

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

139630

BETONARME YAPILARDAKİ ÇELİK DONATI
KOROZYONU HASARININ ÖNLENMESİNİN
ARAŞTIRILMASI

Kimyager HasanYasin DEMİREL

139630

FBE Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı Üretim Programında

Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Zeki ÇİZMECİOĞLU

Doç. Dr. Nuhhan Cevher

Nuhhan

Prof. Dr. Feriye ALÖZ

İSTANBUL, 2003

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANLAMA VE KÜTÜP HİZMETLERİ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. KOROZYON TEORİSİ	2
2.1 Korozyonun Tanımı	2
2.2 Korozyonun Mekanizması	3
2.3 Korozyon Reaksiyonları	4
2.4 Korozyona Etki Eden Faktörler	8
2.4.1 Potansiyel-PH Etkisi	8
2.4.2 Zemin Elektrik Özgül Direnci	10
2.4.3 Sıcaklık Etkisi	11
2.5 Korozyona Karşı Katodik Koruma	11
2.5.1 Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma	13
2.5.2 Galvanik Anotlu Katodik Koruma	15
3. BETON İÇERİSİNDEKİ ÇELİĞİN KOROZYONU	17
3.1 Betonun Yapısı	17
3.2 Betonarme Yapıdaki Çelik Donatının Korozyonun Oluş Nedenleri	18
3.2.1 Oksijen Difüzyonu	18
3.2.2 Karbonatlaşma Reaksiyonunun Donatı Korozyonuna Etkisi	20
3.2.3 Pasifliğin Klorür İyonu Etkisi İle Bozulması ve Klorun Bağlanması	21
3.3 Beton İçindeki Çeliğin Korozyonunun Elektrokimyasal Teorisi	25
3.4 Beton İçindeki Çeliğin Korozyonuna Etki Eden Faktörler	26
3.4.1 pH Etkisi	26
3.4.2 Çimento Cinsinin Etkisi	28
3.4.4 Beton Kalitesi	29
3.5 Beton İçindeki Çelik Donatının Korozyonuna Karşı Alınacak Diğer Önlemler	30
3.5.1 Beton Geçirgenliğinin Azaltılması ve Yüzey Koruma Yöntemleri	30
3.5.2 Portland Çimentosu Şerbeti ile Kaplama	31
3.5.3 Pas Payının (Örtü Beton Kalınlığının) Artırılması	32
3.5.4 Zararlı Klorür Limiti ve Kritik Klor Oranı Tespitinin Yapılması	32

4.	KAÇAK AKIM KOROZYONU	35
4.1	Kaçak Akım Etkisi	36
4.1.1	Kaçak Akımların Sebepleri	40
4.1.2	Kaçak Akımların Ölçüm ve Kontrolü	40
4.1.3	Kaçak Akım İçin Önlemler	41
4.1.4	Diyot ve Trafo/Redresör Uygulaması ile Kaçak Akımın Drene Edilmesi	43
5.	DENEY ÇALIŞMALARI	45
5.1	Metroda Yapılan Deneysel Çalışmalar	45
5.1.1	Drenaj Akımının Ölçülmesi	45
5.1.2	Ray Direncinin Ölçülmesi	47
5.1.3	Ray / Zemin Direncinin Ölçülmesi	49
5.1.4	Ray/Ray Direncinin Ölçülmesi	51
5.1.5	Ray/Donatı ve Donatı/Zemin Potansiyelinin Ölçülmesi	53
5.1.6	Betonun Elektrik Özgöl Direncinin Ölçümü	53
5.1.7	Betona Nüfuz Eden Suyun Özellikleri	53
5.2	Su Deposunda Yapılan Deneysel Çalışmalar	54
5.2.1	Donatı/Beton Potansiyeli Ölçümü	54
5.2.2	Beton Elektrik Özgöl Direnç Ölçümü	55
5.2.3	Depodaki Suyun Özellikleri	56
6.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	58
7.	ÖNERİLER VE ÖNLEMLER	61
7.1	Yeni Betonarme Yapılarda Alınması Gerekli Önlemler	61
7.2	Mevcut Betonarme Yapılarda Alınması Gerekli Önlemler	64
	KAYNAKLAR	68
	EKLER	70
Ek 1	Katodik Korumada Potansiyel Ölçümleri ve Aşırı Koruma	71
Ek 2	Katodik Koruma Kriterleri ve Uygulaması	72
Ek 3	Metro Sisteminden Fotoğraflar	73
Ek 4	Su Deposunda Fotoğraflarla Korozyon	75
Ek 5	ASTM- C 876-87 Standardı	77
	ÖZGEÇMİŞ	78

SİMGE LİSTESİ

ρ	Zemin elektrik özgül direnci
R	Cihazdan okunan direnç
E_{pp}	Metalin korozyonunun pasifleşme potansiyeli
ΔG	Serbest enerji değişimi
I_{RT}	Rayda okunan akım
G_{RT}	Ray iletkenliği
ΔU_{RT}	Raylar arası potansiyel farkı



KISALTMA LİSTESİ

DC	Direct Current (Doğru Akım)
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
T/R	Transformatör-Redresör Güç Kaynağı
TS	Türk Standartları



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Metalin iyonlaşması.....	2
Şekil 2.2	Korozyon hücresinin basit bir görüntüsü	4
Şekil 2.3	Demir metalinin anotta yükselgenmesi.....	7
Şekil 2.4	Katotta hidrojen çıkışı reaksiyonu	7
Şekil 2.5	Metal yüzeyde oluşan mikro korozyon hücresi.....	7
Şekil 2.6	Demirin korozyonu sonucu pasın oluşumu	7
Şekil 2.7	Değişik polarizasyon kontrollü korozyon hücreleri.....	7
Şekil 2.8	Çözelti (PH) değeri ve elektrot potansiyeli değerine göre sulu çözeltiler içinde oluşan demir bileşikleri	8
Şekil 2.9	Demir metalinin sulu çözeltiler içindeki koroziyifliği.....	9
Şekil 2.10	Wenner dört nokta yöntemi ile zemin özgül direnç ölçümü	11
Şekil 2.11	Korozyona uğrayan yapıya elektron pompalanması. (Çizmecioğlu, 2002).....	12
Şekil 2.12	Korozyona uğramış metal üzerine zorlanmış akım uygulayarak yapılan katodik koruma.....	13
Şekil 2.13	Dış akım kaynaklı katodik koruma yöntemi	14
Şekil 2.14	Galvanik anot yardımıyla katodik koruma.....	15
Şekil 3.1	Betonda Korozyon Mekanizması (Çizmecioğlu, 2002).....	23
Şekil 3.2	Metal yüzeyinde klor konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak potansiyel dağılımı (Ayala, Ingalls, Geneska, 1996).....	24
Şekil 3.3	Korozyon Modeli (Tuutti) (Petterson, 1992)	25
Şekil 3.4	Demir metali için aktif-pasif bölgeler.....	27
Şekil 4.1	Tünelin ve Kaçak Akım Etkisinde Kalan Metalik Kısımların Şematik Görünümü (Çizmecioğlu, 2002).....	35
Şekil 4.2	Raylı taşıt aracından yayılan kaçak akımların donatıya intikali ve donatıdan çıkarak korozyon bölgesi oluşturması.....	36
Şekil 4.3	Ray/Zemin ve Donatı/Zemin potansiyellerinin mesafeye göre değişimi.....	38
Şekil 4.4	Trenin hareketi ile ray/zemin potansiyelinin mesafeye göre değişimi (Koç, 1998)	38
Şekil 4.5	Rayların izolasyonu (Koç, 1998).....	39
Şekil 4.6	Raylı taşıt aracından yayılan kaçak akımların donatıya geçişi ve donatıdan çıkarak korozyon bölgesi oluşturmasının kaçak akım drenajı ile önlenmesi. (Baeckmann, Prinz, 1990).....	42
Şekil 4.7	Diyot Sistemi ile Kaçak Akım Drenajı (Çizmecioğlu, 2003)	44
Şekil 4.8	Kaçak Akımların Etkisinin Doğru Akım Kaynağı ile Önlenmesi (Çizmecioğlu, 2003).....	44
Şekil 5.1	Metro Besleme Sistemi ve Kaçak Akım Devresi	45
Şekil 5.2	Ray Direncinin Standart Ölçüm Metodu.....	47
Şekil 5.3	Ray-Tünel arası birim uzunluğun iletkenliğinin St. Ölçüm metodu.....	49
Şekil 5.4	Raylar arası birim uzunluğun iletkenliğinin standart ölçüm metodu.....	52
Şekil 7.1	Korozyon sensörlerinin görüntülenmesinin beton içerisindeki şematik yapısı.....	63
Şekil 7.2	(Al-Zn-In) Alaşımlı galvanik spray sistemi (Corrpro, 2002)	66

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1	Zemin Elektrik Özgöl Direnci Açısından Koroziyel Özellik	10
Çizelge 5.1	Metroya sızan yeraltı suyunun analizi	54
Çizelge 5.2	Su deposunun betonunun donatı/zemin potansiyeli (Cu/CuSO ₄ ref. elektrodu)55	
Çizelge 5.3	Betonun Wenner yöntemine göre direnç ölçümü	56
Çizelge 5.4	Su deposundaki suyun analizi	57
Çizelge Ek 1.1	Katodik korumada referans elektroda karşılık gelen koruma potansiyelleri....	71



ÖNSÖZ

Bu tez, betonarme yapılar içindeki çelik donatı korozyonu hasarlarının oluşturdukları risklere dikkat çekilmesi amacıyla hazırlanmıştır. Bu araştırma yapılırken literatür çalışmasının yanında toplum hayatında önemli yeri olan yeraltı metro sistemlerinde ve büyük su depolarında deneysel çalışmalar yapılarak, donatı korozyonunun önemi ve alınması gereken önlemlere geniş olarak yer verilmiştir.

Bu çalışmada yapılan deneysel çalışmalardan çıkan sonuçların genel olarak yapılarda korozyon riski olduğunu desteklemiş olduğu görülmektedir. Genel olarak yapılan çalışmalar korozyon tespiti için gerekli olan beton yapı içerisindeki çelik donatının zemin olarak kabul edilen betona göre potansiyel ölçümleri, beton özgül direnç ölçümleri, özellikle pasifliği bozan madde olan klorü içinde bulunduran suyun analizleri ve özellikle yeraltı metro sistemlerinde donatı korozyonuna sebep veren kaçak akım tespiti için gerekli ray direnci (iletkenliği) ve potansiyel ölçümlerinden oluşmaktadır.

Bu çalışmanın yapılmasında ve her türlü araç ve gereçlerin temininde yardımcı olan İstanbul Ulaşım Metro Elektrik Tesisleri Şefi Esat AYDIN ve ölçümlerin alınmasında emeği geçen Hazım FEDAKAR'a, gerekli teçhizatların kullanılmasında yardımcı olan İGDAŞ Katodik Koruma Şefi Bülent DEMİRCAN'a, su depolarındaki çalışmalarda gerekli tüm imkanları sağlayan İSKİ Scada Daire Başkanı Mahmut TÜRKMEN'e ve Elektronik müh. Ömer Faruk GÜNGÖRDÜ'ye , son olarakta bu çalışmanın bütün süreçlerinde tüm bu organizasyon ve araştırma imkanlarını sağlayan Prof. Dr. Zeki ÇİZMECİOĞLU'na çok teşekkür ederim.

ÖZET

Yeraltı metro yapıları, su depoları ve betonarme su boruları, köprüler ve viyadükler gibi tüm betonarme yapılardaki çelik donatı korozyonuna etki eden faktörlere karşı gerekli önlem alınmadığı zaman ciddi tehlikeler ve ekonomik kayıplar ile karşılaşıldığı görülmektedir. Bu sebeple korozyon tespiti ve gerekli önlemler için yapılan çalışmalara ağırlık verilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Yeraltı metro sistemleri ve büyük su depolarında beton içinde bulunan çeliğin korozyon durumu hakkında ,statik potansiyel değeri, yani Donatı / Zemin potansiyeli ölçülerek kalitatif olarak fikir edinilebilir. Buna bağlı olarak, beton içinde bulunan çeliğin potansiyel ölçüm sonuçları değerlendirilir. Bu sonuçlardan genel olarak beton içindeki çeliğin doygun bakır-bakır sülfat referans elektroduna göre ölçülen değeri standarda göre -0.35 volttan daha negatif değerlerde olduğunu tespit etmekteyiz ve böylece bu yapılardaki çelik donatılarda %90 ihtimalle korozyon riski olduğunu söyleyebiliriz. Kağıthane su deposunda yapılan ölçümlerde potansiyel değerinin -0.50 volt üzerinde olduğu görülmekte ve standarda göre şiddetli korozyona uğradığı ortaya çıkmaktadır. Ek olarak metroda yapılan çalışmalarda metro sisteminde raylı araçların 750 volt DC gerilim ve 1500 amper akım ile çalıştığı düşünülürse böyle bir sistemde iyi bir izolasyon olmadığı anda ciddi bir kaçak akım oluştuğu ve bu akımında özellikle metro sisteminde negatif kutbun raya bağlandığı drenaj noktası civarındaki donatıda ciddi korozyon oluşturduğu gözlenmektedir. Megger cihazı ve Wenner yöntemi ile yapılan beton elektrik özgül direnç ölçümleride beton kalitesinin iletkenliğinin ve geçirimsizliğinin yapılarada korozyon riski açısından çok önemli olduğu bu çalışmada anlatılmak istenen diğer bir noktadır. Yapılan çalışma sonucunda klorür iyonunun yapılarada ne denli tehlikeli olduğunu ve donatı üzerinde oluşan pas filminin pasifliğini bozarak korozyonu hızlandırdığı ve adeta çelik donatıyı kemirerek yapılarada ciddi hasarlara yol açtığı görülmektedir. Ayrıca su PH ının düşük olması, yaklaşık olarak metroda 7.81 değerinde olması normalde olması gereken 12-13 PH değerine göre çok düşük olması beton içinde bulunan çelik yüzeylerindeki Fe_2O_3 filminin oluşmasını ve metalin pasifliğini engellediği görülmektedir. Buradan düşük su PH ının betonun alkaliliğini bozacağı ve klorür ihtiva etmesinin ciddi olumsuzluklara yol açtığı söylenebilir. Sonuçta mevcut ve yeni betonarme yapılarada kaçak akımların, beton kalitesinin ve ortamın klorür etkisi gibi özellikler araştırılarak metro ve su depoları gibi diğer tüm betonarme sistemlere korozyon riski üzerindeki olumsuz etkilerin azaltılması için belirlenen önlemler uygulanabilir.

Anahtar kelimeler : Betonarme, çelik donatı korozyonu, donatı / beton potansiyel ölçümleri, kaçak akım korozyonu.

ABSTRACT

It has been observed that serious damages and the economic loss is likely to be occurred if required corrosion control in reinforced concrete structures like subways, water storages and concrete water pipes, bridges and viyaduks, etc. and essential measurements preventing the factors affecting the steel rebar in reinforced concrete structures are not taken into account. Therefore, researches regarding the corrosion control gain much more importance.

A qualitative outcome regarding the corrosion degree of the steel in reinforced concrete structures like subways or water storages can be obtained by measuring the Steel Rebar / Concrete Base potential. Hence, the potential measurement findings of the steel in the concrete can be evaluated. In general, it has been determined that the figure depicting the measured value of the steel in concrete with respect to the reference electrode of saturated copper – copper sulphate was less than -0.35 volt of the standard value, so there is the risk of corrosion in these concrete structures with a probability of 90%. Since the potential value was above -0.50 volt attained during the measurements in Kağıthane Water Storage, it is clear that there is severe corrosion with respect to the standard value. Furthermore, serious level of corrosion was observed due to the stray current in the structures of drainage points in the subway system where the negative poles exist. This stray current is mainly caused by the lack of proper isolation in a system where the trains run with 750 volt DC and 1500 amper of current.

Another key finding of this research is the importance of conductivity, quality and the impermeability of the concrete in preventing the risk of corrosion in structures, derived from the specific resistivity measurements of concrete done by Megger Instrument and Wenner Process. As a result of the research, it has been observed that the chloride ion is so hazardous to the structures, and it speeds up the corrosion by destroying the passive film of stain occurred on the steel structure in the concrete. The PH value of water diffusing into concrete has been measured at 7.81 value in subways and standard value of PH diffusing into concrete should be about 12-13 value. However, it is seen that measured value is smaller than the standard value of PH. This case prevents occurring Fe_2O_3 film on the steel rebar and passivity of steel. As a result of this, low values of water PH destroy the alkalinity of concrete and involve chloride, so series corrosion problems occur. Finally, to decrease negative effects of corrosion on the concrete structure, some parameters of new and old concrete structure like stray currents, concrete quality and chloride effect are searched and essential researches like in this thesis studying can be applied to the other concrete structure like being on the subways and water storage system.

Key words : Reinforced concrete, steel rebar corrosion, rebar/concrete potential measurements, stray current corrosion.

1. GİRİŞ

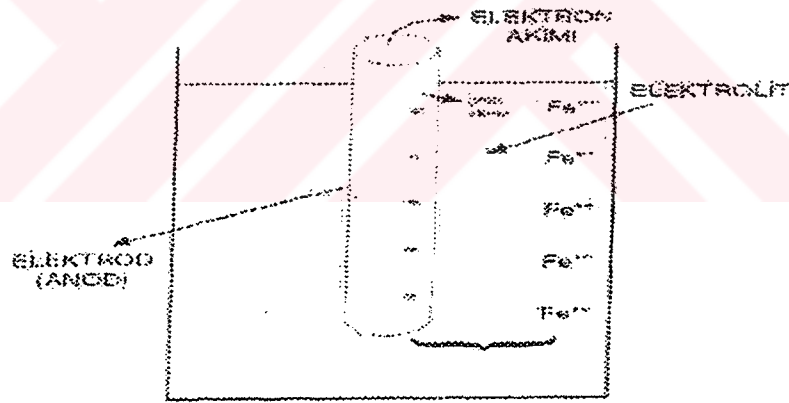
Günümüzde yapılan çalışmalarda betonarme yapılardaki çelik donatıların özellikle yeraltı metro sistemlerinde ve su depolarında betonarme yapıyı oluşturan, betonun içindeki çeliğin korozyonunun uzun vadeli düşünüldüğünde kaçınılmaz hasarlara yol açtığı gözlenmektedir. Yaptığımız çalışmada da beton yapı içerisindeki çeliğin korozyona karşı korunmasının ne denli önemli olduğunu görmekteyiz. Bu araştırmada, yeraltı tünel sistemini ve su deposunu oluşturan betonun kalitesi ve de özellikle metroda kaçak akımın sebep olduğu çelik donatının korozyonunun sebeplerini ve sonuçlarını yaptığımız deneysel ölçümler ve kontroller ile tespit etmekteyiz. Bu araştırmalarda, yeraltı metro sistemi içerisinde yer alan ve doğru akım kaynağı ile beslenen raylı sistemden kaynaklanan kaçak akımın özellikle izolasyon eksikliği ve tünel içerisine betondan sızan su difüzyonunun etkisiyle ve depodaki beton özdirenç ölçümleri ve sistemde bulunan suyun PH ve klorür miktarının analizleri ile korozyonun son derece hızlı ve tahrip edici olduğu görülmektedir. Yapılan deneysel ölçümlerde ray/zemin, donatı/zemin potansiyelleri, ray direnci ve zemin-çelik donatı arası iletkenlik değerlerinin yanısıra beton özdirenç ölçümü ve kaçak akım miktarının ölçümü yapılarak korozyonun şiddeti tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu tür çalışmalarda en zor ölçümlerin kaçak akım miktarının tespitinde olduğu görülmüştür, çünkü sistemdeki kaçak akım miktarını ölçmek için tüm sistemi tamamen izole etmek ve çelik donatının birbirine irtibatını sağlamak gerekmektedir. Asıl amaç, tüm bu tespitlerin sonucunda metro sistemi ve su depoları gibi büyük betonarme yapılarda korozyon miktarının tespiti ve korozyona uğrayan çelik donatı kısmının gerekli koruma yöntemleri ile betonarme yapının ömrünü uzatmaktır.

2. KOROZYON TEORİSİ

2.1 Korozyonun Tanımı

Altın ve platin gibi soy metaller dışında birçok metal tabiatta cevher içerisinde tuz, oksit v.b. gibi mineral adı verilen kararlı bileşikler halinde bulunurlar. Saf metali elde etmek için cevher üretim metalurjisi metodları ile cevher ayrıştırma ve indirgeme gibi birçok işlemlerden geçmelidir. Büyük enerji harcanarak elde edilen saf metal, dengesiz bir yapıya sahiptir. Metal, yeraltına gömüldüğünde tekrar kararlı hale gelmek için değişim gösterecektir.

Korozyon, genel anlamda kimyasal ve/veya elektro kimyasal reaksiyonlarda bozunma olarak tanımlanır. Korozyon, metallerin mekanik yollar dışındaki bozunumları olarak da tanımlanır. Böylece metal doğadaki haline döner. Korozyonun sebebi, kararsız haldeki metalin serbest elektronlarını vererek pozitif iyon oluşturmaya neticesinde, pozitif metalik iyonlarla ortamda oluşan diğer negatif iyonların arasındaki çekim kuvvetinin etkisi ile kararlı bir metal bileşiğinin metalin yüzeyinde pas olarak oluşması ve metali tahrip etmesidir. Şekil 2.1'de iyonlaşma yoluyla metalin korozyonu açıklanmaktadır.



Şekil 2.1 Metalin iyonlaşması

Demir ve çelik genellikle; oksijen ve suyun bulunduğu her ortamda korozyona uğrar. Korozyonun hızı, ortam koşullarına göre değişir. Örneğin, su içinde suyun hareket hızı veya asitliği ile, metalin hareketiyle sıcaklıkta veya havalandırmadaki artışla, bazı bakterilerin veya başka etkili bir takım faktörlerin varlığıyla artış gösterir. Diğer taraftan, korozyon koruyucu tabakalarla (veya filmler) geciktirilir. Suyun alkalitesi de çelik yüzeylerde korozyon hızını azaltır. Ama korozyonun

gerçekleşebilmesi için daima su ve oksijen gereklidir.

Korozyon miktarını her ikisi de belirler. Örneğin, kuru havada çelikte korozyon görülmez. Havadaki nem oranı%30'un altında ise 25 C° veya altındaki sıcaklıklarda korozyon önemsenmeyecek kadar azdır. Korozyonun, rutubeti giderme yoluyla engellenmesi buna dayanır. Bütün metal yapılar doğal çevrede belli derecelerde korozyona uğrar. Demirin ve çeliğin yapısal korozyonu metal gerekli ölçüde korunmazsa hızla ilerler.

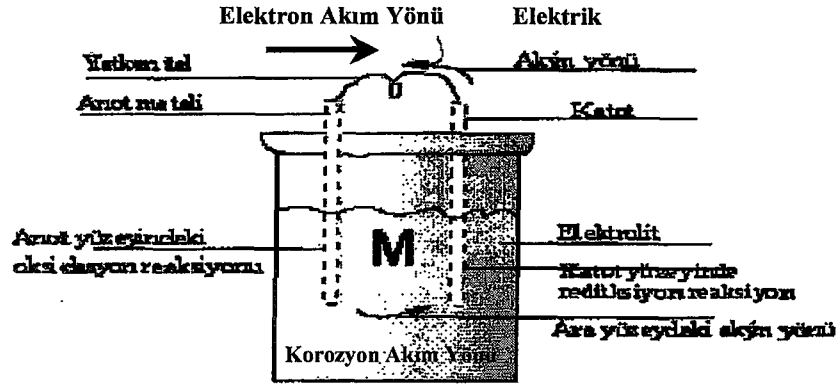
2.2 Korozyonun Mekanizması

Nemli atmosfer içinde, yeraltında, beton içinde yada su altında metallerdeki korozyon; bir metalden diğerine, aynı metalin yüzeyinden bir noktanın diğer bir noktaya geçen galvanik akımlardan kaynaklanır. Şekil 2.2'de bu mekanizma detaylı olarak gösterilmektedir.

Bu elektrik akımlarının gerçekleşebilmesi için, elektrik akımının geçişine izin veren ortamda ıslak bir iletken veya elektrolit olmak zorundadır. Korozyonun görülebilmesi için elektrolitin varlığı vazgeçilmez bir koşuldur. Sulu ortam özellikle de tuzlu su mükemmel bir elektrolittir.

Şekil 2.2'de gösterilen pil, korozyon işleminin en basit şekliyle anlatır. Pil oluşumu için, bir metal anot, bir metal katot (anot ve katot aynı metal parçası üzerinde olabilir), anot ile katot arasında metalik bir iletken ve anot ve katot ile temas halinde olan bir elektrolit ortam gereklidir. Elektrolit ortam iyon içeren bir çözeltidir ve iyonlar asit, alkalin ve tuz çözeltisinden gelebilir. Sonuç olarak, basit bir Pil sistemi aşağıdaki gerekli elemanları içermektedir.

- Bir metal Anot
- Bir metal Katot
- Anot ve Katot arasında metalik bir iletken
- Anot ve Katotla temas halinde bir elektrolit



Şekil 2.2 Korozyon hücresinin basit bir görünüşü

Bu elemanlar, şekil 2.2’de gösterildiği gibi kapalı bir elektrik devresi oluşturmak üzere düzenlenir.

Pilin işlemesine izin verilirse metal iletken ve elektrolitten elektrik akımı geçmeye, anot çözünmeye başlar, eğer anot demir ise pas oluşur. Anotta oluşan bu olay, kimyasal olarak oksidasyon (yükseltgenme) reaksiyonudur. Katot üzerinde ise tahrip edici olmayan, genellikle hidrojen gazı üreten, kendiliğinden kimyasal bir reaksiyon (indirgenme) oluşur, gaz tabakası Katotu elektrolitten yalıtıldığında akım durur ve böylece pil polarize olur. Ancak, ortamda hidrojen ile reaksiyona girerek bu etkiyi azaltacak oksijen veya diğer depolarize etmenler vardır. Bundan dolayı pil işlemeye devam eder. Elektronik iletken devreye bir voltmetre bağlanırsa elektrotlar arasında geçen akım ölçülebilir.

Bu elektrik akımlarının oluşmasına neden olan potansiyel fark, temel olarak benzer olmayan metal iletkenlerin temasından veya genellikle doğal suda çözünen oksijen ile ilgili olarak çözeltinin konsantrasyon farkından doğar. Metal yüzeyinde veya çevresindeki çözelti içindeki heterojenlik de potansiyel farkına neden olur. Bunun sonucu olarak korozyona neden olan reaksiyonlar başlayabilir. Elektrokimyasal korozyona uğrayan metalin çözeltiye daldırılmış olması gerekmez ama ıslak toprakla temas halinde olabilir veya metal yüzeyinin belirli bölümleri ıslak olabilir. Katotla bağlantı içinde olan anot yüzeyi ne kadar küçükse korozyon veya bozunma o kadar hızlıdır.

2.3 Korozyon Reaksiyonları

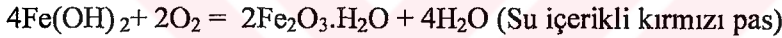
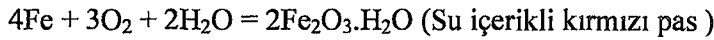
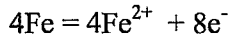
Korozyon sırasında anodik (elektron veren, yükseltgenme) reaksiyonlar ile katodik (elektron alan, indirgenme) reaksiyonları birlikte oluşur. Demir metalinin bulunduğu ortamdaki anodik veya

TC. ...
...

katodik reaksiyonlar şunlardır.

<u>Anodik Reaksiyonlar</u>	$\text{Fe}^0 \Leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$
<u>Katodik Reaksiyonlar</u>	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \Leftrightarrow 2 (\text{OH})^-$
	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \Leftrightarrow \text{H}_2$ (Asitli ortamda)
<u>Toplam Reaksiyon</u>	$\text{Fe}^0 + 1/2 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{Fe} (\text{OH})_2$ (PAS) (Çizmecioğlu,1998)

Korozyon elektrokimyasal reaksiyonu oluşumu aşağıdaki gibi açıklanabilir.



Bir çok incelemeye göre pasın en kararlı biçimi Fe_2O_3 tür. Yüksek sıcaklıklarda (900-1300 F) Fe_2O_3 , Fe_3O_4 e dönüşür. Fe_3O_4 oluşumu paslı çeliğin yüksek sıcaklıklarda ısıtılması veya oksitlenmesi (indirgenme) işlemiyle ortaya çıkar (Koç, 2000)

Korozyon, kimyasal olaylar neticesinde meydana geldiğinden dolayı, korozyon reaksiyonlarını anlayabilmek için kimyanın temel prensiplerini bilmek gerekir. Özellikle de korozyon olaylarının elektrokimyasal olması nedeniyle, elektro kimya bilgisi çok önemlidir. Bunlara ilaveten metalin yapı ve bileşimi korozyonu büyük ölçüde etkilediğinden , fiziksel metalurji esaslarını da bilmek gerekir. Bu nedenle kimya ve metalurji bilim dalları korozyon olayını incelemek için gereklidir, tıpkı tıp bilim dalında biyoloji ve kimyanın gerekli olduğu gibi.

Korozyon mekanizmasının yeterince aydınlatılabilmesi için temel kabul edilen bilim dalları elektrokimya, fizikokimya, termodinamik ve metalurjidir. Kimyasal termodinamik yardımı ile bir reaksiyonun herhangi bir dış etken olmaksızın yürüyüp yürümeyeceği hesaplanabilir. Korozyon

olayları da madem ki neticede kimyasal olaylar şeklinde cereyan etmektedir, o halde korozyonun olup olmayacağı da termodinamik yoldan bulunabilir.

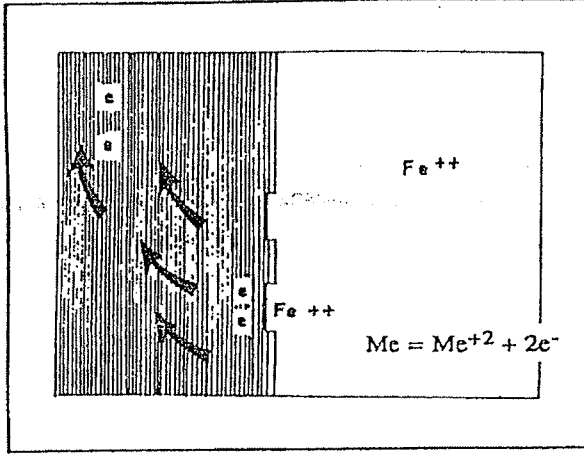
Korozyon reaksiyonlarının hepsi, faz sınırında cereyan eden reaksiyonlardır. Çünkü reaksiyona giren maddeler ayrı ayrı fazlar şeklinde birarada bulunmaktadır. Söz konusu fazlar ve oluşan reaksiyonlar başlıca üç kısma ayrılır: korozyona giren metalin aktivitesi, korozif ortamın aktivitesi ve faz sınırının karakteristik özellikleri. Gerek metalik malzeme, gerekse sulu korozif ortamı elektriksel bakımdan iletkenidir. Bunların arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar ,elektrik yüklü taneciklerin faz sınırındaki nakilleri ile gerçekleşir. O halde sulu ortamlardaki metallerin korozyonunu elektrolitik korozyon şeklinde tarif etmek de uygun olabilir.Şekil 2.3-4-5-6-7'te korozyonun elektrokimyasal yönü daha açık şekilde görülebilir.

Şekil 2.3'de anotta yükseltgenme reaksiyonu sonucu metalin iyon haline geçişi ve açığa çıkan elektronun metal üzerinde toplanarak metal gövdesi üzerinde katot bölgesine taşındığı, şekil 2.4'de hidrojen çıkışı ile yürüten katot reaksiyonu görülmektedir.

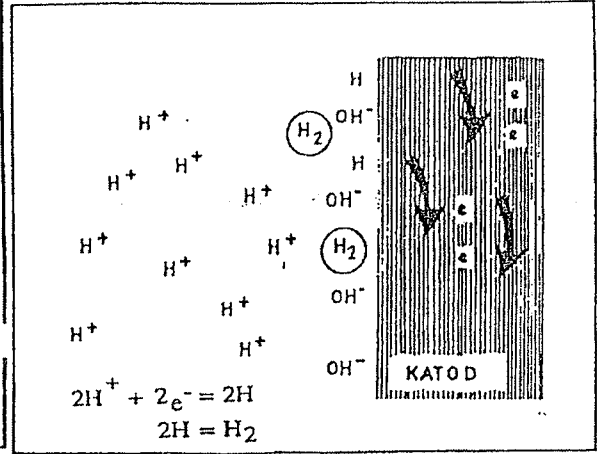
Şekil 2.5'de birbirine çok yakın olarak mikro korozyon hücrelerini oluşturan anot ve katot bölgelerinin yan yana katot reaksiyonlarını oluşturmaları görülmektedir.

Şekil 2.6'da demirin korozyonunda oluşan $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 'nin çevrede bulunan oksijen ile yeniden reaksiyona girerek $\text{Fe}(\text{OH})_3$ haline girerek pas oluşturmaları görülmektedir.

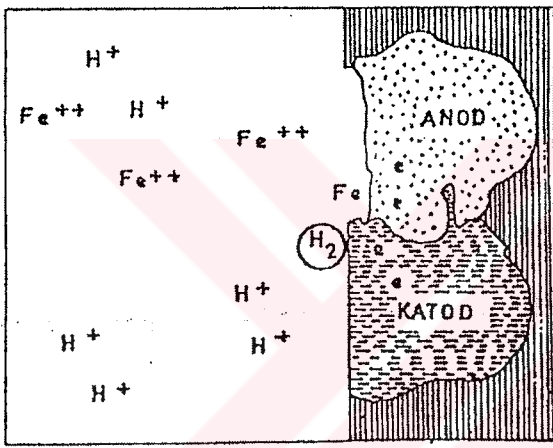
Şekil 2.7'de katodik ve anodik polarizasyon kontrolünde olan korozyon hücreleri görülmektedir. Burada polarizasyonu korozyon hücresinden bir miktar akım geçtikten sonra, anot ve katotta meydana gelen kimyasal reaksiyonların etkisiyle elektrot potansiyellerindeki değişme olarak görebiliriz. Katot polarizasyonuna metal yüzeyli hidrojen birikmesi, anot polarizasyonuna ise, oluşan korozyon ürünlerinin çözünmeyen bileşikler halinde yüzeyi kaplaması sebep olur. Polarizasyon sonucu korozyon hücresinin anot ve katot potansiyel farkı Şekil 2.7'de olduğu gibi azalır.



Şekil 2.3 Demir metalinin anotta yükselgenmesi

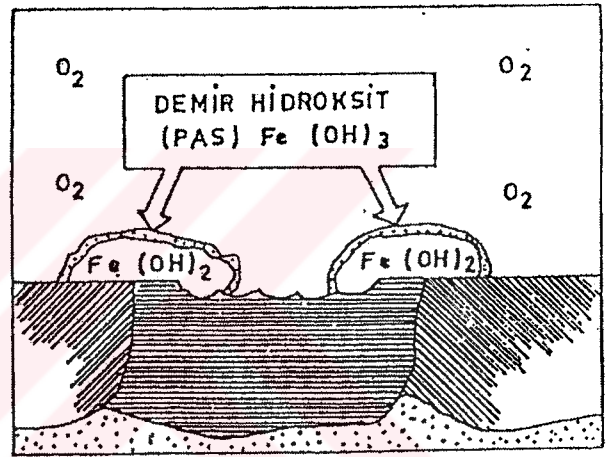


Şekil 2.4 Katotda hidrojen çıkışı reaksiyonu



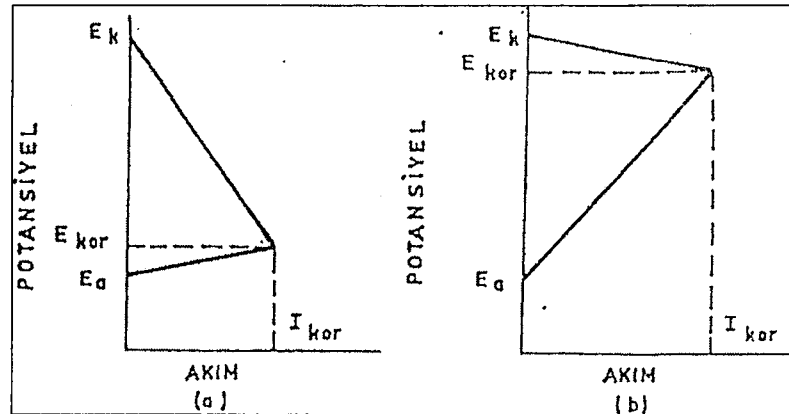
Şekil 2.5 Metal yüzeyde oluşan mikro

korozyon hücresi



Şekil 2.6 Demirin korozyonu sonucu pasın

oluşumu



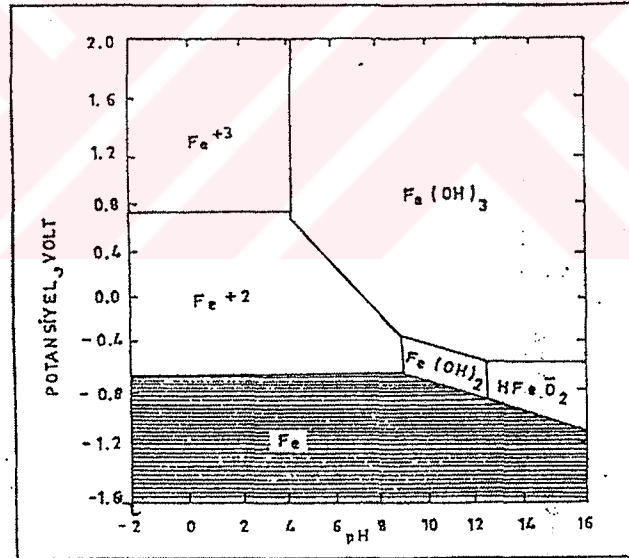
Şekil 2.7 Değişik polarizasyon kontrollü korozyon hücreleri

2.4 Korozyona Etki Eden Faktörler

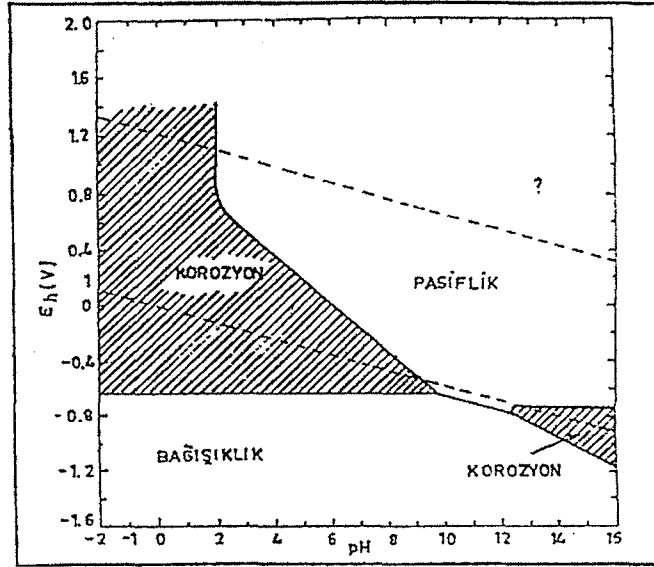
Endüstride proses değişkenlerinin kontrolü ile korozyon kontrolü de sık sık yapılabilmektedir. Bu yüzden, bu değişikliklerin korozyon hızına nasıl etki ettiği çok sık sorulan sorulardan biridir. Bu duruma teknik çözüm bulmak için öncelikle korozyona etki eden belli başlı etmenlerin bilinmesi gerekmektedir.

2.4.1 Potansiyel-PH Etkisi

Metallerin potansiyel-PH diyagramları, oksitlerin ve iyonların termodinamik kararlılığına sahip oldukları alanları gösterir. Yani bir faz diagramı niteliği taşırlar. Potansiyel-PH diyagramları en düşük iyon konsantrasyona göre çizilir ve bu diyagramların yardımıyla bir metalin potansiyel veya PH ını pasif veya bağımsızlık bölgesine kaydırarak, onu korozyondan koruma imkanı sağlar ve hangi şartlarda ne tip bir reaksiyon bekleneceğini gösterir. Bu diyagramlar, su ile beraber sistemde mevcut klorür(Cl), sülfat gibi iyonlar dikkate alınarak çizilebilir. Potansiyel-PH diyagramları denge kavramı üzerine kurulmuş olduğundan, korozyon problemlerine net bir yaklaşım sağlamaz. Korozyon olayları reaksiyonların denge halinden uzaklaşma eğilimleri çerçevesinde oluşmaktadır. Bu yüzden denge halinden uzaklaşma eğiliminin bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 2.8 Çözelti (PH) değeri ve elektrot potansiyeli değerine göre sulu çözeltiler içinde oluşan demir bileşikleri (Çizmecioğlu, 2002)



Şekil 2.9 Demir metalinin sulu çözeltiler içindeki korozyon potansiyeli (Çizmecioğlu, 2002)

Şekil 2.8'de ve Şekil 2.9'da demirin sulu çözeltiler içindeki korozyonu ve pasif bölgeleri, elektrolit (pH) değeri ile elektrot potansiyeline bağlı olarak grafikler halinde açıklanmaktadır. Şekil 2.9'da da görüldüğü gibi demir elektrot potansiyelinin $-0,62$ V'tan (doymuş bakır/bakır sülfat referans elektroda göre $-0,85$ V'tan) pozitif yönde daha küçük olduğu bölgelerde korozyona uğrar. Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'daki grafiklerden de görüleceği gibi pH değeri küçük olması halinde demirin pasifleşmesi söz konusu olamaz. Demirin elektrot potansiyelinin $-0,6$ V'tan daha negatif olması halinde pH değeri ne olursa olsun korozyon reaksiyonu meydana gelmemektedir. Bağışıklık bölgesi denilen bu bölgede muhtemel korozyon reaksiyonlarının serbest enerji değişimi $\Delta G > 0$ 'dır. Bu sonuç katodik koruma yoluyla korozyonu önlemenin temel ilkesini oluşturur. Diğer bölge ise pasiflik bölgesidir ve bu bölgede metal yüzeyinde $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ve $\text{Fe}(\text{OH})_3$ bileşikler oluşarak koruyucu bir film meydana getirir.

Toprağın içindeki çözünmüş tuzlar, alkali ve asit iyonlar , toprak içindeki suyla birleşerek toprağa iletkenlik kazandırır. Toprağın PH değeri 4-8 arasında olmalıdır. Zeminin karakteristik özelliklerinin korozyon üzerinde önemli bir etkisi vardır. Zeminin korozyon özelliği, toprağın bileşimiyle önemli ölçüde değişir. Bunlardan nem oranı, asitlik, baziklik, havanın oksijeni ve suyun

toprak tarafından geçirilebilme yeteneği, kaçak akım ve biyolojik organizmalar vb. toprağın direncine etki eder. Yüksek dirençli toprakta korozyon az olur. Topraktaki su ve tuz oranı arttıkça, toprağın iletkenliği ve korozyon artar. Toprağın içindeki metalik yapılar, yüzeydeki su filmi ve bunun içindeki çözünmüş oksijenin etkisiyle korozyona uğrarlar. Oksijen konsantrasyonunun ve yükseltgenlerin etkisi korozyonu etkileyen diğer bir faktördür. Bir metal, oksitleyici etkenlerin ilavesinden sonra pasif duruma geçmişse, çok güçlü bir oksitleyicinin etkisinde kalmadığı takdirde pasifliğini devam ettirir ancak ortama çok güçlü bir oksitleyici ilave edilirse korozyon hızı şiddetle artış gösterir. Örneğin, daha az hava bulunan bölgelerde çözelti ile temas halindeki metal daha elektronegatif bir potansiyel oluşturur yani daha az hava ile temasta bulunan anot, daha fazla hava ile temasta bulunan bölge katot olarak davranır. Bu ikisi arasında ciddi bir potansiyel farkı vardır ve bu da anottan katota doğru bir korozyon akımına sebep olur.

2.4.2 Zemin Elektrik Özgül Direnci

Zeminde bulunan metal yapıların korozyonunda, önemli bir faktör de zeminin elektrik özgül direncinin etkisidir. Öyle ki, beton, toprak, plastik vb. malzemelerin çelik ile donatıldığı zeminin elektriksel olarak özgül direncinin yüksek olması, korozyon özelliğini, yani korozyon riskini düşürmektedir. Zeminin elektrik özgül direnci (ρ) ile korozyon özellikleri arasındaki ilişki TS-5141'e göre Çizelge 2.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 Zemin Elektrik Özgül Direnci Açısından Korozyon Özelliği (Çizmecioğlu, 1998)

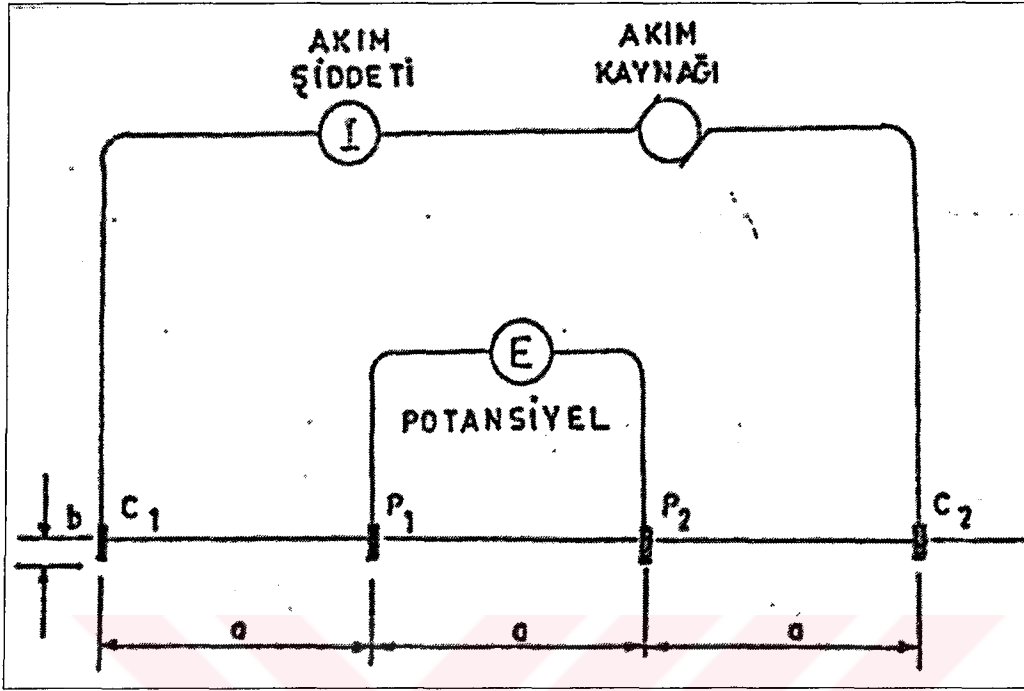
Elektrik Özgül Direnç ρ (ohm.cm);	Korozyon Özelliği
$\rho < 1000$	Çok korozyon
1000 – 3000	Korozyon
3000 – 10000	Orta korozyon
$10000 < \rho$	Az korozyon

Donatının bulunduğu zeminin özgül direnci TS-4363'e uygun olarak Wenner tekniği ile Şekil 2.10'daki gibi ölçülür. Ölçümlerde Wenner 4 elektrot metodu kullanılır ve;

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (2.1)$$

bağıntısına göre elektrik özgül direnci tesbit edilir. Buna göre;

$$\rho = \text{Zeminin özgül direnci (ohm.cm)}, a = \text{Elektrot açıklığı (cm)}, R = \text{Aletten okunan direnç (ohm)}$$



Şekil 2.10 Wenner dört nokta yöntemi ile zemin özgül direnç ölçümü (Çizmecioğlu,1998)

2.4.3 Sıcaklık Etkisi

Sıcaklık da korozyonu etkileyen farklı bir etkidir. Sıcaklık arttıkça iyon hareketi ve korozyon artar. Fakat bazı durumlarda sıcaklık yükselmesine rağmen, korozyon hızında düşme görülebilir. Örneğin demir, çözülmüş oksijen ihtiva eden su içerisinde bu davranışı gösterir, bu olay, yüksek sıcaklıklarda suyun daha az O_2 içermesinden ileri gelmektedir. Kaynama sonucu O_2 ortamdan uzaklaştırılınca, katot ve anot reaksiyonları yavaşlar ve korozyon hızı düşer.

2.5 Korozyona Karşı Katodik Koruma

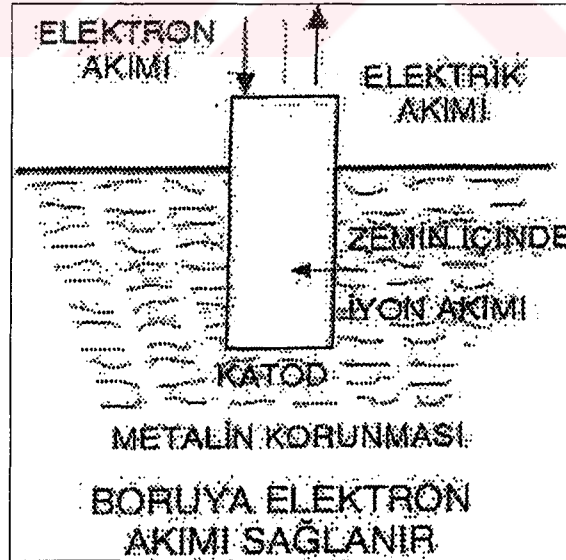
Korozyonu önlemek üzere bilinen yöntemlerin en etkilişi katodik korumadır. Katodik olarak korunmuş olan bir metal yapıda korozyon kesin olarak durur ve korozyonun devam edip etmediği dışardan kontrol edilerek anlaşılabilir. Katodik korumanın temeli, korunacak metali bir pilin katodu haline getirmektir. Eğer katodun polarizasyonu, korozyon potansiyelinin ötesinde bir dış akım uygulanmasıyla devam ettirilirse, her iki elektrot da aynı potansiyele ulaşır ve metalin korozyonu gerçekleşmez. Akım, yardımcı anottan korozyon hücresinin anodik ve katodik alanlarına girer ve DC

kaynağına geri döner. Katodik koruma şekil 2.11’de gösterildiği gibi metalin iyonlaşmasının tam tersi yönde, dışarıdan akım verilerek elektron pompalanması sonucu, daha açıkça donatıya elektron akımı verilerek sağlanır. Basit olarak, korozyona uğrayan yapıya elektron pompalanması şekil 2.11 görülmektedir. Şekil 2.12’de ise basit bir pil hücresi oluşturularak yapılan katodik koruma görülmektedir. Katodik koruma dıştan akım verilerek, anodun potansiyellerinin açık devre potansiyeline getirilmesi şeklinde de uygulanabilir. Bunun sonucu olarak metalin bütün yüzeyi aynı potansiyele ulaşır. Uygulamada katodik korumanın tercih nedeni olan diğer avantajları da şunlardır.

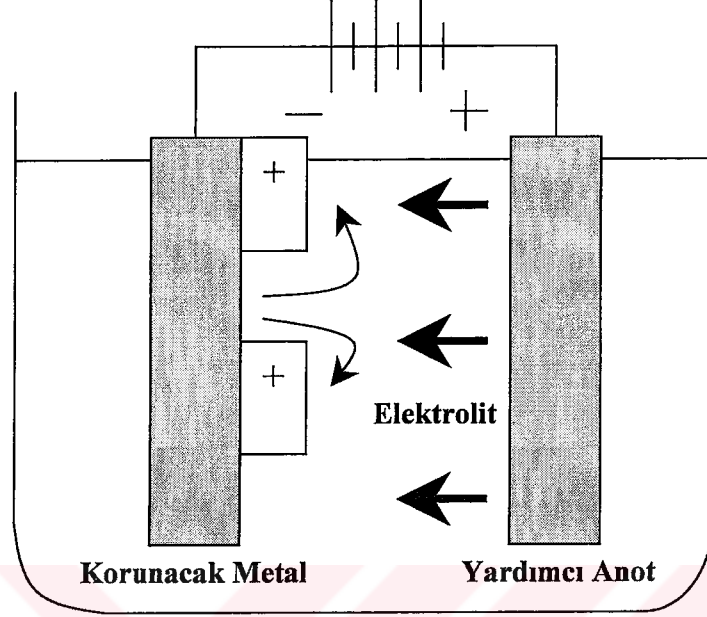
Katodik koruma;

- Yalnız yeni yapılara değil, korozyon olayının başlamış olduğu ve henüz delinme aşamasına gelmemiş yapılarda uygulanabilir.
- Diğer önlemlerle birlikte ve onlara ilave olarak da kullanılabilir. Böylece katodik koruma maliyetinde düşüş sağlanır.
- Uygulanması en kolay ve ekonomik koruma yöntemidir.

Katodik korumanın dış akım kaynaklı ve galvanik anotlu olmak üzere iki tür uygulama şekli vardır. Dış akım kaynaklı katodik koruma sağlamak için bir doğru akım kaynağı ve yardımcı anot gerekmektedir. Galvanik anotlu katodik korumada, galvanik seri içinde korunacak metalden daha aktif bir metalin anot olarak kullanılması gerekmektedir. Galvanit olarak genellikle magnezyum, alüminyum, çinko ve bunların alaşımları kullanılır.



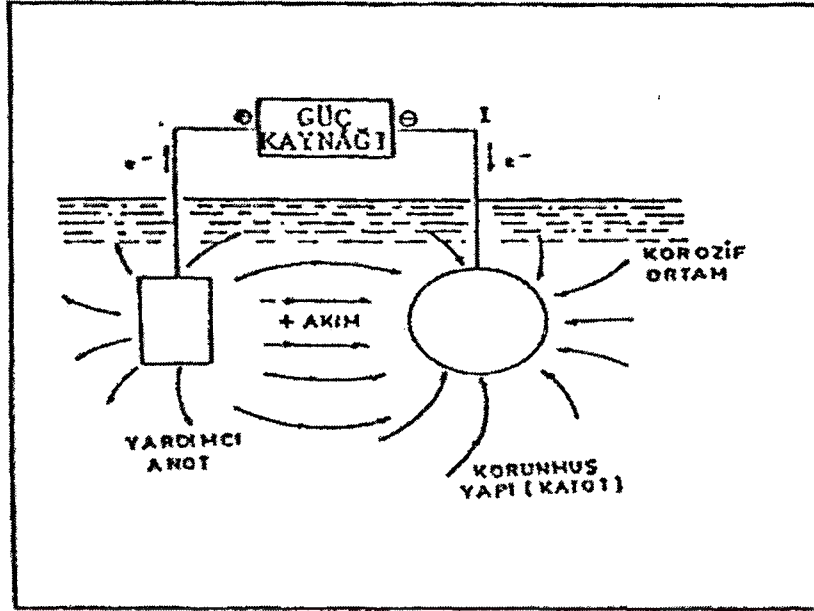
Şekil 2.11 Korozyona uğrayan yapıya elektron pompalanması. (Çizmecioğlu, 2002)



Şekil 2.12 Korozyona uğramış metal üzerine zorlanmış akım uygulayarak yapılan katodik koruma.

2.5.1 Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma

Katodik koruma sağlamak için bir doğru akım kaynağı ve yardımcı anot gerekmektedir. Bu yardımcı anot genellikle grafit, demir, veya son yıllarda geliştirilmiş titanyum bazlı malzemelerden oluşur ve korunacak yapının biraz uzağına yerleştirilir. Anot, doğru akım kaynağının pozitif kutbuna, yapı da negatif kutba bağlanır. Bu anot elektrolit yoluyla yapıya akım geçmesine izin verir. Uygulanan voltajlar, korunacak yapının bütün bölümlerine yeterince akım yoğunluğu sağladığı sürece kritik değildir. Ortamın elektrik özgül direnci gerekli olan uygulama voltajını belirler. Şekil 2.13' de dış akım kaynaklı katodik koruma yöntemini görebiliriz.



Şekil 2.13 Dış akım kaynaklı katodik koruma yöntemi (Çizmecioğlu, 1998)

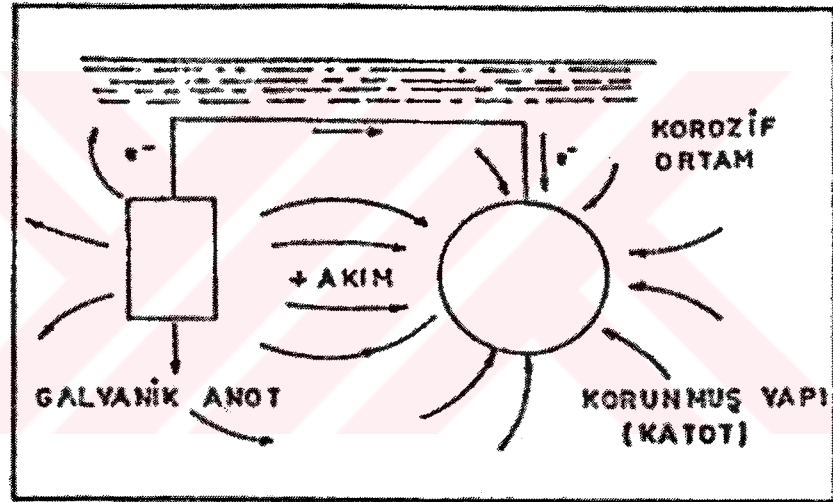
Dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminin özellikleri aşağıdadır:

1. Bu sistem elektrik akımı bulunmayan bölgelerde uygulanmaz.
2. Elektrik akımı şebekeden alındığı için ucuzdur. Bu nedenle akım ihtiyacı için sınır yoktur. Bu sistem, trafo/redresör ünitesi sayısı artırılarak özellikle yeraltı boru hatlarında ekonomik olarak uygulanabilir.
3. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde zemin elektriksel özgül direnci için sınır yoktur. Anot yatağı, direnci düşürülerek ve trafo/redresör sayısı artırılarak istenilen miktarda akım uygulanabilir.
4. Proje sırasında göz önüne alınmayan faktörler nedeni ile beklenmeyen değişimler meydana gelirse, bunlar işletme sırasında gerekli ayarlamalar yapılarak düzeltilebilir.
5. Trafo/Redresör ünitesi kolayca erişecek yerlere konulduğunda, işletme sırasında sistem kontrolü kolaydır.
6. Anot yatağı civarında olan yabancı metalik yapılar üzerinde interferans etkisi yapabilir. Bunun için yabancı metalik yapılar üzerinde özel önlemler alınması gerekebilir.

7. Akım ihtiyacı değıştikçe sisteme uygulanan akım miktarı istenilen seviyeye ayarlanabilir.
8. Anot yatağına yakın olan bölgede aşırı voltaj nedeniyle metal kaplamasında soyulmalar meydana gelmektedir.

2.5.2 Galvanik Anotlu Katodik Koruma

Katodik korumanın bir şekli de, korunacak metalden daha aktif bir metali anot olarak kullanarak yapay bir pil devresi oluşturup aktif metalin tahribatı ile korozyona karşı korunacak yapıya elektron transferi sağlayarak yapıyı katot hale getirerek korumaktır. Şekil 2.14 de galvanik anotlu katodik koruma yöntemi görölmektedir.



Şekil 2.14 Galvanik anot yardımıyla katodik koruma. (Çizmecioğlu, 1998)

Galvanik anotlu katodik koruma, galvanik seri içinde korunacak metalden daha aktif bir metalin anot olarak kullanılması yöntemidir. Galvanik bir pil tanımlandığı gibi akım yönü doğrultusunda kurulur. Galvanik anot olarak genellikle magnezyum ,alüminyum, Çinko ve bunların alaşımları kullanılır. Bu anotlar portatif elektrik kaynağı oldukları için özellikle elektriğin olmadığı veya bu amaç için elektrik hatları döşemenin elverişsiz yada çok maliyetli olduğu yerlerde kullanılır.

Anot İhtiyacı: 1 m² yüzeyde yeterli katodik koruma sağlamak için gerekli akıma katodik koruma akım ihtiyacı denir. Bu akımı anot vereceğinden bu bilgilerden gerekli hesaplamalar yapılarak anodun boyutu

tahmin edilen ömrü ve gerekli olan anot sayısı bulunabilir (Yalçın, Koç, 1991). Daha önce gösterildiği gibi galvanik anot olarak kullanılan en yaygın üç metal magnezyum, çinko ve alüminyumdur.

Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinin özellikleri şöyle özetlenebilir.

1. Dış akım kaynağına gerek yoktur. Katodik koruma için gerekli akım, galvanik anotlardan sağlanır.
2. Bu sistemde elektrik maliyeti yüksektir. Bu nedenle akım ihtiyacı yüksek olan donatı hatlarından tercih edilemez. Galvanik anotlu katodik koruma sistemi yaklaşık olarak 0,5-1,0 amper den daha az akım ihtiyacı olan boru hatlarında ekonomik olabilir.
3. Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinde devre potansiyeli küçük olduğundan yüksek elektriksel özgül dirençli zeminlerde bu sistemin uygulanması güçleşir. 4000 Ohm.cm'den daha yüksek elektriksel özgül dirençli zeminler için bu sistem uygun değildir.
4. Yapımı basit ve kolaydır. İşletme sırasında hiçbir ayar gerektirmez.
5. Anotlar boru hattı boyunca dağılmış olduğundan, işletme sırasında kontrol güçtür. Arızanın belirlenmesi için her anodun ayrı ayrı kontrol edilmesi gerekir.
6. Anot/ Zemin potansiyeli düşük olduğundan, anot yatağının çevre metalik yapılar üzerine interferans etkisi önemsizdir.
7. Anotlardan çekilen akım kontrol edilemez. Borunun akım ihtiyacı polarizasyon nedeni ile zamanla azalır ve bu durumda devre potansiyeli de azalacağından anottan çekilen akım da kendiliğinden düşer.
8. Anoda yakın olan metal yüzeyinde aşırı voltaj nedeni ile metal kaplamasında soyulma meydana gelmez.

Sonuçta, her iki koruma metodunda hattın her noktasında birim alana devamlı olarak akım gelmektedir. Bu akımın yoğunluğu, ortamın koroziyeliğine ve o bölgede ki potansiyel farkına bağlıdır. Dolayısı ile koruma için seçilen kriter, metalin beton ile bağının kurulacağı minimum potansiyeldir. Ölçüler genellikle Bakır/Bakır Sülfat referans elektrodu ile yapılır. Betonda ki çelik için katodik koruma -850 mV'dan daha büyük negatif değerlerdir. Beton ile temas halinde ki her noktada minimum potansiyele erişilmiş olması gerekir (Yalçın, Koç, 1991).

3. BETON İÇERİSİNDEKİ ÇELİĞİN KOROZYONU

3.1 Betonun Yapısı

Beton basınç dayanımı ile denetlenen agreg, çimento hamurundan oluşan kompozit bir malzemedir. Agreg(inert dolgu maddesi) + çimento + su = beton

Beton esas itibariyle agreg (çakıl, kum gibi dolgu maddeleri), çimento ve su karışımından oluşur. Çimentonun bağlayıcı özelliğini sağlayan asıl kimyasal reaksiyon, su ile çimento klinker bileşikleri arasında meydana gelir. Agreg, betonun fiziksel yapısını oluşturan inert bir dolgu maddesi olarak kullanılır. Klinker bileşikleri su ile kimyasal reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum alüminat hidratları oluşturur. Bu hidrate bileşikler zamanla kristallenerek sertleşirler. Klinker bileşiklerinin su ile reaksiyonu sırasında silikatların hidrolizi ile Ca(OH)_2 merydan gelir. Kuvvetli bazik karakterde olan bu hidroksit, betonun sertleşmesinden sonra da, beton boşlukları içinde doygun çözelti halinde kalır. Bunun sonucu olarak ve klinker bileşiminde bulunan az miktardaki alkali oksitlerinin de etkisi ile taze betonun pH derecesi, doygun kireç çözeltisinde olduğu gibi 12,5 (alkali oksitlerinin bulunması halinde 13,2) değerine yükselir. Beton yaşlandıkça atmosferik CO_2 'nin beton bünyesine difüzyonu sonucu pH değerinde azalma gözlenir. Ancak eski betonlarda pH derecesi çok aşağı düşmez.

Beton normal halde betonarme demirleri için hem kimyasal hem de fiziksel olarak iyi bir koruyucu ortam oluşturur. Çimento + su reaksiyonu sonucu kalsiyum hidroksit oluşur ve beton oldukça yüksek bir alkali özellik kazanır. Beton pH derecesinin yüksek oluşu betonarme demiri yüzeylerinde pasif bir oksit filmi oluşmasına neden olur. Diğer taraftan betonun geçirgenliğinin düşük oluşu, korozyona neden olan bileşenlerin beton içine girmesini ve betonarme demirleri yüzeyine kadar ulaşmasını güçleştirir. Bir elektrolit olarak betonun iyonik iletkenliği de çok düşüktür, iletkenliğin düşük oluşu betonarme demirleri üzerinde korozyon hücrelerinin gelişmesini güçleştirici bir etki gösterir. Bu özellikler, normal halde bulunan bir beton içindeki betonarme demirlerinin korozyona uğramasını önler. Normal bir beton içinde demirler pasif halde bulunur. Fakat beton kalitesinin yetersiz olması ve beton içine çevreden zararlı bileşenlerin girmesi halinde betonarme demirleri korozyona uğrayabilir.

Betonarme demirlerinde korozyon olayına, deniz suyu veya atmosferi etkisinde kalan beton yapılarda, klorür tuzlarının kullanıldığı bazı kimyasal fabrikalarda ve özellikle tuzlama yapılan kara yolu köprüleri ve viyadüklerde, büyük su depoları ve özellikle kaçak akımın bulunduğu yeraltı boru ve metro sistemlerinde rastlanmaktadır. Karayollarındaki buzlanmayı önlemek amacıyla yollara ve özellikle buzlanmanın daha etkili olduğu köprülere atılan tuzlar betonarme demirlerinin korozyonu açısından büyük tehlike

yaratmaktadır. Buzların erimesi sonucu oluşan derişik tuz çözeltileri, temas etmiş olduğu beton boşlukları içine nüfuz ederek betonarme demirlerine kadar ulaşmaktadır. Böylece beton boşluklarına giren klorür iyonu zamanla birikim yaparak konsantrasyonu gittikçe artmaktadır. Buna benzer olarak deniz atmosferinde kalan betonlarda da, rüzgarların taşımış olduğu tuz partikülleri beton yüzeyine yapışarak benzer şekilde betonarme demirlerine kadar taşınmakta ve belli bir konsantrasyona ulaştıktan sonra betonarme demirlerinin korozyonuna neden olmaktadır.

Betonarme demirlerinin korozyonu, klorür ve pH gibi kimyasal özellikler yanında beton yapının fiziksel özelliklerine de bağlıdır. Beton porozitesi ve geçirgenliğı korozyona dolaylı olarak etki yapar. Korozyon reaksiyonunun temel bileşenleri olan oksijen ve su beton içine çevreden difüzlenir. Beton içine oksijen difüzlenme hızı betonun porozitesine ve rutubet derecesine bağlıdır. Bu açıdan bakıldığında, sağlam ve geçirimsiz özellikte, kaliteli bir beton yapılarak betonarme demirlerinin korozyonunun büyük ölçüde azaltılabileceğı anlaşılr.

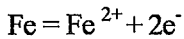
3.2 Betonarme Yapıdaki Çelik Donatının Korozyonun Oluş Nedenleri

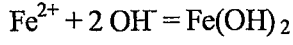
3.2.1 Oksijen Difüzyonu

Atmosferdeki oksijenin beton içinde bulunan demir yüzeyine kadar ulaşması iki basamakta gerçekleşir. Önce oksijen beton boşluklarına girerek orada bulunan beton boşluk suyu içinde çözünür. Daha sonra difüzyon yoluyla çözelti içinde hareket ederek metal yüzeyine ulaşır.

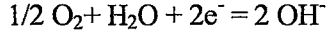
Eğer beton kuru halde ise, bu durumda beton içinde bulunan boşluklar hava ile doludur ve metal yüzeylerine oksijen taşınması çok kolaydır. Beton boşluklarının su ile dolu olması halinde oksijenin çeliğe ulaşması için su içinde çözünmesi ve çözelti içinde difüzyon yoluyla hareket etmesi gerekir Oksijenin hem su içindeki çözünürlüğü az, hem de çözelti içinde difüzlenme hızı çok küçüktür. Bu nedenle beton içine oksijen difüzlenme hızı, beton boşluklarının su ile dolu veya boş oluşuna göre çok farklıdır. Her iki halde de korozyon hızı beklenenden daha azdır. Betonarme demirlerinin korozyonu için hem suyun hem de oksijenin bulunması gerekir. Su ile doymuş haldeki betonlarda oksijen yetersizliğı, kuru haldeki betonlarda da ise su yetersizliğinden dolayı korozyon hızında yavaşlama olur. Betonarme demirlerinin korozyonu beton boşluklarının yarıya kadar su ile dolu olması halinde ya da zaman zaman ıslanıp kuruyan betonlarda maksimum değere ulaşır.

Beton içindeki demir aynen sulu çözeltiler içindekine benzer şekilde korozyona uğrar. Anot bölgesinde demir iyon haline geçer. Demir iyonları alkali ortamda demir hidroksit halinde çökelir.





Beton pH değeri yüksek olduğu için beton içinde katotta hidrojen çıkışı olmaz . Katot reaksiyonu ancak oksijen redüksiyonu şeklinde yürütebilir.



Bu reaksiyonlardan açıkça anlaşılacağı üzere betonarme demirlerinin korozyonu için oksijene ve suya mutlaka ihtiyaç vardır. Yani kuru haldeki beton içinde betonarme demirleri korozyona uğramaz. Yeterli oksijen bulunmaması halinde de korozyon olayı yürümez. Ancak gözenekli (poröz) bir malzeme olan beton içine oksijen kolaylıkla girebilir. Beton içine oksijen girişi iki yolla olabilir, Birincisi oksijen ile doymuş haldeki su beton içine nüfuz ederken oksijeni betonarme demirlerine kadar beraberinde taşır. Bu olay periyodik olarak ıslanan ve kuruyan betonlarda etkili olarak yürür veya hava doğrudan beton çatlak ve boşlukları içine dolarak oksijeni taşır. Eğer beton boşlukları su ile dolu değilse bu olay çok hızlı olarak gerçekleşir. Aksi halde oksijenin beton boşlukları içindeki suda çözünerek oradan betonarme demirlerine kadar çözelti içinde difüzlmesi gerekir. Oksijenin çözelti içindeki difüzlme hızı çok düşük olduğundan, bu yolla oksijen transferi son derece yavaştır.

Beton boşluk suyu içinde çözülmüş olan oksijenin betonarme demirleri yüzeyine kadar olan difüzyon hızı büyük ölçüde beton yapısının homojenliğine ve porozitesine bağlıdır. Difüzyon katsayısı, betonun su ile doygunluk yüzdesine ve beton yapımı sırasında kullanılan su/çimeto oranına göre değişir. Su/Çimeto oranı arttıkça betonun porozitesi artmakta ve buna paralel olarak oksijen difüzyon hızında da artış olmaktadır. Örneğin, su/çimento oranı 0,40 dan 0.60' a çıkarılacak olursa oksijen difüzyon hızında yaklaşık iki kat artış olmaktadır. Bu durumda betonarme demirlerinin korozyon hızında da iki kata varan bir artış beklenebilir.

Beton içine oksijen difüzyon hızı yalnız su/çimento oranına değil, betonun rutubet derecesine (beton boşluklarının su ile doluluk derecesine) de bağlıdır. Beton kuru halde iken beton içindeki boşluklar hava ile doludur. Bu durumda atmosferden katot yüzeyine oksijen transferi son derece kolaydır. Beton boşlukları su ile dolu olursa, bu durumda oksijen önce boşluk suyu içinde çözünecek ve daha sonra difüzlenererek betonarme demirlerine ulaşacaktır. Beton rutubet derecesinden kaynaklanan bu olay pratikte büyük önem taşır. Yukarda belirtildiği üzere, betonarme demirlerinin korozyonu için hem oksijene ve hem de suya ihtiyaç vardır. Beton kuru halde iken su eksikliğinden, beton su ile tam doymuş halde iken 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. 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 difüzlenererek demir yüzeyine kadar taşınmasının güçlüğünden ileri gelir.

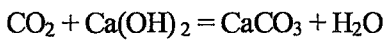
Su içinde bulunan çözülmüş oksijen konsantrasyonu korozyon açısından büyük önem taşır. Oksijenin sudaki çözünürlüğü oldukça küçüktür ve sıcaklık arttıkça azalır. Oksijenin tuzlu sular içindeki çözünürlüğü de saf suya göre daha azdır. Tuz konsantrasyonu arttıkça su içinde çözülmüş haldeki oksijen konsantrasyonu gittikçe azalır. Bu nedenle yüksek konsantrasyondaki tuzlu sular içinde korozyon hızının artık artmadığı görülmüştür (Çizmecioğlu, 2002).

Seyreltik halde tuz konsantrasyonu arttıkça klorür iyonu etkisi ile korozyon hızında da artış olmaktadır. Ancak tuz konsantrasyonu belli bir değere eriştikten sonra (75 g tuz / kg çözelti) korozyon hızında azalma görülmektedir. Bu durum tuz konsantrasyonunun artışı ile birlikte su içinde çözülmüş olarak bulunan oksijen konsantrasyonunun azalmasından ileri gelmektedir.

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 özelliğindedir. Taze betonun pH derecesi 12,5 -13,2 arasındadır. Eğer yüksek fırın cürufu veya uçucu kül gibi puzolan katkı çimentolar kullanılmış ise, beton pH değeri 12 ye kadar düşer. Her iki halde de, eğer klorür iyonu yoksa beton içindeki çelik pasif halde bulunur. Beton pH derecesi ile korozyon arasındaki ilişkide pH derecesinin $10 < \text{pH} < 13$ olduğu bölgelerde betonarme demirlerinin potansiyel değerine bağlı olarak ya bağışıklık, ya da pasifleşme bölgesinde olduğu görülmektedir (Koç, 2000).

3.2.2 Karbonatlaşma Reaksiyonunun Donatı Korozyonuna Etkisi

Yüksek alkali özelliği nedeniyle normal betonlar içinde betonarme demirleri pasif halde bulunur. Fakat herhangi bir nedenle beton pH derecesi düşerse pasiflik bozulur. Beton pH derecesinin düşmesine neden olan en önemli olay karbonasyon olayıdır. Karbonasyon, çevre atmosferden beton içine giren karbon dioksitin (veya SO_x, NO_x gibi diğer asit anidridi gazların) beton boşluklarında bulunan serbest kireç ile reaksiyona girmesi ile oluşur. Bu reaksiyon sonucu beton pH derecesi 9' a kadar düşebilir ve betonun pasifleştirme özelliği kaybolur.

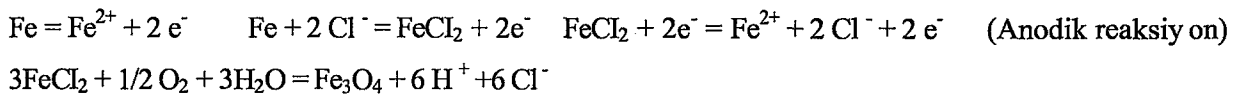


Karbonasyon olayı beton yüzeylerinde başlar ve zamanla parabolik olarak azalan bir hızla beton derinliklerine doğru ilerler. Nüfuz hızı her şeyden önce betonun fiziksel özelliklerine bağlıdır. Yüksek kaliteli ve düşük poroziteli betonlarda karbonasyon etkisi çok azdır. Çevre atmosfer koşulları da karbonasyon olayında etkili olur. Sıcak ve kuru (düşük relatif rutubetli) ortamlarda bulunan betonlarda karbonasyon olayı daha etkilidir. Kirli olmayan atmosferlerde karbonasyon olayının pratik açıdan önemli bir sorun yaratmamaktadır.

3.2.3 Pasifliğin Klorür İyonu Etkisi İle Bozulması ve Klorun Bağlanması

Beton içine klorür başlıca iki yoldan girer. Bunlardan birincisi ve önlenabilir olanı, beton karışımı hazırlanırken kullanılan kum, çakıl, karışım suyu ve çeşitli katkı maddeleri ile giren klorür bileşikleridir, burada özellikle deniz suyu veya deniz kumu kullanılması başlıca önemli bir etkindir. İkincisi ve pratikte daha sık rastlanana beton sertleştikten sonra çevreden beton içine difüzlenen klorür iyonlarıdır, burada da özellikle CaCl_2 içeren karışımların betonun içine nüfuz etmesi korozyona sebep olur. Betonarme demirlerinin korozyonu üzerine başlangıçta ve sonradan giren bu klorürlerin etkisi farklıdır. Başlangıçta beton içine giren klorür iyonlarının bir kısmı, çimento hidratasyon reaksiyonu sırasında çimento klinker bileşiklerinden tri kalsiyum alüminat ile reaksiyona girerek suda çözünmeyen bir bileşik olan Friedel tuzunu ($3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot n \text{ H}_2\text{O}$) oluşturur. Böylece klorür iyonunun bir kısmı bağlanmış olur. Puzolan katkılı betonlarda bu durum değişir. Bu bağlı klorürün pasifliği bozucu etkisi yoktur. Korozyon üzerine beton boşluk suyu içinde çözünmüş halde bulunan klorür iyonları etkili olur.

Beton içinde bulunan klorür iyonlarının pasifliği bozucu etkisi aşağıdaki şekilde açıklanmaktadır: Klorür iyonu elektronegativitesi yüksek bir iyondur. Bu nedenle metal yüzeyinde oksijen ve hidroksit iyonlarından daha sağlam şekilde adsorbe edilir. Adsorbe 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 yeniden çözelti içine karışır. Aşağıda verilen reaksiyonlardan açıkça görüldüğü üzere klorür iyonu doğrudan korozyon yaratmaz. Ancak bir katalizör gibi korozyon olayının hızını artırıcı olarak rol oynar. Şekil 3.1 de beton içerisindeki çelik donatının klorür iyonu difüzyonu ile pasif tabakanın nasıl parçalandığı ve korozyon neticesinde betonun nasıl çatladığı görülmektedir. Ayrıca anot ve katot reaksiyonlarının olması klor iyonları (Cl^-), oksijen (O_2) ve suyun ortamda bulunmasından dolayıdır. Burada korozyonu etkileyen başlıca faktörler oksijen miktarı, beton içindeki nem ve klorür iyonu konsantrasyonudur.



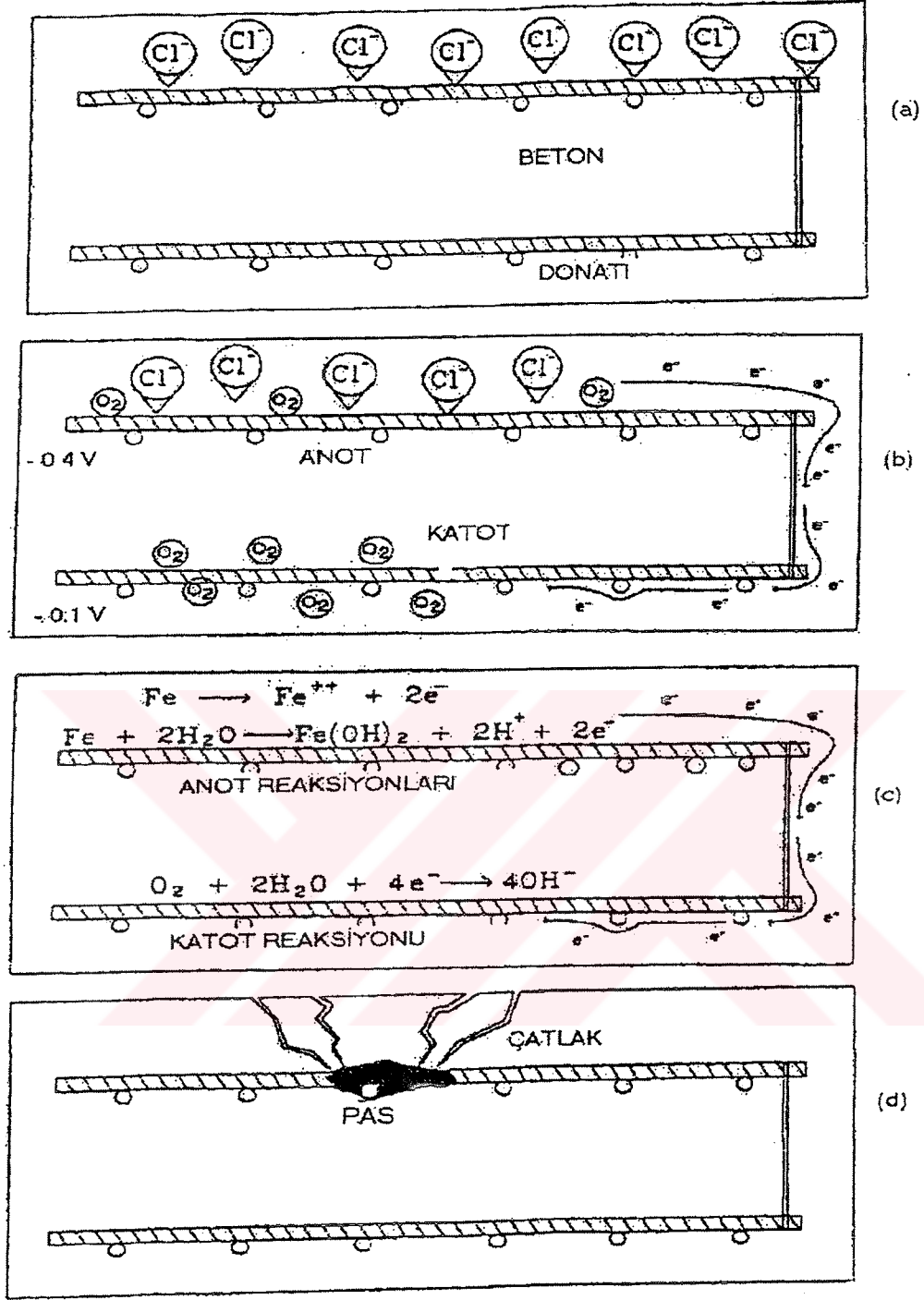
Klorür iyonunun çukur korozyonu oluşturması yukardaki zincirleme reaksiyonların dar bir bölgede yürütmesi sonucu ortaya çıkar. Klorür iyonu ile kirlenmiş betonlar içinde çukur korozyonu olayına sıkça raslanır. Çevreden beton içine difüzlenen klorür iyonlarının pasif halde bulunan betonarme demirleri üzerindeki pasif tabakayı bozarak korozyona neden olur.

Klorür iyonu su içinde çözünmüş olarak beton kılcal çatlaklarından veya boşluklarından ilerleyerek belli bir süre içinde yüzeye en yakın olan betonarme demirine ulaşır. Burada metal yüzeylerinde bulunan pasif

tabakayı geçerek metal yüzeyinde adsorblanır. Betonarme demirlerinin potansiyeli pasif halde iken - 0,200 V'den daha pozitifdir. Klorür iyonlarının adsorbsiyonu ile betonarme demirlerinin potansiyelinde negatif yönde artış olur. Şekil 3.2'de nötral ortamda metalik yapının potansiyelinin artan klorür konsantrasyonu ile negatif yönde arttığını gözlemleyebiliriz. 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.

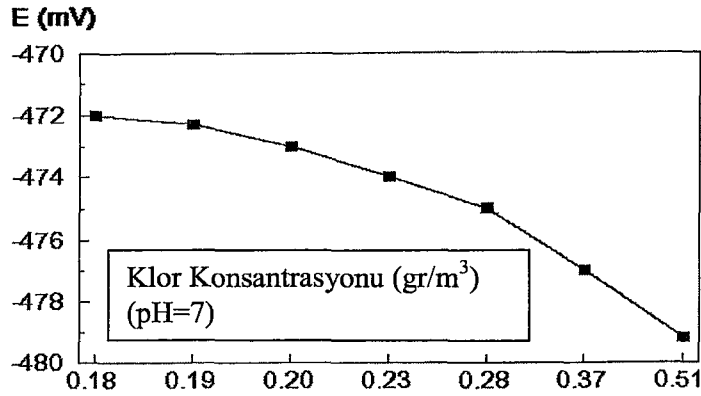
Klorürsüz bir ortamda meydana gelen korozyon olayında anot bölgesinde çözünen demir iyonları demir hidroksit halinde metal yüzeyinde çökeldiği halde, ortamda klorür bulunması halinde çökeltme ve metalin pasifleşmesi söz konusu olmaz. Aksine olarak hidrojen iyonları çıkışı nedeniyle korozyon hızlanarak devam eder. Korozyon hızı katot bölgesine oksijen difüzyon hızının kontrolüne girer ve katotta oksijen redüksiyon reaksiyonu için harcanan elektronlara eşdeğer miktarda demir çözeltiye geçer. Böylece daha az oksijen alan bölgelerde şiddetli bir korozyon olayı başlamış olur.

Klorürün betona bağlanması sırasında beton kalıp içinde korozyona olanak tanıyan değişimler olur. Bu değişimlere karbonatlaşma ve klorür nüfuz etmesi sebep verir. Klorür iyonu böylece beton içinde çelik üzerinde ki koruyucu sıkı oksit film tabakasına nüfuz eder ve pasifliği bozarak korozyona sebep verir. Korozyon işlerinin başlaması ve hızlanması betonun bulunduğu ortamın bağıl nem oranına (RH), oksijen difüzyonuna ve sıcaklığa bağlıdır. Ayrıca betonun yoğunluğu da korozyon oranını etkileyen diğer bir faktördür (Byfords 1990). Klorür ve diğer değişkenlerin korozyon etkisi Tuutti tarafından hazırlanan Şekil 3.3 te ki korozyon modelinden daha açık bir şekilde görülmektedir. CO₂ ve Cl⁻ bağlanma evresini, bağıl nem, sıcaklık ve oksijen yayılma evresini oluşturur. Aslında bu iki evre betona korozyon kontrolü ve onarımı yapılabilmesi için en verimli evredir. Klorürün beton içinde ki etkisi betona bağlanma gücü ile orantılıdır. Beton kalitesi ve yapısı burada klorür bağlanmasında etkilidir. pH, betonun kompozisyonu, su/çimento oranı, çimento cinsi ve ek katkı maddeleri (Örneğin; Flyash gibi), betonun porozitesi (gözenekleri), kılcallığı ve sıcaklığı, betonun hazırlanma evresinde ki diğer önemli parametrelerdir.



Şekil 3.1 Betonda Korozyon Mekanizması (Çizmecioğlu, 2002)

- a) Klorürü Difüzyonu ile Pasif Tabakanın Parçalanması, b) Korozyon Hücresi Oluşumu, c) Anot ve Katot Reaksiyonları, d) Pas Oluşumu ve Hacimce Genleşme Sebebi ile Betonun Çatlama



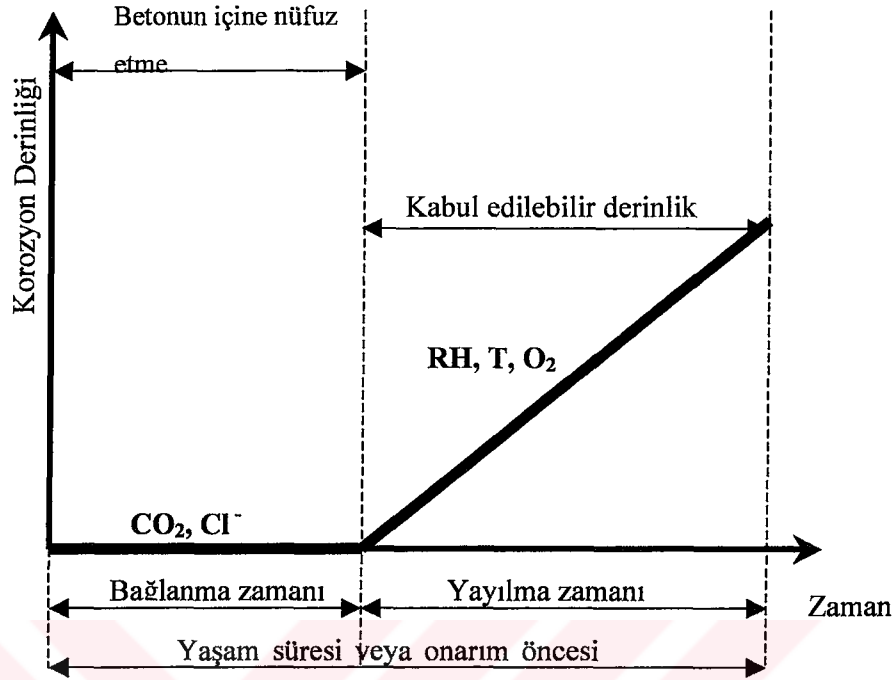
Şekil 3.2 Metal yüzeyinde klor konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak potansiyel dağılımı (Ayala, Ingalls, Geneska, 1996)

Sertleşmiş bir beton bünyesine çevreden klorür nüfuz hızı, betonun fiziksel yapısı ile doğrudan ilgilidir. Betonun porozitesi ve geçirgenliği ne derece az ise, beton içine nüfuz edebilen klorür miktarı da o derece az olur. Beton geçirgenliği başta su/çimento oranı olmak üzere, beton yapımında kullanılan agrega granülometrisine, çimento dozajına, betonun kalıp içinde sıkıştırılmasına ve dökümden sonraki ilk günlerde uygulanan kür koşullarına bağlıdır.

Su/çimento oranı 0,60 olan betonlarda aynı derinliğe klorür penetrasyonunun, su / çimento oranı 0,40 olan betonlara göre bir kaç kat daha fazla olduğu görülmektedir. Örneğin, 50 mm derinlikte beton içinde bulunan klorür konsantrasyonu, su/çimento oranı 0,40 iken % 0,01 olduğu halde, su/çimento oranı 0,60 olduğunda yaklaşık % 0,10 'a çıkmaktadır. O halde su/çimento oranı mümkün olduğunca düşük beton yapılarak klorür iyonlarının zararlı etkisi önemli ölçüde azaltılabilir.

Pratikte betonarme demirlerinin korozyonunun başlaması için geçen süre de büyük önem taşır. Demirler beton içinde mümkün olduğunca derine (en az 5 cm) konularak korozyonun etkisi azaltılmaya çalışılır. Ancak bir çok halde betonarme demirleri üzerinde bulunan beton tabakası kalınlığını (pas payını) çok fazla artırabilmek mümkün olmaz.

Klorür iyonu üstel bir fonksiyonla gittikçe azalan bir şekilde beton içine nüfuz etmektedir. Örneğin su/çimento oranı 0,60 olan bir beton tuzlu su içinde bekletildiğinde, korozyon olayı 50 mm derinlikte yaklaşık olarak 80 günde başladığı halde , 75 mm derinlikteki betonarme demirlerinde korozyon olayının başlaması için en az 380 gün geçmesi gerekmektedir.. Bu süreler betonun sürekli olarak su altında bulunması hali içindir. Zaman zaman ıslanan ve kuruyan betonlarda korozyon olayı çok kısa süre içinde başlayabilir.



Şekil 3.3 Korozyon Modeli (Tuutti) (Petterson, 1992)

3.3 Beton İçindeki Çeliğin Korozyonunun Elektrokimyasal Teorisi

Çelik yüzeyinde oluşan oksit tabakası bozulmadığı süre metal korozyona uğramaz. Bu nedenle yüksek pH derecelerinde çeliğin genellikle pasif halde kaldığı görülür. Beton içinde bulunan çeliğin korozyon durumu hakkında, statik potansiyel değeri ölçülerek kalitatif olarak bir fikir edinilebilir. ASTM -C 876-87 standardına (bakınız ek4) göre, beton içinde bulunan çeliğin potansiyel ölçüm sonuçları değerlendirilmektedir.

Bu değerlendirmeler saf su veya içme suyu derecesinde temiz tatlı sular için geçerlidir. Klorür gibi bazı aktif iyonlar içeren sularla temas eden betonlarda çeliğin pasifliği bozulabilir. Temiz doğal malzemelerle hazırlanmış olan bir beton içinde çok az miktarda klorür iyonu bulunur. Agregadan ve karışım suyundan kaynaklanan bu klorürün konsantrasyonu pasifliği bozmak için yeterli değildir. Bazı halde beton prizini çabuklaştırmak amacıyla beton içine katılan kimyasal maddeler yoluyla da beton bünyesine klorür girebilir. Karışım sırasında beton içine girmiş olan bu klorür iyonlarının bir kısmı çimento hidrasyonu sırasında hidroliz olan trikalsiyum alüminat (C_3A) ile birleşerek trikalsiyum kloroalüminat (C_4AF) halinde bağlanır. Beton bünyesinde bu şekilde bulunan klorür su içinde çözünmediğinden betonarme demirleri üzerine

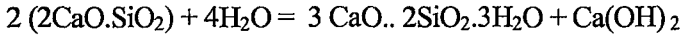
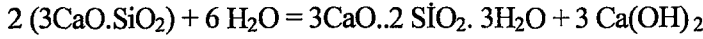
korozif etki yapmaz. Betonarme demirlerinin korozyonu açısından asıl tehlike beton bünyesine sonradan giren klorür iyonarından ileri gelir. Klorür doğada bol bulunan bir elementtir. Başlıca klorür kaynağı bileşiminde yaklaşık %3 oranında tuz bulunan deniz suyudur. Deniz suyu ile temas eden veya yakın deniz atmosferinde bulunan betonlarda zamanla klorür iyonu birikimi meydana gelir. Diğer önemli bir klorür kirlenmesi de, kış aylarında yollarda ki buz eritmek amacıyla kullanılan tuzdan kaynaklanır. Bu tuz su içinde çözülmüş olarak beton bünyesine girer. Daha sonra beton kuruduğu zaman su buharlaşarak uzaklaşır, klorür ise beton boşlukları içindeki su içinde çözülmüş olarak kalır. Bu olay geçirgenliği yüksek olan betonlarda daha etkin şekilde kendini gösterir. Bataklık, çöl gibi tuzlu zeminler içinde bulunan betonlarda da buna benzer olay meydana gelebilir. Yağış suları ve yeraltı suları toprak içinde bulunan klorür iyonunu çözerek beton bünyesine taşıyabilir. Bu olay zeminin heterojen yapısı nedeniyle bölgesel olarak kendini gösterir ve beton içinde yer yer farklı klorür konsantrasyonu oluşmasına neden olur. Klorür iyonunun hangi konsantrasyonda bulunması halinde betonarme demirlerinin korozyonu için zararlı olacağı bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Stratfull, 1 m³ beton içinde 0,8 kg'dan daha fazla klorür bulunması halinde betonarme demirlerinin pasifliğinin bozulduğunu göstermiştir. Diğer bazı araştırmacılar da bu limit değeri desteklemişlerdir. Hausmann, alkali çözeltiler içinde çeliğin korozyonunu incelemiş ve klorür etkisinin hidroksil iyonu konsantrasyonu ile birlikte ele alınmasının gerektiğini ileri sürmüştür. Araştırmacı, pH değeri düştükçe daha az konsantrasyondaki klorür iyonunun çeliğin pasiflik halini bozabileceğini ortaya koymuştur. Beton içinde bulunan klorür konsantrasyonu genellikle kütleli yüzde olarak veya 1 m³ beton içinde bulunan klorür kütlesi şeklinde ifade edilmektedir. Ancak korozyon açısından önemli olan bu toplam klorür konsantrasyonu değil, beton boşlukları içinde bulunan sudaki konsantrasyonlardır. Beton boşluk suyundaki [Cl⁻]/[OH⁻] molar oranı ne derece büyükse, pasiflik de o derece kolay olarak bozulabilir. Beton içinde bulunan klorürün konsantrasyonu kadar tayin yöntemi de önem taşır. Klorür konsantrasyonu tayini, beton toz edilip asitte çözülerek veya sıcak su içinde bekletilerek elde edilen ekstraksiyon çözeltilerinde yapılmaktadır. Beton asitte çözerek yapılan deneyde beton içindeki toplam klorür konsantrasyonu elde edilmektedir. Korozyonu kontrol amacıyla hazırlanmış olan standartlarda bu iki değere de yer verilmektedir. Çeşitli ülkelerde uygulanmakta olan başlıca standartlarda zararlı sayılan klorür limit değerleri birbirinden oldukça farklıdır. Bütün bu standartlarda biri normal betonarme demirleri, diğeri ön gerilimli betonlar için olmak üzere iki ayrı değer verilmektedir.

3.4 Beton İçindeki Çeliğin Korozyonuna Etki Eden Faktörler

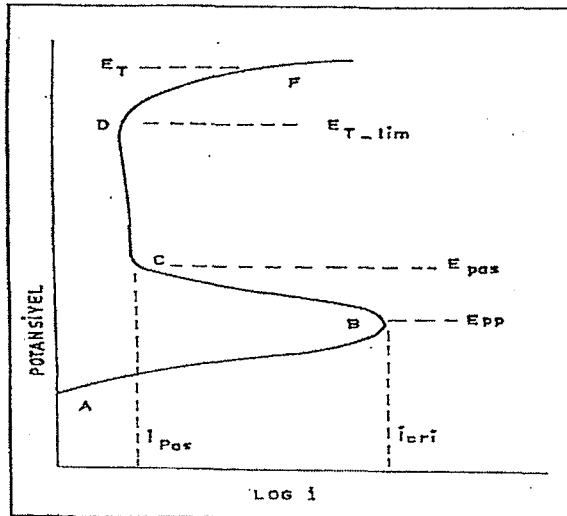
3.4.1 pH Etkisi

Portland çimentosu ile yapılan betonlarda, çimento içine su katılınca klinker mineralojik bileşikleri su ile reaksiyona girerek kısa sürede hidroliz olurlar. Portland çimentosu klinkerinin temel bileşenleri olan

trikalsiyum silikat (C_3S) ve dikalsiyum silikatın (C_2S) su içindeki hidratasyon reaksiyonları şöyledir:



Bu reaksiyonlar sonucu açığa çıkan kalsiyum hidroksit beton boşluk suyu içinde çözünerek doygun çözelti haline gelir ve taze betonun pH derecesini 12 ye kadar çıkarır. Ayrıca çimento klinkeri içinde az miktarda bulunan alkali oksitlerinin (Na_2O ve K_2O) de çözünmesi ile beton pH derecesi 13,2 'ye kadar yükselebilir. Değişik çimento cinslerinde klinker bileşiminin farklı olması nedeniyle beton pH derecesi 12-13 arasında değişebilir. Kalsiyum hidroksit beton boşluk suyu içinde doygun halde bulunduğundan, betonun rutubet yüzdesinin değişmesi beton pH değerini değiştirmez. Ancak beton yaşlandıkça pH değeri gittikçe azalır. Bunun başlıca nedeni karbonasyon olayıdır. Beton pH'ının zamanla azalmasının diğer bir nedeni de beton boşluk suyunda çözünmüş halde bulunan alkali oksitlerinin yıkanmak suretiyle beton dışına taşınmasıdır. Ancak bu yolla yalnız alkali oksitleri uzaklaşacağından beton pH derecesi 11 in altına düşmez ve korozyon açısından bir sorun ortaya çıkmaz. Portland çimentosu ile yapılmış bir betonun boşluklarında bulunan su doygun kireç çözeltisi halinde olup, içinde bulunan az miktarda $NaOH$ ve $Ca(OH)_2$ etkisi ile yüksek alkalın özelliktedir. Taze betonun PH derecesi 12,5-13,2 arasındadır. Eğer yüksek fırın cürufu veya uçucu kül gibi puzolan katkılı çimentolar kullanılmış ise beton pH değeri 12'ye kadar düşer. Her iki halde de, eğer klorür iyonu yoksa beton içindeki çelik pasif halde bulunur. Beton pH derecesi ile korozyon arasındaki ilişkide pH derecesinin $10 < pH < 13$ olduğu bölgelerde betonarme donatılarının potansiyel değerine bağlı olarak ya bağışıklık, ya da pasifleşme bölgesinde olduğu Şekil 2. 9'da görülmektedir. Şekil 3.4'de ise demirin pasifleşme grafiği gösterilmektedir.

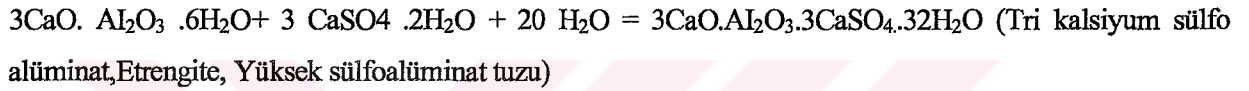


Şekil 3.4 Demir metali için aktif-pasif bölgeler

Şekil 3.4’de verilen, demirin pasifleşme grafiğinde üç bölge mevcuttur. Demir belli bir potansiyele erişinceye kadar (AB) eğrisi boyunca korozyona uğrar. Pasifleşme potansiyeli olan (Epp) değerine erişildiğinde korozyon hızı maksimum bir değer alır. Şekil 3.4’de (BC) eğrisi, oksit filminin oluştuğu bölgeyi, (CD) eğrisi de pasif bölgeyi göstermektedir. Bu bölgede korozyon hızı minimum seviyededir. (DE) eğrisi metal yüzünü kaplayan oksit filminin veya filmin poröz yapısı nedeniyle metal-elektrot arasında temas sağlanmaktadır. Böylece korozyon olayı yeniden başlamaktadır.

3.4.2 Çimento Cinsinin Etkisi

Portland çimento klinkeri içinde ham madde cinsine bağlı olarak değişik oranlarda tri kalsiyum alüminat (C_3A) bulunur. Bu bileşenin hidratasyon reaksiyonu hızı diğer klinker bileşiklerine göre çok yüksektir. Bu nedenle eğer klinker içine hiç alçı taşı katılmaz ise çimento piriz süresi çok kısalmır. Alçı taşı ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ile klinker içinde bulunan tri kalsiyum alüminat arasında aşağıdaki kimyasal reaksiyon meydana gelir.



Bu reaksiyon ile oluşan tri kalsiyum sülf alüminat bileşiği (Candlot tuzu) az çözünen bir tuzdur. Bu tuz çimentonun hidrolizi sırasında klinker partiküllerinin yüzeyinde çökerek geçirimsiz bir kabuk oluşturur ve böylece çimento hidratasyon reaksiyonunun yavaşlamasına neden olur. Beton içinde bulunan kalsiyum klorür de kalsiyum sülfata benzer şekilde tri kalsiyum alüminat ile reaksiyona girerek tri kalsiyum alümino klorür oluşturur. Bu tuz da suda az çözünür. Ancak reaksiyon hızı kalsiyum sülfatta olduğu kadar hızlı değildir.

Klorür iyonlarının tri kalsiyum alüminat ile çözünmeyen bir tuz oluşturması beton içindeki serbest klorür iyonlarının azalmasına neden olacağından .betonarme demirlerinin korozyonu açısından yararlıdır. Ancak bu .reaksiyon beton içine başlangıçta giren klorürler için geçerlidir. Beton bünyesine sonradan difüzlenen klorür iyonlarının hidratasyon reaksiyonunu tamamlamış tri kalsiyum alüminat tarafından bağlanması söz konusu olmaz.

Çimento cinsinin korozyona etkilerinden biri de toplam klorü bünyesinde tutabilme ve klorü bağlama kapasitesidir. Mohammed ve Hamada tarafından farklı çimento çeşitleri ile klorun bağlanma oranları üzerine yapılan çalışmada normal portland çimentosu, (OPC, ordinary portland cement), hafif ısıtılmış portland çimentosu, (MH, moderate heat portland cement), çok erken dayanım kazanan portland çimentosu, (HES, high early strength portland cement), calcium alüminat çimento (AL, Alüminli çimento), A cinsi slag çimento (SCA, slag cements of types A) ve B cinsi slag çimento (SCB, Curufu çimento), B cinsi flay ash çimento (FACB,

Uçucu küllü çimento) türleri kullanılmıştır. (Mohammed,2003).

Bu çalışmanın sonucunda biraz daha farklı bir tür olan özellikle kalsiyum aluminat(AL) cinsi çimentonun klorü bağlama kapasitesi ve bünyesinde tutma oranı diğerlerine göre daha fazladır, dolayısıyla AL cinsi çimentolardan elde edilecek betonun yapısındaki klor oranı da fazla olacağından korozyon riski de fazla olacaktır.Yine bu çalışma ile slag çimentolarda klor tutma kapasitesi azalmakta dolayısıyla korozyon açısından riski azaltıcı bir çimento türü ortaya çıkmaktadır.

3.4.4 Beton Kalitesi

Beton kalitesi artırılarak betonarme demirlerinin korozyon hızı azaltılabilir. Betonun geçirgenliği ve porozitesini azaltmak üzere her şeyden önce iyi bir agrega ve uygun bir granülometri seçilmelidir. Bunun dışında aşağıdaki önlemlerin de alınması gerekir.

Çimento cinsi ve dozajı: Çimento dozajı artırıldığında beton yoğunluğu artar ve porozitesi azalır. Kullanılan çimento cinsi de önemlidir. Puzolanlı çimentolar, beton boşluklarında bulunan serbest kireci silikat bileşikleri halinde bağliyerek beton boşluklarını doldurabilirler. Böylece beton geçirgenliğinde azalma meydana gelir. Ancak puzolanların bu etkisi uzun süre içinde ortaya çıkar. Diğer taraftan puzolanlar serbest kireci bağliyerek beton pH derecesinin düşmesine neden olur. Bu ise, korozyon hızını artırıcı yönde etki gösterir.

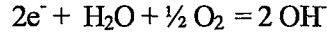
Su / çimento oranı: Beton karışımı içine bazı özel katkı maddeleri katılarak su/çimento oranı düşük beton yapılabilir. Böylece beton içindeki boşluklar minimuma indirilmiş olur. Çimentonun hidratasyonu için kimyasal olarak gerekli su miktarı % 30 dan daha azdır. Pratikte bu oran genellikle % 40-50 arasında alınır. Fazla su betonun boşluklu olmasına neden olur. Ayrıca beton karışımı içine hava sürükleyici katkı maddesi (AEA) katılarak beton içindeki boşlukların kapalı hücreler halinde oluşması sağlanabilir. Böylece beton porozitesinin zararlı etkileri azaltılmış olur. Bu olay kapileritede etkilidir.

Beton dökümü ve kürü : Beton kalıplara yerleştirilirken, vibrasyon yapılarak tam olarak kalıp içine yerleşmesi sağlanmalıdır. Dökümden sonraki ilk günlerde, betonun içinde bulunduğu ortamın sıcaklığı,rüzgar hızı ve bağıl nemi beton kalitesi açısından büyük önem taşır. Dökümden sonra sıcak rüzgarlı ve kuru ortamlarda bekletilen betonlar uygun şekilde kristalleşemediklerinden boşluk yüzdellerinde artış meydana gelir.

Beton Rutubeti: Elektrokimyasal açıdan bakıldığında,beton rutubetinin korozyon üzerine iki şekilde etki yaptığı görülür. Her şeyden önce su korozyon hücrelerinin elektroliti olarak gereklidir. Rutubetin ikinci etkisi, betonun elektriksel direncini azaltıcı, yani iletkenliğini artırıcı olarak rol oynamasıdır, bunun sebebi

Dr. Yücel ÇETİNER
Bilimsel Araştırma ve Uygulama
Mühürü

OH⁻ oluşumdur. İyonik iletkenliğin yüksek oluşu korozyon hücrelerinin gelişmesini kolaylaştırır.



Beton Rezistivitesi : Su/çimento oranı 0,40 ve 0,70 olan betonların su ile doygunluk derecesi arttıkça rezistivitelerinin büyük ölçülerde azalmakta olduğu görülmektedir. Doygun rutubetli bir betonun rezistivitesi 7000 Ohm.cm civarında olduğu halde, bu değer kuru halde bulunan bir betonda daha fazladır. Beton rezistivitesi 50000 Ohm.cm den daha yüksek olması halinde korozyon hızı pratik olarak önemsiz dereceye düşer. Bu koşullarda beton içinde klorür bulunması halinde bile betonarme demirlerinde etkili bir korozyon meydana gelmez. Bu yüzden beton yapının sudan korunması çok önemlidir.

3.5 Beton İçindeki Çelik Donatının Korozyonuna Karşı Alınacak Diğer Önlemler

Donatı demirlerinin korozyonuna neden olan bileşenler beton içine dışardan gelir. O halde porozitesi ve geçirgenliği düşük bir beton yapılarak betonarme demirlerinin korozyonu büyük ölçüde azaltılabilir. Ayrıca beton çevresinden izole edilerek zararlı bileşenlerin özellikle klorür ve oksijenin beton içine difüzyonu tam olarak önlenir. Bu amaçla beton yüzeyleri geçirimsiz bir malzeme ile kaplanır veya boyanır. Beton geçirgenliği azaltmak veya beton yüzeylerini geçirimsiz hale getirmek amacıyla pratikte çeşitli yöntemler uygulanmaktadır.

3.5.1 Beton Geçirgenliğinin Azaltılması ve Yüzey Koruma Yöntemleri

iyi cins bir agregası, düzgün bir granülometri ve düşük bir su/çimento oranı seçilerek beton geçirgenliği azaltılabilir. Döküm sırasında iyi vibrasyon yapılarak ve dökümden sonraki ilk günlerde kür koşulları ayarlanarak betonun geçirimsiz olması sağlanabilir. Beton yüzeylerinin polimer veya plastik ile kaplanması gereklidir.

Beton sertleştikten sonra yüzeylerine monomer halinde bir plastik madde sürülerek orada polimerleşmesi sağlanır. Bu yolla tam geçirimsiz bir tabaka elde edilebilir. Plastik maddenin beton yüzeyine sıkıca yapışmasını sağlamak için kaplamanın uygulanmasından önce , yaygın bir uygulama olan vakum yapılarak beton boşlukları içinde bulunan su buhar halinde uzaklaştırılır veya kuru halde bulunan beton yüzeylerine uygun bir plastik madde yapıştırılarak kaplanır.

Beton yüzeyinin korunması özellikle beton yüzeyindeki gözeneklerin kapatılarak beton içerisine su, oksijen ve özellikle klorür iyonlarının nüfuz etmesinin engellenmesi açısından çok önemlidir . Gani (1992) tarafından araştırılmış olan dört çeşit yüzey koruma yöntemi vardır. Hepsinde asıl amaç betonun yüzeyinin tamamı veya özellikle gözeneklerin olduğu çatlak ve kılcalların bloklanarak kapatılmasıdır.

- 1) Tıkayıcılar/kaplayıcılar kullanmak (sealers/coating): Bu kaplayıcılar su, su buharı, oksijen ve karbondioksit karşı geçirimsiz olmak zorundadırlar. Betonun yüzeyini yağlar veya sentetik reçineler veya epoksi reçineler ile kaplama uygun sonuçların elde edilmesini sağlayabilir. Ayrıca birkaç yılda bir bu kaplamanın yapılması korozyonu önlemek açısından çok verimli olabilir. (Gani,1992)
- 2) Kalın bir tabaka ile çevirme (Rendering): Bu yöntemde betonun yüzeyi çimento içerikli kalın bir harç tabakası ile çevrilir ve betonarme yapı kaplanmış olur. Harç polymer ile de değiştirilebilir. (Gani,1992)
- 3) Gözenek yüzeylerini hidrofobik yapma (Making pore surfaces hydrophobic): Hidrofobik (suyu sevmeyen) yüzeyler betonun silikon bazlı maddeler ile onarımı ile elde edilebilir. Bu maddeler nem ile reaksiyona girerek çimento yüzeyine kimyasal olarak bağlanan silikon reçinelerini oluştururlar. Hidrofobik yüzey, suyun betona gözeneklerden girmesini suyun beton yüzeyindeki yüksek kontak açısını yüzünden önler ve gözeneklere suyun nüfuz etmesini engeller. Hidrofobik yüzey elde etmek için silikon bazlı maddelerin iki önemli sınıfı kullanılır. Birincisi, bir organo-fonksiyonel grubu kapsayan ve betonun gözeneklerine bağ yaparak tıkayan silanlar(silanes), siloksanlar (siloxanes) ve silikonatlardır (siliconates). İkincisi, iki organo-fonksiyonel grup olan ve beton yüzeyi ile bağ oluşturmeyen silikonlardır (silicones). Silikonlar polymer olarak bağlanırlar ve beton üzerinde hidrofobik yüzeylerin oluşmasını sağlarlar. Organo-fonksiyonel grubun daha geniş olması hidrofobik yüzey kaplamasının daha fazla su uzaklaştırıcı etki yapmasını sağlar. (Gani,1992)
- 4) Gözenekleri bloklama (Blocking pores): Bu yöntemde en uygun örnek magnezyum-floro- silikatların çimento ile reaksiyonlarıdır. Magnezyum yerine çinko-floro-silikatlar da kullanılabilir ve bunlar kalsiyum bileşikleriyle çimento içinde reaksiyona girerek çözünmeyen floridleri oluştururlar, böylece gözenekler bloklar halinde bu reaksiyonlar sırasında oluşan silisik acid veya alüminat hidratları tarafından kapatılır. Sodyum ve etil silikat ta bu yöntem için kullanılacak diğer kimyasal maddelerdir. (Gani,1992)

3.5.2 Portland Çimentosu Şerbeti ile Kaplama

Beton sertleştikten bir kaç gün sonra, beton yüzeyleri bir çimento şerbeti ile kaplanır. Çimento şerbeti tam geçirimsiz olmamakla beraber beton içine klorür difüzyon hızını büyük ölçülerde azaltır.

3.5.3 Pas Payının (Örtü Betonu Kalınlığının) Artırılması

Betonarme demirleri üzerindeki beton tabakası kalınlığı (pas payı) ne kadar fazla olursa çelik korozyondan o derece iyi korunmuş olur. Betonarme demirleri genellikle yüzeyden 5,0 - 7,5 cm derine konur. Su altında bulunan bir beton içine difüzlenen klorür konsantrasyonu yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak azalır. Eğer beton atmosferde bulunuyor ise, yüzeye yakın olan bölgede yağmur suları ile yıkanma olacağından bu bölgede klorür konsantrasyonu düşüktür.

3.5.4 Zararlı Klorür Limiti ve Kritik Klor Oranı Tespitinin Yapılması

Beton içinde ne miktarda klorür bulunması halinde betonarme demirlerinde korozyon olayının başlayacağı tartışmalı bir konudur. Bu konuda literatürde farklı değerler bulunmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri Karayolları Laboratuvarlarında yapılan geniş kapsamlı araştırmalarda , beton içerisinde %0,20 'den fazla klorür bulunması halinde betonarme demirlerinin korozyona uğrayacağı ortaya konulmuştur. Bu klorür beton içinde bulunan toplam klorürdür. Bunun yaklaşık olarak % 75' ini suda çözünebilen klorür tuzları oluşturmaktadır. Yukarıda verilmiş olan değerler normal betonlar içindir. Ön gerilmeli betonlar klorür etkisine normal betonlardan daha duyarlıdır. Ön gerilmeli betonlar için maksimum klorür limiti % 0,08 olarak verilmektedir (Koç, 2001). Standartlarda verilmiş olan bu limit değerler çoğu zaman garanti sağlamaz. Çünkü difüzyon yoluyla beton bünyesine giren klorür iyonları beton içinde üniform biçimde dağılmaz. Yüzeyden derine doğru parabolik bir azalma gözlenir. Diğer taraftan beton yapısındaki farklılıklar nedeniyle klorür konsantrasyonu da yer yer farklılık gösterir. Bu farklılık iki betonarme demiri arasında konsantrasyon pili oluşmasına ve bunun sonucu olarak korozyon hızının artmasına neden olur. Yüzeye yakın olan betonarme demirleri rutubetli ve klorürlü halde iken, daha derinde olan demir kuru ve klorürsüz durumda olabilir.

Bazı halde de beton içinde yukarıda verilen limit değerlerin çok üzerinde klorür iyonu bulunmasına rağmen betonarme demirlerinin korozyona uğramadığı görülür. Tam olarak kuru olan betonlarda klorür etkili olmaz. Çünkü korozyon olayının yürütmesi için mutlaka suya ve oksijene ihtiyaç vardır. Yine aynı nedenle sürekli deniz suyu içinde bulunan betonlarda da oksijen yetersizliği sonucu korozyon hızı çok düşüktür. Bu nedenle betonarme demirlerinin korozyonuna yalnızca klorür konsantrasyonu ile karar verilmesi doğru olmaz. Aşağıdaki hususlarında belirlenmesi gerekir.

- Betonun permeabilitesi (geçirgenliği), porozitesi (gözenekliği)
- Beton içindeki klorür iyonunun bağlı olduğu katyon
- Klorürün beton içine pirizden önce veya beton sertleştikten sonra girmiş olduğu
- Beton içinde örneğin sülfat gibi başka iyonların da bulunup bulunmadığı

- Beton içinde bazı bölgelerde klorür konsantrasyon farkının bulunup bulunmadığı
- Beton rutubeti ve pH derecesi

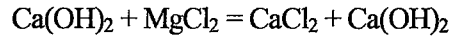
Daha önce açıklandığı üzere, beton pH derecesi düşük olduğu zaman klorür iyonlarının betonarme demirleri üzerine zararlı etkisinde artış olmaktadır. Bu nedenle yalnız klorür konsantrasyonu için limit değer vermek yerine $[Cl^-]/[OH^-]$ molar oranı için limit verilmesinin daha doğru olacağı ileri sürülmektedir. Yapılan deneyler betonarme demirlerinin korozyon hızının $[Cl^-]/[OH^-]$ oranına bağlı olarak değiştiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Kritik klor miktarı da beton içindeki donatı üzerindeki pasif tabakanın bozulmasında ve korozyon riskinin artmasında çok önemli bir etkidir. Çünkü korozyon riski için zararlı olan klorür miktarından daha düşük miktarda klor bulunması tolere edilebilir. Yıllardır yapılan çalışmalarda kritik klorür konsantrasyonu üzerine yapılan değerlendirmelerde farklı araştırmacılar tarafından farklı değerler verilmiştir. Bu sonuçların bazıları Petterson (1992) tarafından aşağıdaki gibi düzenlenmiştir.

Araştırmacı	Kritik Cl^- konsantrasyonu (çimentonun %)	Notlar
Hauseman (1967)	0,06 – 1	pH=12,5 – 13,2
Cady(1967)	0,2 – 0,4	$[Cl^-]$, pH ile değişir.
Matsushita (1980)	0,8	deniz altı tünellerde.
Brown(1989)	0,4	$[Cl^-]$, çimento cinsi ile değişir.
Hansson veSorensen (1989)	0,6 – 1,4	$[Cl^-]$, çimento cinsi, tuzlama (su ile), su / bağlama oranı, karışımlar,vb. ile değişir.
Schiessl ve Raupach (1990)	0,48 – 2,02	$[Cl^-]$, çimento cinsi ve karışımlar ile değişir.

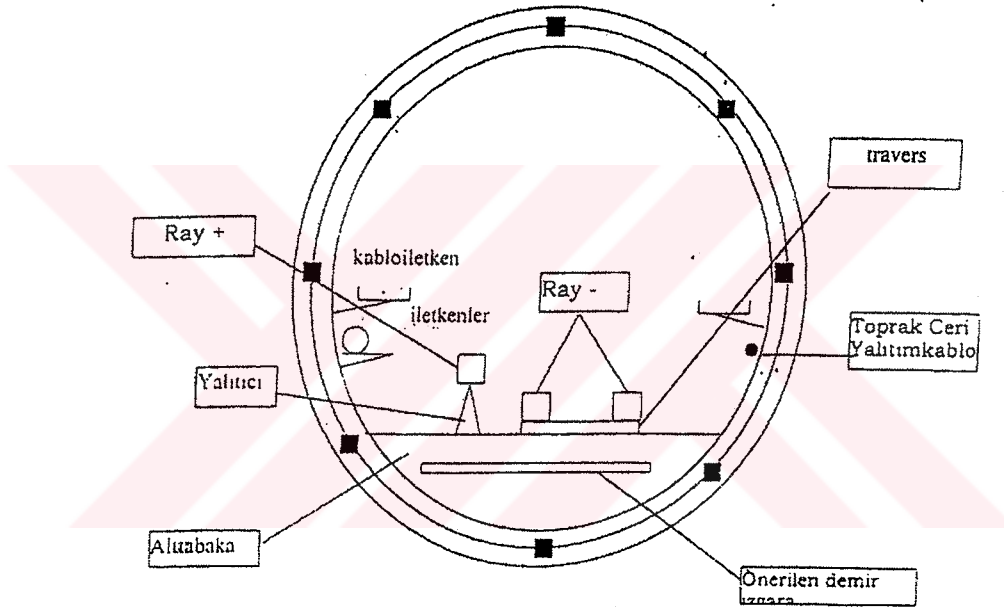
Yapılan çalışmalardan da görüldüğü gibi klorürün bağlanma değeri korozyonun başlaması için tam bir değer değildir ve çeşitli parametrelere bağlıdır.kritik klor miktarını etkileyen bu parametreler; betonun ve ortamın pH değeri, çimento cinsine ve çimento hamuru içindeki klorün kimyasal olarak bağlanmasından sorumlu olan alüminat bileşikleri tri-kalsiyum-alüminat (C_3A) ve tetra-kalsiyum- alüminat ferrit (C_4AF)

miktarları, betonun dökümü sırasında çimentoya katılan katkı maddeleri, tuzlama zamanı ve karbonasyon oranıdır.



4. KAÇAK AKIM KOROZYONU

Yeraltı metro sistemleri de yukarıda bahsettiğimiz gibi beton kalitesindeki ve beton donatının yapımındaki hatalardan dolayı ciddi korozyon tehlikesi ile karşı karşıya kalabilmektedir. Buna rağmen bu tür metro sistemleri 75-100 yıl kullanılabilirlik üzere çok yüksek maliyetler ile ulaşım sorununu halledebilmek için insanların hizmetine sunulmaktadır. Bu yüzden yeraltı metro sistemleri yapım öncesi projelere ve şartnamelere en uygun biçimde beton ve demir kalitesinde inşa edilmelidir. Söz konusu sistemlerde korozyona sebep veren diğer önemli bir sorun da kaçak akım etkisidir, hatta kaçak akımın hem direk çelik donatının korozyonuna, hem de su difüzyonundan oluşacak korozyona etki ettiğini düşünürsek çift katlı bir etkisi olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 4.1 den metro sisteminde tünel yapısı ve tünelin ve kaçak akım etkisinde olan metalik yapıyı görebiliriz.



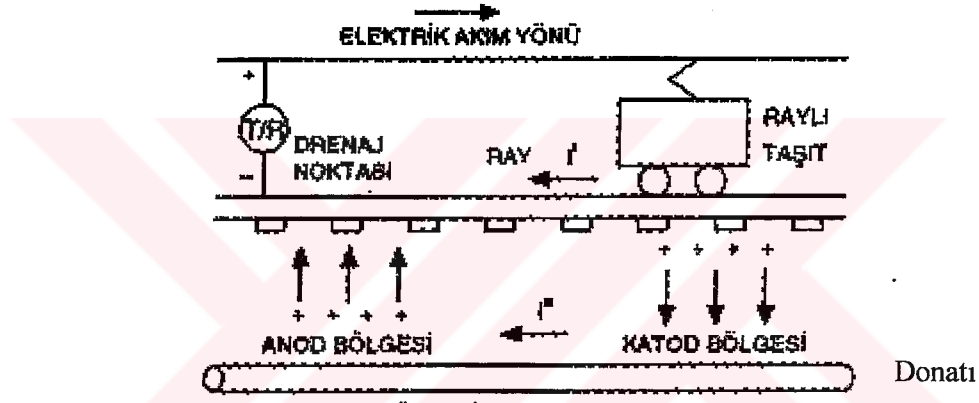
Şekil 4.1 Tünelin ve Kaçak Akım Etkisinde Kalan Metalik Kısımların Şematik Görünümü
(Çizmecioğlu, 2002)

Söz konusu yeraltı transit sistemlerde yüksek voltajlı doğru akım kullanılmakta ve raylar doğru akım sisteminin (-) ucuna bağlanmaktadır. Böyle sistemlerden zemine ve dolayısıyla çelik donatıya kaçan akımlar betonarme tünel yapı ve çevre yapılar üzerinde korozyona sebep olmaktadır. Söz konusu sistemlerde kaçak akımı azaltmak için ciddi önlemler alınmış olmakla beraber, bu tedbirler daha çok akım kaybını azaltmayı hedef almış bulunmaktadır. Fakat çelik donatının ve çevre yapıların korozyonunu önleyici tedbirlerinin de alınması gerekmektedir. Genel olarak alınması gereken

önlemler şunlardır;

- Raylı sistemin rayının oturduğu zeminde rezistivite değerlerinin ölçülerek kaydedilmesi.
- Söz konusu raylı sistem ile kesişen veya bunların yakınından geçen yapıların belirlenmesi ve bir plan üzerinde işlenmesi
- Bu sistemlere akım uygulanan istasyonlarda kaçak akım bağı konulmasına imkan veren sistemlerin konulması
- Ray hattı boyunca kritik noktalara kaçak akım koruma istasyonlarının montajı

4.1 Kaçak Akım Etkisi



Şekil 4.2 Raylı taşıt aracından yayılan kaçak akımların donatıya intikali ve donatıdan çıkarak korozyon bölgesi oluşturması.

Doğru akım ile çalışan bu tür taşıma sistemlerinde 750 volt ve yaklaşık olarak 1500 amperlik akım mevcuttur ve dolayısıyla yeraltı akım kaçağı olmaktadır. Zemin rezistivitesinin düşük oluşu akım kaçağının artmasına neden olur. Diğer taraftan yeraltı treni gibi fazla enerji harcayan sistemlerde yüksek voltajlı doğru akım kullanılması gerekir. Yüksek voltaj da kaçak akımı artırıcı etki yapar.

Zemine kaçan akımlar en kısa yoldan (en az dirençli yoldan) devreyi tamamlamak ister. Çevre de iletkenliği yüksek olan metalik yapıların bulunması kaçak akımlar için uygun ortam oluşturmaktadır. Doğru akım ile çalışan bir yeraltı treninde kaçak akımların izlediği yol Şekil 4.2 'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere trafonun (-) ucu raya bağlanmıştır. Tren hareket ettikçe kablo ile ray arasında devreyi kapatarak, akımın ray üzerinden trafoya dönmesini sağlar.

Yüksek voltaj ve akım izolasyon ne olursa olsun zemine akım kaçacağını önlemez. Bu kaçan akım zemin içinde hareket ederek tekrar T/R ünitesinin orada bir diyot yardımıyla toplanmaktadır. Kaçak akımın donatıya girdiği bölgede korozyon oluşmaz. Tren hareket ettikçe kaçak akımların zemine girdiği bölge değişir. Korozyon sorunu kaçak akımın donatıyı terk ettiği bölgelerde izlenir.

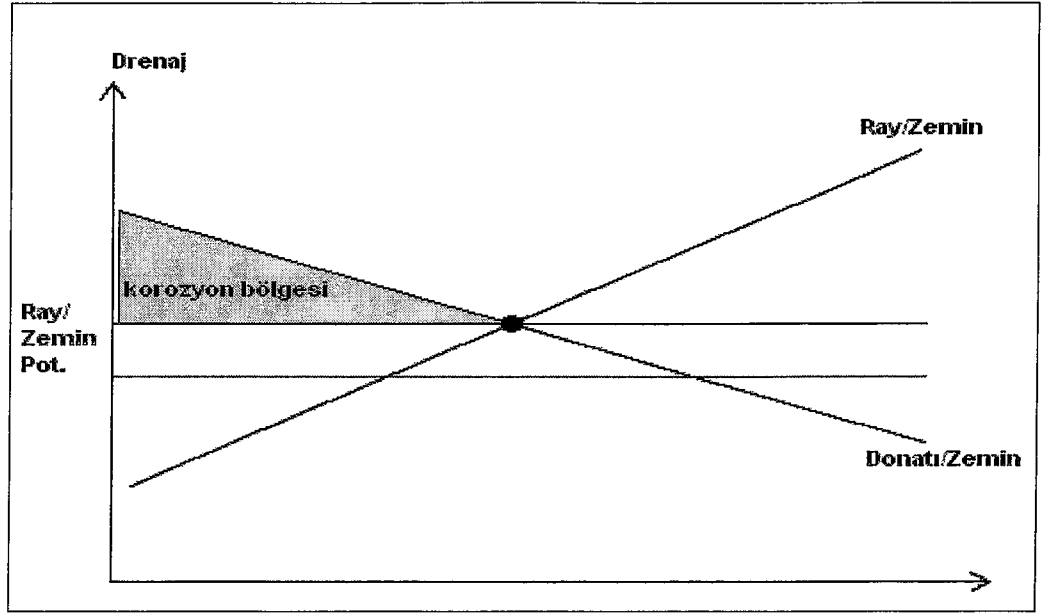
Kaçak akımların çelik donatı bünyesine giriş ve çıkış durumlarında çelik donatı boyunca üç ayrı bölge oluşur.

1. Anodik Bölge : Raylı sisteme ait doğru akımın besleme istasyonu yakınında çelik donatıya giren kaçak akımın donatıyı terk edeceği ve donatının korozyona uğrayacağı bölgedir. Anodik bölge, raylı taşıt sistemine ait doğru akımın negatif kutbunun raya bağlandığı bölgede çelik donatı üzerinde meydana gelmektedir.
2. Anodik veya Katodik Bölge : Anodik bölgenin hemen arkasında bir bölgedir ki, çelik donatıdaki kaçak akımlar, raylı taşıtın bulunduğu noktaya göre ya donatıyı terk etmekte, ya da donatı bünyesine girmektedir.
3. Katodik Bölge : Kaçak akımın sürekli olarak donatıya girdiği bölgedir. Raylı sistemin sonuna doğru olan bölgedir ki, kaçak akımlar donatıyı korurlar.

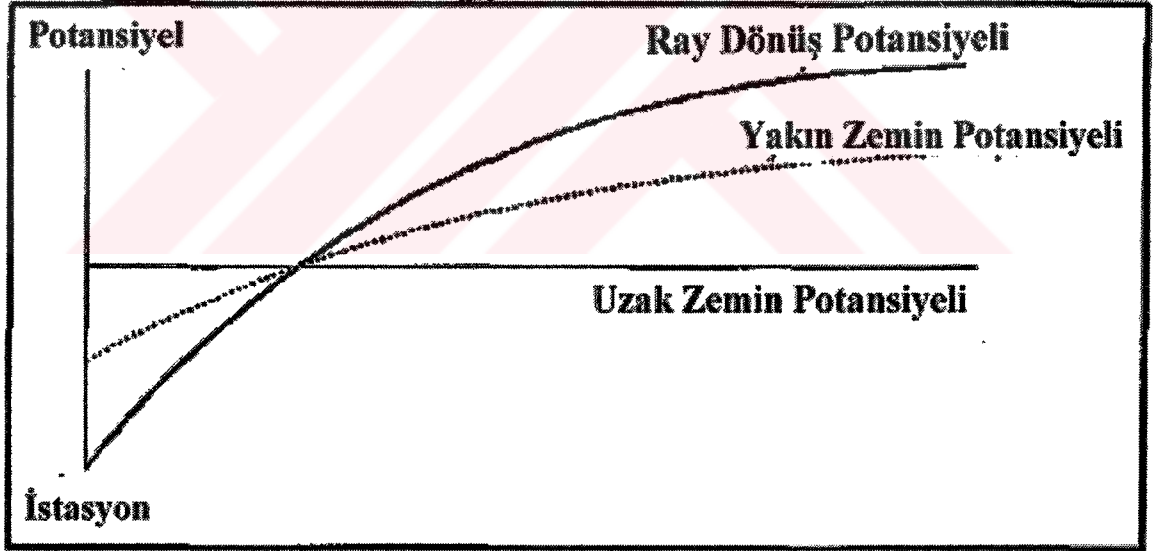
Şekil 4.2’de metro hattında seyreden raylı taşıtın yaydığı kaçak akımın donatı üzerinde oluşturduğu potansiyelde akım şiddeti dağılımı görülmektedir. Herhangi bir akım direnaji olmadığı takdirde, kaçak akım besleme noktası civarında donatıdan betona geçerek tekrar raylara dönmekte ve donatının korozyonuna yol açmaktadır.

Trenin bulunduğu bölgelerde kaçak akım nedeniyle zemin potansiyeli pozitif yönde artar . kaçak akım nedeniyle zemin potansiyelinde , trenin bulunduğu yerin akım uygulama istasyonuna uzaklığına göre değişim olur. Şekil 4.3 trenin hareketi ile ray/zemin potansiyelinin ve donatı/ zemin potansiyelinin mesafeye göre değişimi görülmektedir.

Tren akım uygulanan noktadan ne derece uzakta ise , akım geri dönüş direncinin yüksekliğinden dolayı ray ve zemin ona yakın olan zemin potansiyelinde o derece (+) yönde artış olur. Akım uygulanan istasyon civarında ise zemin potansiyelinde (-) yönde sapma olur. bu potansiyel farkı beton içindeki donatı üzerinde 1 volt dan daha büyük bir voltaj farkı oluşturur.

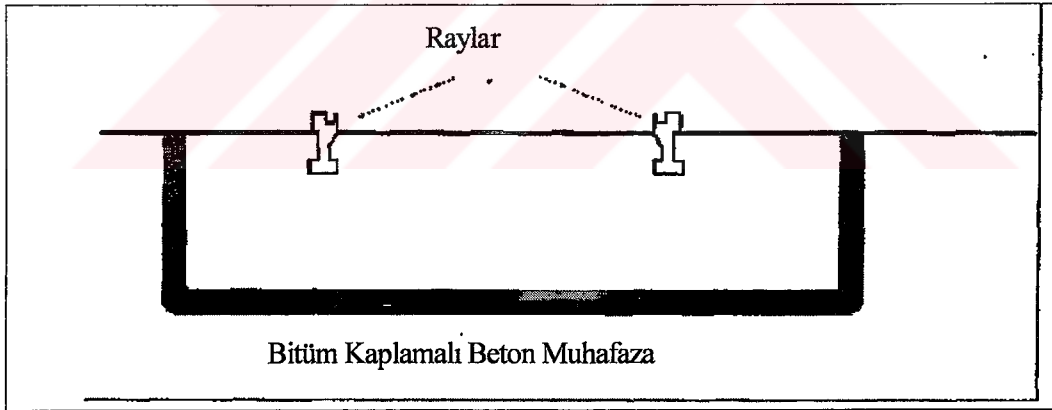


Şekil 4.3 Ray/Zemin ve Donatı/Zemin potansiyellerinin mesafeye göre değişimi



Şekil 4.4 Trenin hareketi ile ray/zemin potansiyelinin mesafeye göre değişimi (Koç, 1998)

Bu nedenle akım daha negatif olan donatıya girer ve donatı üzerinden akım uygulanan noktaya doğru akar. Donatı üzerinde izole flanş bulunması veya donatı hattının tren yolundan ayrılması halinde akım tekrar zemine geçerek yoluna devam eder. Bu durum kaçak akım korozyonunun şiddetini değil ancak yerini değiştirir. Normal bir işletmede bir çok trafo istasyonu ve hat üzerinde aynı anda birkaç tren bulunabilir.trenler sürekli olarak akım çeker. Ancak, kaçak akım trenin geçtiği bölgede olur. Yani, tren izolasyonun kötü olduğu ve (-) kutbun olduğu drenaj noktalarından geçerken kaçak akım donatıya girebilir. Bu nedenle bu tip kaçak akım korozyonları periyodik bir değişim gösterir. Donatı hattı üzerinde bulunan bir ölçüm istasyonunda ray/zemin potansiyelinin değişimi zamana göre Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Elektrikli trenden akım kaçağı , raylardan zemine geçiş yoluyla gerçekleştiği için, akım kaçağını önlemek için rayın oturduğu tabanı Şekil 4.5'de olduğu gibi izole etmek gerekmektedir.Buna rağmen akım kaçakları tam olarak önlenemez.raylar elektriksel iletkenliği sağlamak amacıyla kablo kaynak edilerek birbirlerine bağlanmıştır. Bu bağlantılar raylar direncini artırır ki buda istenmeyen bir durumdur.hatta bazı hallerde raylar arasındaki bu bağlarda kopma meydana gelebilir ve ray direnci dolayısıyla kaçak akımlar artabilir.



Şekil 4.5 Rayların izolasyonu (Koç, 1998)

Şekil 4.5 'teki rayların izolasyonu yer üstü tramvayındaki rayların izolasyonu içindir ve yeraltı metrolarında rayların izolasyonu biraz daha farklıdır.

4.1.1 Kaçak Akımların Sebepleri

Genel olarak, kaçak akım yeraltı raylı sistemlerinde kaçınılmaz bir sonuçtur, çünkü doğru akım (dc) ile yüksek potansiyel farklarının olduğu düşünülürse amaç bu kaçak akımı minimuma indirmek ve bu akımı sistemde elektriksel sürekliliği sağlayarak bir noktada toplamaktır. Yapmış olduğumuz araştırmada kaçak akımın miktarının yüksek olmasının en önemli sebeplerinden birinin izolasyon eksikliği olduğunu gördük ve Şekil 4.5’de görüldüğü gibi özellikle yüksek akımın geçtiği ray sisteminin beton blok ile arasındaki ve beton bloğun zemin ile arasındaki izolasyon sisteminin akım geçişini tam olarak önlemesi gerekmektedir. Eğer burada bir izolasyon sorunu varsa kaçak akım miktarı yüksek olur ve korozyon riskide artar. Ayrıca taşıyıcı ray üzerinde oluşacak direnç(korozyondan veya ray bağlantı yerlerindeki kaynağın direnç oluşturması sonucu olabilir) kaçak akımı arttıran diğer önemli bir sebeptir. Elektriksel sürekliliğin olması için rayın iletkenliğinin yüksek olması ve sürekli yapılacak ölçümlerle bunun tespit edilmesi gerekmektedir. Ray iletkenliğinin düşük olması nasıl kaçak akımı arttırıyorsa , beton yapının elektriksel özgül direncinin düşük olması, dolayısıyla betonun iletkenliğinin yüksek olması da kaçak akımı arttırıcı diğer bir sebeptir. Bu yüzden beton dökülürken su geçirimsiz olmasına ve özgül direnci yüksek bir beton yapı oluşturulmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Sistemde su difüzyonunun olması ve suyun iyi bir şekilde drene edilmemesi sistemde elektriksel iletkenliği artıran ve kaçak akımı körükleyen diğer bir önemli sebeptir. Ayrıca biz kaçak akım ölçümlerinde, sabah vakti kaçak akım miktarının yüksek değerlerde olduğunu gördük ve metro sisteminde buharlaşan suyun sabah havanın soğumasıyla yoğunlaşarak ray üzerinde bir su filmi oluşturması ve dolayısıyla raylardan sabah vaktinde raylı sistem çalışmaya başlayınca zemine kaçan akımın miktarının arttığı gözlenmiştir.

4.1.2 Kaçak Akımların Ölçüm ve Kontrolü

Raylı sistemlerden kaynaklanan kaçak akımların ölçülmesi ve bu kaçak akımın çelik donatı üzerindeki etkisinin kontrol altına alınması oldukça zor bir konudur. Tren hattını kesen, tren hattına paralel giden çelik donatının değişik şiddetlerde kaçak akım korozyonuna maruz kalması söz konusudur. Çelik donatı hattının kaplamasız veya zayıf kaplamalı oluşu, kaçak akımların donatıya daha kolay girmesine neden olur. İyi kaplanmış çelik donatı hatlarında birim akım başına donatı/zemin potansiyelinde görülen değişim kaplamasız donatılara oranla daha büyüktür.

Kaçak akımın etkisiyle donatı/zemin potansiyeli pozitif yöne doğru kayar. Pozitif kayma, kaçak akımların donatıya girmekte olduğunu ifade eder. Donatıya giren kaçak akım şiddeti deneysel olarak ölçülebilir. Bu ölçümün temel ilkesi, uzunluğu ve direnci bilinen bir donatı parçası üzerinde potansiyel düşüşün ölçülmesine dayanır. Bataryadan belli bir miktar akım uygulayarak donatı ve zemin arasındaki potansiyel farkı okunur. Ohm kanunu gereğince devre direnci hesaplanır . Bu direnç kullanılarak, voltmetre için bir düzeltme faktörü belirlenir. Kaçak akım şiddetini ölçmek için batarya devresi açık durumda iken donatı hattında bulunan iki nokta arasındaki potansiyel düşüşü voltmetreden okunur. Belirli uzunluktaki donatının çap ve et kalınlığı bilindiğine göre uzunlamasına direnci hesap edilir. Sonra bu potansiyel farkı donatı parçasının direncine bölünerek donatı üzerinden geçen akım hesaplanır.

En şiddetli korozyon olayı, tren hattına paralel giden ve trafo istasyonu yakınından geçen donatı üzerinde görülür. Diğer hallerde donatıya giren kaçak akım miktarı az olduğu gibi, akımın donatıyı terk etmiş olduğu bölgeler çok geniş bir alanda gerçekleştiği için korozyon tehlikesi nispeten daha az olacaktır.

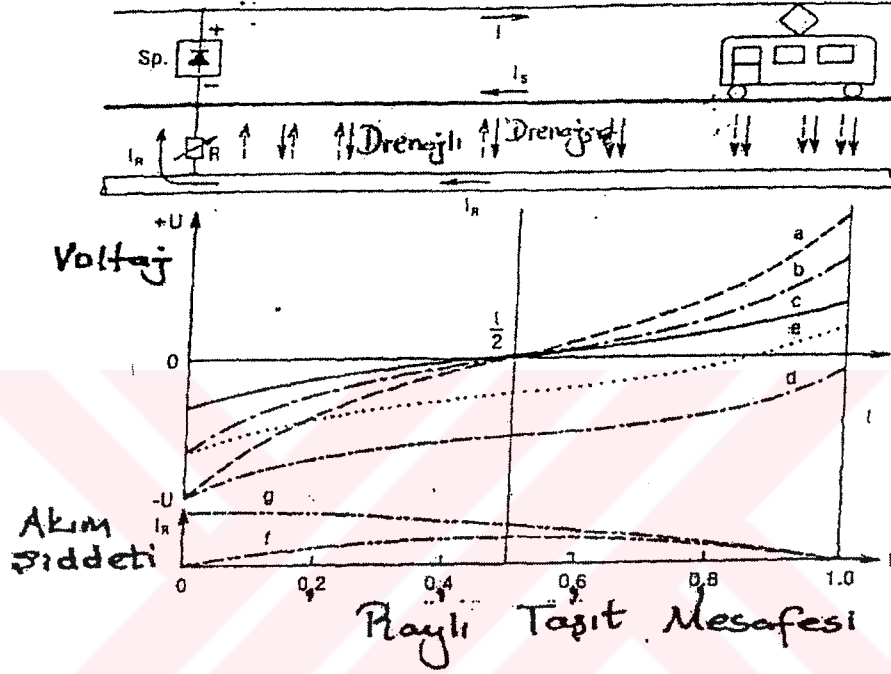
4.1.3 Kaçak Akım İçin Önlemler

Yeraltı raylı sistemlerinde kaçak akım sebebiyle oluşan çelik donatı korozyonunu önlemek için herşeyden önce çelik donatı üzerinde potansiyel ve akım ölçümleri yapılarak kaçak akımların donatıya girdiği ve donatıyı terkettiği bölgelerin kesin olarak belirlenmesi gerekmektedir. Tabi ki öncelikle kaçak akımların donatıya girmesi önlenmelidir. Özellikle ray hattı ile donatı arasında kaçak akımın donatıya girdiği bölgeler tam olarak belirlenebilir ve bu bölgelerde donatıya otomatik potansiyel kontrollü katodik koruma uygulanarak periyodik olarak etki yapan kaçak akımların donatıya girmesi önlenabilir.

Şekil 4.6’da gösterildiği gibi trenin geçtiği anlarda donatı hattı ile zemin potansiyel arasındaki büyük potansiyel farkı yüzünden kaçak akım donatıya geçer.

Kaçak akım bölgeleri katodik olarak korunarak bu potansiyel farkının doğması önlenabilir. Donatı yakınına konan sabit bir referans elektrot ile donatı potansiyeli sürekli kontrol edilir . trenin geçtiği anda trafodan çekilen akım otomatik olarak artar ve donatıya girmiş olan kaçak akımların T/R ünitesinin (-) ucuna girmesi sağlanır. Daha öncede belirtildiği üzere kaçak akımın donatıya girdiği değil, donatıyı terkettiği bölge korozyon riskinin olduğu ve kontrol altına alınması gereken bölgedir. Bu bölgeden akım çıkışı , donatı ile trafo ünitesinin (-) ucu (veya ray) arasına metalik bir iletken bağı yapılarak önlenabilir. Donatıda biriken akım bu metalik bağ üzerinde geri dönüş yapacak ve korozyon riski azaltılmış olacaktır. Raylı sistemlerde kaçak akım yalnız trenin geçtiği anlarda ortaya

çıkar ve diğer zamanlarda kaçak akım söz konusu değildir. Bunun ötesinde donatı üzerinde toplanan kaçak akımların şiddeti trenin ray üzerinde hareketi sırasında, donatı kaplamasına bağlı olarak sürekli değişir ve tren trafo ünitesine yaklaştıkça artar. Bu nedenle bağ drenajının de akım şiddetine bağlı olarak değişmesi gerekir. Aksi halde trenin hareket etmediği saatlerde donatıya trafodan gereksiz yere akım uygulanmış olur.



Şekil 4.6 Raylı taşıt aracından yayılan kaçak akımların donatıya geçişi ve donatıdan çıkarak korozyon bölgesi oluşturmamasının kaçak akım drenajı ile önlenmesi. (Baeckmann, Prinz, 1990)

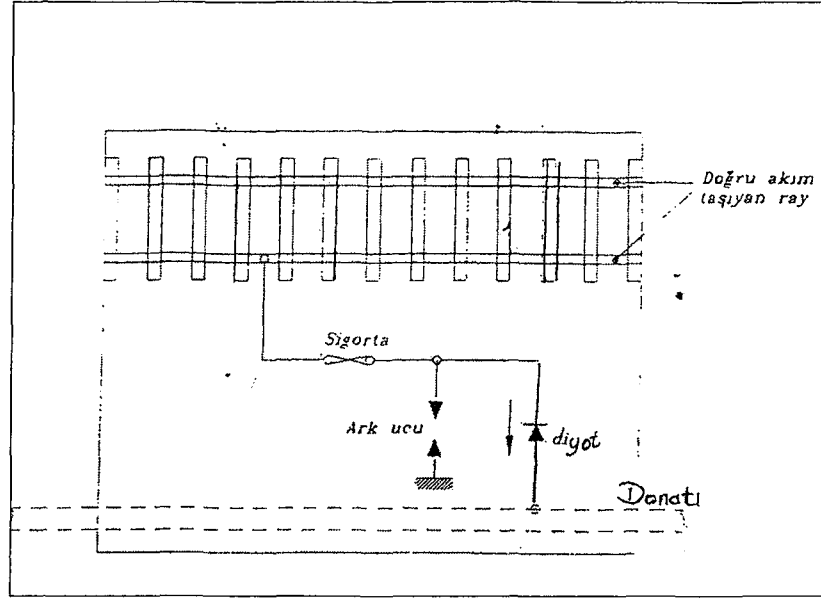
- a) Taşıyıcı rayların polarize olması
- b) Ray- zemin arası voltaj
- c) Kaçak akım drenajı olmaksızın donatının polarize olması
- d) Dirençsiz kaçak akım drenajlı donatının polarize olması
- e) R Dirençli kaçak akım drenajlı donatının polarize olması
- f) Kaçak akım drenajsız donatıdaki akım şiddeti dağılımı
- g) Kaçak akım drenajlı donatıdaki akım şiddeti dağılımı

Kaçak akımların önlenmesi için diğer bir yol da, rayların her iki yanına kaçak akımların kolayca girebileceği metal plakaların (topraklama) konulmasıdır. Bu plakalar kaçak akımları toplar ve topraklamaya taşır.

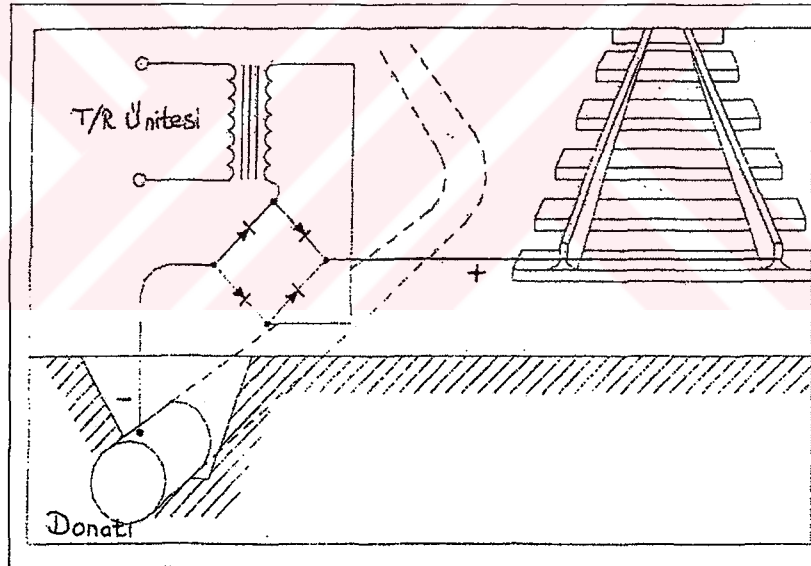
Ayrıca ray altındaki izolasyonun sürekli kontrolü, ray ve beton yapıdaki nem oranının kontrolü, ray direncinin düzenli olarak testi gibi kontrollerde kaçak akımı kontrol altında tutmak için gerekli önlemlerdir.

4.1.4 Diyot ve Trafo/Redresör Uygulaması ile Kaçak Akımın Drene Edilmesi

Kaçak akımların besleme noktası civarında oluşturduğu olumsuz etkiyi azaltmak için raylı sistem ile metalik yapı arasına Şekil 4.7'deki gibi bir diyot ile polarize drenaj monte edilir. Böylece çelik donatı ile kaçak akım kaynağı arasında diyotla yapılan bağ vasıtasıyla doğrudan doğruya drenaj elde edilir. Yani çelik donatı bünyesinde kaçak akımlar, donatı üzerinden beton bünyesine geçmemiş ve dolayısıyla çelik donatının herhangi bir korozyon riski önlenmiş olmaktadır. Genellikle bu tür uygulamalarda çelik donatıdaki bütün kaçak akım ,diyot üzerinden döndürülmeyebilir. Böyle kaynaklı drenaj sistemleri Şekil 4.8'de negatif ucu kaçak akımı dönüş hattına yani çelik donatıya, pozitif ucu ise raya bağlanmak üzere dış akım kaynaklı drenaj sistemleriyle korunmuş olur. Kaçak akım etkisindeki kalan donatıya korozyondan korunmak için uygulanan diğer bir yöntem de, sadece tren geçtiği anda (rayın belli bir negatif potansiyel kazandığı anda çalışan T/R sistemi ile) akım uygulanmasıdır. Bu sistem Şekil 4.8'da şematik olarak görülmektedir. Bu sistem ancak ray potansiyeli belli bir değere erişirse devreye girer. Kaçak akım etkisinde kalan metalik yapıyı korozyondan korumak için uygulanan bu yöntem de, yalnız raylı taşıt geçtiği anda rayın belli bir negatif potansiyel kazandığı anda çalışan doğru akım kaynağı ile gerekli olan akımın uygulanmasıdır.



Şekil 4.7 Diyot Sistemi ile Kaçak Akım Drenajı (Çizmecioğlu, 2003)

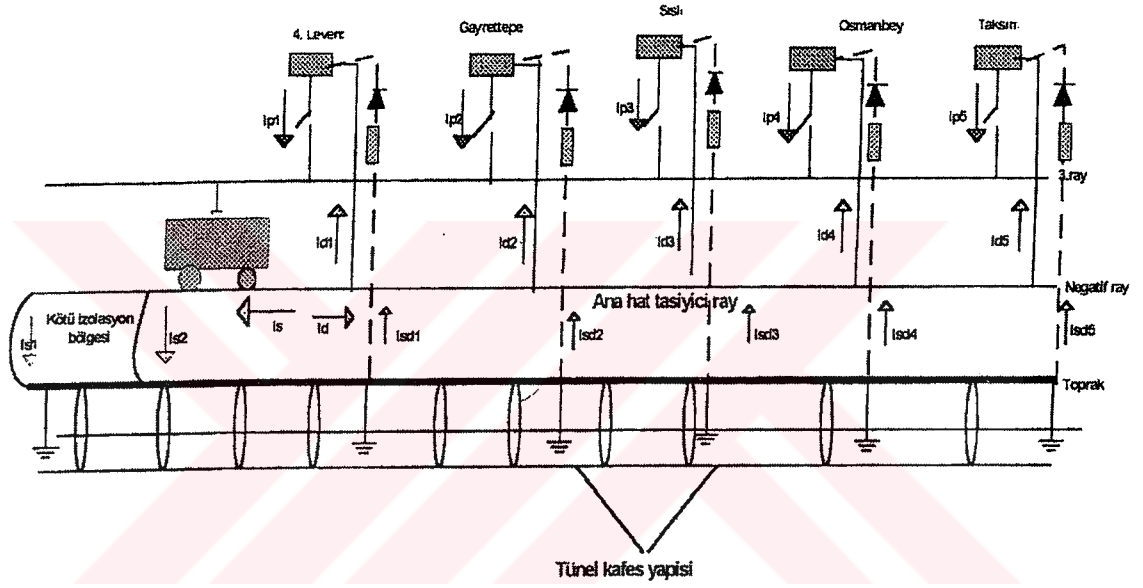


Şekil 4.8 Kaçak Akımların Etkisinin Doğru Akım Kaynağı ile Önlenmesi (Çizmecioğlu, 2003)

5. DENEY ÇALIŞMALARI

5.1 Metroda Yapılan Deneysel Çalışmalar

Araştırması yapılan metro 8580 mt. uzunluğunda birbirine paralel çift boru şeklinde betonarme yapıdan ibarettir. Bu yapı boyunca 6 adet yolcu istasyonu mevcuttur ve 5 adet cer gücü trafo istasyonundan doğru akım beslemesi yapılmaktadır. Beklenen akımın negatif kutbu direnaja noktasında 1. ve 2. taşıyıcı rayla, pozitif kutbu ise 3. rayla irtibatlıdır. Şekil 5.1’de metro tünelinin ve elektrik besleme sisteminin yapısı görülmektedir.



Şekil 5.1 Metro Besleme Sistemi ve Kaçak Akım Devresi

5.1.1 Drenaj Akımının Ölçülmesi

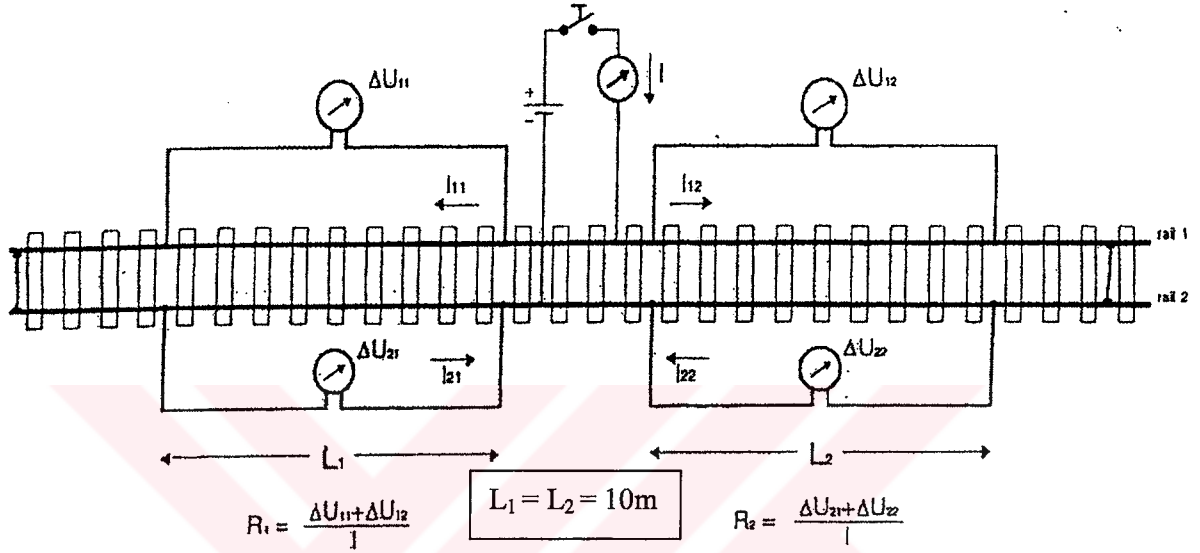
Hat üzerinde 4 vagonlu 2 tren hareket ederken kaçak akım miktarının trenlerin mevkiine bağlı olarak değiştiği 200 mA'den itibaren 300 mA, 400mA, 500mA, 700mA ve 800 mA civarında salınım yaptığı görüldü. Raylı taşıtın Levent'ten Gayrettepe'ye doğru giderken 2300 mA, Gayrettepe'den Levent istikametine doğru giderken 1500 mA değerinin okunduğu görüldü. Son olarak, raylı taşıtın 4. Levent'te makas bölgesi civarında iken 3900 mA'lik en yüksek değeri gösterdiği okunmuştur. Derhal bu bölgeye gidildi, burada hat üzerinde dolaşıldı, gerekli incelemeler yapıldı ve aşağıdaki tespitler değerlendirildi.

1. Bu bölge, negatif kutbun raylara bağlandığı bir drenaj bölgesidir.
2. Bu bölgede yalıtım yetersizliği mevcuttur. Travers altında izolasyonu bozan beton parçacıkları gözlemlenmiştir.
3. Metal profil zemine temas etmektedir.(Bakınız; Fotoğraf Ek 3.1)
4. Taşıyıcı rayla altı ve travers altı izolasyon malzemesi yüzeyleri tamamen kaplamadığından bu bölgeye girebilecek beton parçacığı, toz,pas vb.malzemeler ray yalıtımını bozmaktadır.(Bakınız; Fotoğraf Ek 3.2 ve Ek 3.3)
5. Metalik kapak travers ile temas ederek izolasyonu bozmaktadır. (Bakınız; Fotoğraf Ek 3.4)
6. Betonda çatlaklar ve yarıklar gözlemlenmiştir ve bağlantı kısmında gözüken donatı çeliğinde paslanma belirtileri görülmüştür.
7. Rayların yüzeyinde pas katmanları görülmüştür.

En yüksek kaçak akım şiddeti 10,3 A'dır. Bu değere sabah trafiğinde ve 3 raylı taşıtın hat üzerinde olduğu bir sırada erişilmiştir. Bunun anlamı, bu bölgede yalıtım yetersizliği mevcut olduğunu göstermektedir.. Sabah trafiğindeki en yüksek drenaj akımının akşam trafiğinden yüksek olmasının sebebi sabah saatlerinde ray üzerinde yoğunlaşan su filminin kaçak akımı arttırması olabilir. Yalıtım yetersizliği bulunan bölgede raylı taşıt sayısı kaçak akım miktarını etkilemektedir. Bu sonuç yalıtım yetersizliğinin önemli bir faktör olduğunu göstermektedir.

5.1.2 Ray Direncinin Ölçülmesi

Şekil 5.2’de 10 m.’lik ray uzunluğu için EN 50122-2; 1998’e göre ray direncinin standart ölçüm metodu görülmektedir. 4 farklı noktada (kuzey-güney) 16 adet ray direnci ölçümü sonucunda şartnamelerde öngörülen 35 m.ohm/km değerlerine yakın ve 34,5-43,6 m.ohm/km aralığında değerler bulunmuştur.



Şekil 5.2 Ray Direncinin Standart Ölçüm Metodu (Çizmecioğlu,2002)

Ölçüm No: 1

Ölçüm Yeri: Kuzey Bölgesi

Ölçüm Tarihi: 05/06/2002

Ray Direnci (mΩ/km)

Ölçüm No	I	Ray 1	Ray 2
1.Ölçüm	893 A	42,2 mΩ/km	42,6 mΩ/km
2.Ölçüm	793 A	43,6 mΩ/km	43,1 mΩ/km
		$R_{ort} = 42,9 \text{ m}\Omega/\text{km}$	$R_{ort} = 42,9 \text{ m}\Omega/\text{km}$

Ölçüm No: 2

Ölçüm Yeri: Güney Bölgesi

Ölçüm Tarihi: 05/06/2002

Ray Direnci (m Ω /km)

Ölçüm No	I	Ray 1	Ray 2
1.Ölçüm	890 A	34,5 m Ω /km	37,2 m Ω /km
2.Ölçüm	843 A	35,2 m Ω /km	36,5 m Ω /km
		$R_{ort} = 34,9$ m Ω /km	$R_{ort} = 36,9$ m Ω /km

Ölçüm No: 3

Ölçüm Yeri: Orta Bölge

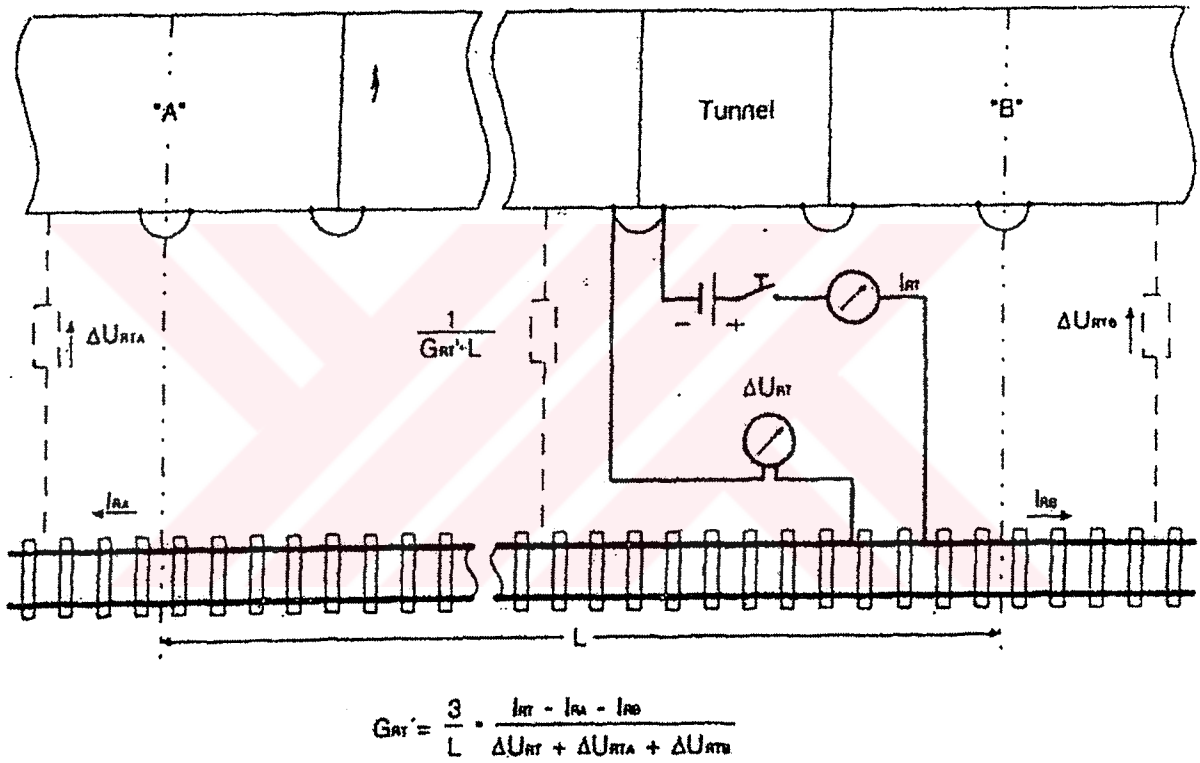
Ölçüm Tarihi: 06/06/2002

Ray Direnci (m Ω /km)

Ölçüm No	I	Ray 1	Ray 2
1.Ölçüm	896 A	35,5 m Ω /km	35,7 m Ω /km
2.Ölçüm	820 A	36,0 m Ω /km	36,3 m Ω /km
3.Ölçüm	800 A	37,5 m Ω /km	37,5 m Ω /km
		$R_{ort} = 36,3$ m Ω /km	$R_{ort} = 36,5$ m Ω /km

5.1.3 Ray / Zemin Direncinin Ölçülmesi

Şekil 5.3’de 1 km.lik ray uzunluğu için EN50122-2; 1998’e göre ray/zemin arası kaçak akım iletkenliğinin standart ölçüm metodu görülmektedir. Kuzey-Orta ve Güney olmak üzere 3 bölgede yapılan ölçümlerde standart olması gereken 150 ohm km. ray zemin direnci değerinin kuzey bölümünde 1. ve 2. Ray için sırası ile 4,36 ohm.km ve 4,10 ohm.km; metronun orta bölümünde 0,803 ohm.km 0,973 ohm.km; güney bölümünde 0,914 ohm.km ve 0,932 ohm.km değerleri ölçülmüştür.



Şekil 5.3 Ray-Tünel arası birim uzunluğun iletkenliğinin St. Ölçüm metodu (Çizmecioğlu,2002)

I_{RT} =Rayda okunan akım

G_{RT} =Ray iletkenliği

ΔU_{RT} =Raylar arası potansiyel farkı

Ölçüm No: 1

Ölçüm Yeri: Kuzey Bölgesi

Ölçüm Tarihi: 05/06/2002

$U_{on} = 3,0 \text{ mV}$	$I = 14,6 \text{ A}$	$\Delta U_{RT} = 12,395 \text{ V}$
$R_{(1.Ray)A} = 42,9 \text{ m}\Omega/\text{km}$	$R_{(1.Ray)B} = 34,9 \text{ m}\Omega/\text{km}$	$\Delta U_{RTA} = 11,675 \text{ V}$
$R_{(2.Ray)A} = 42,9 \text{ m}\Omega/\text{km}$	$R_{(2.Ray)B} = 36,9 \text{ m}\Omega/\text{km}$	$\Delta U_{RTB} = 12,09 \text{ V}$
$U_{RTA.on} = 11,3 \text{ V}$	$U_{RTBon} = 11,73 \text{ V}$	$I_{RTA} = 6,99 \text{ A}$
$U_{RTA.off} = -0,35 \text{ V}$	$U_{RTBoff} = -0,36 \text{ V}$	$I_{RTB} = 6,65 \text{ A}$

$$R_{(1.Ray)} = L(\Delta U_{RT} + \Delta U_{RTA} + \Delta U_{RTB}) / 3(I_{RT} - I_{RTA} - I_{RTB})$$

$$R_{(1.Ray)} = 4,36 \text{ }\Omega.\text{km (ohm.km)}$$

Ölçüm No: 2

Ölçüm Yeri : Orta Bölge

Ölçüm Tarihi: 06/06/2002

$U_{on} = 3,0 \text{ mV}$	$I = 17,6 \text{ A}$	$\Delta U_{RT} = 11,96 \text{ V}$
$R_{(1.Ray)A} = 0,36 \text{ m}\Omega/\text{km}$	$R_{(1.Ray)B} = 0,36 \text{ m}\Omega/\text{km}$	$\Delta U_{RTA} = 11,839 \text{ V}$
$R_{(2.Ray)A} = 0,36 \text{ m}\Omega/\text{km}$	$R_{(2.Ray)B} = 0,36 \text{ m}\Omega/\text{km}$	$\Delta U_{RTB} = 11,897 \text{ V}$
$U_{RTA.on} = 12,119 \text{ V}$	$U_{RTBon} = 12,177 \text{ V}$	$I_{RTA} = 1,11 \text{ A}$
$U_{RTA.off} = -0,280 \text{ V}$	$U_{RTBoff} = -0,280 \text{ V}$	$I_{RTB} = 1,67 \text{ A}$

$$R_{(1.Ray)} = L(\Delta U_{RT} + \Delta U_{RTA} + \Delta U_{RTB}) / 3(I_{RT} - I_{RTA} - I_{RTB})$$

$$R_{(1.Ray)} = 0,803 \text{ }\Omega.\text{km (ohm.km)}$$

Ölçüm No: 3

Ölçüm Yeri : Güney Bölge

Ölçüm Tarihi: 05/06/2002

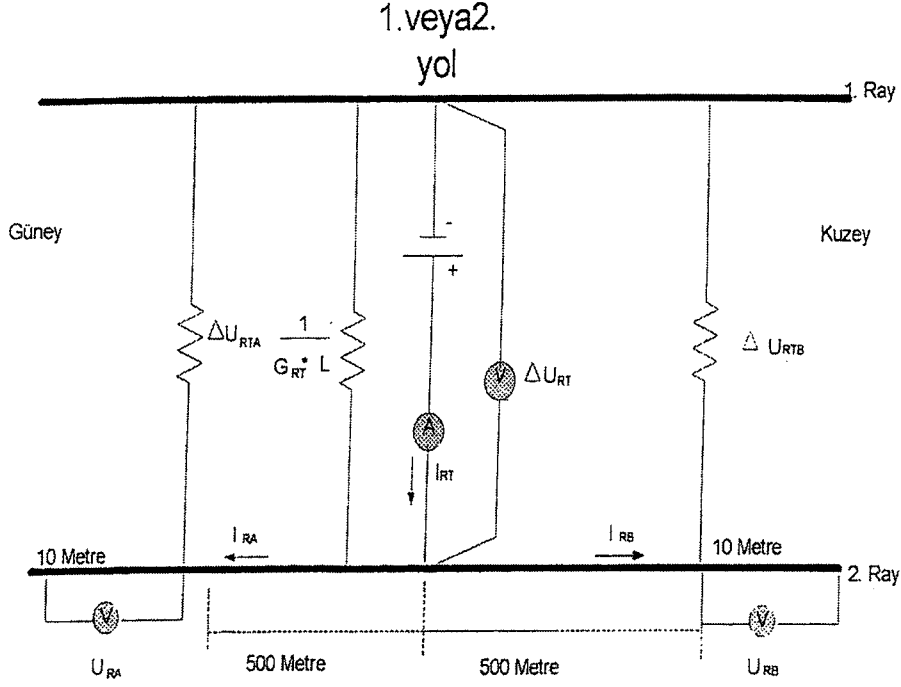
$U_{on} = 3,0 \text{ mV}$	$I = 17,3 \text{ A}$	$\Delta U_{RT} = 12,03 \text{ V}$
$R_{(1.Ray)A} = 0,37 \text{ m}\Omega/\text{km}$	$R_{(1.Ray)B} = 0,36 \text{ m}\Omega/\text{km}$	$\Delta U_{RTA} = 11,912 \text{ V}$
$R_{(2.Ray)A} = 0,37 \text{ m}\Omega/\text{km}$	$R_{(2.Ray)B} = 0,36 \text{ m}\Omega/\text{km}$	$\Delta U_{RTB} = 11,878 \text{ V}$
$U_{RTA.on} = 12,23 \text{ V}$	$U_{RTB.on} = 12,13 \text{ V}$	$I_{RTA} = 1,35 \text{ A}$
$U_{RTA.off} = -0,320 \text{ V}$	$U_{RTB.off} = -0,320 \text{ V}$	$I_{RTB} = 2,78 \text{ A}$

$$R_{(2.Ray)} = L(\Delta U_{RT} + \Delta U_{RTA} + \Delta U_{RTB}) / 3(I_{RT} - I_{RTA} - I_{RTB})$$

$$R_{(2.Ray)} = 0,973 \text{ }\Omega.\text{km (ohm.km)}$$

5.1.4 Ray/Ray Direncinin Ölçülmesi

Şekil 5.4'de raylar arası direncin EN 50122-2;1998'e göre standart ölçüm methodu görülmektedir. Sonuçlar 1. ve 2.yol için sırası ile 0,499 ohm.km ve 0,480 ohm.km dir ve şartnamede olması gereken değer 150 ohm.km dir.



Şekil 5.4 Raylar arası birim uzunluğun iletkenliğinin standart ölçüm metodu(Çizmecioğlu,2002)

Ölçüm No: 1

Ölçüm Yeri : Orta bölge

Ölçüm Tarihi: 07/06/2002

$U_{on} = 3,0 \text{ mV}$	$I = 99,7 \text{ A}$	$\Delta U_{RT} = 5,7 \text{ V}$
$R_{(1.Ray)A} = 0,35 \text{ m}\Omega/\text{km}$	$R_{(1.Ray)B} = 0,35 \text{ m}\Omega/\text{km}$	$\Delta U_{RTA} = 3,96 \text{ V}$
$R_{(2.Ray)A} = 0,35 \text{ m}\Omega/\text{km}$	$R_{(2.Ray)B} = 0,35 \text{ m}\Omega/\text{km}$	$\Delta U_{RTB} = 4,33 \text{ V}$
$U_{RA.on} = 19,2 \text{ V}$	$U_{RB.on} = 12,3 \text{ V}$	$I_{RA} = 54,86 \text{ A}$
$U_{RA.off} = -0,320 \text{ V}$	$U_{RB.off} = -0,320 \text{ V}$	$I_{RB} = 35,14 \text{ A}$

$$R_{(2.yol)} = L(\Delta U_{RT} + \Delta U_{RTA} + \Delta U_{RTB}) / 3(I_{RT} - I_{RA} - I_{RB}) \quad L = 1 \text{ km}$$

$$R_{(2.yol)} = 0,48 \text{ ohm km}$$

5.1.5 Ray/Donatı ve Donatı/Zemin Potansiyelinin Ölçülmesi

Güney drenaj noktasında Bakır/Bakır sülfat referans elektrodu ile alınan donatı/beton potansiyel ölçümlerinden ortalama potansiyel değerinin 0,5 V civarında seyrettiği, ancak 3,3-3,5 V max. değerinin elde edildiği görülmektedir. Uçlar referans elektrodu ile ters bağlandığından alınan değerlerin negatif olduğu, dolayısı ile Donatı/beton potansiyelinin -0,5 V civarında seyrettiği ve donatının korozyon riski taşıdığı söylenebilir. Metro hattında raylı taşıtın çalışmadığı gece saatlerinde Donatı/Beton potansiyeli ölçümünde takriben 1,0 volt değerini ölçülmüştür. ASTM C 876 'a göre gündüz saatlerinde potansiyel değeri donatının korozyon riski taşıdığını; gece saatlerinde ölçülen değer ise donatıda kaçak akım bulunduğunu ifade etmektedir.

Güney Drenaj noktasında 15.05.2002 tarihinde yapılan Ray/Beton potansiyelinin ölçümünde voltmetrenin pozitif kutbu raya negatif kutbu betona temas eden referans elektrotu ile ters bağlandığında, ray/beton potansiyeli tren istasyondan çıkarken negatif potansiyel yönünde, istasyona girerken pozitif potansiyel yönünde değişmektedir. Ölçümlerde tren istasyondan çıkarken -26 V ve -32 V değerleri okunmuştur. Güney peron drenaj noktası civarında Ray/Beton potansiyeli ölçülmüştür ve potansiyel dağılımı en fazla 3,21 V ve ortalama 0,1825 V seviyesindedir.

5.1.6 Betonun Elektrik Özgül Direncinin Ölçümü

Beton elektrik özgül direnci Meger cihazı kullanılarak 4 elektrotlu Wenner yöntemiyle 23.05.2002 tarihinde yapılmıştır. Betonun ıslak olması sebebiyle elektrik özgül direnci Şişli civarında 2341 ohm.cm ve Gayrettepe civarında ise 1005 ohm.cm gibi oldukça düşük bir değer ölçülmüştür ki bu sonuç, betonun kolay ileten bir ortam olduğunu göstermektedir.

5.1.7 Betona Nüfuz Eden Suyun Özellikleri

Betona sızan yeraltı sularının analiz sonucu Çizelge 5.1 de görülmektedir. Metronun farklı yerlerinden alınan su örneklerinin pH, klor, sülfat, klorür, kalsiyum ve magnezyum miktarları analiz edilmiştir. Sonuçlara göre, su pH'nın düşük olması betonun alkaliliğini bozacağı ve klorür ihtiva etmesi sebebi ile donatının pasifliğini azaltarak donatının korozyonunu arttıracığı söylenebilir. Özellikle su analiz sonuçlarına bakarak en azından korozyon riskinin pH oranı düşük klorür miktarı yüksek olan bölgede daha fazla olduğunu söyleyebiliriz.

Çizelge 5.1 Metroya sızan yeraltı suyunun analizi

4.LEVENT	ŞİŞLİ	TAKSİM
PH;7,81	PH;10,39	PH;10,19
Klor;0,0 (Serbest halde)	Klor;0,0 (Serbest halde)	Klor;0,0 (Serbest halde)
Sülfat;158 mg/l	Sülfat;132 mg/l	Sülfat;102 mg/l
Klorür;153 mg/l	Klorür; 84 mg/l	Klorür;115 mg/l
Kalsiyum;108 mg/l	Kalsiyum;8,8 mg/l	Kalsiyum;2,4 mg/l
Magnezyum;28,2 mg/l	Magnezyum;2,9 mg/l	Magnezyum;1,5 mg/l

5.2 Su Deposunda Yapılan DeneySEL Çalışmalar

Kağıthane su deposu 1972 yılında hizmete girmiş ve hala aktif olarak hizmet vermekte olan, 20.000-25000 m³ hacminde ve çift bölmeden oluşan büyük bir su deposudur . İstanbul'un Avrupa Yakasının Sarıyer'den Bayrampaşa'ya kadar hemen hemen 2/3 üne su sağlayan bu dev su deposundaki zamanla korozif etkilere maruz kalması nedeniyle 10.10 2002 de başlattığımız çalışmalar ve sonuçları bu tez çalışmasındaki ikinci deney bölümünü oluşturmaktadır.Genel olarak diğer yapılar gibi betonarme olan bu yapıda, özellikle beton, su ve klor etkisinden dolayı korozyon riski taşıdığı ve çok eski bir yapı olmasından dolayı da korunma olmadığı için bu riskin yapıda olumsuzluklar yarattığının gözlenmesi bu tür yapılarda da çalışmalar yapmamıza neden olmuştur.

5.2.1 Donatı/Beton Potansiyeli Ölçümü

Çalışmalarımızın ilk bölümü deponun farklı yerlerinde donatının zemin olan betona göre potansiyel ölçümleri ile başlamıştır ve ölçüm sonuçları aşağıda görülmektedir. 12.11.2002 tarihinde İSKİ'nin onayı ile yapmış olduğumuz deney çalışmalarının sonuçlarına göre, deponun farklı bölgelerinde farklı donatı/beton potansiyelleri ölçülmüştür. Örneğin,çizelge 5.2'den gördüğümüz gibi 3. ölçüm ve 4. ölçüm sonuçlarında deponun alt bölümü ve temel bölümünde ortalama ölçülen potansiyel değeri -0,35'ün üzerindedir ve bu bölgelerde ASTM C-876-87 standartına göre %90 ihtimalle korozyon riski vardır diyebiliriz, hatta bazı sonuçların özellikle temel bölümünde potansiyel değerinin -0,5 Volt'un üzerinde olmasından dolayı yine standarda göre şiddetli korozyon riski olduğu görülmektedir.Bunun sebebini araştırdığımızda, deponun alt kısımlarının her zaman su ile

dolu olduğu ve bu suyun klorlu olduğu, ayrıca temel kısmının toprak üzerinde olmasından dolayı bu bölümün ek olarak yeraltı su saldırısına da maruz kalması nedeniyle bu bölgelerde korozyon riskinin daha fazla olduğunu fotoğraf 8 ile de söyleyebiliriz.

Çizelge 5.2 Su deposunun betonunun donatı/zemin potansiyeli (Cu/CuSO₄ ref. elektrodu)

Ölçüm no	1.ölçüm (Volt)	2.ölçüm(Volt)	3.ölçüm(Volt)	Ort. (Volt)	ASTM C-876-87 Kor. Riski
1.Tavan bölümünde	-0,285	-0,303	-0,326	-0,304	Korozyon Riski Belirsiz
2.Yan üst bölümde	-0,366	-0,300	-0,289	-0,318	Korozyon Riski Belirsiz
3.Yan alt bölümünde	-0,380	-0,347	-0,359	-0,362	%90 Korozyon Riski
4.Temel bölümünde	-0,495	-0,590	-0,612	-0,566	Şiddetli Korozyon

5.2.2 Beton Elektrik Özgül Direnç Ölçümü

Beton elektrik özgül direnci metroda olduğu gibi Meger cihazı kullanılarak 4 elektrotlu Wenner yöntemiyle 19.11.2002 tarihinde yapılmıştır. Betonun elektrik özgül direnci ölçümü deponun hem sağ hemde sol bölmesi olmak üzere iki defa ölçülmüştür. Ölçümlerde elektrot aralığı 50 cm olarak seçilmiştir. Çizelge 5.3’de ölçüm sonucu bulunan direnç değerlerini göstermektedir ve bu bulunan değerleri formülde yerine koyarsak beton özgül direncini sol bölmede 1422,42 ohm.cm, sağ bölmede 1246,58 ohm.cm olarak buluruz. Bu sonuçlar betonun özgül direncinin olması gereken değerden çok düşük olduğunu gösterir ki TS-5141’e göre depodaki betonun elektriksel olarak iletken olduğunu ve korozif özellik açısından da korozyon riskini taşıdığı sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Sağ bölümde özgül direncin değerinin sol bölüme oranla daha düşük olmasının sebebi de bu bölümde bulunan

klorür miktarının sol bölüme göre 3 kat daha fazla olması olarak açıklanabilir çünkü klorür sağ bölümde donatının pasifliğini daha fazla bozmakta ve betonun özgül direncini daha fazla düşürmektedir.

Çizelge 5.3 Betonun Wenner Yöntemine göre direnç ölçümü

Ölçüm no	1.ölçüm (ohm)	2.ölçüm(ohm)	3.ölçüm (ohm)	Ortalama Direnç (R) Ohm	Ort. Öz direnç (ρ) Ohm.cm	Korozyon Riski
1.Sol bölümünde	4,8	4,2	4,6	4,53	1422,42	Şiddetli Korozyon
2.Sağ bölümünde	3,9	4,0	4,01	3,97	1246,58	Şiddetli Korozyon

Sol bölümde özgül direnç (ρ)

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 4,53 = 1422,42 \text{ ohm.cm}$$

Sağ bölümde özgül direnç (ρ)

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 3,97 = 1246,58 \text{ ohm.cm}$$

ρ =Zeminin özgül direnci(ohm.cm)

a=Elektrot açıklığı(50 cm)

R=Aletten okunan direnç(ohm)

5.2.3 Depodaki Suyun Özellikleri

Çizelge 5.4'ten görüldüğü üzere depodaki su testlerinde metroya göre serbest klor oranının daha fazla miktarda olduğu anlaşılmaktadır.Bunun sebebi depodaki suyun metal oranı biraz daha düşürülerek ve serbest klor oranı artırılarak içme suyu haline getirilmesinden kaynaklanmaktadır, oysa ki metrodaki su oranı yeraltından betona sızan yeraltı sularıdır.Ayrıca deponun sağ bölmesinde serbest haldeki klor oranının sol bölme oranla 3 kat fazla olması bu bölgede korozyonun daha fazla etkili olmasına neden olduğunu beton öz direnç ölçümlerimiz ile de göstermiştik ve dolayısıyla

deney sonuçlarının birbirini desteklediğini bu sonuçtan çıkarabiliriz.

Çizelge 5.4 Su deposundaki suyun analizi

PH;7,25 (SAĞ BÖLMEDE)	PH;7,29 (SOL BÖLMEDE)
Klor;3,0 mg/l (Serbest halde)	Klor;1,0 mg/l (Serbest halde)
Sülfat;108 mg/l	Sülfat;111 mg/l
Klorür;49 mg/l	Klorür; 48 mg/l
Kalsiyum;68,8 mg/l	Kalsiyum;71,2 mg/l
Magnezyum;8,7 mg/l	Magnezyum;13,6 mg/l

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

İstanbul Metrosu ve Kağıthane su deposunda, betonarme donatılar ve diğer metalik yapılar üzerindeki korozyon etkisinin araştırılması ve olumsuz etkilerinin giderilmesine ait önlemlerin belirlenmesine yönelik bu çalışmanın ortaya koyduğu sonuçlar şunlardır;

1.Metro sistemlerinde donatıda korozyon riskinin en önemli sebeblerinden biri kaçak akım olduğu bu çalışmalarda ortaya çıkmıştır ve doğru akımın enerji kaynağı olduğu bu tür sistemlerde kaçak akım için gerekli aşağıdaki önlemler alınmalıdır;

- Ray direnci çok düşük olmalı (EN 50122-2 ; 1998 Avrupa standardına göreölçülen şartnamede öngörülen değer 35 m.ohm/km) ve böylece ray iletkenliği artırılmalıdır. Çalışmalarımızda ray direnci 34,3-43,6 m.ohm/km aralığında bulunduğu için, bu değerın metro için kabul edilebilir olduğunu söylenebilir.Ölçülen değerin şartname değerine göre az yüksek olmasını raylar arasındaki kaynak hatalarından dolayı elektriksel sürekliliğın olmamasına bağlayabiliriz.
- Ray –tünel arası iletkenliğın minimum olması yani ray-zemin direncinin maksimum olması gerektiğinden rayla zeminin arasındaki traverslerin iyi izole edilmesi kaçak akımı azaltacağı için izolasyon pad'inin yüzeyi tamamen kaplaması ve bu bölgeye iletkenliğı arttırıcı toz,toprak,su filmi vb. maddelerin girmesi önlenmelidir.Şartnameye göre ray-zemin direncinin en az 150 ohm.km olması öngörülmesine rağmen metroda bu değır daha düşük ölçülmüştür.Aynı şekilde raylar arası iletkenlikte en az ray- ray direnci 150 ohm.km olacak şekilde standardize edilmiştir.
- Hem kaçak akımın doğru ölçülmesi hemde kaçak akımın toplanması ve kontrollü olarak drene edilmesi için donatıların hem düşey düzlemde bilezik halinde hemde yatay eksene paralel olarak 50 m.'de bir bağ kutusu üzerinden bakır telle birleştirilmesi gerekmektedir.
- Topraklama hasırının trafo istasyonlarının yakınına zemine yerleştirilmesi , kaçak akımların özellikle donatıdan raya dönüş bölgesi olduğu bu bölgelerde kaçak akımların toplanıp, topraklama noktasına taşınmasını sağlayacaktır.
- Diyot sistemli kaçak akım drenajının kaçak akımı önlemekte yetersiz kalmasından dolayı, besleme noktasında T/R ile doğru akım kaynaklı bir koruma yapılması gerekmektedir.

2. Metro ve su deposunda yapılan beton öz direnç ölçümlerinde betonun özgül direncinin değırinin TS-5141'e göre 2000 ohm.cm nin altında olması betonun iyi bir izolasyon tabakası olmayıp kaçak

akımı kolay ileten ve betonun bu özelliğinin donatıda korozyon riski olduğunu göstermektedir.

3.Beton su geçirimli karakterde olduğundan metroda kaçak akım etkisi su difüzyonu ile iletken ortam olan betonarme yapıda kolaylıkla yayılmakta ve besleme noktalarında metalik yapıdan tekrar raya dönebilmektedir. Benzer durum su deposunda, kaçak akımdan değil ama özellikle klorür iyonunun ve ortamın sürekli su bulundurmasının donatı üzerindeki korozif etkisinden dolayı kaynaklanmaktadır. Bu etki, donatısının paslanmasına ve hacimce genişerek betonun çatlamasına ve dolayısıyla su deposundan ciddi su sızıntılarına sebep olmaktadır. (Bakınız: Fotoğraf Ek 4. 1, Ek 4. 2).

4.Su deposunda depo içerisinden betona, metroda yeraltından tünele su difüzyonu olmasından dolayı beton içerisindeki donatının paslanmasını gözlemlemekteyiz ve paslanan donatının özellikle su deposundaki suyun yüksek klor içermesinden dolayı hacimce genişerek betonu çatlatması ve su sızıntısına sebep olduğu görülmektedir. Su deposundaki bu çatlakların yapının gücünü zayıflattığı görülebilmektedir. (Bakınız: Fotoğraf Ek 4. 3, Ek 4.4, Ek 4.5, Ek 4.6)

5.Betona sızan suyun PH değerinin her iki deneyde de yani metro ve su deposunda su analizleri sonucuna göre yaklaşık 7-8 civarında olması ve betonda korozyonun önlenmesi için pH değerinin 12-13 olması gerektiği, çalışma yaptığımız yapılardaki su pH'ının düşük olduğunu ve betonun alkaliliğini bozduğu ve klorür ihtiva etmesi sebebi ile donatının korozyonunu artırdığı söylenebilir.

6.Korozyon tespiti için çok önemli bir standart olan ASTM C-876'ya göre donatı/beton potansiyeli ölçümlerinde özellikle metroda kaçak akım etkisiyle negatif kutbun bulunduğu drenaj noktalarında ve su deposunda su difüzyonu ve klor etkisiyle alt kısım ve temel bölümünde ciddi korozyon riski olduğu hem deneysel sonuçlardan hemde gözlemlerle ortaya çıkmıştır,bu bölgelerde oluşan çatlakları izole bir madde ile tıkararak hemen koruma yöntemi uygulanmalıdır. (Bakınız: Fotoğraf Ek 4.7, Ek 4.8)

Betonarme yapıda korozyon riski açısından klorür iyonun etkisi ve önemi çok fazla olmasına rağmen araştırmalarda beton içerisindeki klor miktarı farklı sınır değerleri verilmektedir. Klorür iyonunun zararlı etkisi bir araştırmada pasif halin devamı için 700 ppm'den (yaklaşık 1,4 kg Cl/1 m³ beton) az olması gerektiği Yalçın (1991) deneylerle ortaya çıkarılmasına rağmen başka bir araştırmada klorür iyonunun zararlı etkisi beton içinde %0,2'den fazla (4,5 kg Cl/1 m³ beton) klorür iyonu bulunması ile söz konusu olabileceği belirtilmektedir. Buradan ortaya çıkan sonuç , betonarme demirlerinin korozyonuna sadece klorür konsantrasyonu değil, aynı zamanda betonun mukavemeti ,geçirimsizliği, boşluk yüzdesi, rutubeti ve pH derecesi gibi parametrelerin etkisinin olmasıdır. Hatta

karbonasyon nedeniyle beton pH derecesinin azalması korozyon açısından tehlikeyi arttırıcı bir rol oynar ve pH derecesinin düşük olması halinde daha az klorün etkili olabileceğini gösterebilir. Bu nedenle yalnız klorür konsantrasyonu için sınır vermek yerine, Cl^- / OH^- iyon konsantrasyon oranının tespiti korozyon riski açısından daha doğru olabilir.

Potansiyel ölçümleri korozyon riskinin belirlenmesi açısından yapılan diğer bir çalışma olmasına rağmen özellikle kaçak akım riskinin olduğu betonarme yapılarda tam doğru sonucu vermeyebilir. Çünkü kaçak akım etkisinden dolayı, ölçümlenen beton/donatı potansiyel sonuçları ASTM C-876-87 standardına göre değerlendirildiği zaman korozyon riski yok gibi değerlendirilen bir yapının aslında korozyon riski taşıyabildiği görülmektedir. Özellikle, kaçak akımdan dolayı donatı /beton potansiyel sonucu pozitif çıkabilmektedir ve eğer bu kaçak akım tespiti yapılmamış ise korozyon riski olan bir yapının korozyon riski taşımadığı gibi yanlış bir sonuç ortaya çıkabilir. Yeraltı metro sistemi gibi kaçak akım riski yüksek yapılarda yapılan çalışmalarda, potansiyel ölçüm sonuçlarının doğru sonuç verebilmesi için tüm donatının irtibatlandırılarak elektriksel sürekliliğin sağlanması sonuçların doğru değerlendirilmesini sağlar. Genellikle yapılan çalışmalar korozyon riskinin tespitine yönelik olarak artarak devam etmektedir, fakat korozyon şiddetinin yoğunluğu veya korozyon miktarının tayinini de çok önemlidir. Burada pas oranının miktar olarak ölçülmesi nitelik analiz açısından gereklidir ve alınacak önlemin boyutunu da tam olarak ortaya çıkaracaktır.

Betonarme yapı içindeki donatı ve betonu ile çok sağlam ve istenilen standartlara uygun olsa bile dış etkenlere karşı önlem alınmadığı (klor, su, oksijen ve karbondioksit saldırılarına ve difüzyonuna karşı) zaman korozyon riski içerebilir. Su deposunda yapılan çalışmalarda özellikle beton öz direnç ölçümlerinde betona elektrotların çakılması sırasında betonun sağlamlığı gözlenmesine rağmen öz direnç sonuçlarının 1422 ve 1246 ohm.cm olarak çıkması ve bu değerlerin standartta belirtilen 3000 ohm.cm'den daha düşük olması dış etkilerin, betonu iyonik olarak daha iletken bir hale getirdiğini ve korozyon riskini arttırdığı görülmektedir. Bu yüzden, bu tür betonarme yapılarda Cl^- iyonlarının saldırısına, O_2 , su ve CO_2 difüzyonuna karşı önlemlerin geliştirilmesi gereklidir. Bu önlemlerden birisi beton yüzeyine koruma amaçlı kaplama yöntemlerinin uygulanmasıdır. Bloklama yapılarak ve beton yüzeyindeki gözenekler sentetik veya epoksi reçineler ile kaplanabilir veya betonun yüzeyindeki gözenekler, betonun silikon bazlı maddelerle onarımıyla hidrofobik (suyu sevmeyen) hale getirilebilir. Ayrıca betonun içindeki donatının beton dökülmeden önce çinko ile kaplanarak paslanmasını önlemek uygulanabilecek diğer bir koruma yöntemidir. Fakat saf çinkonun beton ile reaksiyona girerek hidrojen gazı oluşturmasını önlemek için galvanizlenen donatının kromat çözeltisi ile yıkanması gereklidir.

7. ÖNERİLER VE ÖNLEMLER

Mevcut metro sistemleri, su depoları, beton borular vb. yapılar için betonun karakterini değiştirmek çok kolay değildir fakat yine de bu tarz yapılarda korozyona sebep olacak faktörlerin önüne geçmek ve önlemler almak mevcut yapının ömrünü uzatacaktır. Yapılan tez çalışmasında halen işletilmekte olan metro ve su depolarındaki beton yapılar içerisindeki çelik donatıların paslanması sonucu, pasın 6 misli hacimce genişleme göstermesi ve beton yapıyı çatlatarak hasara yol açması sebebiyle yeni yapılarda önlem ve mevcut yapılarda önlem diye konuyu ele almamız gerekmektedir.

7.1 Yeni Betonarme Yapılarda Alınması Gerekli Önlemler

Yeni yapılar için alınması gerekli önlemler şunlardır;

1. Yeraltı tüneli gibi önemli taşıyıcı fonksiyonu olan ve su depoları gibi sürekli su difüzyonuna maruz kalan betonarme yapılardaki çelik donatının korozyonuna karşı korunması için su geçirimsiz beton yapılması ve bu yapılırken, istenen işlenebilirliği sağlamak koşulu, su/çimento oranının 0,40'tan daha az olmasına dikkat edilmesi gerekir.

2. Betona korozyonu frenleyici olarak katkı maddesi ilave etmek ve inhibitör etkisi yapabilecek kalsiyum nitrit gibi maddeler katılmalıdır. İnhibitör korozyon hızını yavaşlatan kimyasal maddelerden oluşmaktadır. Bunlar negatif etkili katalizör olarak düşünülebilir. İnhibitörler korozyon reaksiyonuna doğrudan katılmayıp yalnızca korozyon hızını azaltıcı etki yaparlar. İnhibitörler döküm sırasında beton içine katılarak kullanılır. Bu maddelerin inhibitör etkisi yanında, betonun diğer özelliklerine de bozucu etki yapmaması gerekir. İnhibitörler üç'e ayrılırlar;

- a) Anodik inhibitörler; en çok kullanılan anodik inhibitörler, kalsiyum nitrit, sodyum nitrit ve sodyum kromattır. Anodik inhibitörler etkili inhibitörlerdir fakat zehirlidirler.
- b) Katodik inhibitörler; arsenik ve antimonuan (Antimony) bileşikleridir. Katodik tarafta korozyon sırasında, çözülmemiş bileşiklerin çökmesine sebep vererek metal yüzeyinde koruma sağlarlar.
- c) Mixed inhibitörler; metal yüzeyi üzerinde absorblanarak veya çökelti olarak bir moleküler engelleyici katman görevi görürler ve bunlar elektron reaksiyon hızlarını hem katot da hem de anotta etkilerler. Metal üzerindeki klor saldırılarından dolayı, korozyon hücrelerinin bozulmasına karşı en çok kullanılabilecek inhibitörlerdir. Bu inhibitörler, tetrametil phosphonium nitrite, tetraethyl phosphonium nitrite ve sodium benzoate bileşikleridir. (Nawy 2001)

3.Betona klorür iyonlarının girişini önlemek için betonun gözeneklerine polimer emdirilmesi ve betonun dış yüzeyinin su geçirmez bir organik madde veya plastik membran ile kaplanması önerilmektedir.

4.Çelik donatının organik epoksi bir madde ile veya çinko ile kaplanması korozyon tahribatını azaltacaktır. Donatının galvanizlenmesi korozyona karşı direnç sağlar fakat saf çinko beton ile reaksiyona girebilir ve hidrojen gazı çıkabilir. Bunun önüne geçmek için çinko ile galvanizlenen çelik donatının kromat solüsyonu ile yıkanması gereklidir

5.Galvanik veya dış akım kaynaklı katodik koruma ile beton içerisindeki çeliğin paslanması engellenmelidir.

6.Çevre metalik yapılar ve özellikle metro yeraltı tünelineki çelik donatı üzerindeki yüksek voltajlı doğru akımlı metronun kaçak akım etkisiyle zarar vermesini önlemek amacıyla ray boyunca sürekli elektriksel iletkenlik,ray ile zeminin iyi izole edilmesi gibi kaçak akımı azaltacak önlemlerin yanında, sürekli geçiş sistemi, akım drenajı noktalarında ızgara kullanımı gibi ilave önlemlerde alınmalıdır.

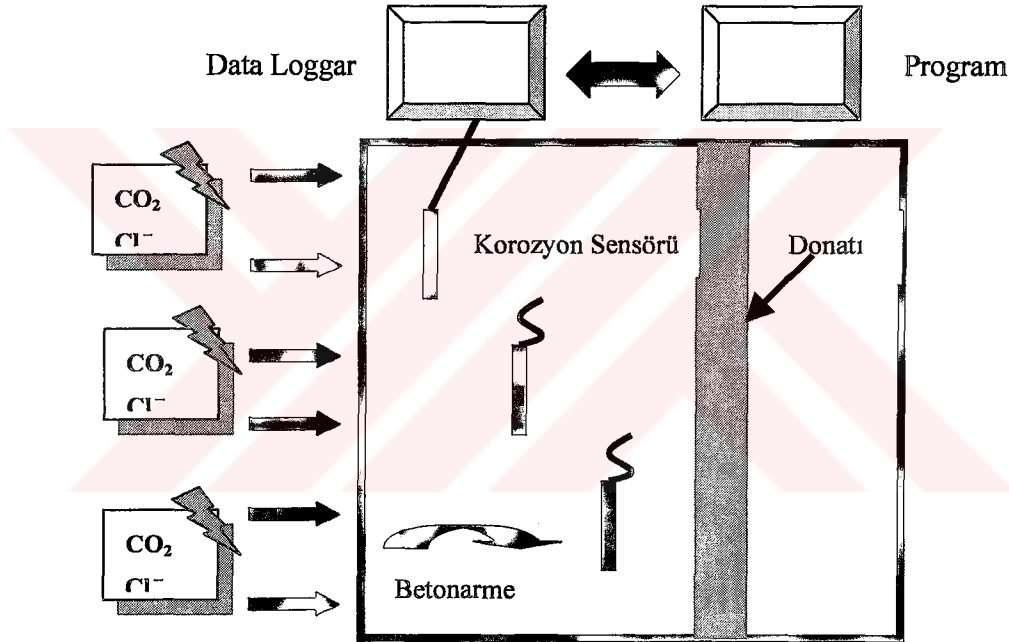
7.Betonun dökümü sırasında da alınacak bazı önlemleri ile korozyon riski azaltılabilir. Tasarım sırasında beton yüzeyinde su birikerek göl oluşturmasını engelleyecek önlemler alınabilir. Yüzeyde biriken kirli ve tuzlu sular, beton bünyesine klörür iyonu girmesine neden olur. Biriken suların yağmur suyu veya tatlı su olması halinde bu sular beton bünyesinde bulunan kalsiyum hidroksiti çözerek uzaklaştırır. Böylece hem beton pH derecesi düşer hemde beton içinde boşluklar oluşur. Beton dökümü sırasında çimento cinsi, dozajı, su/çimento oranı, agrega granülometrisi, beton kıvamı, beton sıkıştırılmasına ve kürüne dikkat edilerek geçirimsiz, sağlam bir beton yapılması sağlanmalıdır. Beton dökümünde kullanılacak karışım suyu da klörsüz olmalıdır. Böylece beton bünyesine oksijen ve klorür iyonu difüzyonu minimum hale indirilebilir.

8.Beton kalitesinde kullanılan çimento cinsi de çok önemlidir. Normal portland çimentosu yerine, puzolanlı çimentoların kullanılması korozyon açısından daha faydalıdır. Puzolanlar çimento klinker bileşiklerinin hidrolizi sonucunda oluşan kalsiyum hidroksit ile birleşerek beton boşluklar içinde kristalize olur. Böylece beton geçirgenliği büyük ölçüde azalır. Betonun mekanik özelliklerini geliştirmek için ve çelik donatının korozyon direncini arttırmak için silika fume (Silica Tütsüsü, SF) ve Blast Furnace Slag (Yüksek Fırın Curufu, BFS) kullanılır. (Türkmen, 2003). Türkmen tarafından yapılan çalışmada, BFS ve SF kullanılan çimento ile elde edilen betonun dayanıklılığı, geçirgenliği sıradan betonlara oranla daha yüksektir. Genellikle yüksek performanslı betonlar 0,45 ten daha düşük

su/çimento oranına sahip ve içinde SF ve BFS bulunan betonlardır.

Uçucu kül (Fly ash) kullanımı betonun porozitesini düşürerek betonu daha dirençli hale getirdiği görülmektedir. Montemor tarafından yapılan çalışmada özellikle çeşitli miktarlarda uçucu kül (fly ash) kullanılarak elde edilen betonların porozite ve direnç bakımından istenilen vasıflarda olduğu ve özellikle oksijen ve klorür iyon difüzyon oranlarını düşürdüğü görülmektedir (Montemor, 2000).

9.Korozyon sensörlerinin son yıllarda kullanılmaya başlanması ile özellikle klörür iyonlarının beton yüzeyinden çelik donatıya ulaşması aşama aşama tespit edilebilmektedir. Bu monitörleme yöntemi ile olmaktadır. Betonun atılması sırasında, yani taze halde iken içerisine yerleştirilen,korozyon sensörleri bir data logar yardımıyla betonun yüzeyinden içine yani donatıya doğru klorür iyonu oranının tespitini sağlamaktadır. Lee (2003) tarafından yapılan çalışmada korozyon sensörlerinin kullanımı Şekil 7.1 de gösterilmektedir.



Şekil 7.1 Korozyon sensörlerinin görüntülenmesinin beton içerisindeki şematik yapısı. Lee (2003)

Korozyon sensörleri beton yüzeyinden donatıya doğru farklı uzaklıklarda betonun içine yerleştirilir ve CO_2 ve Cl^- iyonlarının geçişi ile donatı korozyonu yüzünden sensörlerin direnç değerlerinin değişiminin bir data loggar ile görüntülenir, böylece özellikle klorür iyonu saldırıları ile ortaya çıkabilecek korozyon riskine önlem alınabilir.

7.2 Mevcut Betonarme Yapılarda Alınması Gerekli Önlemler

Mevcut metro yapıları ve su depoları için betonun karakterini değiştirmek mümkün değildir. Ancak aşağıda önerilen önlemlerin alınması mevcut yapının ömrünü uzatacaktır.

1. Mevcut yapı , su sızdırmaz bir katman ile kaplanmalıdır.Tabi ki metro ,yeraltı su borularını kaplamak olanaksız olabilir ama mevcut yapıyı kaplamak mümkün ise su depolarında olabileceği gibi dışının bohçalama sistemi ile deponun içini ise organik bir madde veya maliyeti belki fazla ama özellikle seramik ile kaplanarak betona su ve klor geçişi engellenerek korozyon riskini çok azaltılabilir.
2. Metroda kaçak akımın miktarını ve etkisini azaltmak için negatif rayda sürekli elektriksel iletkenlik sağlanmalı bunun için de ray hatları arasında mükemmel bir irtibat sağlanmalı ve ray boyunca sürekli elektriksel iletkenlik gerçekleştirilmelidir. Dizanyda ray boyutlarının artırılması düşük dirençli bir yük dağılımı sağlar. Belirli bir ray kesiti için raylar arasında ki kaynaklı birleştirme de kaynak kalitesi iyi olmalı ve oluşabilecek boşluklar ve rayların üzerinde oluşabilecek pas tabakasının ray kesitini azaltması ve dolayısı ile ray direncini artırması engellenmelidir.
3. Kaçak akımın zemine geçmesini önleyici bir yalıtım sistemi ile ray ve zemin arasında iyi bir izolasyon sağlanmalı ve kaçak akımın zemine geçmesi önlenmelidir. Burada en pratik çözüm, izolasyon pad'ı bütün ara yüzeyi kaplayacak şekilde yeni bir dizayn geliştirilmelidir. Ray ile zemin arasındaki mesafe arttırılabilir ve mükemmel bir su drenajı ile suyun olumsuz etkisi azaltılabilir.
4. Tünelin dışındaki yapıların tünelden ve raylardan yalıtımı sağlanmalıdır. Çünkü kaçak akımın çevre yapılara kaçmasının en önemli sebebi rayların ve tünel yapının yeterince izole edilmemesidir. Böyle bir durumda, hem kaçak akım çekişi fazla olacak, hem de kaçak akım çevre metalik yapılar üzerinde akımın yapıyı terk ettiği bölgede korozyon hasarı meydana getirecektir.
5. Yeraltı metro tünel sistemlerinde sürekli geçiş sistemi sağlanmalı, yani kaçak akımı bünyesine alan bütün donatı ve metalik yapıların birbiri ile irtibatlandırılması ve elektriksel süreklilik sağlanması, kaçak akımın kontrollü olarak toplanmasına ve drene edilmesine imkan verir.
6. Tüm betonarme sistemlerde suyun sisteme olumsuz etkisini azaltmak gereklidir. Metro da tünel içinde su drenajını geliştirmek, suyun ray üzerine damlamasını ve yoğuşmasını azaltmak ve su kanallarını izole boya ile boyamak önemli bir koruma metodudur. Ayrıca su deposu ve diğer tüm betonarme yapılarda dışarıdan su difüzyonunu engellemek için su kaynaklarının drene edilmesi ve su

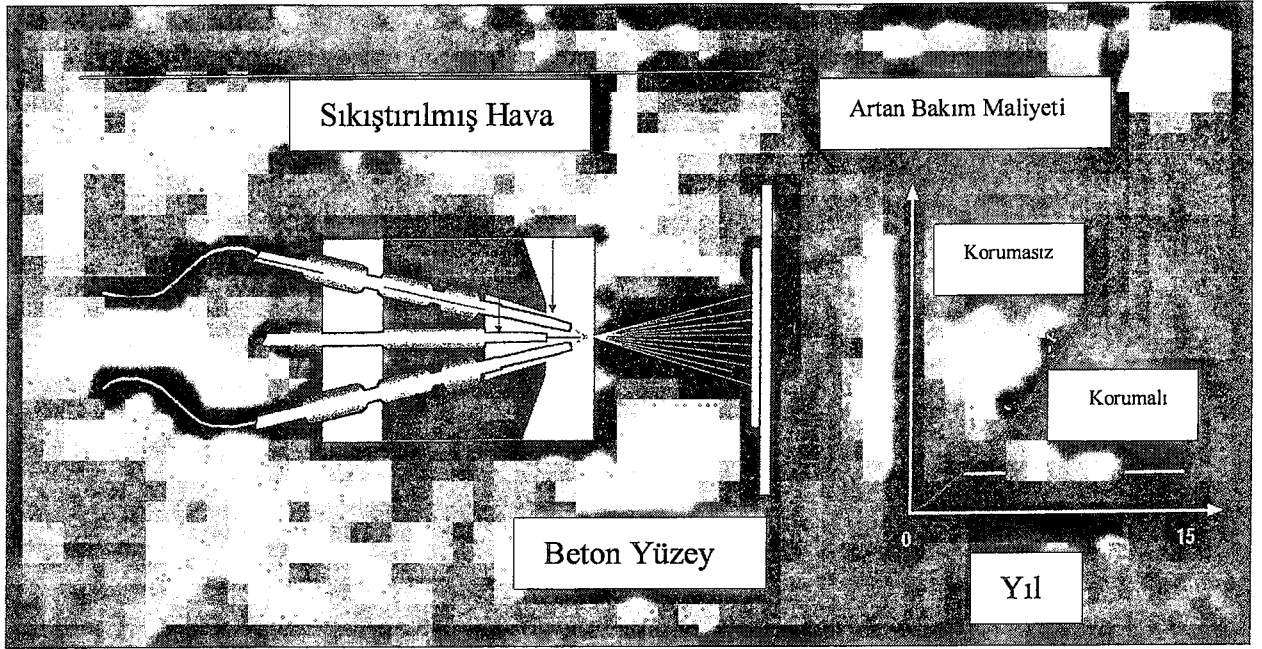
delik ve çatlaklarını izole bir madde ile tıkmak gereklidir.

7. Beton dışında donatı haricindeki metalik yapıların kaplanması gereklidir. Yeni yapılarda ise tüm çelik yapının kaplanması önemli bir ön koruma metodudur.

8. Betonun tamiri mümkün olan betonarme yapılarda yapılmalıdır. Donatıların korozyonu nedeni ile çatlamış olan bir betonu etkili bir tamir yöntemi yoktur. Ancak, henüz çatlama aşamasına varmamış hafif ölçüde korozyonun sözkonusu olduğu hallerde şu tamir yöntemleri önerilmektedir;

- a) Betonarme donatılarının üst kısmında ki beton tabakası kaldırılıp, donatılar değiştirildikten sonra yeniden beton dökülür.
- b) Betonarme donatılarının üst kısmında ki beton tabakası kaldırılıp, korozyona uğramış olan donatılar değiştirildikten sonra üst kısma beton asfalt veya epoksi bağlayıcılı beton dökülür.
- c) Yapının fiziksel durumu uygunsa ve beton bünyesinde bir metreküp içinde 1,2 kg dan daha az klorür bulunuyorsa, korozyona uğramış olan donatılar çıkarılmadan ve beton sökülmeden, üst kısma yaklaşık 7,5 cm kalınlığında yeni bir beton tabakası dökülür. Bu tamir yöntemlerinin herhangi biri ile betonarme yapıyı bir süre daha işletmede tutmak mümkün olabilir.
- d) Uygulamada kompozit malzeme kullanılarak beton tamirati da geliştirilmiştir.

9. Son yıllarda geliştirilmiş olan Ark Püskürtme İşlemi de (Arc Spray prosesi); beton içindeki donatının korunmasında bir diğer yöntem olarak tercih edilebilir. Bu metod, betonarme yapılara Elektrik Ark Püskürtme sistemi yardımı ile uygulanmaktadır. Bu sistem Şekil 7.2 de gösterilmektedir. Burada, anod bir galvanik kaplama gibi uygulanabilir. Nominal karışım oranları %80 alüminyum, %20 cinko ve %0,2 indium elementinden oluşmaktadır. Ark Püskürtme işleminin galvanik bir sistem olması nedeni ile açığındaki çelik yüzeye direkt olarak püskürtmek herhangi bir soruna yol açmamaktadır. Nitekim dar alanlar da bu sayede bir sorun olmaktan çıkmaktadır. Böylelikle, yeni anod (Aluminyum-Çinko- İndium), klorür içeren betonarmenin içinde ki çelik donatının, gelişmiş katodik korumasını sağlayabilmektedir. Ark Püskürtme'nin yararları arasında, çelik donatının korunmasında yüksek verimlilik sağlaması, iyi bir mekanik bağ görevi görmesi ve homojen ve koruyucu bir kaplama oluşturması bulunmaktadır.



Şekil 7.2 (Al-Zn-In) Alaşımlı galvanik spray sistemi (Corrpro, 2002)

10. Katodik koruma da betonarme yapılar için diğer önemli bir koruma yöntemidir. Katodik koruma, korozyona uğrayan (korozyon sisteminde anot olarak davranan) bir metalin potansiyelini değiştirerek katot olarak davranmaya zorlamaktır. Katodik korumanın amacı, belirli bir ortamda bir metal için sabit bir potansiyel eşiğinin altında metali, zemine göre negatif olarak kutuplaştırarak her tür korozyonda korumaktır. Katodik koruma uygulanırken yalıtkan kaplama kullanmak her zaman avantajlıdır. Böyle kaplamalar koruyucu akımın dağıtılmasında, toplam akım ihtiyacının azaltılmasında ve anodun ömrünün uzatılmasına etkili olurlar, kullanışlıdır. Örneğin kaplanmış bir boru hattında akım dağılımı çıplak boru hattına göre daha düzgündür, gerekli olan anot sayısı ve toplam akım daha azdır ve bir anot boru hattının daha uzun bir kısmını daha uzun süre koruyabilir. Katodik korumada aşırı negatif potansiyellerin metale yüklenmesi metal kaplamasını tahrip ettiğinden bundan kaçınılması gerekir. Genel olarak korozyondan korunmak için yapılması gerekenler;

- Uygun tasarım
- Uygun malzeme seçimi
- Yeterli yüzey kaplaması

- Katodik koruma
- Anodik koruma

olarak gruplandırılabilir. Bu önlemler grubundan katodik koruma dışındakiler korozyon hızını azaltan , başka bir deyimle korozyonu kısmen önleyen yöntemlerdir. Katodik koruma ise korozyonu tamamen önleyen etkili bir yöntemdir. Fakat metalin korozyonunu önlemek için öncelikli önlemleri almalı, katodik koruma da takviye amacıyla uygulamak gereklidir. Öncelikli önlemler alınmadığı takdirde sadece katodik korumayı uygulamak hem verimli olmayacak, hem de ekonomik olmayacaktır. Katodik korumada potansiyel ölçümleri ve aşırı korunma Ek 1’de, katodik koruma kriterleri ve uygulaması Ek 2’de açıklanmıştır.



KAYNAKLAR

- Ayala V., Ingalls A., Genesca J., (1996), "Mathemetical Modeling of Rebar Corrosion in Seawater", Ciudad University, Mexico.
- Baekmann W. V., Prinz W., (1990), "Stray Current Interference and Stray Current Protection", Handbook of Cathodic Corrosion Protection, U.S.A.
- CORRPRO COMPANIES INC. (2002), "A Galvanic Anode Cathodic Protection System", Medina, Ohio.
- Çizmecioğlu Z., (2002), "İstanbul Metrosu Taksim 4.Levent Hattı Kaçak Akımlarının Betonarme Tünellerin Çelik Donatıları ve Diğer Yapılar Üzerinde Korozyon Riskinin Araştırılması Hakkında Teknik Rapor", Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Çizmecioğlu Z., (1998) "İsale Hatlarının Katodik Koruması ", İSKİ, İstanbul.
- Gani M.S.J., (1997), "Durability and protection of concrete", CONCRETE AND CEMENT (First edition) (159-168)
- Kajsa B., (1990), " Chloride-initiated reinforcement corrosion", (9-23) STOCKHOLM.
- Koç T., (1998), "Ankaray Projesi ve Kaçak Akım Korozyonu Hakkında Makale", "www.corrosionsource.com", Gazi Üniversitesi Müh. Fak. Ankara.
- Koç T., (2000), "Beton Borularda Korozyon ve KK", "www.corrosionsource.com", Gazi Üniversitesi Müh. Fak. Ankara.
- Koç T., (2001), "Deprem Bir Başka Boyutu", "www.corrosionsource.com", Gazi Üniversitesi Müh. Fak. Ankara.
- Lee H.S., Shin S.W., Ahn J.M., Kim Y.C., Khto Y.T., (2003), "Development of corrosion sensors for monitoring steel-corroding agents in reinforced concrete structures", Materials and Corrosion 54(229-234). Korea.
- Mohammed T.U., Hamada H., (2003), "Relation between free chloride and total chloride contents in concrete", Cement and Concrete Research 2326 (1-4), Japan
- Montemor M. F., Siomes A.M.P., Salta M.M., (2000), "Effect of fly ash on concrete reinforcement corrosion studied by EIS", Cement and Concrete Composites 22 (175-185).
- Mudd C. J., Musinelli G. L., Tettamanti M., Pedferri P., (1998), "Cathodic Protection of Steel in Concrete", MP, U.S.A.
- Navy E.G., (2001), "Mineral and chemical admixtures in high-performance concrete", Fundamentals of high-performance concrete (2. edition), USA.
- Nicholas J., (1999), "Nondestructive Techniques to Investigate Corrosion Status in Concrete Structures", Journal of Performance of Constructed Facilities, U.S.A.
- Petterson K., (1992), " Corrosion threshold value and corrosion rate in reinforced concrete", Stockholm.
- Rosenberg A., (1999), "How to Prevent Corrosion in Precast Concrete", MC Magazine, U.S.A.

Tettamanti M., (1997), “Corrosion and Cathodic Protection of Steel in Concrete”, Cathodic Protection Division, Milano, Italy.

Tullmin M. A. A., Hansson C. M., Roberge P. R., (1999), “Electrochemical Techniques for Measuring Reinforcing Steel Corrosion”, Queen’s University, University of Waterloo and Royal Military College, Canada.

Türkmen İ.,Gavgalı M.,Gül R., (2003), “Influence of mineral admixtures on mechanical properties of steel embedded in high strength concrete”, Materials Letters 57 (2037-2043)

Yalçın H.,Koç T., (1991), “Demir ve çelik yapıların korozyonu ve katodik korunması”, “www.corrosionsource.com” Ankara.



EKLER

- Ek 1** Katodik korumada potansiyel ölçümleri ve aşırı koruma
- Ek 2** Katodik koruma kriterleri ve uygulaması
- Ek 3** Metro sisteminden Fotoğraflar
- Ek 4** Su deposunda fotoğraflarla korozyon
- Ek 5** ASTM C-876 87 Standardı



Ek 1 Katodik Korumada Potansiyel Ölçümleri ve Aşırı Koruma

Korunan yapının potansiyeli ölçülerek koruma derecesi nicel olarak tespit edilebilir. Bu ölçüm genellikle kriter olarak kabul edilir ve korozyon mühendisleri tarafından kullanılır. Bu tespitin temeli, korunan yapı yerel etki pillerinin açık devre anodik potansiyeline polarize olduğundakatodik koruma tamamdır, kavramına dayanır. Bu ölçümü yapmak için referans elektrot omik düşüşten kaynaklanan hatayı ortadan kaldırmak veya azaltmak için korunan yapıya mümkün olduğunca yakın bir şekilde yerleştirilmelidir. Gömülü boru hatları için toprak yüzeyinde gömülü boru hizasında uygun bir yer alınır. Katodik olarak korunan bir metal yapının korunup korunmadığı aşağıda belirtilen referans elektrotların karşısındaki koruma potansiyel değerlerini sağlamak gerekir. Ayrıca başka bir kriterde korunmuş yapının doğal potansiyelinin koruma potansiyeli arasındaki farkın **-300 mV** olmasıdır.

Çizelge Ek 1.1 Katodik korumada referans elektroda karşılık gelen koruma potansiyelleri

Referans Elektrot	Koruma Potansiyeli (mV)
Doygun kalomel Elektrot, $Hg_2 Cl_2$	-0,780
Gümüş-Gümüş Klorid, (Ag/AgCl)	-0,810
Bakır-Bakır Sülfat, (Cu/CuSO ₄)	-0,850
Çinko	+0,250

Aşırı koruma:

Çelik yapıların gereğinden fazla korunması, orta derecede, genellikle bir soruna yol açmaz, dezavantajları artık elektrik gücü ve yardımcı anotların artan tüketimidir. Gereğinden fazla koruma eğer aşırı derecedeyse korunan yapı yüzeyinde yeteri miktarda hidrojen oluşabilir. Bu organik kaplamaların kabarmasına şişmesine veya hidrojen kırılmasına yol açabilir. Hidrojen absorpsiyonuyla ortaya çıkan hasar sülfid olan çevrelerde daha çok etkilidir.

Ek 2 Katodik Koruma Kriterleri ve Uygulaması

Son yıllarda, betonarme demirlerinin katodik olarak korunması da uygulama alanına girmiş bulunmaktadır. Betonarme demirleri, hem galvanik anot (çinko), hem de dış akım kaynaklı katodik koruma sistemleri ile korunabilmektedir. Katodik koruma için en önemli şart, betonarme demirlerinin elektriksel bağlantısının tam olmasıdır. Normal halde betonarme demirleri bir biri ile temas etmekle beraber, bu temas düşük voltajlı elektrik akımını iletme için yeterli değildir. En iyisi betonarme demirlerinin birbirine kaynak edilmesidir.

Katodik Koruma Kriterleri:

Normal koşullarda bir çelik yapının katodik olarak korunması için, doymuş $\text{Cu}/\text{Cu}(\text{SO}_4)_2$ referans elektroduna göre - 0,85 V potansiyelden daha elektronegatif bir potansiyele kadar katodik olarak polarize edilmesi gerekir. Bu değer Ag/AgCl referans elektrotu ile - 0,80 Volt'a karşı gelir. Beton içinde yapılan katodik koruma sistemlerinde, pasiflik nedeniyle bu değere erişmek mümkün olmaz. Beton içindeki çeliğin katodik korunması için başka bir kriter uygulanır. Çeliğin korunması için katot da 100 mV luk bir polarizasyon kayması yeterlidir.

Katodik Koruma Uygulaması:

Beton içindeki betonarme demirlerinin dengeli bir şekilde katodik olarak korunabilmesi için uniform bir akım dağılımı gerekir. Bu nedenle anot biçimi ve boyutlarının seçimi büyük önem taşır. Bu amaca en uygunu, karma metaloksit kaplı titanyumdan yapılmış olan tel kafes şeklindeki anotlardır.

REFERANS ELEKTRODLAR

1-Standart Hidrojen Elektrot, ($\text{Pt}/\text{H}_2/\text{H}^+$)

Elektrot reaksiyonu $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$

(H^+) = 1 P H_2 = 1 atm $E=0$ mV

2-Kalomel Elektrot, ($\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2, \text{Cl}^-$)

Elektrot reaksiyonu $\text{Hg}_2\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- = 2\text{Hg} + 2\text{Cl}^-$

$E=0.2677-0.059 \log a \text{Cl}^-$ $E= 244$ V (doymuş klorür)

3-Gümüş-Gümüş Klorür, (Ag/AgCl)

Elektrot reaksiyonu $\text{AgCl} + 2\text{e}^- = \text{Ag} + \text{Cl}^-$

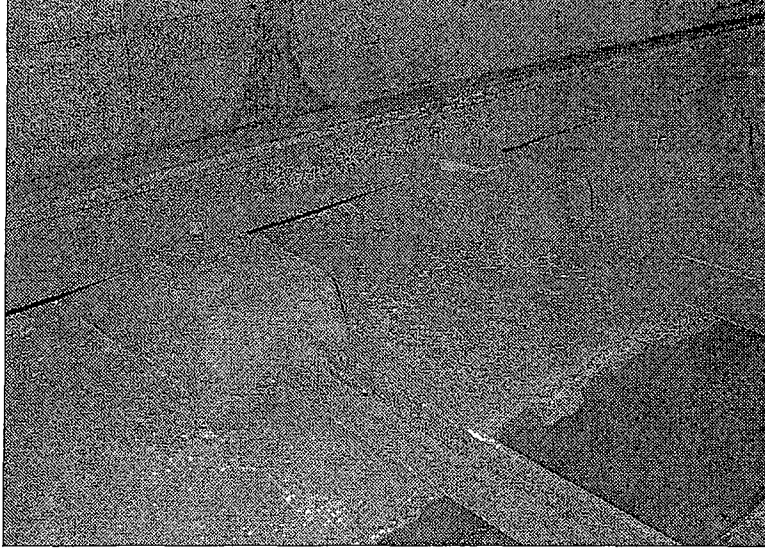
$E=0,2224-0,059 \log a \text{Cl}^-$ $E= 250$ V (Deniz suyunda)

4-Bakır/Bakır sülfat, ($\text{Cu}/\text{SO}_4, \text{Cu}^{+2}$)

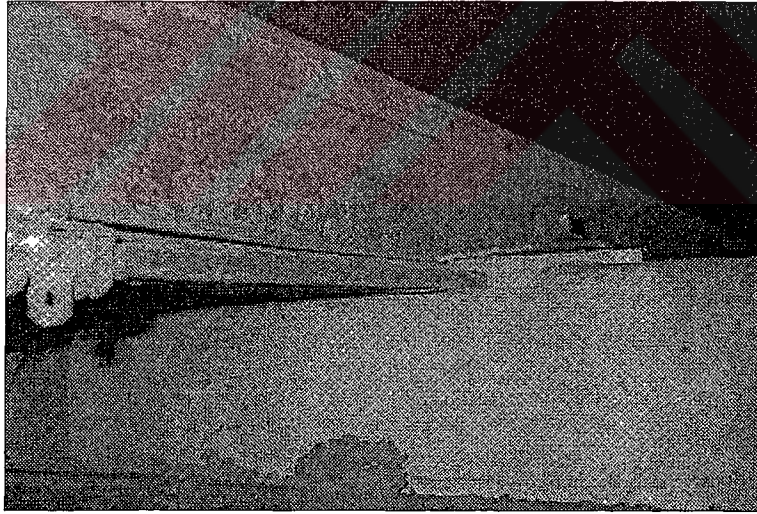
Elektrot reaksiyonu $\text{Cu}^{+2} + 2\text{e}^- = \text{Cu}$

$E=0,340+0,0259 \log a \text{Cu}^{+2}$ $E=318$ V(Doygun CuSO_4)

5-Çinko/Deniz Suyu $E=800$ Mv

Ek 3 Metro Sisteminden Fotoğraflar

Fotoğraf Ek 3.1 Zemine temas eden metal profil ve traversin civarındaki yalıtım bozukluklarının görünümü



Fotoğraf Ek 3.2 Ray altı izolasyonunun görünümü

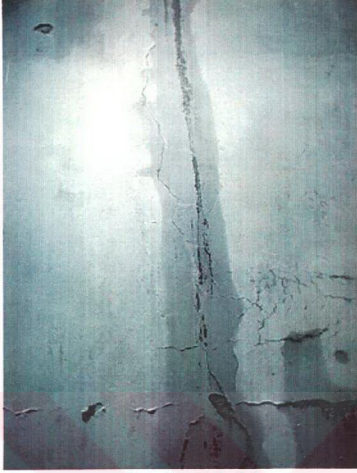


Fotoğraf Ek 3.3 Ray altı izolasyon malzemesinin yüzeyi tamamen kaplamamasının görünümü



Fotoğraf Ek 3.4 Metal kapağın travers temasının görünümü

Ek 4 Su Deposunda Fotoğraflarla Korozyon



Fotoğraf Ek 4.1



Fotoğraf Ek 4.2

(Fotoğraf Ek 4.1 ve 4.2 Depodaki çatlaklardan sızan suyun görüntüsü)



Fotoğraf Ek 4.3



Fotoğraf Ek 4.4

(Fotoğraf 4.3 ve 4.4 Depodaki çatlakların genişliği ve pas tabakasının bozulması ile pas akıntısı)



Fotoğraf Ek 4.5



Fotoğraf Ek 4.6



Fotoğraf Ek 4.7



Fotoğraf Ek 4.8

(Fotoğraf 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8 Korozyon çatlaklarının büyüklüğü ve genişliği sonucu statik yapıya zararı)

Ek 5 ASTM- C 876-87 Standardı

ASTM -C 876-87 standardında beton içinde bulunan çeliğin potansiyel ölçüm sonuçları değerlendirilmektedir:

1. Beton içindeki çeliğin doygun bakır-bakır sülfat referans elektroduna göre ölçülen potansiyel değeri eğer -0.20 V'dan daha pozitif ise, % 90 bir olasılıkla korozyon mevcut değildir.
2. Beton içindeki çeliğin doygun bakır-bakır sülfat referans elektroduna göre ölçülen potansiyeli eğer -0.20 V ile -0.35 V arasında bulunuyorsa, söz konusu çeliğin korozyona uğrayıp uğramadığı belirsizdir.
3. Beton içindeki çeliğin doygun bakır-bakır sülfat referans elektroduna göre ölçülen potansiyel değeri eğer -0,35 V'dan daha negatif ise, %90 bir olasılıkla söz konusu çelik korozyona uğramaktadır.
4. Beton içindeki çeliğin doygun bakır-bakır-sülfat referans elektroduna göre ölçülen potansiyel değeri eğer -0.50'dan daha negatif ise, şiddetli korozyon olayı söz konusudur.
5. Beton içindeki çeliğin doygun bakır-bakır sülfat referans elektroduna göre ölçülen potansiyeli eğer pozitif bir değer gösteriyorsa, ya beton kuru haldedir veya çeliğe kablo bağlantısı iyi yapılmamıştır, ya da çevreden açık akımlar söz konusudur.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	27.05.1974	
Doğum yeri	Sakarya	
Lise	1989-1992	Adapazarı Atatürk Lisesi
Lisans	1993-1999	Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fak. Kimya Bölümü
Yüksek Lisans	2000	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya-Metalurji Müh. Ana Bilim Dalı, Üretim Programı