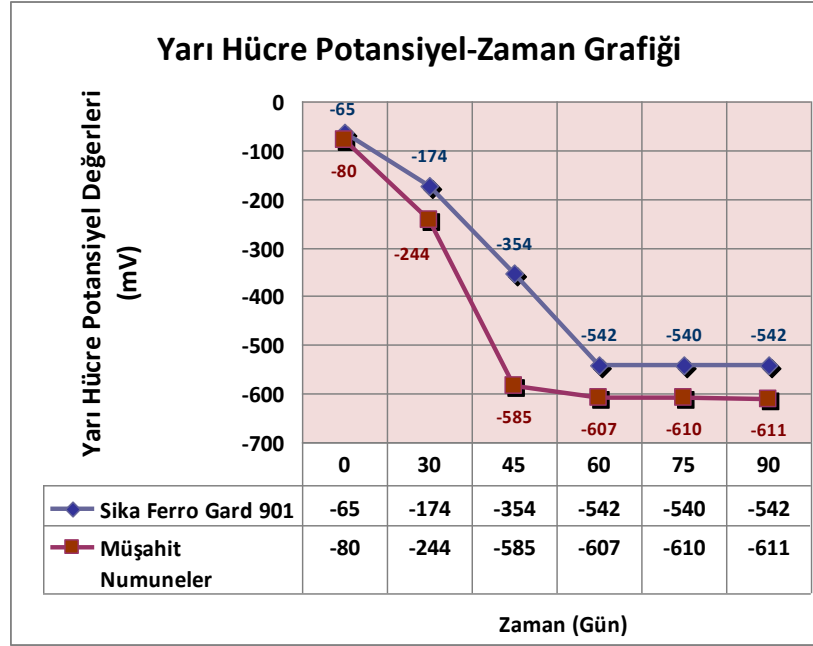
Sika Monotop 610 ile elik donatıları kaplamalı betonarme numunelerin 90. günün sonunda ölçülen -411 mV'luk yarı hücre potansiyel değerleri ortalaması donatılarda %90 olasılıkla korozyon varlığını gösteren bölgede kalmakla birlikte, bu potansiyel değeri az önce belirtildiği gibi sadece donatıdan znen iyon konsantrasyonuna bağlı olmayıp pek çok faktörden de etkilenmektedir. Donatı yüzeyine sürülen koruyucu kaplama malzemesi inhibitör içermektedir ve inhibitörün betonun por zltisinin iletkenliğini arttırdığı bu nedenle potansiyel değerini negatif yöne doğru kaydırđıęı düşünülmektedir. Elsener de buna benzer İtalya'da yaptığı bir çalışmada, pasif donatının potansiyelinin por zltisindeki pH ve donatı çevresindeki oksijen içeriği tarafından kontrol edildiğini belirtmiştir. Organik ve inorganik inhibitör karışımlarının sıvı karışımın kapiler emmesi ile betonun içine taşındığını ve por zltisinin iletkenliğini ve pH'ını değiştirmesinin beklendiğini belirtmiştir. İnorganik inhibitörlerin örneğin monoflorofosfat'ın beton por zltisinin iletkenliğini arttırdığı ve bu nedenle beton yüzeyinde yarı hücre potansiyel değerlerinde düşme eğilimi görüldüğünü belirtmiştir [36].

Bunun yanında betonarme numunelerin uzun süre NaCl içeren zlti içerisinde kalması nedeni ile beton porlarının su ile doymuş olması ve numunelerin üretim esnasında yerleştirmelerinin (vibrasyon) sıkı bir şekilde yapılması sebebi ile betonun yoğun olmasının donatı çevresine korozyonun oluşabilmesi için yeterli oksijen difüzyonunu engellediği düşünülmektedir. Donatı çevresindeki oksijen eksikliğinin de potansiyel değerlerini negatif yöne kaydırđıęına inanılır. Kayalı ve Zhu (2005) buna benzer Avustralya'da yaptıkları bir çalışmada, 5-6 ay süresince hızlandırılmış korozyona tabi tuttukları numunelerde ölçtükleri yarı hücre potansiyel değerlerinin yüksek negatiflikte (≤ -600 mV) bulunmasının ve aynı numunelerde ölçülen korozyon akım yoğunluğu değerlerinin ise numunelerde düşük korozyon aktivitesi olduğunu göstermesinin gerekçesinin numunelerdeki elik yüzeyine oksijenin difüzyonunu engelleyen nem mevcudiyeti olabileceğini belirtmişlerdir. Nem mevcudiyetinin sebebinin ise agregaların doymuş olması ve imento matrisinin yoğun olması olduğuna inandıklarını belirtmişlerdir [35].

Ayrıca donatıyı saran kaplama malzemesi epoksi modifiyeli olduğu için epoksinin de oksijenin donatı ile temasını engellediği ve potansiyelin negatif yöne doğru kaydığı düşünülür. El-Hawary ve arkadaşlarının (2010) buna benzer yaptığı bir yaptığı çalışmada belirtildiği üzere betona epoksi katkısının beton geirirmliliğini azalttığı ve

dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir [65]. Yine Elsener yaptığı yayında betonun yoğun veya epoksi katkılı olması durumunda oluşan oksijen eksikliği neticesinde yarı hücre potansiyel değerlerinin daha negatif değerlere kaydığını belirtmiştir [36].

Bu etkenlerin ön plana çıkması sebebi ile çelik donatı kaplama malzemesinin etkinliğini ve dayanıklılığını kesin olarak değerlendirmek için ayrıca korozyon akım ölçümleri ve mikro yapı incelemeleri de gerçekleştirilmelidir.

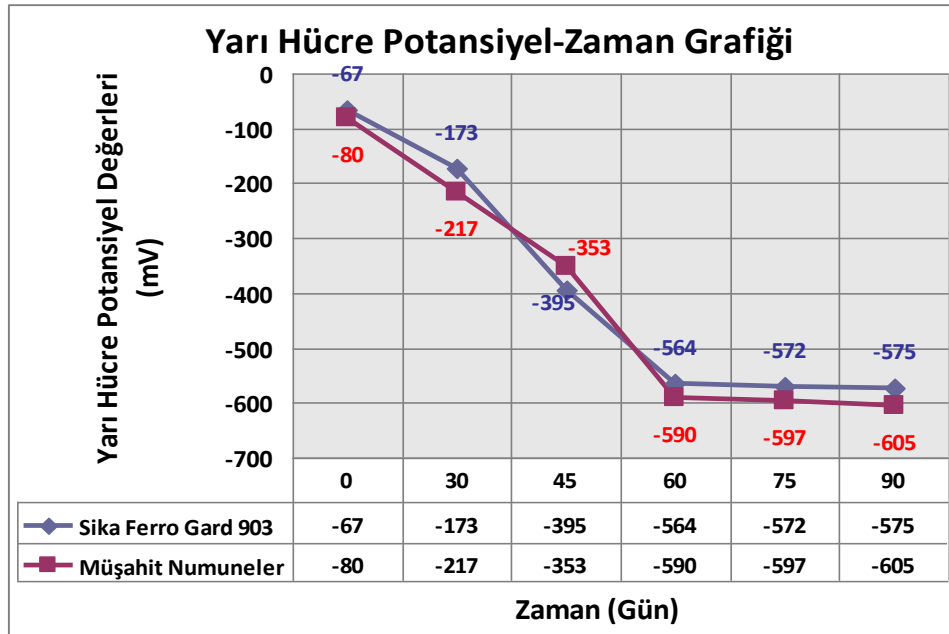


Şekil 5.17 Sika Ferro Gard 901 Katkılı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Yarı Hücre Potansiyel-Zaman Grafiği

Sika Ferro Gard-901 malzemesi ile beton harcına katkı yapılmış 3 adet ve kontrol (katkısız) 3 adet numunenin 50 gr Cl-/litre konsantrasyona sahip sodyum klorür (NaCl) çözeltisine kısmi olarak daldırıldıkları gün ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları katkılı numuneler için -65 mV ve kontrol numuneleri için -80 mV olarak tespit edilmiştir. NaCl çözeltisine daldırıldıktan bir ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları katkılı numuneler için -174 mV ve kontrol numuneleri için -244 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan bir buçuk ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları katkılı numuneler için -354 mV ve kontrol numuneleri için -585 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan iki ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları katkılı numuneler için -542 mV ve kontrol numuneleri için -607 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan iki buçuk ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları katkılı numuneler için -540 mV ve kontrol numuneleri için -610 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan üç ay sonra

ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları katkılı numuneler için -542 mV ve kontrol numuneleri için -611 mV olarak tespit edilmiştir ve Sika Ferro Gard 901 malzemesi ile beton harcına katkı yapılmış 3 adet ve kontrol (katkısız) 3 adet numunelere ait ölçülen potansiyel değerleri Şekil 5.17’de sunulmuştur.

Sika Ferro Gard 901 ticari inhibitör katkılı betonarme numunelerin 90. günün sonunda ölçülen -542 mV'luk yarı hücre potansiyel değerleri ortalaması donatılarda korozyon varlığını gösteren bölgede kalmakla birlikte, bu potansiyel değeri az önce belirtildiği gibi sadece donatıdan çözünen iyon konsantrasyonuna bağlı olmayıp pek çok faktörden de etkilenmektedir. Betona katılan inhibitörün, betonun por çözeltisinin iletkenliğini arttırdığı bu nedenle potansiyel değerini negatif yöne doğru kaydırıldığı düşünülmektedir. Bunun yanında betonarme numunelerin uzun süre NaCl içeren çözelti içerisinde kalması nedeni ile beton porlarının su ile doymuş olması ve numunelerin üretim esnasında yerleştirmelerinin (vibrasyon) sıkı bir şekilde yapılması sebebi ile betonun yoğun olmasının donatı çevresine korozyonun oluşabilmesi için yeterli oksijen difüzyonunu engellediği düşünülmektedir. Donatı çevresindeki oksijen eksikliğinin de potansiyel değerlerini negatif yöne kaydırduğuna inanılır. Bu etkenlerin ön plana çıkması sebebi ile beton katkı malzemesinin etkinliğini ve dayanıklılığını kesin olarak değerlendirmek için ayrıca korozyon akım ölçümleri ve mikro yapı incelemeleri de gerçekleştirilmelidir.

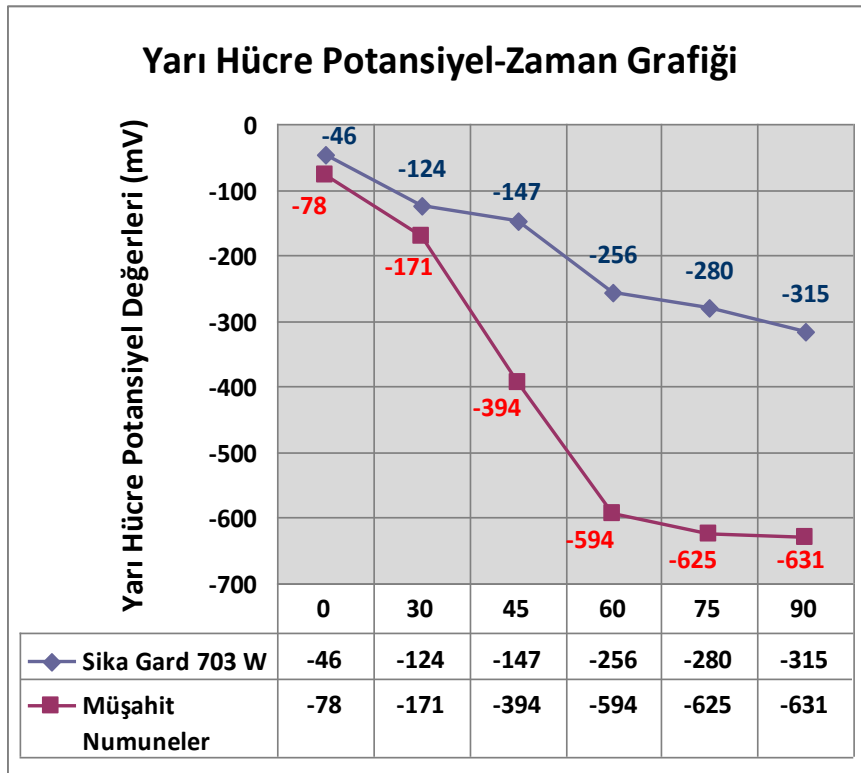


Şekil 5.18 Sika Ferro Gard 903 Kaplamalı(Sürmeli) Numuneler ve Kontrol Numuneleri Yarı Hücre Potansiyel-Zaman Grafiği

Sika Ferro Gard -903 malzemesinden beton dış yüzeyine sürülmüş 3 adet ve kontrol (kaplamasız) 3 adet numunenin 50 gr Cl-/litre konsantrasyona sahip sodyum klorür (NaCl) çözeltisine kısmi olarak daldırıldıkları gün ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları şekil 5.18’de görüldüğü gibi kaplamalı numuneler için -67 mV ve kontrol numuneleri için -80 mV olarak tespit edilmiştir. NaCl çözeltisine daldırıldıktan bir ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -173 mV ve kontrol numuneleri için -217 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan bir buçuk ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -395 mV ve kontrol numuneleri için -353 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan iki ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -564 mV ve kontrol numuneleri için -590 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan iki buçuk ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -572 mV ve kontrol numuneleri için -597 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan üç ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -575 mV ve kontrol numuneleri için -605 mV olarak tespit edilmiştir.

Sika Ferro Gard 903 ticari inhibitör katkılı, betonarme numunelerin 90. günün sonunda ölçülen -575 mV'luk yarı hücre potansiyel değerleri ortalaması donatılarda korozyon varlığını gösteren bölgede kalmakla birlikte, bu potansiyel değeri önceden belirtildiği gibi sadece donatıdan çözünen iyon konsantrasyonuna bağlı olmayıp pek çok faktörden de etkilenmektedir. Betonun dış yüzeyine sürülen inhibitör malzemenin çelik donatıda anodik ve katodik korumayı oluşturabilmek için beton yüzeyinden donatı yüzeyine kadar beton por çözeltisi içinden göç etmesi esnasında inhibitör karışımının betonun por çözeltisinin iletkenliğini arttırdığı ve çözeltinin kompozisyonunu değiştirdiği bu nedenlerle potansiyel değerini negatif yöne doğru kaydıracağı düşünülmektedir. Ayrıca bu düşünce Elsener’in yaptığı çalışmada elde ettiği benzer tipteki sonuçlar ve çalışmasında belirttiği, betona organik ve inorganik esaslı inhibitörlerin katılması neticesinde beton por çözeltisinin iletkenliğinin artması ve bu nedenle beton yüzeyinde yarı hücre potansiyel değerlerinde düşme eğilimi görülmesi yorumu ile de desteklenmektedir [36]. Yine Shiyuan ve Daniel yaptıkları yayında organik ve inorganik esaslı inhibitörlerin iyon içermesi sebebi ile yarı hücre potansiyel okumalarını etkileyebilecekleri belirtilmiştir [37].

Bunun yanında betonarme numunelerin uzun süre NaCl içeren çözelti içerisinde kalması nedeni ile beton porlarının su ile doymuş olması ve numunelerin üretim esnasında yerleştirmelerinin (vibrasyon) sıkı bir şekilde yapılması sebebi ile betonun yoğun olmasının donatı çevresine korozyonun oluşabilmesi için yeterli oksijen difüzyonunu engellediği düşünülmektedir. Donatı çevresindeki oksijen eksikliğinin de potansiyel değerlerini negatif yöne kaydıracağına inanılır. Bu etkenlerin ön plana çıkması sebebi ile sürme esaslı beton kaplama malzemesinin etkinliğini ve dayanıklılığını kesin olarak değerlendirmek için ayrıca korozyon akım ölçümleri ve mikro yapı incelemeleri de gerçekleştirilmelidir.

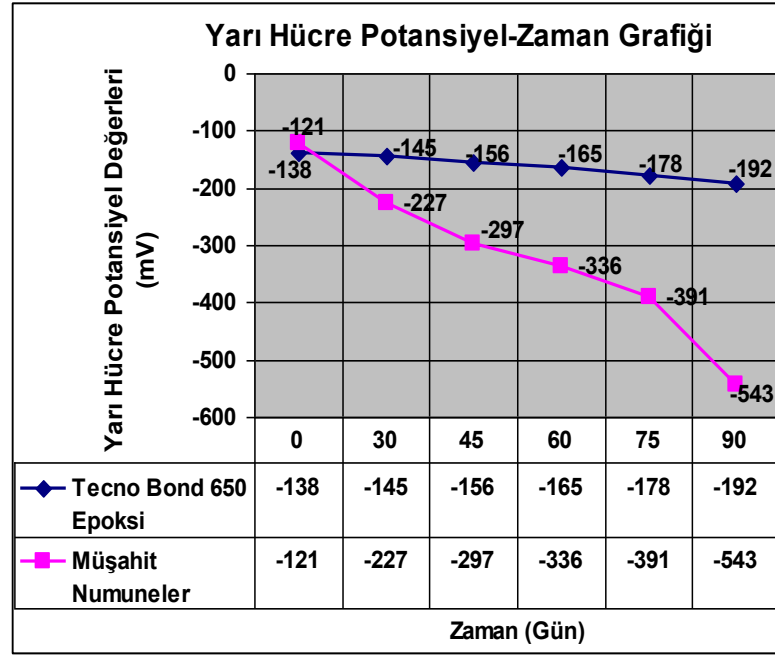


Şekil 5.19 Sika Ferro Gard 703 Kaplamalı(Sürmeli) Numuneler ve Kontrol Numuneleri Yarı Hücre Potansiyel-Zaman Grafiği

Sika Ferro Gard -703 malzemesinden beton dış yüzeyine sürülmüş 3 adet numunenin ve kontrol (kaplamasız) 3 adet numunenin 50 gr Cl-/litre konsantrasyona sahip sodyum klorür (NaCl) çözeltisine kısmi olarak daldırıldıkları gün ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -46 mV ve kontrol numuneleri için -78 mV olarak tespit edilmiştir. NaCl çözeltisine daldırıldıktan bir ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -124 mV ve kontrol numuneleri için -171 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan bir buçuk ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -147 mV

ve kontrol numuneleri için -394 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan iki ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -256 mV ve kontrol numuneleri için -594 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan iki buçuk ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -280 mV ve kontrol numuneleri için -625 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan üç ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -315 mV ve kontrol numuneleri için -631 mV olarak tespit edilmiştir ve Sika Ferro Gard 703 malzemesinden beton dış yüzeyine sürülmüş 3 adet ve kontrol (kaplamasız) 3 adet numunelere ait ölçülen potansiyel değerleri Şekil 5. 19’da sunulmuştur.

Sikagard-703 W ticari isimli silan/siloksan esaslı malzeme kaplı betonarme numunelerin 90. günün sonunda ölçülen -315 mV'luk yarı hücre potansiyel değerleri ortalaması donatı korozyonunda belirsizliği gösteren bölgede kalmakla birlikte, bu potansiyel değeri önceden belirtildiği gibi sadece donatıdan çözünen iyon konsantrasyonuna bağlı olmayıp pek çok faktörden de etkilenmektedir. Betonun dış yüzeyine sürülen silan/siloksan birleşimli su itici özellikli emülsiyon malzeme betonun yüzeyinden içeri geçerek yüzey altında beton ile reaksiyona girerek dışarıdan giren suyu ve klor iyonlarını bloke ettiği için donatı çevresine korozyonun oluşabilmesi için yeterli oksijen difüzyonunu engellediği düşünülmektedir. Ayrıca Kepler, yaptığı çalışmada, silan ve siloksanların betonun yüzeyi ile kimyasal olarak reaksiyona girerek, beton yüzeyinin altında su ve klor iyonlarını geçirmeyerek geri çeviren bir hidrofobik tabaka oluşturduğunu belirterek bu düşüncayı desteklemektedir [40]. Donatı çevresindeki oksijen eksikliğinin de potansiyel değerlerini negatif yöne kaydıracağına inanılır. Ayrıca beton porlarına girebilen ve korozyon reaksiyonunun gerçekleşebilmesi için mutlaka gerekli olup elektrolit vazifesi gören su miktarının azalması ve beton içine girmeye çalışan agresif klor oranının da düşmesi bu görüşü desteklemektedir. Bu etkenlerin ön plana çıkması sebebi ile sürme esaslı beton kaplama malzemesinin etkinliğini ve dayanıklılığını kesin olarak değerlendirmek için ayrıca korozyon akım ölçümleri ve mikro yapı incelemeleri de gerçekleştirilmelidir.

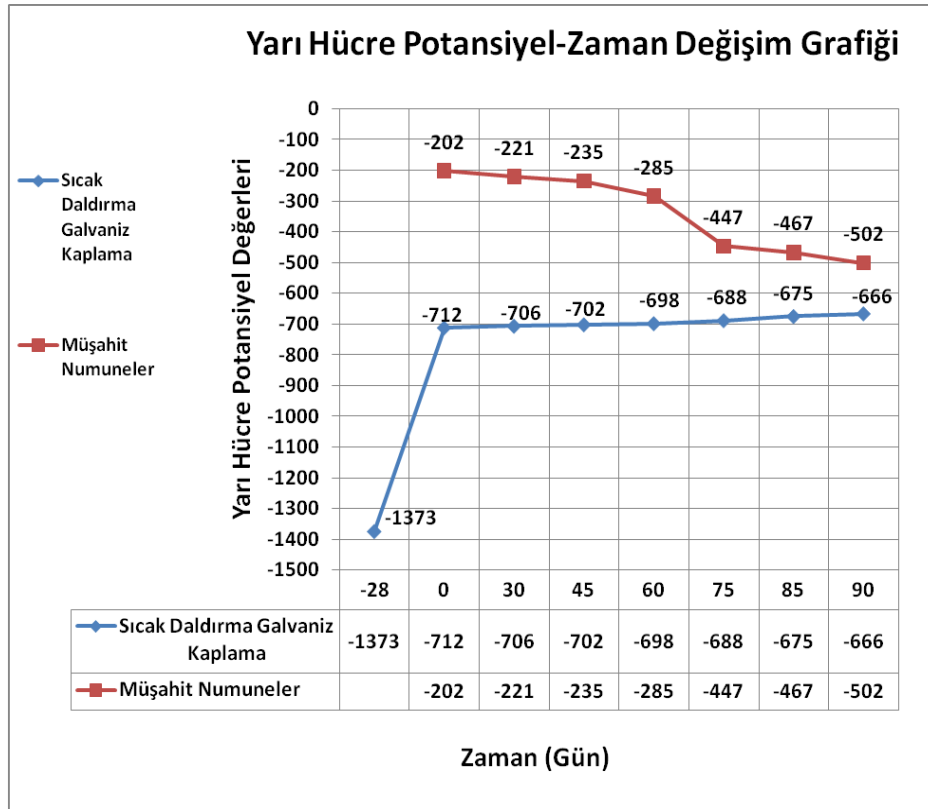


Şekil 5.20 Tekno Bond 650 Epoksi Kaplamalı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Yarı Hücre Potansiyel-Zaman Grafiği

Tekno Bond 650 epoksi malzemesi ile donatı kaplamalı 3 adet ve kontrol (kaplamasız) 3 adet numunenin 50 gr Cl-/litre konsantrasyona sahip sodyum klorür (NaCl) çözeltisine kısmi olarak daldırıldıkları gün ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -138 mV ve kontrol numuneleri için -121 mV olarak tespit edilmiştir. NaCl çözeltisine daldırıldıktan bir ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -145 mV ve kontrol numuneleri için -227 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan bir buçuk ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -156 mV ve kontrol numuneleri için -297 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan iki ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -165 mV ve kontrol numuneleri için -336 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan iki buçuk ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -178 mV ve kontrol numuneleri için -391 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan üç ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -192 mV ve kontrol numuneleri için -543 mV olarak tespit edilmiştir ve Tecno Bond 650 epoksi malzemesi ile donatı kaplamalı 3 adet ve kontrol (kaplamasız) 3 adet numunelere ait ölçülen potansiyel değerleri Şekil 5. 20’de sunulmuştur.

Tenobond 650 ticari isimli epoksi reçine esaslı malzeme ile donatıları kaplı betonarme numunelerin 90. günün sonunda ölçülen -192 mV'luk yarı hücre potansiyel değerleri

ortalaması donatılarda %90 olasılıkla korozyonun olmadığını göstermektedir. Ayrıca, betonarme numunelerin uzun süre NaCl içeren çözelti içerisinde kalması nedeni ile beton porlarının su ile doymuş olması ve numunelerin üretim esnasında yerleştirmelerinin (vibrasyon) sıkı bir şekilde yapılması sebebi ile betonun yoğun olmasının donatı çevresine korozyonun oluşabilmesi için yeterli klor ve oksijen difüzyonunu engellediği düşünülmektedir. Bununla birlikte donatı yüzeyindeki epoksi kaplama da hem oksijen hem de suyun ve agresif iyonların donatı ile temasını kesmektedir. Donatı çevresindeki oksijen eksikliği de potansiyel değerlerini negatif yöne kaydırmaktadır. Bu sebeple potansiyel değerlerinde zararsız bölge içerisinde olmakla birlikte çok hafif negatif yöne doğru kayma olduğu düşünülmektedir. Yarı hücre potansiyel değerleri oldukça tatmin edicidir. Bununla beraber kaplama malzemesinin etkinlik ve dayanıklılık bulgularını desteklemek için ayrıca korozyon akım ölçümleri ve mikro yapı incelemeleri de gerçekleştirilmelidir.



Şekil 5.21 Sıcak Daldırma ile Donatıları Çinko Kaplamalı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Yarı Hücre Potansiyel-Zaman Grafiği

Sıcak Daldırma yöntemi ile çelik donatıları çinko kaplamalı 3 adet numune dökülünce 28 günlük kür süresi beklenmeden önce ölçülen yarı hücre potansiyel değerlerinin ortalamaları -1373 mV olarak tespit edilmiştir. Daha sonra dökülmüş olan lolipop

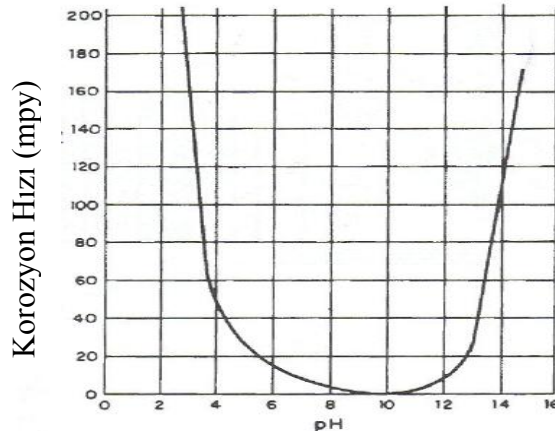
donatılı betonarme numunelerin 28 günlük hava kür süresinin tamamlanması beklenmiştir. Kür süresi tamamlandıktan sonra numuneler 50 gr Cl/1 litre su içeren NaCl çözeltisine daldırılmıştır.

Sıcak Daldırma yöntemi ile çelik donatıları çinko kaplamalı 3 adet ve kontrol (kaplamasız) 3 adet numune 50 gr Cl-/litre konsantrasyona sahip sodyum klorür (NaCl) çözeltisine kısmi olarak daldırıldıkları gün ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -712 mV ve müşahit (kontrol) numuneleri için -202 mV olarak tespit edilmiştir. NaCl çözeltisine daldırıldıktan bir ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -706 mV ve müşahit numuneler için -221 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan bir buçuk ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -702 mV ve müşahit numuneler için -235 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan iki ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -698 mV ve müşahit numuneler için -285 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan iki buçuk ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -688 mV ve müşahit numuneler için -447 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan seksen beş gün sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -675 mV ve müşahit numuneler için -467 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan üç ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -666 mV ve müşahit numuneler için -502 mV olarak tespit edilmiştir ve sıcak daldırma çinko ile donatı kaplamalı 3 adet ve kontrol (kaplamasız) 3 adet numunelere ait ölçülen potansiyel değerleri Şekil 5.21’de sunulmuştur.

Sıcak Daldırma galvaniz ile kaplamalı donatı çelikleri kullanılarak dökülen betonda dökümden sonra tespit edilen korozyon potansiyel değer ortalamalarının -1373 mV gibi aktif korozyonu gösteren bölge içerisinde olmasının sebebi, başlangıçta pasif durumda olan ve ıslak çimento ile ilk defa temas eden galvanize kaplamada yaklaşık 10 mikron çinkonun, kaplamanın saf çinko (eta) tabakasından çözünmesi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu düşünce, Yeomans’ın yayını ve Quan Tan’ın yayını ile de desteklenmektedir. Yeomans’ın yayınında başlangıçta pasif durumda olan ve ıslak çimento ile ilk defa temas eden galvanize kaplamada yaklaşık 10 mikron çinkonun, kaplamanın saf çinko (eta) tabakasından çözündüğü belirtilmiştir. Ayrıca çözelti içindeki çinkonun güçlü asidik ve bazik yapılarda tepkidiği ve bu tepkimenin en çok pH’ın 6’dan küçük ve pH’ın 13’den büyük olduğu durumlarda gerçekleştiği bildirilmiştir. Yine aynı yayında,

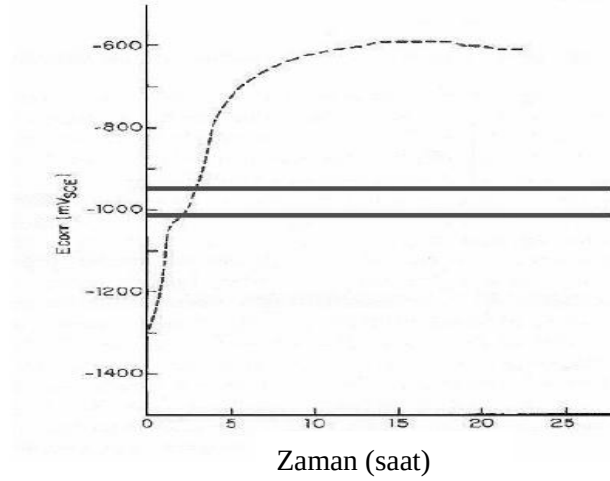
Çinkonun ıslak imento ile kuvvetlice tepkidiği fakat bu reaksiyonun etkin bir şekilde beton sertleşince sona erdiği ve reaksiyonun sonunda bariyer tabakası olan kalsiyum hidroksi zinkat'ın (CHZ) oluştuğu belirtilmiştir [50].

Yine Quan Tan çalışmasında, çinko kaplamalı çeliğin, kaplamasız elik ile karşılaştırıldığında uzun dönemli olarak korozyona karşı direncini geliştirmesine rağmen, ilk olarak beton döküldüğü zaman başlangıç korozyonu ile ilgili belirsizliklerin mevcut olduğunu ve taze betonda çinko kaplamanın termodinamik olarak kararsız olduğunu ve por çözeltisindeki yüksek pH değerine bağlı olarak ilk birkaç gün içinde kuvvetlice korozyona uğradığını ve bu prosesin, koruyucu çinko korozyon ürün tabakası oluşumu neticesinde, pasivasyonun sağlanmasına kadar devam ettiğini belirterek ölçüm sonuçlarımız hakkındaki düşüncemizi desteklemektedir. Ayrıca betonarme döküldükten sonra por çözeltisindeki kalsiyum, sodyum ve potasyum hidroksitler sebebi ile hidratasyon esnasında pH'ın yaklaşık 12,6 değerinden 13,7 değerine kadar yükseldiği belirtilmiştir. Bu davranışın ve pH'ın 12'den 14'e çıkması durumunda korozyon hızındaki hızlı yükselişin aşağıdaki şekil 5.22'den izlenebileceği belirtilmiştir [97].



şekil 5.22 pH'ın Saf inkonun Korozyon Hızına Etkisi [97]

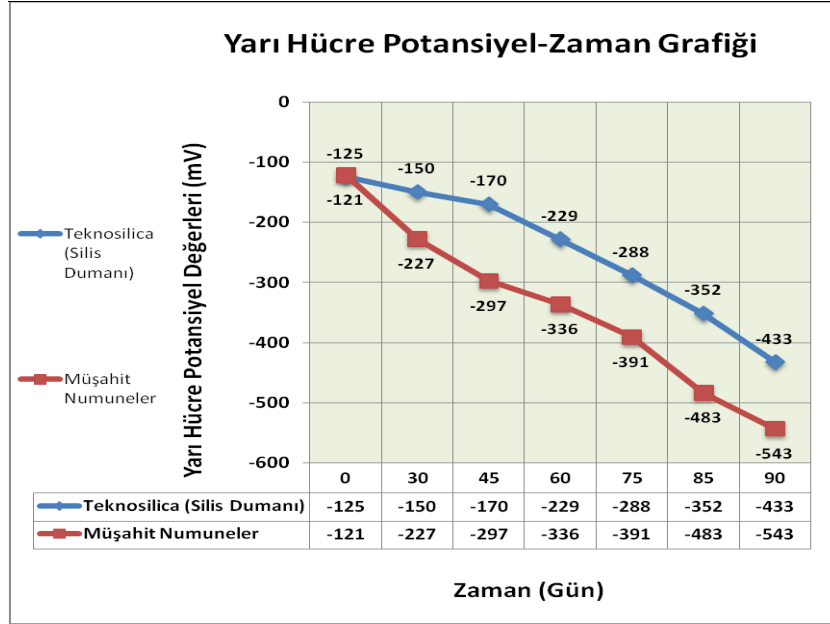
Quan Tan yayınında, başka yayınlara atıfta bulunarak sıcak daldırma çinko ile kaplı donatılı betonlarda döküm sonrası görülen potansiyel değişimini de aşağıdaki şekil 5.23'de sunmuştur. Burada görülen ilk birkaç saatteki potansiyel değerleri -1300 mV civarında olup yine çalışmamızda elde ettiğimiz değerleri desteklemektedir [97].



Şekil 5.23 Harca Daldırılmış Galvanize Çeliğin Yarı Hücre Potansiyel Profili [97]

Betonun sertleşmesinden sonra çinkonun çimento ile reaksiyonu sona erdiğinden küreleme tamamlandıktan sonra başlanan ve 90 gün boyunca takip edilen potansiyel değeri potansiyel değerleri ortalaması gittikçe pozitif yöne doğru ilerlemiştir ve 90. günde ölçülen potansiyel değerleri ortalaması -666 mV olarak saptanmıştır. Bu değer geleneksel çeliklerde pasiflik sınırı olarak kabul edilen -200 mV 'luk potansiyel değerinden oldukça farklı olmasına rağmen galvanize kaplamalı çelik donatılar için pasifliği gösteren bölgede yer almaktadır ve değer -200 mV değerinden oldukça negatif bölgede olmasının nedenleri arasında çinko kaplamanın yüzeyinde oluşan çok ince oksit film tabakasının sadece anodik prosesi yani çinkonun çözünürlüğünü azaltmaması aynı zamanda oksijen tüketimi ve hidrojen gelişimi gibi katodik reaksiyonlara da engel olmasıdır. Bu çok ince oksit film tabakası, galvaniz kaplamalar pasif durumda iken oluşan ve kaplamanın alt katmanlarının ve kaplanan metalin pasivasyonunu garantileyen bir çinko oksit tabakası olarak kabul edilir. Ghost ve Singh yaptıkları çalışmada, klorid çözeltisine daldırılmış galvanize donatılı numunelerin ilk 50 saate kadar olan yarı hücre potansiyel değerlerini pH'ın 12,75 olduğu şartlarda -1400 mV olarak tespit ettiklerini ve bunun aktif çözünmeyi belirttiğini ve bu süreden sonra potansiyelin kademeli olarak soyaştığını ve en sonunda -600 mV'a yaklaştığını bildirerek çalışma sonuçlarımızı ve sonuçlar hakkındaki düşüncemizi desteklemişlerdir [99]. Yine Tan ve Hansson yaptıkları çalışmada, sıcak daldırma çinko kaplı donatılı betonarme numunelerinde pH'ın 13,5 olduğu yani çinko kaplamanın por çözeltisi içinde aktif olarak çözündüğü durumda yarı hücre potansiyel değerini -1400 mV olarak tespit ettiklerini ve daha sonra pH'ın 12,5 olduğu Ca(OH)_2 ile doymuş beton içinde korozyon

bakımından pasif durumda olan aynı numunelerin yarı hücre potansiyel değerlerini -600 mV olarak tespit ettiklerini bildirmişlerdir [98].



Şekil 5.24 Tekno Silica Silis Dumanı Katkılı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Yarı Hücre Potansiyel-Zaman Grafiği

Tekno Silica ticari isimli silis dumanı ile beton harcına katkı yapılmış 3 adet ve kontrol (kaplamasız) 3 adet numune 50 gr Cl-/litre konsantrasyona sahip sodyum klorür (NaCl) çözeltisine kısmi olarak daldırıldıkları gün ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları katkılı numuneler için -125 mV ve müşahit (kontrol) numuneler için -121 mV olarak tespit edilmiştir. NaCl çözeltisine daldırıldıktan bir ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları katkılı numuneler için -150 mV ve müşahit numuneler için -227 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan bir buçuk ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları katkılı numuneler için -170 mV ve müşahit numuneler için -297 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan iki ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları katkılı numuneler için -229 mV ve müşahit numuneler için -336 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan iki buçuk ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları katkılı numuneler için -288 mV ve müşahit numuneler için -391 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan seksen beş gün sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları katkılı numuneler için -352 mV ve müşahit numuneler için -483 mV olarak tespit edilmiştir. Daldırmadan üç ay sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ortalamaları kaplamalı numuneler için -433 mV ve müşahit numuneler için -543 mV olarak tespit edilmiştir ve Tecno

Silica silis dumanı ile beton harcına katkı yapılmış 3 adet ve kontrol (katkısız) 3 adet numunelere ait ölçülen potansiyel değerleri Şekil 5. 24’de sunulmuştur.

Tekno Silica ticari isimli silis dumanı esaslı katkılı betonarme numunelerin 90. günün sonunda ölçülen -433 mV'luk yarı hücre potansiyel değerleri ortalaması donatılarda korozyon varlığını gösteren bölgede kalmakla birlikte, bu potansiyel değeri az önce belirtildiği gibi sadece donatıdan çözünen iyon konsantrasyonuna bağlı olmayıp pek çok faktörden de etkilenmektedir. Betona katılan silis dumanı içeriğinin çok küçük partikül boyutu beton boşluklarını doldurmasını ve içeri su ve klor gibi agresif iyonların ve oksijenin girişini azaltıcı yönde etki yapmasını sağlar. Bu şekilde de çelik donatı yüzeyinde korozyonun oluşumunu geciktirici ya da engelleyici vazife gördüğü düşünülür. Bu düşünce Kepler’in çalışması ile de desteklenmektedir. Kepler’de çalışmasında silis dumanının betona katıldığı zaman malzemenin daha güçlü ve daha az geçirimli olmasını sağlayan fazla kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat bağı oluşturduğunu ayrıca küçük silis dumanı partiküllerinin çimento hamurundaki çimento ile agrega arasındaki boşlukları doldurduğunu ve neticede silis dumanı ile üretilen betonların daha az boşluk dolayısı ile daha az geçirimliliğe sahip olduğunu belirtmiştir [40].

Donatı çevresindeki oksijen eksikliğinin de potansiyel değerlerini negatif yöne kaydıracağına inanılır. Ancak bunun yanında silis dumanı beton içerisinde homojen bir şekilde dağılmamış olabilir ve donatıya temas eden silis dumanı donatının her yerinde eşik miktarda olmayabilir bu sebeple paslanma çelik yüzeyinde her yerde aynı oranda olmayacaktır. Böylelikle yüzeyde paslanmanın artıp-azaldığı bölgeler oluşur. Ayrıca silis dumanının bileşiminde bulunan yüksek değerli demir oksit ve klorürleri otokatalitik etki yaparak betonarme çeliği korozyonunu hızlandırır. Bu yüzden doğal çevre değişimine uğrayan betonarme yapılar için SD’nin beton gözeneklerini tıkayarak, dış çevrenin korozif etkisini kısıtlamasına rağmen, beton çeliğinin özellikle lokalize korozyonunu doğrudan artıran bir etkileşime sebep olduğu düşünülmektedir. Bu düşünce Değirmencinin yaptığı çalışmada elde ettiği sonuçlar ile de desteklenmektedir. Değirmenci çalışmasında, silis dumanı katkısının betonarme çeliğinin korozyonu üzerinde birbirine zıt yönde iki farklı etkide bulunduğunu silis dumanının betonun porozitesini azaltarak çeşitli korozif maddelerin çevreden çelik yüzeyine difüzyon hızını kısıtlamasına rağmen, çelik yüzeyinde kendisinin temas ettiği bölgelerde korozyon direncini düşürerek, özellikle lokalize korozyonu hızlandırıldığını bildirmiştir. Bu

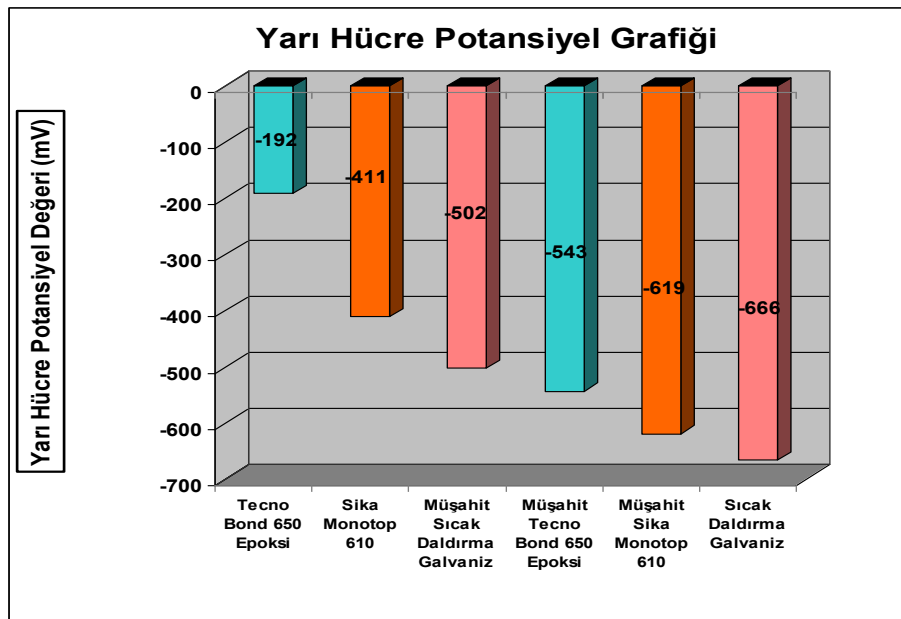
sonuca, hem silis dumanı içindeki yüksek değerlikli demir bileşiklerinin çelik üzerindeki korozyon etkisinin ve lokal bölgelerde pH düşmesinin, hem de betonun kompozit özelliğindeki artışın yol açtığını bildirmiştir [1].

Bu etkenlerin ön plana çıkması sebebi ile beton katkı malzemesinin etkinliğini ve korozyon durumunu kesin olarak değerlendirmek için ayrıca korozyon akım ölçümleri ve mikro yapı incelemeleri de gerçekleştirilmelidir.

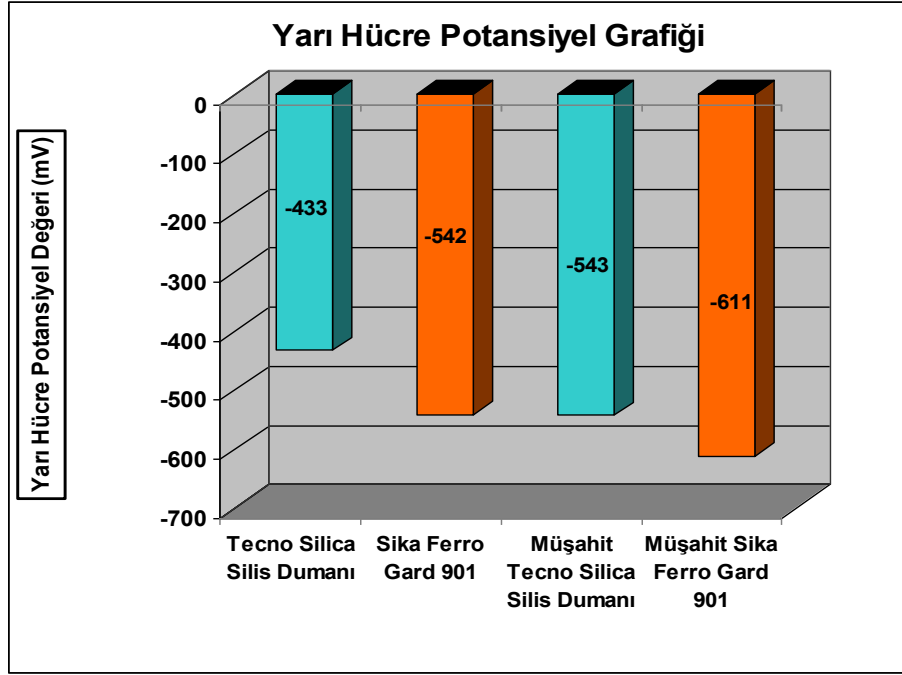
Katkılı ve kontrol (katkısız) betonarme numunelerin 28 günlük kür süresi tamamlandıktan sonra korozyonlarını hızlandırmak amacı ile 50 gr Cl⁻/litrelik konsantrasyona sahip NaCl çözeltisine daldırılmalarından 90 gün sonra ölçülen yarı hücre potansiyel değerlerine göre sıralamaları aşağıdaki Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27’de sunulmuştur.

Şekil 5.25’e göre çelik donatıları kaplamalı numunelerden yarı hücre potansiyel değerleri içerisinde en az negatif değeri -192 mV ile Tekno Bond 650 epoksi kaplama ve sonra sırası ile -411 mV ile Sika Monotop 610 ve -666 mV ile sıcak daldırma galvaniz kaplama almışlardır.

Şekil 5.26’ya göre beton harçları içinde katkı malzemesi içeren numunelerden yarı hücre potansiyel değerleri içerisinde en az negatif değeri sırası ile -433 mV ile Tecno Silica silis dumanı ve -542 mV ile Sika Ferro Gard 901 almışlardır.

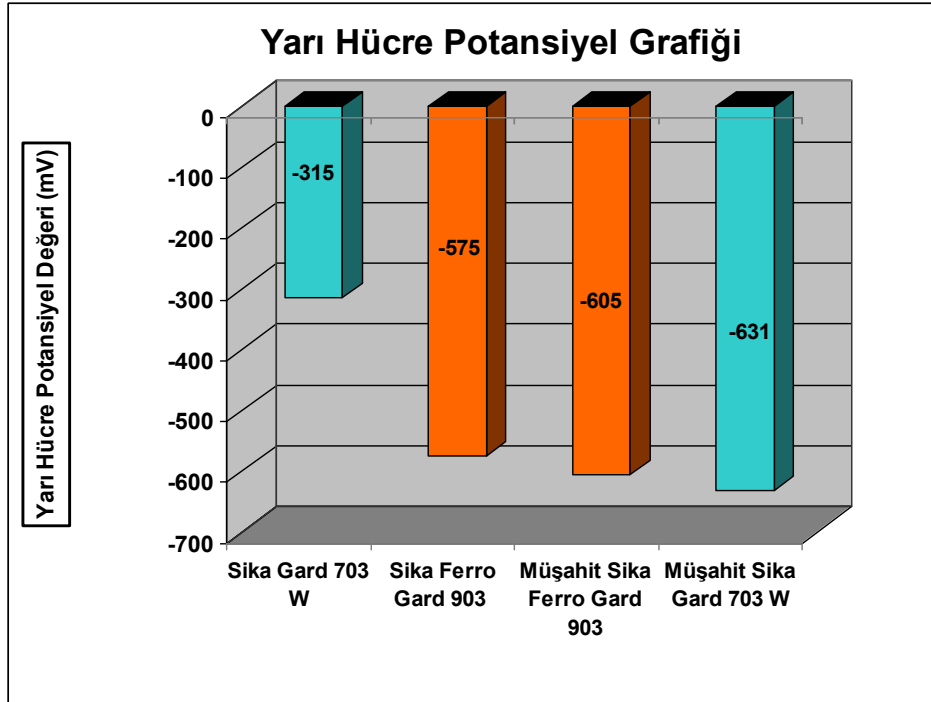


Şekil 5.25 Donatıları Kaplamalı Numunelerin ve Müşahit Numunelerin 90 Gün Sonundaki Yarı Hücre Potansiyel Değerleri Karşılaştırması



Şekil 5.26 Beton Harçlarında Katkı İçeren Numunelerin ve Müşahit Numunelerin 90 Gün Sonundaki Yarı Hücre Potansiyel Değerleri Karşılaştırması

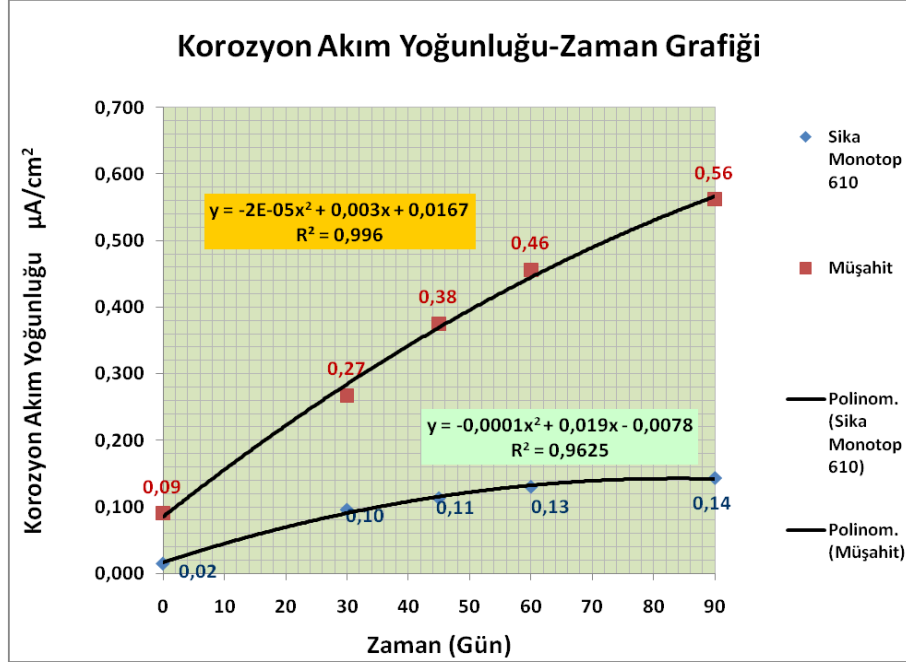
Şekil 5.27'ye göre beton yüzeyleri sürme esaslı kaplamalı numunelerden yarı hücre potansiyel değerleri içerisinde en az negatif değeri sırası ile -315 mV ile Sika Gard 703 W ve -575 mV ile Sika Ferro Gard 903 almışlardır.



Şekil 5.27 Beton Yüzeyleri Sürme Esaslı Kaplamalı Numunelerin ve Müşahit Numunelerin 90 Gün Sonundaki Yarı Hücre Potansiyel Değerleri Karşılaştırması

5.6 Korozyon Hızı Ölçümü Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Sika Mono Top 610 malzemesi ile donatı kaplamalı 3 adet numune 50 gr Cl-/litre konsantrasyona sahip sodyum klorür (NaCl) çözeltisine kısmi olarak daldırılmadan hemen önce yani 0. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,02 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Betonarme numunelerin 30. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ve 45. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,11 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Yine aynı grup numunelerin 60. ve 90. günlerde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları sırası ile $0,13 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $0,14 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak saptanmıştır. Sika Monotop 610 ile çelik donatı kaplamalı betonarme numunelerle aynı zamanda dökülen, kürlen ve NaCl çözeltisine daldırılan kontrol (müşahit) numunelerinin de çözeltiye daldırıldıkları günden başlanarak 90 gün süresince düzenli olarak korozyon akım değerleri ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) ölçülmüştür. En az üçer adet kontrol numunesinin ölçülen korozyon akım değerlerinin ortalamaları alınmıştır. Kontrol numunelerinin çözeltiye daldırılmadan hemen önce yani 0. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,09 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Kontrol numunelerinin 30. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,27 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ve 45. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,38 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Yine aynı grup kontrol numunelerinin 60. ve 90. günlerde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları sırası ile $0,46 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $0,56 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak saptanmıştır, Sika Monotop 610 malzemesi ile donatı kaplamalı 3 adet ve kontrol (kaplamasız) 3 adet numunelerine ait ölçülen korozyon akım yoğunluğu değerleri Şekil 5.28'de sunulmuştur.



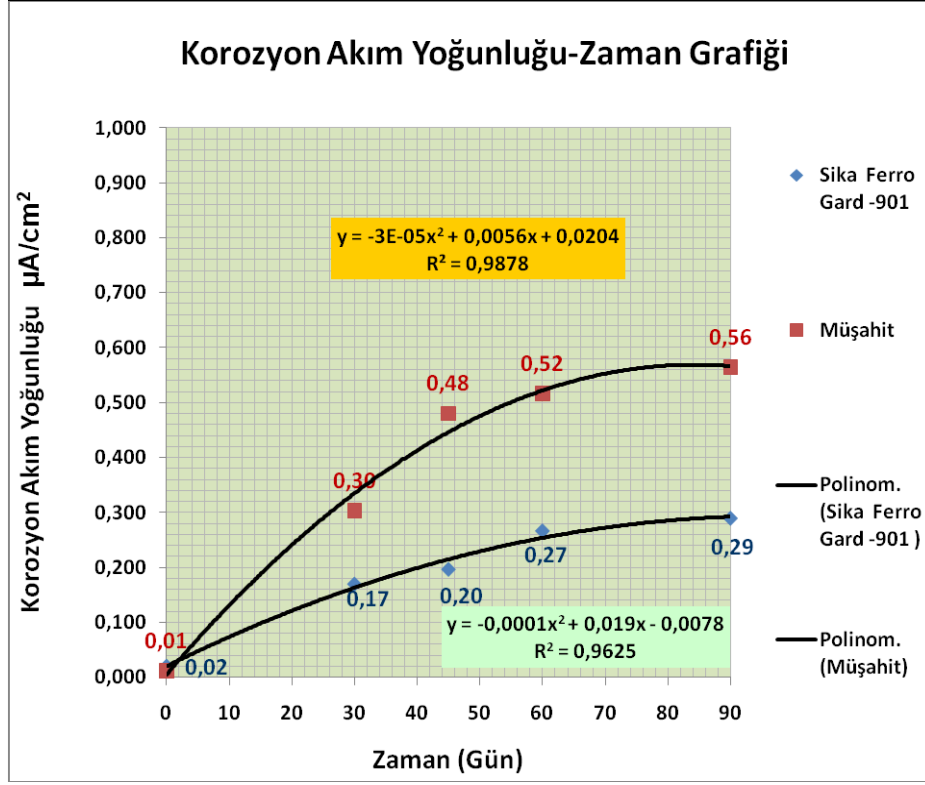
Şekil 5.28 Sika Mono Top -610 Kaplamalı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Korozyon Akım Yoğunluğu($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)-Zaman Grafiği

Sika Monotop 610 ile çelik donatı kaplamalı betonarme numunelerin 90. günün sonunda ölçülen $0,14 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerleri ortalaması, donatılarda ihmal edilebilir ya da pasif korozyon sınırını biraz geçmiş olup çok düşük korozyon varlığını gösteren bölgede kalmaktadır. Ayrıca yapılan pek çok literatür araştırmasına göre $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerinin altındaki donatılar betonun dayanıklılığı açısından risk oluşturmamaktadır. Örneğin Sakr yaptığı çalışmada, lineer polarizasyon direnç metodunun betondaki donatıların korozyon hızını değerlendirmede basit ve güvenilir bir teknik olduğunu belirtmiştir ve korozyon akım yoğunluğu değerinin $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'den küçük olduğunda korozyonun ihmal edilebileceğini $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'den büyük olduğunda ise aktif korozyonu işaret ettiğini bildirmiştir. Bu nedenle çalışmasında korozyon başlangıcı için eşik değeri olarak $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ akım değerini kullanmıştır [17]. Kayalı ve Zhu yaptıkları çalışmada, pek çok araştırmacının $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'lik akım değerinin üzerindeki akım değerlerini aktif korozyon değeri olarak kullandığını belirtmiştir. Ayrıca $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'lik akım değerinin üzerindeki değerlerin tehlikeli (riskli) olarak kabul edildiğini bildirmiştir [21].

Bu sonuca göre Sika Monotop 610 çimento, silis dumanı ve polimer modifiyeli kaplama ile kaplanan çelik donatılı betonarmelerde 90 günlük agresif şartlara maruz kalınmasında bile betonarmenin dayanıklılığı açısından bir tehlike tespit edilememiştir. Bu durum Sika Monotop 610 kaplamanın donatı çeliğini agresif klor iyonlarına karşı ve

beton porlarından difüzyon yolu ile gelen ve korozyonun oluşabilmesi için mutlaka gerekli olan oksijenden ve elektrolit vazifesi gören su ile temastan koruduğunu ve bu sayede kaplamasız çelik donatılar ile karşılaştırıldığında çok uzun süre betonarme yapıyı korozyondan koruyabileceğini göstermektedir. Ayrıca korozyon akım değer ölçümleri 90 gün sonundaki ortalama yarı hücre potansiyel değerinin oksijenin eksikliğine bağlı ve donatı ile temasının engellenmesine bağlı olarak korozyon bakımından aktif bölgede tespit edildiğini de doğrulamaktadır. Kaplamasız donatılı betonarme numunelerin ise 45. günde ölçülen korozyon akım değerleri bu numunelerde korozyonun oluştuğunu göstermektedir ve kontrol numuneleri için 90. günün sonunda elde edilen $0,56 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerleri ortalaması orta şiddette korozyon bölgesine girmektedir.

Sika Ferro Gard 901 ticari isimli nitrojen içeren organik ve inorganik esaslı karışım inhibitörü katkılı 3 adet numunenin 50 gr Cl-/litre konsantrasyona sahip sodyum klorür (NaCl) çözeltisine kısmi olarak daldırılmadan hemen önce yani 0. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,020 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Betonarme numunelerin 30. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ve 45. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Yine aynı grup numunelerin 60. ve 90. günlerde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları sırası ile $0,27 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $0,29 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak saptanmıştır. Sika Ferro Gard 901 katkılı betonarme numunelerle aynı zamanda dökülen, kürlen ve NaCl çözeltisine daldırılan kontrol (müşahit) numunelerinin de çözeltiliye daldırıldıkları günden başlanarak 90 gün süresince düzenli olarak korozyon akım değerleri ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) ölçülmüştür. En az üçer adet kontrol numunesinin ölçülen korozyon akım değerlerinin ortalamaları alınmıştır. Kontrol numunelerinin çözeltiliye daldırılmadan hemen önce yani 0. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,01 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Kontrol numunelerinin 30. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,30 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ve 45. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Yine aynı grup kontrol numunelerinin 60. ve 90. günlerde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları sırası ile $0,52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $0,56 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak saptanmıştır, Sika Ferro Gard 901 malzemesi ile beton harcına katkı yapılmış 3 adet ve kontrol (katkısız) 3 adet numunelerine ait ölçülen korozyon akım yoğunluğu değerleri Şekil 5.29'da sunulmuştur.



Şekil 5.29 Sika Ferro Gard 901 Katkılı Numuneleri ve Kontrol Numuneleri Korozyon Akım Yoğunluğu($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)-Zaman Grafiği

Sika Ferro Gard 901 katkılı betonarme numunelerin 90. günün sonunda ölçülen $0,29 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerleri ortalaması donatılarda düşük korozyon varlığını gösteren bölgede kalmaktadır. Bunun nedeni Sika Ferro Gard 901 inhibitörünün beton harcına homojen bir şekilde karışmamış olması olabilir. Ayrıca ortamın da çok agresif olması ve bu ortamda numunelerin uzun süre bekletilmesi zaman içerisinde inhibitörün kimyasal etkinliğini biraz düşürmüş olabilir. Ancak yapılan pek çok literatür araştırmasına göre $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerinin altındaki donatılar betonun dayanıklılığı açısından risk oluşturmamaktadır. Bu sonuca göre Sika Ferro Gard 901 katkılı betonarmelerde 90 günlük agresif şartlara maruz kalınmasında bile betonarmenin dayanıklılığı açısından bir tehlike tespit edilememiştir. Bu durum Sika Ferro Gard 901 inhibitörünün donatı yüzeyinde anodik ve katodik bölgelerde koruyucu bir film tabakası oluşturarak donatı çeliğini agresif klor iyonlarına ve oksijene karşı oldukça iyi bir şekilde koruduğunu ve kontrol numuneleri ile karşılaştırma yapıldığında etkinliğinin oldukça belirgin olduğu ve uzun süre betonarme yapıyı korozyondan koruyabileceğini göstermektedir. Çünkü kontrol numunelerinde 30. günde ölçülen korozyon akım değerleri bu numunelerde korozyonun oluştuğunu göstermektedir ve kontrol numuneleri

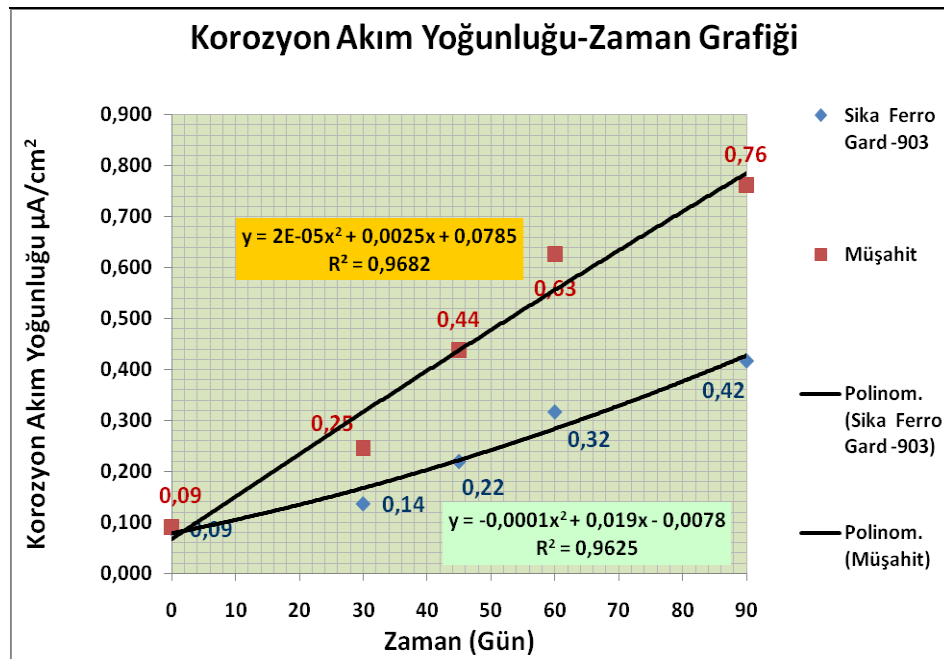
için 90. günün sonunda elde edilen $0,56 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerleri ortalaması orta şiddette korozyon bölgesine girmektedir.

Ayrıca korozyon akım değer ölçümleri, 90. gün sonundaki ortalama yarı hücre potansiyel değerinin inhibitörün betonun por çözeltisinin iletkenliğini arttırmasına, inhibitörün donatının anodik ve katodik bölgelerinde koruyucu bir film tabakası oluşturması neticesinde ve betonun çözelti içinde olması sebebi ile porlarının nispeten su ile doymuş olması sebebi ile donatı yüzeyi ve çevresindeki oksijenin eksikliğine ve oksijenin donatı ile temasının engellenmesine bağlı olarak korozyon bakımından aktif bölgede tespit edildiğini de doğrulamaktadır.

Sika Ferro Gard 903 ticari isimli karışım inhibitörü ile beton dış yüzeyleri fırça ile sürülerek kaplanan 3 adet numunenin 50 gr Cl^- /litre konsantrasyona sahip sodyum klorür (NaCl) çözeltisine kısmi olarak daldırılmadan hemen önce yani 0. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,09 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Betonarme numunelerin 30. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,14 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ve 45. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,220 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Yine aynı grup numunelerin 60. ve 90. günlerde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları sırası ile $0,32 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $0,42 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak saptanmıştır. Sika Ferro Gard 903 katkılı betonarme numunelerle aynı zamanda dökülen, kürlen ve NaCl çözeltisine daldırılan kontrol (müşahit) numunelerinin de çözeltiye daldırıldıkları günden başlanarak 90 gün süresince düzenli olarak korozyon akım değerleri ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) ölçülmüştür. En az üçer adet kontrol numunesinin ölçülen korozyon akım değerlerinin ortalamaları alınmıştır. Kontrol numunelerinin çözeltiye daldırılmadan hemen önce yani 0. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,090 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Kontrol numunelerinin 30. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ve 45. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,44 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Yine aynı grup kontrol numunelerinin 60. ve 90. günlerde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları sırası ile $0,63 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $0,76 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak saptanmıştır, Sika Ferro Gard 903 malzemesinden beton dış yüzeyine sürülmüş 3 adet ve kontrol (kaplamasız) 3 adet numunelerine ait ölçülen korozyon akım yoğunluğu değerleri Şekil 5.30'da sunulmuştur.

Sika Ferro Gard 903 katkılı betonarme numunelerin 90. günün sonunda ölçülen $0,42 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerleri ortalaması donatılarda düşük korozyon varlığını gösteren bölgede kalmaktadır. Bunun nedeni Sika Ferro Gard 903 inhibitörünün beton

yüzeyinden betonun iç kısmına doğru homojen bir şekilde nüfuz etmemesinden kaynaklanmış olabilir. Ancak kontrol numunelerinin 90. günün sonunda elde edilen $0,76 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerleri ortalaması neredeyse yüksek şiddette korozyon bölgesine girmekte olduğu dikkate alınırsa Sika Ferro Gard 903 inhibitörünün donatı yüzeyinde anodik ve katodik bölgelerde koruyucu bir film tabakası oluşturarak donatı çeliğini agresif klor iyonlarına ve oksijene karşı kontrol numunelerine göre oldukça iyi bir şekilde koruduğunu ve kontrol numuneleri ile karşılaştırma yapıldığında etkinliğinin oldukça belirgin olduğu ve uzun süre betonarme yapıyı korozyondan koruyabileceğini göstermektedir.

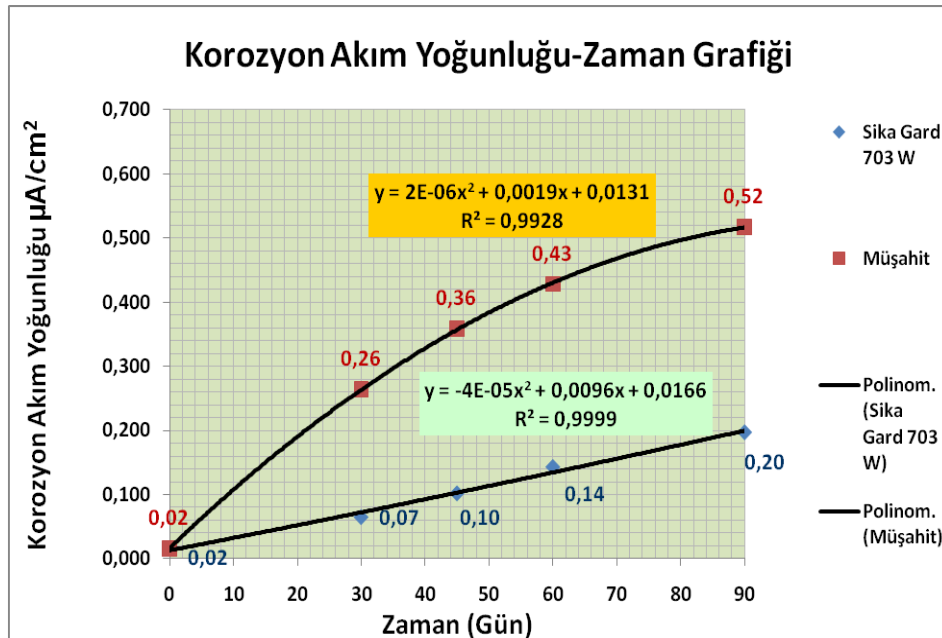


Şekil 5.30 Sika Ferro Gard 903 Kaplamalı (Sürmeli) Numuneler ve Kontrol Numuneleri Korozyon Akım Yoğunluğu($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)-Zaman Grafiği

Ayrıca korozyon akım değer ölçümleri 90. gün sonundaki ortalama yarı hücre potansiyel değerinin inhibitörün betonun por çözeltisinin iletkenliğini arttırmasına, inhibitörün donatının anodik ve katodik bölgelerinde koruyucu bir film tabakası oluşturması neticesinde ve betonun çözelti içinde olması sebebi ile porlarının nispeten su ile doymuş olması sebebi ile donatı yüzeyi ve çevresindeki oksijenin eksikliğine ve oksijenin donatı ile temasının engellenmesine bağlı olarak korozyon bakımından aktif bölgede tespit edildiği düşüncesine de destek olmaktadır.

Sika Ferro Gard 703 W ticari isimli ve silan/siloksan birleşimli emülsiyon ile beton dış yüzeyleri fırça ile sürülerek kaplanan 3 adet numunenin 50 gr Cl^- /litre konsantrasyona sahip sodyum klorür (NaCl) çözeltisine kısmi olarak daldırılmadan hemen önce yani 0.

günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,02 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Betonarme numunelerin 30. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,07 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ve 45. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Yine aynı grup numunelerin 60. ve 90. günlerde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları sırası ile $0,14 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak saptanmıştır. Sika Ferro Gard 703 W katkılı betonarme numunelerle aynı zamanda dökülen, kürlenen ve NaCl çözeltisine daldırılan kontrol (müşahit) numunelerinin de çözeltiye daldırıldıkları günden başlanarak 90 gün süresince düzenli olarak korozyon akım değerleri ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) ölçülmüştür. En az üçer adet kontrol numunesinin ölçülen korozyon akım değerlerinin ortalamaları alınmıştır. Kontrol numunelerinin çözeltiye daldırılmadan hemen önce yani 0. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,02 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Kontrol numunelerinin 30. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,26 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ve 45. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,36 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Yine aynı grup kontrol numunelerinin 60. ve 90. günlerde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları sırası ile $0,43 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $0,52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak saptanmıştır, Sika Ferro Gard 703 malzemesinden beton dış yüzeyine sürülmüş 3 adet ve kontrol (kaplamasız) 3 adet numunelere ait ölçülen korozyon akım yoğunluğu değerleri Şekil 5.31’de sunulmuştur.



Şekil 5.31 Sika Ferro Gard 703 W Kaplamalı (Sürmeli) Numuneler ve Kontrol Numuneleri Korozyon Akım Yoğunluğu ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)-Zaman Grafiği

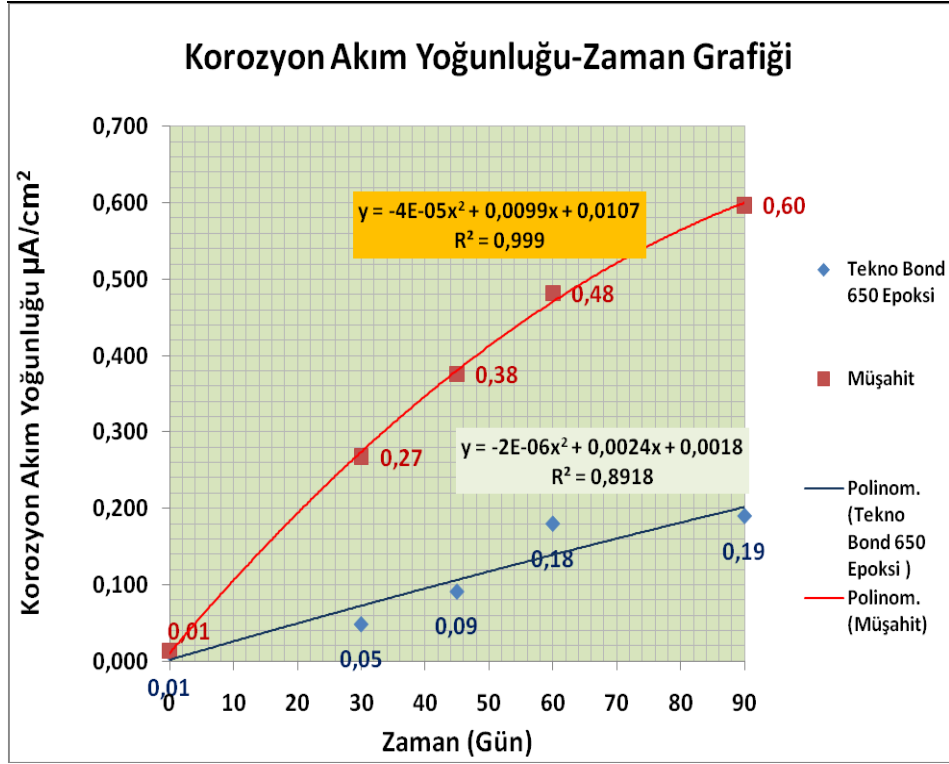
Sikagard-703 W ticari isimli ve silan/siloksan birleşimli emülsiyon ile kaplamalı betonarme betonarme numunelerin 90. günün sonunda ölçülen $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerleri ortalaması donatılarda pasif korozyon sınırını biraz geçmiş ve çok düşük korozyon varlığını gösteren bölgede kalmaktadır. Ayrıca yapılan pek çok literatür araştırmasına göre $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerinin altındaki donatılar betonun dayanıklılığı açısından risk oluşturmamaktadır. Bu sonuca göre Sikagard-703 W ticari isimli ve silan/siloksan birleşimli emülsiyon ile kaplanan çelik donatılı betonarmelerde 90 günlük agresif şartlara maruz kalınmasında bile betonarmenin dayanıklılığı açısından bir tehlike tespit edilememiştir. Bu durum Sikagard-703 W kaplamanın betonu ve donatı çeliğini agresif klor iyonlarına karşı ve beton porlarından difüzyon yolu ile gelen ve korozyonun oluşabilmesi için mutlaka gerekli olan oksijenden ve elektrolit vazifesi gören su ile temastan koruduğunu ve bu sayede betonarme kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında çok uzun süre betonarme yapıyı korozyondan koruyabileceğini göstermektedir. Ayrıca korozyon akım değer ölçümleri 90 gün sonundaki -315 mV 'luk ortalama yarı hücre potansiyel değerinin oksijenin eksikliğine bağlı ve donatı ile temasının engellenmesine bağlı olarak korozyon bakımından belirsiz bölgede tespit edildiğini de doğrulamaktadır. Kaplamasız donatılı betonarme numunelerin ise 45. günde ölçülen korozyon akım değerleri bu numunelerde korozyonun oluştuğunu göstermektedir ve kontrol numuneleri için 90. günün sonunda elde edilen $0,52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerleri ortalaması orta şiddette korozyon bölgesine girmektedir.

Tecno bond 650 epoksi reçine esaslı, iki bileşenli solventli epoksi boya ile donatı kaplamalı 3 adet numunenin 50 gr Cl^- /litre konsantrasyona sahip sodyum klorür (NaCl) çözeltisine kısmi olarak daldırılmadan hemen önce yani 0. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,01 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Betonarme numunelerin 30. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,05 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ve 45. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,09 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Yine aynı grup numunelerin 60. ve 90. günlerde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları sırası ile $0,18 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $0,19 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak saptanmıştır. Tecno bond 650 ile çelik donatı kaplamalı betonarme numunelerle aynı zamanda dökülen, kürlen ve NaCl çözeltisine daldırılan kontrol (müşahit) numunelerinin de çözeltiye daldırıldıkları günden başlanarak 90 gün süresince düzenli olarak korozyon akım değerleri ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) ölçülmüştür. En az üçer adet kontrol numunesinin ölçülen korozyon akım değerlerinin

ortalamları alınmıştır. Kontrol numunelerinin çözeltiye daldırılmadan hemen önce yani 0. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamları $0,01 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Kontrol numunelerinin 30. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamları $0,27 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ve 45. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamları $0,38 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Yine aynı grup kontrol numunelerinin 60. ve 90. günlerde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamları sırası ile $0,48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $0,60 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak saptanmıştır, Tecno Bond 650 epoksi malzemesi ile donatı kaplamalı 3 adet ve kontrol (kaplamasız) 3 adet numunelere ait ölçülen korozyon akım yoğunluğu değerleri Şekil 5.32’de sunulmuştur.

Tecno bond 650 ile çelik donatı kaplamalı betonarme numunelerin 90. günün sonunda ölçülen $0,190 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerleri ortalaması donatılarda ihmal edilebilir veya pasif korozyon sınırını biraz geçmiş ve çok düşük korozyon varlığını gösteren bölgede kalmaktadır. Ayrıca yapılan pek çok literatür araştırmasına göre $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerinin altındaki donatılar betonun dayanıklılığı açısından risk oluşturmamaktadır. Bu sonuca göre Tenobond 650 epoksi reçine esaslı kaplama ile kaplanan çelik donatılı betonarmelerde 90 günlük agresif şartlara maruz kalınmasında bile betonarmenin dayanıklılığı açısından bir tehlike tespit edilememiştir. Bu durum Tenobond 650 epoksi reçine kaplamanın donatı çeliğini agresif klor iyonlarına karşı ve beton porlarından difüzyon yolu ile gelen ve korozyonun oluşabilmesi için mutlaka gerekli olan oksijenden ve elektrolit vazifesi gören su ile temastan koruduğunu ve bu sayede kaplamasız çelik donatılar ile karşılaştırıldığında çok uzun süre betonarme yapıyı korozyondan koruyabileceğini göstermektedir. Ayrıca korozyon akım değer ölçümleri 90 gün sonundaki -192 mV 'luk ortalama yarı hücre potansiyel değerinin, epoksi kaplamanın donatı ile hem oksijen hem de suyun ve agresif iyonların temasını kesmesine bağlı olarak korozyon bakımından pasif bölgede tespit edildiğini de doğrulamaktadır ve donatılarda %90 olasılıkla korozyonun olmadığını göstermektedir.

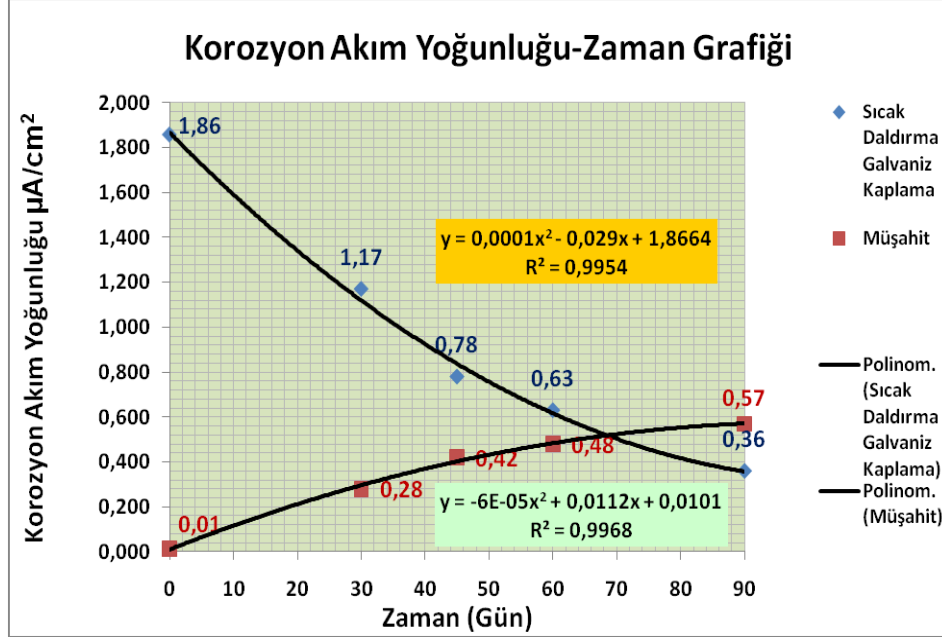
Kaplamasız donatılı betonarme numunelerin ise 45. günde ölçülen korozyon akım değerleri bu numunelerde korozyonun oluştuğunu göstermektedir ve kontrol numuneleri için 90. günün sonunda elde edilen $0,60 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerleri ortalaması orta şiddette korozyon bölgesine girmektedir.



Şekil 5.32 Tecno bond 650 Epoksi Kaplamalı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Korozyon Akım Yoğunluğu($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)-Zaman Grafiği

Sıcak Daldırma yöntemi ile donatıları çinko kaplamalı 3 adet numune dökülür dökülmez ilk birkaç saat içinde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $10,78 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Numunelerin 50 gr Cl-/litre konsantrasyona sahip sodyum klorür (NaCl) çözeltisine kısmi olarak daldırılmadan hemen önce yani 0. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $1,86 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Betonarme numunelerin 30. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $1,17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ve 45. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,78 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Yine aynı grup numunelerin 60. ve 90. günlerde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları sırası ile $0,63 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $0,36 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak saptanmıştır. Sıcak daldırma yöntemi ile çelik donatı kaplamalı betonarme numunelerle aynı zamanda dökülen, kürlen ve NaCl çözeltisine daldırılan kontrol (müşahit) numunelerinin de çözeltiye daldırıldıkları günden başlanarak 90 gün süresince düzenli olarak korozyon akım değerleri ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) ölçülmüştür. En az üçer adet kontrol numunesinin ölçülen korozyon akım değerlerinin ortalamaları alınmıştır. Kontrol numunelerinin çözeltiye daldırılmadan hemen önce yani 0. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,01 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Kontrol numunelerinin 30. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,28 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ve 45. günde ölçülen korozyon akım

değerleri ortalamaları $0,42 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Yine aynı grup kontrol numunelerinin 60. ve 90. günlerde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları sırası ile $0,48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $0,57 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak saptanmıştır, sıcak daldırma çinko ile donatı kaplamalı 3 adet ve kontrol (kaplamasız) 3 adet numunelere ait ölçülen korozyon akım yoğunluğu değerleri Şekil 5.33’de sunulmuştur.

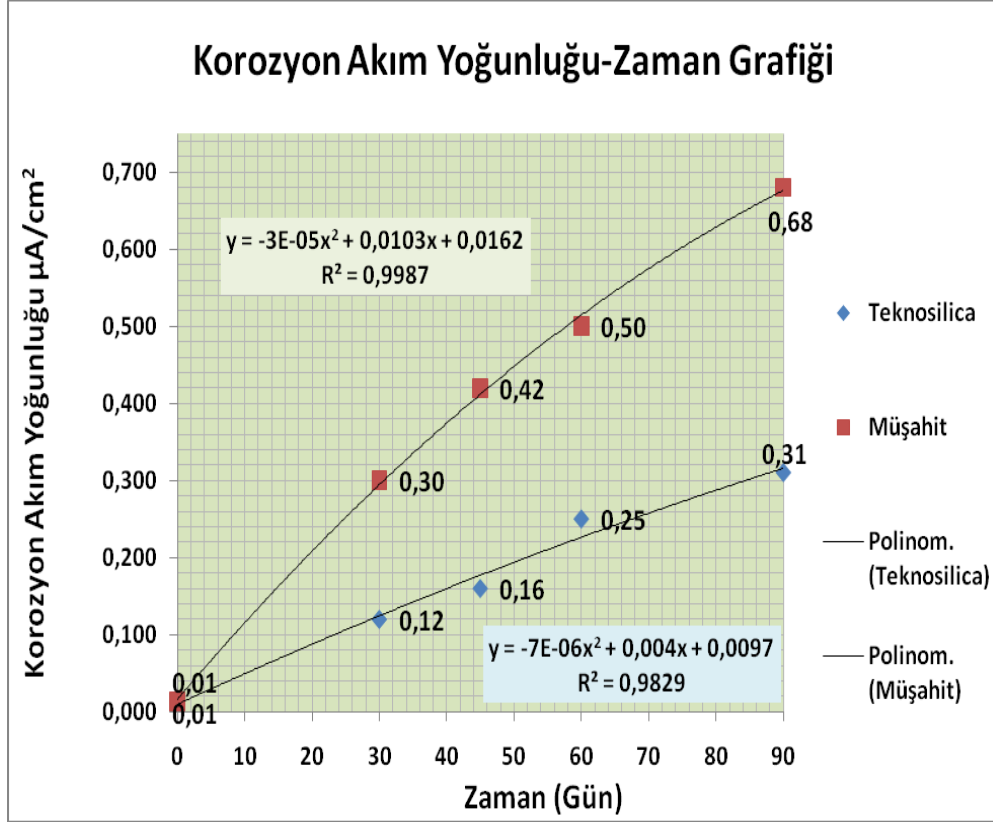


Şekil 5.33 Sıcak Daldırma Galvaniz Kaplamalı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Korozyon Akım Yoğunluğu($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)-Zaman Grafiği

Sıcak daldırma galvaniz yöntemi ile çinko kaplanılan çelik donatılı betonarme numuneler döküldükten itibaren birkaç saat içinde ölçülen korozyon akım yoğunluklarının ortalamasının $10,78 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ gibi yüksek bir değer çıkmasının sebebi beton döküldükten sonra por çözeltisinin kalsiyum hidroksit ile doymuş olması neticesinde pH’ın 13’ün üzerine çıkması ve birkaç saat boyunca hidratasyonun devamı esnasında pH’ın sürekli artarak 13,7 değerine kadar ulaşması sonucu çinkonun termodinamik olarak kararsız davranması ve kuvvetlice çözünmesidir. Bu çözünme reaksiyonunun sonucunda oluşan çinko korozyon ürünleri kalsiyum ile birleşerek kalsiyum hidroksi zinkat ($\text{Ca}(\text{Zn}(\text{OH})_3)_2$) ismi verilen ve çinkoyu yeni oluşabilecek korozyona karşı pasive etme özelliğine sahip kristalin malzemenin oluşumu neticesinde çözünmenin durması ve pasivasyonun başlaması ile betonarme numunelerin 0. günden 90. güne kadar NaCl içeren çözeltideki korozyon akım yoğunluğu değerleri gittikçe düşmüştür ve 90. günün sonunda akım yoğunluğu, $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ’nin altında olan, çinkonun oldukça pasif durumda olduğunu gösteren $0,36 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ’lik ihmal edilebilir ortalama

değere inmiştir. Akım yoğunluğunun düşmesinde oluşan çinko oksit tabakasının etkisi öncelikli olmakla birlikte ayrıca korozyona karşı korumada betonun vibrasyonunun iyi yapılması ve beton porlarındaki süreksizliklerinde çözeltilerden betona geçen zararlı klor iyonlarının donatıya ulaşmasını sınırlandırdığı ve bu şekilde korozyon başlangıcının geciktirildiği düşünülmektedir. Bu değer hafif korozyon bölgesine girmektedir ancak bu durum donatıda hafif korozyon olduğu anlamına gelmemektedir. Çinkonun yüzeyinde oluşan ve pasivasyonu sağlayan ince oksit film tabakası korozyon akım yoğunluğunun tamamen pasifliği gösteren daha düşük değerlerde çıkmasına engel olmuştur.

Tecno Silica ticari isimli silis dumanı katkılı betonarme numuneler döküldükten ve 28 günlük kür süresi tamamlandıktan sonra numuneler 50 gr Cl⁻/litre su içeren NaCl çözeltisine daldırılmıştır. Betonarme numunelerin, daha önce ölçülen yarı hücre potansiyel değerleri ile karşılaştırma yapmak amacı ile NaCl içeren çözeltiliye daldırıldıkları günden başlanarak 90 gün süresince düzenli olarak korozyon akım değerleri ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) ölçülmüştür. En az üçer numunenin ölçülen korozyon akım değerlerinin ortalamaları alınmıştır. Numunelerin çözeltiliye daldırılmadan hemen önce yani 0. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,01 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Betonarme numunelerin 30. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,12 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ve 45. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,16 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Yine aynı grup numunelerin 60. ve 90. günlerde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları sırası ile $0,25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $0,31 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak saptanmıştır. Tecno Silica silis dumanı katkılı betonarme numunelerle aynı zamanda dökülen, kürlen ve NaCl çözeltisine daldırılan kontrol (müşahit) numunelerinin de çözeltiliye daldırıldıkları günden başlanarak 90 gün süresince düzenli olarak korozyon akım değerleri ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) ölçülmüştür. En az üçer adet kontrol numunesinin ölçülen korozyon akım değerlerinin ortalamaları alınmıştır. Kontrol numunelerinin çözeltiliye daldırılmadan hemen önce yani 0. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,012 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Kontrol numunelerinin 30. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,30 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ve 45. günde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları $0,42 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Yine aynı grup kontrol numunelerinin 60. ve 90. günlerde ölçülen korozyon akım değerleri ortalamaları sırası ile $0,50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $0,68 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak saptanmıştır, Tecno Silica silis dumanı ile beton harcına katkı yapılmış 3 adet ve kontrol (katkisiz) 3 adet numunelere ait ölçülen korozyon akım yoğunluğu değerleri Şekil 5.34’de sunulmuştur.



Şekil 5.34 Tecno Silica Silis Dumanı Katkılı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Korozyon Akım Yoğunluğu(µA/cm²)-Zaman Grafiği

Tecno Silica ticari isimli silis dumanı esaslı katkılı betonarme numunelerin 90. günün sonunda ölçülen 0,310 µA/cm² lik korozyon akım değerleri ortalaması donatılarda düşük korozyon varlığını gösteren bölgede kalmaktadır. Bunun nedeni yarı hücre potansiyel ölçüm değerleri yorumlarında da belirtildiği gibi Tecno Silica silis dumanı esaslı katkının beton harcına homojen bir şekilde karışmamış olması olabilir. Silis dumanının içeriğinde bulunan demir oksitler de katalitik etki yaparak düşük miktarlarda da olsa çeliğin farklı bölgelerde farklı oranlarda korozyona uğramasına neden olmuş olabilir. Ancak silis dumanı çok ince partiküllere sahip olduğundan betonun yoğunluğunu arttırarak ve beton gözenekleri arasındaki bağlantıları süreksizleştirerek dışarıdan suyun ve klor gibi bazı zararlı iyonların girişini zayıflatmaktadır. Bu sayede de dış ortam kaynaklı korozyon oluşumunu uzun süre geciktirmekte ve engellemektedir. Ayrıca yapılan pek çok literatür araştırmasına göre 0,3 µA/cm² lik korozyon akım değerinin altındaki donatılar betonun dayanıklılığı açısından risk oluşturmamaktadır. Buna göre silis dumanı esaslı katkılı betonarme numunelerin 90. günün sonunda ölçülen 0,310 µA/cm² lik korozyon akım değerleri ortalaması hemen hemen betonlarda dayanıklılık için gerekli olan akım yoğunluğu sınır değerine yakındır. Bu nedenle Tecno

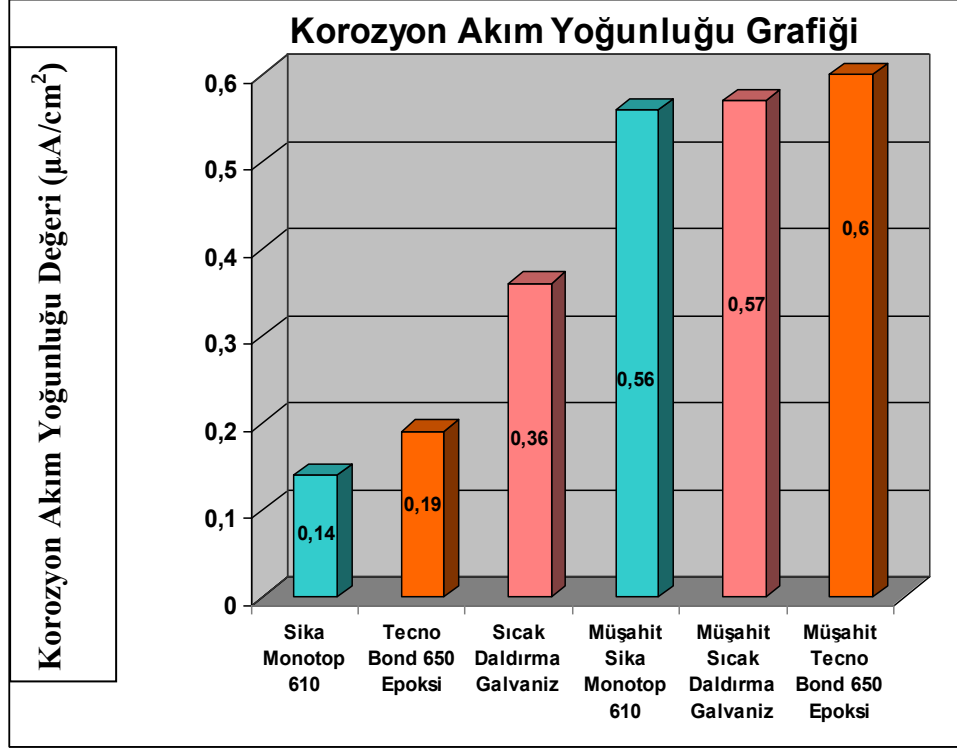
Silica silis dumanı esaslı katkılı betonarmelerde 90 günlük agresif şartlara maruz kalınmasında bile betonarmenin dayanıklılığı açısından bir tehlike olmadığı kabul edilebilir. Netice olarak Tecno Silica silis dumanı katkısının donatı çeliğini agresif klor iyonlarına ve oksijene karşı oldukça iyi bir şekilde koruduğunu ve kontrol numuneleri ile karşılaştırma yapıldığında etkinliğinin oldukça belirgin olduğu ve önlemsiz kontrol numunelerine göre daha uzun süre betonarme yapıyı korozyondan koruyabileceğini göstermektedir. Çünkü kontrol numunelerinde 45. günde ölçülen korozyon akım değerleri bu numunelerde korozyonun oluştuğunu göstermektedir ve kontrol numuneleri için 90. günün sonunda elde edilen $0,68 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerleri ortalaması orta şiddette korozyon bölgesine girmektedir.

Korozyon akım yoğunluğu ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) ölçüm sonuçlarına göre donatı kaplamalı, betona katkılı ve betona sürme esaslı kaplamalı tüm numunelerin ve bunların müşahitlerinin akım yoğunlukları karşılaştırmaları sırası ile Şekil 5.35, Şekil 5.36 ve Şekil 5.37’de gösterilmektedir. Korozyon akım yoğunluğu değerleri incelendiğinde tüm katkılı numunelerin korozyon akım yoğunluğu değerlerinin kontrol numunelerin korozyon akım yoğunluğu değerlerine göre oldukça düşük kaldığı ve korozyon akım yoğunluğu değerlerine göre katkı malzemelerinin betonarme numuneleri donatı korozyonuna karşı oldukça etkin bir şekilde koruduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca betonarme numunelerimize uygulanan ve donatı korozyonunu tespit etmekte güvenilir bir yöntem olan korozyon akım yoğunluğu ölçümü sonuçları aynı numune grubuna uygulanan ve Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27’de sunulan yarı hücre potansiyel ölçümü sonuçları ile karşılaştırıldığında numunelerin yarı hücre potansiyel ölçümü sonuçlarında da tüm katkılı numunelerin yarı hücre potansiyel değerlerinin aynı numunelerin müşahitlerine ait yarı hücre potansiyel değerlerine göre daha pozitif yönde olduğu tespit edilmiştir. Yarı hücre potansiyel değerleri de aynı korozyon akım yoğunluğu değerleri gibi katkı malzemelerinin korozyonu önlemedeki etkinliğini doğrulamaktadır.

Aşağıdaki Şekil 5.35’e göre 90 günlük hızlandırılmış korozyon süresi sonunda, Sika Monotop 610 malzemesi ile donatıları kaplamalı betonarme numuneler $0,14 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değeri ile en düşük korozyon akım yoğunluğuna sahip olmuştur. Bu malzemeyi sırası ile Tecno Bond 650 epoksi donatı kaplaması $0,19 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve sıcak daldırma çinko donatı kaplaması $0,36 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ’lik korozyon akım yoğunluğu ile takip etmiştir. Korozyon önleyici donatı kaplamalı betonarme numuneleri sırası ile müşahit (kontrol)

numunelerinden Sika Monotop 610 müşahit 0,56 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, sıcak daldırma galvaniz müşahit 0,57 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve Tekno Bond epoksi müşahit 0,6 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'lik korozyon akım yoğunluk değerleri ile takip etmişlerdir.



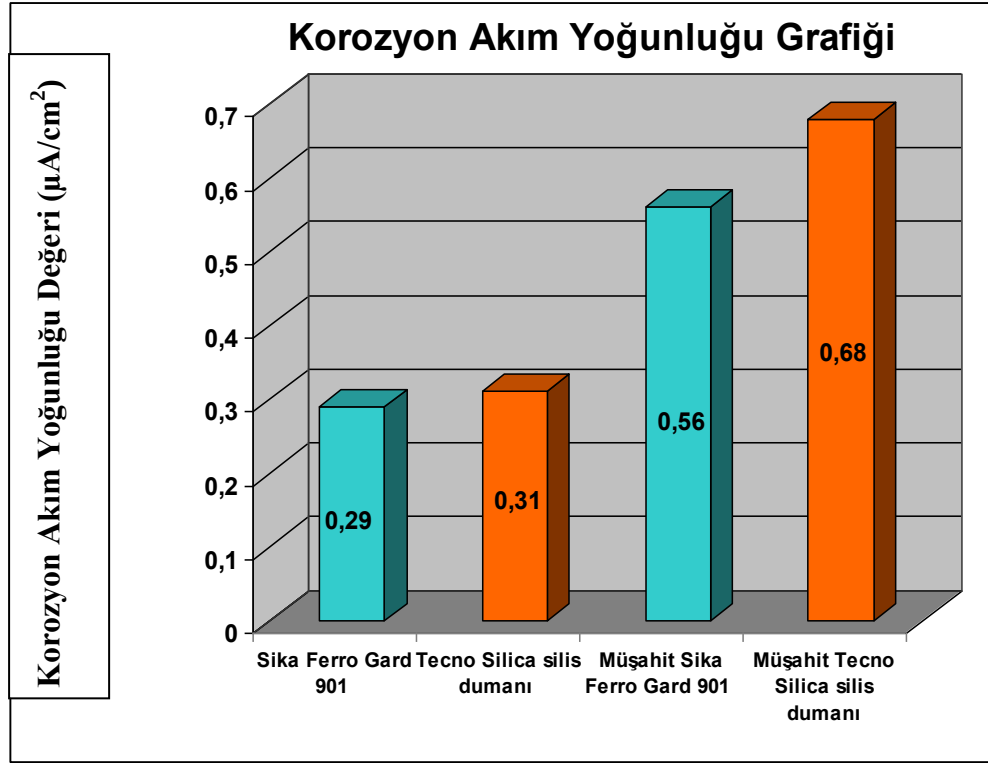
Şekil 5.35 Donatıları Kaplamalı Numunelerin ve Müşahit Numunelerin 90 Gün Sonundaki Korozyon Akım Yoğunluğu Değerleri Karşılaştırması

Bu üç farklı donatı kaplama malzemesi içeren grupta yer alan Sika Monotop 610 malzemesi ile donatıları kaplamalı numuneler sıralama açısından bakıldığında korozyon akım yoğunluğu en düşük yani korozyona uğramayan numuneler olmakla birlikte yarı hücre potansiyel değerleri açısından pozitif yönde eğilimde ikinci sırada yer almaktadır. Ancak daha öncede belirtildiği gibi yarı hücre potansiyel ölçümü değerleri korozyonun varlığı hakkında bilgi sağlarken korozyon hızı hakkında bilgi vermemektedir ve betona gömülü çeliğin yarı hücre potansiyel değerleri korozyonun olup olmadığını saptamak için yeterli gelmemektedir. Çünkü oksijen mevcudiyeti, beton porozitesi, elektriksel akım ve sıcaklık, betonun elektriksel direnci, betonun pH'ı, betonun nem içeriği, hücre yerleştirme, inhibitör katkıları vs. gibi etkenler yarı hücre potansiyel okumalarını önemli bir biçimde etkilemektedir. Sika Monotop 610 malzemesi ile donatıları kaplamalı numunelerde de inhibitör bulunması sonucu por çözeltisindeki iletkenliğin artışı, sıkı vibrasyon ve betonun uzun süre çözelti içinde kalması sonucu beton porlarının su ile doyması ve oksijen çözünürlüğündeki azalma neticesi donatı

çevresindeki oksijen eksikliği potansiyel değerinin negatif yöne doğru kaymasına etki etmiştir.

Donatı kaplamalı numuneler arasında sıralama yapıldığında, sıcak daldırma galvaniz kaplamalı numuneler, korozyon akım yoğunluğu açısından üçüncü sırada en az akım yoğunluğuna sahiptirler ancak ölçtüğümüz akım yoğunluğu değeri hafif korozyon bölgesine girmekle beraber, donatıda hafif korozyon olduğu anlamına gelmemektedir. Çinkonun yüzeyinde oluşan ve pasivasyonu sağlayan ince oksit film tabakası korozyon akım yoğunluğunun tamamen pasifliği gösteren daha düşük değerlerde çıkmasına engel olmuştur. Bu durum yarı hücre potansiyel ölçüm sonuçları ile de desteklenmektedir. Sıcak daldırma galvaniz kaplamalı numuneler yarı hücre potansiyel değerleri açısından sıralamada diğer numunelere göre en negatif değere sahip olmasına rağmen galvaniz kaplama için bu değer pasif bölgeyi göstermektedir ve daha önce belirttiğimiz pek çok yayında da -600 mV'a yaklaşan yarı hücre potansiyel ölçüm değerlerinin galvaniz kaplamalı çelik donatılar için pasif durumu gösterdiği bildirilmiştir. Yani sıcak daldırma galvaniz kaplamalı numunelerin yarı hücre potansiyel değerleri korozyon açısından pasif bölgede olduklarını göstermektedir fakat korozyona karşı pasiflik durumunu diğer numunelerle karşılaştırabilmek için ayrıca mikro yapı analiz sonuçlarından da yararlanılmalıdır.

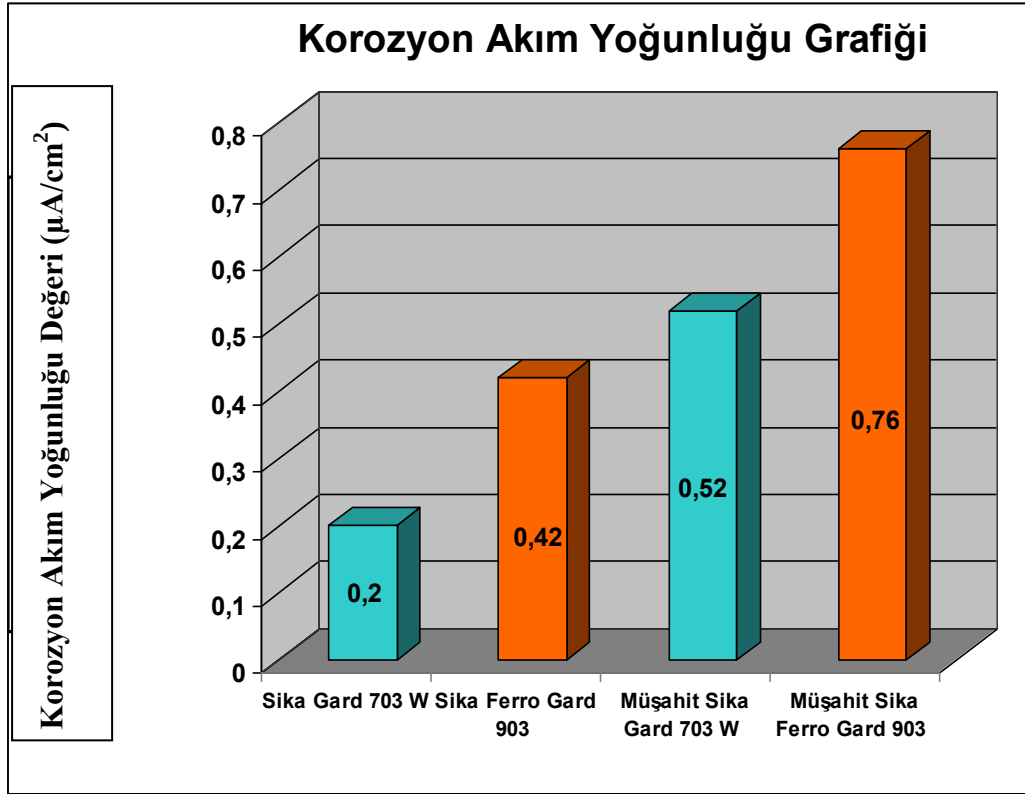
Aşağıdaki Şekil 5.36'ya göre 90 günlük hızlandırılmış korozyon süresi sonunda Sika Ferro Gard 901 beton katkısı $0,29 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ korozyon akım yoğunluğuna sahip olmuştur ve bu katkıyı Tecno Silica silis dumanı beton katkısı $0,31 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'lik korozyon akım yoğunluğu ile takip etmiştir. Korozyon önleyici katkılı betonarme numuneleri sırası ile müşahit (kontrol) numunelerinden Sika Ferro Gard 901 müşahit $0,56 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve Tekno Silica müşahit $0,68 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'lik korozyon akım yoğunluk değerleri ile takip etmişlerdir.



Şekil 5.36 Beton Harçlarında Katkı İçeren Numunelerin ve Müşahit Numunelerin 90 Gün Sonundaki Korozyon Akım Yoğunluğu Değerleri Karşılaştırması

Korozyon akım yoğunluğu açısından en az akım yoğunluğuna sahip numuneler Sika Ferro Gard 901 katkılı numunelerdir ancak aynı numunelerin yarı hücre potansiyel değerleri pozitif yönde eğilimde ikinci sırada yer almaktadır. Potansiyel değerinin negatif yöne doğru kaymasına Sika Ferro Gard 901 inhibitörünün betonun por çözeltisinin iletkenliğini arttırması ve betonun uzun süre sulu çözeltide kalması sonucu porların su ile doymasından dolayı oksijen çözünürlüğündeki azalmaya bağlı donatı çevresindeki oksijen eksikliği sebep olmuştur.

Tekno Silica silis dumanı katkılı numunelerin korozyon akım yoğunluğu değerleri Sika Ferro Gard 901 katkılı numunelerin korozyon akım yoğunluğu değerlerinden biraz daha fazla bulunmuştur. Bunun nedeni Tecno Silica silis dumanı esaslı katkının beton harcına homojen bir şekilde karışmamış olması ve silis dumanının içeriğinde bulunan demir oksitlerin de katalitik etki yaparak çok düşük miktarlarda da olsa çeliğin farklı bölgelerde farklı oranlarda korozyona uğramasına neden olması olabilir.



Şekil 5.37 Beton Yüzeylerinde Sürme Esaslı Kaplama Bulunan Numunelerin ve Müşahit Numunelerin 90 Gün Sonundaki Korozyon Akım Yoğunluğu Değerleri Karşılaştırması

Yukarıdaki Şekil 5.37'ye göre 90 günlük hızlandırılmış korozyon süresi sonunda, Sika Gard 703 W beton sürme esaslı emülsiyonu ile kaplamalı betonarme numuneler $0,20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ korozyon akım yoğunluğuna sahip olmuştur ve bu numuneleri Sika Ferro Gard 903 beton yüzeyine sürme esaslı inhibitörü ile kaplamalı betonarme numuneler $0,42 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'lik korozyon akım yoğunluğu ile takip etmiştir. Korozyon önleyici kaplamalı betonarme numuneleri sırası ile müşahit (kontrol) numunelerinden Sika Gard 703 W müşahit $0,52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, Sika Ferro Gard 903 müşahit $0,76 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'lik korozyon akım yoğunluk değerleri ile takip etmişlerdir.

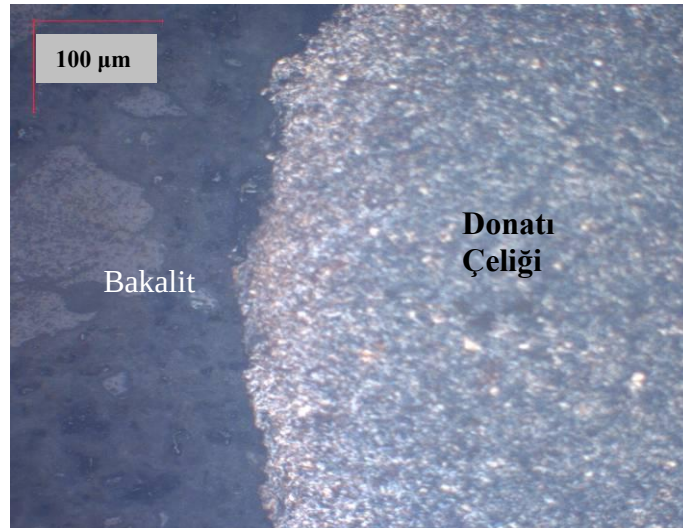
Korozyon akım yoğunluğunu küçükten büyüğe doğru sıraladığımızda Sika Ferro Gard 903 inhibitörü içeren betonarme numunelerin akım yoğunluğu ikinci sırada yer almaktadır fakat korozyon akım değerleri ortalaması donatılarda düşük korozyon varlığını gösteren bölgede kalmaktadır. Aynı numunelere ait yarı hücre potansiyel değerleri de diğer sürme esaslı kaplamalı numunelere göre daha negatif olarak tespit edilmiştir. Yani yarı hücre potansiyel ölçüm değerleri ile korozyon akım yoğunluğu değerleri birbiri ile örtüşmüştür ve bu durum yarı hücre potansiyel değerinin diğer beton

kaplamalı numunelere göre daha negatif olarak tespit edilmesinin gerekçeleri olarak kabul edilen inhibitörün betonun por çözeltisinin iletkenliğini arttırması ve betonun uzun süre sulu çözeltide kalması sonucu porların su ile doymasından dolayı oksijen çözünürlüğündeki azalmaya bağlı donatı çevresindeki oksijen eksikliği düşüncelerini doğrulamaktadır.

Yarı hücre potansiyel değerleri okumalarını etkileyen bütün bu etkenler göz önüne alındığında korozyon akım yoğunluğu ölçümü sonuçları, donatı korozyonunun varlığı ve hızı konusunda çok daha kesin ve güvenilir bir yöntem olarak dikkate alınmıştır ve yarı hücre potansiyel okumalarını da genel olarak desteklediği görülmüştür.

5.7 Mikro Yapı İncelemeleri Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

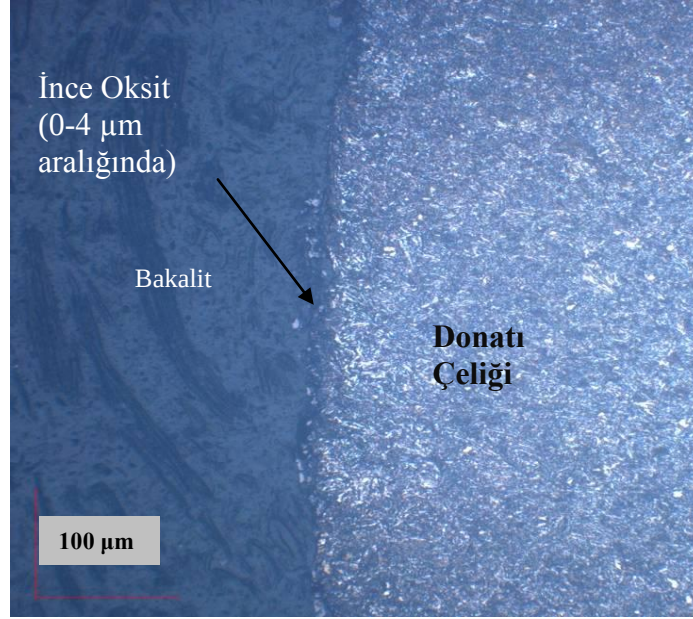
Sika Monotop 610 ile çelik donatı kaplamalı betonarme numunelerin 90 Günlük hızlandırılmış korozyon şartlarına maruz bırakıldıktan sonra yapılan ve Şekil 5.38’de sunulan mikro yapı incelemelerinde çelik üzerinde korozyon tabakasına rastlanamamıştır. Bu sonuç, Sika Monotop 610 ile donatı kaplamalı numuneler için Gecor 8 korozyon hızı ölçüm cihazı ile yapılan $0,14 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ’lik korozyon akımı ölçüm değerlerini de doğrulamaktadır. Çünkü yapılan pek çok literatür araştırmasına göre $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerinin altındaki donatıların betonun dayanıklılığı açısından risk oluşturmadığı bilinmektedir.



Şekil 5.38 Sika Monotop 610 ile kaplamalı numunenin optik mikroskop görüntüsü (X200 ve dağlanmış)

Bu deney koşulları altında yapılan mikro yapı incelemelerine göre Sika Monotop 610 ticari isimli çimento silis dumanı ve polimer modifiyeli kaplamanın betonarme yapıları

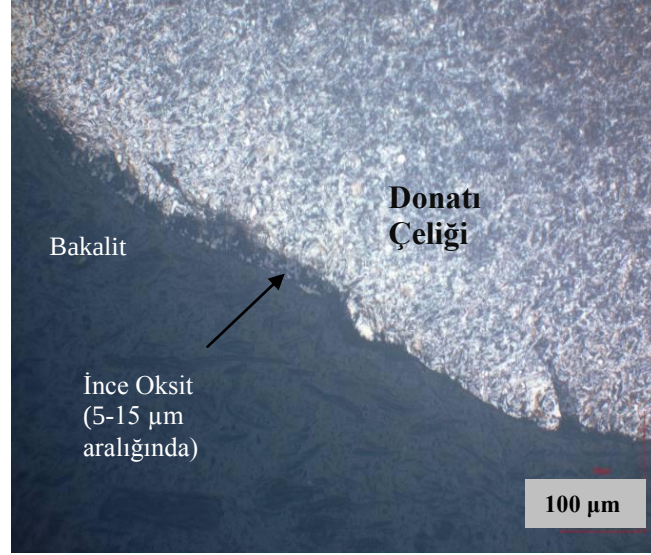
uzun süre yüksek klorür içerikli çevre koşullarına maruz kalındığında bile çok etkili bir şekilde koruyabildiği tespit edilmiştir.



Şekil 5.39 Sika Ferro Gard 901 katkılı numunenin optik mikroskop görüntüsü (X200 ve %3 Nital ile dağlanmış)

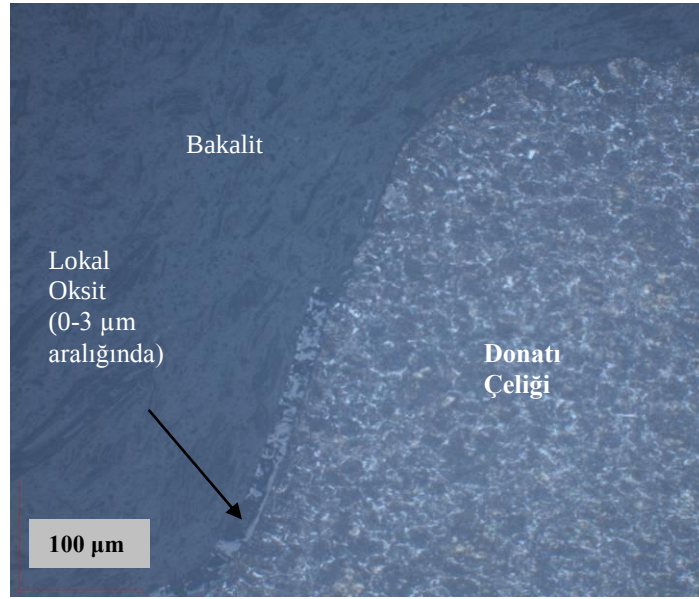
Sika Ferro Gard 901 katkılı betonarme numunelerin 90 Günlük hızlandırılmış korozyon şartlarına maruz bırakıldıktan sonra yapılan ve Şekil 5.39’da sunulan mikro yapı incelemelerinde çelik üzerinde çok ince (0-4 µm arası) oksit tabakasına rastlanmıştır. Bu sonuç, Sika Ferro Gard 901 katkılı numuneler için Gecor 8 korozyon hızı ölçüm cihazı ile yapılan $0,29 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ’lik ve donatılarda düşük korozyon varlığını gösteren korozyon akımı ölçüm değerlerini de doğrulamaktadır. Ortamın çok agresif olması ve bu ortamda numunelerin uzun süre bekletilmesi zaman içerisinde inhibitörün kimyasal etkinliğini çok az düşürmüş olabilir. Ancak yapılan pek çok literatür araştırmasına göre $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerinin altındaki donatılar betonun dayanıklılığı açısından risk oluşturmamaktadır.

Bu deney koşulları altında yapılan mikro yapı incelemelerine göre Sika Ferro Gard 901 katkının betonarme yapıları uzun süre yüksek klorür içerikli çevre koşullarına maruz kalındığında bile oldukça etkili bir şekilde koruyabildiği ve betonarmenin dayanıklılığı açısından bir tehlike oluşmasına engel olabildiği görülmüştür.



Şekil 5.40 Sika Ferro Gard 903 kaplamalı (sürmeli) numunenin optik mikroskop görüntüsü (X200 ve %3 Nital ile dağlanmış)

Sika Ferro Gard 903 kaplamalı (sürmeli) betonarme numunelerin 90 Günlük hızlandırılmış korozyon şartlarına maruz bırakıldıktan sonra yapılan ve Şekil 5.40'da sunulan mikro yapı incelemelerinde çelik üzerinde ince (5-15 µm arası) oksit tabakasına rastlanmıştır. Bu sonuç, Sika Ferro Gard 903 katkılı numuneler için Gecor 8 korozyon hızı ölçüm cihazı ile yapılan $0,42 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'lik ve donatılarda düşük korozyon varlığını gösteren korozyon akımı ölçüm değerlerini de doğrulamaktadır. Bu durumun nedeni Sika Ferro Gard 903 inhibitörünün beton yüzeyinden betonun iç kısmına doğru homojen bir şekilde nüfuz etmemesi olabilir. Bu durum pas tabakasının lokalize olarak oluşmasına sebep olabilir. Ayrıca ortamın çok agresif olması ve bu ortamda numunelerin uzun süre bekletilmesi zaman içerisinde inhibitörün kimyasal etkinliğini biraz zayıflatmış olabilir. Fakat kontrol numuneleri için yapılan mikro yapı incelemelerinde bu numuneler üzerinde 25-30 µm arası korozyon tabakasına rastlanması Sika Ferro Gard 903 inhibitörünün betonarme numuneleri agresif klor iyonlarına ve oksijene karşı kontrol numunelerine göre oldukça iyi bir şekilde koruduğunu ve kontrol numuneleri ile karşılaştırma yapıldığında etkinliğinin belirgin olduğunu göstermiştir.



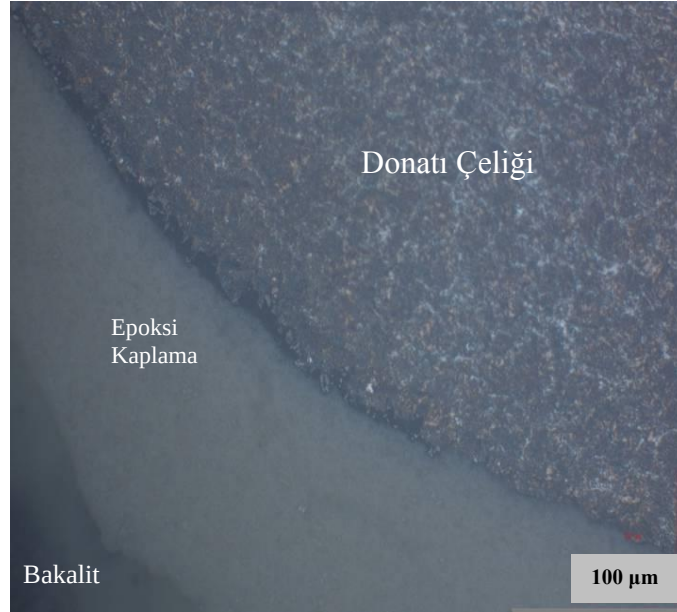
Şekil 5.41 Sikagard-703 W kaplamalı (sürmeli) numunenin optik mikroskop görüntüsü (X 200 ve %3 Nital ile dağlanmış)

Sikagard-703 W ticari isimli ve silan/siloksan birleşimli malzeme ile kaplamalı betonarme numunelerin 90 Günlük hızlandırılmış korozyon şartlarına maruz bırakıldıktan sonra yapılan ve Şekil 5.41’de sunulan mikro yapı incelemelerinde çelik üzerinde genel olarak korozyona rastlanmamıştır. Sadece ufak bir bölgede lokal olarak ve çok ince (0-3 µm arası) oksit tabakasına rastlanmıştır. Bu sonuç, Sikagard-703 W k numuneler için Gecor 8 korozyon hızı ölçüm cihazı ile yapılan $0,20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ’lik ve donatılarda pasif korozyon sınırını biraz geçmiş olan ve çok düşük korozyon varlığını gösteren korozyon akımı ölçüm değerlerini de doğrulamaktadır.

Ayrıca daha önce belirtildiği gibi $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerinin altındaki donatılar betonun dayanıklılığı açısından risk oluşturmamaktadır. Bu sonuca göre Sikagard-703 W ticari isimli ve silan/siloksan birleşimli kaplama ile kaplanan çelik donatılı betonarmelerde 90 günlük agresif şartlara maruz kalınmasında bile betonarmenin dayanıklılığı açısından bir tehlike görülmemiştir ve betonarme kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında Sikagard-703 W isimli silan/siloksan esaslı kaplamanın çok uzun süre betonarme yapıyı korozyondan koruyabileceğini göstermektedir.

Tecno bond 650 ile çelik donatı kaplamalı betonarme numunelerin 90 Günlük hızlandırılmış korozyon şartlarına maruz bırakıldıktan sonra yapılan mikro yapı incelemelerinde çelik üzerinde korozyon tabakasına rastlanamamıştır. Bu sonuç, Tecno bond 650 ile donatı kaplamalı numuneler için Gecor 8 korozyon hızı ölçüm cihazı ile

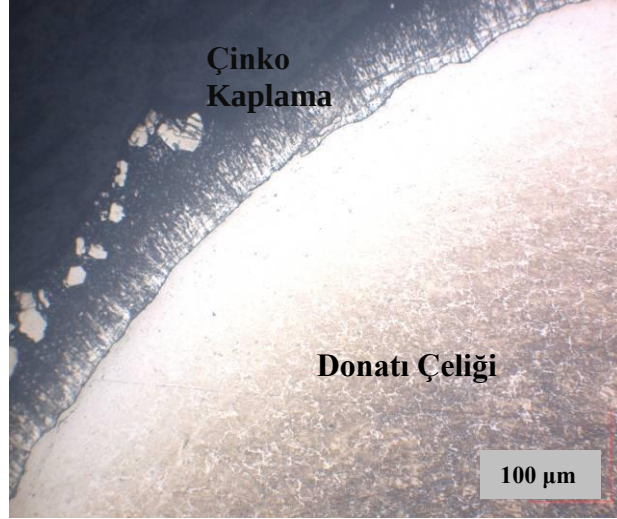
yapılan $0,19 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'lik korozyon akımı ölçüm değerlerini de doğrulamaktadır. Çünkü yapılan pek çok literatür araştırmasına göre $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik korozyon akım değerinin altındaki donatıların betonun dayanıklılığı açısından risk oluşturmadığı bilinmektedir.



Şekil 5.42 Tecno bond 650 epoksi kaplamalı numunenin optik mikroskop görüntüsü (X 200 ve %3 Nital ile dağlanmış)

Bu deney koşulları altında yapılan ve Şekil 5. 42’de sunulan mikro yapı incelemelerine göre Tecno Bond 650 ticari isimli epoksi reçine kaplamanın betonarme yapıları uzun süre yüksek klorür içerikli çevre koşullarına maruz kalındığında bile çok etkili bir şekilde koruyabildiği görülmüştür.

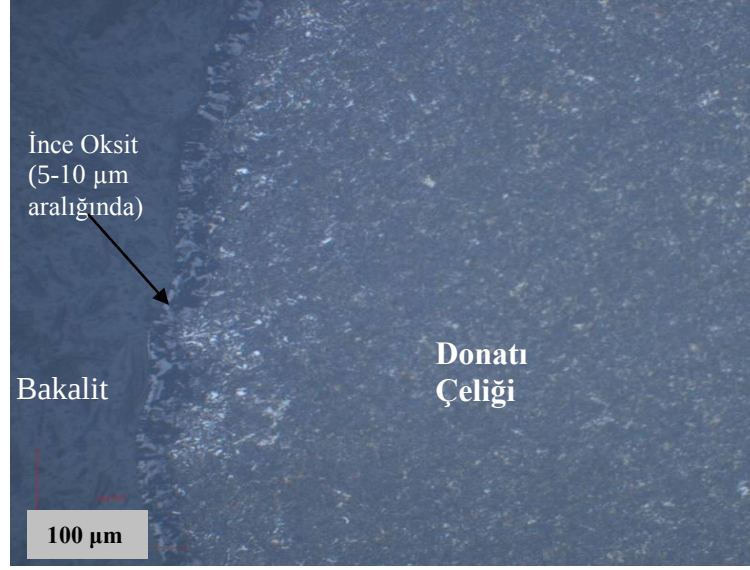
Sıcak daldırma galvaniz yöntemi ile çinko kaplanan çelik donatılı betonarme numunelerin 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartlarına maruz bırakıldıktan sonra yapılan ve Şekil 5.43’de sunulan mikro yapı incelemelerinde çelik üzerinde korozyon tabakasına rastlanamamıştır. Bu sonuç, sıcak daldırma galvaniz ile çinko kaplamalı betonarme numuneler için Gecor 8 korozyon hızı ölçüm cihazı ile yapılan ve 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartlarında elde edilen ve çinkonun oldukça pasif durumda olduğunu gösteren yarı hücre potansiyel ölçümü değerlerini de doğrulamaktadır.



Şekil 5.43 Sıcak Daldırma ile çinko kaplamalı numunenin optik mikroskop görüntüsü (X200 ve %3 Nital ile dağlanmış)

Bu deney koşulları altında yapılan mikro yapı incelemelerine göre sıcak daldırma galvaniz yöntemi ile çinko kaplamanın betonarme yapıları korozyona karşı yüksek klorür içerikli çevre koşullarına maruz kalındığında geleneksel kaplamasız çeliklere göre çok daha uzun süre etkili bir şekilde koruyabildiği görülmüştür.

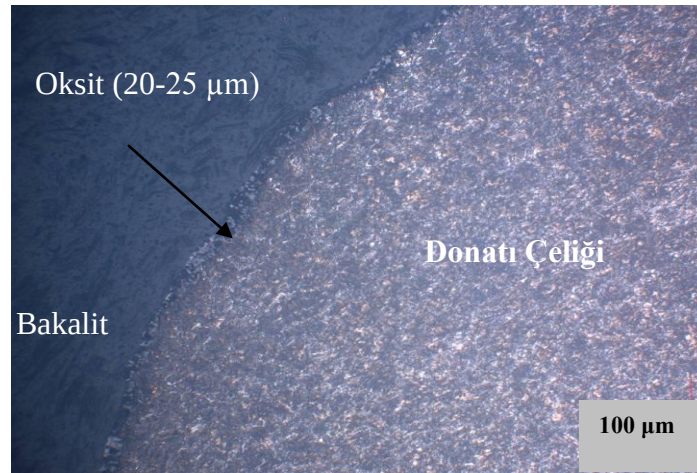
Tecno Silica silis dumanı katkılı betonarme numunelerin 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartlarına maruz bırakıldıktan sonra yapılan ve Şekil 5.44’de sunulan mikro yapı incelemelerinde çelik üzerinde ince (05-10 µm arası) oksit tabakasına rastlanmıştır. Bu sonuç, Tecno silica silis dumanı katkılı numuneler için Gecor 8 korozyon hızı ölçüm cihazı ile yapılan $0,310 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ’lik ve donatılarda düşük korozyon varlığını gösteren korozyon akımı ölçüm değerlerini de doğrulamaktadır. Bunun nedeni silis dumanı beton içerisinde homojen bir şekilde dağılmamış olabilir ve donatıya temas eden silis dumanı donatının her yerinde eşik miktarda olmayabilir bu sebeple paslanma çelik yüzeyinde her yerde aynı oranda olmayacaktır. Böylelikle yüzeyde paslanmanın artıp-azaldığı bölgeler oluşur ve silis dumanı içerisindeki yüksek değerli demir oksitler ve klorürleri çeliğe temas ettikleri bölgelerde kısmen korozyona sebep olmuş olabilirler. Fakat kontrol numuneleri için yapılan mikro yapı incelemelerinde bu numuneler üzerinde 25-30 µm arası korozyon tabakasına rastlanması Tecno Silica silis dumanı katkısının betonarme numuneleri beton yapının dış çevresinden gelebilecek agresif klor iyonlarına ve oksijene karşı kontrol numunelerine göre oldukça iyi bir şekilde koruduğunu ve kontrol numuneleri ile karşılaştırma yapıldığında etkinliğinin belirgin olduğunu göstermiştir.



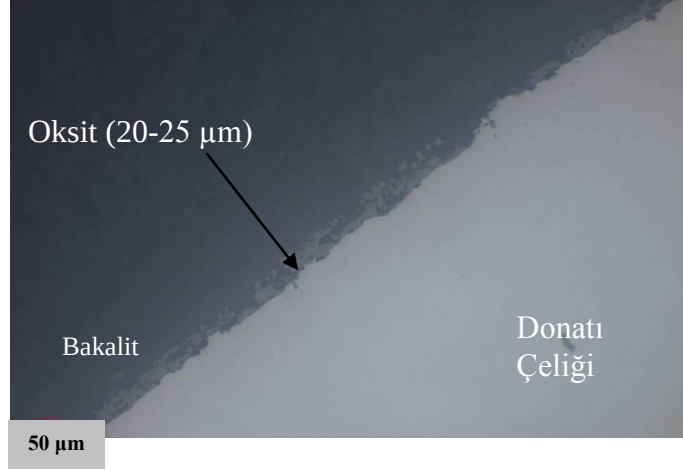
Şekil 5.44 Tecno Silica Silis Dumanı katkılı numunenin optik mikroskop görüntüsü (X200 ve %3 Nital ile dağlanmış)

Katkısız kontrol (müşahit) numunelerinin 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartlarına maruz bırakıldıktan sonra yapılan ve Şekil 5.45’de sunulan mikro yapı incelemelerinde çelik üzerinde 20-30 µm arası oksit tabakasına rastlanmıştır. Bu değerler kontrol numunelerinin agresif ortam şartlarında orta derecede korozyona uğradığını göstermektedir. Şekil 5.46’da ise aynı kontrol numunelerine ait dağlanmamış mikro yapı fotoğrafı gösterilmiştir.

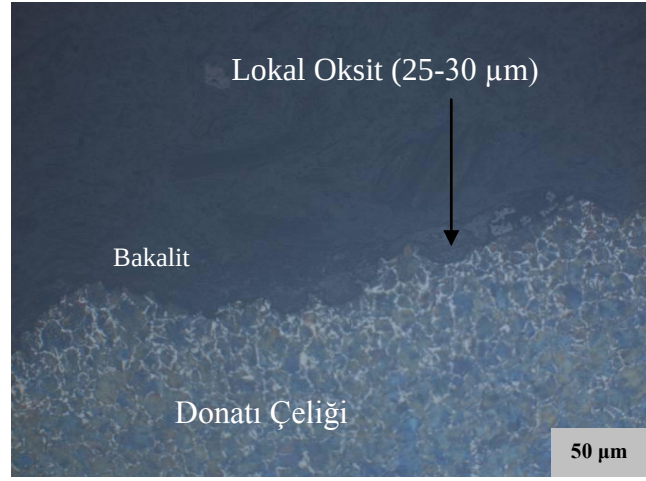
Şekil 5.47’deki kontrol numunelerine ait dağlanmış mikro yapı fotoğrafı gösterilmiştir. Şekil 5.48’de ise aynı kontrol numunelerine ait dağlanmamış mikro yapı fotoğrafı gösterilmiştir.



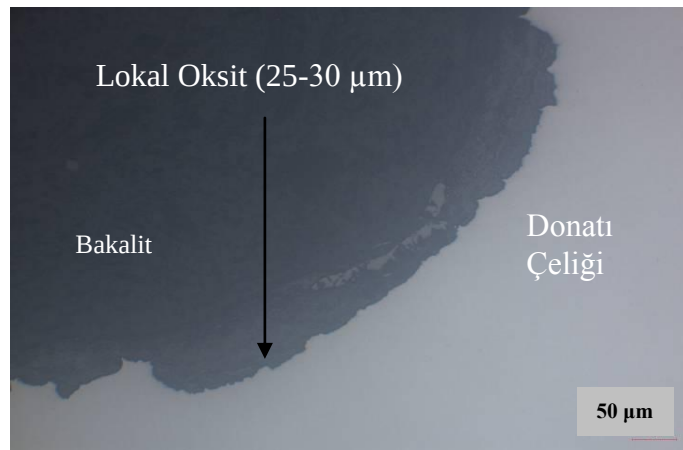
Şekil 5.45 Katkısız kontrol numunesinin (müşahit) optik mikroskop görüntüsü (X200 ve %3 Nital ile dağlanmış)



Şekil 5.46 Katkısız kontrol numunesinin (müşahit) optik mikroskop görüntüsü (X200 ve dağlanmamış)



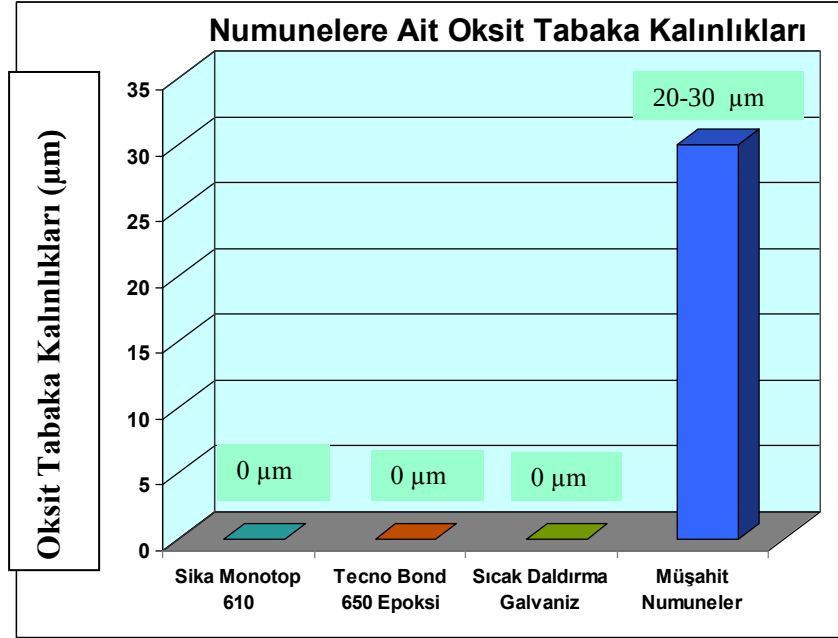
Şekil 5.47 Katkısız kontrol numunesinin (müşahit) optik mikroskop görüntüsü (X200 ve %3 Nital ile dağlanmış)



Şekil 5.48 Katkısız kontrol numunesinin (müşahit) optik mikroskop görüntüsü (X200 ve dağlanmamış)

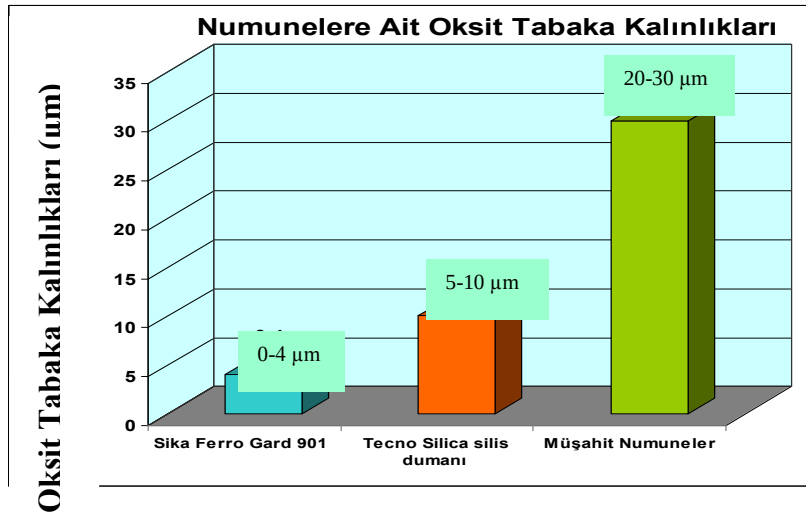
Mikro yapı incelemelerine göre göre donatı kaplamalı, beton harcına katkılı ve betona

sürme esaslı kaplamalı tüm numunelerin ve müşahitlerinin içindeki çelik donatıların yüzeylerinde görülen oksit tabaka karşılaştırmaları sırası ile Şekil 5.49, Şekil 5.50 ve Şekil 5.51’de gösterilmektedir.



Şekil 5.49 Donatıları Kaplamalı Numunelere ve Müşahit Numunelere Ait 90 Günün Sonunda Ölçülen Oksit Tabaka Kalınlıkları

Yukarıdaki Şekil 5.49’a göre Tecno Bond 650 epoksi, sıcak daldırma çinko, Sika Monotop 610 donatı kaplamaları bulunan betonarme numunelerde oksit tabakasına rastlanmamıştır.

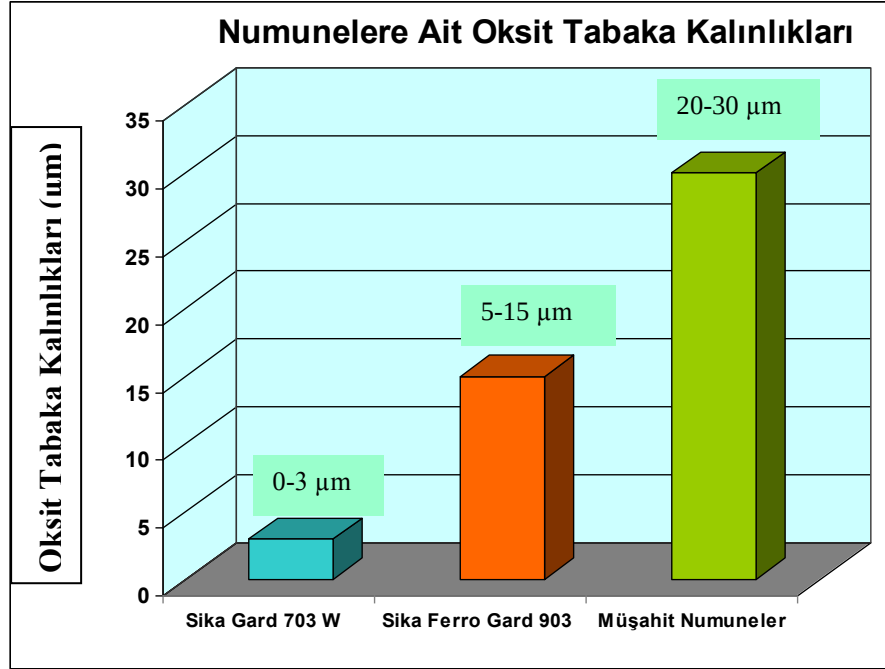


Şekil 5.50 Beton Harçlarında Katkı İçeren Numunelere ve Müşahit Numunelere Ait 90 Günün Sonunda Ölçülen Oksit Tabaka Kalınlıkları

Yukarıdaki Şekil 5.50’ye göre Sika Ferro Gard 901 de (0-4 mikron aralığında oksit),

Tecno Silica silis dumanında (5-10 mikron aralığında oksit) ve kontrol numunelerinde 20-30 mikron aralığında oksit tabakası görülmüştür.

Aşağıdaki Şekil 5.51'e göre Sika Ferro Gard 703 W de (0-3 mikron aralığında oksit) Sika Ferro Gard 903 de (5-15 mikron aralığında oksit) ve kontrol numunelerinde 20-30 mikron aralığında oksit tabakası görülmüştür.

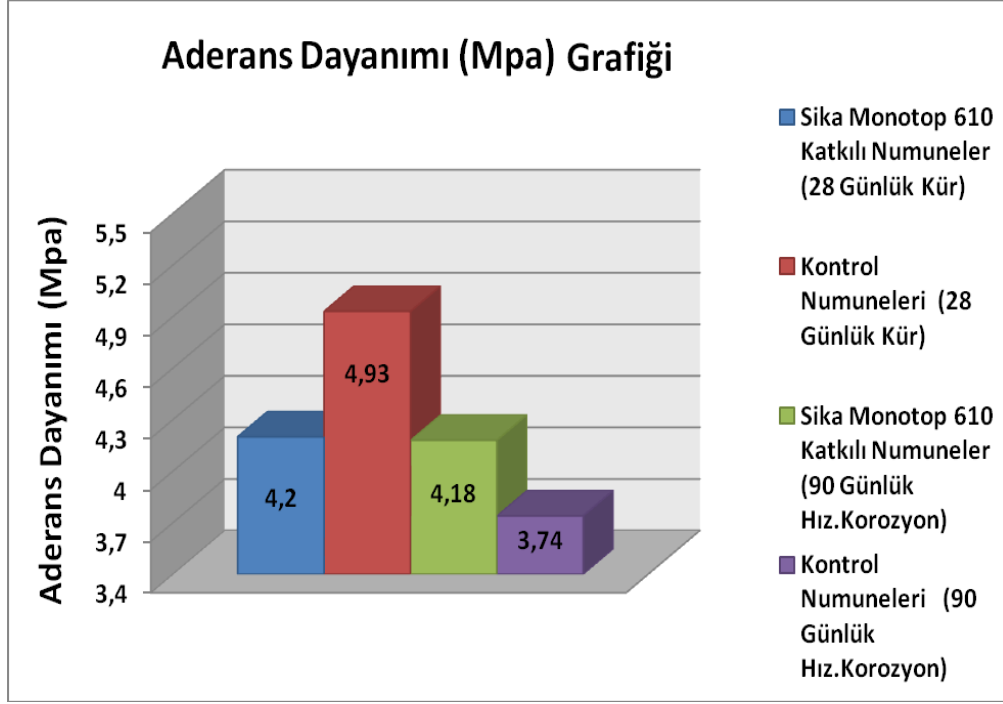


Şekil 5.51 Beton Yüzeylerinde Sürme Esaslı Kaplama İçeren Numunelere ve Müşahit Numunelere Ait 90 Günün Sonunda Ölçülen Oksit Tabaka Kalınlıkları

Katkılı ve katkısız (kontrol) numunelerinin mikro yapı analizleri sonuçları, aynı numunelere yapılan ve betonarme yapılarda donatı korozyonunu tespit etmekte kullanılan korozyon akım yoğunluğu ölçümü sonuçlarını da doğrulamıştır.

5.8 Aderans Dayanımı Ölçümü Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Sika Monotop 610 malzemesi ile donatı kaplamalı 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin 28 günlük kürün sonunda aderans dayanımları ölçülmüştür ve Şekil 5.52'de sunulmuştur. Kaplamalı numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1480 kgf ve kontrol numunelerinin ortalama aderans kuvvetleri 1740 kgf olarak ölçülmüştür. Bu kuvvetlere göre hesaplanan Sika Monotop 610 malzemesi ile donatı kaplamalı 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin aderans dayanımı değerleri ortalamaları sırası ile 4,20 Mpa ve 4,93 Mpa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.52 Sika Monotop 610 Kaplamalı Numunelerin ve Bunlara Ait Kontrol Numunelerinin Aderans Dayanımı (Mpa) Karşılaştırma Grafiği

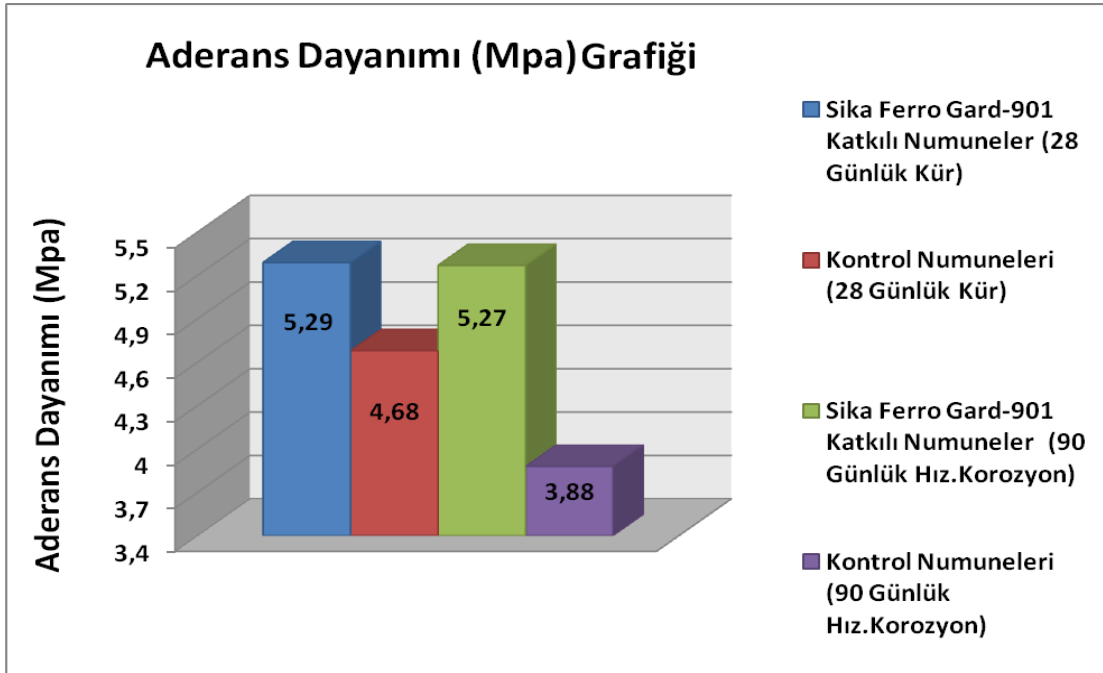
Elde edilen sonuçlara göre Sika Monotop 610 ticari isimli silis dumanı ve çimento esaslı kaplamanın betonarme numunelerin aderans dayanımlarını biraz düşürdüğü görülmüştür. Bu durumun nedeni, donatı ile beton arasında kimyasal yapışma ve sürtünme azalması olarak düşünülmektedir. Çünkü donatıya yapılan kaplama nervürlerin aralarındaki boşlukları azaltarak donatıyı daha düzleştirmiş ve donatının nervürleri ile betonun direk temasını kesmiştir. Ayrıca kaplamanın polimer modifiyeli olması sınıcu yapıda organik bileşenlerin bulunması, inorganik esaslı beton ile arasında oluşan yapışma bağ kuvvetini bir miktar düşürmüş olabilir. Jalili ve arkadaşları da yaptıkları çalışmada bu düşüncüyü destekleyerek, betonu oluşturan elemanların inorganik yapılı olmasından dolayı betonun organik esaslı kaplamalarla kurduğu bağ kuvvetinin inorganik esaslı kaplamalarla kurduğu bağ kuvveti kadar güçlü olamayacağı fikrini savunmuşlardır [62].

Sika Monotop 610 malzemesi ile donatı kaplamalı 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartları sonunda aderans dayanımları ölçülmüştür ve Şekil 5.52’de sunulmuştur. Kaplamalı numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1475 kgf ve kontrol numunelerinin ortalama aderans kuvvetleri 1320 kgf olarak ölçülmüştür. Bu kuvvetlere göre hesaplanan Sika Monotop 610 malzemesi ile

donatı kaplamalı 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin aderans dayanımı değerleri ortalamaları sırası ile 4,18 Mpa ve 3,74 Mpa olarak tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre Sika Monotop 610 malzemesi ile donatı kaplamalı 3 adet numunenin 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartları sonunda aderans dayanımında pek bir değişiklik görülmemiştir. Bu durum Sika monotop 610 donatı kaplamasının hızlandırılmış korozyon ortamında çelik donatıları korozyona karşı koruduğunu ve oksit ya da pas oluşumuna engel olarak aderans dayanımındaki düşmeleri de engellediğini doğrulamaktadır. Ancak kontrol numunelerinin aderans dayanımlarında önemli bir düşüş görülmüştür. Bu durum gerek mikro yapı incelemelerinde, gerekse korozyon akım ölçümlerinde tespit edilen donatı korozyonu neticesinde beton ile çelik donatı arasındaki bağın zayıfladığını açıkça göstermektedir.

Sika Ferro Gard-901 malzemesi ile betona katkılı 3 adet ve katkısız (müşahit) 3 adet numunenin 28 günlük kürün sonunda aderans dayanımları ölçülmüştür ve Şekil 5.53’de sunulmuştur. Katkılı numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1865 kgf ve katkısız numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1650 kgf olarak ölçülmüştür. Bu kuvvetlere göre hesaplanan Sika Ferro Gard-901 malzemesi ile betona katkılı 3 adet ve katkısız (müşahit) 3 adet numunenin aderans dayanımı değerleri ortalamaları sırası ile 5,29 Mpa ve 4,68 Mpa olarak tespit edilmiştir.



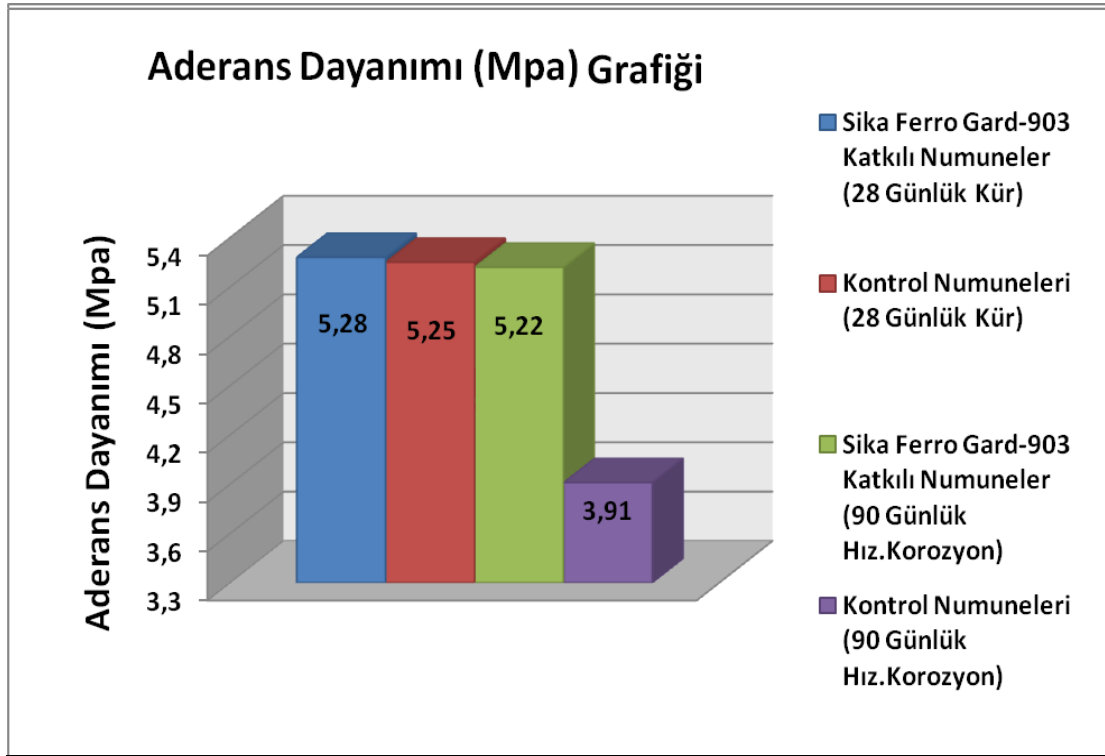
Şekil 5.53 Sika Ferro Gard-901 Katkılı Numunelerin ve Bunlara Ait Kontrol Numunelerinin Aderans Dayanımı (Mpa) Karşılaştırma Grafiği

Elde edilen sonuçlara göre Sika Ferro Gard-901 ticari isimli beton katkısının betonarme numunelerin aderans dayanımlarını arttırdığı görülmüştür. Bu durumun nedeni katkı maddesinin hiper akışkanlaştırıcı görevi görerek su ihtiyacını azaltması ve betonun hidratasyonundan sonra ortamda kalıp buharlaşacak su miktarını düşürmesi neticesinde beton boşluk oranını azaltması ve betonun donatı ile temas eden yüzey alanını arttırması sonucu beton ile donatı arasındaki bağ kuvvetlerinin artması olarak düşünülmektedir. Sika Ferro Gard 901 beton katkı inhibitörünün betonun basma dayanımını arttırması da bu görüşü desteklemektedir.

Sika Ferro Gard-901 malzemesi ile betona katkılı 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartları sonunda aderans dayanımları ölçülmüştür ve Şekil 5.53’de sunulmuştur. Katkılı numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1858 kgf ve kontrol numunelerinin ortalama aderans kuvvetleri 1370 kgf olarak ölçülmüştür. Bu kuvvetlere göre hesaplanan Sika Ferro Gard-901 malzemesi ile betona katkılı 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin aderans dayanımı değerleri ortalamaları sırası ile 5,27 Mpa ve 3,88 Mpa olarak tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre Sika Ferro Gard-901 malzemesi ile betona katkılı 3 adet numunenin 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartları sonunda aderans dayanımında pek bir değişiklik görülmemiştir. Bu durum Sika Ferro Gard-901 beton katkısının hızlandırılmış korozyon ortamında çelik donatıları korozyona karşı koruduğunu ve oksit ya da pas oluşumuna engel olarak aderans dayanımındaki düşmeleri de engellediğini doğrulamaktadır. Ancak kontrol numunelerinin aderans dayanımlarında önemli bir düşüş görülmüştür. Bu durum gerek mikro yapı incelemelerinde, gerekse korozyon akım ölçümlerinde tespit edilen donatı korozyonu neticesinde beton ile çelik donatı arasındaki bağın zayıfladığını açıkça göstermektedir.

Sika Ferro Gard-903 malzemesinden betona kaplamalı (sürmeli) 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin 28 günlük kürün sonunda aderans dayanımları ölçülmüştür ve Şekil 5.54’de sunulmuştur. Kaplamalı numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1860 kgf ve katkısız numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1850 kgf olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.54 Sika Ferro Gard-903 Kaplamalı (Sürmeli) Numunelerin ve Bunlara Ait Kontrol Numunelerinin Aderans Dayanımı (Mpa) Karşılaştırma Grafiği

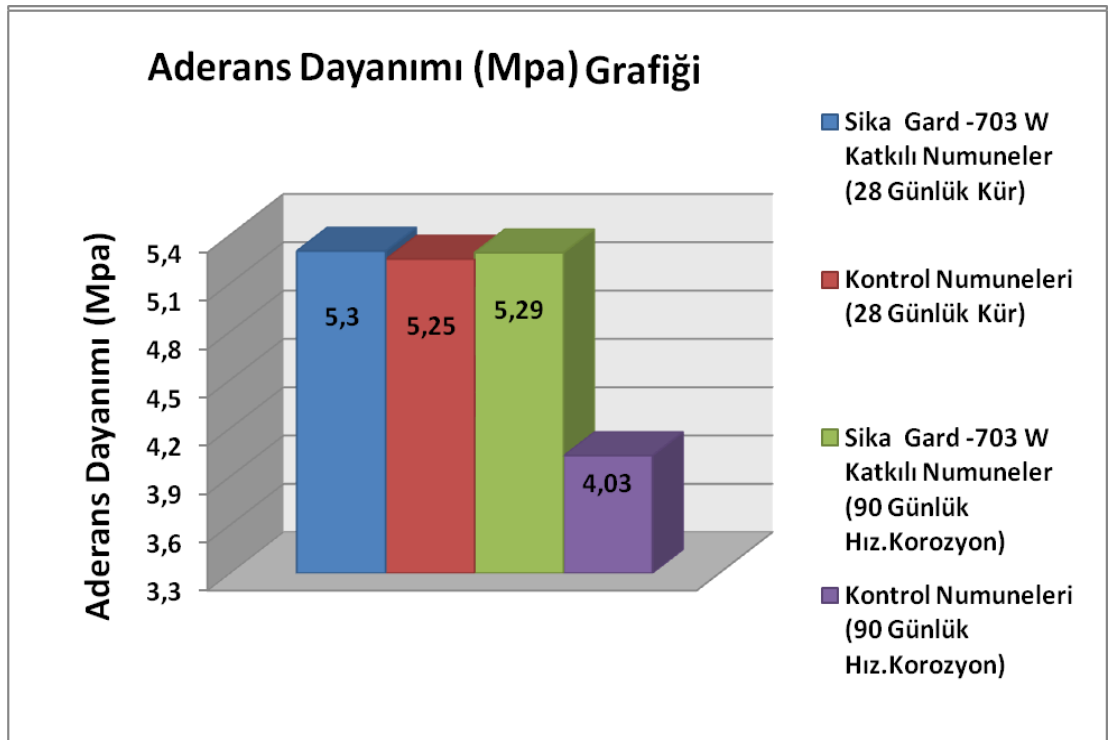
Bu kuvvetlere göre hesaplanan Sika Ferro Gard-903 malzemesi ile betona kaplamalı 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin aderans dayanımı değerleri ortalamaları sırası ile 5,28 Mpa ve 5,25 Mpa olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Sika Ferro Gard-903 ticari isimli beton kaplamasının betonarme numunelerin aderans dayanımlarını pek değiştirmedeği ancak sürme esaslı bu inhibitörün korozyon önleyici vazife görürken betonun aderans dayanımına herhangi bir olumsuz etki yapmadığı görülmüştür.

Sika Ferro Gard-903 malzemesi ile betona kaplamalı (sürmeli) 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartları sonunda aderans dayanımları ölçülmüştür ve Şekil 5.54’de sunulmuştur. Kaplamalı numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1840 kgf ve kontrol numunelerinin ortalama aderans kuvvetleri 1380 kgf olarak ölçülmüştür. Bu kuvvetlere göre hesaplanan Sika Ferro Gard-903 malzemesi ile betona kaplamalı 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin aderans dayanımı değerleri ortalamaları sırası ile 5,22 Mpa ve 3,91 Mpa olarak tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre Sika Ferro Gard-903 malzemesi ile betona kaplamalı 3 adet numunenin 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartları sonunda aderans dayanımında

biraz düşme görülmüştür. Bu durum Sika Ferro Gard-903 katkılı numunelerde hızlandırılmış korozyon ortamında çelik donatılarda oluşan çok hafif oksit tabakası neticesinde çelik ile beton arasındaki bağın biraz zayıflaması ile açıklanabilir. Ancak kontrol numunelerinin aderans dayanımlarında önemli bir düşüş görülmüştür. Bu durum gerek mikro yapı incelemelerinde, gerekse korozyon akım ölçümlerinde tespit edilen donatı korozyonu neticesinde beton ile çelik donatı arasındaki bağın zayıfladığını açıkça göstermektedir.

Sika Gard -703 W malzemesi ile betona kaplamalı (sürmeli) 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin 28 günlük kürün sonunda aderans dayanımları ölçülmüştür ve Şekil 5.55’de sunulmuştur. Kaplamalı numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1870 kgf ve katkısız numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1850 kgf olarak ölçülmüştür. Bu kuvvetlere göre hesaplanan Sika Gard -703 W malzemesi ile betona katkılı 3 adet ve katkısız (müşahit) 3 adet numunenin aderans dayanımı değerleri ortalamaları sırası ile 5,30 Mpa ve 5,25 Mpa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.55 Sika Ferro Gard-703 W Kaplamalı (Sürmeli) Numunelerin ve Bunlara Ait Kontrol Numunelerinin Aderans Dayanımı (Mpa) Karşılaştırma Grafiği

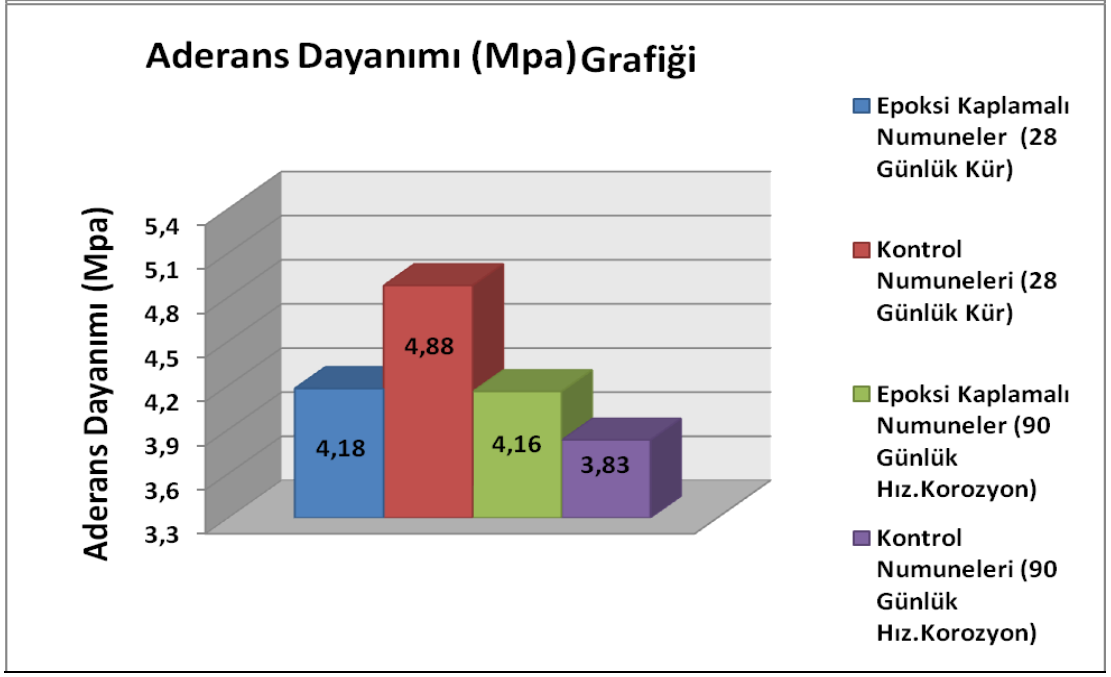
Elde edilen sonuçlara göre Sika Gard -703 W ticari isimli beton kaplamasının betonarme numunelerin aderans dayanımlarını pek değiştirmedeği ancak sürme esaslı bu

inhibitörün korozyon önleyici vazife görürken betonun aderans dayanımına herhangi bir olumsuz etki yapmadığı görülmüştür.

Sika Ferro Gard-703 W malzemesi ile betona kaplamalı (sürmeli) 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartları sonunda aderans dayanımları ölçülmüştür ve Şekil 5.55’de sunulmuştur. Kaplamalı numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1865 kgf ve kontrol numunelerinin ortalama aderans kuvvetleri 1420 kgf olarak ölçülmüştür. Bu kuvvetlere göre hesaplanan Sika Ferro Gard 703 W malzemesi ile betona kaplamalı 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin aderans dayanımı değerleri ortalamaları sırası ile 5,29 Mpa ve 4,03 Mpa olarak tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre Sika Ferro Gard-703 W malzemesi ile betona kaplamalı (sürmeli) 3 adet numunenin 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartları sonunda aderans dayanımında pek bir değişiklik görülmemiştir. Bu durum Sika Ferro Gard-703 W kaplamasının hızlandırılmış korozyon ortamında numuneleri korozyona karşı koruduğunu ve oksit ya da pas oluşumuna engel olarak aderans dayanımındaki düşmeleri de engellediğini doğrulamaktadır. Ancak kontrol numunelerinin aderans dayanımlarında önemli bir düşüş görülmüştür. Bu durum gerek mikro yapı incelemelerinde, gerekse korozyon akım ölçümlerinde tespit edilen donatı korozyonu neticesinde beton ile çelik donatı arasındaki bağın zayıfladığını açıkça göstermektedir.

Tecno Bond epoksi kaplı donatılı 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin 28 günlük kürün sonunda aderans dayanımları ölçülmüştür ve Şekil 5.56’da sunulmuştur. Epoksi kaplı donatılı numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1471 kg ve kontrol numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1718 kg olarak ölçülmüştür. Bu kuvvetlere göre hesaplanan epoksi kaplı donatılı 3 adet ve kaplamasız (müşahit) 3 adet numunenin aderans dayanımı değerleri ortalamaları sırası ile 4,18 Mpa ve 4,88 Mpa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.56 Tecno Bond 650 Epoksi Kaplamalı Numunelerin ve Bunlara Ait Kontrol Numunelerinin Aderans Dayanımı (Mpa) Karşılaştırma Grafiği

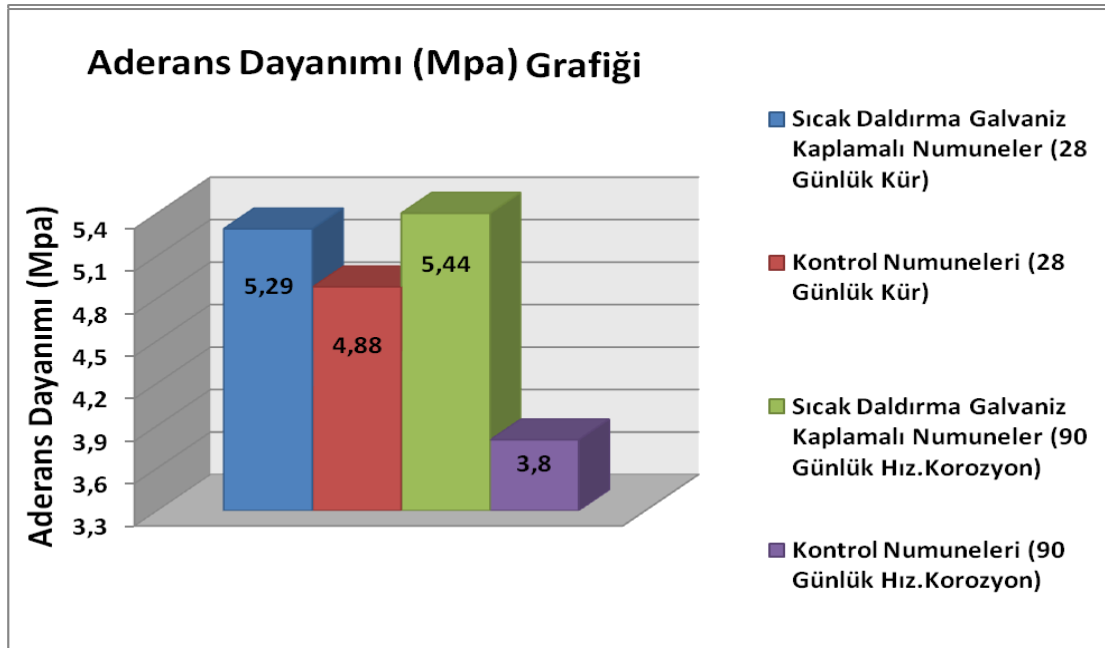
Elde edilen sonuçlara göre epoksi kaplamanın betonarme numunelerin aderans dayanımlarını düşürdüğü görülmüştür. Bu durumun nedeni epoksi kaplamanın yüzey yapısının kaplamasız çelik yüzeyine göre çok pürüzsüz ve kimyasal olarak inert olması ve donatı ile beton arasında kimyasal yapışma ve sürtünme azalması olarak düşünülmektedir. Ayrıca bu düşünce, Jalili ve arkadaşlarının çalışmalarında savundukları düşünceyle ve yaptıkları atıfla da desteklenmektedir. Jalili ve arkadaşları yaptıkları atıfta, Bertolini ve arkadaşlarının epoksi ile çelik donatı kaplamanın epoksinin düz ve pürüzsüz yüzeyi sebebi ile beton ile donatı arasındaki bağ dayanımını azalttığını belirttiklerini bildirmişlerdir [62]. Ayrıca Jalili ve arkadaşları, epoksi kaplamanın organik bir karaktere sahip olması ve betonu oluşturan elemanların inorganik karaktere sahip olması gerçeğinin göz önüne alınarak farklı doğadaki iki tip malzemenin arasındaki etkileşimin aynı cins (inorganik) malzemeler arasındaki etkileşim kadar güçlü olamayacağını savunmuşlardır [62].

Tecno Bond 650 epoksi malzemesi ile donatı kaplamalı 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartları sonunda aderans dayanımları ölçülmüştür ve Şekil 5.56'da sunulmuştur. Kaplamalı numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1468 kgf ve kontrol numunelerinin ortalama aderans kuvvetleri 1350 kgf olarak ölçülmüştür. Bu kuvvetlere göre hesaplanan Tecno Bond 650 epoksi malzemesi ile donatı kaplamalı 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet

numunenin aderans dayanımı değerleri ortalamaları sırası ile 4,16 Mpa ve 3,83 Mpa olarak tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre Tecno Bond 650 epoksi malzemesi ile donatı kaplamalı 3 adet numunenin 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartları sonunda aderans dayanımında pek bir değişiklik görülmemiştir. Bu durum Tecno Bond 650 epoksi donatı kaplamasının hızlandırılmış korozyon ortamında numuneleri korozyona karşı koruduğunu ve oksit ya da pas oluşumuna engel olarak aderans dayanımındaki düşmeleri de engellediğini doğrulamaktadır. Ancak kontrol numunelerinin aderans dayanımlarında önemli bir düşüş görülmüştür. Bu durum gerek mikro yapı incelemelerinde, gerekse korozyon akım ölçümlerinde tespit edilen donatı korozyonu neticesinde beton ile çelik donatı arasındaki bağın zayıfladığını açıkça göstermektedir.

Sıcak daldırma çinko kaplı donatılı 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin 28 günlük kürün sonunda aderans dayanımları ölçülmüştür ve Şekil 5.57’de sunulmuştur. Sıcak daldırma galvaniz kaplı donatılı numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1862 kg ve kontrol numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1718 kg olarak ölçülmüştür. Bu kuvvetlere göre hesaplanan sıcak daldırma galvaniz kaplı donatılı 3 adet ve kaplamasız (müşahit) 3 adet numunenin aderans dayanımı değerleri ortalamaları sırası ile 5,29 Mpa ve 4,88 Mpa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.57 Sıcak Daldırma Çinko Kaplamalı Numunelerin ve Bunlara Ait Kontrol Numunelerinin Aderans Dayanımı (Mpa) Karşılaştırma Grafiği

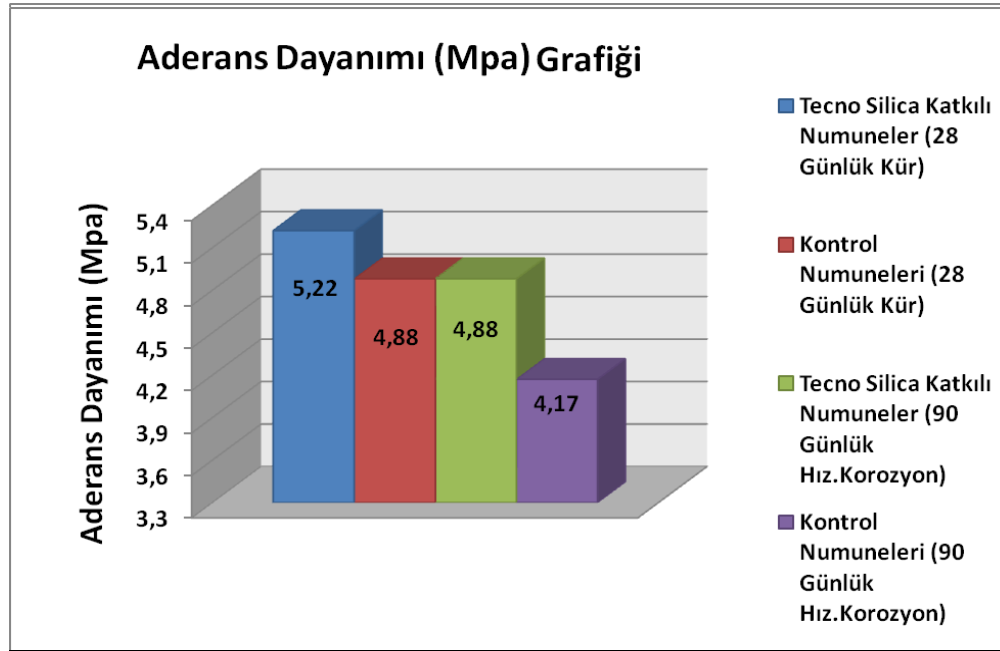
Elde edilen sonuçlara göre sıcak daldırma galvaniz kaplamanın betonarme numunelerin aderans dayanımlarını arttırdığı görülmüştür.

Bu durumun nedeni galvanize donatılı betonarmenin dökülmesinden birkaç hafta sonra galvanize çeliğin artmış olan pürüzlülüğü betona yapışmasının gelişimini sağlar. Çimento hamurunun ara yüzey porozitelerini dolduran ve çinko kaplama ile beton arasında köprü olarak işlev gören kalsiyum hidro zinkat kristallerinin oluşumuna bağlı olarak galvanize kaplı donatı çeliklerinde bağ dayanımı kaplamasız çeliklere göre daha yüksek olabilmektedir.

Sıcak daldırma çinko kaplı donatılı 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartları sonunda aderans dayanımları ölçülmüştür ve Şekil 5.57’de sunulmuştur. Kaplamalı numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1920 kgf ve kontrol numunelerinin ortalama aderans kuvvetleri 1340 kgf olarak ölçülmüştür. Bu kuvvetlere göre hesaplanan sıcak daldırma çinko ile donatı kaplamalı 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin aderans dayanımı değerleri ortalamaları sırası ile 5,44 Mpa ve 3,80 Mpa olarak tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre sıcak daldırma çinko ile donatı kaplamalı 3 adet numunenin 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartları sonunda aderans dayanımında az bir miktar artış görülmüştür. Bu durum sıcak daldırma çinko kaplamanın hızlandırılmış korozyon ortamında numuneleri korozyona karşı koruduğunu ve oksit ya da pas oluşumuna engel olarak aderans dayanımındaki düşmeleri de engellediğini doğrulamaktadır. Ayrıca çinko kaplamalı donatı ile beton arasında güçlü metalurjik bağların kurulduğunu da ortaya koymaktadır. Ancak kontrol numunelerinin aderans dayanımlarında önemli bir düşüş görülmüştür. Bu durum gerek mikro yapı incelemelerinde, gerekse korozyon akım ölçümlerinde tespit edilen donatı korozyonu neticesinde beton ile çelik donatı arasındaki bağın zayıfladığını açıkça göstermektedir.

Tecno Silica silis dumanı katkılı 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin 28 günlük kürün sonunda aderans dayanımları ölçülmüştür ve Şekil 5.58’de sunulmuştur. Silis dumanı katkılı numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1842 kg ve kontrol numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1718 kg olarak ölçülmüştür. Bu kuvvetlere göre hesaplanan silis dumanı katkılı 3 adet ve katkısız (müşahit) 3 adet numunenin aderans dayanımı değerleri ortalamaları sırası ile 5,22 Mpa ve 4,88 Mpa olarak tespit edilmiştir.



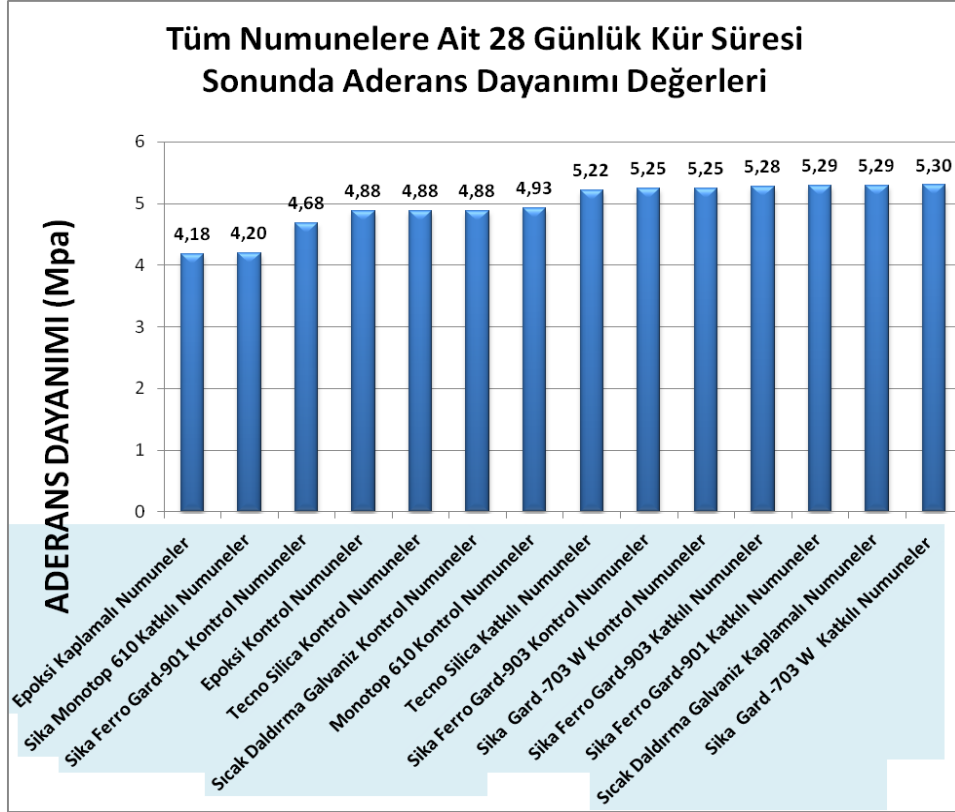
Şekil 5.58 Tecno Silica Silis Dumanı Katkılı Numunelerin ve Bunlara Ait Kontrol Numunelerinin Aderans Dayanımı (Mpa) Karşılaştırma Grafiği

Elde edilen sonuçlara göre silis dumanı katkısının betonarme numunelerin aderans dayanımlarını arttırdığı görülmüştür. Bu durumun nedeni çimentodan yaklaşık yüz kat daha ince olan silis dumanının çimento hamurundaki mikro boşlukları ve agrega-çimento ara yüzeyini doldurarak, bir taraftan fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirerek betonun dayanımını ve geçirimsizliğini ve aderansını artırırken, diğer taraftan içerdiği aktif silis sayesinde hidratasyon ürünlerinden Ca(OH)_2 'i bağlayarak betonun kimyasal dayanıklılığını arttırmasıdır. Kimyasal dayanıklılıktaki artış SD'nın puzolanik reaksiyonu sonucu Ca(OH)_2 'i C-S-H jeli halinde suda çözünmez bir yapıya dönüştürmesine bağlanır.

Tecno Silica silis dumanı ile betona katkılı 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartları sonunda aderans dayanımları ölçülmüştür Şekil 5.58'de sunulmuştur. Katkılı numunelerin ortalama aderans kuvvetleri 1720 kgf ve kontrol numunelerinin ortalama aderans kuvvetleri 1470 kgf olarak ölçülmüştür. Bu kuvvetlere göre hesaplanan Tecno Silica silis dumanı malzemesi ile betona katkılı 3 adet ve kontrol (müşahit) 3 adet numunenin aderans dayanımı değerleri ortalamaları sırası ile 4,88 Mpa ve 4,17 Mpa olarak tespit edilmiştir.

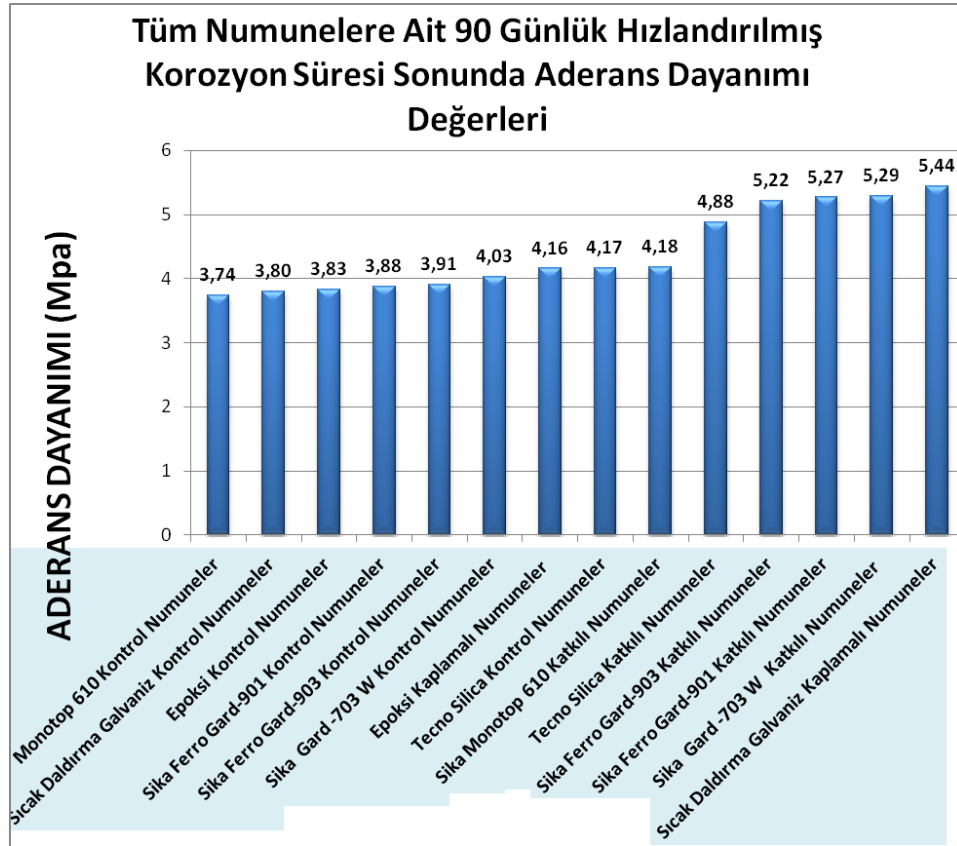
Elde edilen sonuçlara göre Tecno Silica silis dumanı ile betona katkılı 3 adet numunenin 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartları sonunda aderans dayanımında biraz düşme görülmüştür. Bu durumun nedeninin Tecno Silica silis dumanı beton katkısının beton

içerisinde donatıya temas eden bölgelerde homojen olarak dağılmaması neticesinde donatılarda lokalize korozyon oluşumu ve bu bölgelerde beton ile donatı arasındaki bağın zayıflaması olarak düşünülmektedir. Ancak kontrol numunelerinin aderans dayanımlarında önemli bir düşüş görülmüştür. Bu durum gerek mikro yapı incelemelerinde, gerekse korozyon akım ölçümlerinde tespit edilen donatı korozyonu neticesinde beton ile çelik donatı arasındaki bağın zayıfladığını açıkça göstermektedir.



Şekil 5.59 Tüm Betonarme Numunelerin Kür Süresi (28 gün) Sonunda Aderans Dayanımı Değerleri Karşılaştırması

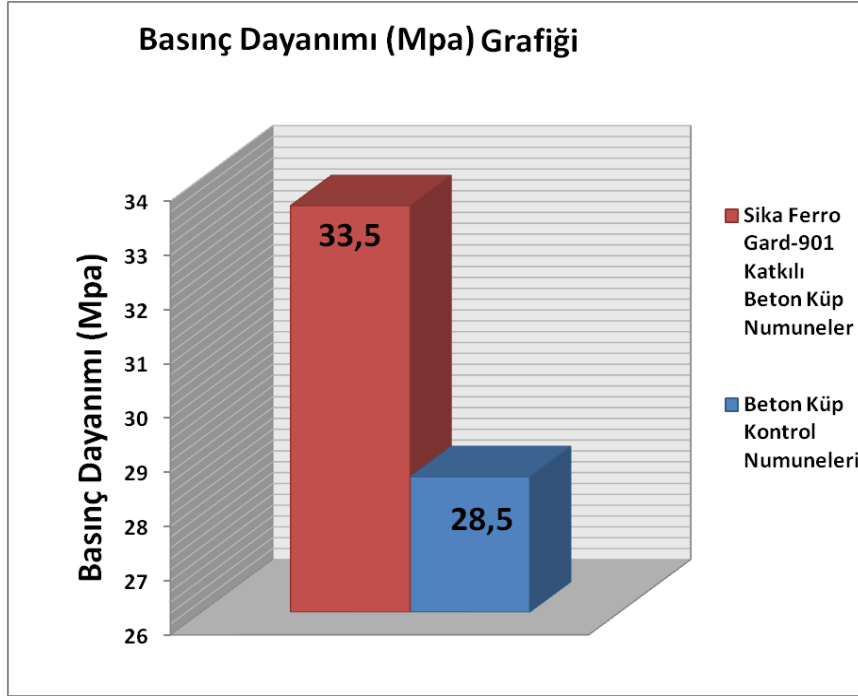
Şekil 5.59’da görüldüğü gibi 28 günlük kür süresi sonunda Sika Gard 703 W emülsiyonlu numunelerin aderans dayanımı 5,3 Mpa ile en yüksek değere sahip olmuştur. Bunu sırası ile sıcak daldırma galvaniz kaplamalı numune grupları ve Sika Ferro Gard 901 inhibitörü katkılı olan numune grupları 5,29 Mpa, Sika Ferro Gard 903 betona sürme esaslı inhibitörlü numune grupları 5,28 Mpa, Tecno Silica silis dumanı katkılı numuneler 5,22 Mpa, Sika Monotop 610 donatı kaplamalı numuneler 4,20 Mpa ve Tecno Bond 650 epoksi donatı kaplamalı numuneler 4,18 Mpa’lık aderans dayanımları ile takip etmişlerdir.



Şekil 5.60 Tüm Betonarme Numunelerin Hızlandırılmış Korozyon Süresi (90 Gün) Sonunda Aderans Dayanımı Değerleri Karşılaştırması

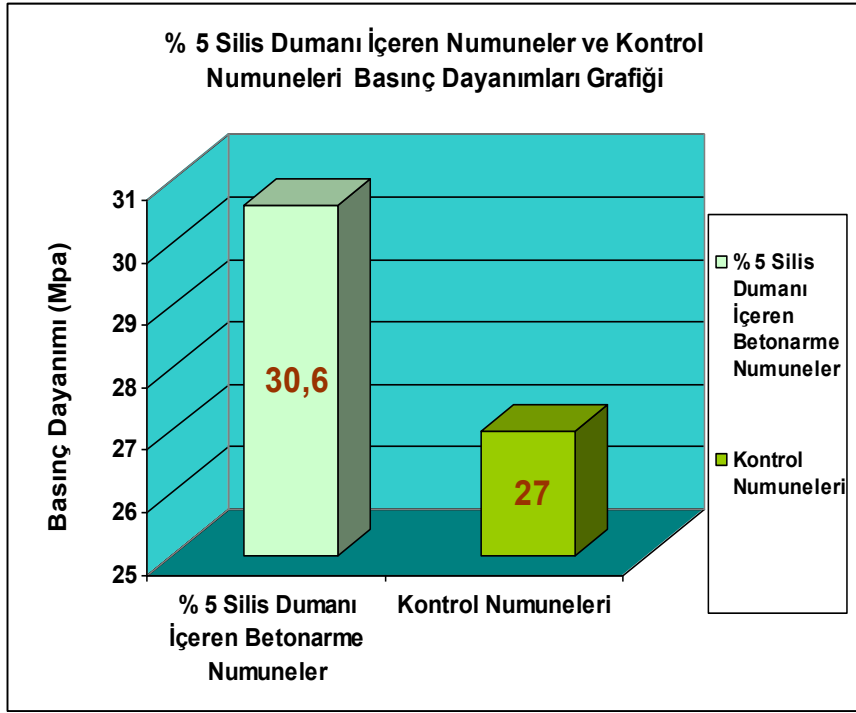
Şekil 5.60’da görüldüğü gibi 90 günlük hızlandırılmış korozyon şartları sonunda sıcak daldırma galvaniz kaplamalı numunelerin aderans dayanımı 5,44 Mpa ile en yüksek değere sahip olmuştur. Bunu sırası ile Sika Gard 703 W emülsiyonlu numune grupları 5,29 Mpa ve Sika Ferro Gard 901 inhibitörü katkılı olan numune grupları 5,27 Mpa, Sika Ferro Gard 903 betona sürme esaslı inhibitörlü numune grupları 5,22 Mpa, Tecno Silica silis dumanı katkılı numuneler 4,88 Mpa, Sika Monotop 610 donatı kaplamalı numuneler 4,18 Mpa ve Tecno Bond 650 epoksi donatı kaplamalı numuneler 4,16 Mpa’lık aderans dayanımları ile takip etmişlerdir.

5.9 Basınç Dayanımı Ölçümü Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi



Şekil 5.61 Sika Ferro Gard-901 Katkılı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Kür Sonrası Basınç Dayanımları

Şekil 5.61’de görüldüğü gibi Sika Ferro Gard-901 katkı maddeli olan küp beton numunelerin 28 günlük kür sonrası basınç dayanımı 33,5 Mpa olarak ölçülmüştür. Kontrol numunelerinin 28 günlük kür sonrası basınç dayanımı ise 28,5 Mpa olarak belirlenmiştir. Yani Sika Ferro Gard-901 ticari isimli nitrojen içeren organik ve inorganik esaslı inhibitörün betona katılması ile betonun basma dayanımında artış olduğu görülmüştür. Bunun nedeni Sika Ferro Gard-901 katkı maddesinin betonda korozyon önleyici görevinin yanında aynı zamanda hiper akışkanlaştırıcı görevi görerek su ihtiyacını azaltması ve su kesme vazifesi görmesidir. Çünkü çimentonun hidratasyonundan (prizinden) sonra taze betonun akıcılık sağlaması için konulan su zamanla buharlaşarak ayrılır ve betonda boşluklar oluşur. Bu durum ise betonun dayanımının düşmesine neden olur. Diğer bir deyişle beton içinde (hidratasyon için gereken suyun dışında), taze betonun akıcılığı için katılan su miktarı arttıkça, yani su çimento oranı yükseldikçe, taze betonun akıcılığı (kıvamı) artar ancak betonun dayanımı hızla düşer. Sika Ferro Gard 901 beton katkı inhibitörü ise karışıma fazla su katılması durumunun önüne geçerek betonda oluşabilecek boşlukları azaltarak ya da engelleyerek betonun basma dayanımının artmasını sağlamıştır.



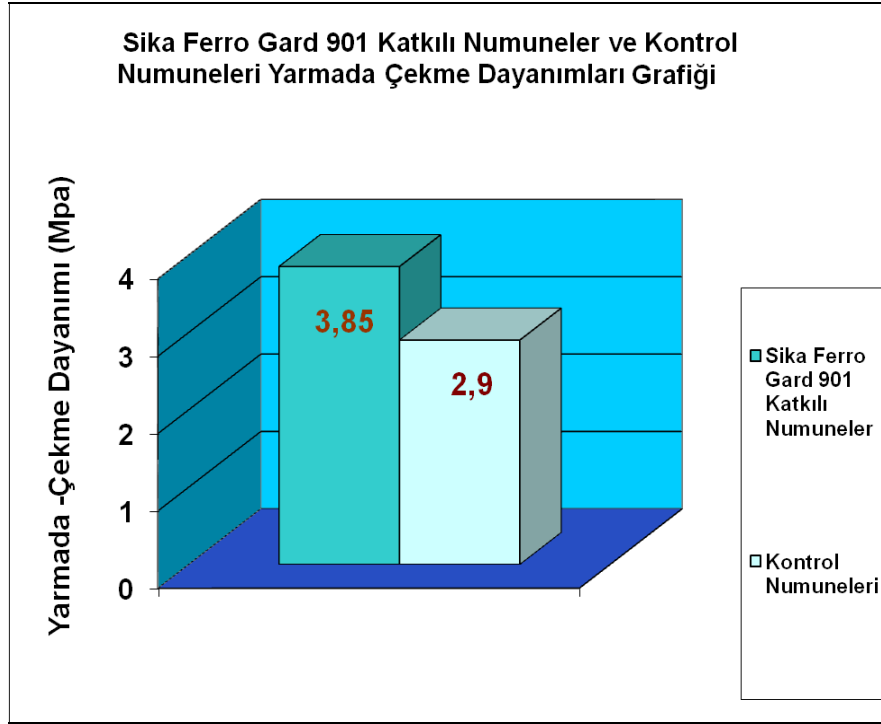
Şekil 5.62 Tecno Silica Silis Dumanı Katkılı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Kür Sonrası Basınç Dayanımları

Şekil 5.62’de görüldüğü gibi Tecno Silica ticari isimli silis dumanı katkılı olan küp beton numunelerin 28 günlük kür sonrası basınç dayanımı 30,6 Mpa olarak ölçülmüştür. Kontrol numunelerinin 28 günlük kür sonrası basınç dayanımı ise 27 Mpa olarak belirlenmiştir. Yani Tecno Silica ticari isimli silis dumanının betona katılması ile betonun basma dayanımında artış olduğu görülmüştür. Bunun nedeni çimentodan yaklaşık yüz kat daha ince olan silis dumanının çimento hamurundaki mikro boşlukları ve agrega-çimento ara yüzeyini doldurarak, betonun dayanımını yükseltmesidir.

5.10 Yarmada-Çekme Dayanımı Ölçümü Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

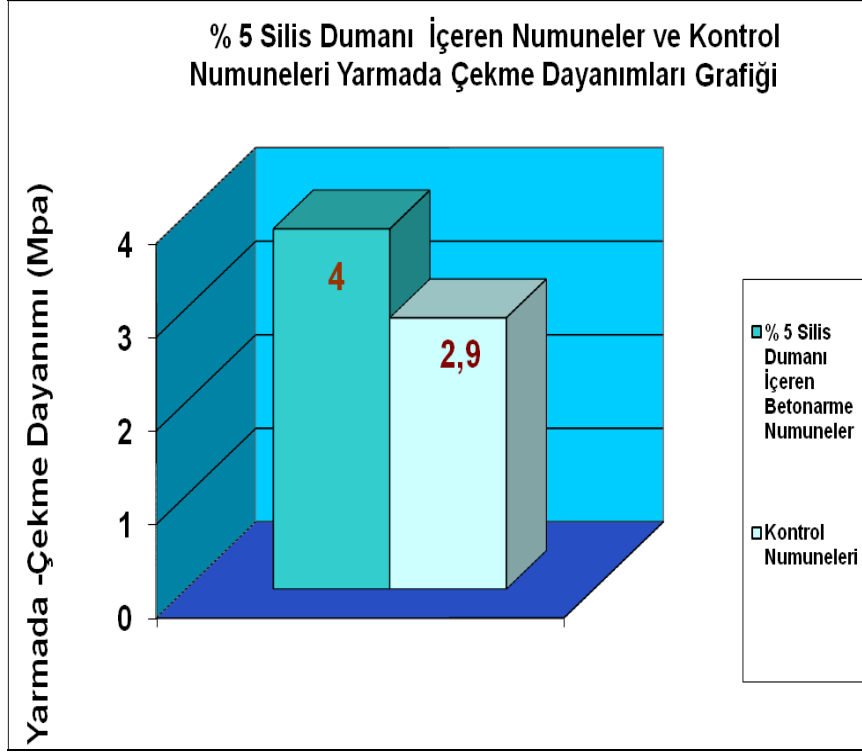
Şekil 5.63’de görüldüğü gibi Sika Ferro Gard-901 katkı maddeli olan küp beton numunelerin 28 günlük kür sonrası yarmada-çekme dayanımı 3,85 Mpa olarak ölçülmüştür. Kontrol numunelerinin 28 günlük kür sonrası yarmada -çekme dayanımı ise 2,9 Mpa olarak belirlenmiştir. Yani Sika Ferro Gard-901 ticari isimli nitrojen içeren organik ve inorganik esaslı inhibitörün betona katılması ile betonun yarmada-çekme dayanımında artış olduğu görülmüştür. Bunun nedeni Sika Ferro Gard-901 katkı maddesinin betonda hiper akışkanlaştırıcı görevi görerek su ihtiyacını azaltması olarak düşünülmektedir. Çünkü çimentonun hidrasyonundan (prizinden) sonra taze betonun akıcılık sağlaması için konulan su zamanla buharlaşarak ayrılır ve betonda boşluklar

oluşur. Bu durum ise betonun yarmada-çekme dayanımının düşmesine neden olabilir. Sika Ferro Gard 901 beton katkı inhibitörünün ise karışıma fazla su katılması durumunun önüne geçerek betonda oluşabilecek boşlukları azaltarak ya da engelleyerek betonun yarmada çekme dayanımının artmasını sağladığı düşünülmektedir.



Şekil 5.63 Sika Ferro Gard-901 Katkılı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Kür Sonrası Yarmada-Çekme Dayanımları

Şekil 5.64’de görüldüğü gibi Tecno Silica Silis dumanı katkıli küp beton numunelerin 28 günlük kür sonrası yarmada çekme dayanımı 4 Mpa olarak ölçülmüştür. Kontrol numunelerinin 28 günlük kür sonrası yarmada çekme dayanımı ise 2,9 Mpa olarak belirlenmiştir. Yani Tecno Silica Silis dumanı katkıli betonun yarmada-çekme dayanımında artış olduğu görülmüştür.



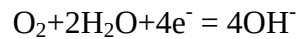
Şekil 5.64 Tecno Silica Silis Dumanı Katkılı Numuneler ve Kontrol Numuneleri Kür Sonrası Yarmada-Çekme Dayanımları

Bunun nedeni pozolanik reaksiyon hızı yüksek olan silis dumanının kalsiyum hidroksitle reaksiyonu sonucu C-S-H oluşturuç çekirdeklerde ilave kristal yapısı oluşumuna katkıda bulunarak dayanımı dolaylı yoldan arttırması ve çimentodan yaklaşık yüz kat daha ince olması sayesinde çimento hamurundaki mikro boşlukları ve agrega-çimento ara yüzeyini doldurması neticesinde dayanımı arttırması olarak düşünülür.

5.11 Betonarme Numunelere Katodik Koruma Uygulanması

5.11.1 Betonarme Numunelere Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Uygulanması

Betonarme demirlerine her iki katodik koruma sistemi de uygulanabilir. Beton rezistivitesi çok yüksek olduğundan (genellikle 3000-20.000 Ohm. cm) atmosferde bulunan betonlarda zorunlu olarak dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi uygulanır. Dış akım kaynaklı katodik koruma uygulandığında betonarme demirlerindeki anodik reaksiyon tam olarak durur. Betonarme demirlerinde yalnızca oksijen redüksiyonu reaksiyonu yürür.



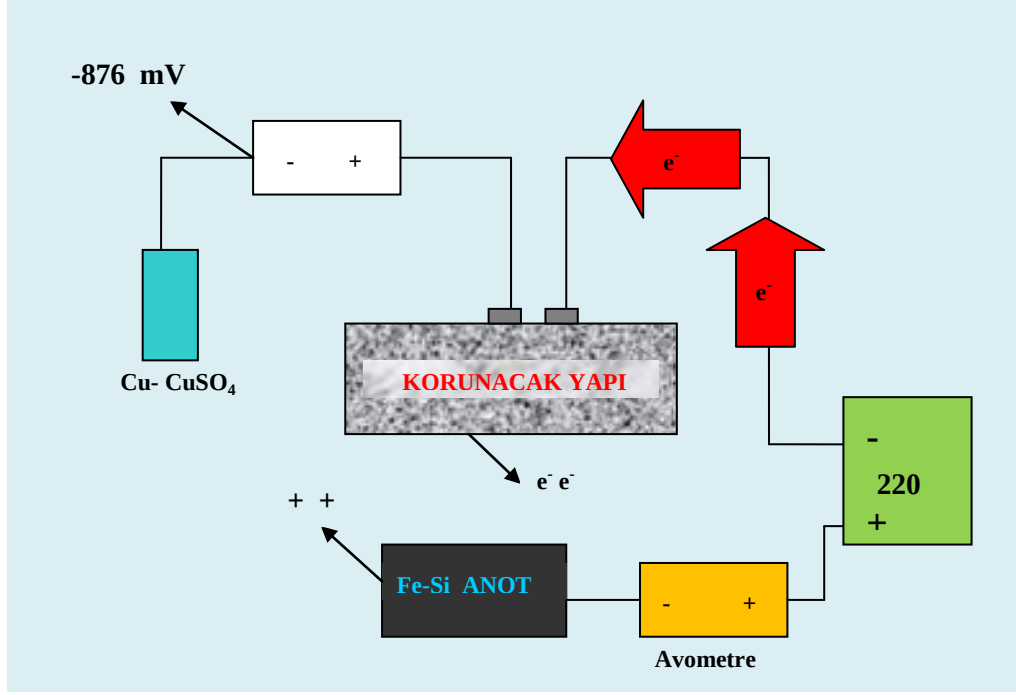
Dış akım uygulanarak anottan korunacak yapıya yani katoda elektron pompalanmış olur. Katoda yani korunacak olan yapıya elektron pompalamadaki amaç; katottan korumasız durumdayken korozyon reaksiyonları esnasında elektron çıkışı olduğundan ve elektron çıkışına bağlı olarak artı yüklü iyonlar halinde malzeme kaybı olduğundan bu malzeme kaybını önlemek için katodun kaybettiği kadar elektronu dışarıdan vermek yoluyla katotta oluşan elektron kaybını toplamda sıfırlamak suretiyle artı yüklü iyonlar şeklinde malzeme kaybının, yani katottaki çözünmenin önüne geçmektir. Uygulanacak olan akım ihtiyacı katot bölgesindeki oksijen redüksiyon hızına bağlıdır. Katot bölgesine oksijen difüzyonu önlenerek örneğin (beton yüzeyleri boyanarak) katodik koruma akım ihtiyacı azaltılabilir. Yalçın ve Koç'un yayınına göre uygulamada verilecek akım, katodun doygun bakır/bakır sülfat referans elektroduna göre potansiyelinin -770 mV dan daha negatif ve -1150 mV dan daha pozitif yarı hücre potansiyel değerleri arasında olmasını sağlayacak şekilde doğru akım güç kaynağı üzerinde ayarlanmalıdır. Beton içinde klorür iyonları bulunması katodik koruma için hiçbir engel oluşturmaz. Ancak klorür iyonlarının fazlalığı demir yüzeylerini aktif hale getireceğinden katodik koruma akım ihtiyacını arttırıcı rol oynar. Klorür iyonları zamanla anot yüzeyine taşınarak orada absorbe olur. Katodik koruma devresinden akım geçtikçe betonarme demirleri çevresinde oluşan hidroksil iyonları pH'ı arttırarak pasifleşmeyi kolaylaştırıcı etki yapar. Katot bölgesine oksijen difüzyon hızı, akım ihtiyacına etki eden bir faktör olduğundan, su ve yer altı beton yapılarda beton içine oksijen difüzyon hızı çok yavaş olduğu için uygulanması gereken akım ihtiyacı da atmosferde bulunan betonlara uygulanması gereken akım ihtiyacına göre daha az olmaktadır [100].

Bu çalışmada eski betonarme yapıları temsilen betonarme yapıdan çıkarılan ve kullanılmış durumda olan Ø14'lük nervürlü donatı çelikleri kullanılarak 200x200x200 mm ölçülerinde küp şeklinde betonarme numuneler üretilmiştir. Küp şeklinde betonarmelerin dökümü esnasında donatı çelikleri çelik tellerle birbirine bağlanarak elektriksel akımın geçişine olanak sağlanmıştır. Nervürlü çelik donatılar betonarme numunelerin dört köşesine yerleştirilmiştir. Demir-silisyum anot ise betonarme küp numunenin tam ortasına yarıyı biraz geçecek şekilde gömülmüştür. Betonarme numuneler ölçüm yapılmadan önce ıslatılmıştır. Çünkü betonun rezistivitesi özellikle kuru halde iken çok yüksektir ve bu durum katodik koruma akım ihtiyacının belirlenmesini güçleştirir ve bazı bölgelerin aşırı korunmasına neden olabilir. Normal

betonlarda çeliğin aşırı koruma sınır değeri doymuş bakır/bakır sülfat referans elektroduna göre -1150 mV, ön gerilimli betonlarda -950 mV dir. Aşırı korumanın çeşitli sakıncaları vardır. Aşırı koruma sonucu katot bölgesinde hidrojen çıkışı olur. Bu ise betonarme demirlerinde hidrojen kırılgenliğine yol açabilir. Diğer taraftan katot bölgesinde hidroksil iyonlarının artışı alkali-agrega reaksiyonuna ve beton ile çelik arasındaki aderansın azalmasına neden olabilir [100].

Yalçın ve Koç'un yayınına göre betonarme demirlerine uygulanmış olan katodik korumanın gerçekleşip gerçekleşmediğini belirlemek üzere, zeminler ve doğal sular için verilmiş olan, doymuş bakır/bakır sülfat referans elektroduna göre -850 mV potansiyel kriteri, betonarme demirleri için -770 mV olarak alınabilir. Yani betonarme demirlerinin potansiyeli doymuş bakır/bakır sülfat referans elektroduna göre -770 mV veya daha negatif hale getirilirse korozyon önlenmiş olur. Potansiyelin -1150 mV'dan daha negatif olması halinde de aşırı koruma söz konusu olur ve katotta hidrojen çıkışı başlar [100].

Üretilen betonarme numunelerin henüz akım verilmeden önce Cu-CuSO₄ referans elektrodu ile yarı hücre potansiyel değerleri ölçülmüştür ve -475 mV dolaylarında tespit edilmiştir. Bu değer numunelerde kullanılan çelik donatıların kullanılmış olması sebebi ile korozyona uğradığını göstermektedir. Ancak beton içinde ne derece klorür bulunursa bulunsun ve çelik donatılar korozyona uğramış ve uğramaya devam ediyor olursa olsun katodik koruma uygulanarak betonarme demirlerinin devam eden korozyonunun tam olarak önlenileceğini doğrulamak için numune üzerine dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi aşağıdaki Şekil 5. 65' de gösterildiği gibi kurulmuştur.



Şekil 5.65 Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Sistemi

Doğru akım kaynağının negatif ucu korunacak olan çelik donatılara bağlanıp çelik donatıların ortamdaki agresif iyonlar sebebi ile kaybettikleri elektronlar akım kaynağı ile çelik donatılara dışarıdan verilmiştir. Böylelikle çelik donatılardan toplamda kaybedilen elektron olmadığı için yük dengesini sağlamak amacı ile demirin iyonlar halinde çözünerek betonun por çözeltisine karışması söz konusu olmadığından donatıların korozyonu tamamen durdurulmuştur ve betonarme numunelerin doymuş bakır-bakır sülfat referans elektroduna göre yarı hücre potansiyel değeri -851 mV olarak ölçülmüştür. Dış akım kaynaklı katodik koruma prosesinin uygulanması esnasında alınan fotoğraflar Şekil 5.66 ve Şekil 5.67’de sunulmuştur.



Şekil 5.66 Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Uygulanmadan Önce Betonarme Numunedeki Çelik Donatıların Yarı Hücre Potansiyel Ölçümü



Şekil 5.67 Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Uygulanırken Betonarme Numunedeki Çelik Donatıların Yarı Hücre Potansiyel Ölçümü

Elde edilen değer, betonarme demirleri için potansiyel kriteri olarak kabul edilen maksimum -770 mV potansiyelinden daha negatif ve aşırı koruma başlangıç sınırı olan -950 mV potansiyelinden pozitif olduğu için katodik korumanın tam olarak gerçekleştiğini de doğrulamıştır. Düzenekteki avometre, verilen akım miktarını gösterir. Akım miktarı potansiyel değerini -770 mV potansiyelinden daha negatif hale getirecek şekilde ayarlanır. Sabit bir değer değildir. Potansiyel ölçüm cihazının yani dijital voltmetrenin negatif ucu doymuş bakır-bakır sülfat referans elektroduna ve pozitif ucu donatıya bağlanır. Bunun nedeni bakır-bakır sülfat referans elektroduna göre yapılan yarı hücre potansiyel ölçümlerinden negatif olarak değerler alınması gerekliliğidir.

5.11.2 Betonarme Numunelere Galvanik Anotlu Katodik Koruma Uygulanması

Betonarme demirlerine her iki katodik koruma sistemi de uygulanabilir fakat beton rezistivitesi çok yüksek olduğundan (genellikle 3000-20. 000 Ohm. cm) atmosferde bulunan betonlarda zorunlu olarak dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi uygulanır. Galvanik anotlu katodik koruma ise yeraltında rutubetli ortamda ve deniz içinde bulunan betonlarda uygulanabilir. Galvanik anotlu katodik koruma sisteminde de betonarme numuneler için olması gereken koruma potansiyel kriteri aynı dış akım kaynaklı katodik korumadaki gibi yine -770 mV potansiyelinden daha negatifliğin ve aşırı koruma başlangıç sınırı olan -1150 mV potansiyelinden daha pozitifliğin sağlanmasıdır [100].

Galvanik anotlu katodik koruma sisteminde akım ihtiyacını demirden daha aktif olan bir galvanik anot sağlar. Galvanik anotlu katodik koruma sistemini kurmaktaki amacımız korunacak olan çelik donatıları kendisinden daha aktif olan çinko anodu kullanarak suni bir pil devresi oluşturup, çinkonun korozyonu ile korozyona karşı korunacak çelik donatıya elektron transferi sağlayarak yapıyı katot haline getirerek korumaktır. Galvanik anotlu katodik koruma sistemini kurmak için hazırladığımız betonarme numuneler, dış akım kaynaklı katodik koruma sistemini kurmak için hazırladığımız betonarme numuneler ile bire bir aynıdır. Buradaki tek fark anot olarak demir-silisyum anot yerine çinko galvanik anodunun kullanılmasıdır. Galvanik çinko anot betonarme numunenin tam ortasına yarıyı geçecek şekilde gömülmüştür. Galvanik anotlu betonarme numunedeki çelik donatıların çinko anot ile metalik bağlantıları henüz yapılmadan önce Cu-CuSO₄ referans elektrodu ile yarı hücre potansiyel değerleri Şekil 5.68'deki gibi ölçülmüştür ve -235 mV dolaylarında tespit edilmiştir. Bu değer numunelerde kullanılan çelik donatıların kullanılmış olması sebebi ile korozyonla ilgili belirsizlik bölgesinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.68 Galvanik Anotlu Katodik Koruma Uygulanmadan Önce Betonarme Numunedeki Çelik Donatıların Yarı Hücre Potansiyel Ölçümü

Daha sonra her ne kadar çelik donatılar korozyona uğramış ve uğramaya devam ediyor olursa olsun galvanik anotlu katodik koruma uygulanarak betonarme demirlerinin devam eden korozyonunun tam olarak önlenebileceğini doğrulamak için çinko anodun betonarme numunede bulunan çelik donatılar ile metalik bağlantısı sağlanarak numune üzerine galvanik anotlu katodik koruma sistemi Şekil 5.14'de gösterildiği gibi kurulmuştur.

Katod yani donatı çeliğinin reaksiyonu için gerekli olan elektronlar galvanik anot olarak bağlanan çinkonun kendiliğinden yükseltgenme reaksiyonu ile sağlanmıştır. Böylece korunan metalin yüzeyinde anodik reaksiyonların durdurulmasına destek sağlanmıştır ve betonarme numunelerin doymuş bakır-bakır sülfat referans elektroduna göre yarı hücre potansiyel değeri -363 mV olarak ölçülmüştür. Elde edilen değerin, numuneye galvanik anotlu katodik koruma yapılmadan önce ölçülen -235 mV'luk yarı hücre potansiyelinden daha negatif olması çinkonun galvanik anot olarak çözündüğünü ve çelik donatıları katodik olarak koruyabilmek için donatılara elektron sağladığını göstermiştir. Ancak kullanılan çinko anodun gücünün kullanılan donatı sayısına karşı tam yeterli gelmemesi sebebi ile elde edilen değer -770 mV'un altına inememiştir. Fakat yapılan çalışma çelik donatılar için yeterli büyüklük ve güçte çinko anot kullanılması durumunda katodik korumanın tam olarak gerçekleşeceğini ve her ne kadar çelik donatılar korozyona uğramış ve uğramaya devam ediyor olursa olsun galvanik anotlu katodik koruma uygulanarak betonarme demirlerinin devam eden korozyonunun tam olarak önlenebileceğini göstermektedir.

5.12 Ekonomik Değerlendirme

5.12.1 Korozyon Önleyici Katkı Malzemelerinin Ekonomik Değerlendirmesi

Betonarme yapılarda korozyon engelleyici katkı malzemelerini ekonomik açıdan değerlendirmek için 411,6 metrekare temel alanına sahip 20 katlı bir bina için maliyet hesapları yapılmıştır. Bu çalışmada 1 Euro = 2,31 TL olarak kabul edilmiştir. Aşağıdaki değerler projeden alınmıştır.

Toplam 80 daire

2 bodrum kat-18 normal kat

Temel taban boyutları: 24,5 metre x 16,80 metre

Temel yüksekliği: 1,4 metre

Binanın toplam temel alanı. 411,6 metrekare

Temelin toplam hacmi. 576,24 metreküp

Temelde kullanılan toplam donatı hacmi..... 6,23 metreküp

Donatıların yüzeyine kaplanan Sika Monotop 610'un korozyondan korunmak amacı ile temeldeki kullanım miktarları ve maliyetleri aşağıdaki gibidir.

Sika Monotop 610 Çelik donatı yüzeyine sürülen malzemedir.

Sika Monotop 610 Kg Fiyatı =1,58 TL

Tavsiye Edilen Kullanım Miktarı = 1 metre kare çelik donatıda 1,5-2 kg sürme malzemedir.

1 Metreküp betonda kullanılan çelik donatı miktarı 85 kg dır.

Binanın temelinde 18 mm çaplı çelik donatılar kullanılmaktadır. Temelde kullanılan çelik donatıların kaplama maliyetini çıkarmak için 18 mm çaplı çelik donatılar esas alınmıştır.

Çelik Hacmi= (Çelik ağırlığı/Çelik öz ağırlığı) formülünden yararlanılarak 1 metreküp temel betonunda kullanılan çelik donatı yüzey alanı yaklaşık olarak belirlenmiştir.

$$\text{Çelik hacmi} = (85.000 \text{ gr} / 7,85 \text{ gr/cm}^3)$$

$$\text{Çelik hacmi} = 10.828 \text{ cm}^3$$

$$\text{Çelik hacmi} = 3,14 \times r^2 \times h$$

$$\text{Çelik Donatı Yarıçapı} = r = 9 \text{ mm} = 0,9 \text{ cm}$$

$$10.828 \text{ cm}^3 = 3,14 \times (0,9)^2 \times h$$

$$\text{Çelik Donatı Uzunluğu} = h = 4257,3 \text{ cm} = 42,57 \text{ metre}$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ Betonda Kullanılan Çelik Donatı Yüzey Alanı} = 2 \times 3,14 \times r \times h + 2 \times 3,14 \times r^2$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ Betonda Kullanılan Çelik Donatı Yüzey Alanı} = 2 \times 3,14 \times 0,9 \times 4257,3 + 2 \times 3,14 \times (0,9)^2$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ Betonda Kullanılan Çelik Donatı Yüzey Alanı} = 24.062,26 \text{ cm}^2 + 5,08 \text{ cm}^2 \\ = 24.067,35 \text{ cm}^2 = 2,40 \text{ m}^2$$

1 metreküp betonda bulunan çelik donatılardaki yüzey alanı için Sika Monotop 610 malzemesinden gereken kullanım miktarı = $2,40 \text{ m}^2 \times 2 \text{ kg} = 4,80 \text{ kg}$

Sika Monotop 610 Sürme Malzemesi Beton Metreküp Fiyatı = $4,80 \text{ kg} \times 1,58 \text{ TL/kg} = 7,58 \text{ TL}$

1 günlük işçilik maliyeti ortalama 60 TL dir.

1 işçinin günde 11 saat çalıştığı ve 1 m² yi ortalama 10 dakikada kaplayabileceği düşünülürse 2,40 m² donatının kaplanabilmesi için ortalama 24 dakika harcanılacaktır.

İşçilik maliyeti = (60 TL Gün/11 saat) * (24 dakika/60 dakika)

İşçilik maliyeti = 2,18 TL olur.

Toplam Maliyet = 7,58+2,18

Toplam Maliyet = 9,76 TL/ m³ betondur.

Temelde toplam 570,01 m³ beton kullanıldığına göre korozyonu önleme amacı ile donatıların yüzeyi Sika Monotop 610 sürme esaslı malzemesi ile kaplandığında 411,6 metrekairelik temele sahip bir binadaki ilave kaplama malzemesi maliyeti 570,01*9,76 TL = 5563,29 TL olmaktadır.

Tekno bond 650 Çelik donatı yüzeyine sürülen malzemedir.

Tekno bond 650 Kg Fiyatı =5 Euro =5x2,31 TL=11,55 TL

Ortalama Kullanım Miktarı= 1 metre kare çelik donatıda yaklaşık 500 gr sürme malzemedir.

1 Metreküp betonda kullanılan çelik donatı miktarı 85 kg dır.

Çelik Donatı Yüzey Alanı = 2,40 m²

1 metreküp betonda bulunan çelik donatılardaki yüzey alanı için Tekno bond 650 malzemesinden gereken kullanım miktarı =2,40 m² x 0,5 kg= 1,2 kg

Tekno bond 650 Sürme Malzemesi Beton Metreküp FiyatıB=1,2 kgx11,55 TL/kg=13,86 TL

1 günlük işçilik maliyeti ortalama 60 TL dir.

1 işçinin günde 11 saat çalıştığı ve 1 m² yi ortalama 10 dakikada kaplayabileceği düşünülürse 2,40 m² donatının kaplanabilmesi için ortalama 24 dakika harcanılacaktır.

İşçilik maliyeti = (60 TL Gün/11 saat) * (24 dakika/60 dakika)

İşçilik maliyeti =2,18 TL olur.

Toplam Maliyet =13,86+2,18

Toplam Maliyet =16,04 TL/m³ betondur.

Temelde toplam 570,01 m³ beton kullanıldığına göre korozyonu önleme amacı ile donatıların yüzeyi Tekno bond 650 sürme esaslı malzemesi ile kaplandığında 411,6 metrekairelik temele sahip bir binadaki ilave kaplama malzemesi maliyeti 570,01*16,04 TL =9142,96 TL olmaktadır.

Sıcak Daldırma Galvaniz Kaplama çelik donatı yüzeyine yapılan çinko kaplamadır.

Sıcak Daldırma Galvaniz Kaplama çelik kg fiyatı = 0,60 TL

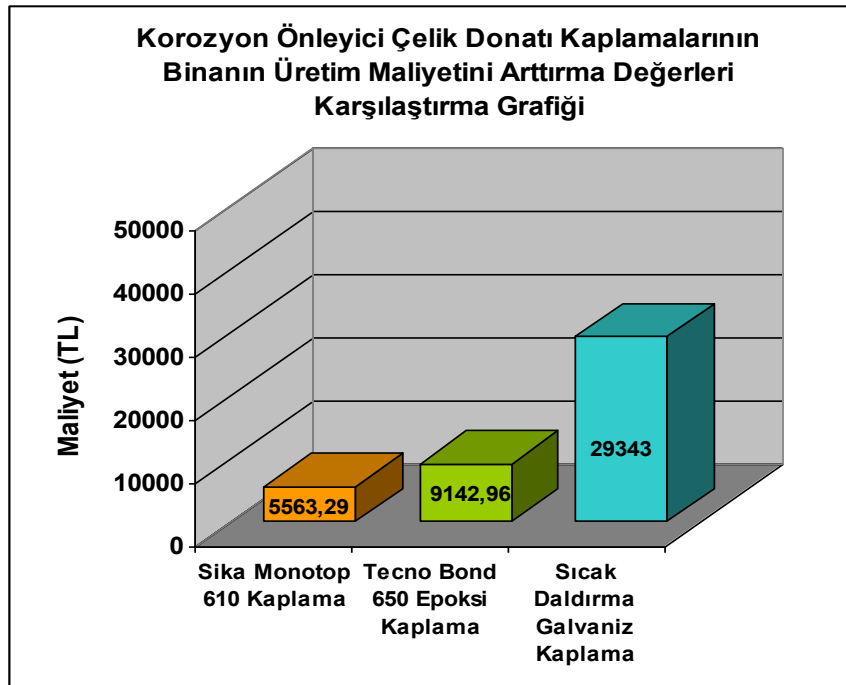
Temelde kullanılan çelik donatı hacmi 6,23 m³ =6.230.000 cm³ tür.

Temelde kullanılan çelik donatının ağırlığı.....(6.230.000 *7,85)/1000=48.905 kg

Sıcak Daldırma Galvaniz Kaplama Temelde Kullanım Fiyatı=48.905 kgx0,60 TL/kg=29.343 TL

Temelde toplam 48.905 kg donatı kullanıldığına göre korozyonu önleme amacı ile donatıların yüzeyi sıcak daldırma galvaniz kaplama ile kaplandığında 411,6 metrekairelik temele sahip bir binadaki ilave kaplamanın maliyeti 29.343 TL olmaktadır.

Korozyon önleyici çelik donatı yüzey kaplamalarının maliyet karşılaştırması Şekil 5.69'da yapılmıştır.



Şekil 5.69 Korozyon Önleyici Çelik Donatı Kaplamalarının Bina Üretim Maliyetini Arttırma Değerleri Karşılaştırma Grafiği

Şekil 5.69'a göre bina üretim maliyetini en az 5563,29 TL ile Sika Monotop 610 ticari isimli çelik donatı yüzey kaplaması arttırmaktadır. Bunu sırası ile Tecno bond 650 epoksi 9142,96 TL, sıcak daldırma yöntemi ile donatıyı çinko kaplama 29.343 TL ile takip etmektedir.

Sika Ferro Gard 901..... Beton harcına katılan katkıdır.

Sika Ferro Gard 901..... Yoğunluğu yaklaşık 1000 kg/m³

Sika Ferro Gard 901..... Kg Fiyatı =7,95 TL

Tavsiye Edilen Kullanım Miktarı= 1 metreküp betonda 12 kg katkıdır.

Sika Ferro Gard 901 Katkı Malzemesi Beton Metreküp Fiyatı= 7,95TL*12 Kg

Sika Ferro Gard 901 Katkı Malzemesi Beton Metreküp Fiyatı = 95,4 TL

Temelde toplam 570,01 metreküp beton kullanılmaktadır.

Temel Beton Metreküpü*1 metreküp Beton için İlave Edilen Katkı Miktarı
570,01*12=6840,12 kg

Sika Ferro Gard 901 Katkısının Kapladığı Hacim 6840,12/1000=6,840 m³'tür.

Sika Ferro Gard 901 katkısının beton metreküpünde kapladığı hacim 6,840 m³ olduğundan temel betonu hacmi 563,17 m³ e düşecektir.

Temelde toplam 563,17 m³ beton kullanıldığına göre korozyonu önleme amacı ile katkı malzemesi olarak Sika Ferro Gard 901 katıldığına 411,6 metrekarelik temele sahip bir binadaki ilave katkı malzemesinin maliyeti 563,17*95,4 TL=53.726 TL olmaktadır.

Tecno Silica Silis Dumanı..... Beton harcına katılan katkıdır.

Tecno Silica Silis Dumanı Kg Fiyatı =0,5 Euro = 0,5x2,31 TL =1,15 TL

Kullanım Miktarı= 1 metreküp betonda çimento ağırlığınca %5 katkıdır.

Çimento Ağırlığı =300 kg

Tecno Silica Kullanım Miktarı= (300 kg /100)x5 =15 kg dır.

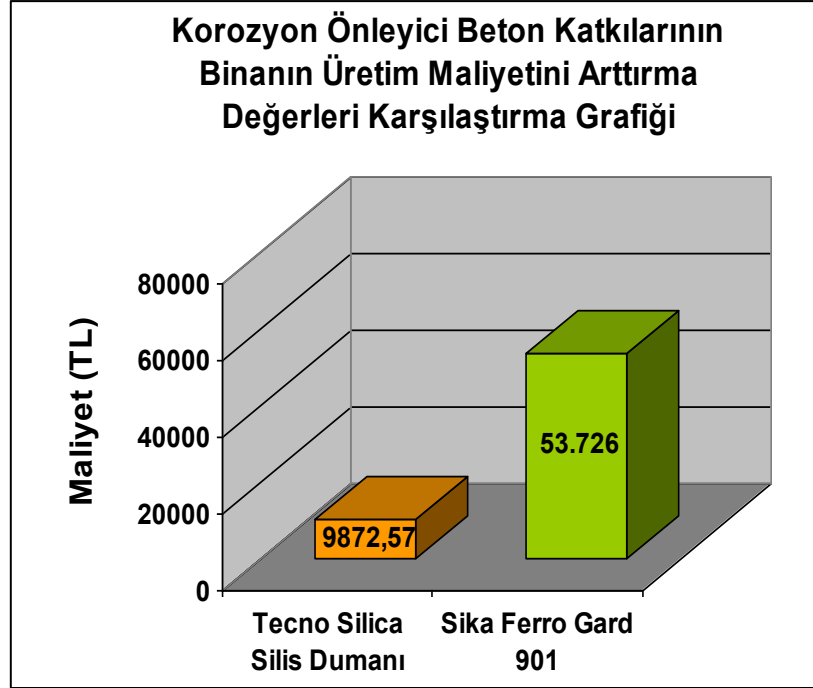
1 Metreküp betonda kullanılan Tecno Silica silis dumanı fiyatı =15 kg x 1,15 TL= 17,32 TL

Temelde toplam 570,01 metreküp beton kullanılmaktadır.

Temelde toplam 570,01 m³ beton kullanıldığına göre korozyonu önleme amacı ile katkı malzemesi olarak çimento yerine ilave edilen Tecno Silica silis dumanı kullanıldığına

411,6 metrekarelik temele sahip bir binadaki ilave katkı malzemesinin maliyeti $570,01 \times 17,32 \text{ TL} = 9872,57 \text{ TL}$ olmaktadır.

Korozyon önleyici beton harç katkılarının maliyet karşılaştırması Şekil 5.70'de yapılmıştır. Şekil 5.70'e göre bina üretim maliyetini sırası ile ve Tekno silica silis dumanı 9872,57 TL ve Sika Ferro Gard 901 inhibitörü 53.726 TL arttırmaktadır.



Şekil 5.70 Korozyon Önleyici Beton Harç Katkılarının Bina Üretim Maliyetini Arttırma Değerleri Karşılaştırma Grafiği

Sika Ferro Gard 903..... Beton yüzeyine sürülen malzemedir.

Sika Ferro Gard 903..... 1 Kilogram Fiyatı= 2,40 Euro = $2,4 \times 2,31 \text{ TL} = 5,54 \text{ TL}$

Tavsiye Edilen Kullanım Miktarı= 1 metrekare betonda 300-500 gr katkıdır.

Temelin toplam hacmi 576,24 metreküptür.

Temel tabanı 16,8 metre*24,5 metre boyutlarındadır.Yüksekliği ise 1,4 metredir.

Temelin toprağa temas eden yüzey alanı 527,24 metrekaredir.

Temele uygulanacak kaplama miktarı..... $527,24 \times 0,5 = 263,62 \text{ kg}$

Temelde kullanılan malzemenin maliyeti..... $263,62 \times 5,54 = 1460,45 \text{ TL}$

1 işçinin günde 11 saat çalıştığı ve 1 m^2 yi ortalama 10 dakikada kaplayabileceği düşünülürse $527,24 \text{ m}^2$ alanın kaplanabilmesi için ortalama 5272,4 dakika harcanılacaktır.

İşçilik maliyeti = (60 TL Gün / 11 saat) * (5272,4 dakika/60 dakika)

İşçilik maliyeti = 479,3 TL olur.

Toplam Maliyet = 1460,45+479,3

Toplam Maliyet = 1939,75 TL

Yukarıda yapılan hesaplama göre 527,24 metrekairelik toprağa temas eden temel yüzeyi korozyonu önleme amacı ile Sika Gard 903 sürme esaslı malzemesi ile kaplandığında binadaki ilave kaplama malzemesinin maliyeti 1939,75 TL olmaktadır.

Sika Gard 703 W Beton yüzeyine sürülen malzemedir.

Sika Gard 703 W 1 Kilogram Fiyatı= 5 Euro = 5x2,31 TL=11,55 TL

Tavsiye Edilen Kullanım Miktarı= 1 metrekaire betonda 200 gr katkıdır.

200 gr Sika Gard 703 W kaplama malzemesi fiyatı= (11,55/1000 gr)x200 gr=2,31 TL

Temelin toprağa temas eden yüzey alanı 527,24 metrekairedir.

Temele uygulanacak kaplama miktarı..... 527,24 *0,2 = 105,45 kg

Temelde kullanılan malzemenin maliyeti..... 105,45*11,55 = 1217,92 TL

İşçilik maliyeti = (60 TL Gün/11 saat) * (5272,4 dakika/60 dakika)

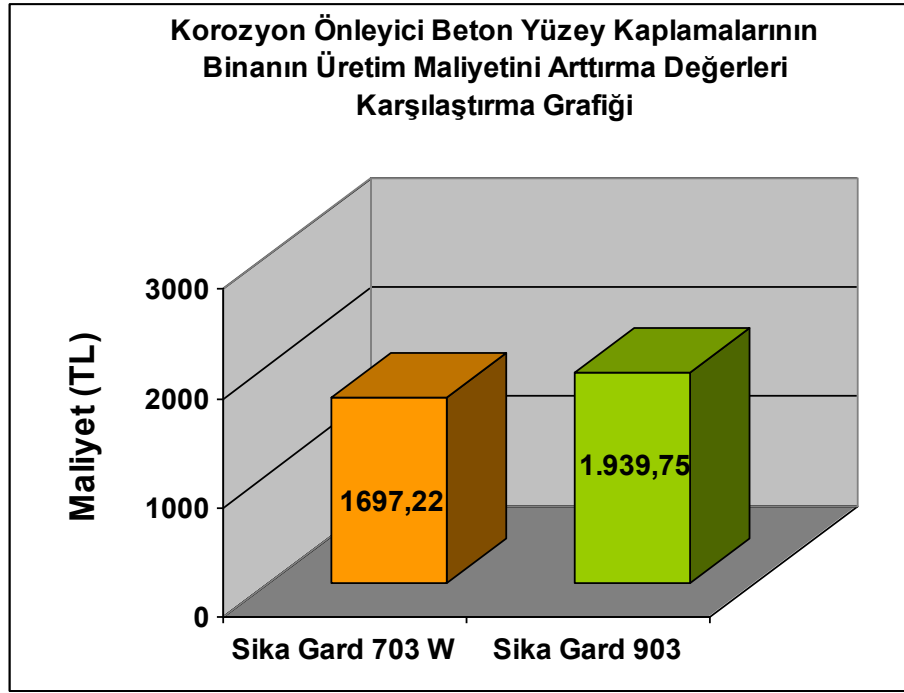
İşçilik maliyeti = 479,3 TL olur.

Toplam Maliyet = 1217,92+479,3

Toplam Maliyet = 1697,22 TL

Yukarıda yapılan hesaplama göre 527,24 metrekairelik toprağa temas eden temel yüzeyi korozyonu önleme amacı ile Sika Gard 703 W sürme esaslı malzemesi ile kaplandığında binadaki ilave kaplama malzemesinin maliyeti 1697,22 TL olmaktadır.

Betonun dış yüzeyine sürülen korozyon önleyici kaplama malzemelerinin maliyet karşılaştırması Şekil 5.71’de yapılmıştır.



Şekil 5.71 Korozyon Önleyici Betona Sürme Esaslı İnhibitör Kaplamalarının Bina Üretim Maliyetini Arttırma Değerleri Karşılaştırma Grafiği

Şekil 5.71'e göre bina maliyetini sırası ile Sika Gard 703 W inhibitörü 1697,22 TL, Sika Gard 903 inhibitörü 1939,75 TL arttırmaktadır.

411,6 metrekarelik tek katlı bir yapının arsa maliyeti hariç maliyet kalemleri ortalama olarak aşağıdaki gibidir.

Temel Maliyeti;

Temel (Temel kazısı, kanalizasyon bağlantısı) = 15.000 TL

Temel (Temel için beton maliyeti yaklaşık $570,01 \text{ m}^3$) = 60.537 TL

Temel (Temel için betonarme çeliği ortalama 48.905 kg) = 75.800 TL

Toplam Temel Maliyeti = 151.337 TL

Binadaki Tek Katın Temel Hariç Maliyeti;

Kaba Yapı (Tek kat için beton maliyeti yaklaşık 330 m^3) = 35.047 TL

Kaba Yapı (Tek kat için betonarme çeliği ortalama 32.280 kg) = 50.032 TL

Kaba Yapı (Tek kat için betonarme taşıyıcı sistem imalat işçiliği) = 24.000 TL

Kaba Yapı (Tek kat için iç-dış tüm yüzeylerin sıvanması)= 17.000 TL

İnce Yapı (Yer döşemesi, kalebodur, masif parke, laminant) = 20.000 TL

İnce Yapı (Yer döşemesi işçiliği) = 10.000 TL

İnce Yapı (Boya badana malzeme ve işçiliği) = 20.000 TL

İnce Yapı (Vitrifiye, armatür malzeme ve işçiliği) = 18.000 TL

İnce Yapı (Elektrik malzemesi ve montaj işçiliği) = 8.000 TL

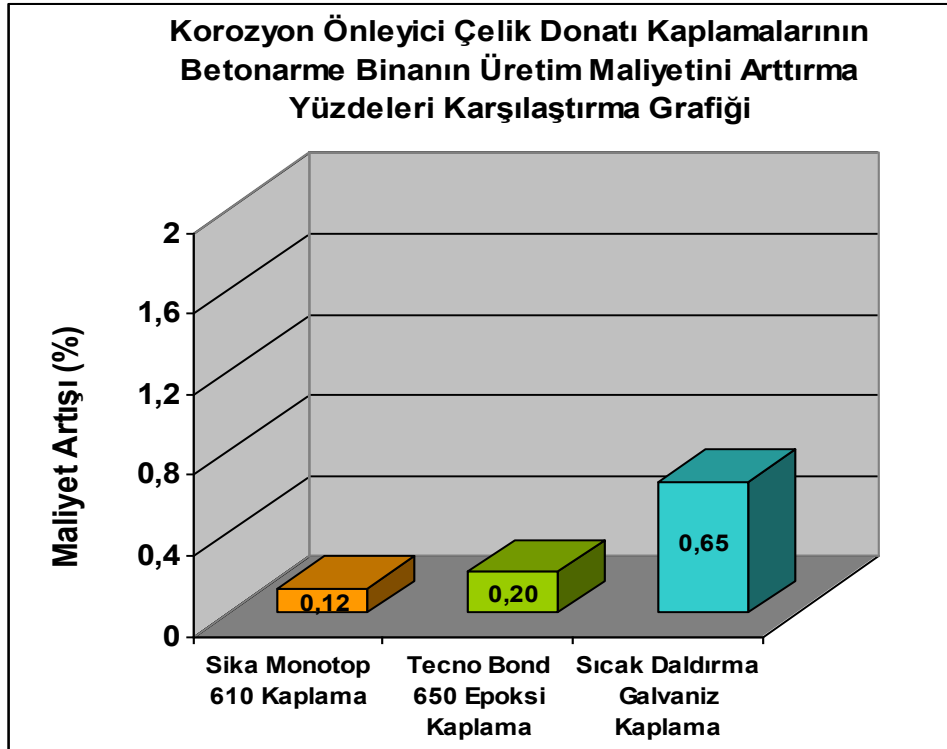
Mimarlık Mühendislik Hizmetleri ve Resmi Harç Giderleri = 15000 TL

Tek Katın Toplam Maliyeti = 217.079 TL

Yirmi Katlı Binanın Arsa Maliyeti Hariç Toplam İnşaat Maliyeti = Temel Maliyeti+20*Tek Kat Maliyeti

Yirmi Katlı Binanın Arsa Maliyeti Hariç Toplam İnşaat Maliyeti
151.337+20*217.079=4.492.917 TL dir.

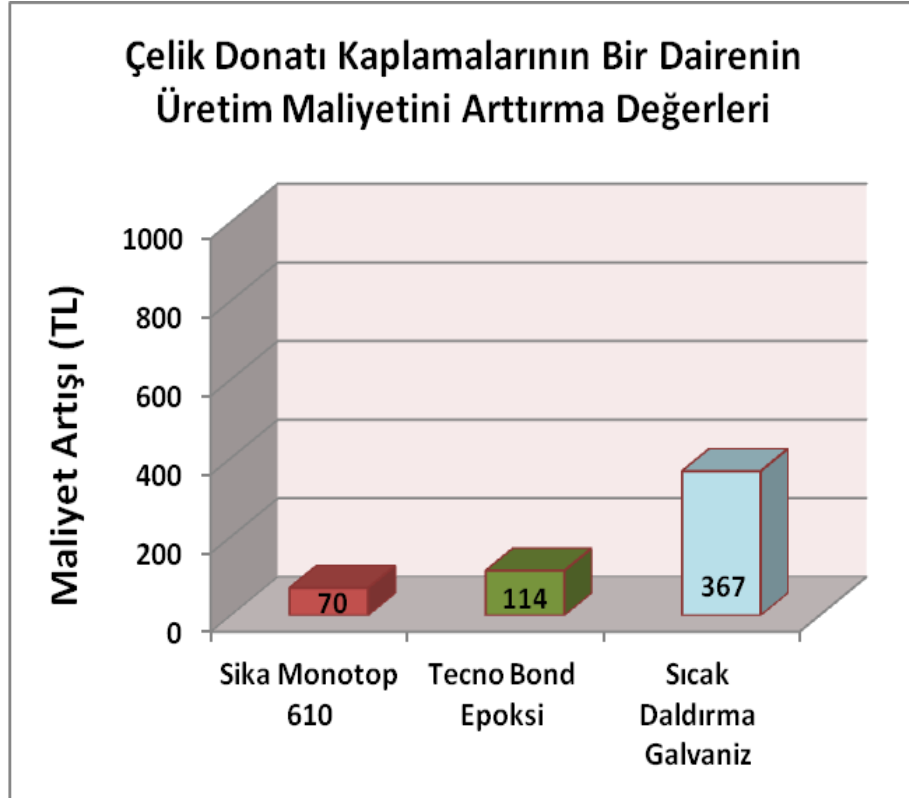
Şekil 5.72’de görüldüğü gibi 411,6 metrekarelik betonarme bir binanın arsa değeri hariç maliyeti yaklaşık olarak 4.492.917 TL olarak kabul edilirse çelik donatı kaplama malzemelerinden Sika Monotop 610 donatı kaplamasının arsa değeri hariç maliyetteki artışa etkisi %0,12 olup bunu sırası ile Tecno Bond 650 epoksi donatı kaplaması %0,20 Sıcak Daldırma Galvaniz donatı kaplaması %0,65 değerleri ile takip etmektedirler.



Şekil 5.72 Korozyon Önleyici Çelik Donatı Kaplamalarının Betonarme Binanın Üretim Maliyetini Arttırma Yüzdeleri Karşılaştırma Grafiği

Seksen daireli binanın arsa değeri hariç toplam üretim maliyeti 4.492.917 TL olduğuna göre bir dairenin arsa değeri hariç üretim maliyeti 4.492.917 TL/80 daire oranından 56.161 TL'ye tekabül etmektedir.

Şekil 5.73'de görüldüğü gibi betonarme binada Sika Monotop 610 çelik donatı kaplaması kullanıldığında 80 daireli binanın üretim maliyeti 5563,29 TL artacağından bir dairenin üretim maliyetindeki artış 5563,29 TL/80 daire oranından 70 TL'ye tekabül etmektedir. Aynı binada Tecno Bond epoksi çelik donatı kaplaması kullanıldığında 80 daireli binanın üretim maliyeti 9142,96 TL artacağından bir dairenin üretim maliyetindeki artış 9142,96 TL/80 daire oranından 114 TL'ye tekabül etmektedir. Sıcak daldırma galvaniz kaplama kullanıldığında ise 80 daireli binanın üretim maliyeti 29.343 TL artacağından bir dairenin üretim maliyetindeki artış 29.343 TL/80 daire oranından 367 TL'ye tekabül etmektedir.

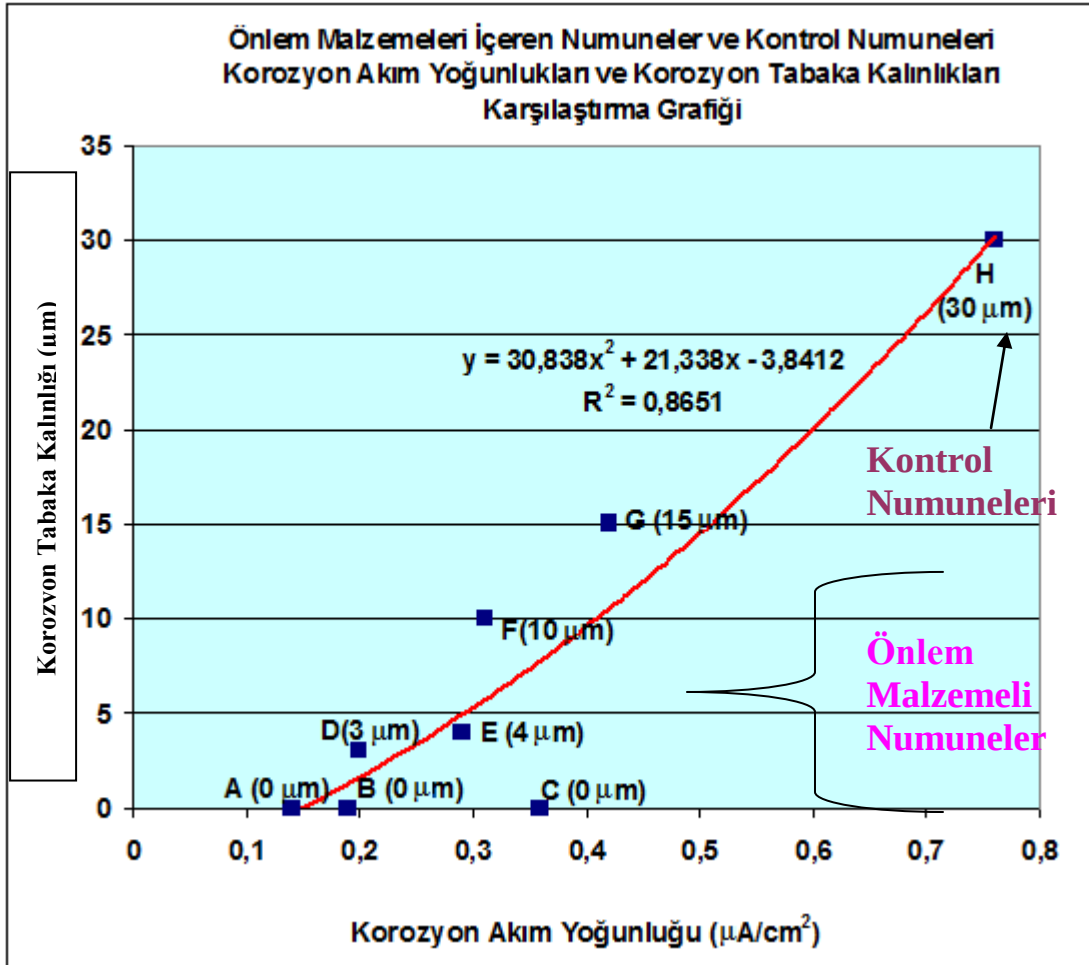


Şekil 5.73 Çelik Donatı Kaplama Malzemelerinin Bir Dairenin Üretim Maliyetini Arttırma Değerleri

Tüm katkı malzemeleri yapının kullanım ömrü boyunca maliyetine olan etkileri açısından da aşağıdaki gibi değerlendirilmiştir. Ayrıca korozyon önlem malzemelerinin üç aylık hızlandırılmış korozyon süresi sonunda korozyonu engellemedeki etkinlikleri kontrol numuneleri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 5.74'de sunulmuştur. Şekil 5.74'de

Sika Monotop 610,Tecno Bond Epoksi, sıcak daldırma çinko kaplama, Sika Gard 703 W,Sika Ferro Gard 901,Tecno Silica silis dumanı, Sika Ferro Gard 903 ve kontrol numuneleri sırası ile A,B,C,D,E,F,G,H olarak kodlanmıştır.

Şekil 5.74’de genel olarak korozyon tabakası kalınlığı arttıkça korozyon akım yoğunluğunun arttığı ve kontrol numunelerinin hem akım yoğunluğu hem de korozyon tabaka kalınlıklarının belirgin biçimde önlem malzemeleri içeren numunelerden yüksek oldukları görülmektedir.



Şekil 5.74 Önlem Malzemeli Numuneler ve Kontrol Numunelerinin 90 Günlük Hızlandırılmış Korozyon Süresi Sonundaki Korozyon Akım Yoğunluğu-Korozyon Tabaka Kalınlığı Karşılaştırma Grafiği

Şekil 5.74’de çelik donatı kaplamalı numunelerde korozyon tabakası görülmemiştir yani 0 mikron kalınlığındaki korozyon tabakasına karşılık sırası ile Sika Monotop 610,Tecno Bond Epoksi ve sıcak daldırma çinko kaplamalarında 0,14 µA/cm² 0,19 µA/cm² ve 0,36 µA/cm² korozyon akım yoğunlukları ölçülmüştür. Yine Sika Gard 703 W beton kaplamalı numunelerde 0-3 mikron aralığındaki korozyon tabakasına karşılık 0,2

$\mu\text{A}/\text{cm}^2$ korozyon akım yoğunluğu ölçülmüştür. Sika Ferro Gard 901 beton katkı inhibitörlü numunelerde 0-4 mikron aralığındaki korozyon tabakasına karşılık $0,29 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ korozyon akım yoğunluğu ölçülmüştür. Tecno Silica silis dumanı beton katkılı numunelerde 5-10 mikron aralığındaki korozyon tabakasına karşılık $0,31 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ korozyon akım yoğunluğu ölçülmüştür. Sika Ferro Gard 903 beton kaplamalı numunelerde 5-15 mikron aralığındaki korozyon tabakasına karşılık $0,42 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ korozyon akım yoğunluğu ölçülmüştür. Kontrol numunelerinde ise 20-30 mikron aralığındaki korozyon tabakasına karşılık $0,76 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ korozyon akım yoğunluğu ölçülmüştür.

Sika A.Ş.'den alınan bilgiye göre, Sika Monotop 610 ile donatı kaplamalı yapılarda servis ömrü yapının içinde bulunduğu dış ortam koşullarına, kaplama kalınlığına ve beton kalitesine bağlı olmakla birlikte hedeflenen kullanım ömrü ortalama 75 yıldır. Ayrıca Şekil 5.74'de yer aldığı gibi, yapmış olduğum korozyon akım yoğunluğu ölçümü ve mikro yapısal incelemelerde de, Sika Monotop 610 ile donatı kaplamalı numunelerde korozyon tabakasına rastlanmaması, fakat müşahit numunelerde 20-30 mikron korozyon tabakası tespit edilmesi sebebi ile kaplamanın korozyonu önlemedeki üstün etkisi görülmüştür.

Sika Monotop 610 donatı kaplamasının örnek olarak alınan 411,6 metrekairelik yirmi katlı bir yapının maliyetine olan etkilerini değerlendirirken bu kaplamanın yapının kullanım ömrünü arttırma süresi dikkate alınmıştır. Ancak betonun bileşenleri, kalitesi, ortam koşulları (klor, nem, su mevcudiyeti vs.) Sika Monotop 610 kaplamasının, betonarmenin kullanım ömrünü arttırma süresini doğrudan etkileyeceğinden ortalama kullanım ömrü esas alınarak Sika Monotop 610'un maliyete olan etkileri değerlendirilmiştir. Bunun için Sika Monotop 610 kaplamalı donatılı betonarmede 75 yıllık kullanım ömrü esas alınmıştır. Herhangi bir önlem içermeyen korumasız betonarmede ise ortalama 50 yıllık kullanım ömrü esas alınmıştır [101].

411,6 metrekairelik yirmi katlı ve her katta dört daire olacak şekilde seksen daireli betonarme bir binanın arsa değeri hariç maliyeti yaklaşık olarak 4.492.917 TL olarak kabul edilmiştir.

50 Yıllık kullanım süresi ve toplam 80 daire esas alındığında daire başına arsa değeri hariç yıllık maliyet: $4.492.917 \text{ TL} / 50 * 80 = 1123 \text{ TL}$ olur.

Aynı binanın temelinde Sika Monotop 610 donatı kaplaması kullanıldığında arsa değeri hariç ortalama toplam maliyet: $4.492.917 \text{ TL} + 5563,29 \text{ TL} = 4.498.480 \text{ TL}$ olur.

Korumalı durumda ortalama 75 yıllık kullanım süresi ve toplam 80 daire esas alındığında daire başına arsa değeri hariç yıllık maliyet: $4.498.480 \text{ TL} / 75 * 80 = 749,75 \text{ TL}$ olur.

Buna göre Sika Monotop 610 kaplamanın yapının temelinde kullanılması durumunda daire başına yıllık olarak elde edilen kar yüzdesi = $(1123 - 749,75) * 100 / 1123 = \%33$ olacaktır.

Buradan da görüldüğü gibi Sika Monotop 610 donatı kaplamasının üretim esnasında yirmi katlı ve seksen dairesel binanın arsa değeri hariç maliyetini ve bu rakamla doğru orantılı olarak bir dairenin maliyetini arttırma oranı sadece $\%0,12$ gibi çok küçük bir değer iken kullanım ömrü boyunca tek bir dairenin yıllık maliyetini yapının içinde bulunduğu ortam koşullarına ve üretim kalitesine bağlı olarak değişmekle birlikte, ortalama $\%33$ gibi oldukça iyi bir oranda düşüreceği öngörülebilir.

Tecno Bond epoksi ile donatı kaplamalı yapılarda servis ömrü yapının içinde bulunduğu dış ortam koşullarına, kaplama kalınlığına ve beton kalitesine bağlı olmakla birlikte hedeflenen ortalama kullanım ömrü 85 yıldır [102]. Ayrıca Şekil 5.74’de yer aldığı gibi yapmış olduğum korozyon akım yoğunluğu ölçümü ve mikro yapısal incelemelerde de Tecno Bond epoksi ile donatı kaplamalı numunelerde korozyon tabakasına rastlanmaması fakat müşahit numunelerde 20-30 mikron korozyon tabakası tespit edilmesi sebebi ile kaplamanın korozyonu önlemedeki üstün etkisi görülmüştür.

411,6 metrekarelik temel alanına sahip binanın temelinde Tecno Bond epoksi donatı kaplaması kullanıldığında arsa değeri hariç ortalama toplam maliyet: $4.492.917 \text{ TL} + 9142,96 \text{ TL} = 4.502.060 \text{ TL}$ olur.

Korumalı durumda ortalama 85 yıllık kullanım süresi ve toplam 80 daire esas alındığında daire başına arsa değeri hariç yıllık maliyet: $4.502.060 \text{ TL} / 85 * 80 = 662 \text{ TL}$ olur.

50 Yıllık kullanım süresi ve toplam 80 daire esas alındığında daire başına arsa değeri hariç yıllık maliyet 1123 TL olduğundan Tecno Bond epoksi kaplamanın yapının temelinde kullanılması durumunda yıllık olarak elde edilen kar yüzdesi = $(1123 - 662) * 100 / 1123 = \%41$ olacaktır.

Tecno Bond Epoksi donatı kaplamasının üretim esnasında yirmi katlı ve seksen dairesel binanın arsa değeri hariç maliyetini ve bu rakamla doğru orantılı olarak bir dairenin maliyetini arttırma oranı sadece %0,20 gibi çok küçük bir değer iken kullanım ömrü boyunca tek bir dairenin yıllık maliyetini yapının içinde bulunduğu ortam koşullarına ve üretim kalitesine bağlı olarak değişmekle birlikte, ortalama %41 gibi oldukça iyi bir oranda düşüreceği öngörülebilmektedir.

Sıcak daldırma çinko ile donatı kaplamalı yapılarda servis ömrü yapının içinde bulunduğu dış ortam koşullarına, kaplama kalınlığına ve beton kalitesine bağlı olmakla birlikte hedeflenen ortalama kullanım ömrü 85 yıldır [103]. Ayrıca Şekil 5.74’de yer aldığı gibi yapmış olduğum korozyon akım yoğunluğu ölçümü ve mikro yapısal incelemelerde de sıcak daldırma çinko ile donatı kaplamalı numunelerde korozyon tabakasına rastlanmaması fakat müşahit numunelerde 20-30 mikron korozyon tabakası tespit edilmesi sebebi ile kaplamanın korozyonu önlemedeki üstün etkisi görülmüştür.

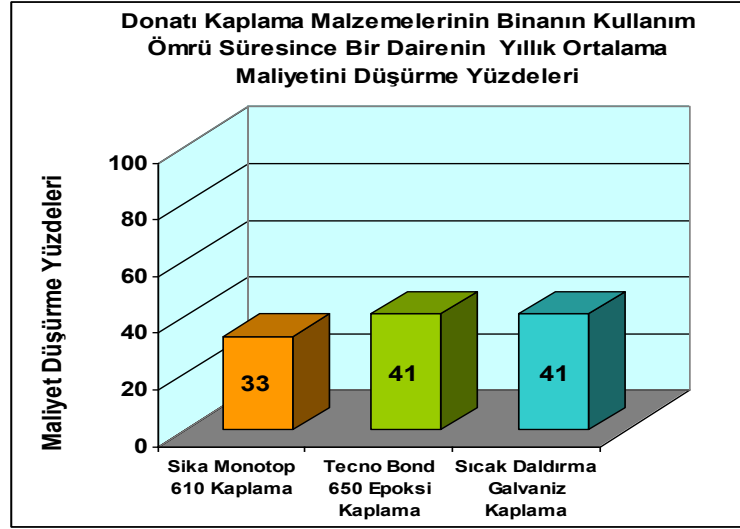
411,6 metrekaresel temel alanına sahip binanın temelinde sıcak daldırma çinko donatı kaplaması kullanıldığında arsa değeri hariç ortalama toplam maliyet: $4.492.917\text{ TL} + 29.343\text{ TL} = 4.522.260\text{ TL}$ olur.

Korumalı durumda ortalama 85 yıllık kullanım süresi ve toplam 80 daire esas alındığında arsa değeri hariç daire başına yıllık maliyet: $4.522.260\text{ TL} / 85 * 80 = 665\text{ TL}$ olur.

50 Yıllık kullanım süresi ve toplam 80 daire esas alındığında arsa değeri hariç daire başına yıllık maliyet 1123 TL olduğundan sıcak daldırma çinko kaplamanın yapının temelinde kullanılması durumunda yıllık olarak elde edilen kar yüzdesi = $(1123 - 665) * 100 / 1123 = \%41$ olacaktır.

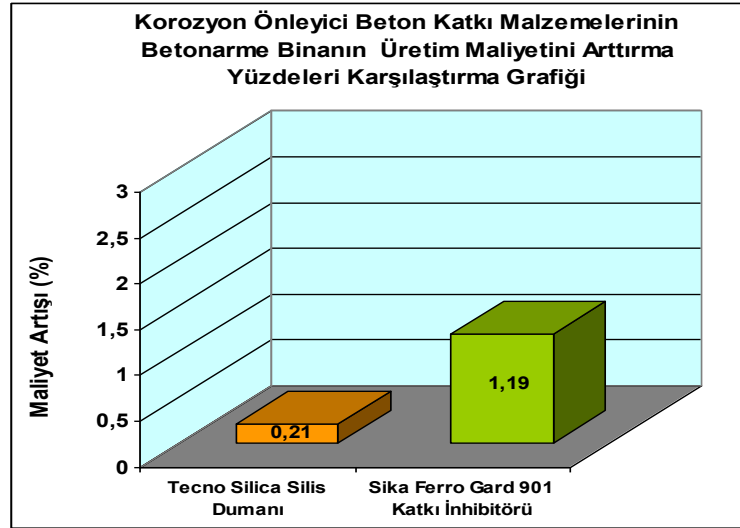
Sıcak daldırma çinko donatı kaplamasının üretim esnasında yirmi katlı ve seksen dairesel binanın arsa değeri hariç maliyetini ve bu rakamla doğru orantılı olarak bir dairenin maliyetini arttırma oranı sadece %0,65 gibi çok küçük bir değer iken kullanım ömrü boyunca tek bir dairenin yıllık maliyetini yapının içinde bulunduğu ortam koşullarına ve üretim kalitesine bağlı olarak değişmekle birlikte %41 gibi oldukça iyi bir oranda düşüreceği öngörülebilmektedir.

411,6 Metrekarelik yirmi katlı ve seksen dairesel bir betonarme binada, kullanılan çelik donatı kaplama malzemelerinin, kullanım ömrü boyunca tek bir dairenin yıllık maliyetini düşürme yüzdeleri ortalama olarak Şekil 5.75’de sunulmuştur.



Şekil 5.75 Betonarmede Çelik Donatı Kaplama Malzemelerinin Binanın Kullanım Ömrü Süresince Bir Dairenin Yıllık Ortalama Maliyetini Düşürme Yüzdeleri

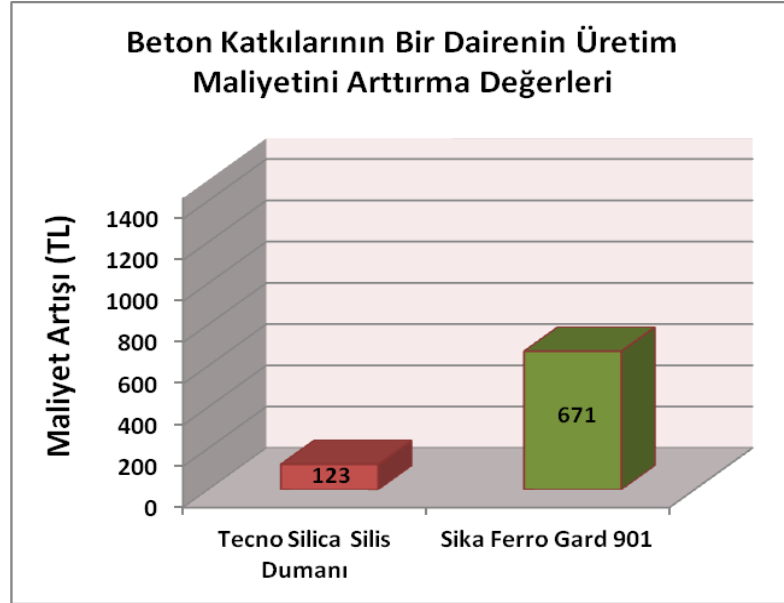
Şekil 5.76’da görüldüğü gibi 411,6 metrekarelik betonarme bir binanın arsa değeri hariç maliyeti yaklaşık olarak 4.492.917 TL olarak kabul edilirse, beton harcına katılan katkı malzemelerinden Tecno silica silis dumanının arsa değeri hariç maliyetteki artışa etkisi %0,21 olup bunu Sika Ferro Gard 901 katkı inhibitörü %1,19 değeri ile takip etmektedir.



Şekil 5.76 Korozyon Önleyici Beton Katkı Malzemelerinin Betonarme Binanın Üretim Maliyetini Arttırma Yüzdeleri Karşılaştırma Grafiği

Şekil 5.77’de görüldüğü gibi betonarme binada Tecno Silica silis dumanı katkısı kullanıldığında 80 dairesel binanın üretim maliyeti 9872,57 TL artacağından bir dairenin üretim maliyetindeki artış $9872,57 \text{ TL} / 80 \text{ daire}$ oranından 123 TL’ye tekabül

etmektedir. Aynı binada Sika Ferro Gard 901 katkı inhibitörü kullanıldığında 80 daireli binanın üretim maliyeti 53.726 TL artacağından bir dairenin üretim maliyetindeki artış 53.726 TL / 80 daire oranından 671 TL'ye tekabül etmektedir.



Şekil 5.77 Beton Katkı Malzemelerinin Bir Dairenin Üretim Maliyetini Arttırma Değerleri

Sika A.Ş.'den alınan bilgiye göre, Sika Ferro Gard 901 katkı inhibitörünün yapılarda servis ömrü yapının içinde bulunduğu dış ortam koşullarına, kaplama kalınlığına ve beton kalitesine bağlı olmakla birlikte hedeflenen ortalama kullanım ömrü 80 yıldır. Ayrıca Şekil 5.74'de yer aldığı gibi yapmış olduğum korozyon akım yoğunluğu ölçümü ve mikro yapısal incelemelerde de Sika Ferro Gard 901 inhibitörü katkılı numunelerde sadece belirli bölgelerde 0-4 um oksit tabakası görülmesi fakat müşahit numunelerde 20-30 mikron korozyon tabakası tespit edilmesi sebebi ile katkının korozyonu önlemedeki yüksek etkinliği görülmüştür.

411,6 metrekarelik temel alanına sahip binanın temelinde Sika Ferro Gard 901 beton katkı inhibitörü kullanıldığında arsa değeri hariç ortalama toplam maliyet: $4.492.917\text{ TL} + 53.726\text{ TL} = 4.546.643\text{ TL}$ olur.

Korumalı durumda ortalama 80 yıllık kullanım süresi ve toplam 80 daire esas alındığında daire başına arsa değeri hariç yıllık maliyet: $4.546.643\text{ TL} / 80 \times 80 = 710\text{ TL}$ olur.

50 Yıllık kullanım süresi ve toplam 80 daire esas alındığında daire başına arsa değeri hariç yıllık maliyet 1123 TL olduğundan Sika Ferro Gard 901 katkısının yapının

temelinde kullanılması durumunda yıllık olarak elde edilen kar yüzdesi = $(1123-710) * 100 / 1123 = \%37$ olacaktır.

Sika Ferro Gard 901 beton katkı inhibitörünün üretim esnasında yirmi katlı ve seksen daireli binanın arsa değeri hariç maliyetini ve bu rakamla doğru orantılı olarak bir dairenin arsa değeri hariç maliyetini arttırma oranı sadece %1,19 gibi küçük bir değer iken kullanım ömrü boyunca tek bir dairenin yıllık maliyetini yapının içinde bulunduğu ortam koşullarına ve üretim kalitesine bağlı olarak değişmekle birlikte, ortalama %37 gibi oldukça iyi bir oranda düşüreceği öngörülebilir.

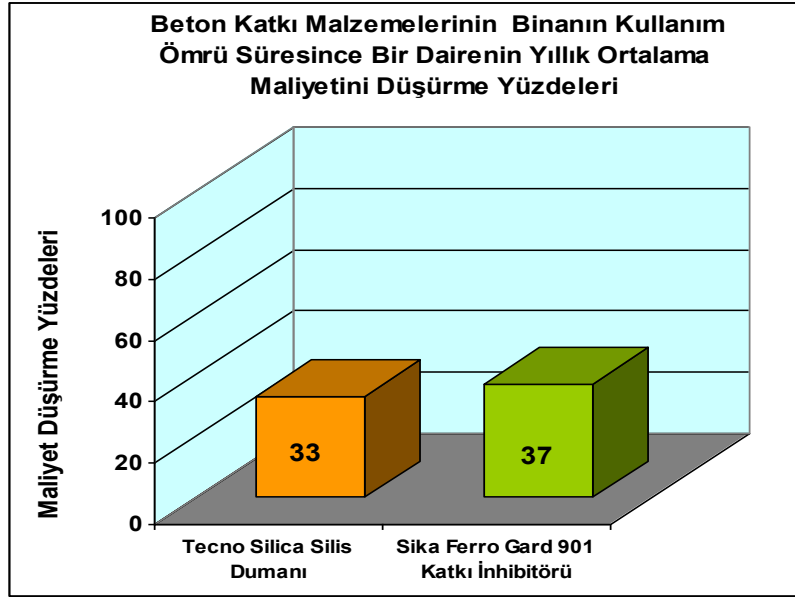
Bugün silis dumanı katkılı betonarme yapılarda servis ömrü 50 ile 100 yıl aralığına ulaşmıştır [104].Betonun bileşenleri, kalitesi, ortam koşulları (klor, nem, su mevcudiyeti vs.) silis dumanı katkısının betonarmenin kullanım ömrünü arttırma süresini doğrudan etkileyeceğinden ortalama 75 yıl kullanım ömrü esas alınarak silis dumanı katkısının maliyete olan etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca Şekil 5.74’de yer aldığı gibi yapmış olduğum korozyon akım yoğunluğu ölçümü ve mikro yapısal incelemelerde de silis dumanı katkılı numunelerde sadece belirli bölgelerde 5-10 um oksit tabakası görülmesi fakat müşahit numunelerde 20-30 mikron korozyon tabakası tespit edilmesi sebebi ile silis dumanının korozyonu önlemedeki yüksek etkinliği görülmüştür.

411,6 metrekarelik temel alanına sahip binanın temelinde Tecno Silica silis dumanı katkısı kullanıldığında arsa değeri hariç ortalama toplam maliyet: $4.492.917\text{TL} + 9872,57\text{TL} = 4.502.790\text{ TL}$ olur.

Korumalı durumda ortalama 75 yıllık kullanım süresi ve toplam 80 daire esas alındığında daire başına arsa değeri hariç yıllık maliyet: $4.502.790\text{ TL} / 75 * 80 = 750\text{ TL}$ olur.

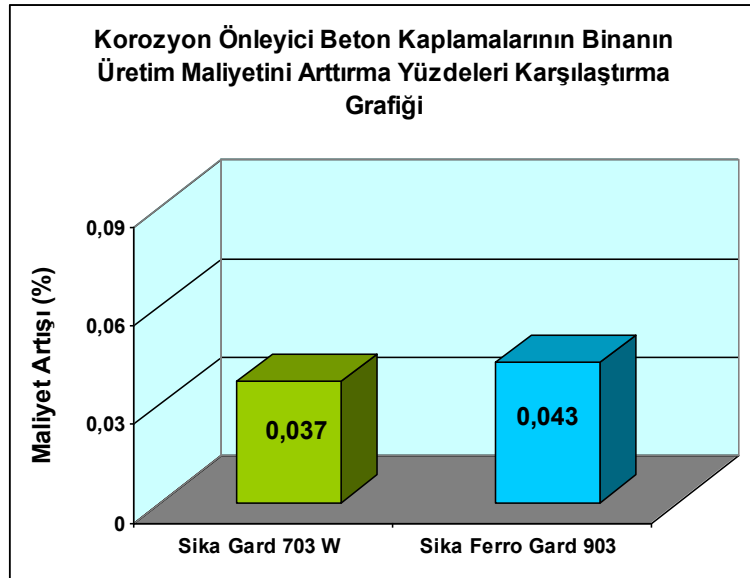
50 Yıllık kullanım süresi ve toplam 80 daire esas alındığında daire başına arsa değeri hariç yıllık maliyet 1123 TL olduğundan Tecno Silica silis dumanı katkısının yapının temelinde kullanılması durumunda yıllık olarak elde edilen kar yüzdesi = $(1123-750) * 100 / 1123 = \%33$ olacaktır.

411,6 Metrekarelik yirmi katlı ve seksen daireli bir betonarme binada, temel betonunda kullanılan katkı malzemelerinin, kullanım ömrü boyunca tek bir dairenin yıllık maliyetini düşürme yüzdeleri Şekil 5.78’de sunulmuştur.



Şekil 5.78 Beton Katkı Malzemelerinin Binanın Kullanım Ömrü Süresince Bir Dairenin Yıllık Ortalama Maliyetini Düşürme Yüzdeleri

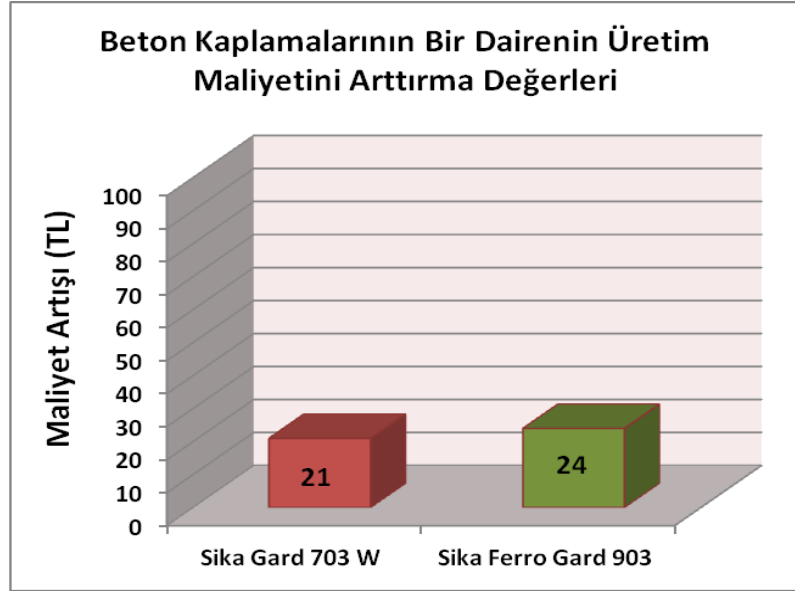
Şekil 5.79’da görüldüğü gibi 411,6 metrekarelik betonarme bir binanın arsa değeri hariç maliyeti yaklaşık olarak 4.492.917 TL olarak kabul edilirse, beton dış yüzeyine uygulanan kaplama malzemelerinden Sika Gard 703 W ‘nin arsa değeri hariç maliyetteki artışa etkisi %0,037 olup bunu Sika Ferro Gard 903 inhibitörü %0,043 değeri ile takip etmektedir.



Şekil 5.79 Korozyon Önleyici Beton Kaplama Malzemelerinin Betonarme Binanın Üretim Maliyetini Arttırma Yüzdeleri Karşılaştırma Grafiği

Şekil 5.80’de görüldüğü gibi betonarme binada Sika Ferro Gard 903 kaplama inhibitörü kullanıldığında 80 dairesel binanın üretim maliyeti 1939,75 TL artacağından bir dairenin

Üretim maliyetindeki artış 1939,75 TL 80 daire oranından 24 TL'ye tekabül etmektedir. Aynı binada Sika Gard 703 W kaplaması kullanıldığında 80 daireli binanın üretim maliyeti 1697,22 TL artacağından bir dairenin üretim maliyetindeki artış 1697,22 TL/80 daire oranından 21 TL'ye tekabül etmektedir.



şekil 5.80 Beton Kaplama Malzemelerinin Bir Dairenin retim Maliyetini Arttırma Değeri

Sika A.ř.'den alınan bilgiye göre, Sika Ferro Gard 903 betona sürme esaslı malzemesi ile kaplamalı yapılarda servis ömrü yapının içinde bulunduğ dış ortam koşullarına, kaplama kalınlığına ve beton kalitesine bağlı olmakla birlikte hedeflenen kullanım ömrü 75 yıldır. Ayrıca şekil 5.74'de yer aldığı gibi yapmış olduğum korozyon akım yoğunluğu ölçümü ve mikro yapısal incelemelerde de Sika Ferro Gard 903 kaplamalı numunelerde belirli bölgelerde 5-15 um oksit tabakası görülmesi fakat müşahit numunelerde 20-30 mikron korozyon tabakası tespit edilmesi sebebi ile Sika Ferro Gard 903 inhibitör kaplamasının korozyonu önlemedeki yüksek etkinliği görülmüştür.

411,6 metrekarelik temel alanına sahip binanın temelinde Sika Ferro Gard 903 kaplaması kullanıldığında arsa değeri hariç ortalama toplam maliyet: 4.492.917TL+1939,75 TL=4.494.857 TL olur.

Korumalı durumda ortalama 75 yıllık kullanım süresi ve toplam 80 daire esas alındığında daire başına arsa değeri hariç yıllık maliyet: 4.494.857 TL/75*80 = 749 TL olur.

50 Yıllık kullanım süresi ve toplam 80 daire esas alındığında daire başına arsa değeri hariç yıllık maliyet 1123 TL olduğundan Sika Ferro Gard 903 kaplamasının yapının temelinde kullanılması durumunda yıllık olarak elde edilen kar yüzdesi = $(1123-749) * 100 / 1123 = \%33$ olur.

Sika Ferro Gard 903 kaplamasının üretim esnasında yirmi katlı ve seksen daireli binanın arsa değeri hariç maliyetini ve bu rakamla doğru orantılı olarak bir dairenin arsa değeri hariç maliyetini arttırma oranı sadece %0,043 gibi çok küçük bir değer iken kullanım ömrü boyunca tek bir dairenin yıllık maliyetini yapının içinde bulunduğu ortam koşullarına ve üretim kalitesine bağlı olarak değişmekle birlikte %33 gibi oldukça iyi bir oranda düşüreceği öngörülebilir.

Sika A.Ş.'den alınan bilgiye göre, Sika Gard 703 W betona sürme esaslı malzemesi ile kaplamalı yapılarda servis ömrü yapının içinde bulunduğu dış ortam koşullarına, kaplama kalınlığına ve beton kalitesine bağlı olmakla birlikte hedeflenen kullanım ömrü 80 yıldır. Ayrıca Şekil 5.74'de yer aldığı gibi yapmış olduğum korozyon akım yoğunluğu ölçümü ve mikro yapısal incelemelerde de Sika Gard 703 W kaplamalı numunelerde sadece belirli bölgelerde 0-3 um oksit tabakası görülmesi fakat müşahit numunelerde 20-30 mikron korozyon tabakası tespit edilmesi sebebi ile Sika Gard 703 W kaplamasının korozyonu önlemedeki yüksek etkinliği görülmüştür.

411,6 metrekarelik temel alanına sahip binanın temelinde Sika Gard 703 W kaplaması kullanıldığında arsa değeri hariç ortalama toplam maliyet: $4.492.917\text{TL} + 1697,22\text{TL} = 4.494.614\text{ TL}$ olur.

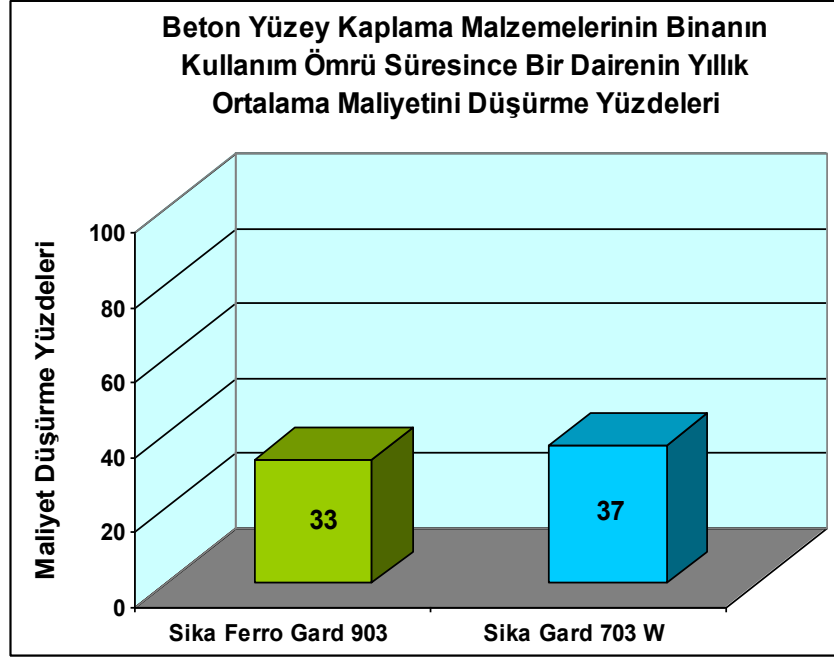
Korumalı durumda ortalama 80 yıllık kullanım süresi ve toplam 80 daire esas alındığında daire başına arsa değeri hariç yıllık maliyet: $4.494.614\text{TL} / 80 * 80 = 702,28\text{TL}$ olur.

50 Yıllık kullanım süresi ve toplam 80 daire esas alındığında daire başına arsa değeri hariç yıllık maliyet 1123 TL olduğundan Sika Gard 703 W kaplamasının yapının temelinde kullanılması durumunda yıllık olarak elde edilen kar yüzdesi = $(1123-702,28) * 100 / 1123 = \%37$ olur.

Sika Gard 703 W kaplamasının üretim esnasında yirmi katlı ve seksen daireli binanın arsa değeri hariç maliyetini ve bu rakamla doğru orantılı olarak bir dairenin arsa değeri hariç maliyetini arttırma oranı sadece %0,037 gibi çok küçük bir değer iken kullanım ömrü boyunca tek bir dairenin yıllık maliyetini yapının içinde bulunduğu ortam

koşullarına ve üretim kalitesine bağlı olarak değişmekle birlikte %37 gibi oldukça iyi bir oranda düşüreceği öngörülebilir.

411,6 Metrekarelik yirmi katlı ve seksen daireli bir betonarme binada, temelde kullanılan kaplama malzemelerinin, kullanım ömrü boyunca tek bir dairenin yıllık maliyetini düşürme yüzdeleri Şekil 5.81’de sunulmuştur.



Şekil 5.81 Beton Yüzey Kaplama Malzemelerinin Binanın Kullanım Ömrü Süresince Bir Dairenin Yıllık Ortalama Maliyetini Düşürme Yüzdeleri

5.12.2 Katodik Korumanın Ekonomik Değerlendirmesi

5.12.2.1 Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma İçin Ekonomik Değerlendirme

Dış akım kaynaklı katodik korumada yapıya 365 gün 24 saat enerji verilir. Dış akım kaynaklı sistemin tesis edilebilmesi için T/R ünitesini besleyecek 220 V elektrik enerjisine mutlaka ihtiyaç vardır. Dış akım kaynaklı katodik korumayı maliyet açısından kesin verilerle değerlendirmek güçtür. Çünkü bu konuda yapılan proje çalışmalarında maliyetler yapıların bulundukları ortama, nem, su seviyesine ve elektrolit ortamın direncine ve ayrıca yapıda kullanılan katodik koruma sisteminin kullanıcı tarafından talep edilen kullanım ömrüne uygun şekilde kullanılacak anodun çeşitliliğine ve kalınlığına göre değişmektedir. Bu nedenle katodik koruma projelerini yapan mühendislik firması olan Protek Katodik Koruma San. A.Ş.’den 411,6 metrekare temel alanına sahip 20 katlı bir binanın dış akım kaynaklı katodik korunması esnasında

yapılan işlemler olan, betonarmenin yapımı esnasında çelik donatıların elektriksel bağlantılarının yapılması, titanyum kaplı anotların kullanılması, pano ve PLC kullanılması, tesisatın kurulması ve işçilik maliyetlerinin az önce sayılan koşullara bağlı değişken olduğu bilindiğinden ortalama olarak 45.000 TL olarak fiyat alınmıştır. Bu şekilde kurulan bir sistemin ortalama ömrünün 50 yıl olduğu ve 50 yıl sonra sistem ömrünü tamamladıktan sonra yapının kullanım ömrüne sıfırdan başlayarak kullanımını sürdüreceği bilgisi alınmıştır. Binalar genellikle 60-80 yıl aralığında ömre sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır [105]. Bu nedenle katodik koruma uygulanan binada toplam 80 yıllık hizmet ömrü esas alınmıştır ve 50 yıllık katodik korumadan sonra binanın korumasız durumda 30 yıl daha servis ömrünü sürdüreceği kabul edilmiştir.

Buna göre yapının toplam kullanım ömrü ortalama 80 yıl seviyesine ulaşmaktadır. 50 yıllık süre esnasında 45.000 TL maliyete ilave olarak elektrik enerjisi kullanım maliyeti vardır. Dış akım kaynaklı katodik koruma esnasında 100 wattlık bir ampulün yanması esnasında harcadığı elektrik enerjisi kadar saatlik enerji harcandığı bilgisi alınarak yapılan hesaplama göre ortalama aylık 12 TL'lik elektrik enerjisi tüketilmektedir. 50 yıllık katodik koruma süresince günümüz değeri üzerinden ortalama olarak 7200 TL'lik elektrik enerjisi tüketilmektedir. Hesaplaması aşağıda sunulmuştur.

72 kwh aylık

$72 \text{ kwh} \times 0,1652 \text{ TL/ kwh} = 12 \text{ TL /aylık}$

$12 \text{ TL} \times 12 \text{ ay} \times 50 \text{ yıl} = 7200 \text{ TL}$

411,6 metrekare temel alanına sahip 20 katlı bir binanın arsa değeri hariç ortalama toplam maliyeti = 4.492.917 TL'dir.

Dış akım kaynaklı katodik korumanın bu yapıya olan ortalama maliyeti = 45.000 TL dir.

411,6 metrekare temel alanına sahip 20 katlı ve dış akım kaynaklı katodik korumalı bir yapının arsa değeri hariç ortalama toplam maliyeti = $4.492.917 + 45.000 + 7200 = 4.545.117$ TL'dir.

Bu yapının korumalı durumda ortalama kullanım ömrünün 80 yıl olduğu kabul edilirse, toplam 80 daire esas alındığında daire başına arsa değeri hariç yıllık maliyet: $4.545.117 \text{ TL} / 80 \times 80 = 710 \text{ TL}$ olur.

50 Yıllık kullanım süresi ve toplam 80 daire esas alındığında daire başına arsa değeri hariç yıllık maliyet 1123 TL olduğundan dış akım kaynaklı katodik korumanın yapıda

uygulanması durumunda yapının içinde bulunduğu ortam koşullarına ve üretim kalitesine bağlı olarak değişmekle birlikte yıllık olarak elde edilen kar yüzdesi = $(1123-710) * 100 / 1123 = \%36,7$ olarak öngörülebilir.

411,6 metrekarelik temel alanına sahip 20 katlı ve seksen daireli betonarme bir binanın arsa değeri hariç maliyeti yaklaşık olarak 4.492.917 TL olduğundan bu yapının temeline uygulanacak dış akım kaynaklı katodik korumanın arsa değeri hariç binanın üretim maliyetini ve bu rakamla doğru orantılı olarak bir dairenin maliyetini arttırma oranı %1,16'dır.

Rakamsal olarak ifade edilirse bu binanın temelinde dış akım kaynaklı katodik koruma uygulandığında binanın üretim maliyeti 52.200 TL artacağından bir dairenin üretim maliyetindeki artış 52.200 TL / 80 daire oranından 653 TL'ye tekabül etmektedir.

5.12.2.2 Galvanik Anotlu Katodik Koruma İçin Ekonomik Değerlendirme

Yine aynı şekilde galvanik anotlu katodik korumayı maliyet açısından kesin verilerle değerlendirmek güçtür. Çünkü bu konuda yapılan proje çalışmalarında maliyetler yapıların bulundukları ortama, nem, su seviyesine ve elektrolit ortamın direncine ve ayrıca yapıda kullanılan katodik koruma sisteminin kullanıcı tarafından talep edilen kullanım ömrüne uygun şekilde kullanılacak anodun çeşitliliğine ve kalınlığına göre değişmektedir.

Protek Katodik Koruma San. A.Ş.'den 411,6 metrekare temel alanına sahip 20 katlı bir binanın dış akım kaynaklı katodik korunması esnasında yapılan işlemler olan, betonarmenin yapımı esnasında çelik donatıların elektriksel bağlantılarının yapılması, betonarme içerisindeki alkali yapıya dayanımlı özel kaplamalı magnezyum anotların kullanılması, anot ve donatıların bağlantılarının yapılması için inşaat tellerinin kullanımı, tesisatın kurulması ve işçilik maliyetlerinin az önce sayılan koşullara bağlı değişken olduğu bilindiğinden ortalama olarak 50.000 TL fiyat alınmıştır. Bu şekilde kurulan bir sistemin ortalama ömrünün 40 yıl olduğu ve 40 yıl sonra sistem ömrünü tamamladıktan sonra yapının kullanım ömrüne sıfırdan başlayarak kullanımını sürdüreceği bilgisi alınmıştır. Katodik koruma uygulanan binada 80 yıllık hizmet ömrü esas alınmıştır.

411,6 metrekare temel alanına sahip 20 katlı bir binanın arsa değeri hariç ortalama toplam maliyeti = 4.492.917 TL'dir.

Galvanik anotlu katodik korumanın bu yapıya olan ortalama maliyeti = 50.000 TL'dir.

411,6 metrekare temel alanına sahip 20 katlı ve galvanik anotlu katodik korumalı bir yapının arsa değeri hariç ortalama toplam maliyeti = $4.492.917 + 50.000 = 4.542.917$ TL'dir.

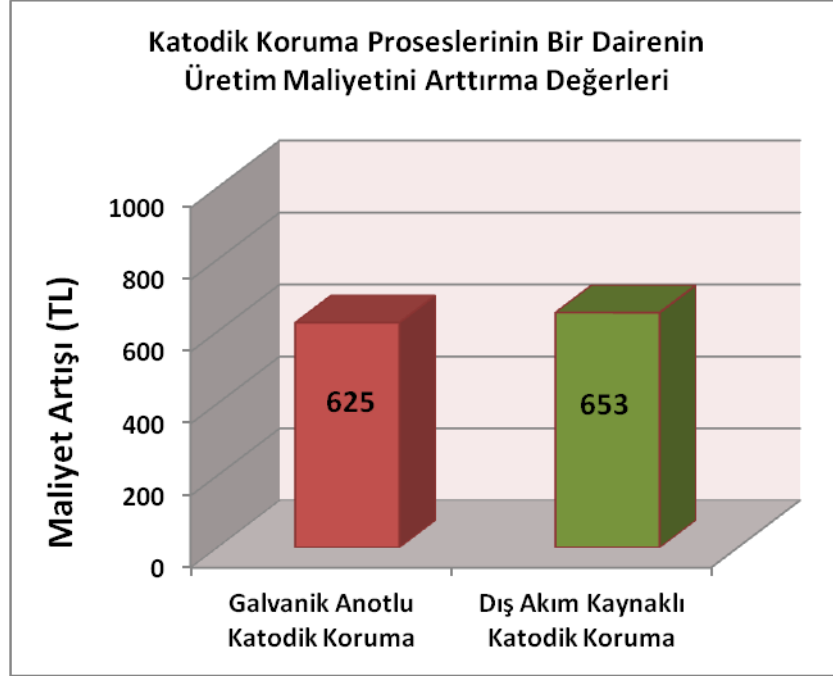
Bu yapının korumalı durumda ortalama kullanım ömrünün 80 yıl olduğu kabul edilirse, toplam 80 daire esas alındığında daire başına arsa değeri hariç yıllık maliyet: $4.542.917 / 80 * 80 = 709$ TL olur.

50 Yıllık kullanım süresi ve toplam 80 daire esas alındığında daire başına arsa değeri hariç yıllık maliyet 1123 TL olduğundan galvanik anotlu katodik korumanın yapıda uygulanması durumunda yapının içinde bulunduğu ortam koşullarına ve üretim kalitesine bağlı olarak değişmekle birlikte yıllık olarak elde edilen kar yüzdesi = $(1123 - 709) * 100 / 1123 = \%36,9$ olarak öngörülebilir.

411,6 metrekarelik temel alanına sahip 20 katlı ve seksen daireli betonarme bir binanın arsa değeri hariç maliyeti yaklaşık olarak 4.492.917 TL olduğundan bu yapının temeline uygulanacak galvanik anotlu katodik korumanın arsa değeri hariç binanın üretim maliyetini ve bu rakamla doğru orantılı olarak bir dairenin maliyetini arttırma oranı %1,11'dir.

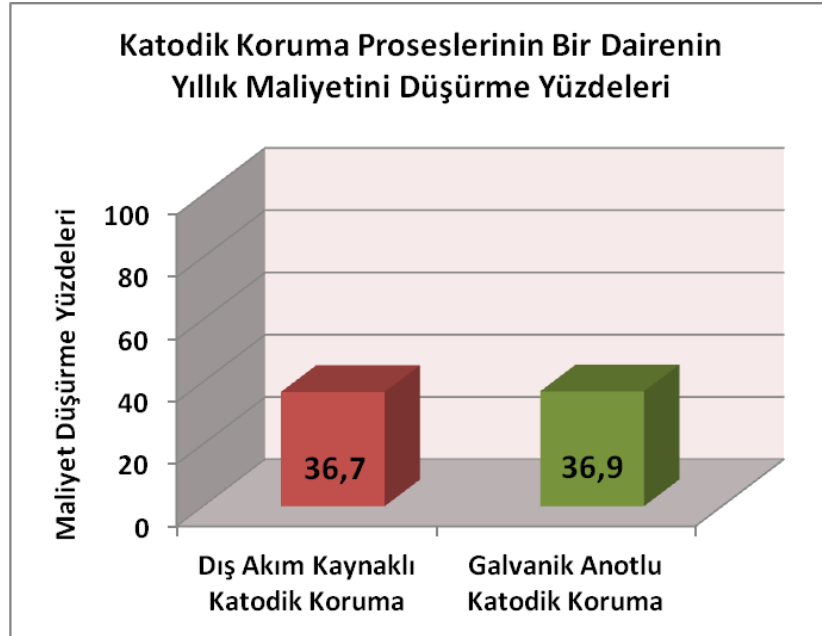
Rakamsal olarak ifade edilirse bu binanın temelinde galvanik anotlu katodik koruma uygulandığında binanın üretim maliyeti 50.000 TL artacağından bir dairenin üretim maliyetindeki artış $50.000 / 80$ daire oranından 625 TL'ye tekabül etmektedir.

411,6 metrekarelik temel alanına sahip 80 daireli betonarme binada uygulanan katodik koruma proseslerinin bir dairenin üretim maliyetini arttırma değerleri Şekil 5.82'de sunulmuştur.



Şekil 5.82 Katodik Koruma Proseslerinin Bir Dairenin Üretim Maliyetini Arttırma Değerleri

Aynı binada uygulanan katodik koruma proseslerinin kullanım ömrü boyunca tek bir dairenin yıllık maliyetini düşürme yüzdeleri Şekil 5.83’de sunulmuştur.



Şekil 5.83 Katodik Koruma Proseslerinin Binanın Kullanım Ömrü Süresince Bir Dairenin Yıllık Ortalama Maliyetini Düşürme Yüzdeleri

5.13 Betonarme Yapılarda Korozyona Karşı Alınabilecek Önlemlerin Seçimi

Beton içine katkı olarak ilave edilen Sika Ferro Gard 901 inhibitörü ve Tecno Silica silis dumanı yalnızca yeni bina inşaatlarında uygulanabilmektedir. Bu iki katkı malzemesi Çizelge 5.9'a göre karşılaştırıldığı zaman Tecno Silica silis dumanı katkısının kullanımının daha uygun olduğu gözükmemektedir.

Betonarme binalardaki çelik donatılarda korozyonu önlemek için kullanılan Sika Monotop 610, Tecno Bond 650 epoksi ve sıcak daldırma çinko kaplamalar yalnızca yeni bina inşaatlarında uygulanabilmektedir. Bu üç kaplama malzemesi Çizelge 5.9'a göre karşılaştırıldığı zaman binanın kullanım ömrü süresince konut başına maliyeti düşürme oranları en yüksek olan kaplamalar epoksi ve sıcak daldırma galvanizdir. Aderans dayanımları dışındaki değerlerin ise birbirlerine yakın oldukları görülmektedir. Bu nedenle aderansın çok önemli olduğu uygulamalarda çinko kaplama tercih edilebilir. Çünkü çinko kaplama beton ile çelik arasında güçlü metalurjik bağın kurulmasını sağlar.

Betonarme yapılarda betonun korozyon etkilere etkilere maruz kaldığı yüzeylerde kullanılan Sika Ferro Gard 903 ve Sika Gard 703 W kaplamaları yeni ve eski binalarda kullanılabilir. Korozyondan korunma ve maliyet açısından Çizelge 5.9'daki bilgilere göre Sika Gard 703 W'nin daha uygun olduğu görülmektedir.

Betonarme binalara uygulanabilen katodik koruma proseslerinden galvanik anotlu katodik koruma eski binalarda ve dış akım kaynaklı katodik koruma da yeni binalarda uygulanabilmektedir. Konut başına yıllık maliyeti düşürme etkileri ise birbirine yakındır.

411,6 metrekairelik temel alanına sahip 20 katlı ve 80 daireli yeni yapılacak betonarme bir binada korozyon hasarlarından korunma amacı ile Çizelge 5.9'da yer alan önlem malzeme ve proseslerinden optimum özelliklere sahip olanlar seçilerek uygulandığında aşağıda görüldüğü gibi bir dairenin üretim maliyeti 1164 TL artmaktadır.

Seçilen Beton Katkısının Daire başına maliyeti: Tecno Silica Silis Dumanı = 123 TL

Seçilen Donatı Kaplamasının Daire başına maliyeti: Sıcak Daldırma Çinko = 367 TL

Seçilen Beton Kaplamasının Daire başına maliyeti: Sika Gard 703 W = 21 TL

Seçilen Katodik Koruma Prosesinin Daire başına maliyeti: Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma = 653 TL

Önlem Paketinin Toplam Maliyeti: 123 TL+367 TL+21 TL+653 TL = 1164 TL

Arsa maliyeti, betonarme yapının toplam maliyetinin yarısına eşit olduğundan önlem malzeme ve proseslerinin toplam inşaat maliyetindeki payları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Betonarme Yapının Toplam Maliyeti = Betonarme yapının üretim maliyeti+Arsa Maliyeti

Betonarme Yapının Toplam Maliyeti: 4.492.917+4.492.917 = 8.985.834 TL

Korumasız Dairenin Toplam Maliyeti: Betonarme Yapının Toplam Maliyeti/80 Daire
8.985.834 TL/80 = 112.322 TL

Önlem Paketinin Dairenin Toplam Maliyetini Arttırma Oranı: $(1164*100)/112.322 = \%1$

Yukarıdaki hesaplamada görüldüğü gibi yeni yapılacak binada bir dairenin korumasız durumda toplam maliyeti 112.322 TL olduğundan önlem paketi uygulandığında bir dairenin toplam maliyeti sadece %1 artmaktadır.

411,6 metrekarelik temel alanına sahip 20 katlı ve 80 daireli eski betonarme bir binada korozyon hasarlarından korunma amacı ile Çizelge 5.9’da yer alan önlem malzeme ve proseslerinden optimum özelliklere sahip olanlar seçilerek uygulandığında aşağıda görüldüğü gibi bir daire başına maliyet 646 TL olmaktadır.

Seçilen Beton Kaplamasının Daire başına maliyeti: Sika Gard 703 W = 21 TL

Seçilen Katodik Koruma Prosesinin Daire başına maliyeti: Galvanik Anotlu Katodik Koruma = 625 TL

Önlem Paketinin Toplam Maliyeti: 21 TL+625 TL = 646 TL

Önlem malzeme ve proseslerinin toplam inşaat maliyetindeki payları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Betonarme Yapının Toplam Maliyeti = Betonarme yapının üretim maliyeti + Arsa Maliyeti

Betonarme Yapının Toplam Maliyeti: 4.492.917+4.492.917 = 8.985.834 TL

Korumasız Dairenin Toplam Maliyeti: Betonarme Yapının Toplam Maliyeti / 80 Daire
8.985.834 TL/80 = 112.322 TL

Önlem Paketinin Dairenin Toplam Maliyetini Arttırma Oranı: $(646*100)/112.322=$
%0,6

Yukarıdaki hesaplamada görüldüğü gibi eski bir binada bir dairenin korumasız durumda toplam maliyeti 112.322 TL olduğundan önlem paketi uygulandığında bir dairenin toplam maliyeti sadece %0,6 artmaktadır.

Çizelge 5.9’da görüldüğü gibi, 411,6 metrekarelik temel alanına sahip 20 katlı ve 80 daireli betonarme yapının toplam maliyeti, arsa değeri hariç üretim maliyetinin 2 katına çıktığı için uygulanan önlem malzeme ve prosesinin toplam yapı maliyeti içindeki yüzde oranları, arsa maliyeti hariç üretim maliyeti içindeki yüzde oranlarına göre yarı yarıya düşecektir.

Çizelge 5.9 Betonarme Yapılarda Korozyon Önleme Uygulamaları Karşılaştırma Tablosu

Uygulamalar	Önlemler	Yarı hücre Potansiyeli (mV)	Korozyon akım yoğunluğu ($\mu A/cm^2$)	Aderans (mpa)	Basma dayanımı 28.günde (mpa)	Pas filmi (μm)	Yarmada çekme dayanımı 28.günde (mpa)	Fiyat	Toplam Binanın ve Bir Dairenin Üretim Maliyetini Arttırma Oranları (%)	Bir Dairenin Üretim Maliyetini Arttırma Değerleri (TL)	Kullanım Ömrü Süresince Bir Dairenin Yıllık maliyetini düşürme Oranları (%)
Beton Katkıları	Sika Ferro Gard 901	-542	0,29	5,27	33,5	0-4	3,85	95,4 TL/ m ³	0,6	671 TL	37
	Tecno Silica	-433	0,31	4,88	30,6	5-10	4	17,32 TL/ m ³	0,10	123 TL	33
Donatı Kaplamaları	Sika Monotop 610	-411	0,14	4,18		0		9,76 TL/ m ³	0,06	70 TL	33
	Tecno Bond 650 Epoksi	-192	0,19	4,16		0		16,04 TL/ m ³	0,10	114 TL	41
	Sıcak daldırma Çinko	-666	0,36	5,44		0		51,47 TL/ m ³	0,33	367 TL	41
Beton Kaplamaları	Sika Gard 703 W	-315	0,20	5,29		0-3		2,94 TL/ m ³	0,019	21 TL	37
	Sika Ferro Gard 903	-575	0,42	5,22		5-15		3,36 TL/ m ³	0,022	24 TL	33
Katodik Korumalar	Galvanik Anotlu Katodik Koruma	-363						86,8 TL/m ³	0,6	625 TL	36,9
	Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma	-851						90,6 TL/m ³	0,6	653 TL	36,7

5.14 Kentsel Dönüşüm

Konut insanların temel ihtiyaçlarından biridir. Bu ihtiyaç yalnız başına barınma ihtiyacını karşılamakla kalmaz sosyal ve ekonomik çevrenin inşasını da beraberinde getirir. İnsanın en önemli özelliklerinden biri de toplu halde yaşaması ve şehir kurmasıdır. Kendini inşa etme sürecinde sürekli iyi olanı araştıran birey ve toplumlar zaman zaman kendini bulunduğu çevrede yetersiz görerek yeni bir çevre arayışına girer.

Bu durumda ailesinden, köyünden, şehrinden hatta ülkesinden uzaklarda, kendisine mekân arar. İnsanlığın bu ihtiyaç ve arayışları yeni şehirlere hayat vermiştir. Göçlerin etkisiyle şehirler hızla gelişmiş, kentler kontrolden çıkarak plansız, gelişi güzel büyümeye başlamıştır. Bu durum özellikle, savaş sonrası ve büyük ekonomik krizlerin akabinde daha yoğun olarak görülmüştür. 1910'lardaki Balkan savaşları ve I.Dünya Savaşı sonrasında topraklarını kaydeden Osmanlı coğrafyasından Anadolu'ya, özellikle İstanbul'a büyük göçler olmuştur. Daha sonra 1950'lerden itibaren Anadolu'dan başta İstanbul olmak üzere büyük şehirlerimize yoğun göçler olmuştur. Bu göçlere hazırlıklı olmayan şehirlerimiz kontrolsüz ve sağlıklı bir şekilde büyüyerek bugünkü karmaşık, çöküntü halini almıştır. 1999 Depremine kadar kullanılmakta olan sağlıklı binaların meydana getirdiği hasarlar konuyla ilgili acil önlemlerin alınması konusunu gündeme getirmiştir ve şu anda "kentsel dönüşüm" gerçeğiyle karşı karşıya kalınmıştır [106].

Kentsel dönüşüm tüm dünyanın güncel meselelerinden olup, sadece geri kalmış ülkelerin sorunu değildir. Japonya'da, ABD'de, Fransa'da, Almanya'da, İspanya'da, İngiltere'de de kentsel dönüşümler vardır. Bu ülkelerde sanayileşmenin getirdiği hızlı değişimler, kentsel alanlar üzerinde sorun oluşturduğundan, dönüşümler şehirleri markalaştırmak, dünyadaki gelişmeye paralel olarak şehirlere yeni silüet kazandırmak bakımından yapılmakta ve bu ülkelerde de zorluklarla karşılaşılmaktadır. Ülkemizde kentsel alanların ve ekonominin tahribatını oluşturan en önemli etken ise gecekondulaşma ve kaçak yapılaşmadır. Bugün Türkiye'de, işsizlikten sonraki en önemli sorun budur [107].

Kentsel dönüşüm'ün derinlemesine incelenmesinden önce tarifini yapmak faydalı olacaktır. Kentsel Dönüşüm; bilimsel bir yaklaşımla "şehre dair bozulmakta ve çökmekte olan kentsel alanın toplumsal, ekonomik, fiziki çevre koşullarının ve yaşam alanlarının kapsayıcı ve bütüncül bir yaklaşımla iyileştirilmesine yönelik politikalar ve yürütülen çalışmalar" veya "kentlerdeki çarpık yapılaşma ve neden olduğu sorunların çağdaş şehircilik ilkeleri ve planlama esaslarına uygun olarak yeniden yapılandırılmasını sağlamak üzere yapılan çalışmalar" şeklinde tarif edilir [108].

Yoksulluğun azaltılması, iş potansiyelinin artırılması, ekonominin canlandırılması, deprem kaynaklı hasar riskinin azaltılması, altyapı ve ulaşım maliyetlerinin azaltılması, kent merkezlerinin köhneleşmesinin önlenmesi ve suç oranlarının azaltılması, mahalleler arası fiziksel, ekonomik ve sosyal farklılıkların azaltılması, doğal çevre ve kaynakların sürdürülebilirliği, enerjiyi savuran yapı stokunun düzeltilmesi konuları

başta olmak üzere kentsel dönüşüm bir zarurettir. Ayrıca, şehirlerimizin küresel açıdan yarışan şehirler olabilmeleri için de gereklidir. Çünkü, gayrimenkul, ileri ulusların milli servetlerinin yüzde 50'si iken bu oran kalkınmakta olan ülkelerde yüzde 75'tir [107].

İBB'nin kentsel dönüşüme bakışını anlatırsak, örneğin İstanbul'da yerleşim alanları içerisinde kalmış, artık işlevini kaybetmiş veya kaybetmekte olan sanayi alanları vardır. İBB, İstanbul'un üst ölçek planlarını hazırlarken dönüşüm için bazı önemli kararlar almış olup bu planlarda İstanbul'u sanayi ağırlıklı değil de hizmet, ticaret, kültür, turizm ağırlıklı bir merkeze dönüştürme öngörülmektedir. Bunların dışındaki dönüşümlere bakıldığında deprem odaklı dönüşümler vardır. Bugün İstanbul'da 1 milyon 300 bin civarında bina olup bu binaların da büyük kısmı 99 depreminden önce yapılmıştır. Bu binaların imal durumlarına bakıldığında ise deprem güvenliğinden uzak yapılar oldukları görülmüştür. Bazılarının ise imal malzemeleri ve yapılışı bakımından depreme gerek duymadan bile yıkılacak binalar oldukları tespit edilmiştir. Bununla birlikte İBB 99 depreminden sonra Japon Araştırma Enstitüsü ile birlikte bir deprem hasar çalışması yapmıştır ve o günkü jeolojik durum, çevresel etkiler ve binaların durumu gibi faktörler göz önüne alınarak on ilçe öncelikli risk altında ilçe olarak belirlenmiştir. Burada daha çok zemin parametreleri ve bina yüzey incelemeleri sonucu böyle bir durum ortaya çıkmıştır. Bilahare İBB tarafından zemin etüt çalışmaları mikro bölgeleme yöntemiyle daha detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Bunun yanında öncelikli on ilçenin altısında bina incelemeleri yaptırılmıştır. Bu incelemeler sonucunda İstanbul'da çok sayıda binanın çok ciddi tehdit altında olduğu görülmüştür ve İstanbul'daki bina incelemelerine göre 99 depreminden sonra 45-50 bin binanın yıkılması gerektiği tespit edilmiştir. Bu altı ilçede yapılan çalışmalar sonucunda binaların yaklaşık üçte birinin riskli olduğu ortaya çıkmıştır [109]. Ayrıca 2010 yılı başı itibarı ile İstanbul'daki binaların durumunu değerlendirmek için Bimtaş'tan alınan verilerden elde edilen sonuçlarla 50 yıl olarak öngörülen bina ömrünün 28 yılda ciddi korozyon hasarları sebebiyle ekonomik olarak sona erdiği anlaşılmıştır. Korozyon seviyelerinin detaylı incelendiği üç ilçedeki (Bayrampaşa, Güngören ve Bahçelievler) 43.783 adet bina arasında %28,7 oranında korozyondan ciddi etkilenmiş bina olduğu tespit edilmiştir ve 2010 yılı için korozyonlu binaların 32.879.121.800 TL parasal kayba tekabül ettiği tespit edilmiştir [4].

Yine İBB'nin araştırmalarına göre kentsel dönüşümün deprem öncesi ve sonrası ekonomik bir karşılaştırması yapıldığında, deprem sonrası ekonomimize yaklaşık 100 milyon TL'lik bir maliyet getireceği öngörülmüştür. Deprem öncesi bu maliyetin yüzde

15-20'sini harcayarak bu kaybı büyük ölçüde önleyebileceğimiz belirtilmiştir. Dolayısıyla deprem dönüşümü dediğimizde binalarımızın yenilenmesi gerektiği kendiliğinden görülmektedir [109].

Ayrıca İBB'nin bütün dünya uygulamalarındaki tespitlerine göre dönüşüm sonrası, ilgili alanlardaki mülklerin değerleri 8-10 katına yükselmiştir [109]. Kentsel dönüşüm ürünü olan yapıların daha sağlıklı olmasının yanında, altyapı ve diğer sosyal donatıyla, yaşanabilir alanların ortaya çıkması, daireler tapulu olacağı için, mülkiyet konusundaki problemlerin ortadan kalkması, vatandaşların yaşam standartlarının artması, insanların, iş ve sosyal çevresinde değişiklik olmadan, yaşamlarına devam edebilmeleri, olası bir depremde, o bölgede ortaya çıkacak olan maddi ve manevi kayıpların oluşmadan önlenmesi, günümüz teknolojisine göre yapılmış sağlıklı yapılarda, enerji verimliliği gibi her türlü tasarrufun sağlanması, giderlerin azalması gibi avantajlar kentsel dönüşümü kullanıcı açısından da cazip hale getirmektedir [107].

Korozyonun, binaların esas iskeletini oluşturan ve taşıyıcı vazife gören çelik kolon ve kirişlerde kesit kaybına yol açarak yapıları depreme karşı dayanıksız hale getiren en önemli etken olduğu bilindiğinden, deprem sonrası hasar görmüş binaların pek çoğunun korozyon kaynaklı olduğu açıkça görülmektedir. Ne yazık ki yapılarda hasara sebep olan korozyona karşı, geçmişten günümüze binalarımızın çoğunda herhangi bir önlem alınmamıştır. Yaptığımız hesaplamalara göre yeni yapılacak 411,6 metrekare temel alanlı 20 katlı ve 80 dairesel betonarme bir binada korozyon hasarlarından korunma amacı ile gerekli önlem malzeme ve prosesleri bir paket halinde uygulandığında ortalama 112.322 TL olan dairenin maliyeti 1164 TL yani sadece %1 değerinde artmaktadır. Fakat binanın kullanım ömrünün artması neticesinde bir dairenin yıllık maliyetinin yapının içinde bulunduğu ortam koşullarına ve üretim kalitesine bağlı olarak değişmekle birlikte ortalama %37 oranında düşebileceği öngörülebilir. Bu maliyet yaklaşık olarak 827 TL civarındadır. Dolayısı ile binalarımızda korozyona karşı önlem paketi uygulandığı takdirde daire başına yapılan harcamanın ortalama iki yıl içerisinde geri kazanılma ihtimali yüksek olacaktır.

Kentsel Dönüşüm esnasında, eski fakat yıkılıp yeniden yapılacak kadar hasarı bulunmayan 411,6 metrekare temel alanlı 20 katlı ve 80 dairesel bir binada, oluşan korozyonun durdurulabilmesi için gerekli önlem malzeme ve prosesleri bir paket halinde uygulandığında ortalama 112.322 TL olan dairenin maliyeti 646 TL yani sadece %0,6 değerinde artmaktadır.

Sonuç olarak deprem dolayısıyla öyle ya da böyle yıkılmaya maruz kalacak yapı alanlarımız var olup bu alanlarda da binlerce insanımız yaşamaktadır. Buradan baktığımızda hızlı bir şekilde dönüşümlerinin yapılması ve yapılan binaların uzun ömürlü ve dayanıklı olması açısından kentsel dönüşüm projelerine korozyonu engelleyici tedbirlerin acilen dahil edilmesi gerekliliğı ortaya çıkmaktadır.

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde betonarme numunelerde yapılan deneysel çalışmalarda; betona inhibitör katılması, katodik koruma, donatının ve betonun kaplanması gibi önlemlerin beton yapıdaki donatının korozyonuna etkisi incelenerek beton yapıların korozyona karşı korunmasına yönelik parametreler araştırılmıştır. Buna dayanarak Kentsel Dönüşümde yeni ve eski binalar için uygulayıcıya pratik önlemler paketi sunulmuştur.

1. Betona İnhibitör Katılmasına Yönelik Deney Sonuçları:

Tecno Silica silis dumanı katkısı içeren betonarme numunelerde teknik özellikler olarak; korozyon akım yoğunluğu $0,31 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, aderans dayanımı 4,88 Mpa, basma dayanımı 30,6 Mpa, pas filmi 5-10 μm , yarmada çekme dayanımı 4 Mpa olarak tespit edilmiştir. Silis dumanı katkısının ekonomik değerlendirmesinde; beton metreküp fiyatı 17,32 TL/m³, referans olarak alınan 411,6 metrekare temel alanına sahip yapının ve bu yapıdaki bir konutun toplam maliyetini arttırma oranı %0,10 ve aynı yapıdaki bir konutun maliyetini arttırma değeri 123 TL olarak tespit edilmiştir.

Sika Ferro Gard 901 inhibitör katkısı içeren betonarme numunelerde teknik özellikler olarak; korozyon akım yoğunluğu $0,29 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, aderans dayanımı 5,27 Mpa, basma dayanımı 33,5 Mpa, pas filmi 0-4 μm , yarmada çekme dayanımı 3,85 Mpa olarak tespit edilmiştir. Sika Ferro Gard 901 katkısının ekonomik değerlendirmesinde; beton metreküp fiyatı 95,4 TL/m³, referans olarak alınan 411,6 metrekare temel alanına sahip yapının ve bu yapıdaki bir konutun toplam maliyetini arttırma oranı %0,6 ve aynı yapıdaki bir konutun maliyetini arttırma değeri 671 TL olarak tespit edilmiştir.

Beton katkı malzemeleri olan Tecno Silica silis dumanı ve Sika Ferro Gard 901 inhibitörü teknik ve ekonomik yönden karşılaştırıldığında, teknik özelliklerinin birbirine

yakın olduğu fakat ekonomik açıdan bakıldığında Tecno Silica silis dumanının yaklaşık 1/6 oranında daha ekonomik olduğu görölmüştür. Bu nedenle betonarme yapılarda korozyonu önleyici beton katkısı olarak silis dumanının kullanımı tercih edilmelidir.

2. Betonarmede Çelik Donatıların Kaplanması Yönelik Deney Sonuçları:

Sıcak daldırma çinko ile donatıları kaplamalı betonarme numunelerde teknik özellikler olarak, pas filmi 0 µm, aderans dayanımı 5,44 Mpa, korozyon akım yoğunluğu 0, 36 µA/cm² olarak tespit edilmiştir. Sıcak daldırma çinko donatı kaplamasının ekonomik değerlendirmesinde; beton metreküp fiyatı 51,47 TL/m³, referans olarak alınan 411,6 metrekare temel alanına sahip yapının ve bu yapıdaki bir konutun toplam maliyetini arttırma oranı %0,33 ve aynı yapıdaki bir konutun maliyetini arttırma değeri 367 TL olarak tespit edilmiştir.

Tecno Bond epoksi ile donatıları kaplamalı betonarme numunelerde teknik özellikler olarak, pas filmi 0 µm, aderans dayanımı 4,16 Mpa, korozyon akım yoğunluğu 0, 19 µA/cm² olarak tespit edilmiştir. Tecno Bond epoksi donatı kaplamasının ekonomik değerlendirmesinde; beton metreküp fiyatı 16,04 TL/m³, referans olarak alınan 411,6 metrekare temel alanına sahip yapının ve bu yapıdaki bir konutun toplam maliyetini arttırma oranı %0,10 ve aynı yapıdaki bir konutun maliyetini arttırma değeri 114 TL olarak tespit edilmiştir.

Sika Monotop 610 ile donatıları kaplamalı betonarme numunelerde teknik özellikler olarak, pas filmi 0 µm, aderans dayanımı 4,18 Mpa, korozyon akım yoğunluğu 0,14 µA/cm² olarak tespit edilmiştir. Tecno Bond epoksi donatı kaplamasının ekonomik değerlendirmesinde; beton metreküp fiyatı 9,76 TL/m³, referans olarak alınan 411,6 metrekare temel alanına sahip yapının ve bu yapıdaki bir konutun toplam maliyetini arttırma oranı %0,06 ve aynı yapıdaki bir konutun maliyetini arttırma değeri 70 TL olarak tespit edilmiştir.

Sıcak daldırma çinko, Tecno Bond epoksi ve Sika Monotop 610 çelik donatı kaplamaları teknik yönden karşılaştırıldığında sıcak daldırma çinko kaplamanın güçlü metalurjik bağ yapısından dolayı aderans dayanımını arttırdığı ve diğer kaplamalara göre daha yüksek aderans dayanımına sahip olduğu görölmüştür. Bunun dışında tüm kaplamaların diğer teknik özelliklerinin birbirine yakın olduğu görölmüştür. Ekonomik açıdan bakıldığında çinko kaplama diğer kaplamalara göre biraz daha maliyetli olmasına rağmen, yüksek aderans ve aşınma dayanımı gibi teknik özellikleri ile diğer

kaplamalara göre avantajlı olmasından dolayı yapılarda donatı kaplaması olarak kullanımı tercih edilmelidir.

3. Betonun Kaplanması Yönelik Deney Sonuçları:

Sika Gard 703 W kaplamalı betonarme numunelerde teknik özellikler olarak; pas filmi 0-3 μm , aderans dayanımı 5,29 Mpa, korozyon akım yoğunluğu 0,20 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak tespit edilmiştir. Sika Gard 703 W beton kaplamasının ekonomik değerlendirmesinde; beton metreküp fiyatı 2,94 TL/ m^3 , referans olarak alınan 411,6 metrekare temel alanına sahip yapının ve bu yapıdaki bir konutun toplam maliyetini arttırma oranı %0,019 ve aynı yapıdaki bir konutun maliyetini arttırma değeri 21 TL olarak tespit edilmiştir.

Sika Ferro Gard 903 inhibitörü kaplamalı betonarme numunelerde teknik özellikler olarak, pas filmi 5-15 μm , aderans dayanımı 5,22 Mpa, korozyon akım yoğunluğu 0,42 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak tespit edilmiştir. Sika Ferro Gard 903 beton kaplamasının ekonomik değerlendirmesinde; beton metreküp fiyatı 3,36 TL/ m^3 , referans olarak alınan 411,6 metrekare temel alanına sahip yapının ve bu yapıdaki bir konutun toplam maliyetini arttırma oranı %0,022 ve aynı yapıdaki bir konutun maliyetini arttırma değeri 24 TL olarak tespit edilmiştir.

Beton kaplamaları olan Sika Gard 703 W ve Sika Ferro Gard 903 inhibitörü teknik ve ekonomik yönden karşılaştırıldığında, Sika Gard 703 W kaplamasının hem teknik hemde ekonomik yönden üstün olduğu görülmüştür. Bu nedenle betonarme yapılarda korozyonu önleyici beton kaplaması olarak Sika Gard 703 W'nin kullanımı tercih edilmelidir.

4. Katodik Koruma Prosesine Yönelik Deney Sonuçları:

Galvanik anotlu katodik korumanın ekonomik değerlendirmesinde beton metreküp fiyatı 86,8 TL/ m^3 , referans olarak alınan 411,6 metrekare temel alanına sahip yapının ve bu yapıdaki bir konutun toplam maliyetini arttırma oranı %0,6 ve aynı yapıdaki bir konutun maliyetini arttırma değeri 625 TL olarak tespit edilmiştir.

Dış akım kaynaklı katodik korumanın ekonomik değerlendirmesinde beton metreküp fiyatı 90,6 TL/ m^3 , referans olarak alınan 411,6 metrekare temel alanına sahip yapının ve bu yapıdaki bir konutun toplam maliyetini arttırma oranı %0,6 ve aynı yapıdaki bir konutun maliyetini arttırma değeri 653 TL olarak tespit edilmiştir.

Galvanik anotlu katodik koruma eski binalara ve dış akım kaynaklı katodik koruma yeni binalara uygulanabilmektedir.

5. Kentsel Dönüşüm Sürecinde Yeni ve Eski Binalar için Çözüm Önerileri

Yeni Binalar için Çözüm Önerileri

Kentsel Dönüşüm sürecinde, yeni binalarda korozyonu önleme amacı ile beton katkı inhibitörleri, beton kaplamaları, çelik donatı kaplamaları ve dış akım kaynaklı katodik koruma prosesi birlikte bir önlem paketi şeklinde uygulanabilir.

Yapılan deneysel çalışmaya göre teknik ve ekonomik yönden optimum özelliklere sahip olan Tecno Silica silis dumanı beton katkı malzemesi, sıcak daldırma çinko çelik donatı kaplaması ve Sika Gard 703 W beton kaplaması önlem malzemeleri olarak ve dış akım kaynaklı katodik koruma ise önlem prosesi olarak Kentsel Dönüşüm esnasında yeni yapılacak binalarda birlikte bir paket şeklinde uygulanmalıdır.

Yukarıda belirtilen korozyondan koruyucu önlem malzeme ve proseslerinin yeni yapıda bir paket halinde uygulanması durumunda, betonarme yapının arsa değeri dahil toplam üretim maliyeti sadece %1 oranında artmaktadır. Bu rakamla orantılı bir şekilde bir dairenin üretim maliyeti de %1 oranında artmaktadır.

Büyük şehirlerde yapıların pek çoğunun imal durumlarına göre deprem güvenliğinden uzak olduğu ve buralarda pek çok insanımızın yaşadığı bilinmektedir. Kentsel Dönüşüm sürecinde yeni yapılacak binaların ömürlerini tamamlamadan kullanım dışı kalmaları neticesinde oluşabilecek ekonomik ve manevi kayıpların engellenmesi korozyon önlem paketinin uygulanması ile mümkün olabilecektir. Korozyon önlemlerinin bir paket halinde uygulanması ile yapıların üretim maliyeti sadece %1 oranında artarken yapıların korozyona karşı dayanıklı olmaları neticesinde kullanım ömürleri artacaktır. Kullanım ömürlerinin artmasına bağlı olarak üretim esnasında harcanılan ilave %1'lik maliyet birkaç yıl içerisinde tekrar geri kazanılarak amorti edilebilecektir.

Eski Binalar için Çözüm Önerileri

Kentsel Dönüşüm sürecinde, eski binalarda korozyonu önleme veya durdurma amacı ile beton kaplamaları ve galvanik anotlu katodik koruma prosesi birlikte bir önlem paketi şeklinde uygulanabilir.

Yapılan deneysel çalışmaya göre teknik ve ekonomik yönden optimum özelliklere sahip olan Sika Gard 703 W beton kaplaması önlem malzemesi olarak ve galvanik anotlu katodik koruma ise önlem prosesi olarak Kentsel Dönüşüm esnasında eski binalarda birlikte bir paket şeklinde uygulanmalıdır.

Yukarıda belirtilen korozyondan koruyucu önlem malzeme ve prosesinin eski yapıda bir paket halinde uygulanması durumunda, betonarme yapının arsa değeri dahil toplam üretim maliyeti sadece %0,6 oranında artmaktadır. Bu rakamla orantılı bir şekilde bir dairenin üretim maliyeti de %0,6 oranında artmaktadır.

Hafif korozyona uğramış veya uğramaya devam eden fakat yıkılıp tekrar üretimine gerek olmayan eski binalarda, korozyonun durdurulabilmesi ve yapıların kullanım ömürlerini tamamlamadan dayanıksız ve kullanım açısından güvensiz duruma gelmelerinin önlenmesi için üretim maliyetinin sadece %0,6'sı kadar ilave bir masraf yapılarak uzun bir süre yapıların kalıcı olması sağlanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Değirmenci, A., (2006). Silis Dumanı Katkısının Betonarme Çeliği Korozyonuna Etkisi, Y.L. Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [2] Mineral Katkıların Donatı Korozyonuna Etkisinin Elektrokimyasal Yöntemlerle İncelenmesi, <http://www.prefab.org.tr/makaleler/86-1.pdf>, 22 Aralık 2011.
- [3] Betonarme Köprü ve Viyadüklerde Oluşan Beton Hasarlarının Nedenleri, http://soylubeton.com/gerecler/betonarme_kopru_viyaduk_olusan_hasarlarin_sebepleri.pdf, 21 Aralık 2011.
- [4] Kentsel Dönüşümün En Önemli Gerekçelerinden Biri Olan Fakat Gözardı Edilen Faktör Korozyon, http://mmg.org.tr/mmg_57_web.pdf, 22 Aralık 2011.
- [5] Coşgun, T., (2003). "İstanbul'da Deprem Sonrası Yapılan İncelemelerde Karşılaşılan Korozyon Hasarı Üzerine Bir İnceleme", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5.Ulusal Beton Kongresi, 1-3 Ekim 2003, İstanbul, 269-278.
- [6] Korozyon ve Katodik Koruma, www.kimyamuhendisi.com, 20 Aralık 2011.
- [7] Pullar-Strecker, P., (2002). Concrete Reinforcement Corrosion: Ice Design and Practice, Thomas Telford, London.
- [8] Elektrik Tesisat Mühendisleri Derneği, Katodik Koruma Sisteminin Tanıtımı Teknik Yazılar, <http://www.etmd.org.tr>, 19 Aralık 2011.
- [9] Haberal, Y., (2010). Uçucu Küllü Betonlarda Klor İyonu Geçirgenliğinin ve Donatı Korozyonunun İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [10] Zeren, M., (2005). Korozyon ve Korozyondan Korunma, Kocaeli.
- [11] Yalçın, H. ve Gürü, M., (2006). Çimento ve Beton Ders Kitabı, Palme Yayınları, Ankara.
- [12] Smith, J.L.ve Virmani Y.P., Materials and Methods for Corrosion Control of Reinforced and Prestressed Concrete Structures In New Construction, <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/00081.pdf>, Ağustos 2011.
- [13] Ün, H., Yapı Malzemesi 4 Çimento, http://hun.pamukkale.edu.tr/ders_notlari/yapi_malzemesi/Yapi_Malzemesi_4_cimento.pdf, Eylül 2010.

- [14] Boğa, A.R., (2005). Uçucu Küllü Betonarme Elemanlarda Donatı Korozyonunun Hızlandırılmış Yöntemlerle Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [15] Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P.ve Polder, R., (2004). Corrosion of Steel in Concrete, Wiley-VCH, Mörlenbach.
- [16] Sakr, K., (2005).”Effect of cement type on the corrosion of reinforcing steel bars exposed to acidic media using electrochemical techniques”, Cement and Concrete Research, 35(9): 1820-1826.
- [17] Al-Amoudi, O.S.B., Maslehuddin, M., Lashari, A.N.ve Almusallam, A.A., May-July 2003, “Effectiveness of corrosion inhibitors in contaminated concrete”, Cement and Concrete Composites, 25(4-5): 439-449.
- [18] Yalçın, H.ve Koç, T., (1998).Mühendisler için Korozyon, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Kimya Mühendisleri Odası, Ankara.
- [19] Saraswathy, V.ve Song, H.W., (2007).”Evaluation of corrosion resistance of Portland pozzolana cement and fly ash blended cements in pre-cracked reinforced concrete slabs under accelerated testing conditions”, Materials Chemistry and Physics, 104 (2-3): 356-361.
- [20] Ann, K.Y., Kim, T.-S., Kim, J.H.ve Kim, S.-H., (2010).“The resistance of high alumina cement against corrosion of steel in concrete”, Construction and Building Materials, 24(8): 1502-1510.
- [20] Kayali, O.ve Zhu, B., (2005).”Corrosion performance of medium-strength and silica fume high-strength reinforced concrete in a chloride solution”, Cement and Concrete Composites, 27(1): 117-124.
- [22] Delikanlı, F., (2001).Donatılı Betonda Korozyon Hasarı ve Giderilme Yolları, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [23] Yung Wang, H.ve Liang Huang, W., (2010).” Durability of self-consolidating concrete using waste LCD glass”, Construction and Building Materials, 24(6): 1008-1013.
- [24] Öztekin, E., Donatı Korozyonuna Karşı C 30 Kullanımı, <http://www.imoistanbul.org.tr/ist-bulten/sayi55/eoztekin.htm>, Mart 2010.
- [25] Soleymani, H.R., Ismail, M.E., (2004). “Comparing corrosion measurement methods to assess the corrosion activity of laboratory OPC and HPC concrete specimens”, Cement and Concrete Research, 34(11): 2037-2044.
- [26] Güneyisi, E., Özturan, T.ve Gesoğlu, M., (2005).“A study on reinforcement corrosion and related properties of plain and blended cement concretes under different curing conditions”, Cement and Concrete Composites, 27(4): 449-46.
- [27] Gel, M.K., Betonarme Yapılarda Donatıların Korozyonu ve Su Yalıtımı, http://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/8d7421593caf098_ek.pdf?dergi=168,Nisan 2010.
- [28] Ngala, V.T., Page, C.L.ve Page, M.M., (2002). “Corrosion inhibitor systems for remedial treatment of reinforced concrete”, Corrosion Science, 44(9): 2073-2087.
- [29] Bentur, N., Diamond, S.ve Berke, N.S., (1997). Steel Corrosion in Concrete, Taylor Francis CRC Press, Florida.

- [30] Ormellese, M., Lazzari, L., Goidanich, S., Fumagalli, G.ve Brenna, A., (2009).“A study of organic substances as inhibitors for chloride-induced corrosion in concrete”, Corrosion Science, 51(12): 2959-2968.
- [31] Dhir, R.K.ve Newlands, M.D., (1999). Controlling Concrete Degradation, Thomas Telford, London.
- [32] Manning, D.G., (1995).Waterproofing Membranes for Concrete Bridge Decks, Transportation Research Board,Washington.
- [33] Broomfield, J.P., Davies, K.ve Hladky, K., (2002).” The use of permanent corrosion monitoring in new and existing reinforced concrete structures”, Cement and Concrete Composites, 24(1): 27-34.
- [34] Ramachandran, V.S.ve Beaudoin, J.J., (2001). Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology, Noyes Publications William Andrew Publishing, New York.
- [35] Kayali, O.ve Zhu, B., (2005).” Chloride induced reinforcement corrosion in lightweight aggregate high-strength fly ash concrete”, Construction and Building Materials, 19(4): 327-336.
- [36] Elsener, B., (2001).”Half-cell potential mapping to assess repair work on RC Structures”, Construction and Building Materials, 15(2-3): 133-139
- [37] Qian, S.ve Cusson, D., (2004).” Electrochemical evaluation of the performance of corrosion-inhibiting systems in concrete bridges”, Cement and Concrete Composites, 26(3): 217-233.
- [38] Kılıçoğlu, C., (2007). Betonarme Yapılarda Donatı Korozyonu Durumunun Aletsel Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- [39] Darwin, A.B.ve Scantlebury J.D., (2002).” Retarding of corrosion processes on reinforcement bar in concrete with an FBE coating”, Cement and Concrete Composites, 24(1): 73-78.
- [40] Kepler, J., Evaluation of Corrosion Protection Methods for Reinforced Concrete Highway Structures, <http://www.iri.ku.edu/publications/SM58.PDF>, 01.04.2010.
- [41] Muralidharan, S., Saraswathy, V., Merlin Nima, S.P.ve Palaniswamy, N., (2004). “Evaluation of a composite corrosion inhibiting admixtures and its performance in Portland pozzolana cement”, Materials Chemistry and Physics, 86(2-3): 298-306.
- [42] Saraswathy, W., Muralidharan, S., Kalyanasundaram, R.M., Thangavel, K.ve Srinivasan, S., (2001). “Evaluation of a composite corrosion-inhibiting admixture and its performance in concrete under macrocell corrosion conditions”, Cement and Concrete Research, 31(5): 789-794.
- [43] Kondratova, I.L., Montes, P.ve Bremner, T.W., (2003). “Natural marine exposure results for reinforced concrete slabs with corrosion inhibitors”, Cement and Concrete Composites, 25(4-5): 483-490.
- [44] Ormellese, M., Lazzari, L., Goidanich S., Fumagalli G.ve Brenna A., (2009). “A study of organic substances as inhibitors for chloride-induced corrosion in concrete”, Corrosion Science, 51(12): 2959-2968.

- [45] Söylev, T.A., McNally, C.ve Richardson, M., (2007). "Effectiveness of amino alcohol-based surface-applied corrosion inhibitors in chloride-contaminated concrete", *Cement and Concrete Research*, 37(6): 972-977.
- [46] Saricimen, H., Mohammad, M., Quddus, A., Shameem, M.ve Barry, M.S., (2002). "Effectiveness of concrete inhibitors in retarding rebar corrosion", *Cement and Concrete Composites*, 24(1): 89-100.
- [47] Malik, A.U., Andijani I., Al-Moaili, F.ve Ozair, G., (2004). "Studies on the performance of migratory corrosion inhibitors in protection of rebar concrete in Gulf seawater environment", *Cement and Concrete Composites*, 26(3): 235-242.
- [48] Mechmeche, L.B., Dhouibi, L., Ouezdou, M.B., Triki, E.ve Zucchi, F., (2008). "Investigation of the early effectiveness of an amino-alcohol based corrosion inhibitor using simulated pore solutions and mortar specimens", *Cement and Concrete Composites*, 30(3): 167-173.
- [49] Tommaselli, M.A.G., Mariano, N.A., Kuri, S.E., (2009). "Effectiveness of corrosion inhibitors in saturated calcium hydroxide solutions acidified by acid rain components", *Construction and Building Materials*, 23(1): 328-333.
- [50] Yeomans, S.R., (2004). *Galvanized Steel Reinforcement in Concrete*, First Edition, Elsevier B.V., Amsterdam.
- [51] Trejo, D.ve Monteiro, P.J., (2005). "Corrosion performance of conventional (ASTM A615) and low-alloy (ASTM A706) reinforcing bars embedded in concrete and exposed to chloride environments", *Cement and Concrete Research*, 35(3): 562-571.
- [52] Živica, V., Krajci, L', Bágel', L'.ve Vargová, M., (1997). "Significance of the ambient temperature and the steel material in the process of concrete reinforcement corrosion", *Construction and Building Materials*, 11(2): 99-103.
- [53] Sohanqhpurwala, A.A., (2006). *Manual on Service Life of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Bridge Superstructure Elements*, Transportation Research Board, Washington.
- [54] Saravanan, K., Sathiyarayanan, S., Muralidharan, S., Syed Azim, S.ve Venkatachari, G., (2007). "Performance evaluation of polyaniline pigmented epoxy coating for corrosion protection of steel in concrete environment", *Progress in Organic Coatings*, 59(2): 160-167.
- [55] Selvaraj, R., Selvaraj, M.ve Iyer, S.V.K., (2009). "Studies on the evaluation of the performance of organic coatings used for the prevention of corrosion of steel rebars in concrete structures", *Progress in Organic Coatings*, 64(4): 454-459.
- [5] Venkatesan, P., Palaniswamy, N.ve Rajagopal, K., (2006). "Corrosion performance of coated reinforcing bars embedded in concrete and exposed to natural marine environment", *Progress in Organic Coatings*, 56(1): 8-12.
- [57] Gowripalan, N.ve Mohamed, H.M., (1998). "Chloride-ion induced corrosion of galvanized and ordinary steel reinforcement in high -performance concrete, *Cement and Concrete Research*, 28(8): 1119-1131.
- [58] García-Alonso, M.C., González, J.A., Miranda, J., Escudero, M.L., Correia, M.J., Salta, M.ve Bennani, A., (2007). "Corrosion behaviour of innovative stainless steels in mortar", *Cement and Concrete Research*, 37(11): 1562-1569.

- [59] Gu, P., Elliott S., Beaudoin, J.J.ve Arsenault, B., (1996). "Corrosion resistance of stainless steel in chloride contaminated concrete", *Cement and Concrete Research*, 26 (8): 1151-1156.
- [60] Bautista, A., Blanco, G.ve Velasco, F., (2006). "Corrosion behaviour of low-nickel austenitic stainless steels reinforcements: A comparative study in simulated pore solutions", *Cement and Concrete Research*, 36(10): 1922-1930.
- [61] Alvarez, S.M., Bautista A.ve Velasco F., (2011). "Corrosion behaviour of corrugated lean duplex stainless steels in simulated concrete pore solutions", *Corrosion Science*, 53(5): 1748-1755.
- [62] Jalili, M.M., Moradian, S., Hosseinpour D., (2009). "The use of inorganic conversion coatings to enhance the corrosion resistance of reinforcement and the bond strength at the rebar/concrete", *Construction and Building Materials*, 23(1): 233-238.
- [63] Singh, D.D.N.ve Ghosh, R., (2006). "Electroless nickel-phosphorus coatings to protect steel reinforcement bars from chloride induced corrosion", *Surface and Coatings Technology*, 201(1-2): 90-101.
- [64] Hou J.ve Chung D.D.L., (2000). "Effect of admixtures in concrete on the corrosion resistance of steel reinforced concrete", *Corrosion Science*, 42(9): 1489-1507.
- [65] El-Hawary, M.M.ve Abdul-Jaleel, A., (2010). "Durability assessment of epoxy modified concrete", *Construction and Building Materials*, 24(8): 1523-1528.
- [66] Batis, G., Kouloumbi, N.ve Pantazopoulou P., (2005). "Corrosion protection of steel in pumice lightweight mortar by coatings", *Cement and Concrete Composites*, 27(2): 261-267.
- [67] Okba, S.H., El-Dieb, A.S.ve Reda M.M., (1997). "Evaluation of the corrosion resistance of latex modified concrete (lmc)", *Cement and Concrete Research*, 27(6): 861-868.
- [68] Al-Zahrani, M.M., Al-Dulaijan, S.U., Ibrahim, M., Saricimen, H.ve Sharif F.M., (2002). "Effect of waterproofing coatings on steel reinforcement corrosion and physical properties of concrete", *Cement and Concrete Composites*, 24(1): 127-137.
- [69] Tittarelli, F.ve Moriconi, G., (2008). "The effect of silane-based hydrophobic admixture on corrosion of reinforcing steel in concrete", *Cement and Concrete Research*, 38(11): 1354-1357.
- [70] Tittarelli, F.ve Moriconi, G., (2010). "The effect of silane-based hydrophobic admixture on corrosion of galvanized reinforcing steel in concrete", *Corrosion Science*, 52(9): 2958-2963.
- [71] Wang, S.X., Lin, W.W., Ceng, S.A.ve Zhang, J.Q., (1998), "Corrosion inhibition of reinforcing steel by using acrylic latex", *Cement and Concrete Research*, 28(5): 649-653.
- [72] Siddique, R.ve Klaus, J., (2009). "Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review", *Applied Clay Science*, 43(3-4): 392- 400.

- [73] Horsakulthai, V., Phiuvanna, S.ve Kaenbud, W., (2011). "Investigation on the corrosion resistance of bagasse-rice husk-wood ash blended cement concrete by impressed voltage", *Construction and Building Materials*, 25(1): 54-60.
- [74] El-Din, H., Seleem, H., Rashad, A.M.ve El-Sabbagh, B.A., (2010). "Durability and strength evaluation of high-performance concrete in marine structures", *Construction and Building Materials*, 24(6): 878-884.
- [75] Ahmadi, B.ve Shekarchi, M., (2010). "Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material", *Cement and Concrete Composites*, 32(2): 134-141.
- [76] Chindaprasirt, P.ve Rukzon, S., (2008). "Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar", *Construction and Building Materials*, 22(8): 1601-1606.
- [77] Parande, A.K., Babu, B.R., Karthik M.A., Kumaar K.K.D.ve Palaniswamy N., (2008), "Study on strength and corrosion performance for steel embedded in metakaolin blended concrete/mortar", *Construction and Building Materials*, 22(3): 127-134.
- [78] Boddy, A., Hooton, R.D.ve Gruber, K.A., (2001). "Long term testing of the chloride –penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin", *Cement and Concrete Research*, 31(5): 759-765.
- [79] Dotto, J.M.R., Abreu, A.G.ve Dal Molin, D.C.C.ve Müller I.L., (2004). "Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars", *Cement and Concrete Composites*, 26(1): 31-39.
- [80] Türkmen, İ.ve Gavgalı, M., (2003). "Influence of mineral admixtures on the some properties and corrosion of steel embedded in sodium sulfate solution of concrete", *Materials Letters*, 57(21): 3222-3233.
- [81] Civjan, S.A., LaFave, J.M., Trybulski, J., Lovett, D., Lima, J.ve Pfeifer, D.W., (2005). "Effectiveness of corrosion inhibiting admixture combinations in structural concrete", *Cement and Concrete Composites*, 27(6): 688-703.
- [82] Binici, H., Aksoğan, O., Görür, E., Kaplan, H.ve Bodur, M.N., (2008). "Performance of ground blast furnace slag and ground basaltic pumice concrete against seawater attack", *Construction and Building Materials* 22(7): 1515–1526.
- [83] Maslehuddin, M., Awan, F.R., Shameem, M., Ibrahim, M.ve Ali.M.R., (2011). "Effect of electric arc furnace dust on the properties of OPC and blended cement concretes", *Construction and Building Materials*, 25(1): 308-312.
- [84] Hyun, H.T., Muralidharan, S., Bae J., Cheol Ha Y., Goo Lee H., Wha Park K.ve Kyeong Kim D., (2007). "Accelerated short-term techniques to evaluate the corrosion performance of steel in fly ash blended concrete", *Building and Environment*, 42(1): 78-85.
- [85] Chindaprasirt, P., Rukzon, S.ve Sirivivatnanon, V., (2008). "Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash", *Construction and Building Materials*, 22(5): 932-938.
- [86] Wheat, H.G., (2002). "Using polymers to minimize corrosion of steel in concrete", *Cement and Concrete Composites*, 24(1): 119-126.

- [87] Fedrizzi L., Azzolini F.ve Bonora P.L., (2005). "The use of migrating corrosion inhibitors to repair motorways' concrete structures contaminated by chlorides", Cement and Concrete Research, 35(3): 551-561.
- [88] Emindağ, F., (2001). Suyun Yapıdaki Etkileri ve Yapıların Suyu Karşı Yalıtımı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [89] Aydın, Ö., (2010). "Beton Yapılarda Donatı Korozyonunun Önlenmesine Yönelik Tedbirlerin Araştırılması", YTÜ Doktora Semineri, 5 Mayıs 2010, İstanbul.
- [90] TS-EN 197-1, (2002). Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara.
- [91] TS 708, (2010). Çelik-Betonarme İçin-Donatı Çeliği, TSE, Ankara.
- [92] ASTM C 876-09, (2009). Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete, ASTM, Pennsylvania.
- [93] ASTM G 59-97, (2009). "Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements", ASTM, Pennsylvania.
- [94] TS-EN 12390-3, (2010). Beton-Sertleşmiş Beton Deneylemleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini, TSE, Ankara.
- [95] TS-EN 12390-6, (2010). Beton-Sertleşmiş Beton Deneylemleri-Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini, TSE, Ankara.
- [96] Qian, S.Y.ve Chagno, N., (2001). "Evaluation of corrosion of reinforcement in repaired concrete", 9th International Structural Faults and Repair Conference and Exhibition, London, 1-12.
- [97] Tan, Z.Q., (2007). The Effect of Galvanized Steel Corrosion on the Integrity of Concrete, Master Thesis, University of Waterloo, West Waterloo.
- [98] Tan Z.Q.ve Hansson C.M., (2008). "Effect of surface condition on the initial corrosion of galvanized reinforcing steel embedded in concrete" Corrosion Science, 50(9): 2512-2522.
- [99] Ghosh, R.ve Singh D.D.N., (2007). "Kinetics, mechanism and characterisation of passive film formed on hot dip galvanized coating exposed in simulated concrete pore solution", Surface and Coatings Technology, 201(16-17): 7346-7359.
- [100] Yalçın, H.ve Koç, T., (1999). Katodik Koruma, Palme Yayıncılık, Ankara.
- [101] İzoder, Su Yalıtımı, http://www.izoder.org.tr/suyalitimi/genel/TEK_CD_SU_%20YALITIMI_GIRISpdf,25 Kasım 2011.
- [102] New Guide on Use of Epoxy-Coated Reinforcing Steel, <http://epoxyinterestgroup.org>, 20 Kasım 2011.
- [103] Service Life of Galvanized Steel Articles in Soil Applications, http://www.galvanizeit.org/images/uploads/publicationPDFs/Galvanized_Steel_Performance_in_Soil.pdf, 21 Ekim 2011.
- [104] Gapinski, G.M. ve Scanlon, J., Silica Fume, http://www.norchem.com/pdf/technical-papers-articles-gapinski_scanlon.pdf, 20 Eylül 2011.

- [105] Challenges in Residual Service Life Assessment for Refurbishment Projects, <http://eprints.qut.edu.au/27206/1/27206.pdf>, 2003.
- [106] Kentsel Dönüşümden Şehir Çıkarmak, http://mmg.org.tr/mmg_57_web.pdf, 22 Aralık 2011.
- [107] Toki Kentsel Dönüşüm Uygulamaları, http://mmg.org.tr/mmg_57_web.pdf, 10 Ocak 2012.
- [108] Kentsel Dönüşüm Yerel Yönetimlerin Yarı Tanrısal Gücü (mü), http://mmg.org.tr/mmg_57_web.pdf, 1 Şubat 2012.
- [109] İstanbul; Kültür, Turizm ve Ticaretin Başkenti Olmalıdır, http://mmg.org.tr/mmg_57_web.pdf, 5 Mart 2012.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Özlem AYDIN
Doğum tarihi ve yeri : 13.11.1979 / Nişantaşı-İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ozlemaydin12@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Üretim Programı	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Y. Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Üretim Programı	Yıldız Teknik Üniversitesi	2005
Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı	Sakarya Üniversitesi	2003
Lise	Fen Bilimleri	Şişli Kurtuluş Lisesi	1998

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010 /...	Gedik Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2006-2010	Net Cıvata A.Ş.	İhracat Uzmanı
2001	Arçelik A.Ş.	Stajyer