

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETON YOLLARDA KOROZYON

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Salih İLTEKİN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

ARALIK 2017

BETON YOLLARDA KOROZYON

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Salih İLTEKİN
(501141416)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Abdullah Hilmi LAV

ARALIK 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501141416 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Salih İLTEKİN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BETON YOLLARDA KOROZYON” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Abdullah Hilmi LAV**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mustafa Hulusi ÖZKUL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN
İstanbul Gelişim Üniversitesi

Teslim Tarihi : 16 Kasım 2017
Savunma Tarihi : 21 Aralık 2017





Aileme,



ÖNSÖZ

Dünyada gittikçe yaygınlaşan beton yolların korozyon nedeniyle servis ömrü kısa olmaktadır. Bu çalışmada beton yollarda korozyon oluşturabilecek etmenler ve korozyona nasıl bir önlem alınması gerektiği anlatılmıştır.

Bu orijinal konuyu bana bulan ve bütün çalışmalarım boyunca desteğini esirgemeyen çok kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Abdullah Hilmi LAV'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Aralık 2017

Salih İLTEKİN
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. BETON YOLLAR.....	3
2.1 Beton Yol Nedir?	3
2.2 Beton Yolda Oluşan Gerilmeler	4
2.3 Beton Yol Yapım Aşamaları	5
2.3.1 Yol tabanı ve temel hazırlığı	5
2.3.2 Betonun karışımı ve taşınması	5
2.3.3 Betonun yerleştirilmesi	6
2.3.4 Derz uygulaması	8
2.3.4.1 Enine derzler	8
2.3.4.2 Boyuna derzler	10
2.3.5 Kayma ve bağlantı demirleri yerleştirilmesi	11
2.3.5.1 Kayma demirleri yerleştirilmesi	11
2.3.5.2 Bağlantı demirleri yerleştirilmesi	12
2.3.6 Beton çelik çubukları	12
2.3.7 Yüzey bakımı	12
2.3.7.1 Çelik fırçalama	12
2.3.7.2 Görünür agregalı yüzey elde edilmesi	12
2.3.7.3 Desen baskılı beton	13
2.3.8 Betonun korunması	13
2.3.8.1 Kurumaya karşı koruma	13
2.3.8.2 Yağmura karşı koruma	13
2.3.8.3 Dona karşı koruma	13
2.3.8.4 Mekanik etkilere karşı koruma	13
2.4 Beton Yol – Asfalt Yol Karşılaştırması	14
2.5 Beton Yol Çeşitleri	18
2.5.1 Derzli donatısız beton yollar	18
2.5.2 Derzli donatılı beton yollar	19
2.5.3 Sürekli donatılı beton yollar	19
2.5.4 Çelik lifli beton yollar	20
2.6 Beton Yolun Tasarımı	20
2.7 Türkiye’de Beton Yollar	22

3. KOROZYON	25
3.1 Korozyon Mekanizmalarına Göre Korozyon Türleri	26
3.2 Genel Olarak Korozyon Türleri.....	28
3.3 Korozyon Oluşumu	35
3.3.1 Pasifleşme ve pasifliğin bozulması	37
3.4 Korozyon İlerlemesi ve Hızına Etki Eden Faktörler	38
3.4.1 pH etkisi	38
3.4.2 Karbondioksit etkisi	39
3.4.3 Klorür iyonu etkisi	41
3.4.4 Nitrat etkisi	47
3.4.5 Sülfat etkisi.....	48
3.4.6 Sülfür etkisi	49
3.5 Korozyon Sonuçları	49
3.6 Betonun Kritik Özellikleri.....	51
3.7 Beton Yollarda Buz Çözücüler.....	61
4. ABD'DE YAPILAN BETON YOLLARDAKİ KAYMA DEMİRLERİNİN KOROZYON DİRENÇLERİNİN LABORATUVAR ORTAMINDA ÖLÇÜLMESİ DENEYİNİN LİTERATÜR İNCELEMESİ	67
4.1 Kayma Demirlerinin Korozyonu	67
4.2 Deneyde Değerlendirilen Kayma Demiri Çeşitleri	69
4.3 Deney Metodu	70
4.4 Deney Tasarımı	71
4.4.1 Aşama 1.....	71
4.4.2 Aşama 2.....	73
4.4.3 Aşama 3.....	77
4.4.3.1 Arazideki plakların değerlendirilmesi.....	78
4.4.3.2 Kullanımda olan yoldan alınan karotun klorür testi.....	79
4.4.4 Sonuçları bulma yöntemleri	79
4.4.5 Boşluk kontrolü	81
4.4.6 Laboratuardan ve araziden alınan karotların klorür deneyleri	81
4.5 Deney Sonuçları ve Yorumları.....	82
4.5.1 Birinci aşama sonuçları	82
4.5.1.1 Yarı hücre potansiyeli ve lineer polarizasyon direnci	83
4.5.1.2 Gözle muayene	89
4.5.2 İkinci aşama sonuçları.....	92
4.5.2.1 Yarı hücre potansiyeli ve lineer polarizasyon direnci	92
4.5.2.2 Gözle muayene	98
4.5.2.3 Korozi alanların mikroyapısal analizi	101
4.5.3 Üçüncü aşama sonuçları.....	106
4.5.3.1 Çıkarılan WSDOT beton yol plakları.....	106
4.5.4 Klorür içeriğinin analizi	107
4.5.4.1 Interstate 90'dan çıkarılan WSDOT plaklarının klorür analizi.....	108
4.5.4.2 Çeşitli yerlerdeki WSDOT beton yollarından alınan karotların klorür analizi	108
4.5.4.3 Laboratuvar numunelerinin klorür analizi.....	109
4.6 Değerlendirme ve Öneriler	109
4.6.1 Birinci aşama değerlendirmesi	110
4.6.2 İkinci aşama değerlendirmesi.....	110
4.6.3 Üçüncü aşama değerlendirmesi.....	112
4.6.4 Klorür analizi değerlendirmesi.....	112

5. TÜRKİYE’DE İKLİM TÜRLERİNE GÖRE BETON YOL YAPILMADAN ALINMASI GEREKEN ÖNLEMLER.....	115
6. SONUÇLAR	119
KAYNAKLAR	121
EKLER	125
ÖZGEÇMİŞ.....	133





KISALTMALAR

AASHTO	:American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	: American Society for Testing and Materials
ASR	: Alkali – Silika Reaksiyonu
Caltrans	: California Department of Transportation
FWD	: Falling Weight Deflectometer
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
LPR	: Linear Polarization Resistance
LTE	: Load Transfer Efficiency
SEM	: Scanning Electron Microscope
TÇMB	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
UCPRC	: University of California Pavement Research Center
YOGT	: Yıllık Ortalama Günlük Trafik
WSDOT	: Washington State Department of Transportation



SEMBOLLER

E	: Elastisite modülü
I_{corr}	: Korozyon akım yoğunluğu
R_p	: Kutuplaşma direnci
ΔE	: Gerilimdeki değişim
Δi	: Elektron birikim alanı
ε	: Şekil değiştirme
σ	: Gerilme



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Galvanik metal çiftlerinden korozyona uğrayan metaller.	29
Çizelge 3.2 : Mikrobiyolojik korozyonun olduğu yerler.	34
Çizelge 3.3 : Korozyon için zararlı sayılan klorür yüzdeleri.	43
Çizelge 3.4 : Korozyon aktivitesinin Cl^- iyonu oranına göre değerlendirilmesi.	44
Çizelge 3.5 : Suda bulunan sülfat iyonu oranına göre korozyon etkisi.	48
Çizelge 4.1 : Yarı hücre potansiyeli değeri ile korozyon olasılığı değerlendirmesi.	80
Çizelge 4.2 : Korozyon akım yoğunluğu ile korozyon hızının değerlendirmesi.	81
Çizelge 4.3 : Bağlantı demiri numune çeşitlerinin isimlendirilmesi.	83
Çizelge 4.4 : Deney numunelerinin yarı hücre potansiyeli, polarizasyon direnci ve korozyon akım yoğunluğu değerleri.	96
Çizelge A.1 : İstanbul için meteorolojik veriler.	126
Çizelge A.2 : İzmir için meteorolojik veriler.	127
Çizelge A.3 : Trabzon için meteorolojik veriler.	128
Çizelge A.4 : Kayseri için meteorolojik veriler.	129
Çizelge A.5 : Antalya için meteorolojik veriler.	130
Çizelge A.6 : Diyarbakır için meteorolojik veriler.	131
Çizelge A.7 : Erzurum için meteorolojik veriler.	132



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Kamyonla taşınan beton ile yol yapımı.	6
Şekil 2.2 : Transmikser ile taşınan beton ile yol yapımı.....	6
Şekil 2.3 : Sabit kalıp kullanımı.	7
Şekil 2.4 : Kayar kalıplı beton finişeri.....	8
Şekil 2.5 : Enine büzülme derzi.....	9
Şekil 2.6 : Enine genleşme derzi.....	9
Şekil 2.7 : İnşaat derzi.	10
Şekil 2.8 : Boyuna büzülme derzi.....	10
Şekil 2.9 : Boyuna inşaat derzi.	11
Şekil 2.10 : Tamamlanmış bir beton yol.....	14
Şekil 2.11 : Washington otoyolu performans eğrileri.....	15
Şekil 2.12 : Kaplamaların yükü iletme çeşitleri.....	16
Şekil 2.13 : Derzli donatısız beton yollar.	18
Şekil 2.14 : Derzli donatılı beton yollar.....	19
Şekil 2.15 : Sürekli donatılı beton yollar.	20
Şekil 2.16 : Esnek üstyapıdaki trafik tekrar sayılarına göre tabaka kalınlıkları.	21
Şekil 2.17 : Derzli donatısız üstyapıdaki trafik tekrar sayılarına göre tabaka kalınlıkları.	21
Şekil 2.18 : Sürekli donatılı üstyapıdaki trafik tekrar sayılarına göre tabaka kalınlıkları.	22
Şekil 3.1 : Bazı metal iyonları için elektromotif kuvvet serisi.	27
Şekil 3.2 : Voltaj sırasına göre anot - katot oluşumu.....	29
Şekil 3.3 : Gerilme pili örneği.	30
Şekil 3.4 : Konsantrasyon pili örneği.	30
Şekil 3.5 : Demirin korozyon mekanizması.	35
Şekil 3.6 : Oksijen difüzyonunun beton kalınlığına göre değişimi.	36
Şekil 3.7 : Korozyon hızının çözünmüş O ₂ ile konsantrasyonu ile değişimi.....	36
Şekil 3.8 : Gerilim ve pH değişimi ile oluşan korozyon bölgeleri.	37
Şekil 3.9 : Klorürlü ortamlardaki potansiyel – pH diyagramı.	38
Şekil 3.10 : Korozyon hızının pH ile değişimi.	39
Şekil 3.11 : Betondaki karbonasyon olayı.	40
Şekil 3.12 : Karbonasyona uğramış metal.	40
Şekil 3.13 : Korozyon hızının tuzluluk oranı ile değişimi.	41
Şekil 3.14 : Klorür etkisiyle donatıda çukur oluşması.....	42
Şekil 3.15 : Klorürlerin neden olduğu korozyon aşamaları.	45
Şekil 3.16 : Betonarme yapının servis ömrünün Cl ⁻ konsantrasyonu ve korozyon seviyesi ile değerlendirilmesi.....	46
Şekil 3.17 : Donatı çapındaki kayba örnek.	47
Şekil 3.18 : Sodyum sülfat etkisi ile oluşan hasar.	49
Şekil 3.19 : Korozyona uğramış donatı yakınında olan bir noktadaki gerilmeler.	50

Şekil 3.20 : Korozyona uğramış donatı yakınında olan bir noktadaki gerilme değişimlerinin Mohr dairesinde gösterilmesi.....	51
Şekil 3.21 : Buz çözücü tuzların kullanımı sebebiyle pullanmış bir beton yüzeyi.	55
Şekil 3.22 : Betondaki terleme ile yüzeye çıkan suların buharlaşması ile oluşan plastik rötre çatlağı.	57
Şekil 3.23 : Beton yoldaki yüzey çatlakları.	58
Şekil 3.24 : Beton yolda oluşan gelişigüzel enine çatlaklar.	59
Şekil 3.25 : Beton yolda oluşan gelişigüzel boyuna çatlaklar.	60
Şekil 3.26 : Beton yoldaki köşe kırılmaları.	60
Şekil 3.27 : Buz çözücü etkisiyle derz çevresinde oluşan gölgelenme.....	62
Şekil 3.28 : Gölgelenme sonrasında derzde oluşan çatlak.....	63
Şekil 3.29 : Çatlama artışı ile beton formundaki değişimi.	63
Şekil 3.30 : Betondaki kırılmalar.	64
Şekil 3.31 : Betonun parçalanması.	64
Şekil 3.32 : Çatlaklarda kalsiyum hidroksit ve kalsiyum karbonat sızıntısı.	65
Şekil 4.1 : Derzlerden kayma demirlerine sızan zararlı maddeler.	68
Şekil 4.2 : Aşama 1’de kullanılan kayma demiri çeşitleri.	72
Şekil 4.3 : Demirlerin kirişlere yerleştirilmeden önce hazırlanması.	72
Şekil 4.4 : Yarı hücre potansiyeli testi.	73
Şekil 4.5 : Araştırılan kayma demiri çeşitleri.	74
Şekil 4.6 : Yarı hücre potansiyeli ve lineer polarizasyon direnci deneylerini yapmak için beton dökümden önce dübellere elektrik bağlantıları yapılması. ..	74
Şekil 4.7 : Döküm işleminden önce bağlantıların epoksi ile kapatılması.	75
Şekil 4.8 : Elektrik bağlantılarının demirin yanında yapılması.	75
Şekil 4.9 : Döküm öncesinde bağlantının epoksi ile kaplanması.	76
Şekil 4.10 : Deney düzeneğinde klor göllendirmesi yaparak korozyon hızlandırılması.....	76
Şekil 4.11 : Şekil 4.10’da şematize edilen deney düzeneğinin fotoğrafı.	77
Şekil 4.12 : Çıkarılan WSDOT plakları.	79
Şekil 4.13 : 40 - 43 ° C’deki klorür göllenmesindeki karbon çeliklerinin yarı hücre potansiyelleri.	83
Şekil 4.14 : 4.4 ° C’deki klorür göllenmesindeki karbon çeliklerinin yarı hücre potansiyelleri.	84
Şekil 4.15 : 40 - 43 ° C’deki klorür göllenmesindeki epoksi kaplı çeliklerin yarı hücre potansiyelleri.	84
Şekil 4.16 : 4.4 ° C’deki klorür göllenmesindeki epoksi kaplı çeliklerin yarı hücre potansiyelleri.	85
Şekil 4.17 : 40 - 43 ° C’deki klorür göllenmesindeki delikli paslanmaz çeliklerin yarı hücre potansiyelleri.	85
Şekil 4.18 : 4.4 ° C’deki klorür göllenmesindeki delikli paslanmaz çeliklerin yarı hücre potansiyelleri.	86
Şekil 4.19 : 40 - 43 ° C’deki klorür göllenmesindeki paslanmaz kaplı çeliklerin yarı hücre potansiyelleri.	86
Şekil 4.20 : 4.4 ° C’deki klorür göllenmesindeki paslanmaz kaplı çeliklerin yarı hücre potansiyelleri.	87
Şekil 4.21 : Karbon çeliklerinin ve paslanmaz çeliklerin lineer polarizasyonu.....	89
Şekil 4.22 : Sökülen kayma demirlerinin gözle muayenesi.	90
Şekil 4.23 : Karbon çelikleri boyunca oluşan korozyon.	90
Şekil 4.24 : Epoksi kaplılardaki korozyon.	91
Şekil 4.25 : Delikli paslanmaz çeliklerin testten sonraki görünüşü.	91

Şekil 4.26 : Paslanmaz kaplı çeliklerin testten sonraki görünüşü.....	92
Şekil 4.27 : Farklı tipteki kayma demirlerinin yarı hücre potansiyeli ile ilgili potansiyel değişimi ve akım yoğunluğunu gösteren grafik.	94
Şekil 4.28 : Yarı hücre potansiyelinin detayı.....	94
Şekil 4.29 : Kaplanmamış kayma demirleri için kutuplaşma dirençlerinin ortalama sonuçları.....	97
Şekil 4.30 : Kaplanmamış kayma demirleri için korozyon akım yoğunluğunun ortalama sonuçları.....	97
Şekil 4.31 : Karbon çelikten üretilmiş kayma demiri.	99
Şekil 4.32 : Mikrokompozitten üretilmiş kayma demiri.....	99
Şekil 4.33 : Paslanmaz kaplı çelikten üretilmiş kayma demiri.	99
Şekil 4.34 : Delikli paslanmaz çelikten üretilmiş kayma demiri.	100
Şekil 4.35 : Epoksi kaplı çelikten üretilmiş kayma demiri (mor).....	100
Şekil 4.36 : Epoksi kaplı çelikten üretilmiş kayma demiri (gri).....	100
Şekil 4.37 : Epoksi kaplı çelikten üretilmiş kayma demiri (yeşil).....	101
Şekil 4.38 : Korozyon ürünü epoksi kaplamanın sorunlu alanında yoğunlaşmıştır.	101
Şekil 4.39 : Karbon çeliği numuneleri.	102
Şekil 4.40 : Mikrokompozit çelik numuneleri.....	103
Şekil 4.41 : Delikli paslanmaz çelik numuneleri.	103
Şekil 4.42 : Paslanmaz kaplı çelik numuneleri.....	104
Şekil 4.43 : Gri epoksi kaplamalı numuneler.	104
Şekil 4.44 : Yeşil epoksi kaplamalı numuneler.	105
Şekil 4.45 : Mor epoksi kaplamalı numuneler.....	105
Şekil 4.46 : Yakın zamanda alınmış bir karot numunesinin iç kısmında, epoksi kaplamanın altında korozyon ürünlerini gösteren görüntü.....	107



BETON YOLLARDA KOROZYON

ÖZET

İnsanlar için yer değiştirme her dönemde önemli bir eylem olmuştur. Önceleri sadece yayalar daha sonraları hayvanlarla çekilen basit taşıtlar sadece ulaştırmanın birer ögesiiken günümüzde motorlu ve motorsuz taşıtlar ve bunların sürücöleri ve yayalar karayolu ulaşımının birer ögeleridir.

Her geöen gün gelişmekte olan karayolu ulaştırmacılığında karayolları esnek veya rijit yapılabilmektedir. Esnek kaplamada kullanılan asfaltın hem pahalı oluşu hem sıcaklığa karşı öok duyarlı oluşu hem de öevreye olan zararı betona göre daha fazla olduğundan rijit kaplamalar tercih edilmeye başlamıştır. Özellikle yoğun ve ağır taşıt trafiğinin olduğu noktalarda beton yollar tercih edilir. ABD, Avustralya, Belöika, Fransa, Almanya, Avusturya ve Hindistan gibi ölkeler beton yolların yoğun olarak kullanıldığı ölkelerdir. Bu ölkelerde beton yolların performansının gayet yüksek olduğu gözlenmiştir.

Beton yolların asfalt yollara göre öeşitli üstönlükleri vardır. Özellikle beton yolların daha uzun ömürlü ve ekonomik oluşu beton yolu asfalt yola göre daha cazip kılmaktadır. Trafiğe açılış ve onarım süresinin uzun olması beton yolun dezavantajlarından olup beton yol yapımının ciddi bir altyapı ve ekipman istediğinin göstergesidir.

Beton yollar asfalt yollar gibi dökölemediği için enine ve boyuna derzler bırakılır. Bu derzlere ise yük aktarımı için demir donatı yerleştirilir. Daha sonra derzlere yapılan mühürleme işlemi öok sağlıklı olmalıdır. İşte tam da bu noktada bu öalışmada anlatılan beton yollarda oluşabilecek korozyon devreye girmektedir. Beton yollardaki donatı korozyonu bu derzlerde yer alan donatılarda meydana gelmektedir. Derzlerdeki mühürlemenin zamanla yıpranması veya ilk yapım aşamasında kalitesiz uygulama yapılması bu noktalardaki demirlerin direkt atmosferle temas etmesine neden olur. Bu safhada ise korozyon devreye girer.

Beton yolda incelenen korozyona iklim koşulları, betonun kritik özellikleri ve beton yolun yapıldığı yerin konumunun sebep olduğu gözlenmiştir. Yolun inşa safhasında veya daha sonrasında betonun özelliklerinden dolayı betonda meydana gelebilecek öatlama, kırılma, hidrasyon malzemesi oluşması gibi olumsuzluklar beton yolda korozyon oluşmasında önemli bir etkiye sahiptir.

Korozyona etki eden en önemli sebeplerden biri de iklim özellikleridir. Derzlerdeki demir donatıların direkt olarak atmosferle temas edebilme olasılığı korozyonu etkiler. Soğuk bölgelerde özellikle kar yağışının olduğu ve karla kaplı gün sayısının fazla olduğu yerlerde buz öözöcü olarak kullanılan tuzlar betona etki ederek dolaylı yoldan, derz bölgesindeki donatı demirlerine etki ederek direkt olarak korozyona sebep olabilir. Tuzun bileşenlerine ayrılmasıyla klorür iyonları demire etki ederek korozyon oluşumunu başlatır. Ayrıca kar suyu da korozyon için tehlikeli maddelerden biridir. Sıcak bölgelerde ise nem etkisi korozyona sebep olan önemli

etmenlerden biridir. Gece beton yol yüzeyinde kalan su buharı damlacıkları gündüz yüksek sıcaklık etkisiyle kuruyarak hem betona hem de donatıya zarar verir. Özellikle denize yakın konumda ve sıcak bir bölgede bu olaydan bahsediyorsak yüksek klorür içeren bu su buharı damlacıkları gündüz klor iyonlarını yüzeyde bırakarak donatı korozyonunu oldukça hızlandırır. Konum olarak deniz kenarına yakın yerlere yapılan beton yollarda yağmur etkisi ile ıslanma, dalga etkisi, denizden esen rüzgar ve yoğunlaşma sebebiyle tuz birikimi meydana gelir ve korozyon için oldukça elverişli bir ortam hazırlanmış olur.

Bu çalışmada ayrıca beton yoldaki kayma demiri için ABD’de yapılan bir deney incelenmiştir. Bu deneyde kullanılan çeşitli kayma demirleri için korozyon performansları ölçülmüş ve sonuçlar elde edilmiştir.

Bütün bu sonuçlar değerlendirilerek Türkiye’den yedi farklı coğrafi bölgeden yedi farklı il seçilmiş ve bu illerde beton yol uygulanacak olsa, iklimden ve konumdan yola çıkılarak beton yol yapılmadan önce ne gibi önlemler alınması gerektiği ve beton yol yapılırken ve donatıları seçilirken ne gibi hamlelerde bulunulması gerektiği açıklanmıştır.

CORROSION IN CONCRETE PAVEMENTS

SUMMARY

Relocation for people has always been an important act. Priority is only a matter of transporting simple vehicles transported by animals only after the spring, and nowadays motorized and non-motorized vehicles and their drivers and vehicles are the objects of highway transportation.

Highways can be made flexible or rigid every day in developing road transport. Since the asphalt used in the flexible coating is both expensive and very sensitive to heat and has more damage to the surrounding than concrete, rigid coatings have begun to be preferred. Concrete roads are especially preferred where there are heavy and heavy vehicle traffic. Countries such as USA, Australia, Belgium, France, Germany, Austria and India are countries where concrete roads are used extensively. It has been observed that the performance of concrete roads in these countries is very high.

Concrete roads have various advantages over asphalt roads. In particular, the longer life and economic form of concrete roads make the concrete road more attractive than the asphalt road. The length of the opening and repair time of the traffic is due to the disadvantages of the concrete road and it is a sign that concrete road construction requires serious infrastructure and equipment.

The increased use of concrete roads has led to many problems with it. Some agencies such as municipalities and general directorate of highways have completed sufficient scientific infrastructure work, they have to prepare the road construction specifications and activate serious control mechanisms during implementation. Otherwise, it is inevitable that the concrete roads which are attracting attention with their positive aspects in many scientific platforms will be shorter in life than the asphalt roads.

When a road is planned to be concrete, the issue should be assessed in terms of sustainability and all the conditions should be taken seriously and the precautions should be taken especially for the negligence and abuse that may be caused by them.

Many of the factors that negatively affect the service life of concrete roads are interrelated. The emergence of a negative factor can bring along other negative factors. For example, due to heavy vehicle loads, breakage can occur in the road cover, resulting in increased permeability, road-based and floor deformation, which can lead to increased cracking in the cover.

Factors causing damages in concrete roads can be explained as vehicle loads and traffic, errors in concrete design and applications, freezing-thawing and salting studies, chemical degradation and other factors.

Corrosion occurs as an important resistance problem in reinforced concrete structures. Major economic losses also occur due to corrosion. For these reasons it is necessary to take measures against corrosion.

Direct contact with concrete grounds and atmosphere, heavy vehicle loads and any leaks that may occur in the joints contribute indirectly and directly to corrosion. Concrete roads must therefore be protected against corrosion. Since the average lifespan of concrete roads is 50 years, corrosion in concrete roads is usually neglected, but with measures taken against corrosion in concrete roads, we can extend service life and save the economy.

Concrete mix designed for road coating should be done considering the adverse factors that the road may be exposed to. Especially breaks, erosions, permeability, deterioration due to freeze-thawing and salting studies, and consequent deterioration caused by chemical reactions can be avoided in a great way with the right mix design.

The purpose of this study is; corrosion mechanism and construction of concrete roads, concrete properties and corrosion mechanism, and how corrosion in concrete roads can occur and what precautions can be taken against concrete and fixtures.

Concrete roads are not paved like asphalt roads, therefore, transverse and longitudinal joints are left. These joints are placed in reinforcement for load transfer. Afterwards, the sealing process to the joints should be very healthy. At this point, there is corrosion that can occur in the concrete roads described in this study. Reinforcement corrosion in the concrete roads occurs in the joints in these joints. If the seals in the joints are worn over time or poorly applied during the first construction phase, the bar in these points will cause direct contact with the atmosphere. In this phase, corrosion occurs.

The corrosion on the concrete road was observed to be caused by the climatic conditions, the critical properties of the concrete and the location of the place where the concrete road was made. Cracks in the concrete due to the properties of concrete during the construction phase or afterwards, and the formation of hydration material which can lead to the formation, have an important effect on corrosion of the concrete road.

One of the most important causes of corrosion is climate. The possibility that the bar fittings in the joints can directly contact with the atmosphere affects the corrosion. In cold regions, especially where there is snowfall and the number of snow-covered days is high, salts used as defrosters can act directly on the reinforcing bars in the joint area, acting indirectly on the concrete, causing corrosion. By separating into salt components, chloride ions act as a demure to initiate corrosion formation. With water frost, the volume is increased by about 10%. In the case of freeze-thawing, this can lead to cracks in the concrete, which in turn cause damage to the reinforced concrete bars and cause corrosion. A similar situation is the salting work done to prevent the icing on the roads during the winter months. It becomes molten with salt snow waters and seeps into the concrete, but when the weather is hot, this water evaporates, but the salt is transformed into a crystal, causing internal pressure in the concrete and causing cracks and cracks in the concrete. The aggressive materials that leak from these cavities and cracks are the biggest cause of corrosion.

In addition, snow water is one of the dangerous substances for corrosion. Moisture effect in hot areas is one of the important factors causing corrosion.

The water remaining on the concrete road surface at night damages both concrete and reinforcement by drying the vapor droplets with high temperature effect during daytime. Especially if we are talking about the sea in close proximity to the sea and in a hot zone, this water with high chlorides will accelerate the corrosion of the revetment by leaving the chlorine ions on the surface at daytime. As a result of the wetness effect, the wave effect, the wind blowing from the sea and the condensation, the salt accumulation occurs on the concrete roads made near places near the seaside and a suitable environment for corrosion is prepared.

There is also a chemical reaction in concrete roads called carbonation over time. This reaction is especially effective in concrete roads where the rate of carbon dioxide is high in the open air. The carbon dioxide in the environment transforms into calcium carbonate by entering into the cavities of the concrete. This conversion plays an important role in the rusting of reinforcement or steel fibers in the concrete as it reduces the pH value of the concrete. Carbonation proceeds from the surface of the concrete that comes into contact with the air. At the same time, it increases the impermeability of the concrete. Theoretically, with the increase of the impermeability, there is no expectation of a decrease in the strength of the concrete over time, whereas the reinforcement which is given for the high energy holding of the concrete tends to rust with the reason of carbonation. The service life of the construction is shortened due to the decrease in the amount of energy absorption of the concrete with the corrosion result.

This study also examined a test made in the USA for concrete dowels. Corrosion performances for various dowels used in this experiment were measured and results were obtained.

Seven different provinces were selected from seven different geographical regions in Turkey and all these results were evaluated and it is explained what kind of precautions should be taken before the concrete road is made by climbing from the climate and from the location and if the concrete road is to be applied to these roads and what kind of movements should be made while making the concrete road and choosing the equipment.



1. GİRİŞ

Karayolu ve havaalanı üst yapıları bağlayıcı maddelerin farklılıklarına göre esnek ve rijit olmak üzere iki çeşittir. Esnek üstyapıların bağlayıcı maddesi asfalt, rijit üstyapıların ki ise çimentodur. Esnek ve rijit üstyapıların beraber kullanıldığı üstyapılar ise kompozit olarak adlandırılmaktadır.

Dünyada oldukça yaygın olarak kullanılan rijit üstyapı yani beton yol ilk olarak ABD'nin Ohio eyaletinde uygulanmıştır. Avrupa'da da oldukça yoğun kullanılan beton yolların ömrü asfalt yollara göre oldukça yüksektir. Bir asfalt yol ömrü ortalama 15-20 yıl iken beton yolda bu 50 yıla kadar çıkmaktadır.

Ülkemizin petrol bakımından dış kaynaklara bağımlı olması çimento açısından ise yüzde yüz yerli kaynaklara sahip olması beton yol uygulanabilirliğini artırmaktadır. KGM'nin son yıllarda bu konu üzerinde çalışması umut verici bir gelişmedir.

Korozyon betonarme yapılarda önemli bir dayanım sorunu olarak karşımıza çıkmaktadır. Korozyondan dolayı büyük ekonomik kayıplar da ortaya çıkmaktadır. Bu sebeplerden korozyona karşı önlem almak gereklidir.

Beton yollarda direkt zeminle temas, atmosferle direkt temas, ağır taşıt yükleri ve derzlerde meydana gelebilecek her türlü sızıntılar korozyona dolaylı ve direkt katkı sağlar. Beton yollarda bu yüzden korozyona karşı önlemler alınmalıdır. Beton yolların ortalama ömrü 50 yıl olarak görüldüğünden beton yollardaki korozyon genellikle ihmal edilmiştir ancak beton yollarda korozyona karşı alınan önlemlerle hem servis ömrünü uzatabilir hem de ekonomiden tasarruf sağlayabiliriz.

Bu çalışmanın amacı; korozyon mekanizmasını ve beton yolların yapımını, beton özelliklerini ve korozyon mekanizmasını inceleyip beton yollardaki korozyonun nasıl meydana gelebileceği ve buna karşı betonda ve donatılarda ne gibi önlemler alınabileceğinin irdelenmesidir.

Bu çalışmada ilk bölümde beton yollar kısaca anlatılmış, beton yol ile asfalt yol karşılaştırılmıştır. Beton yolun yapım aşamalarından bahsedilmiş, kısaca beton yol tipleri hakkında bilgi verilmiştir.

İlk bölümün devamında ise betonun kritik özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra korozyon mekanizmasından, korozyon çeşitlerinden ve korozyona neden olan sebeplerden bahsedilmiştir. Özellikle beton yola özgü olarak kar ve buz çözücü tuzların zararlarından da bahsedilmiştir.

Daha sonra ABD’de bağlantı demiri çeşitlerinin korozyon dirençlerini ölçen bir deneyden bahsedilmiş ve bu deney sonuçları ile iklim şartları göz önüne alınarak Türkiye’deki yedi coğrafi bölgeden birer il seçilmiş ve bu illerde beton yol yapımında nelere dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Sonuç bölümünde ise korozyon ihtimalleri göz önünde bulundurularak beton yol yapımın hangi aşamalarında ne gibi müdahalelerde bulunulması gerektiği ve beton yol yapımı sonrası iklimsel olarak çevresel etmenlerin korozyona olan etkilerine nasıl müdahalede bulunmamız gerektiği açıklanmıştır.

2. BETON YOL

2.1 Beton Yol Nedir?

Çimento betonu ile yapılan kaplamalara “Beton Yollar” denir. Yol kaplaması olarak betonun görevi, trafikten gelen şiddetli tekil yükleri tabana iletme ve bu sırada tabanın deforme olmamasını sağlamaktır. Bu durum, betonun rijitliğinden yararlanmak sonucunu doğurur. Beton çekme direnci düşük olan bir yapı malzemesidir. Betonda deformasyonlar ile gerilmeler arasındaki bağıntı lineer değildir. Ayrıca, yükler kalktıktan sonra bir süre, betonda kalıcı deformasyonlar görülür. Daha sonra beton yavaş yavaş ilk duruma döner. Bir tekerlek yükü bir beton plak üzerinden geçerken çekme, basınç ve eğilme gerilmeleri oluşur. Tekerlek geçtikten sonra gerilmeler yön değiştirerek kaybolur. Özellikle yoğun kamyon trafiği taşıyan bir beton yolda bu gerilme değişimleri kısa zaman aralıkları ile sürekli olarak kendini gösterir. Bu durumda, beton plakta çekme ile basınç arasında değişen sürekli gerilmeler oluşur, bu da zamanla malzemenin yorulmasına neden olur. O halde bu tip gerilmelerin, betonun sürekli direncinin çok altında bulunması gerekir. Diğer malzemeler gibi beton da sıcaklığın artmasına veya azalmasına bağlı olarak genişlemekte veya büzülmeaktadır. Buna ek olarak kaplamaların alt ve üst yüzeyleri günlük ve mevsimlik sıcaklık ve nemlilik farkları nedeniyle eğilme ve bükülmelere uğrar.

Bir beton kaplamanın davranışı, dökülen beton tabaklarının özelliklerinin yanı sıra, kaplama altına serilen alt temel ve temel tabakaları ile mevcut taban toprağının özelliklerine bağlı olarak değişir. Bu nedenle, projelendirme sırasında, beton kaplamanın davranışı etkileyen, taban toprağı, temel malzemesi, betonu oluşturan kum, çakıl, çimento ve betonarme demiri gibi malzemelerin fiziksel özelliklerinin çok iyi incelenmesi gerekmektedir [1].

Yol kaplama betonundan yüksek beklentiler ve gereksinimler söz konusudur. Beton kaplama, gittikçe artan trafiğin statik ve dinamik yüklerinin yanı sıra hava ve çevre şartlarına, don ve buz çözücü tuz etkilerine, kaplamada sürekli değişen sıcaklık ve nem etkilerine karşı, dayanıklılık ve sağlamlık göstermek zorundadır [2].

Taze betonda;

- Homojenlik
- İyi işlenebilirlik
- Yeterli işlenebilirlik süresi

- Kayar kalıp finişerin kullanımı nedeniyle yaş halde betonun şeklini koruması sağlanmalıdır [2].

Sertleşmiş beton ve bitmiş kaplamalarda;

- Basınç dayanımı
- Eğilme dayanımı
- Yarma dayanımı
- Aşınma dayanımı
- Don dayanımı
- Uygun yüzey özellikleri (düzgünsüzlük, lastik- yol gürültüsü, kayma direnci, yüzey suyu drenajı) sağlanmalıdır [2].

2.2 Beton Yolda Oluşan Gerilmeler

Beton kaplamalar nispeten geniş ve ince beton plaklardan imal edilirler. Betonun mekanik karakteristiklerine (basınç, eğilmede çekme, yorulma, vb. mukavemetlerine) göre dizayn edilen beton kaplamalar, trafik ve çevre etkilerinden oluşan gerilmelere geniş ve ince plaklarla karşı koyarlar. Bu gerilmeler;

- Taşıt yükleri
- Periyodik ısı değişimleri (burulma-kıvrılma, büzülme, genleşme, vb.)
- Plak ile temel arasındaki yatay sürtünme
- Plaklar arasındaki düşey sürtünme ve yük transferi

gibi sebeplerden ötürü farklı şiddetlerde oluşmaktadır. Bu nedenle, beton kaplama kalınlıklarının dizaynı için;

- Trafik (dingil yükü ve tekerrür sayısı)
- Zemin taşıma gücü
- İklim
- Betonun mekanik özellikleri

göz önüne alınmalıdır.

Teker yüklerinden ötürü beton plaklarda hem basınç hem de çekme gerilmeleri bir arada oluşmaktadır. Fakat betonun yüksek basınç mukavemetine sahip olması nedeniyle betonun eğilme-çekme gerilmesi esas alınarak geliştirilen dizayn metotları ile beton kaplama kalınlığı saptanmaktadır.

2.3 Beton Yol Yapım Aşamaları

2.3.1 Yol tabanı ve temel hazırlığı

Bir temel yapılırken şu noktalara dikkat edilmelidir.

- Bütün yüzey suları drene edilmelidir;
- Yol tabanının sıkıştırması iyi olmalıdır;
- Trafikten dolayı oluşacak tekerlek izleri için dolgu ve sıkıştırma yapılmalıdır;
- Yol tabanını kum tabakası ile düzleştirmek yasaktır. Eğer düzeltme yapılacaksa granül bir malzeme kullanılmalıdır;
- Yatay destekler (eğimli çakılan kazıklar veya ek demir donatı) yol tabanı genişliğinin artmasını sağlar.

2.3.2 Betonun karışımı ve taşınması

Beton karıştırma tesisleri beton kaplama makinelerine yeterli miktarda beton sağlayacak kapasitede olmalıdır. Karışım bileşenleri ve katkı maddeleri doğru oranda kullanılmalıdır.

Kaplama makinelerine beton sağlamak için yeterli miktarda kamyon bulunmalıdır. (Şekil 2.1) Kamyon sayısı inşaat sahasındaki beton hacmine, kamyonların yük kapasitesine ve devir süresine (taşıma artı kamyonun yüklenme ve boşaltılması için gereken süre) bağlıdır.

Genellikle şartnameler, diğer betonlara nispeten beton yollarda kullanılan betonun daha kuru bir karışım olmasından dolayı transmikserlerde taşınması ve boşaltılması zor olduğu için damperli kamyonlarla taşınmasını söyler. Kent içi küçük işlerde transmikserler kullanılabilir (Şekil 2.2).



Şekil 2.1 : Kamyonla taşınan beton ile yol yapımı [3].



Şekil 2.2 : Transmikser ile taşınan beton ile yol yapımı [3].

2.3.3 Betonun yerleştirilmesi

Genelde beton kayar kalıp beton finişerleri ile yerleştirilir fakat karmaşık geometrili ve farklı kalınlıklardaki kaplamalar için sabit kalıp kullanılır. Özellikle kavşaklarda sabit kalıp kullanmak daha avantajlıdır. Sabit kalıbın ekipmanları kayar kalıba göre daha ucuzdur. Sabit kalıplar, kayar kalıpların kullanılmadığı yerlerde tercih edilmelidir.

Sabit kalıp kullanımında, uygun kalıplar ile yolun yatay ve dikey pozisyonu ve beton yüzeyinin düzgünlüğü sağlanmalıdır [2].

Beton yol kaplamaları için çelik veya betondan (örneğin, daha önceden dökülen şeritlerin kenarları) yapılmış kalıplar kullanılmalıdır. Zemin, imalat için gerekli olan büyük serme ekipmanlarının ve beton taşıyan kamyonların yükleri nedeniyle gerekli taşıma gücüne sahip olmalıdır [2].

Sabit kalıplar sıkıca sabitlenmeli ve hareket etmeyecek şekilde yeteri kadar desteklenmelidir. Bu durum sabit kalıpların altına çimento harcı kullanımı ile sağlanabilir. Herhangi bir kalıbın sabitlenmesinde ahşap kullanılabilir. Yanal kuvvetlerin etkilerini dikkate alarak sabit kalıplar yere bir çivi ile sabitlenmelidir [2].

Kalıpların kurulumu, sökümü, temizlenmesi ve taşınması son derece emek isteyen bir çalışmadır. Sabit kalıplar betonun artık şekil değiştirmeyeceğinden emin olduğu zaman ancak çıkartılabilir [2]. Şekil 2.3’de sabit kalıp kullanımına örnek bir uygulama gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Sabit kalıp kullanımı [3].

Kayar kalıp ilerlediğinde, sıkıştırılmış betonun şekli, özellikle kenarların dikliği korunabilmelidir. Finişerlerin hareket ettiği alanlar, yeterince sağlam, düzgün ve uygun yükseklikte hazırlanmalıdır [2].

Kayar kalıplı beton finişerleri (Şekil 2.4), kılavuz tel hatlarına ya da hassas konumlandırma sistemlerine göre, yönlendirme, yan ve kot kontrolü yapmalıdır [2].

Kaplamanın birbirine bitişik şeritler halindeki üretiminde makinelerin hareket alanları veya ray döşenmesi için, halihazırda katılaşmış beton alanları da kullanılacaksa, beton bu yükleri kaldırabilecek dayanıma ulaşmış olmalıdır [2].



Şekil 2.4 : Kayar kalıplı beton finişeri [3].

2.3.4 Derz uygulaması

2.3.4.1 Enine derzler

Büzülme derzi

Betonun büzülmesi ile oluşacak tehlikeli çatlakları önlemek için büzülme derzinin (Şekil 2.5) altında kontrollü çatlak oluşturulur. Derzler kayma demirinin üzerinden kesilir.

Genleşme derzi

Genleşme derzleri (Şekil 2.6) daha sonraları zorluk çekmemek için baştan önlem alınması gereken durumlarda nadir olarak kullanılır.



Şekil 2.5 : Enine b z lme derzi.



Şekil 2.6 : Enine genleşme derzi [3].

 n aat derzi

  e ara verme, örneğin gün sonunda    bitimi gibi durumlarda, kayma demirleri ile sabitlenmiş enine derzler yapılmalıdır ( ekil 2.7). Gün sonu derzleri özenle hazırlanmalıdır. Bu süreçte dik bir  n yüzeye ve kayma demirlerinin hatasız konumuna dikkat edilmelidir. Gün sonu derz bölgesinde betonun diğer bölgeleri ile aynı kaliteyi göstermesi gerekmektedir.

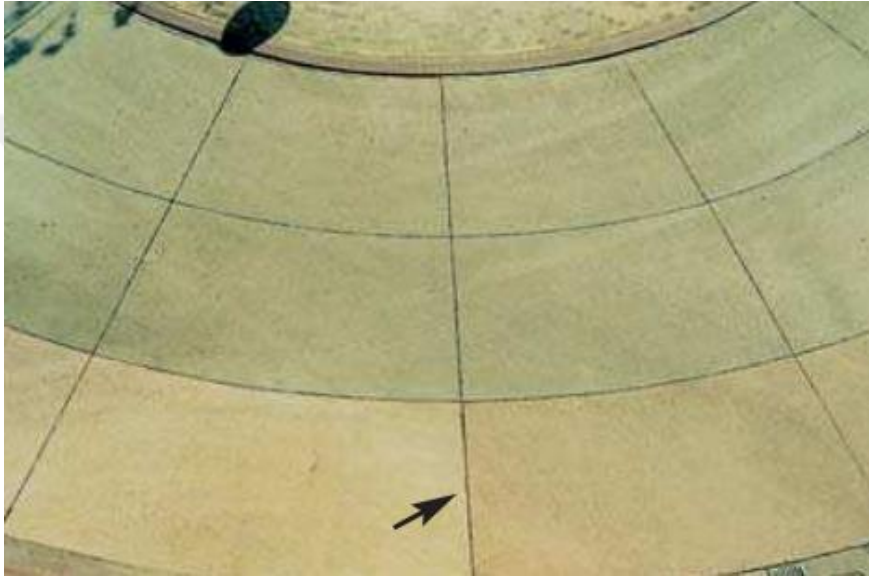
2.3.4.2 Boyuna derzler

Büzölme derzi

Boyuna derz de enine derzler gibi, derz planına göre bağlantı demirinin üzerinde kesilmelidir. Şekil 2.8’de boyuna büzölme derzi gösterilmiştir.

İnşaat derzi

Bu derzler iki bitişik beton şeridinin arasında oluşturulan derzlerdir. Şekil 2.9’da bu derzin örneği gösterilmiştir.



Şekil 2.7 : İnşaat derzi [3].



Şekil 2.8 : Boyuna büzölme derzi [3].



Şekil 2.9 : Boyuna inşaat derzi [3].

2.3.5 Kayma ve bağlantı demirleri yerleştirilmesi

2.3.5.1 Kayma demirleri yerleştirilmesi

Plakalar arasında yük aktarımını geliştiren ve faylanmayı önleyen çelik çubuklardır. Demirler projesine uygun boyutlarda ve en az 25 mm çapında (ağır trafik yüklerine maruz kalacak üstyapılarda en düşük kayma demiri çapı 30 mm'dir), 500 mm uzunluğunda olmalıdır. Kayma demiri aralıkları genellikle 25 cm'dir. Emniyet şeritlerinde bu mesafe 2 katına çıkarılabilir. Boyuna derzlerden ve plaka kenarından kayma demiri mesafesi 25 cm olmalıdır.

Kayma demirleri plaka kalınlığının ortasına ve beton kaplamanın eğimine göre monte edilmelidir. Yol ve yol yüzeyi eksenine paralel olmalıdır.

Demirlerin korozyona karşı korunmasında ulusal standart ve hükümlere uygun gerekli tedbirler alınacaktır. Paslanmayı engellemek ya da geciktirmek amacıyla çelik demirler 0,2 ile 0,4 mm kalınlığında epoksi ile tamamiyle kaplanmalıdır.

2.3.5.2 Bağlantı demirleri yerleştirilmesi

Bağlantı demirleri (nervürlü demirler) boyuna derzler boyunca, plakaların birbirinden ayrılmasını önlemek amacıyla yerleştirilmektedir. Bağ demirleri döşemelerin faylanmasını ve yatay hareketini engellemekte, döşemeler arasında yük

aktarımına yardımcı olmaktadır. Bağ demirleri ayrıca bordür ve oluk gibi tamamlayıcı kenar elemanların kaplamaya bağlanmasında da kullanılmaktadır.

Kayma demirlerinde olduğu gibi, bağlantı demirlerinin tümü de korozyon koruması için, sadece orta kısımda 200 mm uzunluğunda, 0,2-0,4 mm kalınlığında epoksi ile kaplanmış olmalıdır.

Bağlantı demirleri, kaplama kalınlığının alttan 1/3'lik kısmına yerleştirilir ve kaplama alt yüzeyinin en az 5 cm üzerinde olmalıdır.

2.3.6 Beton elik çubukları

atlamaları kontrol etmek ve taşıma kapasitesini artırmak amacıyla kullanılır. Sürekli donatılı beton kaplamalarda, donatı sürekliliği, ulusal standartlar ve kullanım yerindeki hükümlere göre; bağlantı araçları, bindirme, kaynak ile yapılabilir.

2.3.7 Yüzey bakımı

Betonun yerleştirilmesi ve bitirilmesinden sonra uygulanan yüzey işlemleri, döşeme yüzeyinin pürüzsüzlüğü üzerinde olumsuz etkileri olmaksızın, kızak etkisi ve tekerlek gürültüsü ile ilgili uygun değer özellikleri vermeyi amaçlamaktadır.

2.3.7.1 elik fırçalama

Yüzey perdahlanmasından sonra ve bakım maddesinin uygulamasından önce beton üst yüzeyi en az 45 cm genişliğindeki bir elik fırça (tırmık) ile enine dokulandırılır [2]. Pürüzlendirme işlemleri dokulandırma araçları ile de yapılabilir.

2.3.7.2 Görünür agregalı yüzey elde edilmesi

Bu teknik, beton tamamlandıktan hemen sonra beton yüzeyine priz geciktirici katkı maddesinin püskürtülmesi işleminden oluşur. Yüzey geciktiricisinin görevi, betonun tanımlanmış bir derinliğe kadar ve üst kenar bölgesi içinde priz almayı bir süre geciktirmeyi sağlamaktır. Bu şekilde bir süre sonra yüzey harcının temizlenerek alınması sağlanmaktadır. Yüzey harcı temizlenip alındıktan sonra görünür agregalı yüzey elde edilir.

2.3.7.3 Desen baskılı beton

Desenli baskılı beton, yeni dökülen betonun yüzeyine bir kaldırım deseninin damgalanması yöntemidir. Bu yüzey işlemi özellikle kentsel alanlarda özel uygulamalar için tasarlanmıştır.

2.3.8 Betonun korunması

2.3.8.1 Kurumaya karşı koruma

Sertleşmiş beton kalitesi ve özellikle yüzeyin dayanıklılığı, taze betonun kurumaya karşı korunmasına doğrudan bağlıdır. Bunun için yüzey su kürü ile sulanmalıdır.

Su kürü ile beton yüzeyinin çok hızlı soğumasını önlemek amacıyla, püskürtme ile ince bir film tabaka halinde uygulama gereklidir.

2.3.8.2 Yağmura karşı koruma

Yağmur yağarsa beton döküm işlemi durdurulmalıdır. Ayrıca beton yüzeyin yağmurda ıslanmasını önlemek için plastik örtü veya su tutucu örtü kullanılması gerekir.

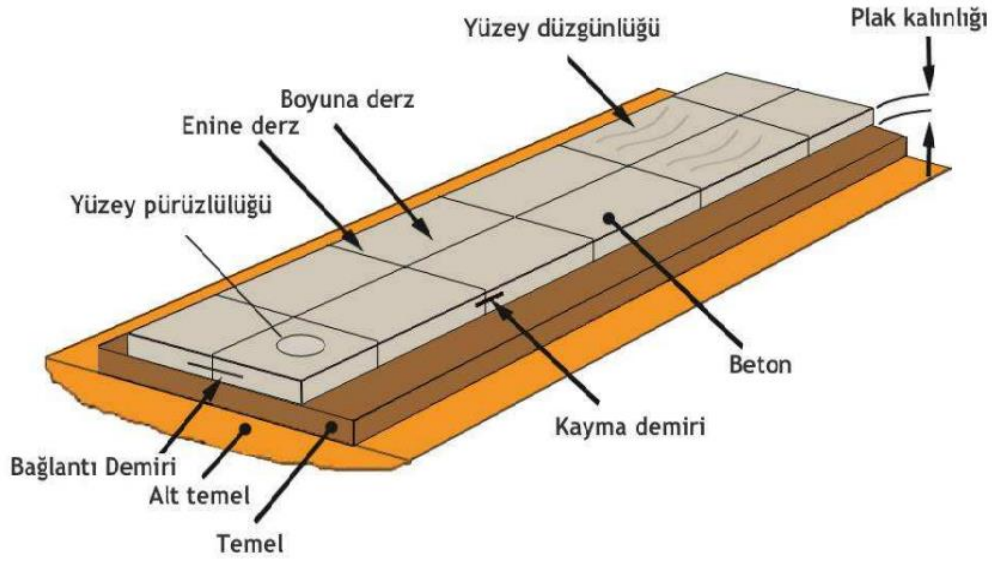
2.3.8.3 Dona karşı koruma

Beton soğuk havada döküldüğünde, kaplama yüzeyi donmadan, beton yüzeyindeki sıcaklığın yerleştirildikten sonra 72 saat boyunca +1°C'nin altına düşmeyecek şekilde etkili bir şekilde korunması gerekir.

2.3.8.4 Mekanik etkilere karşı koruma (işaretleme)

Taze betonun, her türlü mekanik etkiden (otomobil, bisiklet, yaya, hayvan, vb.) kaynaklanan hasarlardan korunması için gerekli önlemler alınmalıdır.

Şekil 2.10'da tamamlanmış bir beton yolun elemanları gösterilmiştir.



Şekil 2.10 : Tamamlanmış bir beton yol.

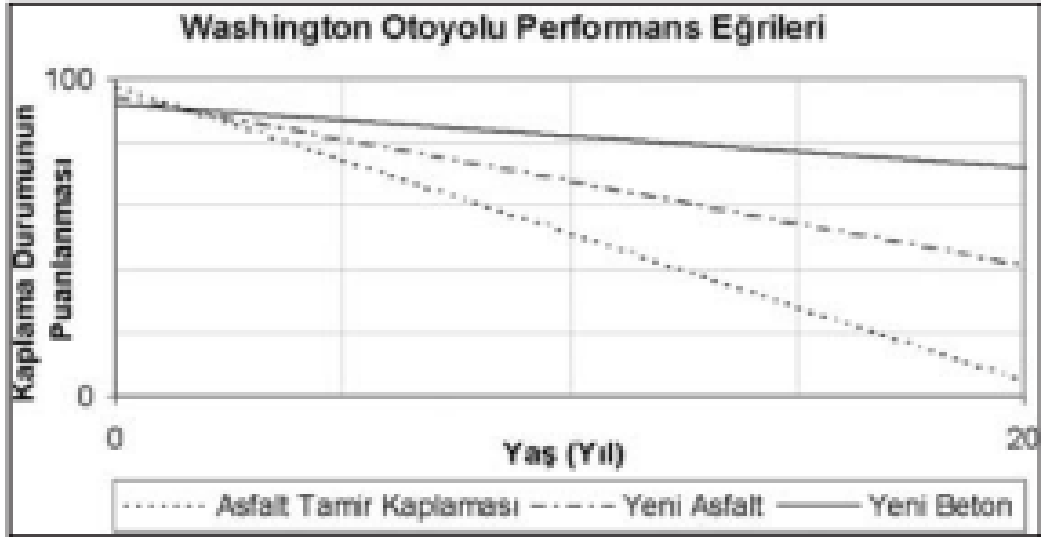
2.4 Beton Yol – Asfalt Yol Karşılaştırması

Bir mühendislik yapısında kullanılabilecek malzeme arasında seçim yapmak gerektiğinde bir dizi teknik ve ekonomik faktör dikkate alınır. Son yıllarda çevre faktörü de önem kazanmıştır. Yapı türüne bağlı olarak bunlara estetik faktörü de ilave edilebilir. Teknik faktörler malzemenin servis ve çevre koşulları ile ilgili fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri, yapım kolaylığı ve süresi, dayanıklılığı ile kullanıcı güveni ve konforu gibi hususları içerir. Ekonomik faktörler arasında ilk maliyet ve yaşam döngüsü maliyeti yer alır. Burada sosyo-ekonomik faktörlerin ve ülke ekonomisine etkilerin de düşünülmesi gerekir. Burada karayolu üst yapı kaplamalarında en çok kullanılan iki malzeme: asfalt betonu (asfalt) ile çimento betonu (beton) karşılaştırılacak ve beton yolun asfalt yola göre üstünlüklerinden bahsedilecektir [4].

• Beton yolların yapısal ömrü fazladır

Kaplamanın ömrü süresince verdiği hizmetin kalitesinin karşılaştırılması bakımından bir puanlama ile yolların yıllara göre “bozunma hızı”dır. Buna göre asfalt yol % 80 performansa yaklaşık 7 yılda inerken, beton yol aynı performans düzeyine yaklaşık 13 yılda inmektedir. Diğer bir ilgi çekici sonuç ise, asfalt tamir kaplamasının “bozunma hızı”nın yeni asfaltın da çok üzerinde olduğu, tamir kaplamasının ömrünün 7 yılda % 70’e indiği ve 20 yılda tamamen ortadan kalktığıdır [5].

Şekil 2.11’de asfalt tamirinin, yeni asfaltın ve yeni betonun puanlaması gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : Washington otoyolu performans eğrileri [5].

- **Beton yollar ekonomiktir**

Beton yolun esnek üst yapıya göre ilk yapım maliyeti, bilinenin tersine sadece çok sağlam bir zeminde ve çok düşük trafik hacimleri birlikte olduğu bir koşulda yüksek olduğu ortaya çıkıyor. Bakım ve onarım maliyetleri düşünülmeden ortaya çıkan bu sonuca göre şu söylenebilir. Sırf ekonominin düşünüldüğü durumlarda bile yapılacak yolun koşullarından bağımsız olarak beton yolun tercih edilmesi gerekir. Hele ki ülkemizde yollarda %40 ağır taşıt trafiği olduğu da düşünülürse, beton yolun hem ekonomik olduğu hem de bir zorunluluk olduğu açıktır.

Son yıllarda, bu konu ile ilgili çeşitli Hayat Döngüsü Maliyet Değerlendirmesi çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğu beton ve asfalt yollar arasındaki maliyet farkları ile ilgilidir.

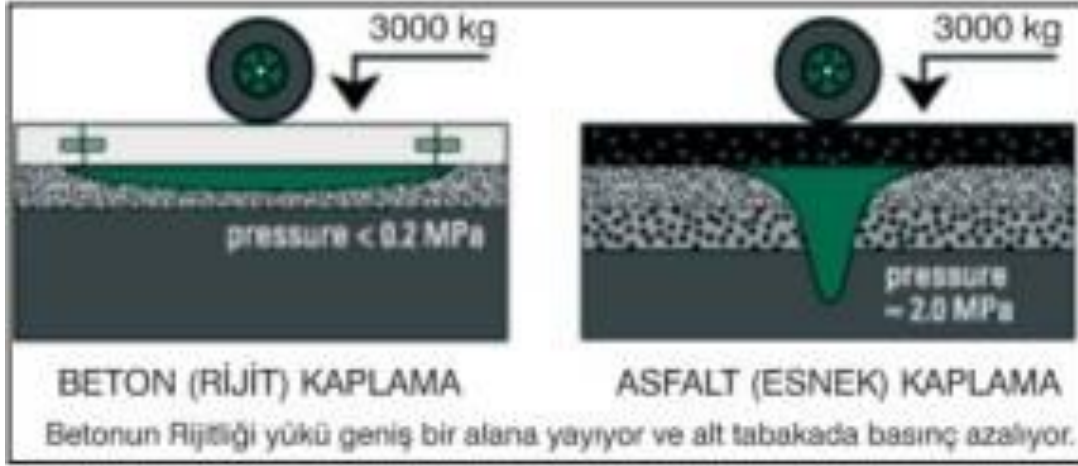
Örneğin son yapılan bir araştırma sonucunda, derzli beton yollarda, asfalt kaplamalı yollara göre, yapım ve bakım göz önüne alınarak, % 13'den % 28'e kadar bir maliyet düşüklüğü bulunmuştur. Sürekli betonarme yollarda ise asfalta göre hiçbir maliyet farkı yoktur. Bu çalışmada gerçek ve historik yapım ve bakım verileri kullanılmıştır [5].

- **Beton yollar dayanıklıdır**

Beton kaplama rijittir. Elastik bir zemine oturan kiriş gibi çalışır ve üzerine gelen yükleri çok daha geniş bir alana yayarak taban zeminine iletir. Beton yolun taşıma gücü taban zeminine bağlı değildir. Bu nedenle rijit üst yapı olan beton kaplama zayıf taban zeminleri üstünde esnek üstyapılara kıyasla daha iyi sonuçlar vermektedir. Asfalt kaplamalar ise, üzerlerine gelen yükleri bir alt tabakaya yayarak iletirler (Şekil 2.12). Kaplamadan temele, temelden alt temele ve nihayet alt temelden taban zeminine iletilen yükler, her bir tabaka geçişinde gittikçe yayılmakta ve daha geniş bir alana dağılmaktadır. Dolayısıyla her bir tabakada

kullanılan malzemenin mekanik özellikleri de, tabakalardan aşağı inildikçe azalan gerilme değerlerine paralellik gösterir. Taban zemini zayıfsa ve çeşitli gerilmeler altında deforme oluyorsa, asfalt kaplama da bu deforme olan bu profili izlemekte ve sonuçta yolun en üst düzeyinde çeşitli oturmalar ve ondülasyonlar gözlenmektedir.

Bunun sonucu olarak ağır trafik altındaki yollarda, beton yol uygulaması, dayanıklılığı sebebiyle çok daha iyi ve uygun olmaktadır [5].



Şekil 2.12 : Kaplamaların yükü iletme çeşitleri [5].

- **Beton yollar daha kısa durma mesafesi sağlar**

Beton kaplamaların kayma sürtünme katsayıları yüksektir. Kaymaya karşı direnci fazladır. Güven vericidir. Boyuna sürtünme katsayısı 0,70; enine sürtünme katsayısı 0,65 civarındadır. Ayrıca, ıslak oldukları zaman, sürtünme katsayısının küçülmesi diğer plastik bağlayıcılarla yapılan kaplamalara göre daha azdır. Yol yüzeyi düz olduğundan yağış suları kolay akar ve yüzey çabuk kurur [1].

Kullanıcı için de kişisel güvenliği düşünülürse, beton kaplamanın rijit yapısı önem kazanır. Asfaltta oluşan tümsekler ve çukurlar yağışlı havalarda ekstra su tutar. Bu da su kızağı etkisi için büyük bir potansiyel oluşturur. Ayrıca bu biriken sular soğuk havalarda don yapabilirler [5].

- **Beton yol akaryakıt tasarrufu sağlar**

Ağır araçlar esnek kaplamalarda rijit kaplamalara göre daha fazla deformasyona neden olurlar. Kaplamadaki bu deformasyon, taşıt enerjisinin bir kısmını emer. Ve şöyle bir hipotez ortaya çıkar: Esnek kaplamalarda sürüş için daha fazla enerjiye, bu nedenle daha fazla yakıt tüketimine ihtiyaç vardır [5].

- **Beton yollar gece görüşünü kolaylaştırır**

Beton doğal olarak açık renklidir ve araçlardan veya sokak lambalarından gelen ışıkları, koyu asfalt kaplamalara göre daha az emerler. Böylece gece görüşü artar. Islak olduğu zaman bile tehlikeli far ışığı yansımalarına sebep olmaz. Bu olay trafik güvenliği açısından çok önemlidir. Şerit çizgileri gerektirmez [1].

- **Beton yolun hammaddesi %100 yerlidir**

Betonda kullanılan çimentonun hammaddesi tamamen yerlidir. Ayrıca çimento fabrikaları üretimlerini %100'e yaklaşan oranlarda yerli kaynaklarla gerçekleştirebilmektedirler.

Petrol üreten veya petrol gereksinimlerinde herhangi bir sorunları bulunmayan ülkelerde asfalt kaplamalı yollar ekonomik olmakta buna karşılık çimento üretimi yönünden ileri düzeyde bulunan ülkelerde, beton yol yapımının daha rantabl olduğu görülmektedir [6].

- **Beton yol her mevsimde her türlü koşulda uygulanabilir**

Türkiye'nin birçok bölgesinde beton dökümü için inşaat mevsimi daha uzun sürelidir. Asfaltın aksine ıslak zeminde de döküm yapılabilir. Asfalt kaplamalarda taban zeminindeki nem oranının en çok %2 olması istenir. Bunun üzerindeki bir değerde nem oranına sahip taban zeminlerinde, asfalt uygulaması son derece sakıncalı olup bu durum, üst yapının özellikle de kaplama ömrünü büyük ölçüde azaltır. Beton yollarda ise böyle bir sorun bulunmamakta ve hatta iyi bir kenetlenme için taban zemininde nemlilik, hatta ıslaklık aranmaktadır [6].

- **Beton yol çevrecidir**

Beton yollar daha az bakıma ihtiyaç duyacağından bakım nedeniyle oluşacak trafik sıkışıklıklarından doğan akaryakıt sarfiyatını azaltacaktır.

Asfalt kaplamaların yapım ve uygulama aşamalarında, ısıtma ve kurutma işlemlerinin bulunması nedeniyle çevre kirliliğine yol açmaktadır.

Bir alt temel, temel ve asfalt kaplamadan oluşan esnek üst yapının toplam kalınlığı, beton plak ve altında kumlu yastık tabakasından oluşan rijit üst yapının toplam kalınlığına kıyasla çok daha fazladır. Bütün tabakalarda ana malzeme, agregadan oluşmaktadır. Bu nedenle sonuçta eşdeğer niteliklere sahip olsalar dahi, esnek üst yapı için gereken agregat miktarı rijit üst yapıya göre çok daha fazla olmaktadır.

Agrega kalitesi yönünden asfalt kaplamalar için çok kaliteli agreganın kullanılması zorunludur. Buna karşılık beton yollar daha düşük kalitede agreganın kullanımına olanak vermektedir. Kullanılan malzeme miktarı ne kadar fazlaysa çevreye verilen zarar o kadar çok olmaktadır [6].

- **Beton yolun yatırım maliyeti daha düşüktür**

Beton üretimi asfalt üretimine göre daha ucuz santrallerde (plantlerde) yapılabilir. Asfalt kaplamalar beton yollara kıyasla daha fazla enerji harcanması sonunda yapılır. Enerji sorununun bulunduğu yerlerde beton yol uygulanması daha uygundur. Ayrıca yapım ilerleme hızları yönünden asfalt kaplamalarda bu husus, plant kapasitesine, plant ile döküm yeri arasındaki uzaklığa, döküm ve sıkıştırmadaki çabukluğa bağlıdır. Beton yolda aynı husus, transmikserlerin kapasitesine ve sayısına, imalat yeri ile döküm yeri arasındaki uzaklığa, döküm sırasındaki vibrasyon ve perdahlama işlerinin çabukluğuna bağlı kalmaktadır. Burada ilerleme hızı yönünden asfalt kaplamalar zamanla meydana gelecek ısı kaybının yaratacağı sorunlar da dikkate alınarak, daha çabuk uygulanmak zorundadırlar [6].

2.5 Beton Yol Çeşitleri

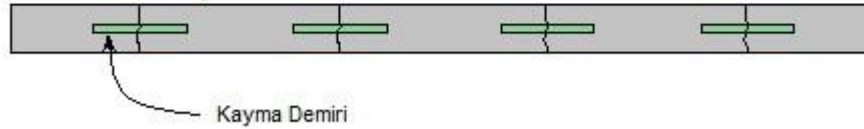
2.5.1 Derzli donatısız beton yollar

Derzli donatısız beton yollar(Şekil 2.13), beklenen bütün çatlaklar için yeterli miktarda derz içerir. Donatısız yapılan bu tip yollar da enine derzler için kayma demirleri boyuna derzler için de bağlantı demirleri konulabilir. 175-300 mm kalınlık için enine derzler arası boşluk 3,7-4,5 m arasında olabilir.

Üstten Görünüş



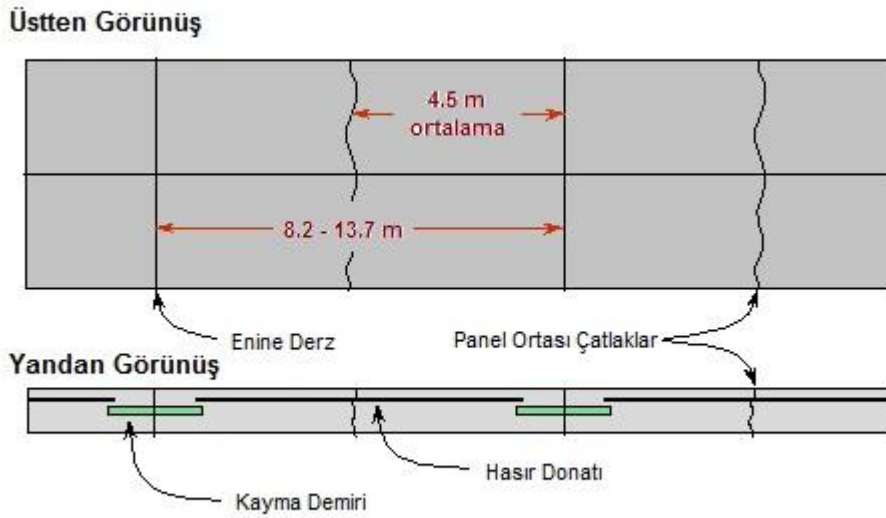
Yandan Görünüş



Şekil 2.13 : Derzli donatısız beton yollar.

2.5.2 Derzli donatılı beton yollar

Derzli donatılı beton yollar hasır donatı içerir. Bu tip yollarda derz aralığını artırmak ve orta paneldeki çatlakları almak için hasır donatı konulur. Bu tip yollarda enine derz aralıkları genellikle 9 m olarak seçilir ama bazı büyük kurumlar 30,5 metreye kadar inşa edebilmişlerdir. Derzli donatılı beton yollar (Şekil 2.14) genellikle Amerika'nın doğu ve orta batı eyaletlerinde uygulanmaktadır.

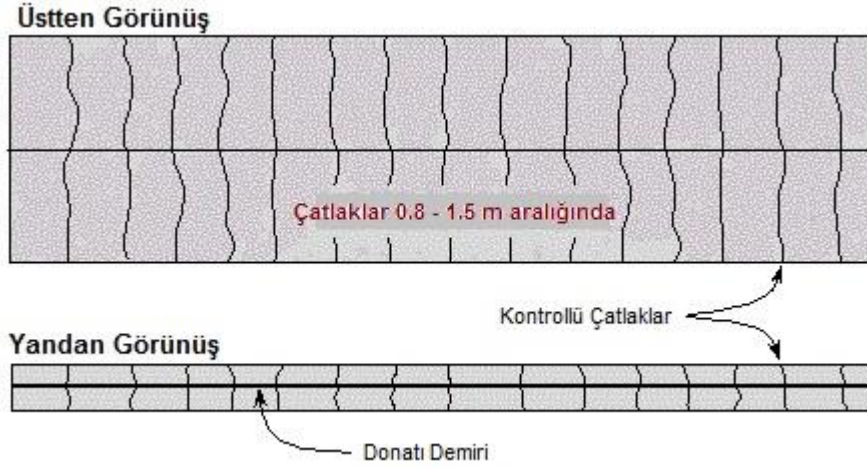


Şekil 2.14 : Derzli donatılı beton yollar.

2.5.3 Sürekli donatılı beton yollar

Sürekli donatılı beton yollar derzsiz olarak inşa edilir. Enine çatlaklar genelde 0,8-1,5 m aralıklarla gerçekleşir. Bu tip yollar genelde yolun enine kesit alanının yaklaşık %0,6-0,7 ile arasında bir derinliğe yerleştirilir ve böylece çatlaklar kontrollü bir şekilde alınır. Çatlaklar için uygun aralık belirleme bu tip yollarda en önemli tasarım kriteridir.

Sürekli donatılı beton yollar (Şekil 2.15) derzli donatılı ve derzsiz donatılı beton yollara göre daha çok donatı içerdiği için pahalıdır. Ancak servis ömrünün 30-40 yıl civarında olduğu ve maliyet – verimlilik açısından daha iyi durumda olduğu kanıtlanmıştır. Yoğun trafiğe maruz kalan yerlerde genelde tercih edilir.



Şekil 2.15 : Sürekli donatılı beton yollar.

2.5.4 Çelik lifli beton yollar

Çelik lifli beton yolların kullanımı sanayi alanları ile sınırlıdır. Bu sektörde oldukça yaygın olarak kullanılır. Çelik lifli beton yol kaplamaları ince veya çok ince beton plaklarda veya çok özel uygulamalarda uygulanır.

2.6 Beton Yolun Tasarımı

Beton yolun tasarımında en önemli husus beton kaplama kalınlığının belirlenmesidir. Toprak tabanı ve / veya temel tabakası üzerine oturan beton kaplamanın davranışı teorik olarak elastik zemin üzerine oturan rijit plakların davranışına benzer. Ancak gerçekte etki eden yüklerin çeşitliliği (dinamik ve tekrar eden dahil), zemin özellikleri (taşıma gücü, yatak katsayısı, CBR değeri, drenaj durumu, ...), iklim (sıcaklık, yağış), beton özellikleri (elastisite modülü, basınç ve eğilme dayanımları, ...) ve tasarlanan servis ömrü konuyu daha karmaşık hale getirir ve zorunlu olarak teorik yaklaşımın deneysel bulgularla desteklenmesini gerektirir.

Bu konuda yapılan deneysel çalışmaların en kapsamlısı 1958-1960 yılları arasında Amerika'nın Illinois eyaleti Ottawa şehrinde yapılmıştır. Amerika Eyalet Yolları Çalışanları Birliği, AASHO, (sonraları AASHTO) tarafında yürütülen bu çalışmada yüklü kamyonlar oval pistler üzerinde sürekli dolaşarak yolu neredeyse servis ömrü boyunca karşılaşacağı bir trafik yüküne maruz bırakmışlardır. Pistin farklı bölgelerinde farklı tasarımlarla oluşturulmuş olan beton üst yapının ve kaplamanın durumu (yüzey düzgünlüğü, oturmalar, çatlamlar, ...) sürekli ölçülerek belirlenmiştir. AASHO Yol Testi'nden elde edilen bilgileri temel alan AASHTO Tasarım Yöntemi bazı revizyonlara uğramakla birlikte bugün de yürürlükte olan ve yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Portland Çimentosu Birliği tarafından geliştirilen bir tasarım yöntemi de ABD'de bazı eyaletler tarafından kullanılmaktadır. Diğer ülkelerde ve Avrupa'da da benzer ampirik – analitik yöntemler geliştirilmiştir.

Bu yöntemlerin uygulanması sonucu, belirli trafik yükü aralıklarında beton plak ve temel tabaka kalınlıklarının çok fazla değişmediği gözlenmiş ve mevcut yollar üzerindeki deneyimlerden de yararlanarak pratik olarak kullanılabilen “kataloglar” oluşturulmuştur. Bir katalogdan kaplamanın faydalı ömrü boyunca maruz kalacağı tahmini trafik yükü “trafik kategorisi”, zemin tipi (CBR) ve iklim (don olasılığı) dikkate alınarak temel tabaka cins ve kalınlıkları ile beton plak kalınlığı doğrudan seçilebilmektedir. Trafik kategorisi, yoldan geçen çeşitli araçların farklı dingil yüklerinin tek bir eşdeğer standart dingil yüküne çevrilmesi (örneğin, 8.2 ton) ve bu yükün yol üzerinde yıllık ortalama günlük (YOGT) ve servis ömrü süresince tekrar sayısına bağlı olarak belirlenmektedir [4].

Şekil 2.16, Şekil 2.17 ve Şekil 2.18’de platform genişliği 12 m olan bir yolda 11 farklı trafik kategorisine göre tasarlanmış esnek ve rijit üstyapı kesit kalınlıkları gösterilmiştir. Esnek üstyapı Karayolları Genel Müdürlüğü tasarım kriterlerihe göre, rijit üstyapı ise AASHTO 93 Yöntemi’ne göre derzli donatısız ve sürekli donatılı olarak farklı farklı dizayn edilmiştir [4].

Üstyapı (cm)	Trafik Kategorileri ($T_{8.2}$: 8,2 tonluk eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı - Yolun hizmet ömrü boyunca)										
	3-10 Milyon	10-20 Milyon	20-30 Milyon	30-40 Milyon	40-50 Milyon	50-65 Milyon	65-80 Milyon	80-100 Milyon	100-160 Milyon	160-250 Milyon	>250 Milyon
Aşınma	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Binder	8	6	6	6	7	7	7	8	8	8	8
Bitümlü Temel	0	8	9	10	10	11	12	12	14	16	18
P. miks Temel	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Kırmataş Temel	25	20	20	20	20	20	20	25	25	25	25

Şekil 2.16 : Esnek üstyapıdaki trafik tekrar sayılarına göre tabaka kalınlıkları [4].

Üstyapı (cm)	Trafik Kategorileri ($T_{8.2}$: 8,2 tonluk eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı - Yolun hizmet ömrü boyunca)										
	3-10 Milyon	10-20 Milyon	20-30 Milyon	30-40 Milyon	40-50 Milyon	50-65 Milyon	65-80 Milyon	80-100 Milyon	100-160 Milyon	160-250 Milyon	>250 Milyon
Beton Kaplama	19	22	23	25	25	26	27	30	33	36	38
Kırmataş Alttemel	20	20	20	20	25	25	25	25	25	25	25

Şekil 2.17 : Derzli donatısız üstyapıdaki trafik tekrar sayılarına göre tabaka kalınlıkları [4].

Üstyapı (cm)	Trafik Kategorileri (T _{8,2} : 8,2 tonluk eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı - Yolun hizmet ömrü boyunca)										
	3-10 Milyon	10-20 Milyon	20-30 Milyon	30-40 Milyon	40-50 Milyon	50-65 Milyon	65-80 Milyon	80-100 Milyon	100-160 Milyon	160-250 Milyon	>250 Milyon
Beton Kaplama	18	20	22	24	25	25	26	28	31	35	36
Kırmataş Alttemel	20	20	20	20	25	25	25	25	25	25	25

Şekil 2.18 : Sürekli donatılı üstyapıdaki trafik tekrar sayılarına göre tabaka kalınlıkları [4].

Şekil 2.16, Şekil 2.17 ve Şekil 2.18’de de görüldüğü gibi, aynı trafik kategorisi için esnek üstyapı daha kalındır ve daha fazla sayıda temel tabakası bulunmaktadır. Aynı trafik kategorisinde derzli donatısız üstyapıdan sürekli donatılı üstyapıya geçildiğinde beton plak kalınlığı sadece birkaç santim azalmaktadır [4].

Uygulamada beton kaplama kalınlıklarının genellikle 20-40 cm arasında değiştiği görülmektedir. Ağır vasıta geçmeyen düşük trafik yoğunluklu yollarda kalınlık 15-20 cm arasına düşmektedir [4].

2.7 Türkiye’de Beton Yollar

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, ülkemizde beton yolu tanıtmak ve beton yol uygulamalarını başlatmak amacı ile çeşitli etkinliklerde bulunmuştur. Bunların arasında konu ile ilgili yayınlar çıkarmak, ulusal ve uluslararası sempozyumlar düzenlemek sayılabilir. Bu konudaki en önemli gelişme ise kuşkusuz 9 Nisan 2002 tarihinde KGM ile imzalanan protokol olmuştur. Protokole göre TÇMB deneme amaçlı olarak iki ayrı güzergahta beton yol yapımını üstlenmiştir. İstanbul’daki beton yol Hasdal Kavşağı- Kemerburgaz yolunun 3,5 km ‘lik bir bölümünde, Afyonkarahisar’daki beton yol ise Afyonkarahisar-Emirdağ yolunun 2 km’lik bir bölümünde yapılacaktır. Temel tabakalarının yapımı Afyonkarahisar’da KGM, İstanbul’da TÇMB tarafından üstlenilecektir. Her iki yolda beton plakların yapımı da TÇMB tarafından gerçekleştirilecektir. TÇMB rijit üstyapı projelendirme metodu ile rijit kaplama yapımı teknik şartnamesinin hazırlanmasında KGM’ne yardımcı olacak, beton yol konusunda KGM teknik personeline kurs / seminer verilmesini ve yurt dışında inceleme yaptırılmasını sağlayacaktır. Afyon’daki yolun bakım ve onarımı yapımından sonra 5 yıl süre ile TÇMB’ye ait olacaktır. Protokolde İstanbul’daki

yolun öncelikle yapılması öngörülmüştü. Ancak, bu yolun alt yapısı tamamlanamadığı için öncelik alt yapısı hazır olan Afyonkarahisar'daki yola verilmiştir [7].

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) ile Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) ve Bayındırlık ve İskan Bakanlığı arasında imzalanan protokol'de deneme amaçlı olarak İstanbul ve Afyonkarahisar'da yapılacak beton yollardan İstanbul'dakinin öncelikle yapılması öngörülmüştü. İstanbul'daki yol için belirlenen güzergah, bölünmüş yola çevrilerek asfalt olarak yapılmakta olan Hasdal Kavşağı – Kemberburgaz Ayrımı – Yassıören Devlet Yolu (km: 0+000 – 43+504) nun Hasdal Kavşağı – Kemberburgaz Ayrımı (km: 39+900 – 43+504) arasında kalan ve Kemberburgaz Ayrımı'na doğru sağ tek taşıt yönü olan yaklaşık 3,5 km uzunluğundaki bölümü olarak belirlenmiştir [7].

Devlet yolunun tamamını üstlenen müteahhit firma ile İdare arasında anlaşmazlık ortaya çıkınca yolda inşaat faaliyetleri durdu ve beton yol yapımı için Afyonkarahisar öncelik kazandı. Oradaki yol tamamlandığında İstanbul'daki yolda da çalışmalar işi devir alan yeni müteahhit firma, MAK-YOL İnşaat Sanayi Turizm ve Ticaret A.Ş. tarafından başlatılmış bulunuyordu [7].

Türkiye Çimento sanayisinin önde gelen kuruluşları arasında yer alan Çimsa, Eskişehir Fabrikasının önünden geçen Eskişehir-Bursa karayolundaki taşıt trafiğini rahatlatmak ve fabrikaya giriş yapan ağır vasıtalarla daha güvenli bir yol sunmak amacıyla bir beton yol projesi hazırlamıştır. ABD'den gelen uzmanların desteğiyle 1,5 km uzunluğunda üzerinden günde 800 ağır taşıtın geçmesi planlanan beton yol imal edilmiştir. Yüzde yüz yerli üretimi olan bu beton yol, 30 senelik kullanım ömrü olacak şekilde tasarlanmıştır [7].

Dünyada yüzyılı aşkın süredir kullanılan en güvenilir ve uzun ömürlü üstyapı sistemi beton yolları Eskişehir'de hayata geçiren Çimsa; Türkiye'de beton yol yapımının mümkün olduğunu, teknik ve ekonomik olarak irdelendiğinde beton yolun asfalta göre daha verimli ve kullanışlı bir alternatif olduğunu gözler önüne sermektedir [7].

Denizli Üstyapı Projesi kapsamında şehrin ana arterlerine çelik lifli silindirle sıkıştırılmış beton yol, ara sokaklarına ise poroz beton ve kilit parke taşı uygulaması yapılmıştır [7].

Karamürsel şehir geçişinde 2,5 km uzunluğundaki (gidiş-geliş toplam 5 km) bölünmüş yol beton yol olarak imal edilmiştir. Bu yol Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yapılan ilk beton uygulaması olarak dikkat çekmektedir [7].

Ordu – Ulubey Devlet Yolunda, Karayolları Genel Müdürlüğü ile Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü arasında imzalanan protokolle Km:5+000 - 6+000 arasında beton yol deneme kesimi yapılmıştır [7].

Beton yol, sathi kaplamalı bölünmüş yolun sadece bir tarafına yapılmıştır. Beton kaplama mevcut sathi kaplama üzerine getirilmiştir. Bu kesimde beton plak kalınlığı 28 cm olup, platform genişliği 1,0 m iç banket, 2 x 3,5 m taşıt şeridi ve 2,50 m dış banket olmak üzere toplam 10,50 m'dir. Bu beton yol deneme kesiminde bor katkılı çimentonun performansının izlenebilmesi amacıyla yolun 700 m'lik kısmı bor katkılı çimento ile 300 m'lik kısmı ise normal katkısız çimento ile yapılmıştır [7].

3. KOROZYON

Korozyon genel anlamda, malzemenin bulunduğu ortamda özelliklerini kaybederek kullanılmaz hale gelmesidir. Korozyon kavramı, daha çok metal ve alaşımlarının çevreleri ile kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonları sonucu bozulmalarının tanımlanması için kullanılır [8].

Metallerin büyük bir kısmı su ve atmosfer etkisine dayanıklı olmayıp normal koşullar altında bile korozyona uğrayabilirler. Metaller cevherlerinden indirgenme yoluyla elde edilirken, doğadaki temel tepkimeler tersine çevrilir. Korozyonun asıl nedeni, metallerin metal hallerinde kararlı olmayışlarıdır. Metaller termodinamik yasalara uyarak doğadaki en kararlı bileşiklerine diğer bir deyişle doğada mineral olarak bulundukları kendi doğal hallerine dönüşme eğilimi gösterirler, yani korozyona uğrarlar [9,10].

Metallerin korozyonu, yarattığı dolaylı rahatsızlıkların yanı sıra her zaman malzeme israfına ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Yaklaşık olarak her yıl üretilen demir miktarının % 25'i kadar demirin korozyon nedeniyle kullanılamaz hale geldiği sanılmaktadır [11].

Korozyon nedeniyle ülkelerin malzeme, enerji, emek kayıplarının “Gayri Safi Milli Gelirinin” % 3,5-5'i düzeyinde olduğu tahmin edilmektedir. Bu değere korozyonun neden olduğu üretim ve ürün kaybı dahil değildir. Örneğin, büyük şehirlerde korozyon nedeniyle delinen su borularından kaçan su miktarı çok büyük değerlere varmaktadır [12].

Metallerde korozyon olayının gelişimi; malzeme türüne, ortam koşullarına ve yabancı faktörlerin varlığına bağlıdır. Korozyon ayrıca malzeme seçiminin ekonomikliğinde rol oynar. Gereğinde daha ucuz bir malzeme korozyon nedeniyle, sık sık tamir veya yenilenme gerektirebileceğinden, daha çok dayanabilecek ve fiyatı fazla bir malzemedan daha az ekonomik olabilir. Bir metalin korozyona dayanıklı olup olmadığı; onun kimyasal bileşimine, kristal yapısına ve saflık derecesine bağlıdır [12].

3.1 Korozyon Mekanizmalarına Göre Korozyon Türleri

• Fiziksel Korozyon

Organik sıvıların ya da ergimiş metallerin neden olduğu korozyon türüdür. Korozyon doğrudan fiziksel çözünme ya da katı hal değişimi ile gerçekleşir. Cıva ya da ergimiş alüminyumun metal malzeme yüzeyinde korozyona neden olması fiziksel korozyona örnek olarak gösterilebilir [13].

• Kimyasal Korozyon

Metal malzemelerin direkt olarak ortamla reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Atmosferik koşullarda en önemli koroziv maddeler O_2 , H_2S ve halojenler olduğundan genelde metal yüzeyinde korozyon ürünü olarak oksitler ve sülfürler oluşur. Kimyasal korozyon yüksek sıcaklıklarda meydana geldiğinden yüksek sıcaklık korozyonu olarak da adlandırılmaktadır [13]. Doğrudan kimyasal etkilenmede bir elektron akımı (cureyan) yoktur. Bu tip etkilenmede metallerin yüzeyinde eş dağılımlı oksijen reaksiyonu oluşur. Doğrudan korozyon sonucu metal üzerinde oluşan yapışık korozyon tabakasının kalınlığı, yaklaşık olarak, oluşma zamanının kare kökü ile doğru orantılıdır [11].

Bu korozyon türüne örnek olarak, kazanların alevle ya da sıcak gazla temas ettiği bölgelerde meydana gelen korozyon verilebilir [13].

• Elektrokimyasal korozyon

Sulu ortamda metal ve alaşımlarının bozulmaları ile meydana gelen korozyon türüdür. Bu tip korozyonun başlayıp ilerleyebilmesi için dört temel unsurun yerine getirilmesi koşulu vardır. Aksi takdirde bu koşullardan biri sağlanmadığında korozyon gelişimi durur. Bu koşullar; anodik reaksiyonlar, katodik reaksiyonlar, anodik ve katodik bölgeler arasında iyon transferi ve elektron akışı olarak sıralanabilir [14].

Bir metal çubuk, kendi iyonlarını içeren bir çözelti içine daldırılırsa, metal iyonları çözeltiye geçer. Çözelti (+), metal (-) yükle yüklenir. Ara yüzeyde bir potansiyel farkı doğar. Elektron vererek çözeltiye geçen metal iyonları ile elektron alarak yeniden serbest metal haline geçen metal atomları $M^0 \rightleftharpoons M^{n+} + n e^-$ dengesini oluşturur [14].

Bu olay tersinir olup, kısa sürede dengeye ulaşır. Aynı eriyik içine iki ayrı türde metal daldırılırsa, aralarında bir gerilim doğar ve buna galvanî pili adı verilir. Elektron veren metal anot, elektron alan metal ise katot olur. Bir iletkenle birleştirilirse anottan çıkan elektronlar, katoda geçer. Elektron kaybeden metalin iyonları eriyiğe geçerek korozyon oluşturur, katot ise etkisiz kalır. Bu şekilde galvanî çiftlerinde görülen korozyona elektrokimyasal korozyon denir [14].

Metallerde elektrot potansiyeli hidrojen elektrotunun durumuna göre ölçülür. Bunlar sırayla ele alınacak olursa Şekil 3.1'deki bazı metal iyonları için görülen elektromotif kuvvet serisi elde edilir [14].

Yükseltgenme tepkimesi	Elektrot gerilimi E°, volt (25 °C'de standart hidrojen elektroduna göre)
Au → Au ³⁺ + 3e ⁻	+1,498
Pt → Pt ²⁺ + 2e ⁻	+1,200
Ag → Ag ⁺ + e ⁻	+0,799
2Hg → Hg ₂ ²⁺ + 2e ⁻	+0,788
Fe ²⁺ → Fe ³⁺ + e ⁻	+0,771
Cu → Cu ²⁺ + 2e ⁻	+0,337
Sn ²⁺ → Sn ⁴⁺ + 2e ⁻	+0,150
H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻	0,000
Pb → Pb ²⁺ + 2e ⁻	-0,126
Sn → Sn ²⁺ + 2e ⁻	-0,136
Ni → Ni ²⁺ + 2e ⁻	-0,250
Co → Co ²⁺ + 2e ⁻	-0,277
Cd → Cd ²⁺ + 2e ⁻	-0,403
Fe → Fe ²⁺ + 2e ⁻	-0,440
Cr → Cr ³⁺ + 3e ⁻	-0,744
Zn → Zn ²⁺ + 2e ⁻	-0,763
Al → Al ³⁺ + 3e ⁻	-1,662
Mg → Mg ²⁺ + 2e ⁻	-2,363
Na → Na ⁺ + e ⁻	-2,714

Daha katodik (korozyona eğilim daha az)

Daha anodik (korozyona eğilim daha fazla)

Şekil 3.1 : Bazı metal iyonları için elektromotif kuvvet serisi [9].

Voltaj sırası listesi iki temiz metal yüzeyinden hangisinin anot olacağını gösterir. Bu seride anot kısmındaki metal, katot kısmındakiye kıyasla anot reaksiyonuna maruz kalır, katot tarafındaki ise korunur. Kimyasal bileşik şeklinde oluşan korozyon ürünü oluştuğu yerden ayrılır ve yenisi oluşursa tahribat sürekli olur. Demir korozyonu bu olaya örnektir [14].

3.2 Genel Olarak Korozyon Türleri

- **Homojen (üniform) korozyon**

Metal yüzeyinin her noktasında aynı hızla yürüyen korozyon çeşididir. Korozyon sonucu metal kalınlığı her noktada aynı miktarda incelir. Atmosfer ortamında ve herhangi bir dış etkenden etkilenmeyen tamamı aynı cins malzemedan üretilmiş olan metaller homojen korozyona uğrar [14].

- **Galvanik korozyon**

Farklı malzeme kullanımından kaynaklanan korozyon, farklı potansiyelde iki metal birbiriyle temas halinde iken aralarında bir galvanik pil oluştururlar ve daha aktif olan metal anot, daha soy olan metal ise katot görevi görerek aktif olan metalde korozyona sebep olur [14]. Bu tip korozyona oldukça sık rastlanır.

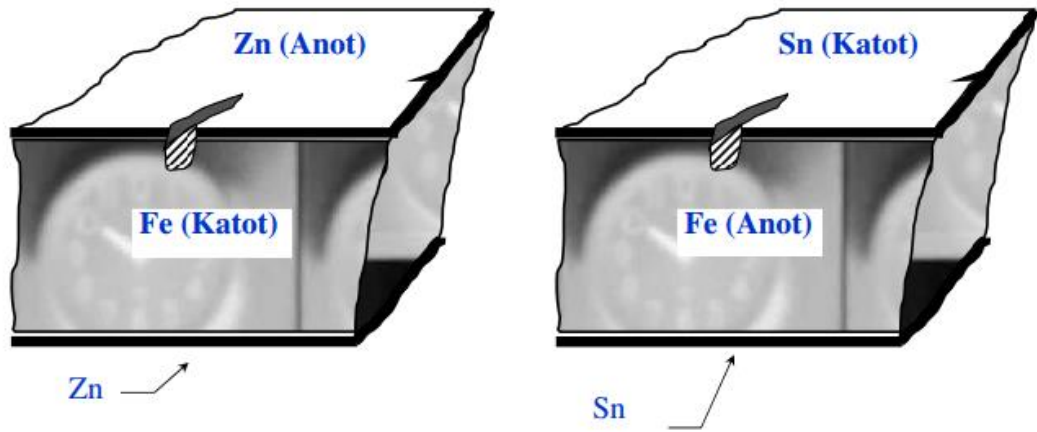
Korozyona sebebiyet veren galvanik pili türleri çeşitlidir. Bileşim pilleri, gerilme pilleri ve konsantrasyon pilleri olmak üzere üç farklı pil türü vardır. Bunların oluşumunu engelleyerek korozyonu önleyebiliriz.

- **Bileşim pilleri**

İki farklı çeşitteki metal arasında bir galvanik elemanı oluşabilir. İki metalden hangisinin katot hangisinin anot olacağına voltaj sırası listesinden karar verilir.

Örneğin Şekil 3.2'de görülen galvanizli sacdaki çinko demire kıyasla anot tarafındadır. Galvaniz tabakası çizilerek demir açığa çıksa bile çinko tarafından bir süre korunur. Ancak çinko zamanla korozyona uğrayarak demir sac paslanmaya başlar.

Şekil 3.2'de görülen kalaylı sacda kalay demiri tamamen örttüğü sürece korozyondan korur. Korozyona dayanıklı olan kalay tabakası çizildiği takdirde, demir kalaya kıyasla anot tarafında olduğundan kısa sürede paslanır.



Şekil 3.2 : Voltaj sırasına göre anot – katot oluşumu [14].

Çizelge 3.1’de de gösterildiği üzere galvaniz çifti metallerden daha anot tarafta olan korozyona uğrayan metaldir .

Çizelge 3.1 : Galvanik metal çiftlerinden korozyona uğrayan metaller.

Galvanik Çift	Korozyona Uğrayan Metal
Çelik ve bakır yüzey	Çelik
Çelik ve alüminyum	Alüminyum
Çelik ve kurşun	Çelik

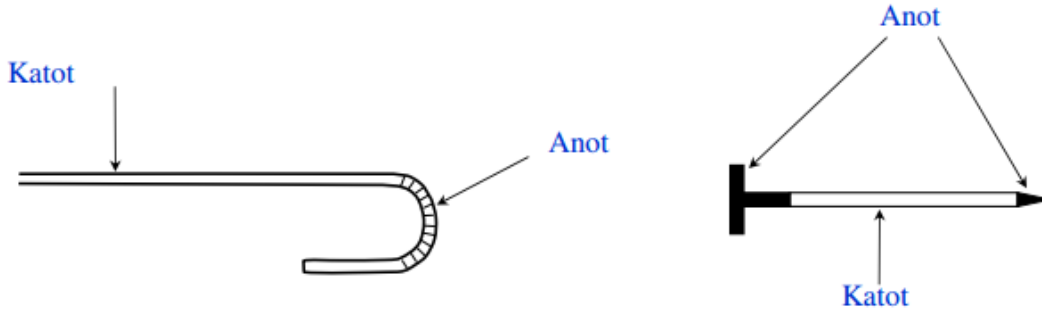
Yapıda kullanılan malzemelerde elektrokimsiyal korozyona oldukça rastlanır. Örneğin, çatılarda alüminyum ve bakır levhalar birbirleriyle etkileşecek şekilde konursa, çukurlarda birikebilecek suyun iletkenliği ile bir pil oluşur ve daha az asal olan alüminyum levhalar delinir. Bu olay temas korozyonu olarak adlandırılır [14].

- Gerilme pilleri

Gerilme etkisindeki atomlar en düşük enerjili denge konumundan ayrıldıklarından gerilmesiz bölgelere göre daha yüksek enerjiye sahiptirler. Bundan dolayı gerilme

etkisindeki atomların elektrolit potansiyelleri daha büyüktür ve anot reaksiyonu gösterirler [14].

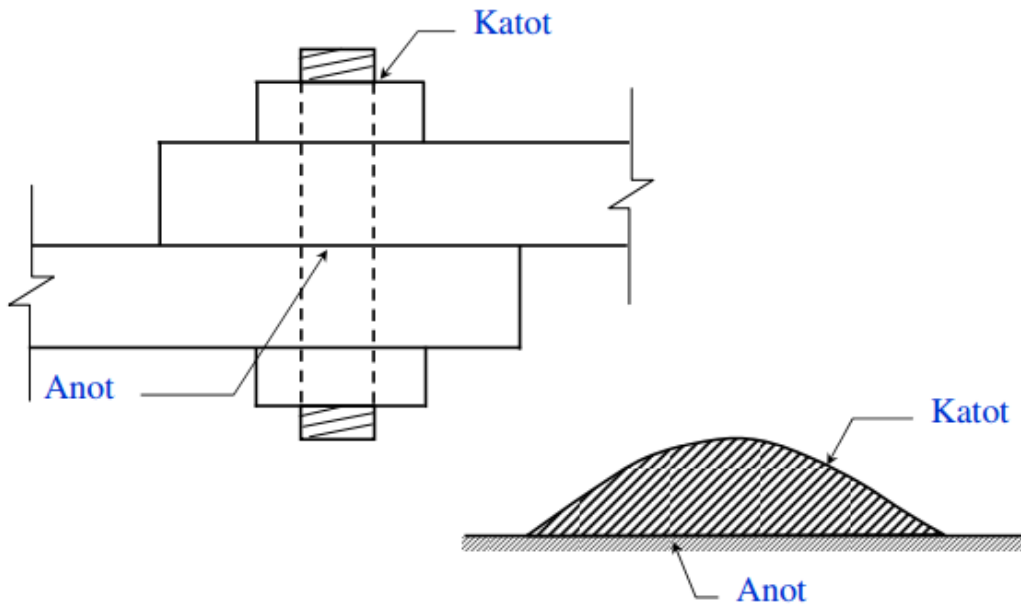
Eğilmiş veya burulmuş metallerde plastik şekil değişimi bölgeleri anot reaksiyonu gösterirler. Şekil 3.3’de görülen çubuğun eğilme bölgesinde korozyon daha şiddetli oluşur. Benzer şekilde soğuk burulmuş donatı çelikleri, sıcak haddelenmiş çelik çubuklara kıyasla daha çabuk paslanır [14].



Şekil 3.3 : Gerilme pili örneği [12].

- Konsantrasyon pilleri

Elektrolitin konsantrasyonu elektrot potansiyelini etkiler. Konsantrasyonun yüksek olduğu bölgeler katot, düşük olduğu bölgeler anot reaksiyonu gösterir. Kapalı yerlerde oksijen azdır. Bu bölgeler oksijeni fazla olan açık bölgelere kıyasla daha şiddetli paslanırlar. Şekil 3.4’de konsantrasyon pilinin örneği gösterilmiştir [12].



Şekil 3.4 : Konsantrasyon pili örneği [14].

- **Çatlak korozyonu**

Metal yüzeyinde bulunan bir çatlak içinde veya dar bir aralıkta oluşan korozyon çeşididir. Bu korozyonun temel nedeni, çatlak içi ile çevre elektrolit arasında oksijen konsantrasyonu veya metal iyonu konsantrasyonunun farklı oluşudur [15]. Çatlak korozyonu yalnız metalde bulunan bir çatlakta değil, metal olmayan bir eleman ile metal yüzeyi arasında da meydana gelebilir.

- **Çukur korozyonu**

Metal yüzeyinin bazı noktalarında çukur oluşturarak meydana gelen korozyon türüdür. Anot ve katot bölgeleri birbirinden kesin bir şekilde ayrılmış olup, anot, yüzeyin herhangi bir noktasından açılan çukurun içindeki dar bir bölge, katot ise çukurun çevresindeki geniş bir alandır. Korozyondan dolayı çukur gittikçe derileşir ve metalin o noktadan kısa sürede delinmesine sebep olur. Bu nedenle çukur korozyonu çok tehlikelidir [15].

- **Kabuk altı korozyonu**

Metal yüzeyindeki korozyon malzemelerinin sebep olduğu veya başka bir sebeple oluşan bir birikme altında meydana gelen korozyona kabuk altı korozyonu denir. Kabuk altında akışkan hareketi olmadığı için kabuk altı yeteri kadar oksijen alamaz ve buradaki nemin de etkisiyle bu tip korozyon meydana gelir. Bu durum çatlak korozyonundaki ortam gibi bir ortam yaratır ve kabuğun altı anot, kabuğun çevresi ise katot olur. Örneğin, boru yüzeylerindeki izolasyonu sağlamak amacı ile sarılan cam pamuğu yağış sebebiyle ıslanırsa, bu bölgelerde şiddetli bir kabuk altı korozyonu başlar [16].

- **Taneler arası korozyon**

“Bir metalin kristal yapısında tanelerin sınır çizgisi boyunca meydana gelen korozyona taneler arası korozyon denir. Taneler arası korozyonun en tipik örneği paslanmaz çeliklerde görülür” [16].

- **Erozyonlu korozyon**

Özellikle daha çok hareketli akışkanların var olduğu ortamlarda rastlanan bu tip korozyonda korozif çözeltilerin metal yüzeyinden hızla akması halinde, korozyon olayı yanında

erozyon da meydana gelir. Bu durum korozyon hızının da artmasına neden olur. Bunun nedeni, oluşan korozyon ürünlerinin akışkan tarafından sürüklenerek götürülmesidir [17].

- **Tabakalaşma korozyonu**

Korozyona uğramış metal tabakalar birbirinden ayrılır ve oluşan korozyon ürünleri malzemenin tabakalar halinde birbirinden ayrılmasına sebep olur [15].

- **Filiform korozyonu**

Metal yüzeyinde var olan boya veya kaplama tabakası altında meydana gelen bir korozyon türüdür. Filiform korozyonu, çatlak korozyonunun bir çeşidi olarak kabul edilebilir [16].

- **Seçimli korozyon**

Alaşımı meydana getiren elementlerden birinin korozyona uğrayarak uzaklaşması sonucu oluşan korozyon türüdür. Örneğin, bünyesinde %70 bakır %30 çinko barındıran pirinç alaşımında çinko bakırdan önce korozyona uğrar [15].

- **Kaplama bozukluğu korozyonu**

İşçilik hataların dolayı kaplamada bazı bölgelerinin bozulması veya delinmesi halinde bu bölgeler anot olacaktır ve korozyona uğrayacaktır. Bu tip korozyon, metal yüzeyinde çok küçük bölgelerde yoğunlaşan bir korozyondur [15].

- **Aşınmalı korozyon**

Birbiri üzerinde kayan iki yüzeyin aşınması ile birlikte yürüyen korozyon olayına aşınmalı korozyon denir. Aşınmalı korozyon daha çok metallerin yığın halinde uzun mesafelere taşınmaları sırasında ve yumuşak bağlantı yapılmış elemanlar arasında görülür. Aşınmalı korozyonun oluşması için ortamda suyun bulunmasına gerekmez [16].

- **Basınç korozyonu**

Bir metal hem bir korozif ortamda bulunuyor hem de statik bir basınç altında ise, metalin çatlayarak kırılması, korozyonun başlamasına sebep olur. Normalde korozyon ürünleri metal yüzeyinde koruyucu bir kabuk oluşturduğu halde, gerilme altında iken kabuk oluşturamaz ve bunun sonucunda korozyon hızla devam ederek metalin o bölgede çatlamasına neden olur [16].

- **Gerilim korozyonu**

Çekme gerilmesine maruz kalan ve saldırgan bir ortamda bulunan korozyona duyarlı malzemelerden ortaya çıkar. Çekme gerilmesine dik bölgesel çatlakların oluşumu ile malzeme hasara uğrar [15].

- **Yorulmalı korozyon**

Periyodik olarak dinamik bir basınç altında bulunan bir metal zamanla yorulur. Yorulmuş metal, normalden daha küçük gerilmelerin etkisi ile çatlayabilir. Yorulma ve korozyon etkisiyle metal kısa sürede çatlar [16].

- **Kavitasyon korozyonu**

Hızlı akan sıvıların malzeme yüzeyine yakın bölümlerinde oluşan alçak basınç kabarcıklarının büyümesi ve patlaması ile meydana gelir [15].

- **Aralık korozyonu**

Perçin, cıvata, conta gibi altı örtülü yüzeylerde ve aralıklarda meydana gelen önemli bir korozyon olan aralık korozyonunun meydana gelmesi için aralık, çözeltinin girebileceği kadar geniş, aynı zamanda çözeltinin çıkamayacağı kadar dar olmalıdır [15].

- **Kaçak akım korozyonu**

Toprak zemin içerisinde doğru akım ile çalışan raylı sistem araçları, doğru akım taşıyan yüksek voltajlı elektrik hatları ve kaynak makinaları zemin içinde kaçak akım oluştururlar [18]. Bu kaçak akımlar çevrede bulunan metalik yapılara girerek çok hızlı ve şiddetli korozyona sebep olurlar. Örneğin, bir metro hattına paralel giden boru hattında kaçak akım korozyonu meydana gelebilir.

- **Mikrobiyolojik korozyon**

Mikrobiyolojik etkiden kaynaklanan korozyon olarak bilinen bir diğer adıyla biyokorozyon olarak da ifade edilen mikrobiyolojik korozyon; mikrop, bakteri ve mantar gibi mikroorganizmalar tarafından başlatılan veya hızlandırılan korozyondur. 100 yılı aşkın bir süre önce ortaya çıkarılan bu korozyonun, modern sanayi sistemleri için ciddi bir sorun olduğunun farkına son 30 yılda varılmıştır. Mikrobiyolojik korozyon, metal ve yapı malzemelerine olan korozyon zararlarının yaklaşık %20'sini

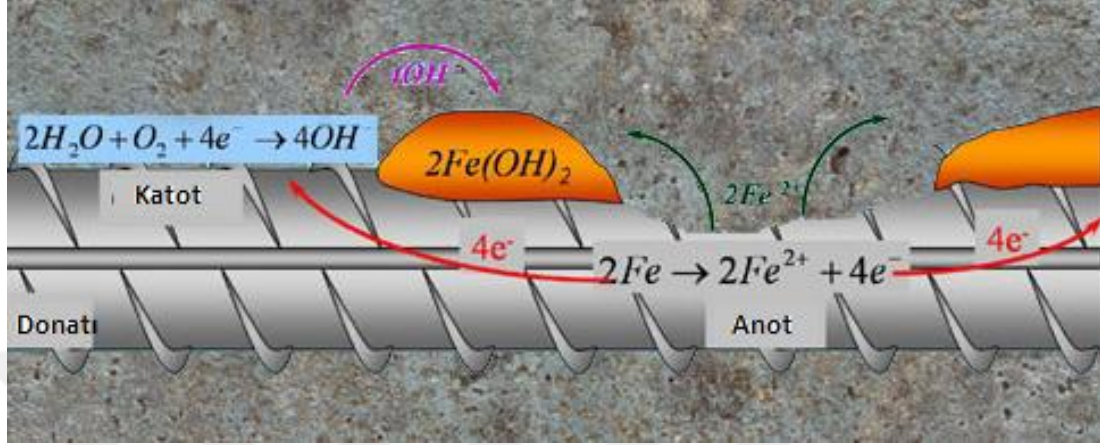
oluşturmaktadır. Dünya genelinde mikrobiyolojik korozyonun doğrudan sebep olduğu zararın yıllık 30-50 Milyar \$ mertebesinde olduğu tahmin edilmektedir. ABD'deki sanayi boru hatlarında meydana gelen korozyonun %15-30'unu oluşturan mikrobiyolojik korozyon sebebiyle oluşmaktadır. Bununla mücadele etmek için sadece doğal gaz endüstrisine yılda 1,2 Milyar \$ harcama yapmaktadır. Mikrobiyolojik korozyon özellikle enerji ve petrol sanayinde, mikrobiyolojik korozyonun sebep olduğu yangın problemleri gibi zaman zaman ciddi hasarlarla sonuçlanan birçok soruna yol açmaktadır. Mikrobiyolojik korozyon normal korozyon olayları gibidir ve bazı mikro canlıların korozyonun tepkime hızını artırması şeklinde kendini gösterir. Eğer bir ortamda normal korozyon yoksa mikrobiyolojik korozyon olayına çok nadiren rastlanır. Başka sebeplerle meydana gelen korozyon olaylarına mikrobiyolojik korozyon olayları da katılırsa korozyon hızını artırıcı etki yapar [14]. Çizelge 3.2'de sanayi alanında mikrobiyolojik korozyonun olduğu yerler açıklanmıştır.

Çizelge 3.2 : Mikrobiyolojik korozyonun olduğu yerler.

Sanayi	Sorunlu Alanlar
Metal	Karbon ve paslanmaz çelik borular ve tanklar; bakır, nikel, pirinç, alüminyum, bronz soğutma suyu boruları, kuleleri ve drenaj boruları
Petrol ve doğal gaz	Petrol ve gaz yükleme, taşıma, boşaltma ve yer altı boruları
Havacılık	Alüminyum kanatlar ve yakıt depoları
Su arıtma	Isı değiştiriciler ve boru sistemlerinde

3.3. Korozyon Oluşumu

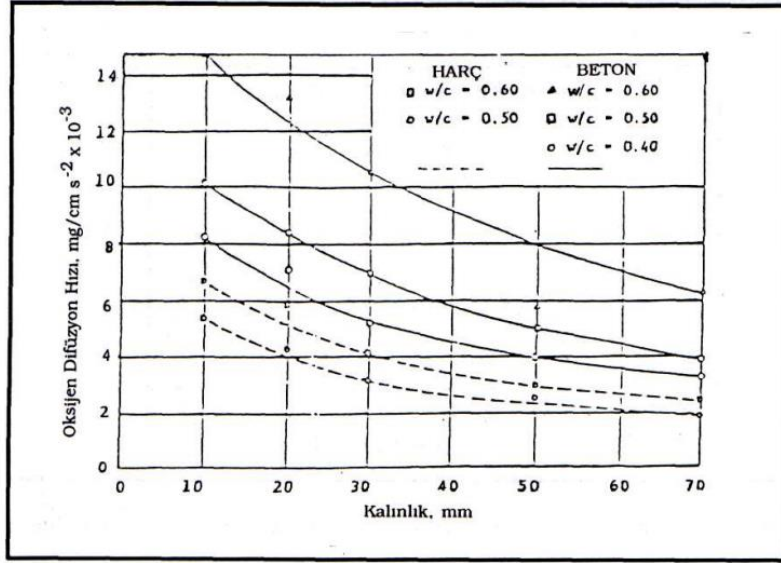
Demir ortamın rutubeti ve oksijenle birlikte galvaniz elemanı oluşturur ve sürekli olarak korozyon etkisinde kalır. Demir, nemli ortamda Şekil 3.5’deki gibi iyonlarına ayrılır.



Şekil 3.5 : Demirin korozyon mekanizması.

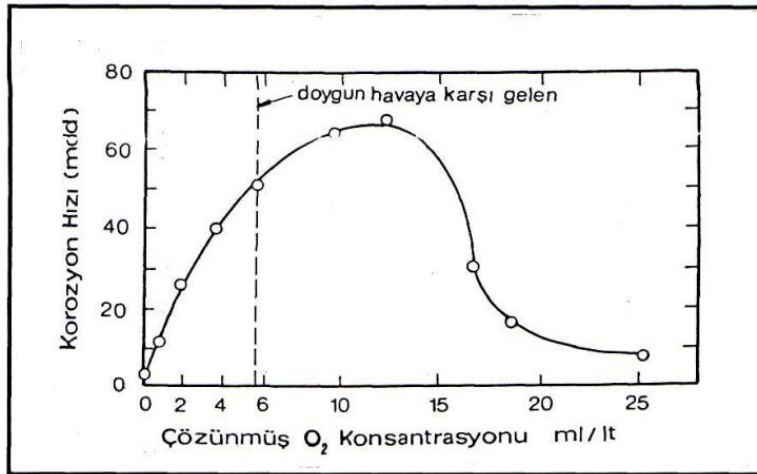
Şekil 3.5’de görüldüğü gibi demirin korozyonu için sürekli olarak oksijen ve su olması gerekir. Aksi takdirde demir paslanmaz. Yani kuru haldeki beton içinde betonarme demirleri korozyona uğramaz. Yeterli oksijen halinde de korozyon olayı yürümez. Ancak geçirimli bir malzeme olan beton içine oksijen kolaylıkla girebilir. Beton içerisine oksijen girişi iki yolla olabilir. Birincisi oksijen ile doymuş haldeki su beton içine penetre olurken, oksijeni betonarme demirlerine kadar beraberinde taşır. Bu olay periyodik olarak ıslanan ve kuruyan betonlarda etkili olarak yürür. Veya atmosfer içindeki oksijen beton boşlukları içindeki suda çözünerek oradan betonarme demirlerine kadar çözelti içinde difüzyonlanır. Beton boşlukları su ile dolduğu zaman atmosferden katot yüzeyine oksijen transferi genellikle bu ikinci yolla oldukça yavaş olarak gerçekleşebilir. Difüzyon katsayısı betonun porozitesine ve su/çimento oranına bağlıdır [19].

Şekil 3.6’da su ile doymun halde bulunan değişik su/çimento oranındaki beton ve harçlar içindeki oksijen difüzyonunun beton kalınlığına göre değişimi görülmektedir. Su/çimento oranı arttıkça betonun porozitesi artmakta ve buna paralel olarak oksijen difüzyonunda da artış olmaktadır. Su/çimento oranı 0,40’dan 0,60’a çıkarılacak olursa difüzyon hızında yaklaşık iki kat artış olacaktır. Bu durumda betonarme demirlerinin korozyon hızında da yaklaşık iki kata varan bir artış beklenebilir [19].



Şekil 3.6 : Oksijen difüzyonunun beton kalınlığına göre değişimi [20].

Yukarıda belirtildiği üzere, betonarme demirlerinin korozyonu için hem oksijene hem de suya ihtiyaç vardır. Beton kuru haldeyken su eksikliğinden, beton su ile doymuş haldeyken de oksijen eksikliğinden betonarme demirlerinin korozyonu son derece yavaştır. En şiddetli korozyon olayı, periyodik olarak ıslanan ve kuruyan betonlarda görülür. Betonların büyük bir kısmı kuru halde bulunur. Tam olarak kuru betonlarda korozyon hücresi oluşamaz ve korozyon söz konusu olmaz. Bu durumdaki betonlar içindeki betonarme demirleri pasif haldedir. Diğer taraftan sürekli su altında kalan betonlarda da korozyon hızı son derece düşüktür. Bu durum su içinde çözülmüş halde olan oksijenin beton içinden difüzlenerak demir yüzeyine kadar taşınmasının güçlüğünden dolayıdır (Şekil 3.7) [19].



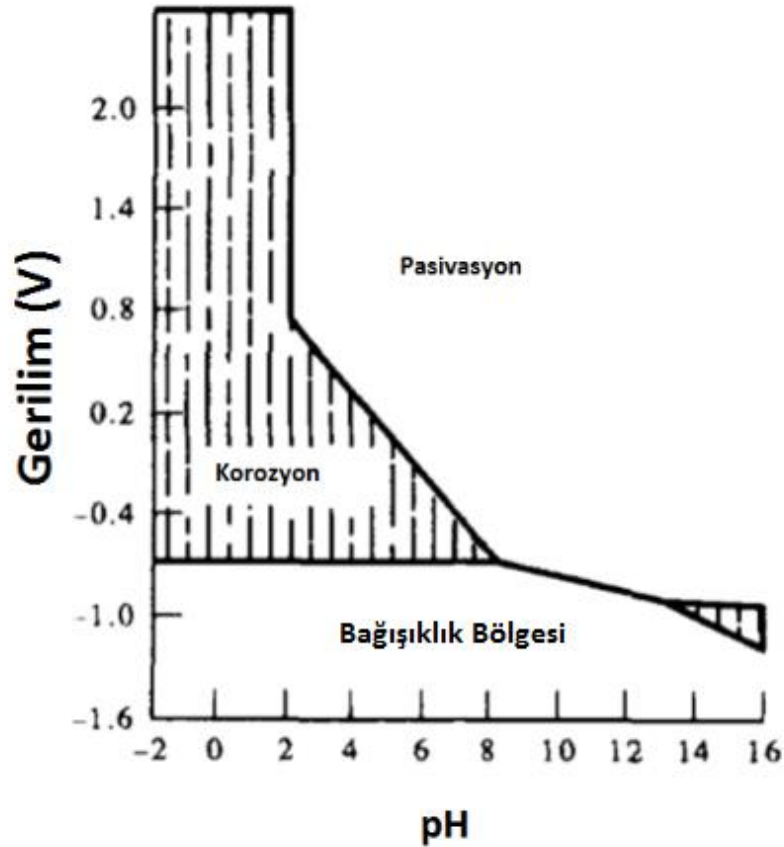
Şekil 3.7 : Korozyon hızının çözülmüş O_2 konsantrasyonu ile değişimi [20].

Maksimum korozyon hızı 12 ml O₂/L H₂O oksijen konsantrasyonuna karşı gelmektedir. Daha yüksek oksijen konsantrasyonunda çelik pasifleşmektedir.

3.3.1. Pasifleşme ve pasifliğin bozulması

Portland çimentosu ile yapılmış bir betonun boşluklarında bulunan su doygun kireç çözeltisi halinde olup, içinde bulunan az miktardaki sodyum ve potasyum hidroksitlerinin de etkisi ile yüksek alkali özelliktedir. Taze betonun pH değeri 12,5–13,2 değerleri arasındadır. Eğer yüksek fırın cürufu veya uçucu kül gibi puzolan katkılı çimentolar kullanılırsa beton pH değeri 12'ye kadar düşer. Bu pH ortamında da çelik pasif halde bulunur.

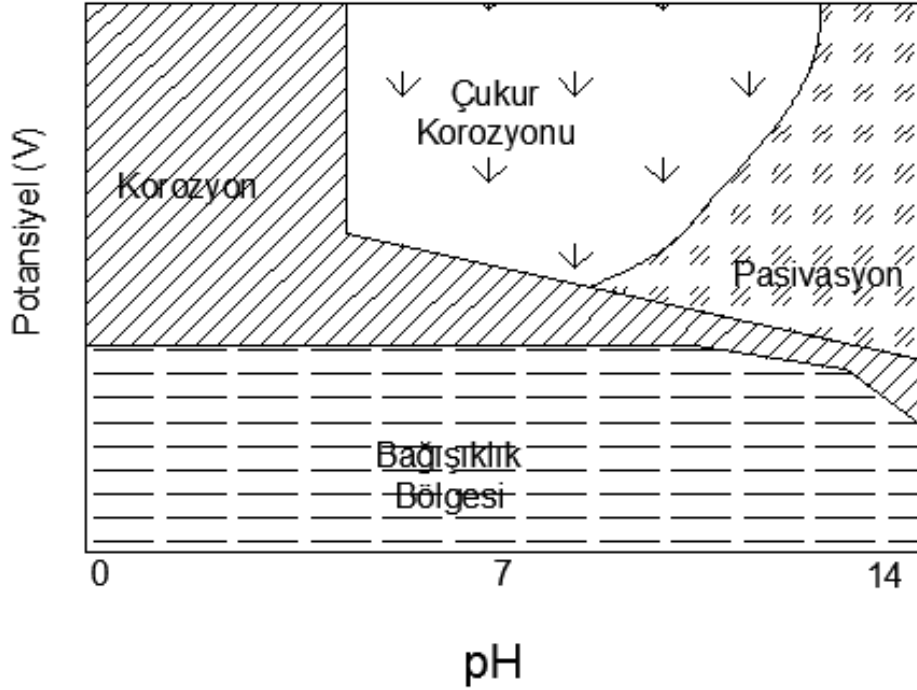
Şekil 3.8'de gösterildiği gibi, donatının bulunduğu ortamın gerilimi ve pH'ından etkilenir. Karbonatlaşma ve klorür etkisi hem beton pH'ını hem de gerilimi etkiler.



Şekil 3.8 : Gerilim ve pH değişimi ile oluşan korozyon bölgeleri.

Şekil 3.8'de çözelti pH değerinin 9-13 arasında olması halinde demirin pasif halde bulunacağı açıkça görülmektedir. Çözelti içinde klorür iyonu bulunması halinde durum biraz farklıdır. Klorür iyonlarının etkisi ile korozyon bölgesi genişler. Diğer

taftan, potansiyelin yüksek olduğu bölgelerde pasiflik bozulur ve çukur tipi korozyon başlar. Klorürlü ortamlarda demir çok dar bir potansiyel aralığında pasif halde bulunur. Bu bölge içinde de pasif tabakanın koruyucu özelliği yeterli değildir. Şekil 3.9’da donatının klorürlü ortamlarda bulunması halinde potansiyel – pH değişim grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.9 : Klorürlü ortamlardaki potansiyel – pH diyagramı.

3.4 Korozyon İlerlemesi ve Hızına Etki Eden Faktörler

Korozyonun ilerleme aşamasında çeşitli etkiler mevcuttur. Bunlar bu bölümde açıklanmıştır.

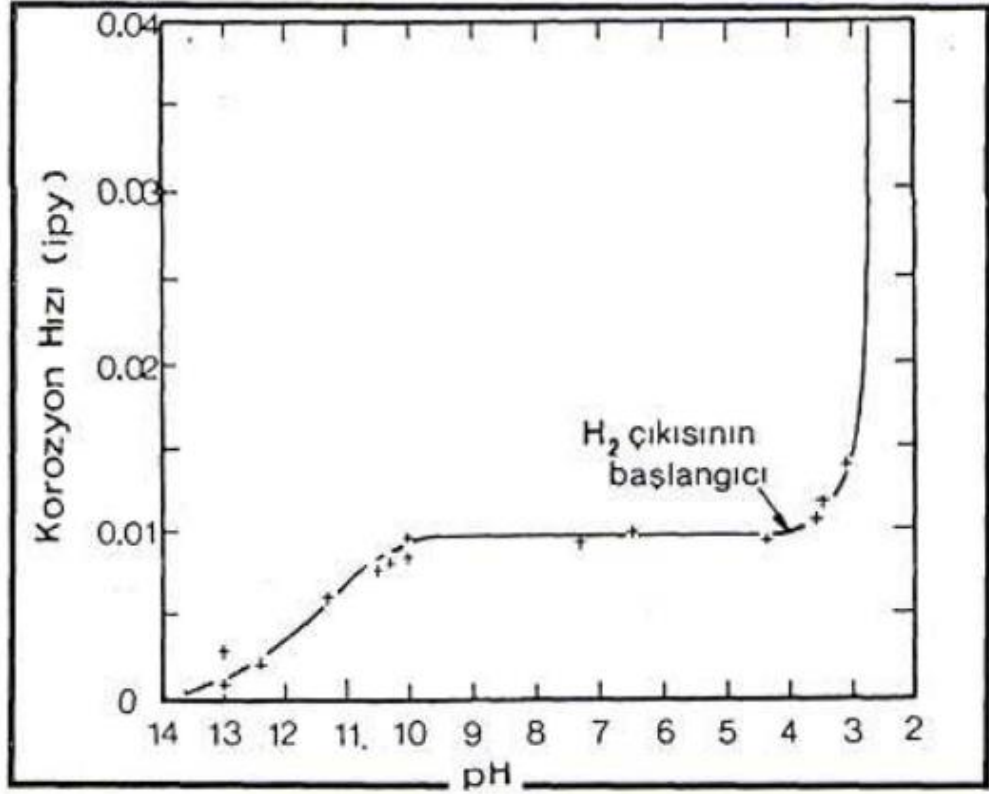
3.4.1 pH etkisi

pH'ın 10'dan büyük olduğu bölgede, demir pasif durumdadır. Bu bölgede demir yüzeyi bir oksit tabakasıyla kaplanarak koruyucu bir kabuk oluşturmaktadır. Beton boşluk suyunun pH'ı 12 ile 13 aralığında olması, betonarme demirlerinin pasif halde olmasını sağlar.

4 ile 10 pH aralığında, korozyon hızı pH'dan bağımsızdır. Bu bölgede korozyon hızını tamamıyla oksijen difüzyonu kontrol eder .

pH'nın 4'ten küçük olduğu bölgede ise, demir hidrojen çıkışıyla şiddetli korozyona uğrar. Bu bölgede oksijen difüzyonunun bir etkisi olamaz. Korozyon hızı, katotta hidrojen çıkışının etkisi altındadır.

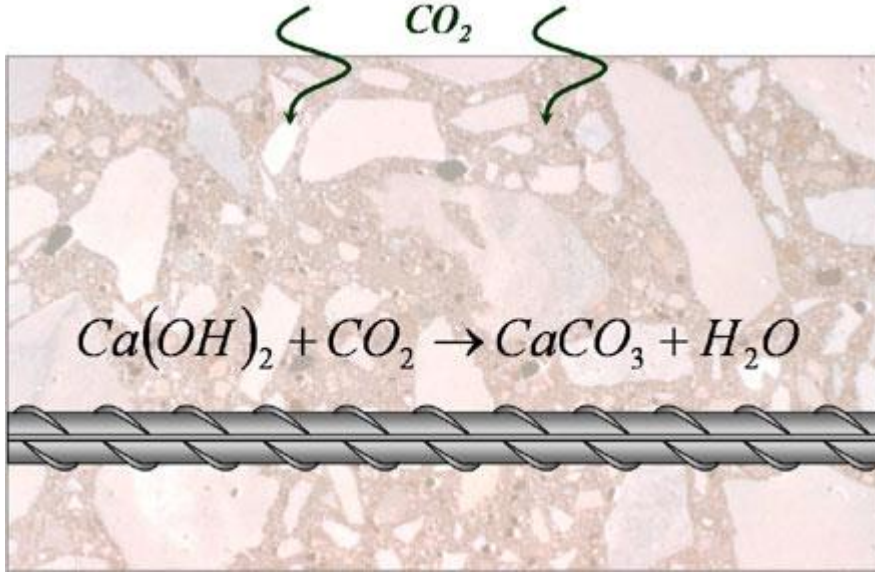
Şekil 3.10 korozyon hızının pH ile değişimini ifade eden grafiği içermektedir.



Şekil 3.10 : Korozyon hızının pH ile değişimi [20].

3.4.2 Karbonatlaşma etkisi

Yukarıdaki başlıklarda da açıklanmış olduğu üzere, yüksek alkali özelliği nedeniyle normal betonlar içinde betonarme demirleri pasif halde bulunur. Fakat herhangi bir nedenle pH derecesi düşerse pasiflik bozulur. Beton pH değerinin düşmesine neden olan en önemli olay karbonasyon olayıdır. Karbonasyon, çevre atmosferden beton içine giren karbondioksitin veya (SO_x , NO_x gibi diğer asit anhidridi gazların) beton boşluklarında bulunan serbest kireç ile reaksiyona girmesi ile oluşur (Şekil 3.11). Bu reaksiyon sonucu beton pH derecesi 9'a kadar düşebilir ve betonun pasifleşme özelliği kaybolur.



Şekil 3.11 : Betondaki karbonasyon olayı.

Karbonasyon olayı beton yüzeylerinde başlar ve zamanla parabolik olarak azalan bir hızla beton derinliklerine doğru iner. Penetrasyon hızı her şeyden önce betonun fiziksel özelliklerine bağlıdır. Yüksek kaliteli ve düşük poroziteli betonlarda karbonasyon etkisi çok azdır. Çevre atmosfer koşulları da karbonasyon olayında etkili olur. Sıcak ve kuru ortamlarda bulunan betonlarda karbonasyon olayı daha etkilidir. Ancak penetrasyon hızı en kötü koşullarda bile ortalama 1 mm/yıl'dan daha azdır. Betonarme demirlerinin üzerinde bulunan pas payının ortalama 5 cm olduğu göz önüne alınacak olursa karbonasyon olayının pratik açıdan önemli bir sorun yaratmadığı ortaya çıkar. Şekil 3.12'de karbonasyona uğramış bir metal gösterilmiştir.

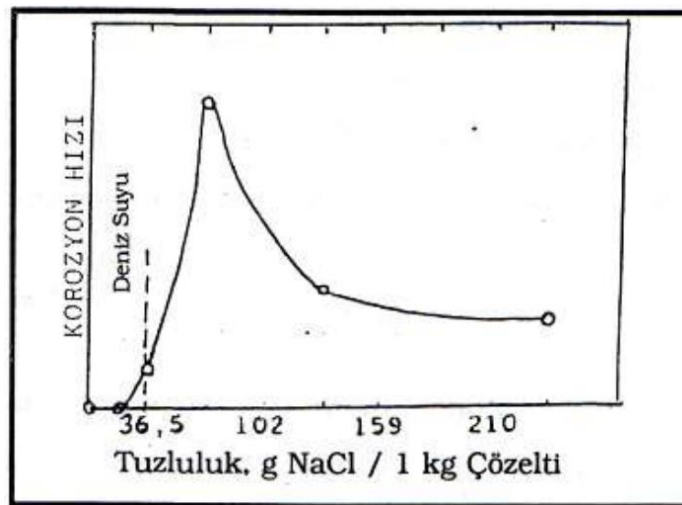


Şekil 3.12 : Karbonasyona uğramış metal.

3.4.3. Klorür iyonu etkisi

Betonarme demirlerinin korozyonuna etki yapan en önemli faktör klorür iyonudur. Hiçbir kirlenici, betonarme demirlerinin korozyonunda klorür iyonu kadar etkili değildir [21]. Klorür iyonu beton içine iki yolla girer. Bunlardan birincisi ve önlenabilir olanı, beton karışımı hazırlanırken agrega, çimento, karışım suyu ve çeşitli katkı maddeleri ile giren klorür bileşikleridir. İkincisi ve pratikte daha sık rastlananı beton sertleştikten sonra çevreden beton içine difüzlener klorür iyonlarıdır. Bunun için betonun çatlamış olması da gerekmemektedir. Betonarme demirlerinin korozyonu üzerine başlangıçta ve sonradan giren bu klorürlerin etkisi farklıdır. Başlangıçta beton içine giren klorür iyonlarının bir kısmı, çimento hidratasyonu sırasında çimento klinker bileşiklerinden tri kalsiyum alüminat ile reaksiyona girerek suda çözünmeyen bir bileşik olan Friedel tuzunu ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6(\text{Cl}, \text{OH}) \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) oluşturur. Böylece klorür iyonunun bir kısmı bağlanmış olur. Bu bağlı klorürün pasifliği bozucu etkisi yoktur. Korozyon üzerine beton boşluk suyu içinde çözünmüş halde bulunan klorür iyonları etkili olur.

Çözelti içinde sodyum klorür konsantrasyonu arttıkça, korozyon hızı artar. Bu artış NaCl konsantrasyonu 75 g NaCl / 1 kg çözelti değerinde bir maksimuma ulaşır. Bundan sonra tuz konsantrasyonu arttığı halde korozyon hızının azaldığı görülür. Bunun nedeni tuz konsantrasyonunun fazla olması durumunda oksijen çözünürlüğünün azalmasıdır, çözelti içinde yeteri miktarda oksijenin bulunmaması korozyon hızını düşürür. Ancak beton içinde tuz konsantrasyonu arttıkça korozyon hızı artar. Şekil 3.13 bu değişimi anlatan bir grafiği içermektedir.

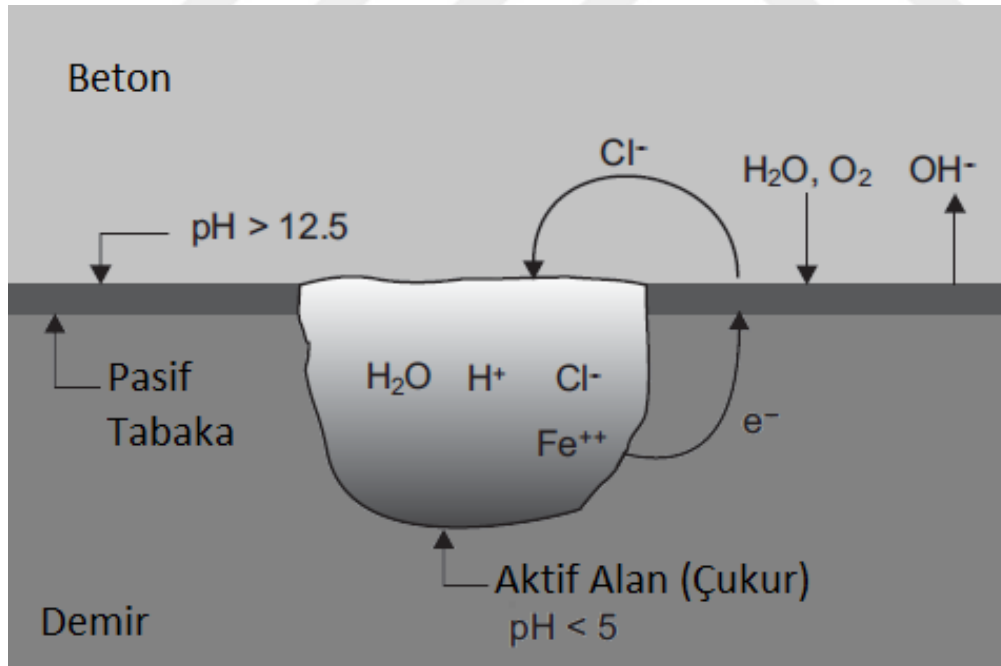


Şekil 3.13 : Korozyon hızının tuzluluk oranı ile değişimi [20].

Beton içinde bulunan klorür iyonlarının pasifliği bozucu etkisi şu şekilde açıklanmaktadır: Klorür iyonu elektronegativitesi yüksek bir iyondur. Bu nedenle metal yüzeyinde oksijen ve hidroksit iyonlarından daha sağlam şekilde absorbe edilir. Absorbe olan bu klorür iyonları korozyon sonucu oluşan demir iyonları ile birleşerek demir klorür halinde çözeltiye geçer. Böylece metal yüzeyinde $\text{Fe}(\text{OH})_2$ çökmesi ve pasif filmin oluşması önlenmiş olur. Bu bölgede korozyon olayı artık oto-katalitik olarak devam eder. Çünkü çözelti içine giren demir klorür su ve oksijenle birleşerek pası oluştururken, klorür iyonu aşağıdaki reaksiyonlar ile yeniden serbest hale geçerek çözelti içine karışır.



Açığa çıkan klorür iyonları yeniden metal yüzeyinde absorbe edilerek o bölgede korozyonun daha hızlı şekilde yürümesine ve kısa sürede çukur oluşmasına neden olur (Şekil 3.14) [15].



Şekil 3.14 : Klorür etkisiyle donatıda çukur oluşması.

Çevreden beton içine difüzlener klorür iyonlarının pasif halde bulunan betonarme demirleri üzerindeki pasif tabakayı bozarak korozyona neden olması şu şekilde açıklanır: Klorür iyonu su içinde çözünmüş olarak beton kılcal çatlaklarından veya

boşluklarından ilerleyerek belli bir süre içerisinde yüzeye en yakın olan betonarme demirine ulaşır. Burada metal yüzeylerinde bulunan pasif tabakayı geçerek metal yüzeyinde absorblanır.

Betonarme demirlerinin potansiyeli pasif halde iken -0,200 Volt'dan daha pozitifdir. Ancak klorür iyonlarının adsorbe edilmesi ile betonarme demirlerinin potansiyelinde negatif yönde artış olur. Böylece yüzeye yakın olan betonarme demirleri anot olurken alt kısımda kalan ve klorür iyonlarının erişemediği demirler katot olur. Metalik bağlantı yoluyla anottan katoda doğru bir elektron akımı başlar. Bu iki betonarme demiri arasında bir korozyon hücresi oluşur. Yüzeye yakın olan betonarme demirleri anot olarak çözünür.

Klorürsüz bir çözelti içinde gerçekleşen bir korozyon olayında anot bölgesinde çözünen demir iyonları demir hidroksit halinde metal yüzeyinde çökelediği halde, ortamda klorür bulunması halinde çökeltme ve metalin pasifleşmesi söz konusu olmaz. Aksine hidrojen iyonları çıkışı nedeniyle korozyon hızlanarak devam eder. Korozyon hızı katot bölgesine oksijen difüzyon hızının kontrolüne girer ve katotta oksijen redüksiyon reaksiyonu için harcanan elektronlara eşdeğer miktarda demir çözeltiye geçer.

Çizelge 3.3'de normal ve ön gerilimli betonlarda korozyon için zararlı sayılan klorür yüzdeleri farklı standartlar için verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Korozyon için zararlı sayılan klorür yüzdeleri.

Standart	Normal Beton % Cl	Ön Gerilimli Beton % Cl
American Concrete Ins.	0,15	0,06
British Code (Cp – 110)	0,35	
Norwegian Code (NS – 3474)	0,60	0,002*
ASTMC- 114	0,20	0,08*

*Asitte çözünen klorür

Çizelge 3.4’de çimentodaki Cl^- iyonu oranına göre korozyon aktivite değeri değerlendirilmesi verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Korozyon aktivitesinin Cl^- iyonu oranına göre değerlendirilmesi.

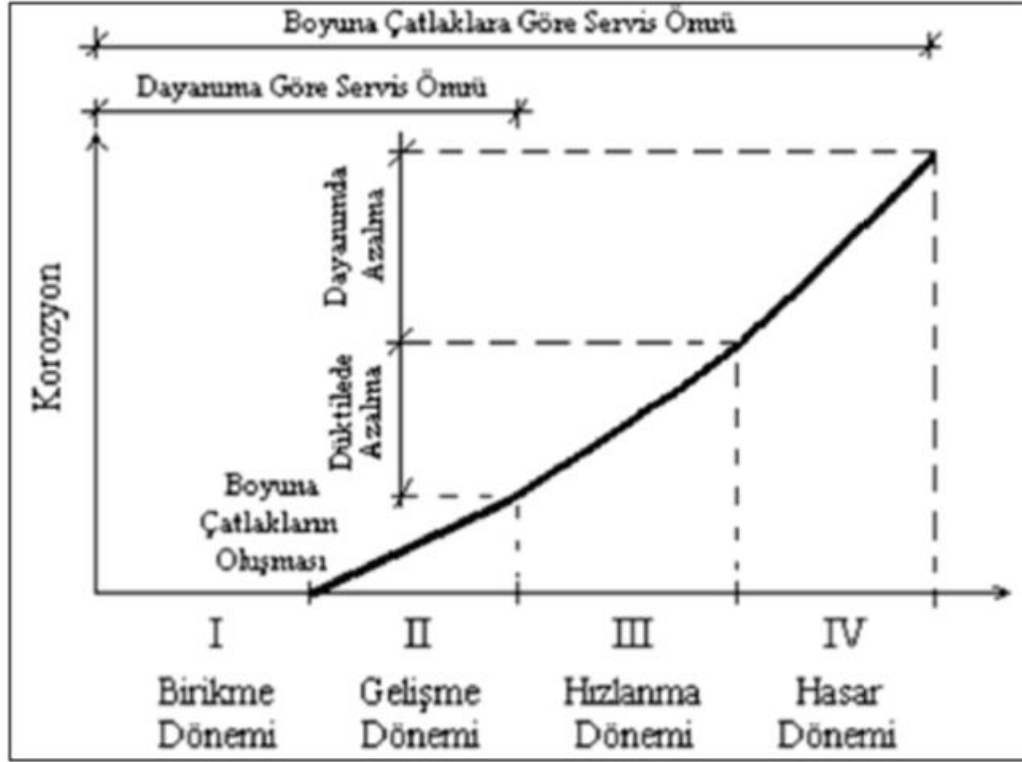
Çimento ağırlığının %’si olarak eşik değeri	Korozyon durumu	Korozyon aktivite seviyesi
$\text{Cl}^- < \% 0,3$	Düşük korozyon durumu	A
$\% 0,3 < \text{Cl}^- < \% 1$	Orta derece korozyon durumu	B
$\text{Cl}^- \geq \% 1$	Yüksek korozyon durumu	C

Çizelge 3.4’de görüldüğü gibi betonun içerisindeki klor iyonun oranının artmasıyla korozyon şiddeti artmaktadır. Standartlarda donatının korozyonuna neden olan klor miktarı çimento veya agrega ağırlığının yüzdesi veya bir m^3 betonda kg ($0,6 - 0,9 \text{ kg/m}^3$) olarak verilmektedir.

Bu miktarın artmasıyla klorür tuzları higroskopik özelliğinden dolayı havadan daha çok nem alarak betonun iletkenliğini artırır ve korozyonu hızlandırır. Ancak donatıdaki korozyonunun belirlenmesinde serbest klorür miktarının bilinmesi tek başına yeterli değildir; çünkü donatı – beton ara yüzündeki boşluk suyunda $\text{Cl}^- / \text{OH}^-$ molar oranının kritik bir değer olan 0,6 değerini aşması durumunda koruyucu film tabakası bozulur ve donatı korozyona karşı korumasız hale gelir.

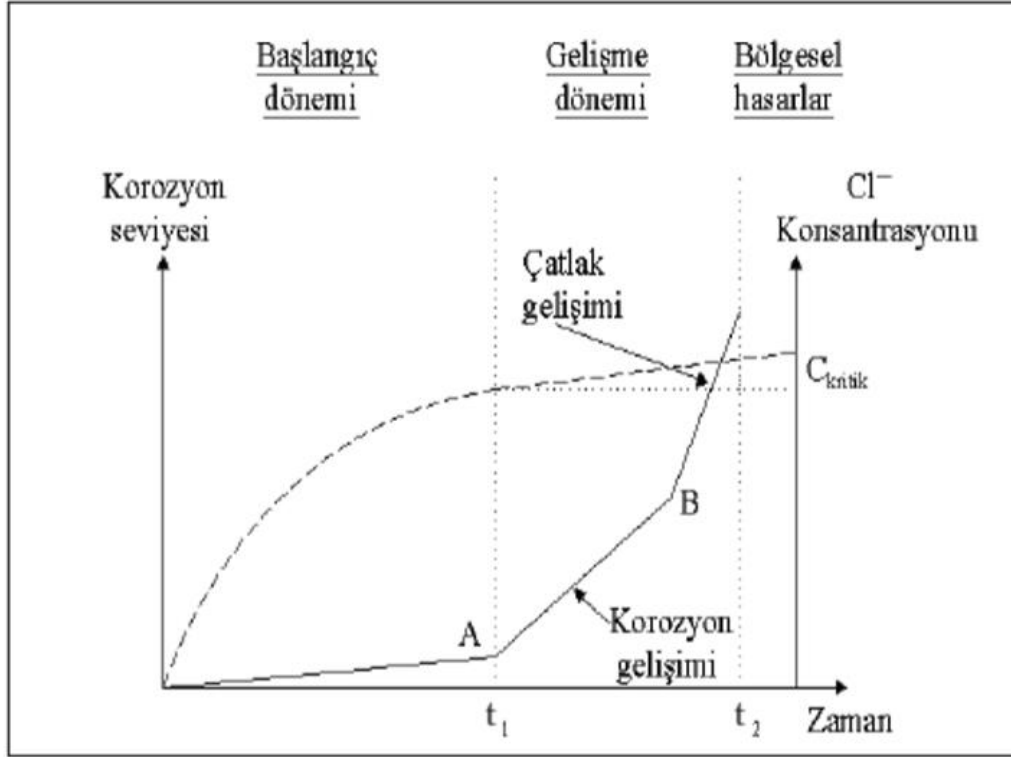
Betonarme elemanların donatı korozyonuna bağlı olarak servis ömrünün belirlenmesinde dayanımın esas alındığı yöntemde; Şekil 3.15’de görüldüğü gibi ilk dönem; klor iyonlarının betona sızması ve donatı çevresinde birikmesi aşamasıdır ve bu dönem, “Birikme Dönemi” olarak isimlendirilir, eğer klor betona karışım aşamasında katılırsa, bu aşama ortadan kalkar. İkinci dönemde; donatı, klor iyonları nedeni ile korozyona uğrar, betonda çatlaklar oluşur, bu döneme “Gelişme Aşaması” denir. Dayanıma göre servis ömrü sona ermiştir. Üçüncü dönem; gelişme aşamasında oluşan çatlaklar nedeni ile klor difüzyonu artar ve korozyon hızlanır, betonda

parçalanmalar başlar, beton dayanımında azalma görülür, bu “Hızlanma Aşaması”dır. “Hasar Dönemi” olarak isimlendirilen dördüncü dönemde; donatıda korozyonun ilerlemesi ile kesit alanında azalma olur, boyuna çatlaklar artar, beton dayanımında azalmalar belirgin hale gelir, boyuna çatlaklar bakımından servis ömrü sona erer.



Şekil 3.15 : Klorürlerin neden olduğu korozyon aşamaları.

Betonarme yapının servis ömrünün korozyon seviyesi ve klor konsantrasyonu bakımından değerlendirildiği Şekil 3.16’da da görüldüğü üzere çatlakın oluştuğu başlangıç dönemi (t_1) ve çatlakın büyüdüğü gelişme dönemi (t_2) olmak üzere iki ana dönemde ele alınabilir. Başlangıç dönemi (t_1), boşluklu malzemeye klorür sızmasına ve klorür iyonlarının donatı etrafında birikimine karşılık gelir ve bu süreç, betonun geçirirliğine, sürekliliğine ve kalınlığına bağlı olarak korozyonu başlatmak için gerekli klorür konsantrasyonundan etkilenmektedir. Gelişme dönemi (t_2) ise, klorür iyonlarının donatıya ulaşmasına, klor konsantrasyonunun kritik düzeye ulaşması ve çelik yüzeyin pasifliğinin bozulması anlamına gelmektedir. Gelişme döneminden sonra korozyonun ilerlediği ve betonarme elemanda bölgesel hasarların oluştuğu görülmektedir.



Şekil 3.16 : Betonarme yapının servis ömrünün Cl^- konsantrasyonu ve korozyon seviyesi ile değerlendirilmesi.

Yukarıda da belirtildiği gibi betonarme elemanlarda donatı korozyonunun gözlenen en belirgin göstergesi, beton örtünün çatlamasıdır ve bu olay, korozyon başlangıç süresi için esas alınan önemli parametrelerden biridir. Örneğin deniz yapılarında beton yüzeyinde ilk çatlağın oluştuğu an kritiktir ve onarım kaçınılmazdır. Bu amaçla, bağıntısında görüldüğü gibi ilk çatlağın süresi (t) esas alınarak, betonda 0,3-0,4 mm'lik çatlağa neden olan donatı çapındaki azalmaya ilişkin basit nümerik modeller geliştirilmektedir.

$$t = \frac{\text{Donatı çapındaki kayıp (mm)}}{\text{Korozyon hızı } \left(\frac{\text{mm}}{\text{yıl}}\right)} \quad (3.4)$$

Donatı korozyonu ile ilgili bağıntıların çıkarılmasında Faraday kanunundan yararlanılarak donatı çapında meydana gelen kayıp ile elektrokimyasal akım verileri arasında matematiksel ilişkiler kurulmaktadır. Bu bağıntıda W_L ; ağırlık kaybı (g), i.t; akım şiddeti.zaman (C:Coulomb), M_W ; elektro aktif metalin molekül ağırlığı, n; elektrokimyasal reaksiyonda alınıp verilen elektron sayısı, F (96487 C/g-eşdeğer ağırlık); Faraday sabitidir.

$$W_L = \frac{i.t.Mw}{n.F} \quad (3.5)$$

Andrade ve arkadaşları tarafından, donatı çapındaki kaybın belirlenmesi için Faraday Kanununu esas alan bağıntısı önerilmiştir. Bağıntıda, $\Delta\phi_s$ (mm); donatı çapındaki kayıp, I_{corr} ($\mu A/cm^2$); korozyon akım yoğunluğu, t (yıl); zaman, a ((mm/yıl)*(cm²/ μA)) birim dönüştürme çarpanıdır. Betonda kritik çatlama süresinin (t_{cr}) önceden tahmini için laboratuarda hızlandırılmış deneylere gereksinim vardır.

$$\Delta\phi_s = a.I_{corr}.t \quad (3.6)$$

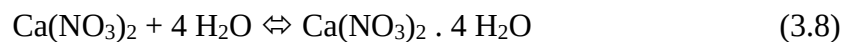
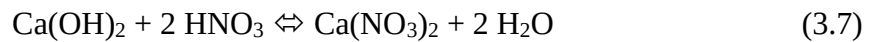
Şekil 3.17’de donatı çapındaki kayba bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 3.17 : Donatı çapındaki kayba örnek.

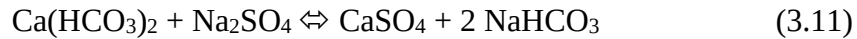
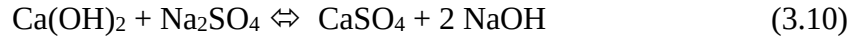
3.4.4 Nitrat etkisi

Nitrik asit porlarındaki $Ca(OH)_2$ ile aşağıdaki gibi tepkimeler vererek “Duvar Güherçilesi” denilen yapıyı oluşturur [19].

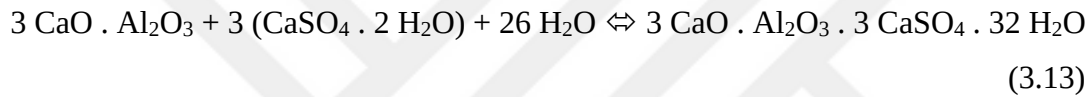
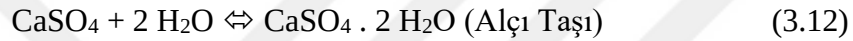


3.4.5 Sülfat etkisi

Katı sülfat tuzları betona etki etmediği halde, çözelti şeklinde bulunan bu tuzlar sertleşmekte olan çimento ile reaksiyon verebilirler. Ortamda bulunan SO_4^{-2} iyonları, yapıdaki CaCO_3 , $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile önce alçı taşı, daha sonra da çimento bünyesindeki trikalsiyum aluminat (C_3A) ile Ettringite tuzu oluşturabilirler [19].



CaSO_4 2 mol su bağlayarak kristalleşirken hacim büyümesi olur.

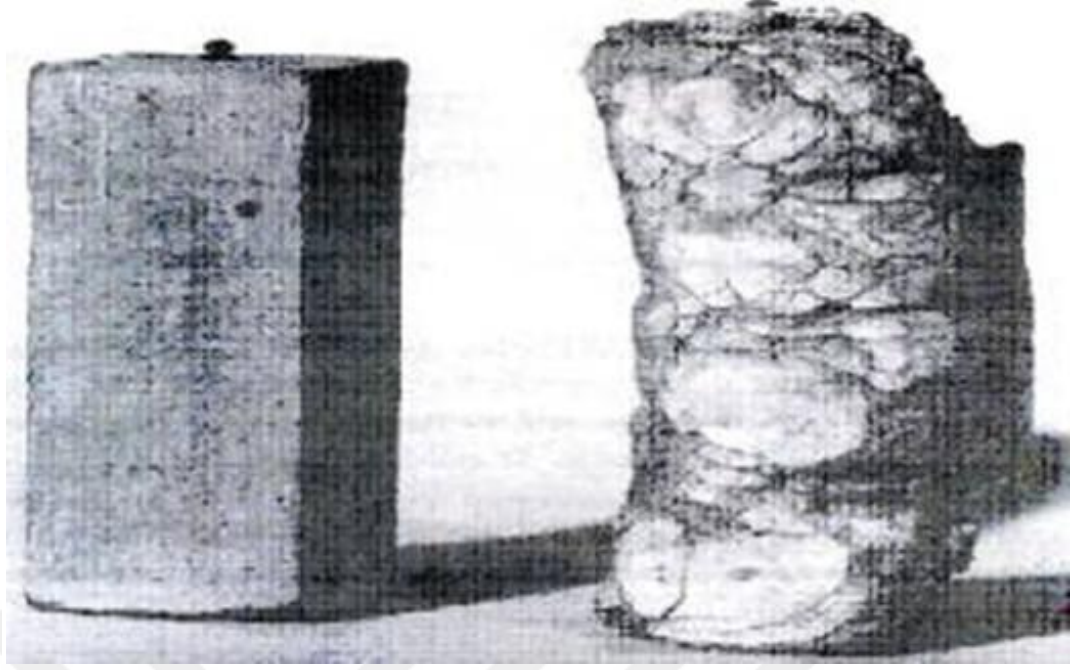


Beyaz renkte ve iğne kristalli olan bu tuza “Candelot veya Ettringite Tuzu” denir. Bünyesinde 32 mol su bulundurduğundan; hacim büyümesi çok fazladır, beton içerisinde zamanla büyük çatlaklar oluşturur.

Çizelge 3.5’te suda bulunan sülfat iyonu miktarının korozyona olan etkisi açıklanmış, Şekil 3.18’de de sodyum sülfat etkisi ile hasara uğramış bir betonarme eleman gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 : Suda bulunan sülfat iyonu oranına göre korozyon etkisi.

Suda bulunun sülfat iyonu (mg/L)	Korozyona etkisi
200 - 600 mg/L	Zararlı etki
600 – 3000 mg/L	Kuvvetli zararlı etki
>3000 mg/L	Çok kuvvetli zararlı etki



Şekil 3.18 : Sodyum sülfat etkisi ile oluşan hasar.

3.4.6 Sülfür etkisi

Kanalizasyon, bataklık ve atık su ortamlarında bulunan hidrojen sülfür diprotik asit olduğundan H_2S , HS^- ve S^{2-} iyonları dengesi ortamın pH'sı ile yakından ilgilidir. Sülfürler, $7 < pH < 10$ arasında çoğunlukla HS^- ve S^{2-} yapısında, $pH < 7$ ise ağırlık olarak H_2S halinde bulunur. H^+ iyonu derişimi arttırılması, HS^- ve S^{2-} iyonları derişimini azaltarak H_2S oluşumuna yol açacaktır.



3.5 Korozyon Sonuçları

Betonarme yapılarda korozyonun sonucunda yapıların dayanımında azalma olur. Bu betonarme yapıların genel davranışları ve mekanik özelliklerin değışiklikleri ile açıklanabilir [22].

Demir-beton bağlantı mekanizması

Yük taşıma kapasitesi

Süneklik

Kayma ve burulma mukavemeti vb.

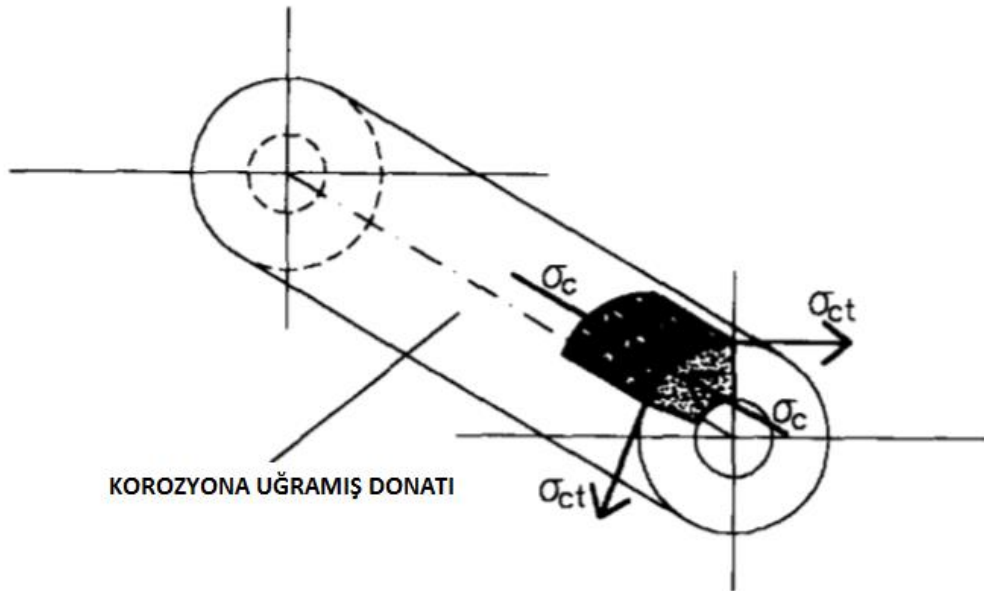
Hasarın kapsamı ve yapıların davranışları üzerindeki sonuçları, var olan yapının onarımdan önce güvenlik ve güvenilirliğini belirlemek için ön analizin bir parçası olarak belirlenmelidir.

Korozyondan kaynaklanan hasar çatlaklarla kendini belli eder. Dolayısıyla, aşınmış donatıların etrafındaki beton, iki eksenli gerilmelere maruz kalır ve çekme gerilmelerinin bir sonucu olarak basınç gerilmeleri boyuna dayanımı önemli ölçüde azaltır [23].

Çekme basınçları nedeniyle çatlamış betonarme elemanın, tek eksenli olarak basınca uğrayan betona göre daha düşük mukavemet ve rijitlik gösterdiği görülmüştür. Pasa bağlı çatlakların beton üzerinde plastikleştirici bir basınca sebep olduğu düşünülür. Bu durum, betonarme elemanın mukavemet, süneklik ve yük-deformasyon tepkisini belirgin şekilde etkiler.

Şekil 3.19’da korozyona uğramış bir donatı yakınındaki gerilmeler gösterilmiştir.

Şekil 3.20’de korozyona uğramış donatının yakınında bulunan genel bir P noktasındaki gerilme durumu göz önüne alındığında Mohr dairesindeki U-T gerilme durumunun betonun sınır mukavemet eğrisine teğet hale gelmek için 2’den 3’e nasıl değiştiğini gözlemliyoruz.



Şekil 3.19 : Korozyona uğramış donatı yakınında olan bir noktadaki gerilmeler.

• İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, taze karıştırılmış beton ya da harcın kolay ve homojen bir şekilde karıştırılabilir, dökülebilir, sıkıştırılabilir ve yüzeyinin bitirilebilir olmasının ölçütü olan bir özelliktir. İşlenebilirlik, yüzey bitirme de dahil olmak üzere, inşa sürecinin kalitesini belirleyen bir çok hususta etkili olduğundan dolayı önem arz eden taze beton özelliğidir. Yetersiz işlenebilirlik, yüzey bitirme işlemlerinin zorlaşmasına ve yüzeyin parçalanmasına neden olabilecek çatlakların oluşmasına sebep olabilir.

• Beton malzemelerinin ayrışması

Ayrışma, iri agreganın özellikle taşınma ya da sıkıştırma sırasında beton karışımının harcından ayrılma eğilimi olarak tanımlanmaktadır. Ayrışma bir harmanda belirli bir kısımda çok az, kalan kısımda ise çok fazla miktarda iri agreganın bulunmasına sebep olmaktadır. Özellikle beton üstyapıların dökümü sırasında dayanım kaybı, köşe çökmesi, parçalanma, kabarcıklanma ve pullanma gibi sorunlara sebep olduğu için önemlidir.

- Ayrışmayı etkileyen faktörler

Ayrışma; öncelikli olarak sürekli granülometrilik agregası sistemiyle önlenemez, puzolanik malzemeler ve çimento dahil olmak üzere, ince malzeme miktarının artırılmasıyla azaltılabilir.

• Terleme

Terleme, yeni yerleştirilmiş betonun yüzeyinde sıkıştırılma sonrası ve priz alma öncesinde görülen su katmanıdır. Terleme ayrıca su kazanımı, damlama ya da yoğunlaşma olarak da adlandırılabilir. Terleme bir karışımdaki katı tanelerin (çimento ve agregası) çökmesi ve aynı zamanda suyun yukarı yönde hareket etmesinden kaynaklanmaktadır. Terleme suyu, betonun kendi içerisinde, iri agregası tanelerinin ya da donatıların altında birikebilir. Suyun iri agregası tanelerinin altında birikmesi beton dayanımının düşmesine (agregası-harç zayıflamasından dolayı), donatıların altında birikmesi ise harç ile donatılar arasındaki aderansın zayıflamasına ve korozyonun tetiklenmesine sebep olmaktadır. Terleme ince malzeme miktarının artırılması ve hava sürükleyici ve/veya su azaltıcı katkıların kullanılmasıyla azaltılabilir [25].

- **Priz alma**

Priz alma betonun plastik halden katı hale dönüşmeye başladığı evredir. Diğer bir deyişle betonun işlenebilirliğini kaybetmesi ve sertleşmesidir. Priz alma bağlayıcı malzemelerin kimyasal özelliklerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Priz hızlandırıcı ve priz geciktirici katkıları priz alma süresinde etkili olabilmektedir. Yalancı priz ve ani priz, betonun karıştırma işleminden sonraki ilk birkaç dakika içerisinde katılaşması olup, çimentonun alüminat/sülfat bileşenlerinin kontrol edilemeyen reaksiyonları sonucunda oluşmaktadır.

- **Dayanım ve dayanım artışı**

Dayanım belirli yaştaki bir betonun gerilmelere ya da kuvvetlere karşı koyabilme yeteneğidir. Beton genel olarak basınç yüklerine karşı dayanıklıdır. Bu durum betonun üzerindeki ağır yüklemelere dayanabileceğinin göstergesidir. Ancak, beton çekme gerilmelerine karşı çok zayıftır. Bu durum betonun ayrılması yönünde uygulanan yüklere karşı oldukça zayıf olduğunu göstermektedir. Çoğu döşemede görülen göçmeler basınçtan ziyade eğilme yönündedir. Bu nedenle, ihtiyaç duyulan döşeme kalınlığının belirlenmesinde betonun eğilme gerilmesi ve eğilmede çekme dayanımı (kopma modülü) değerleri kullanılmaktadır. Beton üstyapıların önemli dayanım parametrelerinden biri de betonun sürekli olarak tekrarlanan yükleme ve boşaltma çevrimlerine karşı dayanma direnci olarak tanımlanan yorulmadır. Yorulma durumunda, betonda her yükleme durumunda büyüyen küçük çatlaklar oluşmaktadır.

- **Elastisite modülü ve poisson oranı**

Betonun elastisite modülü (E) ya da rijitliği, malzemenin yük altında ne kadar deplasmana uğrayacağını ve çatlak oluşum riskinin bir ölçütüdür. Poisson oranı, yükleme doğrultusuna dik deplasmanın ölçütüdür.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.14)$$

σ : Gerilme

ε : Şekil değiştirme

- **Rötre**

Rötre nem kaybından dolayı betonun boy ya da hacminde görülen azalmadır. Belirli mekanizmalardan dolayı oluşan beton rötresi taze karışımın karıştırılmasından hemen sonra başlamakta ve uzun süre devam etmektedir. Beton rötresi genellikle bir şekilde kısıtlandığından, beton neredeyse her zaman çatlamaktadır.

Kimyasal rötre: Çimentondaki hidratasyondan sonra oluşan ürün hacminin hammaddelerden daha az yer kaplamasından kaynaklanan rötre türü.

Plastik rötre: Betonun priz almaya başlamasından önce oluşan ve temel olarak taze betonun yüzeyinde oluşan nem kaybından meydana gelen rötre.

Kuruma rötresi: Beton prizini alır almaz oluşan rötre.

- **Sıcaklık etkileri**

Beton karışımlarında bulunan çimentonun hidratasyonu ısı açığa çıkarmaktadır. Beton sıcaklığın artmasıyla genişmekte, düşmesiyle büzülmeaktadır. Bu hareketler özellikle ilk 24 saat içerisinde, betonda çatlak oluşum riskini önemli ölçüde arttırabilir. Eğer beton sıcak iken priz almaya başlarsa, sonrasında soğuduğunda önemli ölçüde büzülme gösterecektir. Bu durum çatlak oluşma riskini oldukça arttırmaktadır [17].

- **Geçirimlilik**

Geçirimlilik sıvıların betona nüfuz edebilme kolaylığıdır. Üstyapılarda durabiliteyle ilgili olarak ortaya çıkan hasarların hemen hemen hepsi geçirimsizliğin düşürülmesiyle azaltılabilir ya da durdurulabilir. Bunun sebebi, durabiliteyle ilgili tüm hasarların betonun içerisine taşınan zararlı maddelerle ilgili olmasıdır.

- **Dona dayanıklılık**

Dona dayanıklılık betonun soğuk hava şartlarına dayanabilme yeteneğidir. Soğuk havalara maruz kalan betonlarda çeşitli şekillerde hasar oluşumları görülebilir [26].

- **Donma çözülme hasarı**

Su donduğunda hacmi yaklaşık % 9 oranında artar. Eğer betondaki kılcal boşluklar ve hava boşlukları doygun durumdaysa, bu hacim artışı beton dayanımından daha

büyük basınçların oluşumuna ve betonun çatlamasına yol açarak geçirimliliğini arttırabilir [26].

- Buz çözücü tuzlardan dolayı pullanma

Pullanma buz çözücü tuzlar ve donma çözülme çevrimlerinin etkisiyle ağırlaşan fiziksel bir bozulma şeklidir(Şekil 3.21). Kar ve buzun eritilmesinde kullanılan tuzlar betonun boşluk yapısına sızarak çözeltiye karışmakta ve çözeltinin donmasıyla birlikte hidrolik basınç oluşumunu şiddetlendirmektedir. Ayrıca, suyun buza dönüşmesiyle, tuzlar donma bölgelerinde toplanmaktadır. Donmamış su osmoz etkisiyle (tuz konsantrasyonunun dengeye gelme isteği) bu bölgelere doğru taşınmaktadır. Oluşan bu osmotik basınçlar sebebiyle çatlak oluşumu, pullanma ve ayrışmalar görülebilmektedir [26].

Pullanmanın başlıca sebeplerinden olan hidrolik ve osmotik basınçlara ek olarak, kuruma durumunda kristalleşen tuzlar da basınç oluşumuna sebep olabilir [26].

Bir araştırma, beton için düşük sodyum klorür konsantrasyonlarının (yüzde 2 ile 4) yüksek sodyum klorür konsantrasyonlarına oranla daha zararlı olduğunu göstermiştir [26].

Pullanmanın kontrol edilebilmesi için betonun düzgün bir hava-boşluk sistemine, dayanıklı agregalara ve minimum 28 MPa dayanımına sahip olması ve buz çözücü tuzlara maruz kalmadan önce kuru durumda olması gereklidir [26].



Şekil 3.21 : Buz çözücü tuzların kullanımı sebebiyle pullanmış bir beton yüzeyi.

- D çatlaması

D-çatlaması, bazı agrega tanelerindeki suyun donması sebebiyle görülen genleşmenin sonucunda oluşan bir hasar türüdür. Hasar genellikle derz yakınlarında başlamakta ve D şeklinde çatlak oluşumlarına sebebiyet vermektedir.

- Patlamalar

Patlama sonucunda beton yüzeyinden kopan parçalar, yüzeysel ve koni şeklinde çukurların oluşmasına sebep olmaktadır [26].

• Sülfat Direnci

Sülfat direnci, betonun dışarıdan yapısına nüfuz eden sülfat hücumuna ve saldırı sonucunda oluşan hasara karşı koyabilme yeteneğidir.

Toprak ya da suda aşırı miktarlarda bulunan sülfat uzun yıllar süresince üstyapı betonuna ve diğer yapılara saldırıp tahrip edebilir.

Sülfat sertleşmiş çimento hamurunda hidrate olmuş durumda bulunan trikalsiyum aliminatla (C_3A) reaksiyona girerek ve tuzların beton içerisine sızarak çökmesi neticesinde betonda hasara neden olmaktadır.

• Alkali – silika reaksiyonu

Bazı agrega mineralleriyle, betonda bulunan ve yüksek pH'a sahip boşluk çözeltisi arasında oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan alkali-silika reaksiyonu (ASR) beton için potansiyel bir tehlike arz etmektedir. Zamanla, bu kimyasal reaksiyonların ürünü olan ve ASR jeli olarak adlandırılan jelatinimsi alkali-silika su emerek genleşir ve betonda çatlak oluşumuna sebep olarak servis ömrünü azaltır [27].

• Aşınma direnci

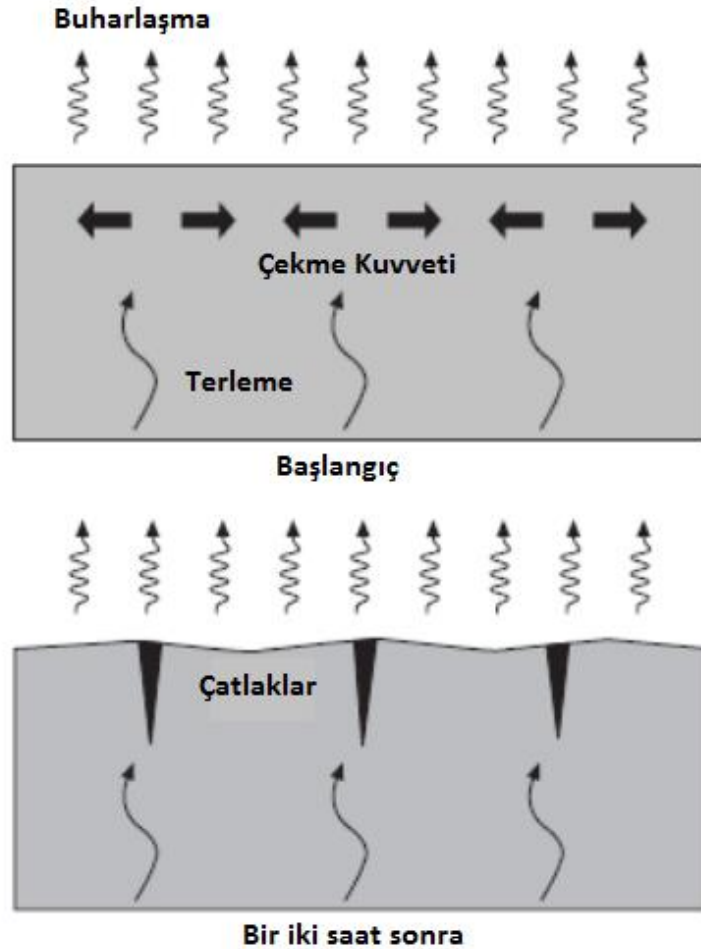
Aşınma direnci betonun yüzey aşınmasına dayanabilme yeteneğidir. Üstyapı yüzeyleri uygun araç kontrolünün sağlanabilmesi için yeterli kayma direncine ve yüzey dokusuna sahip olmalıdır. Bu sebeple, beton yapıların yüksek aşınma direncine sahip olmaları önemlidir [28].

- **Erken yaş çatlakları**

Temel olarak, uygulanan çekme gerilmeleri betonun çekme dayanımını aştığında çatlama meydana gelmektedir. Erken yaş çatlakları ile kastedilen beton üstyapısının trafiğe açılmasından önce oluşan çatlaklardır. İleri yaş çatlakları ise trafik yükleri ve malzemelerle alakalı gerilmelerin de dahil olduğu çeşitli mekanizmalar nedeniyle oluşmaktadır (Dona dayanıklılık, sülfat direnci, D-çatlaması ve alkali-silika reaksiyonu).

- **Plastik rötre çatlakları**

Plastik rötre çatlakları, beton plastik durumunda iken beton yüzeyindeki suyun buharlaşarak yüzeyin kuruması sebebiyle oluşmaktadır (Şekil 3.22). Bu tür çatlaklar priz alma öncesi, beton plastik haldeyken meydana gelir. Genelde rüzgar doğrultusuna dik, 0.3 ile 10 m aralıklı ve oldukça sığdır.



Şekil 3.22 : Betondaki terleme ile yüzeye çıkan suların buharlaşması ile oluşan plastik rötre çatlağı.

Plastik rötre çatlakları su ve kimyasal maddelerin betona sızmasına izin vermekte olup bu sebeple geniş alanlara yayılan çatlaklar uzun vadede problemlere sebep olabilir.

Betonun plastikliğini koruduğu durumlarda, plastik rötre çatlakları tekrardan vibrasyon uygulamasıyla kapatılabilir.

- Yüzey çatlakları

Harita şeklinde çatlama, genel olarak elle yapılan dökümlerde yüksek oranda yüzey bitirme gerektiren ve/veya yetersiz bakım yapılan durumlarda görülmektedir. Beton prizini aldıktan sonra; genellikle yerleştirmeden sonraki gün ya da ilk hafta sonunda görülmektedir.

Bu tip çatlaklar genellikle onarım gerektirmez. Çatlaklar estetik açıdan kötü görüntü oluşmaması amacıyla elmaslı taşlama yöntemiyle ortadan kaldırılabılır. Şekil 3.23’de yüzey çatlaklarına örnek gösterilmiştir.



Şekil 3.23 : Beton yoldaki yüzey çatlakları.

- Gelişigüzel enine çatlaklar

Rastgele enine çatlaklar (Şekil 3.24), beton prizini aldıktan sonra ancak çekme gerilmelerine dayanacak yeterli dayanımı kazanmadan önce oluşmaktadır. Donatısız betonda, bu gelişigüzel çatlakların sayısı ve yeri büzülme derzleri yardımıyla kontrol edilebilmektedir. Çalışmayan rastgele enine çatlaklar testere ile kesilmeli ve derz dolgu ile kapatılmalıdır. Ancak, çalışan ve derz ya da başka çatlaklara yakın bulunan enine çatlaklar yapısal göçmenin engellenmesi bakımından tüm derinlik boyunca onarılmalıdır.



Şekil 3.24 : Beton yolda oluşan gelişigüzel enine çatlaklar.

- Gelişigüzel boyuna çatlaklar

Rastgele boyuna çatlaklar (Şekil 3.25), beton prizini aldıktan sonra ancak çekme gerilmelerine dayanacak yeterli dayanımı kazanmadan önce oluşmaktadır. Eğer tek seferde bir şerit genişliğinden daha geniş donatısız beton yerleştiriliyorsa, şeritler arasında çatlakların oluşacağı yerlere boyuna derzler kesilmesi ya da yapılmalıdır.



Şekil 3.25 : Beton yolda oluşan gelişigüzel boyuna çatlaklar.

- Köşe kırılmaları

Köşe kırılmaları üstyapının taşıyabileceğinden daha fazla yüklemeye maruz kaldığı durumlarda ve/veya temel destek kaybı olduğunda oluşmaktadır (Şekil 3.26). Köşe kırılması priz alma sonrası, üstyapı kullanıma açılmadan önce oluşabilir. Ancak, köşe kırılması, zemin oturması, erozyon, don kabarması, genleşme gösteren zeminler ya da aşırı kıvrılma ve yamulma gibi üstyapının destek kaybına uğradığı sebeplerden dolayı herhangi bir zamanda görülebilir. Köşe kırılmaları genellikle döşemenin derinliği boyunca tamirini ve temelin stabilizasyonunu gerektirir.



Şekil 3.26 : Beton yoldaki köşe kırılmaları.

3.7 Beton Yollarda Buz Çözücüler

Beton yolda korozyona sebep olan etmenlerden biri de kar ve buz çözücü olarak kullanılan kimyasallardır.

Kar ve buz kontrolünde etkili bir çözüm bulmak, değişkenlerin çokluğundan dolayı kolay değildir. Farklı hava durumları, üstyapı sıcaklığı, üstyapı tipi, ortam sıcaklığı, trafik hacmi, taşıt hızları, rüzgar yönü ve hızı, yağış tipi, topografya, göl veya okyanus etkisi, güneş görmeyen bölgeler bu faktörlerdendir. Bu etkenlerin çeşitliliğinden dolayı kar ve buz mücadelesinde farklı kimyasallar değişik yöntemler ile kullanılır. En çok kullanılan kimyasallar CaCl_2 , MgCl_2 , CMA ve NaCl 'dir [29].

Portland çimentosundan yapılan beton, geçirgen bir hidratlı portland çimento karışımı ile birleştirilmiş mineral agrega ve kum karışımıdır. Beton yol yük transferi veya taşıma gücünün artırma amaçlı gömülü çelik içerebilir. Buz çözücü kimyasallar, beton bir yapının tüm bileşenleri ile zararlı etkileşime girebilir. En basit ifadeyle bu etkileşim ilk olarak tuzun suda ayrıştığı (örn., NaCl , suda ayrı sodyum (Na) ve klorür (Cl) iyonları haline gelir) iki aşamalı bir süreçtir ve ikincisi, bu bağımsız iyonlar, çeşitli şekillerde betonarme yapıya nüfuz eder. Bunlar;

- Magnezyum (Mg) ve kalsiyum (Ca) iyonları sertleşmiş çimento hamuru ile etkileşerek genişleyebilen veya sertleşmiş çimento hamurunun zayıflamasına neden olabilecek çeşitli reaksiyon ürünleri oluştururlar.
- Buz çözücüler, tasarım gereği betondaki mevcut suyu doğrudan doğruya uygulanan tuzlu sudan veya karı ve buzu eriterek arttırır. Artan su, soğuk sıcaklıklar ile birleşince, katılaşmış çimento hamurunun bileşenlerini kusmasını ve böylelikle hamurun zayıflamasını veya zararlı bileşikleri oluşturmak için buz çözücü maddelerin iyonlarıyla birleşmesini arttırır.
- Klorür iyonları beton içerisinden geçer ve derinde birikir. Klorür iyonlarının kritik bir konsantrasyonu donatının derinliğinde elde edilirse demirin korozyonuna neden olabilir.

Çözeltideki tuzlar gözenekli beton mikroyapısına nüfuz eder. Daha sonra buharlaşma beton içinde tuz kristali büyümesine neden olabilir ve bu da genişleyebilen kuvvetlere neden olabilir. Bu sadece soğuk hava olayı değildir; deniz veya endüstriyel ortamlarda da meydana gelebilir [30].

Beton yoldaki tehlike açısından önemli bir faktör de tuzların donma-çözünme döngülerinin sayısı üzerindeki etkisidir. Hava sıcaklıkları 0°C ile dönerse ancak tuz çözeltisinin donma sıcaklığının üzerinde kalırsa, çevrim sayısı azalacaktır. Bununla birlikte, hava sıcaklıkları düştükçe, tuzların varlığı döngü sayısını artırabilir. Mevsime bağlı olarak, tuzların toplam çevrim sayısına etkisi az olabilir.

Bazı kireç taşı agregalarına klorür tuzları saldırılarına maruz kalabilir. Tipik olarak bunlar, D çatlamasına eğilimli agregalardır [31].

Beton yoldaki derzlerde meydana gelen sıkıntılar için fiziksel veya kimyasal buz çözücü saldırısı için tek bir tanımlayıcı durum olmamakla birlikte bazı gözlemler vardır. Başlangıçta, sıkıntı derz çevresinde gölgelenme (Şekil 3.27) ve ardından derze paralel olarak çatlama şeklinde gözlemlenir (Şekil 3.28).

Çatlama arttıkça, yüzeye çıkan ince hamur parçalarından dolayı betonun formunda görünür bir değişim olur (Çizim 3.29) veya çoğu durumda betondaki kırılmalar serbest haldedir (Şekil 3.30). Gölgeleme ve çatlama derz paralelinde yayılmaya devam eder ve malzeme kaybı da devam eder ve ortak bozulma gelişir.

Kimyasal saldırı ile beton hamurunu yumuşar ve agrega çimento karışımından ayrılır (yani beton parçalanır) (Şekil 3.31).

Kalsiyum hidroksit ve kalsiyum karbonat sızıntısı, bazı durumlarda parçalanmaya yakın çatlaklarda görülebilir (Şekil 3.32).



Şekil 3.27 : Buz çözücü etkisiyle derz çevresinde oluşan gölgelenme.



Şekil 3.28 : Gölgeleme sonrası derzde oluşan çatlak.



Şekil 3.29 : Çatlama artışı ile beton formundaki değişim.



Şekil 3.30 : Betondaki kırılmalar.



Şekil 3.31 : Betonun parçalanması.



Şekil 3.32 : Çatlaklarda kalsiyum hidroksit ve kalsiyum karbonat sızıntısı.



4. ABD'DE YAPILAN BETON YOLLARDAKİ KAYMA DEMİRLERİNİN KOROZYON DİRENCİNİN LABORATUVAR ORTAMINDA ÖLÇÜLMESİ DENEYİNİN LİTERATÜR İNCELEMESİ

4.1 Kayma Demirlerinin Korozyonu

Kayma demirleri enine derzlerde yük aktarımı sağlamak için derzli beton kaplamalarda kullanılır. Kayma demirlerinin kullanımı, yükün bir kısmını döşemenin yük almayan kısmına aktararak boyuna çatlamaya neden olan gerilmeleri azaltır. Bununla birlikte, donatıların aşınması halinde kaplama performansını tehlikeye atabilen ve erken bozulmaya neden olabilecek bir takım problemler ortaya çıkabilir. Bu problemler şunlardır: (i) yük aktarma yeteneğini azaltan donatı kesit kaybı ve (ii)döşemelerin serbest genişleme ve büzülmesini kısıtlayan korozyon ürünlerinin birikimi.

Geçmişte arazide ve laboratuarda kayma demiri korozyonu araştırılmış ve çıplak karbon çeliği yerine beton kaplamalarda çelik kayma demiri için epoksi kaplamaların yaygın olarak kullanılmasına neden olmuştur.

Kaliforniya Ulaştırma Dairesi (Caltrans) da olmak üzere çoğu kamu kurumu, su ve tozların derze girmesini en aza indirmek için beton kaplamaların derzlerini kapatmaktadırlar. Zararlı maddelerin donatılara erişmesini önlemedeki bu müşterek sızdırmazlık maddeyle derzin kapatılması uygulamasının etkinliği bilinmemektedir. Ayrıca, derzin yüzeyden sızdırmaz kılınması, derzin kenarlarından veya altındaki donatılara hala erişebildiğinden, derzi su ve tozlara maruz kalmadan tamamen engelleyemez. Zararlı maddeler beton içerisine nüfuz ederek donatılara da erişebilirler.

Tuutti'nin modeline göre kayma demirindeki başlangıç aşaması betonarme yapıdaki donatıya göre çok daha kolay olur.

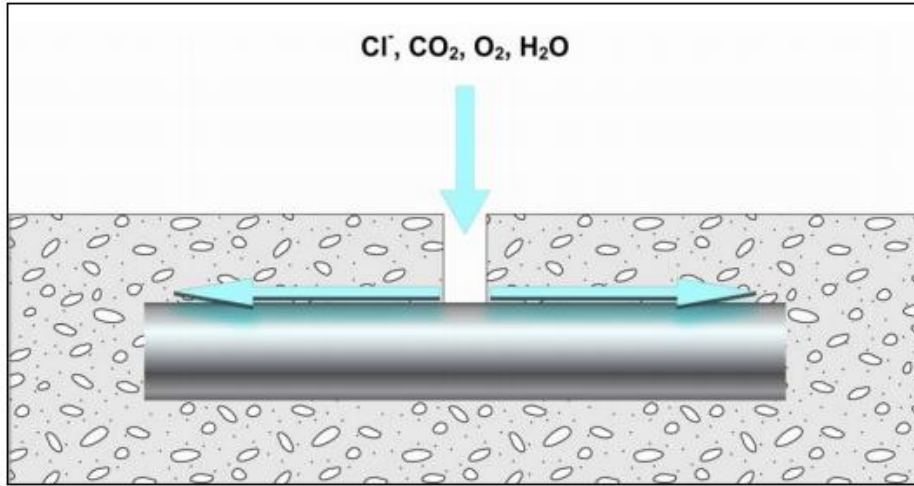
Kayma demirlerinin geçtiği derzler tipik olarak oksijen, nem ve buz çözücü tuzlar gibi zararlı maddelerin donatıların yüzeyine serbestçe nüfuz etmesine izin verir.

Tamamen su geçirmez ve hava geçirmez bir bağlantı kurmak ve korumak mümkün değildir. Su ve hava derzin aşağısı, yukarısı ve yanlarından girebilir [32].

Betonarme yapılar için beton içine yerleştirilen demirin aksine kayma demirleri ve beton arasındaki bağ, sıkı olacak şekilde tasarlanır, ancak düşük sürtünmeye sahip olmak için, zararlı maddelerin kayma demiri boyunca bir betonarme yapıdaki donatıya kıyasla daha kolay difüzyonuna izin verir (Şekil 4.1).

Döşeme plakaları ve kayma demiri arasındaki döngüsel yatay hareket, epoksi-kaplama gibi koruyucu malzemelere zarar verme riskini artıracaktır.

Böylece, CO_2 ve Cl^- gibi zararlı maddeler, artı su ve oksijen, kayma demirinin yüzeyine serbestçe erişebilir; bu da başlangıç aşamasının tamamlanması için gerekli süreyi önemli ölçüde azaltır.



Şekil 4.1 : Derzlerden kayma demirlerine sızan zararlı maddeler [33].

Kayma demirlerinin enine derzlerde yük aktarımı için kullanıldığı diğer bölümlerde bahsedilmiştir. Bunların kullanımı, yükün bir kısmını yüksüz döşemeye aktararak faylanmaya neden olan düşey sehimleri ve köşeye ve boyuna kırılmaya neden olan gerilmeleri azaltır. Bununla birlikte, kayma demirlerinin korozyona uğraması beton yolun performansını tehlikeye atabilen ve erken bozulmaya neden olabilecek bir takım problemler ortaya çıkarabilir. Bunlar;

- Kayma demirinin kesit kaybına uğrayıp yük taşıma kapasitesinin azalması
- Korozyon ürünlerinin birikerek beton yolun genişlemesini ve büzülmesini kısıtlaması

Kayma demirinin korozyonu geçmişte sahada ve laboratuvarında araştırılmış ve çıplak karbon demiri yerine epoksi kaplamalı demirlerin yaygın olarak kullanılmasına neden olmuştur. Sağlam betonda donatı, beton gözenek solüsyonlarından dolayı oluşan pasif film tabakası ile korozyondan korunmaktadır. Bu ince koruyucu film korozyon reaksiyonunu yavaşlatır. Eğer bu film tabakası kırılırsa veya eriyip giderse metal aktif davranışa geri döner ve hızlı bir korozyon meydana gelebilir. Betonarme yapılarda korozyonun iki aşamadan (başlangıç ve ilerleme aşaması) oluştuğu daha önceki bölümlerde bahsedilmiştir.

Başlangıç aşaması, karbondioksit ve klorür gibi zararlı maddelerin nüfuz etmesi ve konsantrasyonun bir sonucu olarak koruyucu pasif tabakanın depassivasyonu için gerekli zamandır. Beton yollardaki bağlantı demirlerinin zararlı maddelerle kolaylıkla bağlantı yapabilmesi başlangıç aşamasını kısaltır. Bu nedenle korozyonun durumu büyük ölçüde kullanılan bağlantı demirlerinin özelliklerine bağlıdır. Kayma demirleri ile beton arasındaki bağ, sıkı fakat daha az sürtünmeye sahip olacak şekilde tasarlanmış olduğundan zararlı maddeler bağlantı demirinin tamamına ulaşabilirler ve demir boyunca diğer donatılara kıyasla bu maddeleri daha kolay difüze ederler. Beton yol döşemeleri ve kayma demirlerinin sürekli yatay hareketlerinin olması epoksi gibi koruyucu kaplamalara zarar verme ihtimalini de artırır.

Birçok kurum, suyun ve ince molozun derze girmesini en az indirmek için beton yolların derzlerini kapatmaktadır. Zararlı maddelerin kayma demirlerine ulaşmasını engelleyip engellemediği tam olarak bilinmemektedir. Ayrıca derzin yüzeyden sızdırmazlık işlemine tabi tutulması suyun ve ince molozun derzin kenarlarından veya altından kayma demirlerine erişmesini engelleyemez. Zararlı maddeler beton içine nüfuz ederek de kayma demirlerine ulaşabilirler.

4.2 Deneyde Değerlendirilen Kayma Demiri Çeşitleri

Bu deneyde yedi çeşit kayma demiri incelenmiştir. Bunlar;

- a) Çıplak karbon çeliğinden üretilmiş
- b) Paslanmaz kaplı çelikten üretilmiş
- c) Harç dolu delikli paslanmaz çelikten üretilmiş
- d) Mikrokompozit çelikten üretilmiş

- e) Esnek epoksi ile kaplanmış karbon çeliğinden üretilmiş (Yeşil renk kodu, ASTM A775'e göre yapılmış)
- f) Esnek olmayan epoksi ile kaplanmış karbon çeliğinden üretilmiş (İki tip: Mor ve gri renk kodu, ASTM A934'e göre yapılmış)

Paslanmaz çubuklar yaklaşık 5 mm kalınlığında bir kaplamaya sahiptir. Paslanmaz kayma demirlerinin uçları paslanmaz çelik kaplamaya sahip değildir ancak koruyucu boya vardır. Epoksi kaplı çubukların uçları da epoksi kaplıdır. Paslanmaz delikli kayma demirleri yaklaşık 5 mm et kalınlığına sahip çimentolu bir harçla doldurulmuş içi boş bir silindirden oluşuyordu.

Bu deneyde mikrokompozit çelikten üretilmiş kayma demirlerinin korozyona karşı karbon çeliğinden üretilmişlerden daha fazla oranda dirençli olması beklenmiştir.

4.3 Deney Metodu

Yarı hücre potansiyel ölçümleri yarı hücrenin altında bulunan donatının korozyon aktivitesinin olasılığının göstergesidir. Bu işlem ASTM C876'da açıklanmaktadır. Yarı hücre potansiyeli ölçümünün basitliği ve bu tekniğin betonda donatı boyunca aktif korozyon varlığının iyi bir göstergesi olduğu için sahada yaygın olarak kullanılmaktadır [34].

Lineer polarizasyon direnci (LPR) tekniği elektrolitik test hücrelerini kullanarak korozyon hızını belirleyen iyi bir yöntemdir. Korozyon akım yoğunluğu olarak ifade edilen korozyon hızı, kutuplaşma direnciyle ters orantılıdır. LPR tekniği ile ilgili en büyük sorun, karşı çubuk elektrotundaki akımdan etkilenen çelik çubuk alanının belirsizliğidir. Bu deneyde karşı elektrot NaCl çözeltisi ile doldurulmuş ve kayma demirinin üzerinde konumlandırılmış bir derzin üstüne konmuştur. Hemen hemen tüm akım, beton ile karşılaştırıldığında çok düşük dirençli bir yolu temsil eden tuz çözeltisinden akacağı için kutuplaşma alanı derzin içindeki kayma demirinin NaCl çözeltisine maruz bırakılan bölümüne karşılık geldiği kabul edilmiştir. Yine de epoksi kaplı çubuk LPR tekniği kullanılarak nicel olarak değerlendirilememiştir. Epoksi kaplamalı kayma demirlerinde oluşan korozyonun küçük süreksizliklerde (küçük delikler, boşluklar, aşınmalar vb.) ve kaplamadaki kusurlarda yoğunlaştığı ve yerleştiğinden bu çubuklar için korozyona maruz kalan alan hakkındaki varsayım geçerli değildir.

Epoksi kaplamalı kayma demirlerinde korozyona uğrayan alanların tanımlanması kolaylaştırmak ve yerel korozyon gelişimindeki kusurların rolün değerlendirmek için epoksi kaplı kayma demirlerinin süreksizlikleri kontrol edilmiştir [35]. Bu işlem kayma demirlerini beton kirişlere koymadan önce düşük voltajlı porozit dedektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaplama kusurlarının haritalanması, iyileştirmeden sonra korozyona uğramış kayma demirlerinin gözle muayenesi sırasında tespit edilen korozyon yerlerini kontrol etmek için kullanılmıştır.

4.4 Deney Tasarımı

Bu deney 3 aşamada yürütülmüştür.

4.4.1 Aşama 1

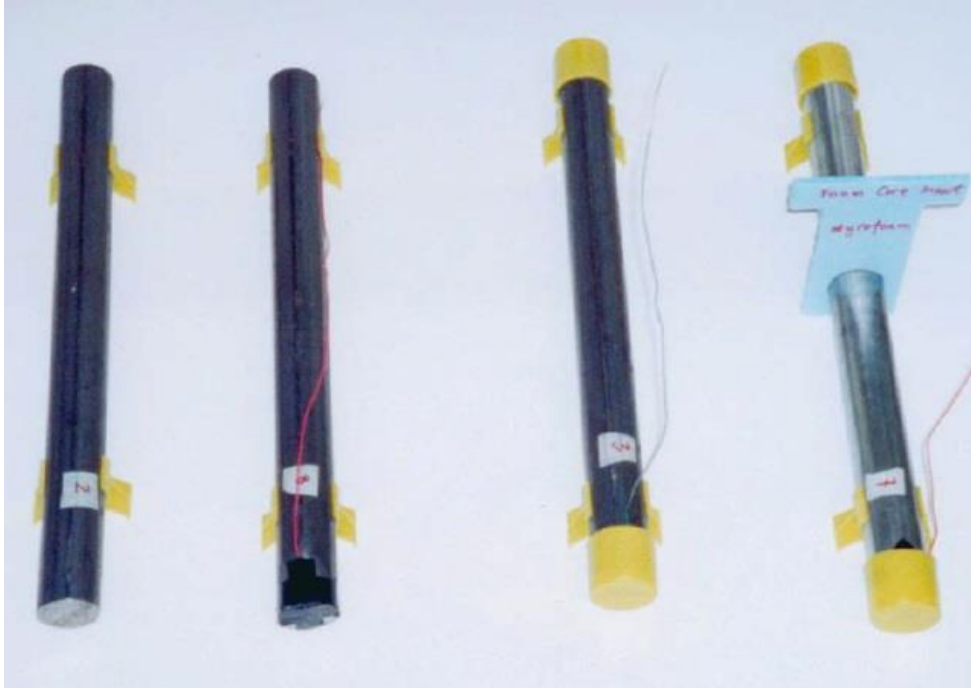
4 çeşit kayma demiri (karbon çeliği, paslanmaz kaplı çelik, harç dolu delikli paslanmaz çelik ve esnek epoksi ile kaplı çelik) beton kirişlere yerleştirilmiştir (Şekil 4.2). Kayma demirlerinin çapı 38,1 mm, boyu 460 mm'dir. Beton kirişin ölçüleri 150 x 150 x 560 mm'dir.

Şekil 4.3'de gösterildiği gibi demirler yerleştirilmeden önce demirlerin bir ucuna elektrik bağlantıları yapılmış, genleşme uç kapağı yerleştirilmiş ve kayma demirleri plastik desteklere monte edilmiştir. Beton kirişin ortasında 30 günlük beklemeden sonra çıkarılan bir polistiren köpük paspayı kullanılarak bir derz simüle edilmiştir.

Betonun su/çimento oranı 0,42 çimento:kum:agrega oranı 1:1,84:2,76 olarak belirlenmiştir. Kalsiyum sülfat alüminat çimentosu ve iri agrega maksimum boyutu 38 mm olan agrega kullanılmıştır. Numuneler dökümden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve 23°C'de %100 bağıl nemde 7 gün süreyle kürlenmiştir. Bu numuneler, soğuk (4°C) ve sıcak (40°C) olmak üzere iki sıcaklıkta korozif bir ortama (kirişlerin üzerinde %3 NaCl çözeltisi havuzu oluşacak gibi, korozif çözeltinin simüle edilmiş derzden geçmesine izin verecek şekilde) maruz bırakılmıştır. Bu sıcaklıklar Kaliforniya'daki farklı bölgelerdeki ortalama düşük ve yüksek sıcaklıkları temsil etmiştir. Kirişlere ise mekanik yük uygulanmamıştır.



Şekil 4.2 : Aşama 1’de kullanılan kayma demiri çeşitleri. Yukarıdan aşağıya: karbon çeliği, paslanmaz kaplı çelik, esnek epoksi ile kaplı çelik ve harç dolu delikli paslanmaz çelik [33].



Şekil 4.3 : Demirlerin kirişlere yerleştirilmeden önce hazırlanması [33].

Yarı hücre potansiyeli, korozyon başlama süresinin belirlenmesi için altı ay beton yüzeyine yerleştirilen bir bakır / bakır sülfat ($\text{Cu} / \text{CuSO}_4$) elektrodu kullanılarak izlenmiştir. Deneyler tamamlandıktan sonra korozyona uğramış kayma demirlerinin gözle muayenesi yapılmıştır. Elektriksel ölçümler yapılmadan önce tuz çözeltisi beton yüzeyden uzaklaştırılmıştır. Her bir kayma demiri tipi için 3 tekrarlı denemenmiştir. Şekil 4.4’de deney düzeneği görülmektedir.



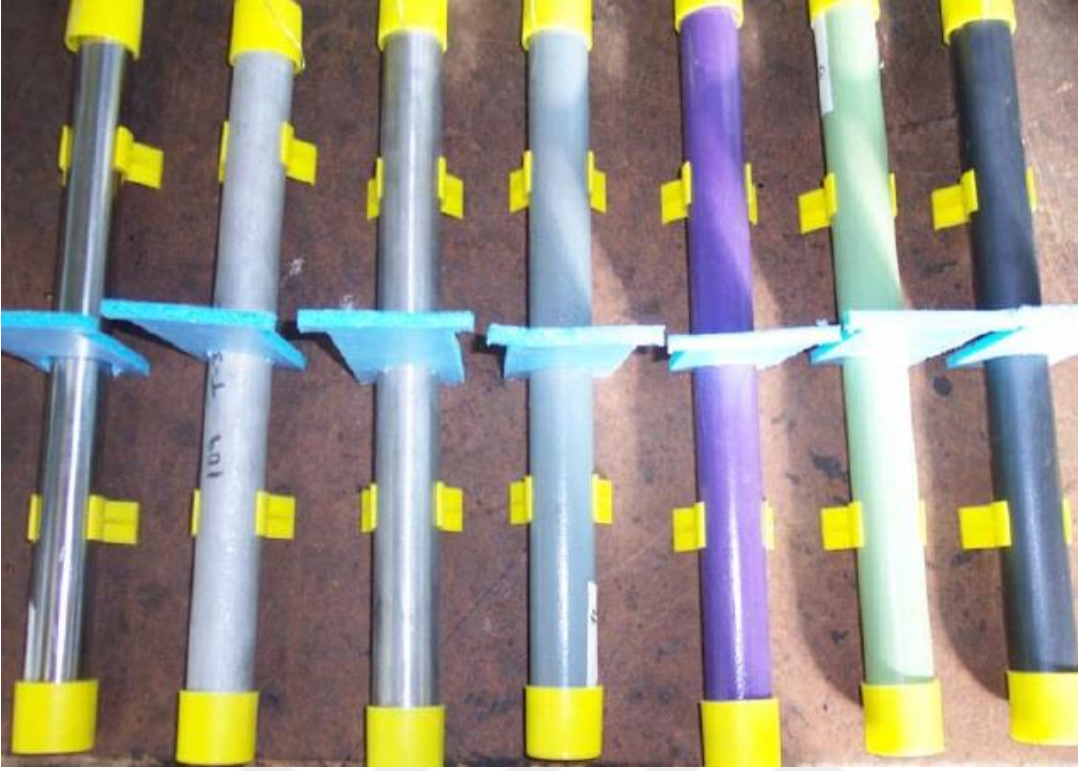
Şekil 4.4 : Yarı hücre potansiyeli testi [33].

4.4.2 Aşama 2

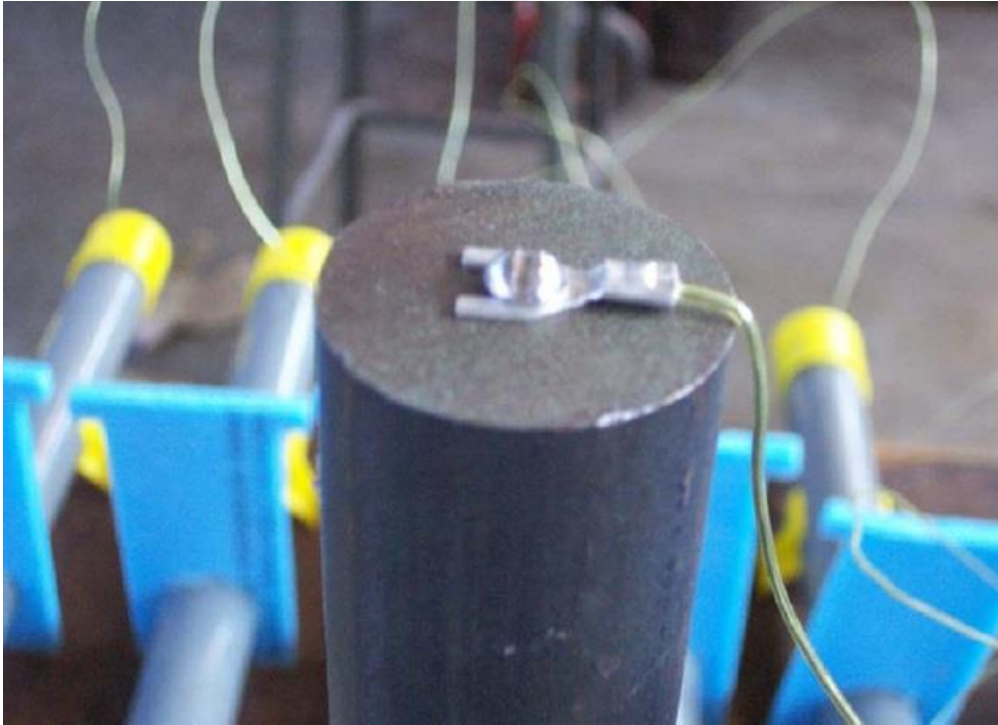
Testin ikinci aşamasında 7 farklı kayma demiri değerlendirilmiştir (Şekil 4.5).

Numunelerin boyutları ilk aşamadakilerle aynıdır, ancak su-çimento oranı 0,65 ve karışım oranları 1: 3,0: 3,25 (çimento: kum: agrega) olan daha geçirgen bir beton kullanılmıştır. Tip I / II çimento kullanılmış ve maksimum agrega boyutu 12,8 mm (0,5 inç) seçilmiştir. Numuneler dökümden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve 23 ° C'de ve % 100 bağıl nemde 28 gün süreyle kürlenmiştir.

Testin ikinci aşamasında numuneler oda sıcaklığında 18 aylık bir süre boyunca % 3.5 NaCl çözeltisinin haftalık ıslanma ve kuruma döngülerine maruz bırakılmış ve korozyon hızlandırılmıştır. Kayma demirlerinin korozyon performansını değerlendirmek için, yarı hücreli potansiyel testleri, lineer polarizasyon direnci (LPR) eğrileri, görsel kontroller, klorür analizleri ve mikroskopik incelemeler yapılmıştır. Bu çalışmada her kayma demiri tipinin dört kopyası test edildi. Şekil 4.5 kullanılan kayma demirleri çeşitlerini göstermektedir. Yerinde korozyon hızı, hızlandırılmış koşullar altında kayma demirlerinin ömrünün tahmini için izin verilmesi amacıyla ölçülmüştür. Şekil 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9 elektrik bağlantılarını göstermektedir. Şekil 4.10 ve 4.11 deney ayarını göstermektedir.



Şekil 4.5 : Araştırılan kayma demiri çeşitleri [33].



Şekil 4.6 : Yarı hücre potansiyeli ve lineer polarizasyon direnci deneylerini yapmak için beton dökümden önce dübellere elektrik bağlantıları yapılması [33].



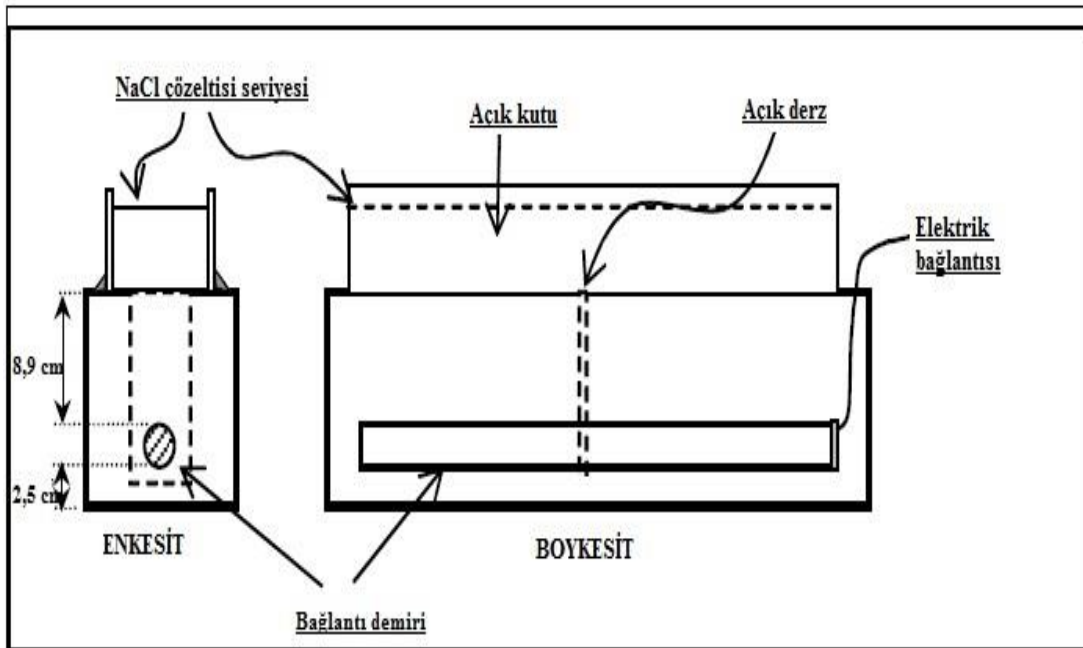
Şekil 4.7 : Döküm işleminden önce bağlantıların epoksi ile kapatılması [33].



Şekil 4.8 : Elektrik bağlantılarının demirin yanında yapılması [33].



Şekil 4.9 : Döküm öncesinde bağlantının epoksi ile kaplanması [33].



Şekil 4.10 : Deney düzeneğinde klor göllendirmesi yaparak korozyon hızlandırılması [33].



Şekil 4.11 : Şekil 4.10’da şematize edilen deney düzeneğinin fotoğrafı [33].

4.4.3 Aşama 3

Laboratuvar deneylerine ek olarak Washington Ulaştırma Departmanı (WSDOT) ‘nın yaptığı kayma demiri yenileme projesinden elde edilen beton yol plakları üzerinde başka deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu plaklar 1964’de inşa edilmiş, yenileme projesi 1994’te yapılmıştır. Deney için numuneler Washington eyaletindeki Cle Elum kasabası yakınlarındaki Interstate 90’dan çıkarılmış ve test ve değerlendirme için Richmond Field 9 İstasyonu’nda Kaliforniya Üniversitesi Kaplama Araştırma Merkezi’ne (UCPRC) sevk edilmiştir. Yük aktarım verimliliği (LTE), düşme ağırlığı deformasyon ölçer (FWD) kullanılarak ölçüldü. FWD derzlerin yük aktarım verimliliğinde bir azalma yaşandığını gösterdiğinden seçildi. Bu önemli bir LTE kaybı sergileyen ilk WSDOT kayma demiri yenileme projesidir.

WSDOT tarafından sağlanan bilgilere göre, 1980’lerin başına kadar, kaya tuzunun yaklaşık kullanım oranı yılda 120-150 gün arasındadır. Her gün genellikle en az iki uygulama yapılmış ve tuzlama genellikle tipik olarak kasım ortasından nisan ortasına kadar sürmüştür. 1980’lerin başından 1997’ye kadar pas önleyici tip buz çözücü tuzları kullanılmıştır. 1997 yılından beri, sıvı magnezyum klorür kullanılmaktadır.

4.4.3.1 Arazideki plakların değerdendirilmesi

Bu çalışmada kullanılan levhalar ilk inşaat sırasında kauuklu bir derz dolgu ürünü ile kesilmiş ve sızdırmazlığı sağlanmıştır. 1994'te bağlantı demirlerini yenileme sırasında derzler kauuklu derz dolgu macunu ile sızdırmaz hale getirilmiştir. şekil 4.12 test edilen döşeme levhalarını göstermektedir.

Bu plakların alındığı yerin rakımı 543 metredir. Bu yer, ortalama 568 mm yağışa, 2,070 mm ortalama yıllık yağışa ve 76 yıllık ortalama donma - çözülme döngüsüne tabidir. Plaklar dış şeritten alınmış ve hizmet ömrü boyunca yıllık olarak yaklaşık 1 milyon Eşdeğer Standart Dingil Yüküne tabi tutulmuştur. Dbeller 38 mm çapında ve beton döşemeler 228 mm kalınlıktadır. Kayma demirleri esnek (yeşil) epoksi ile kaplanmış karbon çeliğidir. Hızlandırılmış koşullar altında laboratuarda elde edilen sonuçlarla karşılaştırma yapabilmek için plakları çıkardıktan sonra yarı hücreli potansiyel testleri, Lineer polarizasyon direnç deneyleri, klorür analizleri ve görsel inceleme çalışmaları yapılmıştır. Tüm testler Kaliforniya Üniversitesi Kaplama Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.12 : Çıkarılan WSDOT plakları [33].

4.4.3.2 Kullanımda olan yoldan alınan karotun klorür testi

WSDOT, daha önce belirtildiği gibi WSDOT döşeme levhası üzerinde yapılan testlere ek olarak, Washington'daki çeşitli yerlerde hizmet köprülerinin yakın köşelerinden iki karot çıkarmıştır. Bu karotlar, laboratuvar sonuçlarıyla karşılaştırma için, Yapı Teknoloji Laboratuvarları tarafından klorür içeriği açısından test edilmiştir.

4.4.4 Sonuçları bulma yöntemleri

Donatının korozyon aktivitesini değerlendirmek için birçok elektrokimyasal yöntem kullanılmıştır. Yarı hücre potansiyeli ve LPR yöntemleri, yerinde ölçümler için en çok kullanılan ve kabul gören test yöntemleridir. Bu testler sahada gerçekleştirilmesi kolay ve bu testler için gerekli olan ticari araçlar da kolay bulunabilir. Carino'nun gözlemlediği gibi, beton içine gömülmüş çeliğin yerinde korozyon hızının ölçülmesi için araştırılan birçok yöntem arasından, lineer polarizasyon direnci en fazla kabul görmeye başlayan yöntem olarak gözükmüştür.

Yarı hücre potansiyeli ölçümleri, yarı hücrenin altında bulunan donatının korozyon aktivitesinin olasılığını gösterir ve prosedürü ASTM C876'da tanımlanmıştır [36]. Kurulum temelde bir dış elektrottan (yarım hücre), bağlantı tellerinden ve bir yüksek empedans voltmetresinden ($\text{empedans} > 10\text{M}\Omega$) oluşur. Devreden çok az bir akım geçmesi için yüksek empedanslı bir voltmetre kullanılır. Bu araştırma boyunca bakır / bakır sülfat ($\text{Cu} / \text{CuSO}_4$) elektrotları kullanılmıştır.

Yarı hücreli potansiyel ölçümü basitliği, araştırmacılar arasında genel kabul görmesi ve bu tekniğin beton içindeki donatı boyunca etkin korozyon varlığını etkili bir şekilde göstermesinden sahada yaygın şekilde kullanılmaktadır. Çizelge 4.1 ölçülen potansiyel ile korozyon aktivitesi olasılığı arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

Çizelge 4.1 : Yarı hücre potansiyeli değeri ile korozyon olasılığı değerlendirmesi.

Yarı Hücre Potansiyeli (mV)	Korozyon Açıklaması
> -200	Korozyon ihtimali düşük (%10)
-200 ile -350 arası	Korozyon aktivitesi belirsiz
< -350	Korozyon ihtimali yüksek (%90)

Bu nedenle yarı hücreli potansiyel yöntemi, ölçüm anında korozyon aktivitesi olasılığının bir göstergesini sağlar. Bununla birlikte çeliğin korozyon oranının herhangi bir göstergesi değildir.

Öte yandan LPR tekniği elektrolitik test hücrelerini kullanarak korozyon hızını belirlemek için iyi bilinen bir yöntemdir. Bu teknik, temel olarak, hücreye harici bir akım uygulandığında, elektrolitik hücrenin açık devre potansiyelindeki değişikliğin ölçülmesini içerir. Açık devre potansiyeli ile ilgili küçük bir bozulma için elektronun birim alanına uygulanan akımdaki değişim (Δi) ile ölçülen gerilimdeki değişim (ΔE) arasında doğrusal bir ilişki vardır. $\Delta E / \Delta i$ oranına kutuplaşma direnci (R_p) denir. Korozyon akımı yoğunluğu (i) olarak ifade edilen korozyon hızı, Stern-Geary ilişkisi $i = B / R_p$ ile gösterilen polarizasyon direnci ile ters orantılıdır, burada B sabittir (ASTM G59). Çizelge 4.2'de gösterildiği gibi korozyon akımı yoğunluğu ve korozyon hızı arasında bir ilişki kurmak için bazı talimatlar geliştirilmiştir.

Çizelge 4.2 : Korozyon akım yoğunluğu ile korozyon hızının değerlendirmesi.

Korozyon Akım Yoğunluğu, I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Korozyon Hızı
< 0,1	Göz ardı edilebilir
0,1 – 0,5	Düşük
0,5 – 1,0	Orta
> 1,0	Yüksek

LPR metodundaki en önemli sorun, karşı çubuk elektrottaki akımdan etkilenen çelik çubuk alanı hakkındaki belirsizliktir [37]. Genellikle, akımın çubuğa ve karşı elektroda dik doğrultuda düz çizgiler halinde aktığı ve etkilenen çubuk alanının çubuk çevresinin karşı elektrotun altındaki çubuğun uzunluğuyla çarpıldığı anlaşılr. Ancak, bu çalışmada gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinde bu sorun önemsizdir çünkü neredeyse tüm akım açık olan derzde bulunan NaCl çözeltisinden akacaktır ki bu da betonla karşılaştırıldığında çok düşük dirençli bir yoldur. Daha önce de belirtildiği gibi elektriksel ölçümleri gerçekleştirmek için tuz çözeltisi beton yüzeyden uzaklaştırılmış, ancak derz akım için gerekli bu düşük dirençli yolu sağlamak için çözelti ile dolu kalmıştır. Karşı elektrotun imal edilen derzin hemen üzerine yerleştirildiği dikkat edilmesi gereken bir husustur. Bu nedenle kutuplaşmış alanın imal edilen derzin içindeki NaCl çözeltisine maruz bırakılan kayma demiri bölümüne karşılık geldiği kabul edilmiştir.

4.4.5 Boşluk kontrolü

Bu araştırmanın ikinci aşaması sırasında epoksi kaplı kayma demirlerinde aşınmış alanların belirlenmesini kolaylaştırmak ve kusurların lokalize korozyon gelişimindeki rolünü değerlendirmek için epoksi kaplamalı kayma demirlerinin süreksizlikleri (küçük delikler, boşluklar, kusurlar vb.) olup olmadığı kontrol edilmiştir. Bu kontrol, bağlantı demirlerinin ASTM G62 ve CTM 685'e uygun olan alçak gerilimli bir porozit dedektörü kullanılarak kirişlere dökülmeden önce yapılmıştır. Kaplama kusurlarının haritalanması, iyi bir hale getirildikten sonra korozyona uğramış kayma demirlerinin gözle muayenesi sırasında tespit edilen korozyon yerlerine karşı kontrol etmek için kullanılmıştır. Aşama II'de kullanılan her

bir epoksi kaplı çubuğun, özellikle kayma demiri uçlarındaki kenarlar boyunca kaplamada bir veya daha fazla kusur gösterdiğini belirtmek gerekir. Bu kayma demirleri imalatçıdan direkt laboratuara gönderilmiş ve laboratuarda gerektiğinde dikkatli bir şekilde indirilmişlerdir. Kayma demirlerinin bir şantiyede çok daha sert kullanıma tabi tutulması beklenebilir. Haritalamada bulunan süreksizliklere, laboratuarda düşürülmesi veya vurulması neden olmamıştır.

4.4.6 Laboratuar ve araziden alınan karotların klorür deneyleri

Kayma demirlerini çevreleyen bölgede, özellikle açık derz çevresindeki klorür konsantrasyonunu değerlendirmek için laboratuvar kırımlarından ve WSDOT'dan elde edilen döşeme plakalarından çıkarılan beton karotlar üzerinde çeşitli klorür analizleri gerçekleştirilmiştir. Zamanla klorür iyonlarının derz alanının çevresinde ve kayma demirlerinin yakınında birikmesi, klorür konsantrasyonunun önemli seviyelere, belki de kullanılan çeliğin klorür eşiğinin üstüne çıktığı düşünülmektedir. Çıkarılan numuneler kimyasal analizlerin yapıldığı Caltrans kimya laboratuvarına gönderilmiştir. Buna ek olarak, plak köşelerinden alınan karotlar çeşitli yerlerde WSDOT kaplamasından elde edilmiş ve Yapı Teknolojisi Laboratuvarları tarafından klorür içeriği açısından analiz edilmiştir. Klorür testleri, ASTM C1152'ye göre gerçekleştirilmiştir.

4.5 Deney Sonuçları ve Yorumları

4.5.1 Birinci aşama sonuçları

Interstate 90'daki bağlantı demiri yenileme projesinden WSDOT plağı için elde edilen üçüncü aşama sonuçları ve WSDOT karotlarının klorür analizleri ilerleyen bölümlerde sunulmuştur.

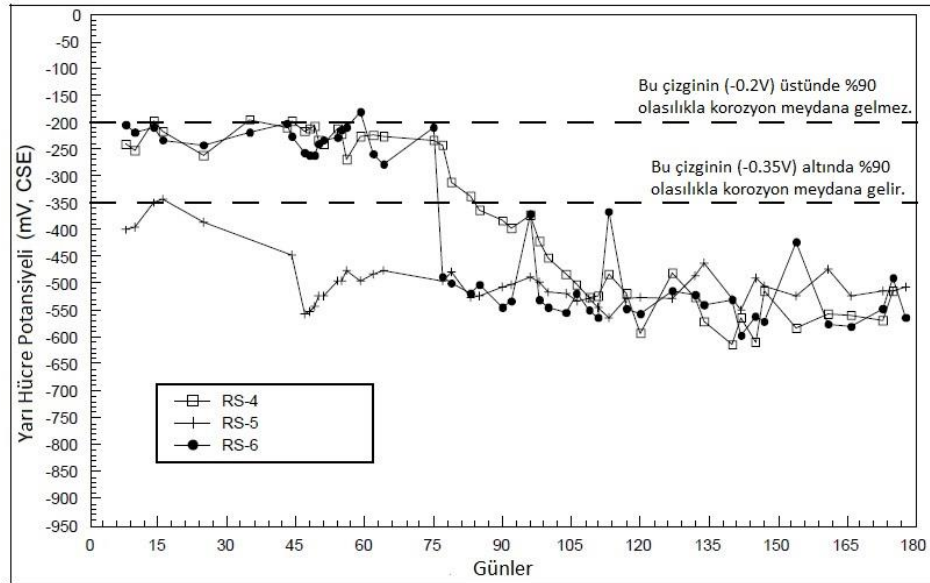
Bölümdeki metinde ve Şekil 4.13 - Şekil 4.20 arasında numuneler Çizelge 4.3'de gösterildiği gibi tanımlanmıştır; RS ("normal çelik", yani karbon çeliği), SS (harç dolu delikli paslanmaz çelik), EX (epoksi kaplı [esnek epoksi, yeşil kod]), ve XX (paslanmaz kaplı çubuklar).

Çizelge 4.3 : Bağlantı demiri numune çeşitlerinin isimlendirilmesi [33].

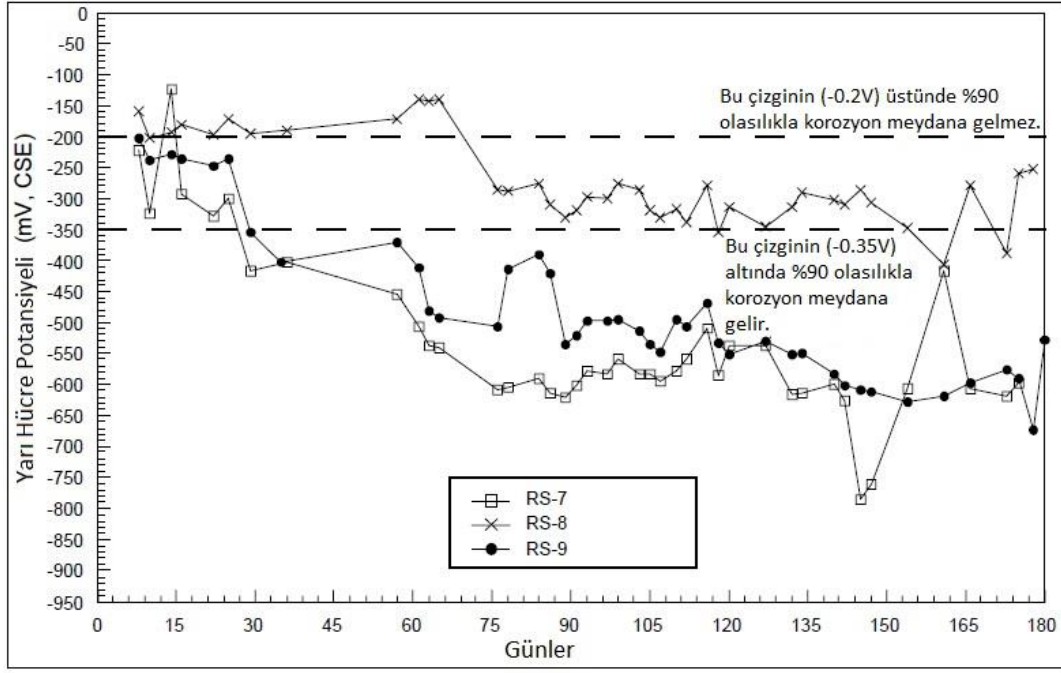
Bağlantı Demiri Çeşitleri	Numunelerin Tanımlanması	
	Sıcak Oda (40-43 °C)	Sıcak Oda (4 °C)
Karbon Çeliği	RS-4, RS-5, RS-6	RS-7, RS-8, RS-9
Delikli Paslanmaz Çelik	SS-4, SS-5, SS-6,	SS-7, SS-8, SS-9
Epoksi Kaplı Çelik	EX-4, EX-5, EX-6	EX-7, EX-8, EX-9
Paslanmaz Kaplanmış Çelik	XX-4, XX-5, XX-6	XX-1, XX-2, XX-3

4.5.1.1 Yarı hücre potansiyeli ve lineer polarizasyon direnci

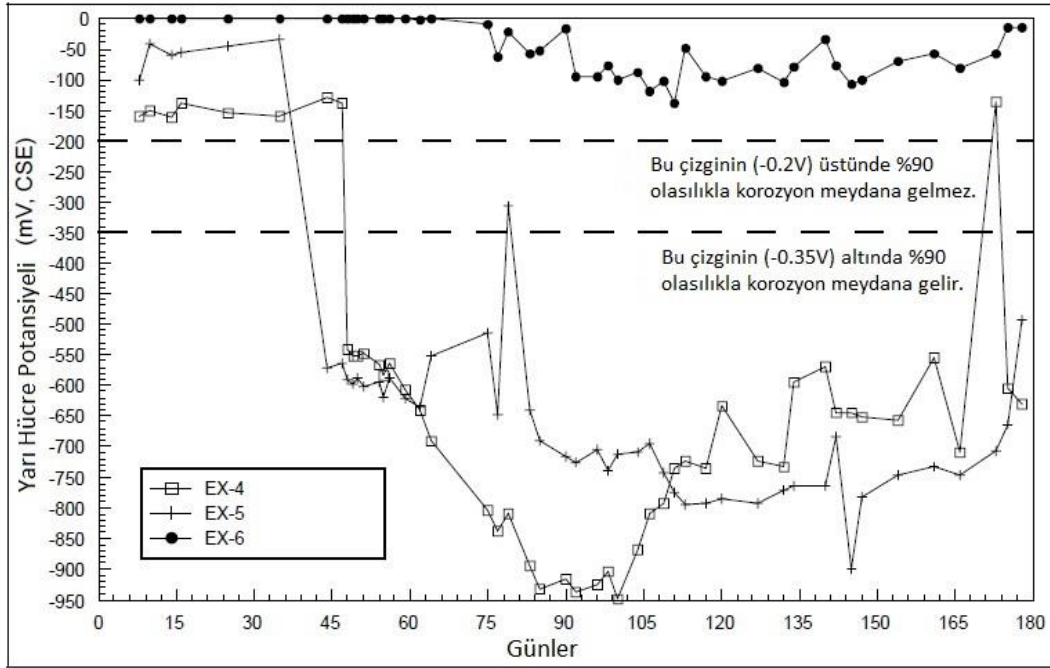
Şekil 4.13'den Şekil 4.20'ye kadar, bu çalışmanın ilk aşamasında araştırılan dört kayma demiri çeşidi için ölçülen yarı-hücre potansiyellerinin zamanla ilişkisini göstermektedir. Şekil 4.13'de görüldüğü gibi karbon çeliklerinin 40-43 °C'deki üç kopyasından ikisi için, yaklaşık 75 gün sonra potansiyeller -350 mV'dan daha düşük olan aktif korozyon bölgesine geçmiş ve açıklandığı gibi yüzde 90 olası bir korozyona işaret etmiştir. RS-5 örneği için potansiyeller testin neredeyse başlangıcında -350 mV'dan daha negatiftir.



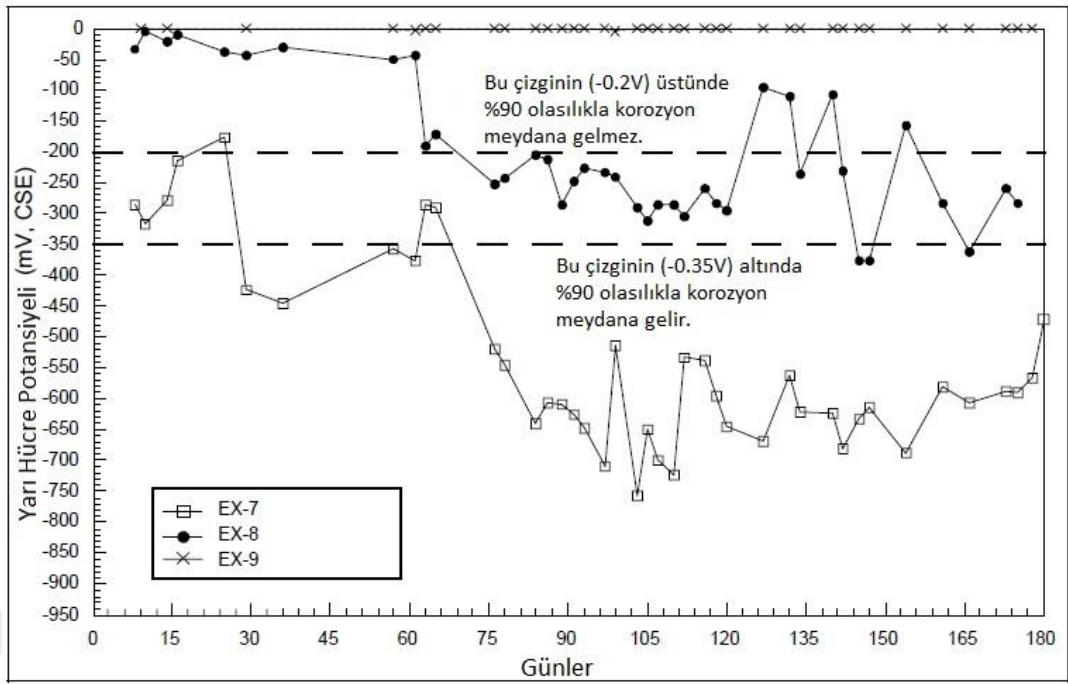
Şekil 4.13 : 40 - 43 ° C'deki klorür göllenmesindeki karbon çeliklerinin yarı hücre potansiyelleri [33].



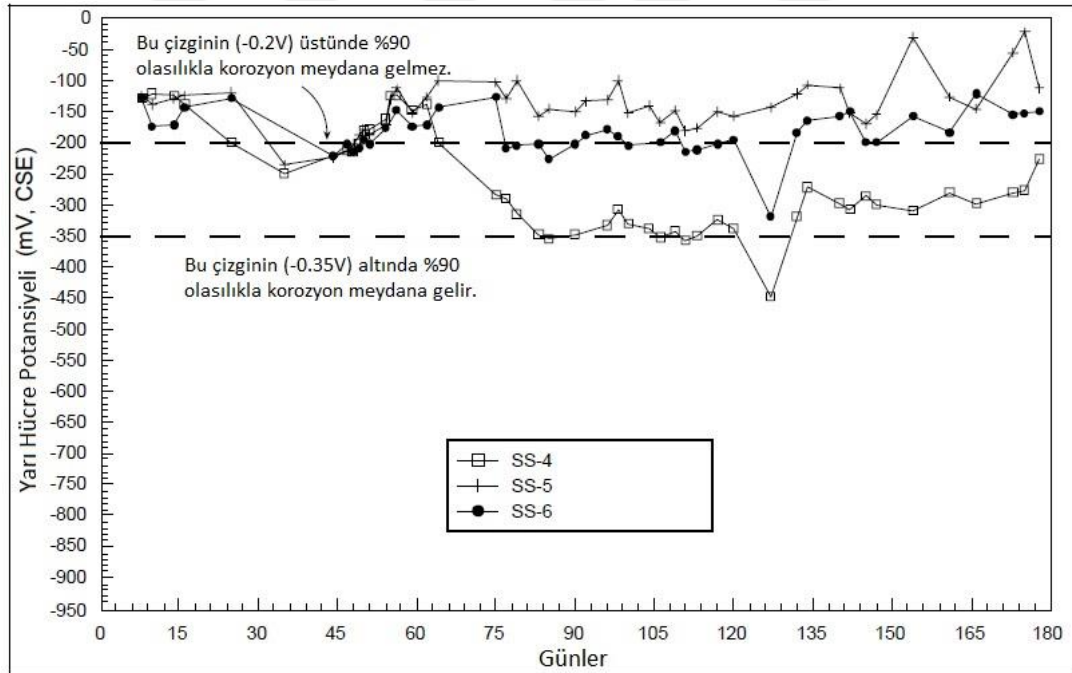
Şekil 4.14 : 4.4 ° C'deki klorür göllenmesindeki karbon çeliklerinin yarı hücre potansiyelleri [33].



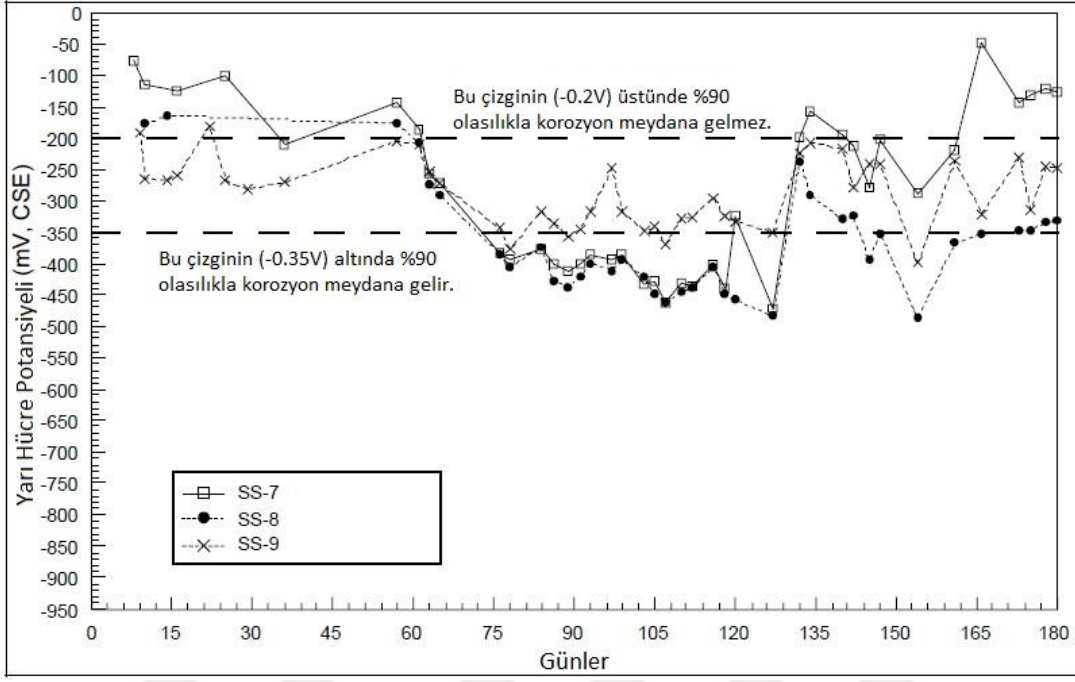
Şekil 4.15 : 40 - 43 ° C'deki klorür göllenmesindeki epoksi kaplı çeliklerin yarı hücre potansiyelleri [33].



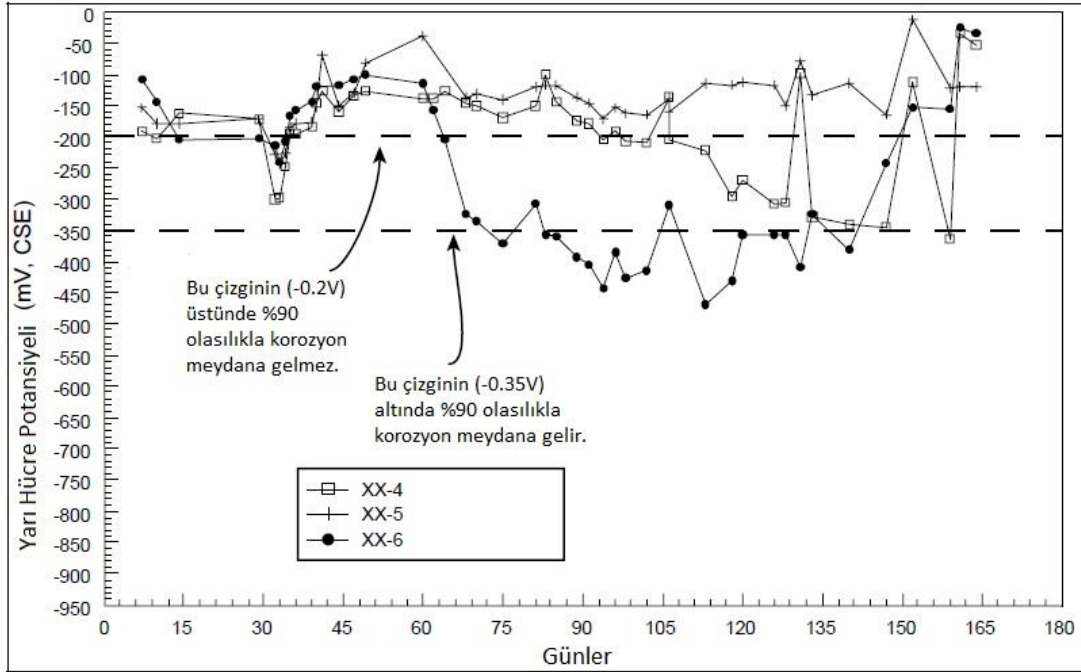
Şekil 4.16 : 4.4 ° C'deki klorür göllenmesindeki epoksi kaplı çeliklerin yarı hücre potansiyelleri [33].



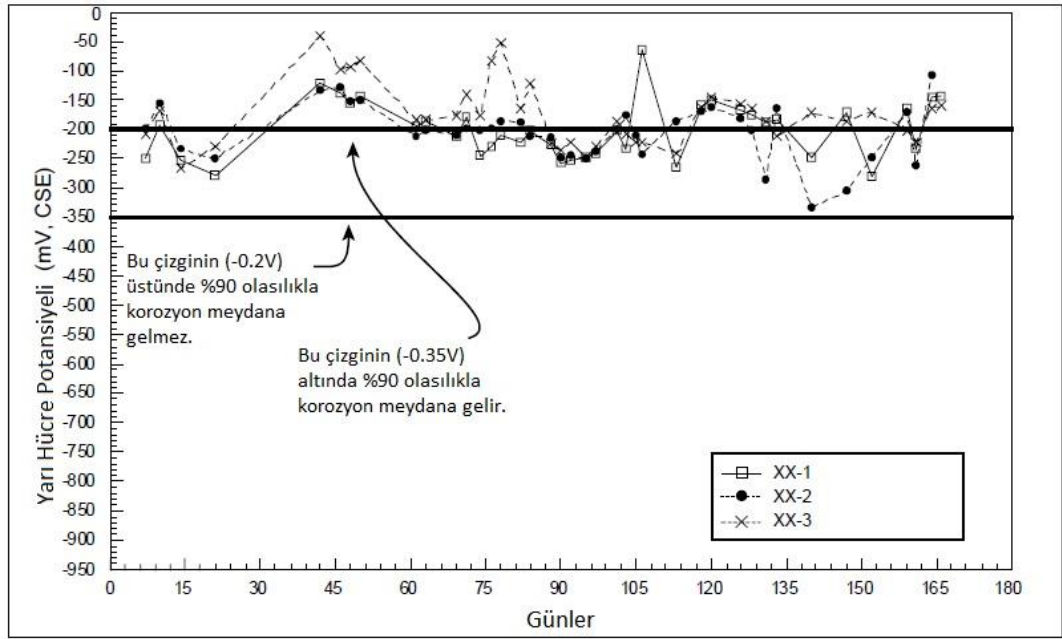
Şekil 4.17 : 40 - 43 ° C'deki klorür göllenmesindeki delikli paslanmaz çeliklerin yarı hücre potansiyelleri [33].



Şekil 4.18 : 4.4 ° C'deki klorür göllenmesindeki delikli paslanmaz çeliklerin yarı hücre potansiyelleri [33].



Şekil 4.19 : 40-43 ° C'deki klorür göllenmesindeki paslanmaz kaplı çeliklerin yarı hücre potansiyelleri [33].



Şekil 4.20 : 4.4 ° C'deki klorür göllenmesindeki paslanmaz kaplı çeliklerin yarı hücre potansiyelleri [33].

Daha önce de bahsedildiği gibi, demirin tamamen beton içinde kaldığı beton yapılarıdaki donatıya kıyasla, saldırgan maddelerin çubuklara daha kolay erişmesi nedeniyle kayma demirlerinde başlangıç aşaması büyük ölçüde azaltılabilir.

4.4 ° C'de (Şekil 4.14), potansiyeller RS-7 ve RS-9 için yaklaşık 30 gün sonra aktif kuruma bölgesine, RS-8 için ise 75 güne kadar hareket etmemiştir. İlginç olan, bazı numuneler için korozyon, 4.4°C'lik odadaki karbon çelikleri için 40-43°C'den daha erken başlamıştır. Bunun nedeninin farklı sıcaklıklarda oksijen kullanılabilirliği arasındaki fark olabileceği düşünülmüştür. Sıcaklık ne kadar yüksekse, oksijen çözünürlüğü suda o kadar düşük olur. Örneğin tuzlu sudaki oksijen çözünürlüğü 4°C'de yaklaşık 11.7 mg / L iken 30°C'de 6.5 mg / L'ye düşer.

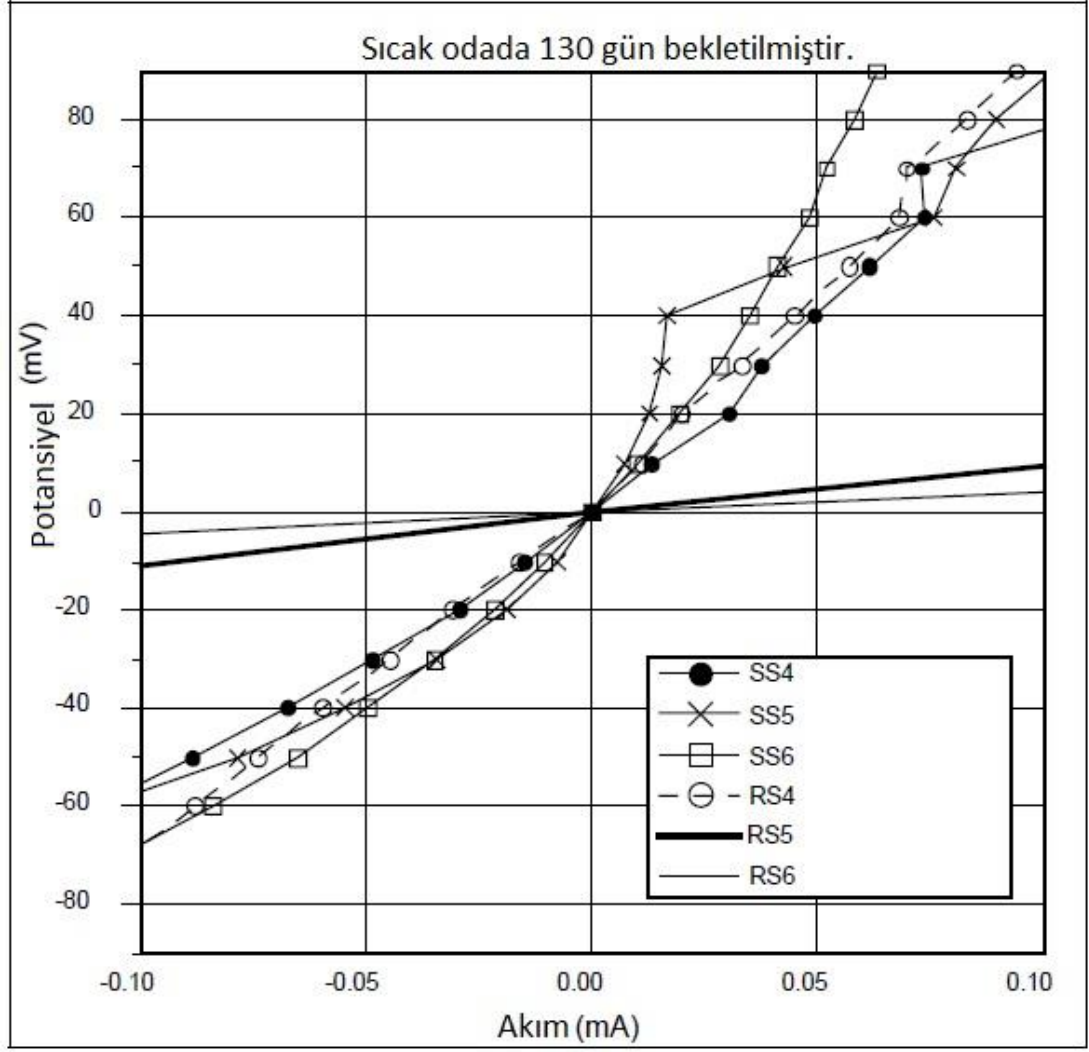
Derz oluşturmak için kullanılan polistiren köpük tabakanın 30 günden sonra çıkarıldığı belirtilmiştir. Polistren levha çıkarıldıktan sonra, 4.4°C sıcaklıktaki odada karbon çeliği için hemen aşınma meydana gelmesi, plaklardaki derzlerden kayma demiri yüzeyine klorür, oksijen ve suyun yoğun erişimi olduğuna işaret etmiştir. Bu olay, derz sızdırmazlığının, aşındırıcı çözeltilerin erişimini sınırlandırarak kayma demirlerinin korozyon olasılığını azaltabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, derzler tipik olarak sadece yüzeyde kapatıldığından aşındırıcı çözeltiler derzin yanından ve tabanından derz yüzeyine girebilir.

Yüksek sıcaklıklardaki (40 - 43 ° C) epoksi kaplı çelik çubuklar için (Şekil 4.15 ve Şekil 4.16), EX-4 ve EX-5 numuneleri için ölçülen potansiyeller yaklaşık 40 gün içinde ani bir düşüş yaşayıp yaklaşık -650 mV olarak yüksek korozyon riski oluşturmuştur. Öte yandan EX-6 numunesi, sıfır ölçülerek test boyunca inaktif bölgede kalmıştır.

Soğuk havadaki (4°C) numuneler için, EX-9 numunesinin ölçülen potansiyeli test boyunca sıfır kalmıştır. Bu durum muhtemelen epoksi kaplamada kusurların olmadığını ya da kayma demirindeki elektrik bağlantısında bir sorun olduğunu göstermiştir. EX-7 numunesinin potansiyelleri, orta korozyon riski (belirsiz) aralığı içinde kalırken, EX-8 numunesi yaklaşık 70 gün içinde yüksek korozyon riski bölgesine (<-350mV) girdi. Çalışmanın birinci aşamasında, epoksi kaplamanın döküm öncesinde kusurlarının kontrol edilmediği belirtilmiştir.

Hem paslanmaz hem de paslanmaz kaplamalı kayma demirleri (Şekil 4.17 ile Şekil 4.20 arası) genellikle her iki test sıcaklığında -350 mV çizgisinin üzerinde ölçülen potansiyelleri korozyon ihtimalinin düşük olduğunu göstermiştir.

Birinci aşamada, yarı hücre potansiyellerinin zaman içindeki ölçümü ile başlangıç aşamasının belirlenmesine ağırlık verilmiştir. Bununla birlikte, karbon ve paslanmaz çelik dübellerde korozyon hızını değerlendirmek için bir LPR testi de yapılmıştır. Şekil 4.21'de elde edilen sonuçlar gösterilmektedir (numuneler 40 - 43 ° C'de saklanmıştır). Polarize edilmiş bir potansiyelin eğimi ve karşılık gelen akım besleme eğrisi, polarizasyon direnci R_p 'dir. Değeri, Stern-Geary ilişkisinde $i = B / R_p$ 'de gösterilen korozyon hızı (i) ile ters orantılıdır. Burada B, 25 mV ila 56 mV arasında bir sabit olan bir sabittir. Karbon çeliğinin korozyon hızı paslanmaz çeliğin korozyon hızının 10 katına kadar çıkabilir. RS4'ün korozyon hızının düşük olduğunu ve yarı hücre potansiyelinin aktif korozyon bölgede (<-350mV) bulunduğu ve yarı hücreli potansiyel ölçümünün niceliksel bir yöntem olmadığını gösterdiği belirtilmiştir. Diğer iki numuneden (RS5 ve RS6) alınan sonuçlar, yarı hücreli potansiyel ölçümlerine uymuştur.



Şekil 4.21 : Karbon çeliklerinin ve paslanmaz çeliklerin lineer polarizasyonu [33].

4.5.1.2 Gözle muayene

Altı ayın sonunda beton kirişler açıldı ve kayma demirleri alınıp kontrol edilmiştir. Şekil 4.22, kayma demiri alındıktan sonra beton plaklardan birini göstermektedir.

Klor birikintisine maruz kalan karbon çelikleri için, Şekil 4.23'de gösterildiği gibi korozyon ürünleri hem soğuk hem de sıcak koşullar için çubukların uzunluğu boyunca ve çapınca dağıtılmıştır. Epoksi kaplı çubukların çoğunlukla çubukların uçlarında lokalize korozyon vardır ki burada kaplama hasarlara karşı en savunmasız durumdadır. EX-9 dışındaki, klorür göllenmesine maruz bırakılan tüm epoksi kaplı çubuklar, Şekil 4.24'de gösterildiği gibi uçlarından aşınmıştır. Sonuçlar, bir keresinde korozyon meydana geldiğinde ve kaplama kaldırıldığında, yarı hücreli

potansiyele uyduğunu göstermiştir. Ölçülen potansiyel artık sıfır olmadığı gözlenmiştir.

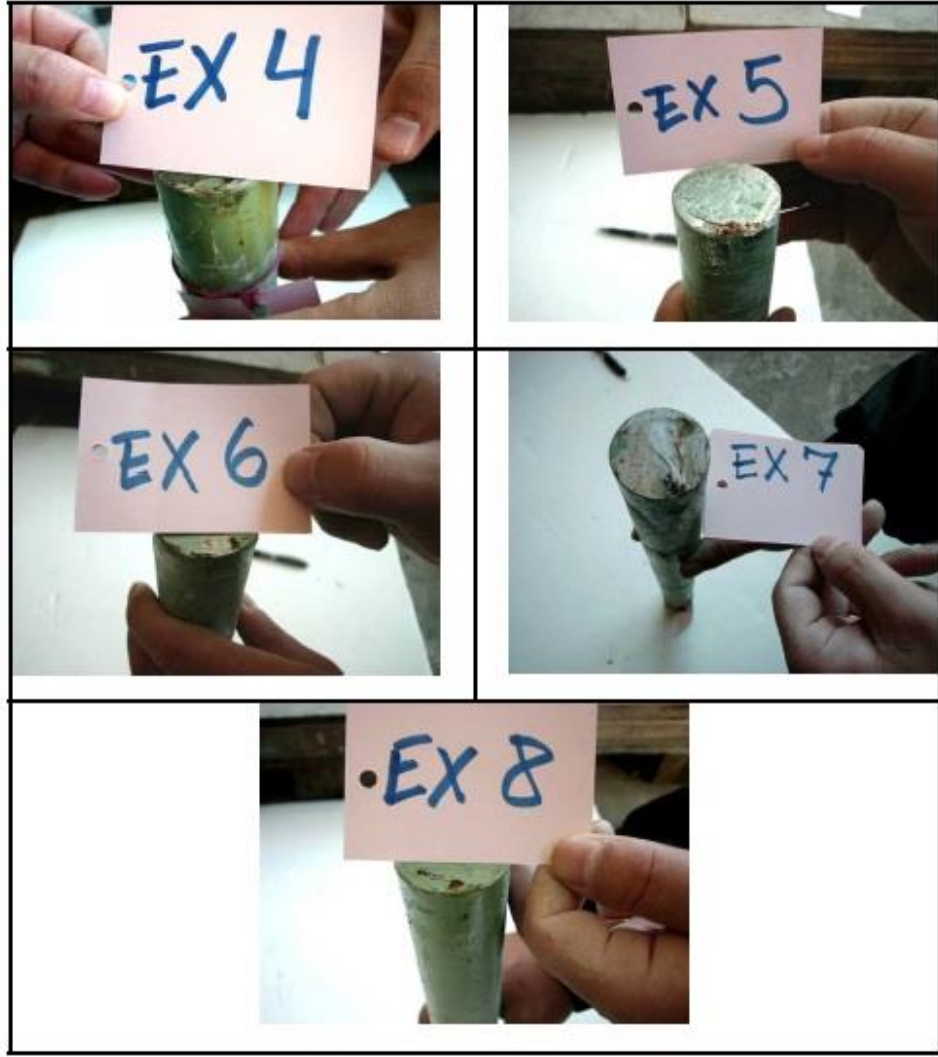
Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da da görülebileceği gibi paslanmaz çelik delikli çubuklarda veya paslanmaz kaplı çubuklarda görünür herhangi bir korozyon görülmemiştir.



Şekil 4.22 : Sökülen kayma demirlerinin gözle muayenesi [33].



Şekil 4.23 : Karbon çelikleri boyunca oluşan korozyon [33].



Şekil 4.24 : Epoksi kaplılardaki korozyon [33].



Şekil 4.25 : Delikli paslanmaz çeliklerin testten sonraki görünüşü [33].



Şekil 4.26 : Paslanmaz kaplı çeliklerin testten sonraki görünüşü [33].

4.5.2 İkinci aşama sonuçları

Bu bölümde ikinci aşamada oda sıcaklığındaki yedi çelik kayma demiri tipinde [karbon, delikli paslanmaz, paslanmaz kaplı, esnek epoksi (yeşil renkli) ile kaplanmış karbon çeliği ve esnek olmayan epoksilerle (mor ve gri renkli) kaplanmış karbon çeliği, mikrokompzit çelik] yapılan yarı hücre potansiyel testleri, lineer polarizasyon direnç eğrileri, görsel kontroller, klorür analizleri ve mikroskopik inceleme sonuçları sunulmuştur.

4.5.2.1 Yarı hücre potansiyeli ve lineer polarizasyon direnci

Bu bölümde, tek tek grafikler incelenen her kayma demiri tipi için LPR sonuçlarını anlatılmıştır. Çizimler yarı hücre değerine göre normalize edilmiş dört numunenin

ortalama sonuçlarını gösterir. Akım yoğunluğu ($\mu\text{A} / \text{cm}^2$) ve potansiyel (mV), yarı hücre potansiyeli dengesinde elde edilen değerlerden varyasyon olarak verilmiştir. Verilerin normalleştirilmesi, farklı numuneler arasındaki karşılaştırmayı kolaylaştırır.

Daha önceki bölümlerde de açıklandığı gibi, eğrilerin eğimi ($\Delta E / \Delta i$), kutuplaşma direncinin R_p değerini sağlar. Eğim ne kadar büyük olursa, metal / elektrolit ara yüzü boyunca yük aktarımı o kadar zor olur ve bu nedenle korozyon akımı yoğunluğu daha düşüktür ve dolayısıyla korozyon reaksiyon hızı daha yavaştır.

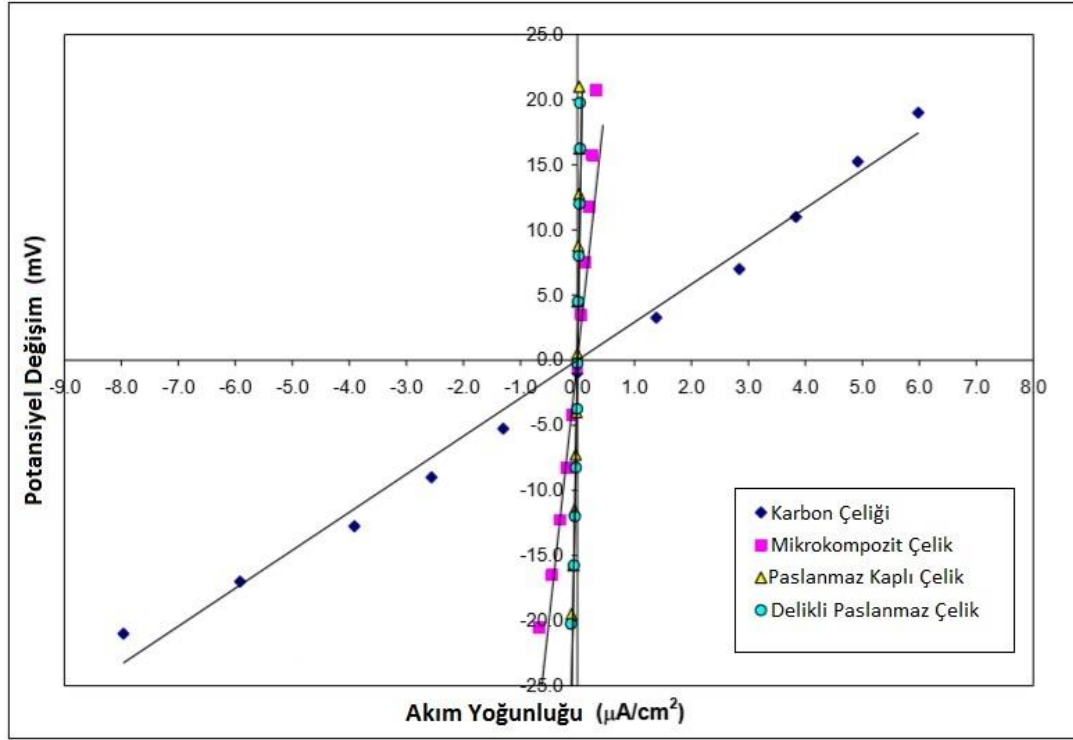
Kaplanmış numunelerde, korozyon üniform değildir. Bunun yerine, lokalize süreksizliklerde (küçük delikler, boşluklar, vb.) yoğunlaşmaktadır [35]. Epoksinin bir elektrik izolatörü olduğu göz önüne alındığında, kutuplaşma sadece bu kusurlu alanlarda meydana gelir ki kutuplaşma direncinin hesaplanmasında hesaba katılmaz.

Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, kutuplaşmış alanın, imal edilen derzlerin içindeki NaCl çözeltisine maruz bırakılan kayma demiri yüzeyine karşılık geldiği kabul edilmiştir. Polarize alan boyutu küçülürse korozyon akım yoğunluğu artacaktır.

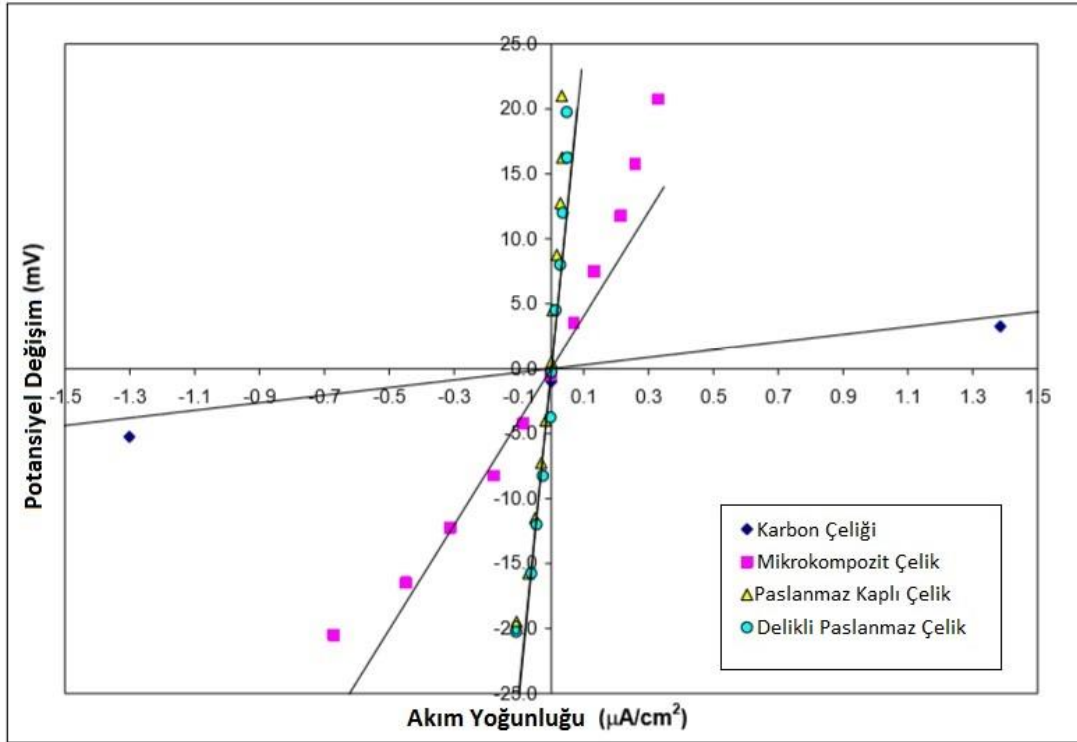
Akım yoğunluğu hesaplamasında kullanılan yüzey alanı $7,18 \text{ cm}^2$ idi; bu, kayma demiri çevresi (119,69 mm) ile derzin kalınlığı (6 mm) ile çarpılarak bulunmuştur. Mikrokompozit çelikten üretilmiş kayma demirlerinin çapı daha küçük (31,75 mm) ve kutuplaşma alanı $5,98 \text{ cm}^2$ idi.

Referans elektrot (bakır / bakır sülfat) ile çalışma elektrodu (kayma demiri) arasında elektriksel temas olması ve epoksi kaplamalı çubuklar için bir yarı hücre potansiyeli ölçülebilmesi kaplamadaki kusurlara işaret etmiştir. Lineer polarizasyon direnç sonuçları, kusurlu bölgelerde korozyon varlığını gösterebilir, ancak korozyon derecesinin değerlendirilmesi görsel incelemelere ve mikroskopik araştırmalara dayanmalıdır.

Şekil 4.27 ve Şekil 4.28 çeşitli bağlantı demirlerinin lineer polarizasyon direnç sonuçlarının karşılaştırmasını göstermektedir. Karbonlu çelik numunelerin, test edilen diğer kayma demirlerinden çok daha kötü performans gösterdiği kolayca görülebilir. Öte yandan, delikli paslanmaz çelik çubukların en iyi performansı sergilediğini ve bunu takiben paslanmaz çelik kaplı ve mikrokompozit çelik kayma demirlerinin izlediğini gözlemleyebiliyoruz.



Şekil 4.27 : Farklı tipteki kayma demirlerinin yarı hücre potansiyeli ile ilgili potansiyel değişimi ve akım yoğunluğunu gösteren grafik [33].



Şekil 4.28 : Yarı hücre potansiyelinin detayı. Eğim ne kadar büyük olursa korozyon direnci o kadar fazla olur [33].

Yarı hücreli potansiyel değerleri ile ilgili olarak, delikli paslanmaz çelik ve paslanmaz çelik kaplı numuneler belirsiz korozyon bölgelerinde bulunurken diğer tüm numuneler aktif korozyon bölgesindedir (bkz. Çizelge 4.1).

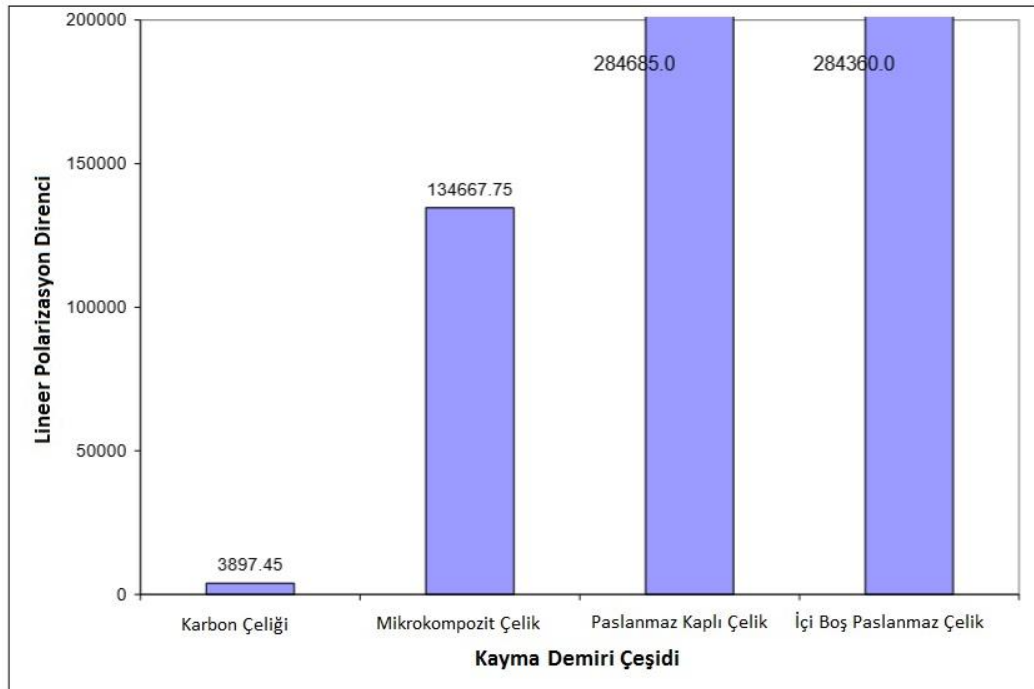
Çizelge 4.4 yarı hücre potansiyeli, polarizasyon direnci (R_p) ve korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) dahil olmak üzere her bir numune için elde edilen bireysel sonuçları özetlemektedir.



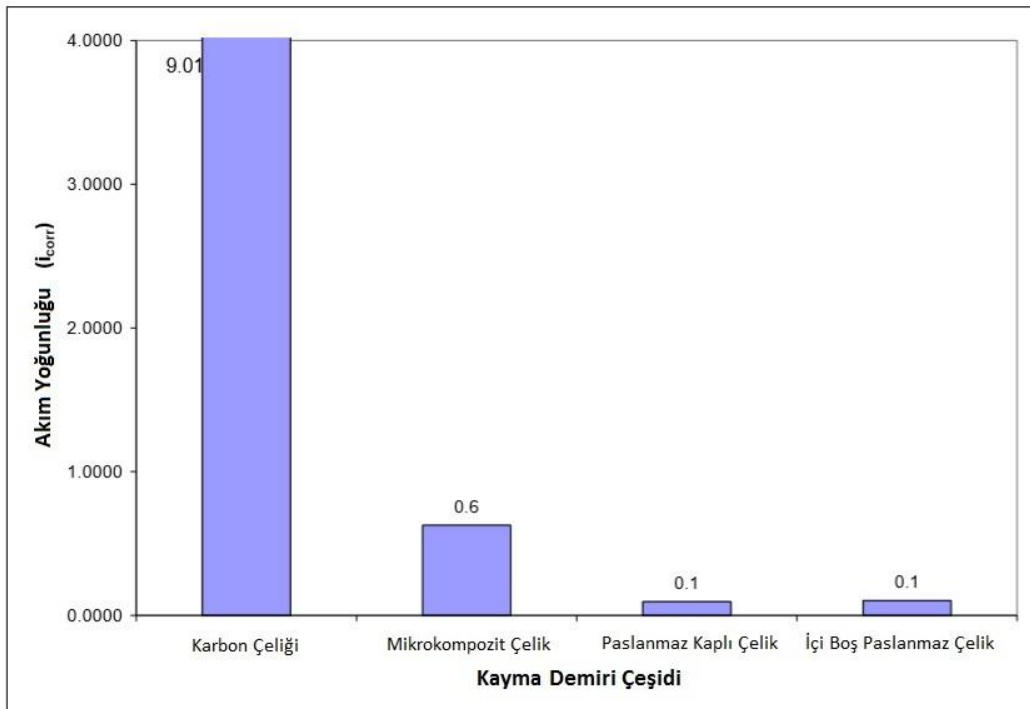
Çizelge 4.4 : Deney numunelerinin yarı hücre potansiyeli, polarizasyon direnci ve korozyon akım yoğunluğu değerleri [33].

Numuneler		Yarı Hücre Potansiyeli (mV)	Polarizasyon Direnci (Rp)	Korozyon Akım Yoğunluğu (i_{corr})
Karbon Çeliği	1	-602	1544.3	16.84
	2	-640	6066.5	4.29
	3	-694	2568.2	10.12
	4	-629	5410.8	4.81
	Ort.	-641.3	3897.5	9.01
Mikro- Kompozit	Std. Sap.	38.6	2183.2	5.84
	1	-567	23495	1.11
	2	-571	23146	1.12
	3	-292	367410	0.07
	4	-278	124620	0.21
Paslanmaz Kaplı	Ort.	-427.0	134667.8	0.63
	Std. Sap.	164.1	162343.7	0.57
	1	-286	311560	0.08
	2	-179	249520	0.10
	3	-216	361130	0.07
Delikli Paslanmaz	4	-345	216530	0.12
	Ort.	-256.5	284685.0	0.09
	Std. Sap.	73.8	64414.8	0.02
	1	-210	229850	0.11
	2	-569	192840	0.13
Mor epoksi kaplı(esnek olmayan)	3	-193	481700	0.05
	4	-320	233050	0.11
	Ort.	-323.0	284360.0	0.10
	Std. Sap.	173.4	132819.5	0.03
	1	-476	-	-
Gri epoksi kaplı(esnek olmayan)	2	-582	-	-
	3	-464	-	-
	4	-811	-	-
	Ort.	-583.3	-	-
	Std. Sap.	160.8	-	-
Yeşil epoksi kaplı (esnek)	1	-630	-	-
	2	-405	-	-
	3	-648	-	-
	4	-597	-	-
	Ort.	-570.0	-	-
	Std. Sap.	112.0	-	-
	1	-420	-	-
	2	-760	-	-
	3	-558	-	-
	4	-643	-	-
	Ort.	-595.3	-	-
	Std. Sap.	143.2	-	-

Şekil 4.29 ve 4.30, Lineer Polarizasyon Direnci ve akım yoğunluğu sonuçlarının karşılaştırmalı bir özetini göstermektedir.



Şekil 4.29 : Kaplanmamış kayma demirleri için kutuplaşma dirençlerinin ortalama sonuçları [33].



Şekil 4.30 : Kaplanmamış kayma demirleri için korozyon akım yoğunluğunun ortalama sonuçları [33].

Ortalama korozyon akımı yoğunluklarına gelince, karbon çelikten üretilmiş kayma demirinin çok hızlı korozyonu önlediği, mikrokompозit çeliğin orta düzeyde aşınma seviyesi sergilediği gözlemlenebilir. Paslanmaz çelikten üretilmiş ve paslanmaz çelikli delikli olanlar düşük korozyon oranına sahiptir (kullanılan kriterler Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'ye bakınız). Bireysel sonuçlar, dört mikrokompозit numuneden ikisinin "belirsiz" korozyon bölgelerinde (yarı hücreli potansiyel sonuçlarına göre) olduğunu ve düşük korozyon oranına sahip olduğunu göstermektedir.

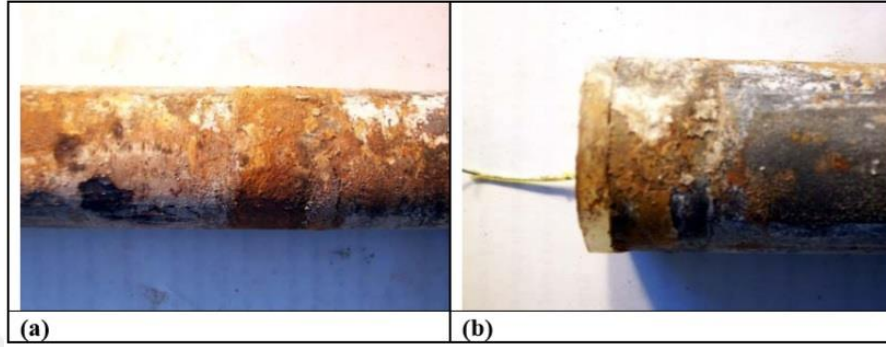
Epoksi kaplı çubuklar için sunulan ortalama değerler, düşük korozyon oranına işaret etmekte ve aslında görsel inceleme, birkaç lokalize arızalı bölge dışında bu bağlantı demirleri için büyük bir korozyon belirtisi göstermemektedir. Bununla birlikte, epoksi kaplı çubukların LPR sonuçları nicel olarak yorumlanamaz. Daha önceki bölümlerde (mikroyapı analizi) daha ayrıntılı olarak tartışıldığı gibi, kaplamadaki kusurlarda lokalize korozyon tespit edilmiştir. Kaplamanın altında ek korozyon gözlenmiştir.

4.5.2.2 Gözle muayene

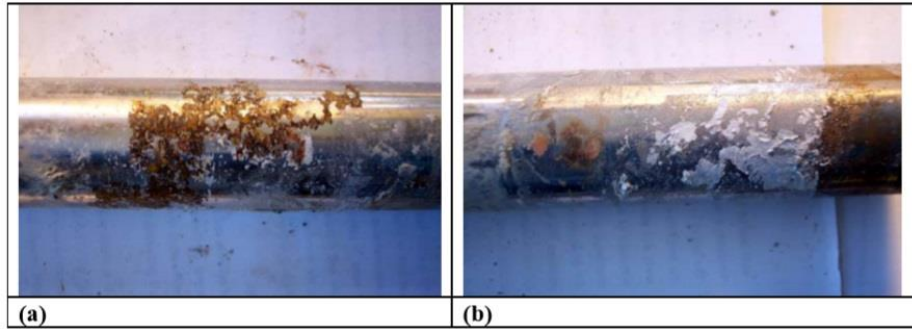
Elektrik deneyleri tamamlandıktan sonra, kayma demirlerini çevreleyen beton içerisindeki klorür konsantrasyonunu analiz etmek için, her kayma demiri türünün çevresindeki derzden karot alındı. Korozyona uğramış bölgeleri gözle muayene etmek amacıyla alınan numuneler kesilerek açılmış, kırılmış ve kayma demirleri çıkarılmıştır. Numuneler mikroyapısal SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) analizleri için seçilmiştir.

Şekil 4.31 ile Şekil 4.38 arası incelenen kayma demirlerinin genel görünümünü göstermektedir. Genel olarak karbon çelikten üretilmiş kayma demirleri demir boyunca genel korozyon sergilemiştir. Mikrokompозit çelikten üretilmişler, (karbonlu çelik numunelere kıyasla) daha az korozyon göstermiştir. Paslanmaz kaplamalı kayma demirlerinin demir boyunca görülebilen korozyona uğramış alanları olmadığı gözlenmiştir (karbon çeliği çekirdeği ile dış paslanmaz çelik tabaka arasındaki uçlarda paslanma doğrulanmıştır). Delikli paslanmaz kaplı kayma demirleri temelde hiçbir görünür korozyon göstermedi. Lokalize korozyon, epoksi kaplı dübeller üzerindeki kusurlu bölgelerde doğrulanmıştır, ancak görsel olarak büyük bir korozyon belirtisi görülememiştir.

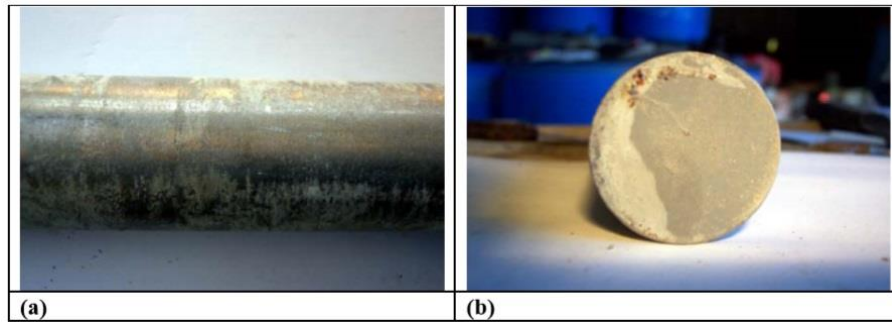
Şekil 4.31 ile Şekil 4.38 arasında görüldüğü gibi, karbon çeliği örnekleri aşırı derecede korozyona uğramıştır. Mikrokompozit çelikten üretilmiş kayma demirleri daha az korozyon sergilemiştir. Paslanmaz çelik kaplı ve delikli paslanmaz kayma demirleri, görünür hiçbir korozyon belirtisi göstermemiştir. Epoksi kaplı çubuklarda kusurlar görülmüş ve beklendiği gibi kusurlu bölgelerdeki lokalize korozyon doğrulanmıştır.



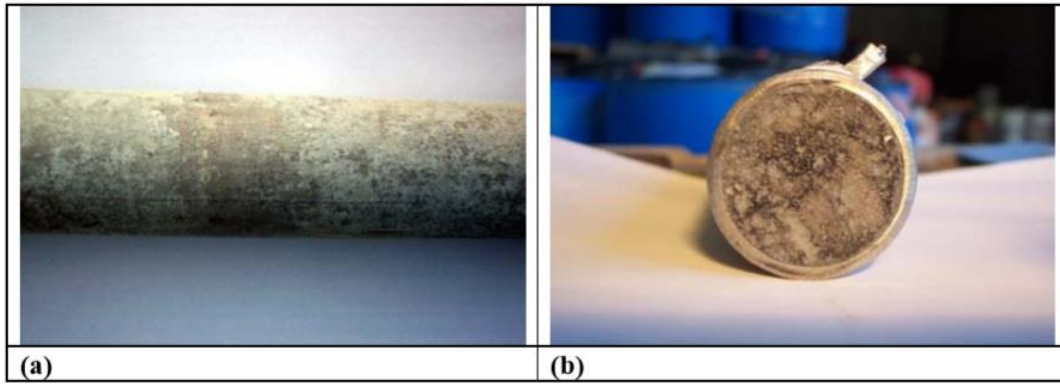
Şekil 4.31 : Karbon çelikten üretilmiş kayma demiri. (a) Derz altındaki bölge; (b) Elektrik bağlantısı ile sonlandırma [33].



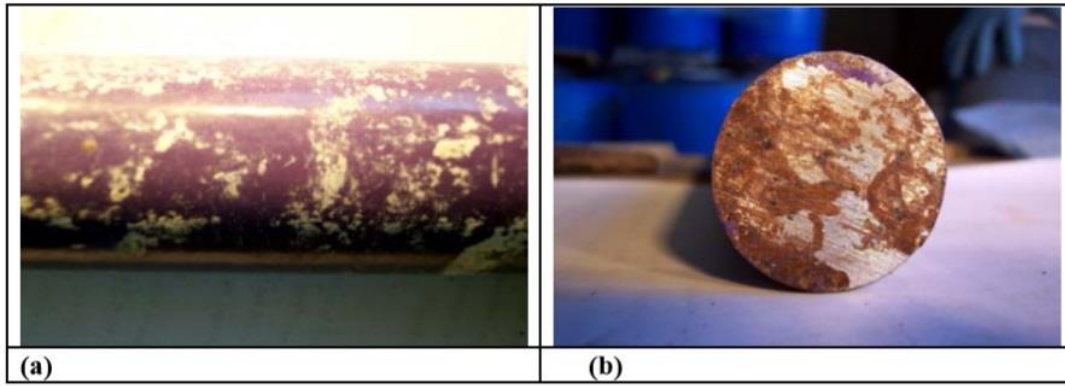
Şekil 4.32 : Mikrokompozit çelikten üretilmiş kayma demiri. (a) Derz altındaki bölge; (b) Demirin uç bölgeleri [33].



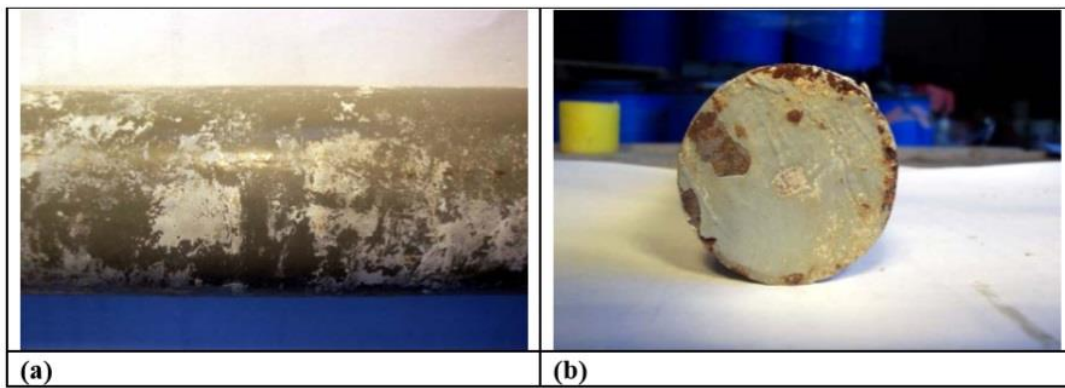
Şekil 4.33 : Paslanmaz kaplı çelikten üretilmiş kayma demiri. (a) Derz altındaki bölge; (b) Paslanmaz kaplama ile çelik arasındaki bölgede oluşan korozyon [33].



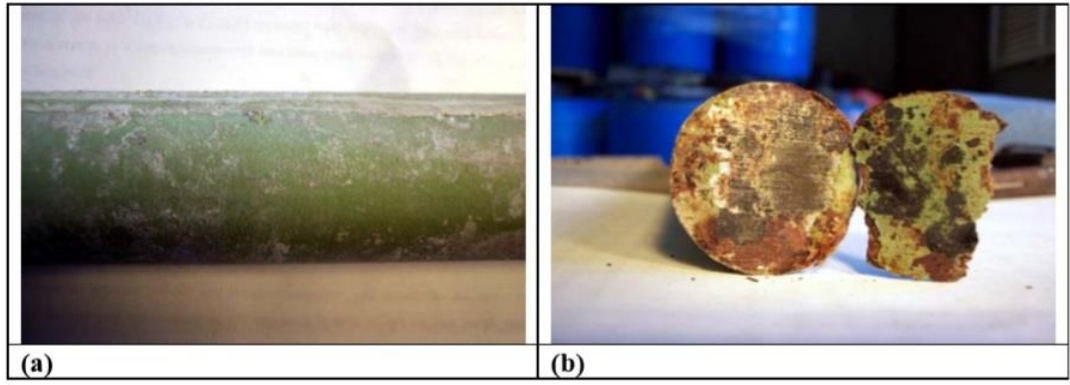
Şekil 4.34 : Delikli paslanmaz çelikten üretilmiş kayma demiri. (a) Derz altındaki bölge; (b) Demirin uç noktasındaki kesitte görülen harç dolu bölge [33].



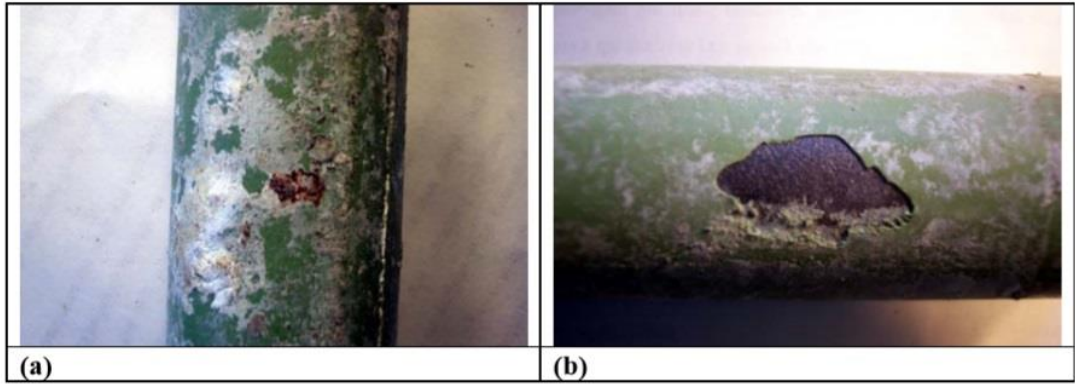
Şekil 4.35 : Epoksi kaplı çelikten üretilmiş kayma demiri (mor). (a) Demirin genel izlenimi; (b) Korozyon demirin uç kısmında epoksi kaplamanın altında oluşmuştur [33].



Şekil 4.36 : Epoksi kaplı çelikten üretilmiş kayma demiri (gri). (a) Demirin genel izlenimi; (b) Korozyon demirin uç kısmında epoksi kaplamanın altında oluşmuştur [33].



Şekil 4.37 : Epoksi kaplı çelikten üretilmiş kayma demiri (yeşil). (a) Demirin genel izlenimi; (b) Korozyon demirin uç kısmında epoksi kaplamanın altında oluşmuştur [33].



Şekil 4.38 : Korozyon ürünü epoksi kaplamanın sorunlu alanında yoğunlaşmıştır. (a); kaplamanın altındaki karbon çeliğin durumunu gözlemlemek için epoksi kaplamanın bir kısmı çıkarılmıştır (b) [33].

4.5.2.3 Koroziyon alanların mikroyapısal analizi

Mikroyapısal araştırma, ikincil elektronları kullanarak dijital bir Leo 430 taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. SEM görüntüleme, bir kamera ile algılanan ve kaydedilen ikincil elektronları uyaracak ve çıkartacak yeterli enerjiye sahip bir elektron demeti ile numuneyi bombardıman ederek çalışır.

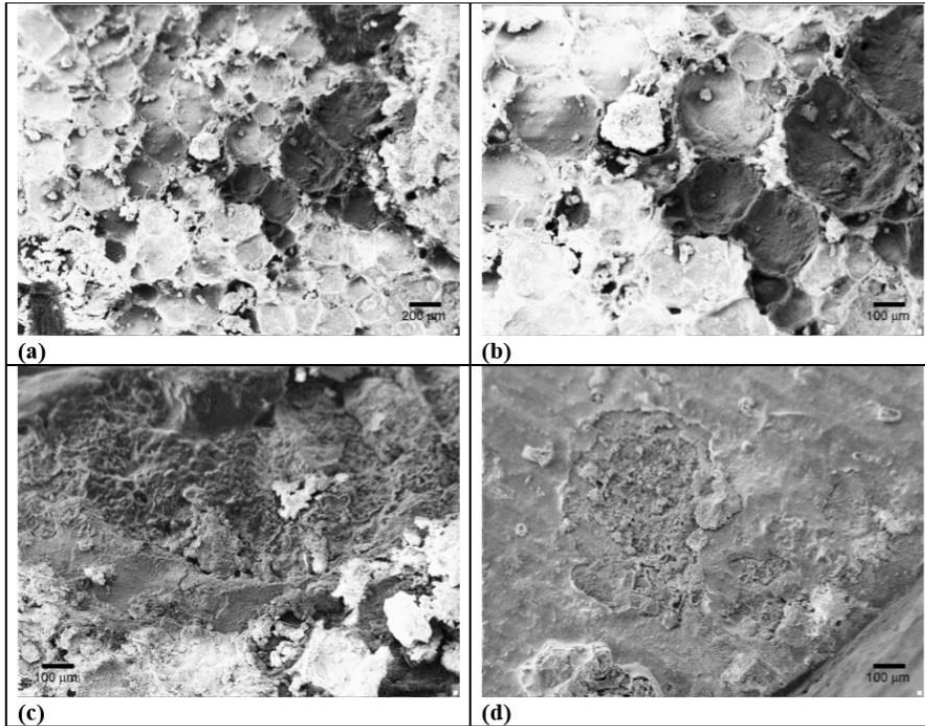
Bu çalışmada, gözle muayene sırasında her korozyona uğramış kayma demiri türünün numuneleri toplanmış ve daha sonra SEM ile analiz edilmiştir.

SEM mikroyapı analizinde, her numunedeki aşınmış alanların incelenmesi (ör. Şekil 4.38a) tercih edilmiştir. Ayrıca Şekil 4.38b'de gösterilen gibi seçilen bölgelerde araştırılmıştır.

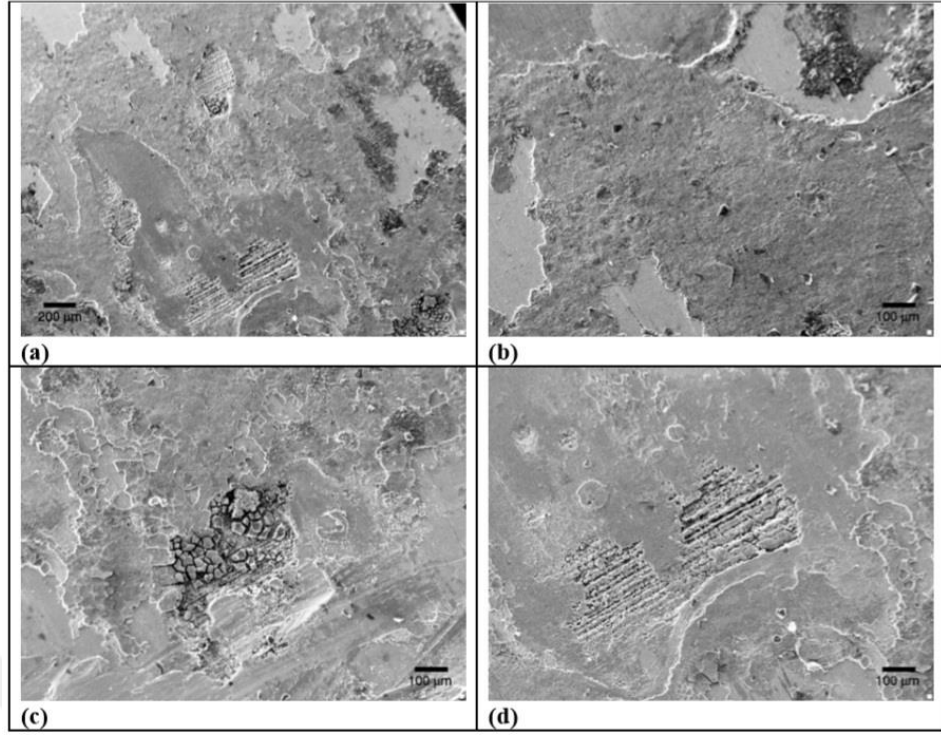
Şekil 4.39 ile Şekil 4.45 arası, incelenen her malzeme için karakteristik SEM görüntüleri sunmaktadır.

Genel olarak, elektron mikroskopu ile gözlenen korozyon şiddeti, elektriksel ölçümler ve gözle muayene ile ölçülen sonuçlarla uyumludur. Bununla birlikte mikroyapısal soruşturmanın çoğunlukla her numunenin aşınmış alanlarına odaklandığını ve kayma demiri çubuklarının genel durumunu göstermediği unutulmamalıdır. Örneğin, paslanmaz çelik kaplamalı kayma demirleri korozyon hızı ölçümleri üzerinde mükemmel performans sergilemiş ve görsel denetimle korozyon tespit edilmemiş olmasına rağmen karbon çeliğinden üretilmişlere yakın uçlarında nispeten daha fazla lokalize korozyon gözlenmiştir (bkz. Şekil 4.33b ve Şekil 4.42).

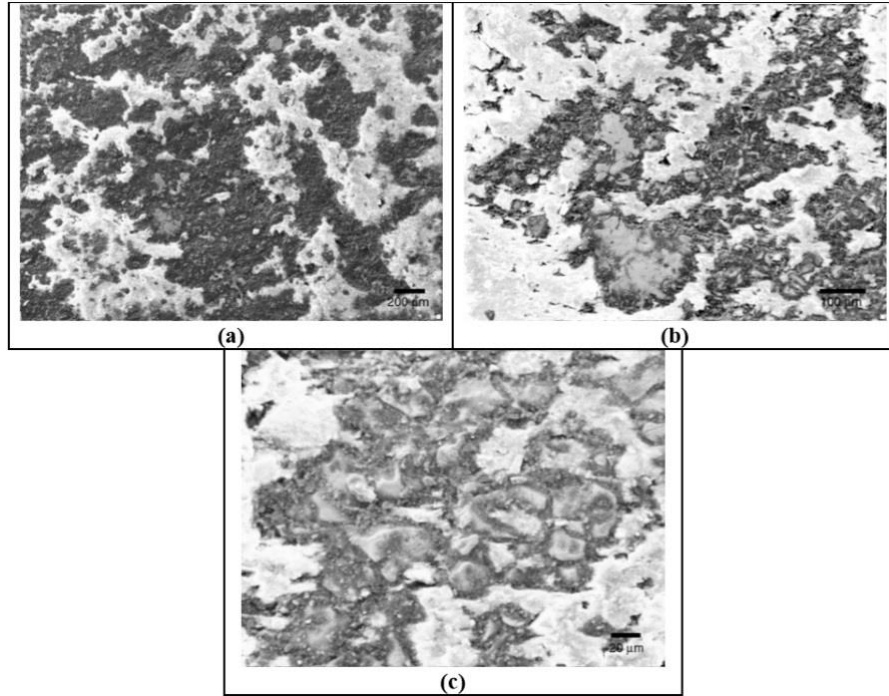
Epoksi kaplı numunelerin analizinde de benzer bir durum gözlemlenmiştir. Elektriksel ölçümlerin, bu tür numunelerin korozyon durumunun güvenilir bir nicel tahminini sağlamadığı ve görsel incelemede çubukların hala özellikle karbon çeliğinden üretilmiş kayma demirlerine kıyasla nispeten iyi durumda olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, bu bölümde epoksi kaplamanın çeşitli kusurları sunulmuş ve kusurlar ile lokalize korozyon oluşumu arasındaki ilişki araştırılmıştır.



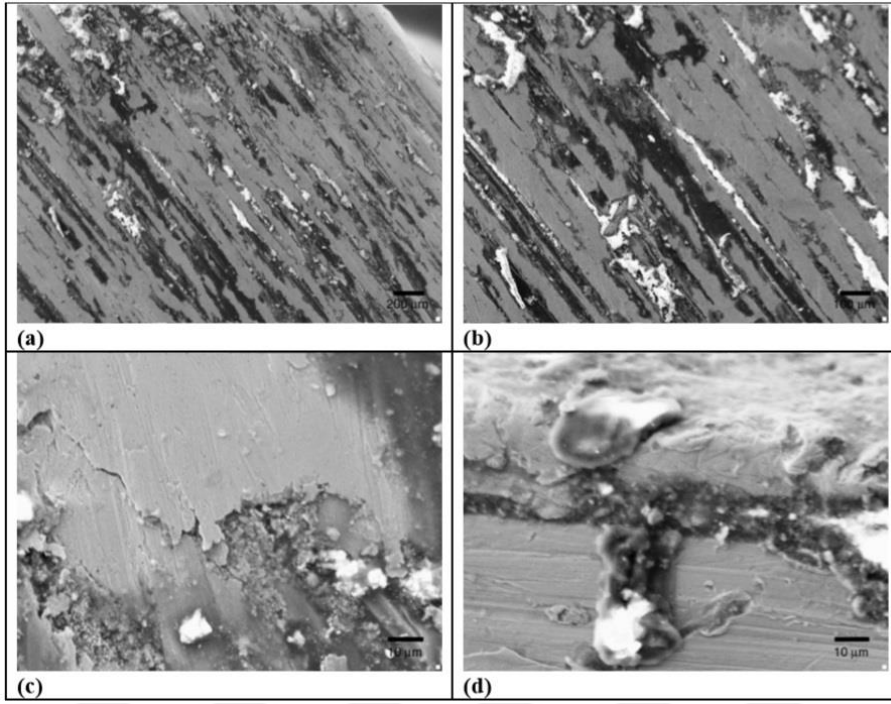
Şekil 4.39 : Karbon çeliği numuneleri. (a) Dübel yüzeyi boyunca ağır aşınma, büyütme = 100 ×; (b) aynı bölge, 200 ×; (c) yüzeydeki farklı bölge, 200 ×; ve (d) bar ucunda korozyon, 100 × [33].



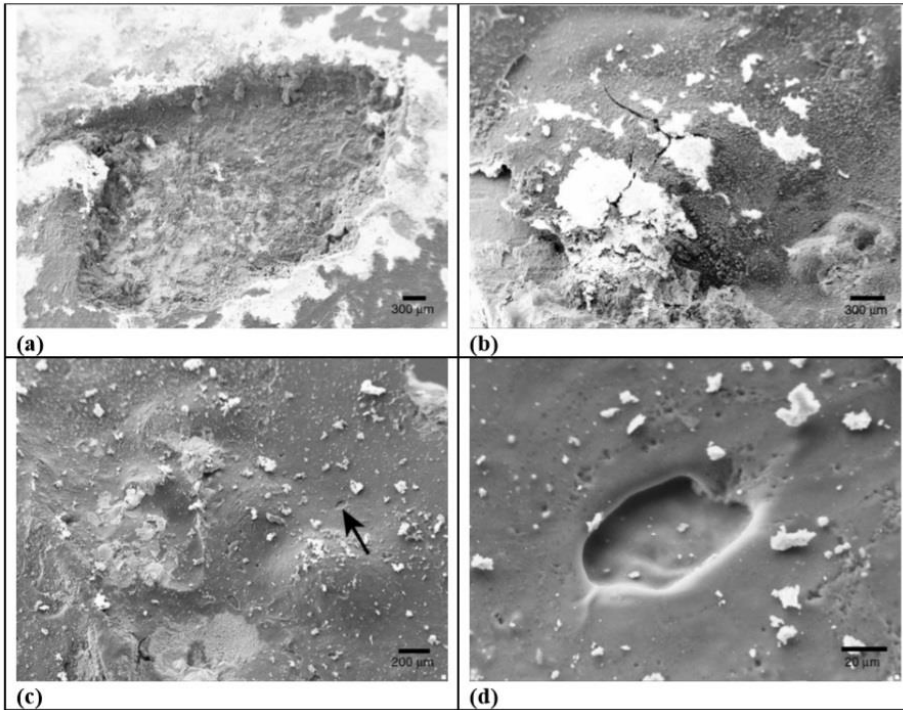
Şekil 4.40 : Mikrokompozit çelik numuneleri: (a) Yüzey boyunca korozyon yönü, 100 ×; (b) aynı bölge, 205 ×; (c) ve (d) karakteristik korozyon alanlarının detayları, 205 × [33].



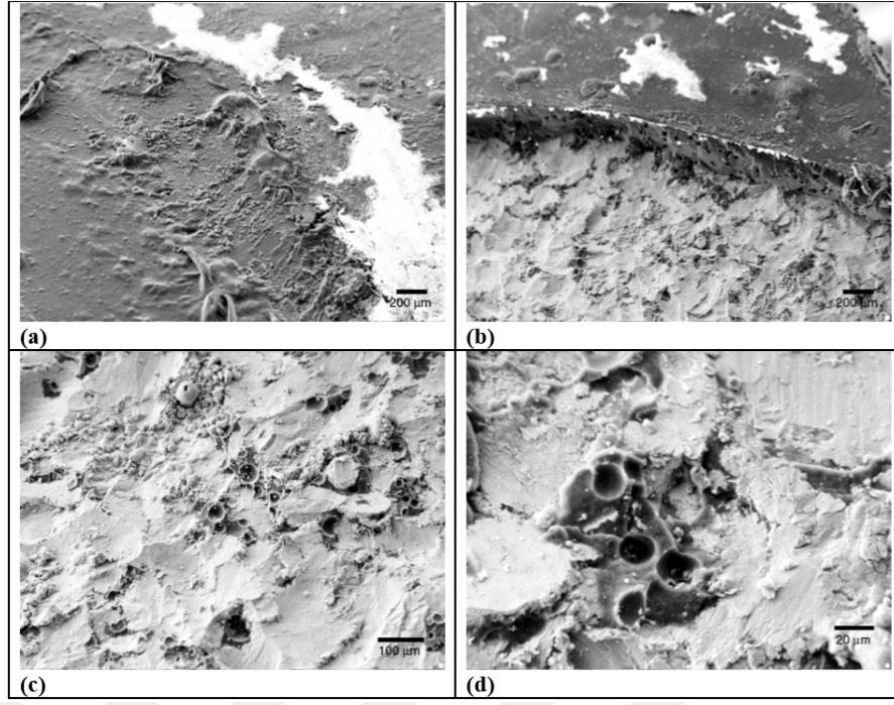
Şekil 4.41 : Delikli paslanmaz çelik numuneleri: (a) yüzeyde 100 × görüntü; (b) aynı bölge, 300 ×; ve (c) yüzey durumunun ayrıntısı, 1.000 × [33].



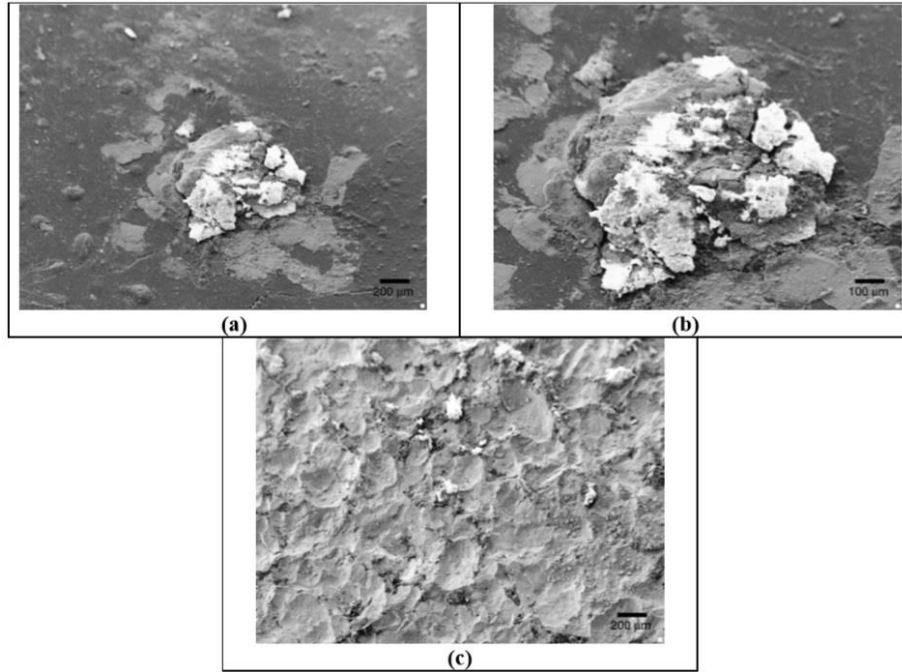
Şekil 4.42 : Paslanmaz kaplı çelik numuneleri: (a) Demirin ucuna yakın bir bölgede, 100 ×; (b) aynı bölgede yakınlaştırma, 200 ×; (c) yüzeydeki aşınma ayrıntıları, 2,390 ×; (d) kenarda korozyon detayı, 2,320 × [33].



Şekil 4.43 : Gri epoksi kaplı numuneler: (a) kaplamada korozyona uğramış alan, 50 ×; (b) kaplamanın kaldırıldığı bir köşedeki başka bir bölge, 75 ×; (c) yüzeyin genel görünüşü, 100 ×; ve (d) c’de okla gösterilen bir süreksizliğin detayı, 1,500 × [33].



Şekil 4.44 : Yeşil epoksi kaplı numuneler: (a) yüzeyin genel görünümü, 100 ×; (b) epoksi kaplamanın bir kısmının çıkarıldığı bölge, 100 ×; (c) epoksi altındaki çeliğin durumu, 302 ×; ve (d) kaplamanın altında bulunan korozyona uğramış alan ve çukurların ayrıntıları, 1,330 × [33].



Şekil 4.45 : Mor epoksi kaplı numuneler: (a) Penetrasyon sırasında biriken korozyon ürünleriyle yüzeyin genel görünümü, 100 ×; (b) aynı bölgede yakınlaştırma, 200 ×; ve (c) epoksi altındaki çeliğin durumu, 200 × [33].

4.5.3 Üçüncü aşama sonuçları

WSDOT plaklarından çıkarılan ve Kaliforniya'ya taşınan altı karot da Caltrans laboratuvarında test edildi. Hizmetteki beton yolların köşelerinden çıkarılan 10 karot (2 tanesi Washington Eyaletindeki 5 farklı konumdan), test için ayrıca Yapı Teknoloji Laboratuvarı'na gönderilmiştir. Karotların farklı derinliklerindeki betonunun klorür içeriği, laboratuvarda klorür alan plakların içeriği ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, hızlandırılmış laboratuvar testlerinden elde edilen sonuçların uzun vadeli saha koşullarıyla ilişkilendirilmesine yardımcı olmuştur.

4.5.3.1 Çıkarılan WSDOT beton yol plakları

Bu bölüm, yarı hücre potansiyel testleri, LPR deneyleri, klorür analizleri ve Interstate 90'daki WSDOT kayma demiri yenileme projesinden alınan döşemeler üzerinde yapılan görsel incelemenin sonuçlarını ve tartışmalarını sunmaktadır.

Yarı hücre potansiyeli ve lineer polarizasyon direnci

Lineer polarizasyon direnci yönteminde kutuplaşma direncinin büyük olduğu tahmin edilse de, hızlandırılmış lokalize korozyonun epoksi kaplamanın altında ve / veya kusurlarında meydana gelebileceğini vurgulamak önemlidir. Bu korozyon tespit tekniğinin epoksi kaplı kayma demiri için nicel olarak yorumlanamayacağını unutmamak gerekir çünkü bu durumda korozyon, kaplama süreksizliklerinde (küçük delikler, boşluklar, vb.) lokalizedir. Epoksinin bir elektrik izolatörü olduğu göz önüne alındığında kutuplaşma, kutuplaşma direncinin hesaplanmasında hesaba katılamayan çok küçük alanlarda (sorunlu bölgeler) meydana gelir.

Yarı hücreli potansiyel sonuçlarına gelince, farklı kayma demirlerinin yüksek ihtimalli korozyon bölgesinde bulunan benzer değerleri (sırasıyla -430mV, -400mV ve -392mV) sunduğunu gözlemleyebiliriz (Çizelge 4.1).

Gözle muayene

Şekil 4.46, derzden hemen sonra derzde bulunan bir karot deliğinin iç kısmını göstermektedir. Korozyona uğramış kayma demirinin üstü deliğin tabanında gözlemlenebilir. Seyrek epoksi kaplamanın bir kısmını sıyırdıktan sonra, önemli ölçüde korozyon ürünü bulunmuştur. Karot burgusunu soğutmak için karot su ile

ıkarılmasına rağmen karot almadaki su nedeniyle korozyon oluşmasına neden olacak vakit oluşmamıştır.

Ayrıca karot alma sırasında yenilenen kayma demirleri çubuklarından birinin enine derz üzerinde ortalanmadığı ve derzin bir tarafındaki döşemeye yaklaşık 100 mm uzaklıkta olduğu ortaya konmuştur. Bağlantı demirinin bu yanlış yerleştirilmesinin derzin yük aktarım verimliliğine (LTE) olumsuz katkıda bulunduğu kesindir. Muhtemelen gözlenen korozyon ve beton ile kayma demiri arasında zayıf bir korozyon tabakası varlığı da LTE kaybına katkıda bulunmuştur.



şekil 4.46 : Yakın zamanda alınmış bir karot numunesinin iç kısmında, epoksi kaplamanın altında korozyon ürünlerini gösteren görüntü [33].

4.5.4 Klorür içeriğinin analizi

Daha nceki bölümlerde belirtildiği gibi, WSDOT beton yol plakları çıkarılmış, Washington eyaletinde beş farklı lokasyondaki hizmetteki beton yol birleşim köşelerinden alınan beton karotlar üzerinde çeşitli klorür analizleri gerçekleştirilmiş ve 2.aşama testinden laboratuvar kirişleri %3,5 NaCl solüsyonuna maruz bırakılmıştır. Bu gibi klorür kesitleri kayma demirlerini çevreleyen bölgedeki klor

konsantrasyonunu, özellikle açık derzlerin yakınında değerlendirmek ve arazi ile laboratuvarında maruz kalma koşullarını karşılaştırmak için kullanılır.

4.5.4.1 Interstate 90'dan çıkarılan WSDOT plaklarının klorür analizi

Klorür analizleri için çıkarılan WSDOT plaklarından Interstate 90'dan altı numune alınmıştır. Karot 1 ve 2, yalnızca beton içinden yapılmıştır; karot 3 ve 4 yenileme yapılan harçtan ve kayma demirlerinin ucundan alınmış, karot 5 ve 6 ise harç ve kayma demiri vasıtasıyla derzde elde edilmiştir. Numuneler, gerçekleştirilecek analizler için Caltrans kimya laboratuvarına gönderilmiştir.

Karot 4, karot makinesi ile ilgili sorunlar nedeniyle aynı gün tamamen kaldırılamamış ve analizlerden çıkarılmıştır. Karot 3 için sonuçlar bu bölgedeki klorür konsantrasyonunun düşük olduğunu ve önemli olanın derz bölgesindeki klorür konsantrasyonlarının incelenmesi olduğunu göstermiştir.

Beton yol 1964'te yapılmış ve buz çözücü tuzlar yılda 120-150 gün uygulanırken her buzlu günün tipik olarak en az iki uygulaması olduğu belirtilmiştir.

1994 yılında yapılan kayma demiri yenilenmesi için kullanılan harç üzerine klorür konsantrasyonlarını ilave edilmiştir. Projeden yaklaşık 10-11 yıl sonra bile, Cl- iyonlarının konsantrasyonunun, kayma demirleri normal karbonlu çelik olmasına rağmen, korozyonu başlatmak için asgari değerde olduğu görülmüştür. Derzin yakınında bulunan klorür konsantrasyonlarının daha yüksek değerlere ulaştığı anlaşılmıştır.

Klorür iyonlarının, açık derzden oyuk içine daha kolay nüfuz etmektedir. Bu yüzden bu noktada, klorürlerin daha kolay erişmesi ve birikmesi, kayma demirlerinin yakınında daha yüksek lokalize konsantrasyonlara neden olur. Bu durumda, klorür iyonlarının üstten beton (veya harç) içerisine sızmadığı, bunun yerine açık derz yerinden kayma demiri içine geçtiğine kanaat getirilmiştir.

4.5.4.2 Çeşitli yerlerdeki WSDOT beton yollarından alınan karotların klorür analizi

Bu bölümde Washington eyaletinin beş farklı yerinde hizmetteki beton yolların derzlerinin yanından alınan karotların klorür analizlerinin sonuçları açıklanmaktadır. Bu karotlar WSDOT tarafından çıkarıldı ve laboratuvar sonuçlarıyla karşılaştırma için Yapı Teknoloji Laboratuvarı tarafından klorür içeriği açısından test edilmiştir.

4.5.4.3 Laboratuvar numunelerinin klorür analizi

Daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi, laboratuvar beton kirişlerinin derzlerinden silindirik karot alınmıştır. Laboratuvar numuneleri, 18 aylık bir süre boyunca, genellikle deniz suyunu simüle etmek için kullanılan %3,5 NaCl solüsyonuyla ıslak-kuru döngülere tabi tutulmuştur. Çıkarılan numuneler, klor analizlerinin yapıldığı Caltrans kimya laboratuvarına sevk edilmiştir.

Genel olarak klorür konsantrasyonlarının, klorürün beton içerisinde dağılması gerekirken derinlik boyunca çok daha sabit olduğu veya dar bir derzden sızdığı görülmüştür. Bunun nedeni, laboratuvar numunelerinde, dübellerin üstünde büyük (yaklaşık 6 x 50 mm) derz birleşimi bırakılmasıdır.

Ayrıca % 3.5 NaCl çözeltisinin kullanılması, sahadaki örneklerde elde edilen sonuçlara kıyasla yüksek klorür konsantrasyonlarına yol açarak korozyon sürecini büyük ölçüde hızlandırdığını doğrulamıştır. Bu saldırgan ortama sadece 18 ay maruz kaldıktan sonra paslanmaz kaplı ve paslanmaz boşluklu numuneler hariç hemen hemen tüm örneklerde korozyon gözlemlenmiştir. Nispeten, önceki sonuçlara dayanarak, karbon çeliklerin korozyon direncinin, mikrokompzit çeliklerinkine kıyasla oldukça düşük olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, klorür konsantrasyon analizlerinin projesi için uygun materyali seçerken gerçek saha koşullarının ve yerel çevresinin dikkate alınması gerektiği unutulmamalıdır.

4.6 Değerlendirmeler ve Öneriler

Bu çalışmada, hızlandırılmış laboratuvar testleri kullanılarak beton kirişlere dökülen birkaç çelik kayma demirinin korozyon performansı araştırılmıştır. Hızlandırılmış test, kirişlerin üst kısmında klorür çözeltisi ile suyun toplanması ve bağlantı demirlerinin kısa bir bölümüne doğrudan erişim sağlayan her kirişte bir "derz" bulundurmaktan ibaretti. Kirişlere kuvvet yükü uygulanmamıştır. Sonuçlar testlerden elde edilmiştir.

Sonuçlar, yarı hücreli potansiyel testlerin sonuçları, LPR eğrileri, gözle muayeneler ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile yapılan mikroskobik araştırmalara dayandırılmıştır. Bunların hepsi bu bölümde sunulmuştur.

4.6.1 Birinci aşama değerlendirmesi

Aşağıdaki sonuçlar, farklı aşındırıcı ortamlardaki derzlerle birlikte dört tip kayma demirinin (karbon çeliği, epoksi kaplı çelik, delikli paslanmaz çelik ve paslanmaz kaplı çelik) farklı korozyon ortamlarda beton kirişlere yerleştirilmesiyle oluşan sonuçlardır. Korozyon başlamasını değerlendirme için yarı hücreli potansiyel testleri, test tamamlandıktan sonra gözle muayene yöntemi kullanılmıştır.

- Karbon çeliğinden yapılmış kayma demirleri en kısa korozyon başlatma periyoduna sahiptir. Klorürler demirden derzin içine doğrudan eriştiği zaman, başlangıç safhası ihmal edilebilir ve hemen korozyon ilerleme aşaması başlar. Kayma demirlerinin epoksi kaplı olması başlangıç süresini önemli ölçüde artırırken paslanmaz delikli ve paslanmaz kaplı kayma demirleri korozyonun başlangıcına en yüksek direnç sağlamıştır.
- Altı aylık döngüsel kaplama sonrası gözle muayenelerden, karbonlu çelik kayma demirlerinin çubuk boyunca aynı korozyona sahip olduğu, epoksi kaplı kayma demirlerinin çoğunlukla kaplamanın en savunmasız olduğu çubukların uçlarında lokalize korozyona sahip olduğu gözlemlenmiştir. Delikli paslanmaz çelik çubuklarda veya paslanmaz kaplı çubuklarda görünür bir korozyon görülmemiştir.

4.6.2 İkinci aşama değerlendirmesi

Aşağıdaki sonuçlar, yedi çeşit kayma demirinin [karbon çeliği, mikrokompozit çelik, delikli paslanmaz çelik, paslanmaz kaplı çelik, esnek epoksi ile kaplanmış karbon çeliği (yeşil renkli) ve esnek olmayan epoksi ile kaplanmış karbon çeliği (mor ve gri renkli)] farklı korozyon ortamlarda derzler ile beton kirişler içine dökülmüştür. Bu numuneler, yarı hücre potansiyel testleri, lineer polarizasyon direnç eğrileri, gözle muayeneler, klorür analizleri ve mikroskopik incelemeler kullanılarak korozyon direnci açısından değerlendirilmiştir.

- Bu çalışmada yer alan epoksi kaplı numuneler gibi kaplanmış numunelerde korozyon, düzgün değildir bunun yerine lokalize süreksizliklerde (küçük delikler, boşluklar, vb.) yoğunlaşmıştır. Epoksinin bir elektrik izolatörü olduğu göz önüne alındığında, kutuplaşma yalnızca kutuplaşma direnci teriminin hesaplanmasında hesaba katılamayacak kadar küçük alanlarda (hatalı bölgeler) meydana gelir. Bu nedenle epoksi kaplı kayma demirleri

diğer kayma demirleri ile nicel olarak değerdendirilemediğinden nitel olarak değerdendirilmelidir.

- Karbon çelik kayma demirleri en düşük kutuplaşma direnci değerdelerine (R_p) sahiptir ve dolayısıyla ara yüzey boyunca yük transferine karşı direnci çok azdır ve bu nedenle en hızlı korozyon yayılım oranına sahip olmaları beklenir.
- Mikrokompozit çelik kayma demirleri, karbon çeliğinden yaklaşık 35 kat daha fazla polarizasyon direncine (R_p) sahipken, paslanmaz kaplı ve delikli paslanmaz çubukların kutuplaşma direnci yaklaşık 73 kat daha fazla olmuştur. R_p 'nin korozyon akım yoğunluğu ile ters orantılı olduğuna ve dolayısıyla korozyon oranını dikkate aldığını göz önünde bulundurmak gerekir. Bu, mikrokompozit çelik kayma demirlerinin karbon çeliğinden yapılmış kayma demirlerine göre korozyon yayılımına karşı daha fazla direnç gösterdiğini, ancak paslanmaz kaplı ve delikli çubuklar kadar fazla olmadığını göstermektedir.
- Korozyon akımı yoğunluğu sonuçlarına dayanarak, karbon çelik kayma demirlerinin çok hızlı korozyon sergilediğı, mikrokompozit çeliğın orta seviyede olduğu ve paslanmaz çelik kaplı ve delikli paslanmaz çeliğın düşük korozyon hızında ilerlediğı doğrulanmıştır.
- Korozyona uğramış kayma demirlerinin gözle muayeneleri sonucu karbon çeliğı kayma demirleri boyunca ağır ve çoğunlukla düzgün korozyon, mikrokompozit çelik kayma demirlerinde hafif korozyon ve paslanmaz çelik kaplı ve delikli paslanmaz çelik çubuklarda görünür korozyon görülmemiştir. Epoksi kaplamalı kayma demirleri için gözle muayeneler genel olarak görünür korozyonun yaygın olmadığını ancak boşluklarda ve demir uçlarının kenarlarında var olan birkaç kusurlu alanda meydana geldiğini ortaya koymuştur. Esnek ve esnek olmayan epoksi kaplı kayma demirlerinin performansı üzerinde hiçbir fark gözlenmemiştir.
- Genel olarak SEM ile mikroskobik inceleme sonuçları, elektriksel ölçümler ve görsel incelemeler tarafından öngörülen sonuçları eşleştirmiştir. Bununla birlikte, analiz her bir numunenin çoğunlukla paslanmış alanlarına odaklanmış ve çıplak gözle görülemeyen aşınmış alanları ortaya koymuştur.

- Sonuçların istatistiksel analizleri her durumda kayma demiri tipinin, incelenen nicel parametreler üzerinde (yarı hücreli potansiyel, polarizasyon direnci ve korozyon akım yoğunluğu) istatistiksel olarak önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

4.6.3 Üçüncü aşama değerlendirmesi

Aşağıdaki sonuçlar, WSDOT kayma demirinin yenilenmesi projesi kapsamında 40 yıllık beton yoldan çıkarılan kayma demirlerinin üçüncü aşamadaki sonuçlarıdır.

- Karotların derzlerden alındığı plaklarda gözle muayene sonucu önemli miktarda korozyon ürünü doğrulandı. Korozyon derzin altındaki kayma demirinin orta bölgesinde epoksi kaplamanın altında meydana gelmiştir. Korozyonun beton ile kayma demiri arasındaki ara yüzeyindeki dayanım düşürücü korozyon ürünlerinden dolayı derzin yük aktarım verimliliğinin (LTE) kaybına yol açması muhtemeldir. Bir kayma demirinin enine derz üzerinde merkezlenmesinin olmaması da düşük LTE'ye katkıda bulunabilir.
- Yarı hücreli potansiyel ve lineer polarizasyon direnç sonuçları gözle muayene sonucu belirlenen aktif korozyon varlığını onaylamıştır.

4.6.4 Klorür analizi değerlendirmesi

Çıkarılan WSDOT plakları ve Washington eyaletinin çeşitli yerlerinde beton yoldan çıkarılan karotların laboratuvar numuneleri klorür konsantrasyonları arasındaki ilişki hakkında aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Kaplama derzlerine yakın klorür konsantrasyonları kaplamanın diğer bölgelerinden daha yüksektir. Derzde, klorürlerin daha kolay erişilmesi ve birikmesi, daha yüksek lokalize konsantrasyonlara yol açar.
- Bir derz varsa klorür iyonları üstten beton (veya harç) yoluyla kayma demirlerine erişmez, açık derzden kayma demirine girerler.
- Arazi deneylerinde karbonlu çelik için klorür eşiğinin altı projeden beşinde aşıldığı doğrulandı.

- Kayma demirlerinin üstünde bulunan açık derzlerdeki klorür konsantrasyonları, klorürün beton içerisinde dağılması veya daha dar bir derzden geçmesi gereken alan koşullarına kıyasla, derinlik profili boyunca daha sabittir.
- Laboratuvar deneyleri için %3,5 NaCl solüsyonunun kullanılması arazi numunelerinden elde edilen sonuçlara kıyasla oldukça yüksek klorür konsantrasyonlarına yol açarak korozyon sürecini büyük ölçüde hızlandırır. Bu saldırgan ortamın bir sonucu olarak, hemen hemen tüm örneklerde 18 ay içinde korozyon gözlemlenebilir.
- Laboratuvar sonuçları, aynı saldırgan çevreye maruz bırakılan farklı malzemelerin korozyon direncini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek için kullanılabilir. Bununla birlikte, klorür konsantrasyon analizleri, belirli bir proje için uygun materyali seçerken gerçek saha koşullarının ve yerel çevresinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.



5. TÜRKİYE’DE İKLİM TÜRLERİNE GÖRE BETON YOL YAPILMADAN ALINMASI GEREKEN ÖNLEMLER

Daha önceki bölümlerde anlatılan konulara göre Türkiye’de yapılması düşünülen bir beton yol uygulamasında iklim özellikleri öncelikle dikkate alınması gereken bir konudur. İklim çeşitlerine göre farklı önlemler alınması gereklidir. Bu bölümde kısaca bunlardan bahsedilmiştir.

Türkiye’deki yedi farklı bölgeden birer il seçilmiştir. Marmara’dan İstanbul, Ege’den İzmir, Karadeniz’den Trabzon, İç Anadolu’dan Kayseri, Akdeniz’den Antalya, Güneydoğu Anadolu’dan Diyarbakır ve Doğu Anadolu’dan da Erzurum illeri göz önüne alınarak bir değerlendirme yapılmıştır.

• İstanbul

Konum olarak Marmara ve Karadeniz’e kıyısı olan İstanbul ayrıca bu iki denizi birleştiren boğaza sahiptir. Bu sebepten dolayı sahil şeridinde korozif suya maruz kalma ihtimali oldukça yüksektir. Yazları sıcak ve kurak, kışlar ise ılık ve yağışlıdır. Normal şartlarda kar yağışlı gün sayısı yılda 10-15 gün arasındadır. Çizelge’de İstanbul’a ait yıllık sıcaklık değerleri verilmiştir.

ABD’de yapılan deney ve İstanbul’un iklimi ile ilgili verilerden (Çizelge A.1) yola çıktığımız zaman İstanbul’da uygulanacak olan bir beton yolda korozif suya maruz olma olasılığı oldukça yüksektir. Denizden esen rüzgarlardan dolayı tuz taşınması meydana gelebilir ve oluşacak çığ etkisi ile donatıda korozyon meydana gelebilir. Bu yüzden İstanbul’da uygulanması planlanan bir beton yolda kayma demirleri paslanmaz kaplı çelik veya boşluklu paslanmaz çelikten seçilmelidir.

• İzmir

Ege Denizi’ne kıyısı bulunan İzmir’de de yazlar sıcak ve kurak kışlar ise ılık ve yağışlı geçer (Çizelge A.2). Hemen hemen hiç kar yağışının olmadığı İzmir’de sıcaklık sıfırın altına ise yılda 7-10 gün arasında düşer. Bağıl nem oranı yüksektir. Denize yakın yerlerde korozif suya maruz kalma ihtimali oldukça fazladır.

İzmir’de uygulanacak bir beton yolda ise gerek bağıl nem oranının yüksek olması gerekse rüzgarlarla taşınabilecek klordan dolayı korozyon suya maruz kalacağından kayma demirleri paslanmaz kaplı çelik veya boşluklu paslanmaz çelikten seçilmelidir.

• Trabzon

Karadeniz ikliminin hakim olduğu Trabzon’da her mevsim hemen hemen yağışlıdır. İlde karla kaplı gün sayısı yılda bir haftayı geçmez. Yılın yaklaşık 130-150 günü yağışlıdır. Yaz ayları ise diğer bölgelere nispeten serindir (Çizelge A.3).

Deniz kenarında yapılacak bir beton yol yüzeyinde ıslanma-kuruma neticesinde tuz birikimi görülebilir. Trabzon’da yapılması planlanan beton yolda yağmur etkisi ile ıslanma, dalga etkisi, denizden esen rüzgar ve yoğunlaşma yolun yüzeyine zarar verecek tuz birikimine neden olabilir. Bu yüzden burada da kayma demirleri paslanmaz kaplı çelik veya boşluklu paslanmaz çelikten seçilmelidir.

• Kayseri

Tipik karasal iklimin hakim olduğu Kayseri’de yazlar sıcak ve kurak, kışlar ise soğuk ve kar yağışlıdır (Çizelge A.4). Yılda 30-40 gün karla kaplıdır. Gündüz ve gece sıcaklık farkı oldukça yüksektir.

Kar suyunun sertlik seviyesi düşüktür. Sertlik seviyesi düşük bu gibi sular betondaki çimentonun kalsiyumlu bileşenlerin çözünmesine neden olurlar ve kireç oranının azaltırlar. Bunun sonucu olarak betonun dayanımı düşer ve oluşan çatlaklardan dolayı geçirimsizlik artar. Kayseri’de uygulanacak bir beton yolda öncelikle beton bazlı önlem alınmalıdır. Silis dumanlı beton kullanımı hem beton dayanımını hem de korozyona karşı direnci artırır. Beton yol tipi olarak da sürekli donatılı beton yol yapılması daha uygundur. Kayma demirleri açısından ise soğuğa dirençli özel donatılar kullanılabilir.

• Antalya

Bağıl nem oranının oldukça yüksek olduğu Antalya’da yazlar sıcak ve kurak olmasına rağmen diğer mevsimler yağışlı geçer (Çizelge A.5).

Yüksek neme sahip olan Antalya yöresinde bağıl nem su buharı damlacıkları ile beton yol yüzeyini kaplar ve gündüz sıcaklığı ile kuruyan bu yüzeylerde korozyon meydana getirebilir. Genellikle beton yolda nemle birlikte yoğunlaşan su tanecikleri

bünyesindeki kimyasal maddeleri yüzeyde bırakır ve kimyasal madde birikime neden olur. Beton yolda enine ve boyuna çatlaklar, pullanmalar ve bozulmalar görülür. Tuzların özellikle klorun Antalya'nın iklimi gibi sıcak iklim şartlarında kolay taşınabilirliği nedeniyle beton yolda hasarlar meydana gelir.

Bu sebeplerden dolayı Antalya'da uygulanacak bir beton yolda kayma demirleri mikrokompozit, paslanmaz çelik kaplı ya da içi boş paslanmaz çelik olmalıdır.

• Diyarbakır

Diyarbakır'da yazları çok sıcak geçmesine rağmen kışları karasal iklimin hüküm sürdüğü yerlerdeki kadar soğuk geçmez (Çizelge A.6). Güneydoğu Toros dağlarının varlığı kuzeydoğu rüzgarlarını keserek Diyarbakır havzasına soğuk hava kütesini taşımaz.

Diyarbakır'da bir beton yol yaz aylarında inşa edilecekse sıcak havanın betonun kalitesini ve özelliklerini olumsuz yönde etkileyeceği göz önüne alınmalıdır. Sıcaklık arttıkça betondaki kıvam kaybı artar ve priz süresi kısalmır.

Diyarbakır'da yapılacak bir beton yol için betonun sıcaklığı açısından önlem alınıp, kayma demiri olarak karbon çeliği dışında hepsi tercih edilebilir.

• Erzurum

Karasal iklimin en sert halinin görüldüğü Erzurum'da yazlar sıcak kışlar ise aşırı soğuk ve kar yağışlıdır (Çizelge A.7). Yılın 140-160 günü karla kaplı olan Erzurum'un gece-gündüz sıcaklık farkı da oldukça yüksektir.

Erzurum'daki koşullar göz önüne alındığında yapılacak olan bir beton yolda meydana gelen hasar donma-çözülme nedeniyle olabilir. Erzurum gibi bölgelerde yapılacak beton yollarda hasarı önleyecek en etkili önlem betonda hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmasıdır. Gece-gündüz farkı nedeniyle beton yola sızan sular gece donup sabah tekrar çözüldüğünde donatıyı korozyona uğratabilir. Ayrıca Kayseri'deki gibi Erzurum'da da kar suyu betona zarar verip çatlak oluşumuna neden olabilir.

Bu gibi iklimlerde özellikle derz arası mühürleme çok iyi yapılmalı, betona donma-çözünmeye karşı önlem alınmalı ve kayma demirleri de paslanmaz kaplı çelik veya içi boş paslanmaz çelik seçilmelidir.



6. SONUÇLAR

Çalışmada beton yolların yapım aşaması, betonun kritik özellikleri, korozyon mekanizması, kayma demirlerinin korozyon direnci irdelenmiş ve şu sonuçlara ulaşılmıştır.

- İlk olarak donatılı bir beton yol yapımı fikri ortaya atıldığında korozyon için o bölgenin iklimi göz önünde bulundurulmalıdır. En düşük ve en yüksek sıcaklık, yağış miktarı, karla kaplı gün sayısı, gece-gündüz sıcaklık farkı, denize olan konumu, bölgenin rüzgar durumu ve nem oranı gibi kriterler baz alınmalıdır.
- Bu incelemeler yapıldıkta sonra betonun kritik özellikleri incelenmelidir. İklim şartlarının betonun hangi kritik özelliklerini etkilediğine karar verip betonda ona göre bir önlem alınmalıdır. Betonda oluşacak herhangi bir çatlak veya kırılmanın korozyona direkt etki edeceği unutulmamalıdır.
- Betonun kritik özellikleri göz önüne alınıp yolda kullanılacak betona karar verildikten sonra yol yapımı büyük önem arz etmektedir. Yer altı suları korozyonda önemli bir etken olduğu için korunmak için iyi drene edilmiş bir zemin hazırlığı yapılması önemlidir. Altyapı tamamlandıktan sonra demir donatılar uygun bir şekilde yerleştirilmeli ve beton döküm işlemi beton, döküm sırasında ve sonradan zarara uğramayacak şekilde planlanarak yapılmalıdır. En son olarak da derzler kesilmeli ve derzlere mutlaka mühürleme işlemi uygulanmalıdır.
- Karla kaplı gün sayısı fazla olan yerlerde inşa edilen beton yollardaki tuzlama işlemleri yüzünden derze sızan tuz çözeltileri donatılara zarar verebilir. Genellikle tuzlama için kullanılan CaCl_2 ve MgCl_2 iyonlarına ayrışır ve Ca ve Mg betonun yapısına, klorür iyonları da direkt donatıya nüfuz ederek donatının kendisine zarar verebilir. Bu yüzden donatılar bu gibi yerlerde deneyde anlatıldığı gibi özel olarak seçilmelidir.

- Denize yakın olan yerlerde de derzlerden tuz çözeltisi sızması büyük bir problemdir. Klorür iyonlarının kayma ve bağlantı demirleri ile teması sonucu korozyon oluşur. Denize yakın özellikle Akdeniz ve Ege sahillerindeki yerlerde yüksek bağıl nem de betonda çatlakların oluşmasına ve bu da dolaylı olarak korozyona neden olur. Buralarda da donatılar korozyona karşı daha dayanıklı olan tiplerde seçilmelidir.



KAYNAKLAR

- [1] **Ağar, E., Sütaş, İ., Öztaş, G.** (1998). Beton Yollar. İstanbul, İTÜ.
- [2] **Url-1**
<http://www.tmmmb.org.tr/images/GORUSLERIMIZ/TurkMMMB_Gorus-Beton_Yollar_Tekn._Satrn-.pdf>, erişim tarihi 13.12.2016.
- [3] **Fuchs, F., Jasienski A.**, (2001). “Execution of Concrete Pavements”, Belgian Road Research Center. Retrieved from <http://www.eupave.eu/documents/graphics/inventory-of-documents/febelcem-publicaties/road-pavements-of-cement-concrete.pdf>
- [4] **Yeğınobalı, A.** (2009). Niçin Beton Yol. TÇMB/AR-GE/ Y 09.01, Ankara.
- [5] **Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği** (2003). Türkiye Mühendislik Haberleri Sayı 427.
- [6] **Ağar, E., Sütaş, İ., Öztaş, G.** (1996). Asfalt Kaplama ile Beton Yol Karşılaştırılması. THBB Hazır Beton Dergisi - Beton Yollar Özel Eki.
- [7] **Yeğınobalı, A.** (2010). Türkiye’nin İlk Beton Yolları. TÇMB/AR-GE/ Y 09.02, Ankara.
- [8] **Url-2** <<http://www.kmyocorrosionlab.duzce.edu.tr/Dokumanlar/fcd20393-1be8-4b6b-a3c0-678ff88cdafc.pdf>> erişim tarihi 03.09.2017
- [9] **Kıracı, E.**, (2005). Bazı aromatik hidrazinlerin yumuşak çeliğin hidroklorik asit ortamındaki korozyonuna inhibitör etkinliklerinin kuantum kimyasal incelenmesi, (yüksek lisans tezi), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- [10] **Doruk, M.**, (1982). Korozyon ve önlenmesi, ODTÜ, Müh. Fakültesi Yayınları, 70 s.
- [11] **Url-3** <http://kisi.deu.edu.tr/kamile.tosun/Malzeme_ders5-3_KOROZYON.pdf> erişim tarihi 10.10.2017
- [12] **Url-4**
<http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme2/Korozyon_ve_Korozyondan_Korunma.pdf> erişim tarihi 24.02.2017
- [13] **Url-5** < <http://docplayer.biz.tr/57153264-6-emniyet-gerilmesi-guvenirlik-ve-korozyon.html>> erişim tarihi 21.09.2017
- [14] **Baradan, B.**, (2014). İnşaat Mühendisleri İçin Malzeme Bilgisi. İzmir, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- [15] **Url-6** < http://abs.mehmetakif.edu.tr/upload/D007_335_dosya.pp> erişim tarihi 11.04.2017

- [16] **Url-7** < <http://www.angelfire.com/mt/mehmettamirci/korozyon1/cesitler.htm> > erişim tarihi 11.04.2017
- [17] **Polly, D., D. Burke, et al.** (2008). Corrosion of Stainless Steel Reinforcement in the Concrete Deperming Pier at Point Loma Port Hueneme, California 93043-4370, Naval Facilities Engineering Service Center. TR-2305-SHR.
- [18] **Carino, N. J.** (1999). Nondestructive Techniques to Investigate Corrosion Status in Concrete Structures, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 13 (3), pp.96-106.
- [19] **Bereket, G., Yurt A.** (2002). VIII. Uluslararası Korozyon Sempozyumu Bildiriler Kitabı. Eskişehir, Osmangazi Üniversitesi, (413-436)
- [20] **Url-8**
<<http://web.hitit.edu.tr/dosyalar/duyurular/abdurrahmanasan@hititedu.tr181020163L0X2G3J.pdf>> erişim tarihi 01.02.2017
- [21] **Herald, S.E., Henry, M.B., Al-Qadi, I.L., Weyers, R.E., Feeney, M.A., Houlun, S.F., and Cady, P.D.** (1992). Condition evaluation of concrete bridges relative to reinforcement corrosion. Vol. 6: Method for field determination of total chloride content. SHRPS/FR-92-108, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
- [22] **Al-Qadi, I.L., Peterson, J.E. and Weyers** (1993). R.E.A time to cracking model for critically contaminated reinforced concrete structures. In *Proc. Fifth Int. Conf: on Structural Faults and Repair*, pp. 91-98, Edinburgh, Birleşik Krallık.
- [23] **Bazant, Z.P.** (1979). Physical model for steel corrosion in concrete sea structures - Application. *J. Struct.*, 1137 – 1165.
- [24] **Eisenmann, J.**, (1979). *Concrete Pavements – Design and Construction* (in German) Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin/Munich/Düsseldorf.
- [25] **Thornton, J.B.** (1978). Investigation into the performance of rigid pavement joint and material. *Proceedings of the International Conference on Concrete Pavement Design*, Purdue University, West Lafayette, Ind., pp. 435–446.
- [26] **Taylor, Peter C., Kosmatka, Steven H., Voigt, Gerald F.**, (2007). *Beton Yollar İçin Bütünleşik Malzeme ve Yapım Uygulamaları: Modern Uygulamalar El Yapım Kitabı*, FHWA Yayın No: HIF-07-004.
- [27] **Neville, A.M.**, (1995). *Properties of Concrete*, Pearson Education Limited.
- [28] **Farny J.A. and W.C. Panarese.**, (1994). *High Strength Concrete*. 1st Ed. EB114. Skokie, IL:Portland Cement Association.
- [29] **Li, W., Pour-Ghaz, M., Castro, J. & Weiss, J. W.** (2012). Water Absorption and Critical Degree of Saturation Relating to Freeze-Thaw Damage in Concrete Pavement Joints. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24, 299-307.

- [30] **Chappelow, C. C. and D. Darwin.** (1992). Handbook of Test Methods for Evaluating Chemical Deicers. SHRP H-332, Washington, DC: Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- [31] **Baalbaki, W., B. Benmokrane, O. Chaallal, and P.C. Aitcin.** (1991) Influence of Coarse Aggregate on Elastic Properties of High – Performance Concrete. ACI Materials Journal 88.5:499
- [32] **Tuutti, K.** (1982). Corrosion of Steel in Concrete. Stockholm, İsveç.
- [33] **Mancio, M., Carlos Jr, C., Zhang, J., Harvey, John T., Monterino, Paulo J.M.** (2007) Laboratory Evaluation of Corrosion Resistance of Steel Dowels in Concrete Pavement, (Research Raport : UCPRC-RR-2005-10), University of California Pavement Research Center, UC Davis and Berkeley.
- [34] **Davids, W. G., Wang, Z. M. ., Turkiyyah, G., Mahoney, J., and Bush, D.** (2003). 3D Finite Element Analysis of Jointed Plain Concrete Pavement with EverFE2.2. Transportation Research Record 1853, TRB, National Research Council, pp 92-99, Washington, D.C.
- [35] **Lawler, J. S., P. D. Krauss, et al.** (2011). Condition Survey of Older West Virginia Bridge Decks Constructed with Epoxy-Coated Reinforcing Bar. Washington DC.
- [36] **Mack, J. W.** (1995). Dowel Retrofit Restores Pavement Load Transfer, RP335P American Concrete Paving Association, Skokie IL.
- [37] **Harvey, J. T., Ali, A., Hung, D., Uhlmeyer, J., Popescu, L., Bush, D., Grote, K., Lea, J., and Scheffy, C.** (2003). Construction and Test Results from Dowel Bar Retrofit HVS Test Sections 553FD, 554FD and 555FD: US 101, Ukiah, Mendocino County. Draft report prepared for the California Department of Transportation. Pavement Research Center, Institute of Transportation Studies, University of California.
- [38] **Url-8** < <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx> > erişim tarihi 14.10.2017



EKLER

EK A: Meteorolojik Veriler



Çizelge A.1 : İstanbul için meteorolojik veriler [38].

İSTANBUL	OCAK	ŞUBAT	MART	NİSAN	MAYIS	HAZİRAN	TEMMUZ	AĞUSTOS	EYLÜL	EKİM	KASIM	ARALIK
ORTALAMA SICAKLIK (°C)	6.0	6.1	7.7	12.0	16.8	21.4	23.8	23.8	20.1	15.7	11.7	8.2
ORTALAMA YAĞIŞ (mm)	104.4	78.2	71.5	46.1	34.2	35.9	32.5	40.1	60.6	87.8	101.2	122.7
EN YÜKSEK SICAKLIK (°C)	22.0	24.7	29.3	33.6	34.5	40.2	41.5	40.5	37.9	34.2	27.8	25.8
EN DÜŞÜK SICAKLIK (°C)	-13.9	-16.1	-11.1	-2.0	2.8	7.1	10.5	10.2	6.0	0.6	-7.2	-10.8

Çizelge A.2 : İzmir için meteorolojik veriler [38].

İZMİR	OCAK	ŞUBAT	MART	NİSAN	MAYIS	HAZİRAN	TEMMUZ	AĞUSTOS	EYLÜL	EKİM	KASIM	ARALIK
ORTALAMA SICAKLIK (°C)	8.8	9.5	11.5	15.8	20.7	25.5	28.0	27.6	23.6	18.7	14.1	10.4
ORTALAMA YAĞIŞ (mm)	131.2	102.5	75.8	46.2	31.0	9.9	1.7	2.9	13.9	43.6	93.5	143.7
EN YÜKSEK SICAKLIK (°C)	21.4	27.0	30.5	32.5	37.6	41.3	42.6	43.0	40.1	36.0	30.3	25.2
EN DÜŞÜK SICAKLIK (°C)	-8.2	-5.2	-3.8	0.6	4.3	9.5	15.4	11.5	10.0	3.6	-2.9	-4.7

Çizelge A.3 : Trabzon için meteorolojik veriler [38].

TRABZON	OCAK	ŞUBAT	MART	NİSAN	MAYIS	HAZİRAN	TEMMUZ	AĞUSTOS	EYLÜL	EKİM	KASIM	ARALIK
ORTALAMA SICAKLIK (°C)	7.3	7.2	8.3	11.7	15.9	20.3	23.0	23.4	20.3	16.5	12.8	9.4
ORTALAMA YAĞIŞ (mm)	81.9	63.1	59.9	56.1	51.3	49.9	36.0	45.3	79.7	116.1	97.2	82.3
EN YÜKSEK SICAKLIK (°C)	25.9	30.1	35.2	37.6	38.2	36.7	37.0	38.2	37.9	33.8	32.8	26.4
EN DÜŞÜK SICAKLIK (°C)	-7.0	-7.4	-5.8	-2.0	4.2	9.2	11.0	13.5	7.3	3.4	-1.6	-3.3

Çizelge A.4 : Kayseri için meteorolojik veriler [38].

KAYSERİ	OCAK	ŞUBAT	MART	NİSAN	MAYIS	HAZİRAN	TEMMUZ	AĞUSTOS	EYLÜL	EKİM	KASIM	ARALIK
ORTALAMA SICAKLIK (°C)	-1.7	0.1	4.8	10.7	15.2	19.3	22.6	22.2	17.3	11.6	5.3	0.5
ORTALAMA YAĞIŞ (mm)	35.2	36.5	41.8	52.1	51.8	39.5	9.5	6.8	13.9	28.0	32.4	37.4
EN YÜKSEK SICAKLIK (°C)	18.0	22.6	28.6	31.2	33.6	37.6	40.7	40.6	36.0	33.6	26.0	21.0
EN DÜŞÜK SICAKLIK (°C)	-32.5	-31.2	-28.1	-11.6	-6.9	-0.6	2.9	1.4	-3.8	-12.2	-20.7	-28.3

Çizelge A.5 : Antalya için meteorolojik veriler [38].

ANTALYA	OCAK	ŞUBAT	MART	NİSAN	MAYIS	HAZİRAN	TEMMUZ	AĞUSTOS	EYLÜL	EKİM	KASIM	ARALIK
ORTALAMA SICAKLIK (°C)	9.9	10.5	12.7	16.2	20.5	25.3	28.4	28.2	24.8	20.1	15.1	11.4
ORTALAMA YAĞIŞ (mm)	236.3	156.2	96.8	52.5	31.5	9.4	2.5	2.7	14.5	72.0	131.4	261.1
EN YÜKSEK SICAKLIK (°C)	23.9	25.9	28.8	36.4	38.7	44.8	45.0	44.6	42.5	38.7	33.0	25.4
EN DÜŞÜK SICAKLIK (°C)	-4.3	-4.6	-1.6	1.4	6.3	11.1	14.8	13.6	10.3	4.9	0.0	-1.9

Çizelge A.6 : Diyarbakır için meteorolojik veriler [38].

DİYARBAKIR	OCAK	ŞUBAT	MART	NİSAN	MAYIS	HAZİRAN	TEMMUZ	AĞUSTOS	EYLÜL	EKİM	KASIM	ARALIK
ORTALAMA SICAKLIK (°C)	1.6	3.6	8.3	13.8	19.2	26.2	31.1	30.4	24.9	17.2	9.5	3.9
ORTALAMA YAĞIŞ (mm)	70.7	68.6	65.5	68.2	42.9	8.1	0.7	0.4	3.9	31.8	54.1	70.8
EN YÜKSEK SICAKLIK (°C)	16.9	21.3	28.3	35.3	39.8	42.0	46.2	45.9	42.0	35.7	28.4	46.2
EN DÜŞÜK SICAKLIK (°C)	-24.2	-21.0	-14.0	-6.1	0.8	3.5	9.9	11.4	4.0	-1.8	-12.9	-23.4

Çizelge A.7 : Erzurum için meteorolojik veriler [38].

ERZURUM	OCAK	ŞUBAT	MART	NİSAN	MAYIS	HAZİRAN	TEMMUZ	AĞUSTOS	EYLÜL	EKİM	KASIM	ARALIK
ORTALAMA SICAKLIK (°C)	-9.1	-7.7	-2.5	5.3	10.7	14.9	19.3	19.5	14.7	8.1	1.0	-6.0
ORTALAMA YAĞIŞ (mm)	22.5	27.3	35.0	53.5	73.1	49.1	26.8	17.5	23.9	48.2	33.3	22.6
EN YÜKSEK SICAKLIK (°C)	8.0	10.6	21.4	26.5	29.8	32.2	35.6	36.5	33.3	27.0	20.7	14.0
EN DÜŞÜK SICAKLIK (°C)	-36.0	-37.0	-33.2	-22.4	-7.1	-5.6	-1.8	-1.1	-6.8	-14.1	-34.3	-37.2

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Salih İLTEKİN
Doğum Tarihi ve Yeri : 04.07.1992 Kayseri
E-posta : salih.iltekin@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği