

19113.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KONYA II. ORGANİZE SANAYİ BÖLGESİNDEKİ
ZEMİN SUYUNUN BETON İÇİNDEKİ ÇELİĞE
OLAN ETKİSİ**

M. Faik SEVİMLİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT ANABİLİM DALI

Bu tez 6.9.1991 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Ahmet YÜCEER Prof. Dr. Tamer YILMAZ Yrd. Doç. Dr. Yüksel BURDURLU
(Danışman) (Üye) (Üye)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

**KONYA II. ORGANİZE SANAYİ BÖLGESİNDEKİ
ZEMİN SUYUNUN BETON İÇİNDEKİ ÇELİĞE
OLAN ETKİSİ**

M. Faik SEVİMLİ

Selçuk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Anabilim Dalı

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ahmet YÜCEER

1991, Sayfa : 81

Jüri : Prof. Dr. Tamer YILMAZ

Yrd. Doç. Dr. Ahmet YÜCEER

Yrd. Doç. Dr. Yüksel BURDURLU

Konya II. Organize Sanayi Bölgesi zemin suyunun beton içindeki çeliğe olan etkilerini belirlemek üzere iki grup deney yapılmıştır. Bunlardan birincisi doygun kalsiyum hidroksit çözeltisi içinde ikincisi de gerçek beton ortamında yapılmıştır. Deneylerde S 220 (BÇ I) inşaat çeliği kullanılmıştır. Birinci grup deneylerde, içerisinde sürekli olarak oksijen gazı geçirilen doygun haldeki kireç çözeltisinde tutulan çelik numunelerin yirmibir gün süreyle potansiyelleri ölçülmüştür. Bu deneyler kalsiyum hidroksitle doygun hale getirilmiş saf su, şehir şebeke suyu ve araştırma alanının zemin suyu çözeltilerinde yapılmıştır. İkinci grup deneyler için, iki tip beton blok dökülmüştür. Birinci tip beton blok şehir şebeke suyuyla, ikinci tip beton blok araştırma alanı zemin suyu ile imal edilmiştir. Bu numunelere yerleştirilen 10 mm çapındaki çelik çubukların yirmidokuz gün süreyle potansiyelleri ölçülmüştür. Daha sonra ikinci tip beton blok polarizasyon deneyine tabi tutularak korozyon hızı tesbit edilmiştir. Yapılan potansiyel ölçümleri sonunda çeliğin aktif-pasif durumu hakkında kalitatif fikirler elde edilmiştir. Laboratuvarında yapılan deney sonucu araştırma alanı zemin suyunun temas ettiği çeliğin aktif hale geldiği ve potansiyelinin -450 mV'den daha negatif değerler aldığı görülmüştür. Beton içindeki çeliğin 29150 ppm gibi aşırı klorürlü ortamdaki korozyon hızı ise 9.8 mA/m^2 ($1.13 \times 10^{-2} \text{ mm/yıl}$) olarak bulunmuştur. Elde edilen deney sonuçlarına göre, bu bölgede yapılan sanayi yapılarında bu olumsuz etkilere karşı uygulanması gereken önlemler tavsiye edilmiştir.

ABSTRACT
Masters Thesis
EFFECT OF THE GROUNDWATER ON THE
STEEL IN CONCRETE AT THE II. ORGANIZED
INDUSTRIAL REGION

M. Faik SEVİMLİ

Selçuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Building Engineering

Supervisor : Yrd. Doç. Dr. Ahmet YÜCEER

1991, Page : 81

Jüry : Prof. Dr. Tamer YILMAZ

Assoc. Prof. Dr. Ahmet YÜCEER

Assoc. Prof. Dr. Yüksel BURDURLU

Two groups of experiments have been carried out to determine the effects of ground water on the steel in concrete at the II. Organized Industrial Region of Konya. One of these experiments were performed in the saturated lime solution and the another one in the concrete blocks. In the experiments S 220 (BÇ I) mild steel were used. In the first group of experiments, the electrode potentials of these samples held in the saturated lime solution in which oxygen gas passed through continuously was measured during the twentyone days. These experiments were carried out with the saturated solution of calcium hydroxide in the distilled water, tap water and the ground water of research area. Two type concrete blocks were prepared for the second group of experiments. The first type of concrete block was prepared with the tap water, and the second one with the ground water. The potentials of the steel bars with 10 mm diameters which were located in the concrete blocks were measured during the twentynine days. Later, I was tried to determine the corrosion rate of second type of concrete block by using polarization breakdown measurements, some calitative ideas were obtained about active - passive position of the steel. As a result of laboratory experiments, the steel which contacted with the ground water, became active state and its potential values observed being less then -450 mV. The corrosion rate of steel in concrete which prepared with the ground water, include as 29150 ppm Cl^- was obtained being $9.8 \text{ mA} / \text{m}^2$ ($1.13 \times 10^{-2} \text{ mm} / \text{year}$). According to the results which were observed from the laboratory experiments, some measures are recommended for the industrial buildings which have been still carried on the building.

TEŞEKKÜR

Bu tezi yürüten ve hazırlanması sırasında karşılaştığım zorlukları yenmede her türlü yardımı esirgemeyen değerli bilgi ve tecrübelerinden daima faydalandığım kıymetli hocam Sayın Yard. Doç. Dr. Ahmet Yüceer Bey'e teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarımnda benden yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Mehmet Bayrak Bey'e, Sayın Yard. Doç. Dr. Yüksel Burdurlu Bey'e, Araş. Gör. Sayın Sinan Gültekin'e, Fen - Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü Araş. Gör. Sayın Nejdet Şen'e, bölümümüz teknisyeni Sayın Naci Alatlı'ya ve bu arada tezi gerçekten ciddi bir şekilde kısa zamanda yazan BİL-TEZ (Tez Yazım Bürosu)'na teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. ELEKTROLİTİK KOROZYON TEORİSİ VE ÇELİĞİN BETON İÇİNDEKİ KOROZYONU	19
3.1. Korozyon	19
3.2. Elektrokimyasal Korozyon	20
3.3. Akım - Potansiyel Eğrileri	24
3.4. Akım - Potansiyel Eğrilerini Elde Etme Metodları	24
3.4.1. Potansiyostatik metod	24
3.4.2. Galvanostatik metod	25
3.5. Polarizasyon	25
3.6. Çeliğin Beton İçindeki Korozyonu	26
3.6.1. Çeliğin beton içindeki korozyonunun elektrokimyasal mekanizması	27
3.7. Pasifleşme	29
3.8. Korozyon Üzerinde pH'ın Etkisi	30
3.8.1. Demir - su sistemi için elektrokimyasal denge diyagramı	31
3.9. Çözünmüş Oksijenin Korozyon Hızı Üzerindeki Etkisi	34
3.10. Klorür İyonlarının Etkisi	35
3.10.1. Serbest klorür iyonlarının elektrokimyasal rolü	36
3.11. Beton İçindeki Çeliğin Korozyonuna Etki Yapan Diğer Faktörler	37
3.11.1. Beton kalitesi	37
3.11.2. Karbonatlaşma etkisi	38
3.11.3. Priz hızlandırıcı katkı maddeleri	38
3.12. Korozyondan Korunma Metodları	39

3.12.1. Beton dökümü sırasında alınacak önlemler	39
3.12.2. İnhibitör kullanımı	40
3.12.3. Pozolan kullanımı	41
3.12.4. Zararlı suyun uzaklaştırılması veya nötralizasyonu	41
3.12.5. Katodik koruma	42
4. MATERYAL VE METOD	43
4.1. Materyal	43
4.1.1. Araştırma alanının yeri	43
4.1.2. Araştırma alanı toprakları ;.....	43
4.1.3. Araştırma alanının topoğrafyası ve yeraltı suyu durumu	45
4.1.4. Araştırma alanının iklimi	45
4.1.5. Araştırma alanı zemin suyu özellikleri	47
4.2. Metod	47
4.2.1. Araştırma alanında kuyu açılması	47
4.2.2. Deneysel çalışmalar	48
4.2.3. Su numunelerinin alınması ve kimyasal analizleri	49
4.2.4. Elektrot numunelerinin hazırlanması	49
4.2.5. Çeliğin doygun kalsiyum hidroksit çözeltisi içindeki denge potansiyeli ölçümleri	50
4.2.5.1. Elektrolitlerin hazırlanması	50
4.2.5.2. Deney seti	51
4.2.5.3. Deneyin yapılışı	53
4.2.6. Çeliğin beton içindeki denge potansiyeli ve katodik polarizasyon eğrisi	54
4.2.6.1. Beton numunelerinin ve deney düzeneğinin hazırlanması	54
4.2.6.2. Çeliğin beton içindeki denge potansiyelinin ölçülmesi	58

4.2.6.3. Çeliğin beton içinde katodik polarizasyonunun belirlenmesi için deney düzeneği	58
4.2.6.4. Katodik polarizasyon deneyinin yapılışı	59
5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	61
5.1. Yeraltı Suyu Numunelerinin Analiz Sonuçları	61
5.2. Doygun Kalsiyum Hidroksit Ortamında Yapılan Deneyler	64
5.3. Beton Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler	68
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	74
KAYNAKLAR	78



SİMGELER

A	:	Amper
E_a	:	Anot potansiyeli (V)
E_c	:	Katot potansiyeli (V)
E_{cor}	:	Korozyon potansiyeli (V)
I	:	Akım (A)
\dot{I}_{cor}	:	Korozyon hızı (A / m ²)
\dot{I}_{cp}	:	Katodik koruma akım ihtiyacı (A / m ²)
ipy	:	Yıl başına parmak (25.4 mm) cinsinden aşınma
l	:	Litre
M	:	Molar
mdd	:	Korozyon hızı (Gün ve desimetrekare başına miligram)
N	:	Normal
pcy	:	Pound Cubic Yard (pound/yrđ ³)
ppm	:	Milyonda kısım (ağırlık olarak)
R	:	Direnç (Ω)
SCE	:	Doygun kalomel elektrot
V	:	Volt
η	:	İki polarizasyon değeri arasındaki potansiyel farkı (mV)
γ	:	Ortalama iyon aktiflik katsayısı

1. GİRİŞ

En önemli inşaat malzelesi olan beton, özellikle dış etkilere karşı da dayanıklı olma özelliğinden dolayı konut yapımından yol ve baraj yapımına kadar çok geniş bir alanda uygulama imkanı bulmaktadır. Basınca karşı mukavemeti oldukça yüksek olan betonun, çekmeye karşı oldukça düşük olan mukavemetini telafi üzere çelik takviyeler kullanılmaktadır.

Betonarme yapılarda kullanılan bu çelik çubukların, yapı güvenliği açısından paslanmadan uzun süre aynı şekilde kalmaları istenir. Aksi halde beton çeliği yüzeylerinde oluşan pas, yalnız çeliğin gücünü kaybettirmekle kalmayıp, aynı zamanda hacim genişlemesine ve dolayısıyla betonda içsel gerilmelere ve hatta parçalanmalara sebep olmaktadır.

Çeşitli kimyasal madde ve bileşiklerle (asit, baz vb.) temas etmeyen betonarme yapılardaki betonarme demirlerinde önemli bir korozyon problemi söz konusu olmamaktadır. Bu durum betonun alkali özelliği sebebi ile demirin kısa sürede pasifleşmesinden ileri gelmektedir.

Betonun âlkali özelliği, portland çimentosu bileşiklerinin hidrolizi sonucu ortaya çıkmaktadır. Portland çimentosu klinkerlerinin minerolojik bileşiminde başlıca kalsiyum silikat ve alüminatlar bulunmaktadır. Bu bileşikler su ile reaksiyona girdiklerinde sağlam yapılı kristaller oluşmaktadır. Bu sırada hidroliz sonucu kalsiyum hidroksit de meydana gelmektedir. Betonun prizi sırasında, bu kalsiyum hidroksit beton boşlukları içinde doygun çözelti halinde bulunmaktadır. Bunun sonucu olarak betonun pH değeri yaklaşık 12 civarında bulunmaktadır. Bu âlkali ortam betonarme demirlerinin kısa sürede pasifleşmesine sebep olmaktadır.

Bu pasifliği bozucu en önemli etkenler, pH değerinin düşmesi, beton bünyesine atmosferden oksijen difüzyonu ve klorür iyonlarıdır. Oksijen girişinin pasif-

liği bozacak oranda olmadığı yüksek alkali ortamlarda bir miktar klorürün bulunması pasifliği bozucu etki yapıp betonarme donatısının korozyonuna sebep olmaktadır.

Konya II. Organize Sanayi Bölgesi zemin ve yüksek zemin suyu hem beton hem de betonarme çelikleri üzerinde korozif etkiler yapabilecek derecede tuzluluk ve sodyumluluk özelliklerine sahiptir. Muhtelif zamanlarda yapılan toprak ve su analizlerinde pasifliği bozucu etkisi olan klorür iyonu miktarının, kriterlerin 40-50 katına kadar çıkabildiği görülmüştür.

Bu durum bölgede yapılacak betonarme yapıları tehdit ettiği gibi altyapı hizmetlerinin bölgeye uygulanmasında da çok ciddi problemler çıkaracaktır.

Yapmış olduğumuz çalışmada bölge zemin suyu içerisindeki klorür iyonunun betonarme demirlerinin korozyonu üzerine etkileri incelenmiş ve alınabilecek tedbirler araştırılmıştır.

Bölge zemin suyunda bulunan klorür iyonlarının betonarme demirlerinin korozyonu üzerine etkilerini belirlemek üzere iki grup deney yapılmıştır.

1- Karşılaştırma yapabilmek amacıyla çeliğin, kalsiyum hidroksitle doygun bölge zemin suyu, şehir şebeke suyu ve saf su çözeltilerindeki potansiyel değişimi ölçümleri yapılarak klorür konsantrasyonu ile denge potansiyelleri arasındaki bağıntı incelenmiştir.

2- Beton bloklar içine konulan çelik çubukların, düşük (karma suyu şehir şebeke suyu olan) ve yüksek (karma veya temas suyu bölge zemin suyu olan) konsantrasyonları altında korozyonları incelenmiştir. Beton bloklar, (oda sıcaklığında) atmosferde 29 gün bekletilmiş ve betonarme çelik potansiyellerinin dengeli hale gelmesi sağlanmışır. Daha sonra dıştan bir doğru akım uygulanarak galvanostatik metodla çeliğin katodik polarizasyon eğrisi elde edilmiştir.

Böylece hem denge potansiyellerine bakarak kalitatif bilgiler elde edilmiş, hem de çeliğin korozyon hızı ve katodik koruma akım ihtiyacının belirlenmesine çalışılmışır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde, beton içindeki çeliğin korozyonu üzerinde yapılan çalışmalarda iki farklı deney metodu tatbik edilmektedir.

1- Elektrolit olarak doygun kalsiyum hidroksit [$\text{Ca}(\text{OH})_2$ veya sönmüş kireç] çözeltisi kullanılarak yapılan deneyler.

2- Beton ortamında yapılan deneyler.

Beton, çimento + agrega + su karışımından oluşan heterojen yapıda bir katı ortamdır. Beton boşlukları içinde sıvı halde su ve hava bulunur. Betonun sertleşmesi sırasında su + çimento reaksiyonu sonucu kalsiyum hidroksit oluşur. Bu sebeple sertleşmiş beton boşluklarında bulunan su kalsiyum hidroksite doygun çözelti halindedir ve betonarme çelikleri bu çözelti ile temas halindedir.

Çeliğin beton içindeki korozyon reaksiyonunu incelemek, betonun heterojen yapıda oluşu sebebiyle oldukça güçtür. Beton içine atmosferden oksijen difüzyonu, betonun permeabilite, rutubet vb. fiziksel özelliklerine bağlıdır. Bu özellikleri kontrol altında tutabilmek oldukça güçtür. Bu sebeple literatürde beton yerine genellikle daha kolay kontrol edilebilen doygun kireç çözeltisi kullanılması yolu tercih edilmektedir.

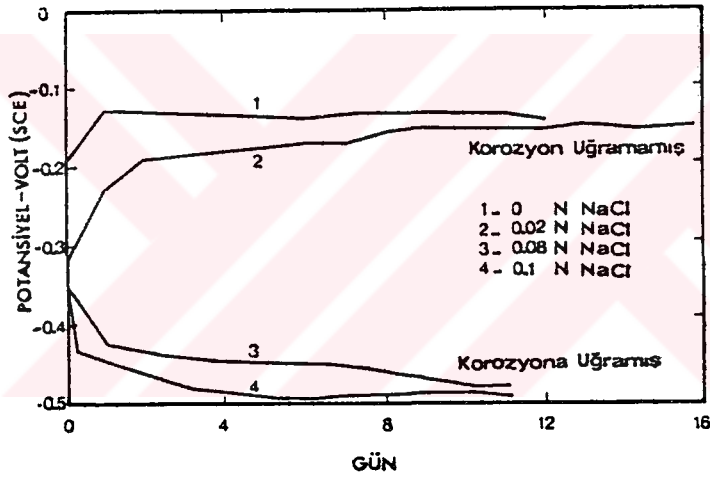
Beton içindeki çeliğin korozyonunun elektrokimyası üzerine ilk çalışmalar Hausmann (1) tarafından yapılmıştır. Araştırmacı 400 adet çelik numunesini, pH'ı 11.6-13.2 arasında, klorür iyonu içeren ve içermeyen doygun kireç çözeltisi içinde deneye tabi tutmuştur. Deneyler çözeltiden sürekli oksijen geçirilerek doygun oksijen ortamında yapılmıştır. Çelik elektrodun potansiyelindeki değişim 12 gün süre ile kontrol edilmiştir. Bu deneylerden aşağıdaki sonuçlara varılmıştır :

1- Çelik pasifleştikçe potansiyeli daha pozitif yöne doğru kaymaktadır. Pasif halde olan çeliğin potansiyeli -100 mV ile -200 mV (SCE Doygun kalomel elektroda

göre) arasındadır. (Bu değerler bakır - bakır sülfat referans elektroduna göre -160 mV ile - 260 mV'a karşı gelir). Eğer beton içinde klorür iyonları yoksa pasif halde potansiyel değeri -300 mV'a kadar düşmektedir.

2- Klorürlü ortamlarda pasif tabaka kırıldığı zaman (yaklaşık 7 gün sonra) potansiyelde ani bir düşüş olmaktadır. Bu andan itibaren korozyon başlamaktadır.

3- Korozyona uğrayan çelik ile uğramayan çeliğin potansiyelleri arasında yaklaşık 300 mV kadar bir fark oluşmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1- Doygun kireç çözeltisi (oksijene doymun ortamda) içine daldırılmış olan çelik çubukların korozyon potansiyeli değişimi.

4- Çeliğin beton içinde veya eşdeğer âlkali çözelti içindeki yerel hücre korozyonu, katot yüzeyine yeterli oksijen difüzyonu ve klorür iyonu olmadıkça gerçekleşmemektedir.

5- Çeliğin beton içindeki korozyonu için ortamda en az 700 (mg/l) ppm klorür iyonu bulunması gerekmektedir. Eğer katot bölgesinde yeterli oksijen yoksa, bu değer-

den daha yüksek klorür konsantrasyonlarında da korozyon olayı meydana gelmemektedir.

6- Klorürlü veya klorürsüz doymuş kireç çözeltisi içinde korozyona uğramayan çeliğin potansiyeli doymuş kalomel elektroda göre -100 mV ile -200 mV arasında kalmaktadır. Oksijen bulunuşunun bu potansiyel değeri civarında belirli bir etkisi olmamaktadır.

7- Doymuş kireç çözeltisi içinde bulunan pasifleşmiş çelik yüzeyindeki oksit filmi, potansiyel -300 mV'dan -400 mV'a düştüğü anda bozulmaktadır.

Hausmann (1), beton bloklar içinde bulunan çelik çubuklara bir dış akım uygulayarak yapmış olduğu deneylerde katodik koruma için gerekli olan akım ve potansiyel kriterlerini incelemiştir. Araştırmacı betonun, yüksek âlkali karakteri sebebiyle çeliğin doğal olarak korunduğunu, bu nedenle katodik koruma akım ihtiyacının çok azaldığını ileri sürmüştür. Araştırmacının varmış olduğu sonuçlar şöyledir.

1- Beton içine konulan çelik, eğer beton zemin içinde veya deniz suyu içinde ise korozyona karşı korunabilir. Bu durumda oksijen veya klorür iyonunun çelik yüzeyine difüze olabilmesi ancak beton kabuğun fiziksel olarak kırılması ile mümkün olabilir.

2- Beton içindeki çelik, bakır - bakır sülfat ($\text{Cu} / \text{CuSO}_4$) referans elektroduna göre +0.6 V ile -1.0 V aralığında betonun omik direnci sebebiyle korozyon akımlarına karşı dayanıklıdır.

3- Eğer sağlam durumda olan bir beton yapı içindeki çelik katodik olarak korunacak olursa, akım ihtiyacı başlangıçta 1 mA/m^2 civarındadır. Bu değer zamanla polarizasyon etkisiyle büyük ölçüde azalır.

4- Beton içinde bulunan çelik için katodik koruma yapılmasına gerek olmayabilir. Fakat katodik interferans etkisini önlemek üzere katodik koruma yapılması gerekir.

Scott (2), çimento kum oranı = 1/2 olacak şekilde hazırlanmış beton içine çelik çubuklar yerleştirerek, betonda 7 gün süreyle bekletmiştir. Daha sonra bu beton % 1'lik sodyum klorür çözeltisi içeren bir tank içine konulmuştur. Çelik çubukların birine anodik diğerine katodik yönde dış akım uygulanmıştır. Akım yoğunluğu 0, 20, 50, 100, 150 ve 200 mA/m²'de sabit tutularak potansiyel değerleri okunmuştur. Araştırmacı galvanostatik metodla elde ettiği polarizasyon eğrilerinden aşağıdaki sonuçları çıkarmıştır :

1- Beton, oksijensiz ortamlarda çeliği korozyona karşı korumaktadır. Oksijen bulunmadığı sürece, zemin ve su içinde bulunan anyonların zararlı bir etkisi olmamaktadır. Beton, rutubetin, oksijenin ve anyonların çelik yüzeyine temasını güçleştirmektedir.

2- Çeliği katodik olarak -1.0 V'den (SCE) daha fazla polarize edecek şekilde bir dış akım uygulandığı zaman hidrojen gazı çıkışı olur. Bu durumda beton içinde bulunan çelik çubuk, pH'ı 12.5 olan bir oksijen elektrot gibi davranır.

3- Çeliği anodik olarak 0.64 V (SCE)'den daha fazla polarize edecek olursak, oksijen çıkışı meydana gelir. Bu durumda beton içinde bulunan çelik çubuk, pH'ı 12.5 olan bir hidrojen elektrot gibi davranır.

4- Çeliğin beton içindeki korozyonu, doymuş kireç çözeltisi içindeki korozyonuna benzer özelliktedir. Betonun çeliği koruma etkisi, beton içinde hidroliz sonucu oluşan kalsiyum hidroksitten ileri gelmektedir. Bu bileşik demir yüzeyi üzerinde oksit tabakası oluşturarak metalin çevresi ile temasını önlemektedir.

5- Katodik interferans mevcudiyeti hariç beton içinde bulunan çeliğin katodik olarak korunmasına gerek yoktur. Katodik korumanın ancak beton kaplamanın bozuk olduğu bölgelerde ve yapının potansiyelini -0.65 V ile -0.75 V olacak şekilde polarize eden yeterli miktarda akım uygulayarak yapılmasına müsaade edilebilir.

Wheat ve Eliezer (3), çeliğin beton içindeki korozyon potansiyelinin (E_{cor}) za-

mana göre değişimini potansiyostatik ve potansiyodinamik metodlar kullanarak incelemişlerdir.

Deneyleerde beton bloklar % 10'luk sodyum klorür çözeltilisi içine konularak polarize edilmişlerdir. Bu deneylerden şu sonuçlara varılmıştır :

1- Beton numuneleri aynı bileşimde ve aynı şartlarda hazırlandığı halde, betonun yapısı ve özellikle geçirgenliği birbirinden farklı olmaktadır. Bu durum beton içinde bulunan çeliğin korozyon durumuna da etki yapmaktadır. Buna rağmen, uzun süre tuzlu su içerisinde bekletilen numunelerde, çelik yüzeyinde yeterli kalınlıkta bir korozyon ürünü oluştuğu için yukarıda sözü edilen farklılık azalmaktadır.

2- Korozyon potansiyeli değişimi, deneyin yapılış tarzına göre (pasif halden aktif hale geçiş veya tersi) değişik sonuç vermektedir.

3- Korozyon potansiyellerinin bütün numunelerde aynı şartlarda ölçülmesi, sonuçların birbirleriyle karşılaştırılması bakımından büyük önem taşımaktadır. Aksi halde korozyon potansiyellerinin daha negatif olması halinde bu durumun, pasif filmin kırılışı sonucu mu veya daha fazla oksijen difüzyonu sonucu mu ileri geldiğini belirlemek de mümkün olmaz.

Araştırmacılar yapmış oldukları deney sonunda beton içindeki çeliğin aktif ve pasif korozyon potansiyellerini de belirlemişlerdir. Bu konuda varılan sonuçlar şöyle özetlenebilir :

1- Genellikle daha pozitif olan korozyon potansiyeli çeliğin daha pasif durumda olduğunun göstergesidir. Daha negatif potansiyeller ise çeliğin aktif durumda olduğunu ifade eder.

2- Bütün hallerde doğru olmamakla beraber, korozyon potansiyeli ile aktif - pasif hal arasında aşağıdaki bağıntı mevcuttur.

Potansiyel > -300 mV daha pasif

Potansiyel < -300 mV daha aktif

3- Deney sonunda anot - katot yüzey alanları değişikliğe uğradığından bu metodla kantitatif sonuçlara varmak mümkün olmamaktadır.

Wheat ve Eliezer (4), su / çimento oranı 0.46 olan ve pas payları 152.4 mm (6 in) ile 76.2 mm (3 in) olan 60 adet beton numunesi içine yerleştirdikleri çelik çubukların potansiyellerini ölçmüşlerdir. Bu numunelerin, haftada 5 gün % 3.5'lük NaCl (Sodyum klorür) çözeltisinde ve 2 gün de kuru olacak şekilde 18 ay süreyle potansiyelleri ölçülmüştür.

Yapılan çalışmalar sonunda pas payı 152.4 mm olan numune potansiyellerinin -305 mV'den daha pozitif ve pas payı 76.2 mm olan numune potansiyellerinin -382 mV'den daha negatif olduğunu gözlemişlerdir. Beton içine giren klorürün korozyon etkisiyle, pH ve O_2 (oksijen) arasında herhangi bir bağ bulunamamıştır. Yüksek pH derecelerinde bile az miktardaki klorürün pasifliği bozduğunu gözlemişlerdir.

Stratfull (5), beton içinde bulunan çeliğin korozyon potansiyellerine dayanarak çeliğin korozyonu hakkında fikir edinilebileceğini ileri sürmüştür. Araştırmacı yaptığı deneyler sonucu korozyon potansiyeline bağlı olarak çeliğin durumunu aşağıdaki şekilde yorumlamıştır.

Tablo 2.1 Korozyon Potansiyellerine bağlı olarak çeliğin durumu

E_{cor} (mV) (SCE elektroduna göre)	Çeliğin Durumu
> -220	Pasif
< -220 ile > -350	Geçiş bölgesi
< -350	Aktif

Van Daveer (6), beton içinde bulunan çeliğin korozyon potansiyellerine dayanarak çeliğin korozyonu hakkında fikir edinilebileceğini ileri sürmüştür. Araştırmacı korozyon potansiyelleri değerleriyle çeliğin durumunu aşağıdaki şekilde yorumlamıştır.

Tablo 2.2 Korozyon potansiyeline bağlı olarak çeliğin durumunun değişimi

E_{cor} (mV) (SCE elektroduna göre)	Çeliğin Durumu
> -0.220	Pasif
< -0.220 ile > -0.270	Aktif veya Pasif
< -0.270	Aktif

Arup (7), çeliğin beton içindeki korozyonu için dört hal belirlemiştir :

1- Pasif hal:

Klorürün mevcut olmadığı durumlarda ve pH'ı 13.0 olduğunda beton pasif haldedir. Bu şartlarda beton içindeki çeliğin korozyon potansiyeli genellikle +100 mV ile -200 mV (SCE) arasında bulunmaktadır.

2- Çukur korozyonu:

Çukur korozyonu beton içinde yeterli konsantrasyonda klorür iyonu bulunması halinde meydana gelir. Bu durumda çeliğin korozyon potansiyeli -200 mV ile -500 mV (SCE) arasında kalır.

3- Genel korozyon:

Karbonatlaşma sonucu veya aşırı klorür etkisi ile çelik pasiflik özelliğini kaybeder. Bu durumda korozyon potansiyeli oldukça negatiftir. Tipik olarak çelik potansiyeli -450 mV ile -600 mV (SCE) arasında bulunur.

4- Aktif hal:

Fazla miktarda oksijen difuzyonu söz konusu olan ortamlarda çelik pasif halini koruyamaz. Yüksek âlkali ortamda aktif halde olan bir çeliğin potansiyeli -100 mV (SCE) değerine kadar düşer.

Monfore ve Verbeck (8) yaptıkları çalışmada, betonda öngerilimli çelik çubukların korozyonu üzerine etki yapan faktörleri incelemişlerdir. İçerisinde kalsiyum klorür bulunan bir beton numunesi hazırlayarak iki yıllık bir süre sonunda çalışmalarının sonuçlarını almışlardır. Bu çalışmaların sonunda betonda %3-4 veya daha fazla kalsiyum klorür kullanıldığında çelik çubuk üzerinde önemli derecede korozyonun olduğu ve korozyona uğrayan çubuklarda kırılmaların meydana geldiği görülmüştür. Buna göre; normal şartlar altında , portland çimentosundan yapılan betonda çelik çubukların korozyona uğramadığını ancak ortama klorür iyonu eklendiğinde, korozyonun meydana geldiği sonucuna varmışlardır. Bu tür yapılarda klorürün çelik üzerinde kesinlikle zararlı olduğunu belirlemişlerdir.

Griffin (9), deniz suyu etkisinde kalan betonarme çeliklerin korozyonunu incelemek üzere bir seri deney yapmıştır. Hazırlamış olduğu numuneleri açık havada bekletmiş ve hergün beş dakika süreyle beton numuneleri üzerine deniz suyu püskürtmüştür. Bu işleme, korozyon sonucu beton plâkalarda çatlama oluşuncaya kadar devam etmiştir. Deney sonunda agrega cinsinin, su/çimento oranının, beton kalınlığının ve çimento dozajının korozyon üzerine etkisini incelemiş ve aşağıdaki sonuçları çıkartmıştır.

- 1- Beton içinde çimento dozajı arttıkça korozyon azalmaktadır.
- 2- Beton geçirgenliği azaldıkça korozyon azalmaktadır.
- 3- Betonarme çeliği üzerindeki 25mm beton kalınlığının yetersiz olduğu görülerek, kalınlığın 25 - 150 mm arasında olması gerektiği uygun görülmüştür. Ancak 150 mm kalınlığın bile betonarme çeliklerini korozyondan korumak için yeterli olmadığı ileri sürülmüştür.

Lewis ve Copenhagen (10), beton içindeki çeliğin korozyon derecesini çabuk bir şekilde belirlemek üzere tuz püskürtme kabinleri içinde deney yapmışlardır. Betonun su/çimento oranı ve kür süresinin korozyon hızı üzerine etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, beton yüzeyinin uygun bir malzeme ile kaplanması sonucu korozyonun büyük ölçüde azaltılabildiğini göstermişlerdir. Ayrıca beton yapısı ne kadar geçirimsiz ise betonarme demirlerinin korozyonunun da o derece azaldığı ortaya konulmuştur. Araştırmacılar korozyonu önlemek amacıyla katodik koruma veya inhibitör kullanılmasının uygun olmadığını ileri sürmüşlerdir.

Cornet ve Bresler (11), betonarme demiri olarak normal çelik ve galvanizlenmiş çelik kullanarak bir seri beton numunesi hazırlamışlar ve % 4'lük sodyum klorür çözeltisi içinde tutmuşlardır. Numunelerin bir kısmına anodik akım uygulanmış, diğerleri periyodik olarak çözelti içinde ve havada tutulmuştur. Deney sonunda çelik çubuklar çekme gerilimi deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler sonunda, galvanize çeliğin beton içindeki korozyonunun normal çelikten daha az olduğu sonucuna varılmıştır.

Stratfull (12), tuzlu su etkisinde kalan bir betonarme köprüde yapmış olduğu potansiyel ölçümleri ile makro galvanik korozyon hücrelerinin oluşumunu incelemiştir. Beton yapıda anodik bölgelerin oluşması için başlıca iki faktörün rol oynadığını göstermiştir. Bunları ;

a- Rutubetin yüksek olduğu,

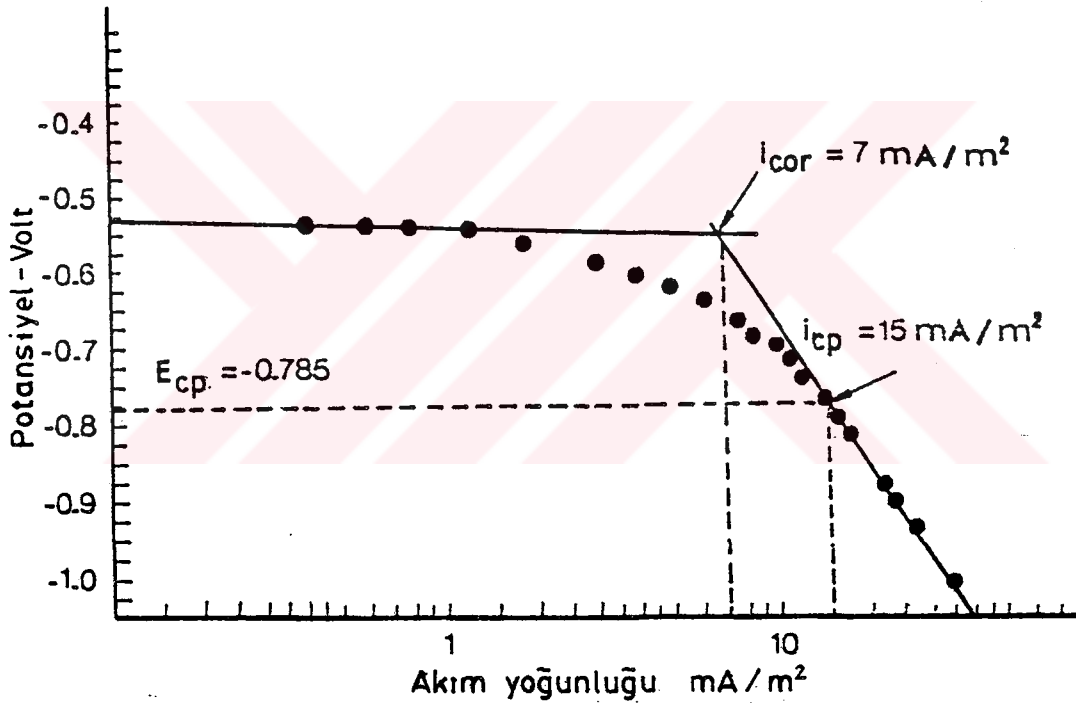
b- Tuz yüzdesinin arttığı bölgeler

olarak belirlemiştir. Betonarme demirlerinin korozyonunu önlemek üzere, betonun porozitesinin minimum olması ve demir üzerindeki beton kalınlığının maksimum olması gerektiğini ileri sürmüştür. Araştırmacı yapmış olduğu potansiyel ölçümleri sonunda çeliğin korozyonunun makro galvanik hücrelerin etkisi ile meydana geldiğini göstermiştir.

Mudd ve arkadaşları (13), betonarme çeliklerindeki korozyonu önlemek üzere

katodik koruma uygulamışlardır. Bileşimi klorür / çimento = 0.02 olacak şekilde hazırlanmış olan beton numunelerinde katodik koruma akım ihtiyacını belirlemek üzere polarizasyon eğrileri çizmişlerdir (Şekil 2.2).

Bu deney sonunda korozyon akımı $i_{cor} = 6.8 \text{ mA/m}^2$, katodik koruma akım ihtiyacı da $i_{cp} = 12 - 16 \text{ mA/m}^2$ olarak belirlenmiştir. Katodik koruma potansiyeli, -600 mV ile -800 mV (SCE) arasında bulunmuştur. Ayrıca çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır :



Şekil 2.2- Beton içindeki çeliğin katodik polarizasyon eğrisi

1- Katodik koruma uygulandığında beton içinde bulunan klorür iyonları katot-tan anoda doğru hareket ederek anot bölgesinde toplanmaktadır.

2- Öngörülen akımın iki katı akım yoğunluğu ile iki yıllık uygulama sonunda

betonda hiçbir hasar meydana gelmemiştir.

Loto ve Odumbo (14), karışımında NaCl (Sodyum klorür) bulunan ve bulunmayan beton bloklarda değişik deneyler yapmışlar ve beton içindeki çeliğin potansiyellerini ölçmüşlerdir.

Betonlar 100 x 100 x 160 mm ebadında dökülmüş ve bu blokların ortalarına 14 mm çapında yumuşak çelik yerleştirilmiştir. Bünyesinde NaCl bulunmayan beton bloklar dört ayrı şekilde dökülmüştür.

- NaCl yok,
- NaCl yok, çelik boyandıktan sonra döküm yapılmış,
- NaCl yok, çelik boyanmamış, beton blok dıştan tamamen boyanmış,
- NaCl yok, çelik boyandıktan sonra döküm yapılmış, beton blok dıştan tamamen boyanmış.

Boya olarak içinde çinko bulunan epoksi reçinesi kullanılmıştır. Bloklar, 0.2M NaHCO₃ (sodyum bikarbonat), 1M NaCl (sodyum klorür), deniz suyu ve şebeke suyuna konulmuş ve potansiyelleri ölçülmüştür. Araştırmacılar yapmış oldukları deneylerde şu sonuçlara varmışlardır.

1- İçinde klorür, sülfat ve karbonat iyonları gibi aktifleştirici iyonlar bulunan deniz suyu ortamında, çeliğin korozyonu şiddetlidir.

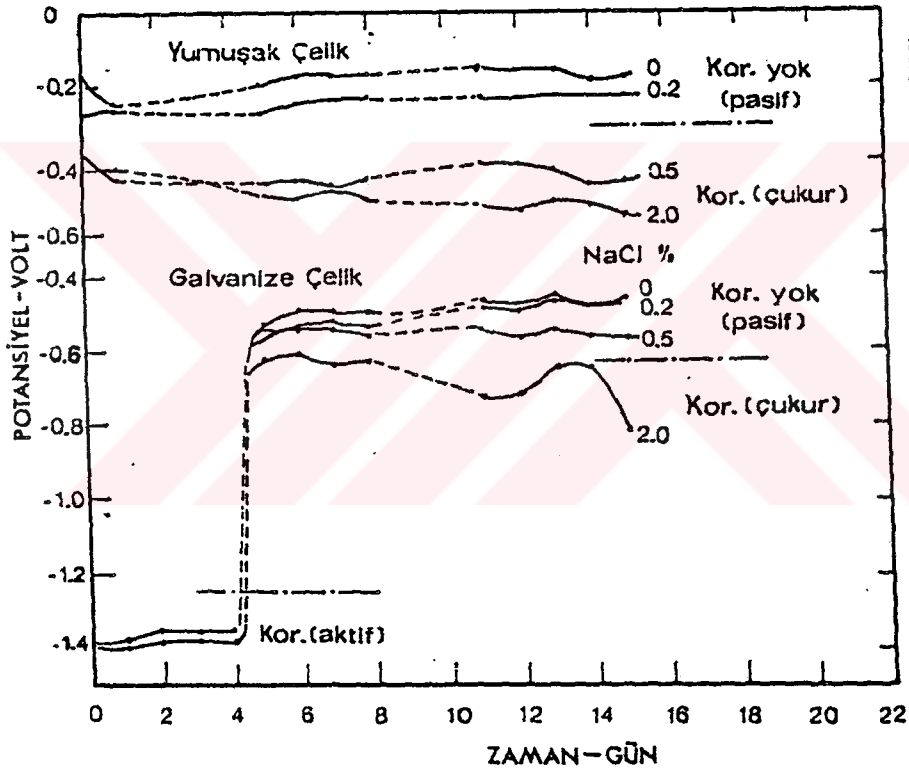
2- Boyanarak beton içine yerleştirilen çelik önemli ölçüde korunmaktadır. Beton blokun dıştan boyanmasıyla çeliğin daha iyi korunduğu gözlenmiştir. Her iki halin birarada bulunması çeliğin korunması için en iyi sonucu vermiştir.

3- Geniş anlamda, beton içindeki çeliğin korozyonu, çelik için aktiflik özelliği veren sulu çözeltilerde olmaktadır.

Cornet ve Arkadaşları (15), yaptıkları çalışmada belirli konsantrasyonlarda sodyum klorür içeren doygun kalsiyum hidroksit çözeltisi içinde çeliğin korozyonunu

incelemiştirler.

Araştırmacılar yumuşak çelik ve galvanize çelik numunelerinin %0, %0.2, %0.5 ve %2 oranlarında NaCl içeren çözeltiler içinde 15 gün süre ile potansiyel değişimini incelemiştirler. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3- Yumuşak ve galvanize çeliğin potansiyelinin zamanla değişimi

Grafikten de anlaşılacağı üzere, çelik numunesi %0.2'den daha yüksek konsantrasyonlu çözeltilerde aktif hale gelmiştir. Galvanizli çelik ise, %0.5 NaCl konsantrasyonuna kadar pasif halini koruyabilmiştir.

Wyatt ve Irwine (16), klorürlü ortamlarda beton içindeki çeliği korozyondan

koruyabilmek için tek metodun katodik koruma olduğunu ileri sürmüşlerdir. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışmalardan aşağıdaki sonuçları çıkarmışlardır.

1- Beton içindeki çeliğin korozyonuna etki yapan en önemli faktör beton içine klorür iyonu karışması ve karbondioksit etkisi ile beton içinde bulunan kalsiyum hidroksitinin karbonatlaşma olayıdır.

2- Beton içinde klorür bulunması halinde korozyonu önlemek için en uygun metod katodik korumadır.

3- Önceden korozyona uğramış betonarme demirlerine de katodik koruma uygulanarak korozyon kesin şekilde önlenir.

West ve Hime (17) yapmış oldukları çalışmada, klorürlü ortamlarda yüzeye olan uzaklığa bağlı olarak beton içine klorür iyonu difüzyonunu incelemişlerdir. Yapılan deneylerde beton içindeki klorür konsantrasyonunun yaklaşık 25 mm derinlikte maksimum değere eriştiğini gözlemişlerdir (Şekil 2.4).

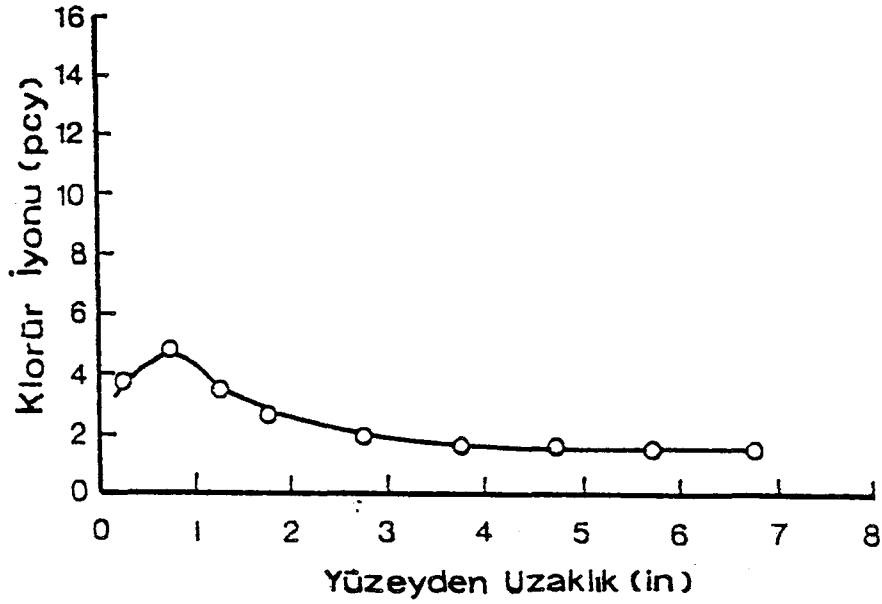
Klorür konsantrasyonu 150 mm'den sonra artık sabit kalmaktadır. Araştırmacılar deneylerden aşağıdaki sonuçları çıkarmışlardır.

1- Beton bünyesine klorür difüzyonu betonun yapısına ve homojenliğine göre değişmektedir.

2- Beton içine klorür difüzyon profili belirli bir mesafeden sonra yaklaşık olarak aynı kalmaktadır.

3- Katodik koruma uygulandığında klorür iyonları katottan anoda doğru göç etmektedir.

4- Klorür iyonu difüzyon katsayısı yardımıyla betonarme demirlerinin korozyon hızını tahmin edebilmek mümkündür.



Şekil 2.4- Kaplamasız betonda klorür iyonu konsantrasyonunun derinlikle değişimi

Doğan (18), değişik oranlarda sodyum klorür içeren ve içermeyen kalsiyum hidroksit çözeltilerine koyduğu betonarme çeliğinin potansiyel değişimini incelemiştir (Şekil 2.5). Ayrıca araştırmacı içinde 1826 mg/l klorür iyonu bulunan karma suyu ve su / çimento oranı 0.6 olan beton numunesi içindeki çeliğin katodik koruma ihtiyacını da incelemiştir. Araştırmacının varmış olduğu sonuçlar şöyledir :

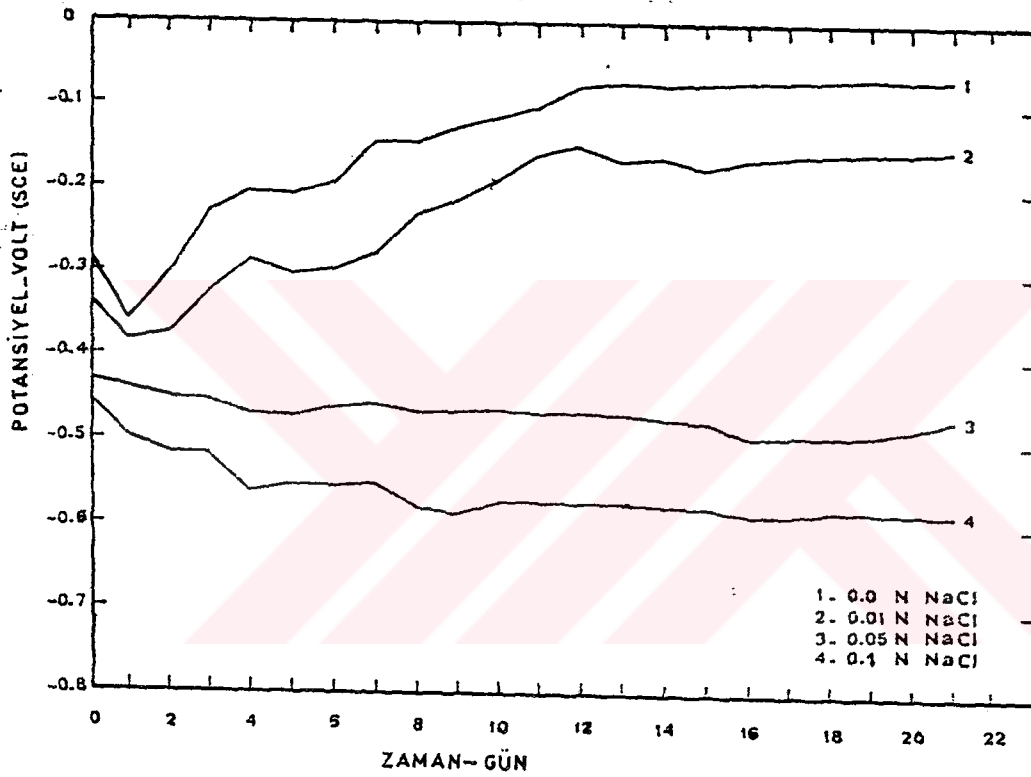
1- Beton içinde bulunan çelik, betonun yüksek âlkalinitesi nedeniyle pasif hale gelmektedir. Oksijenin bulunup bulunmayışı pasifliği etkilemektedir.

2- Beton bünyesinde belirli miktarda klorür bulunuşu çeliğin pasifliğinin bozulmasına sebep olmaktadır. Ancak 350 mg/l ve daha az miktardaki klorür pasifliği bozmak için yeterli olmamaktadır.

3- Çeliğin potansiyel değeri, aktif veya pasif bölgede bulunduğu hakkında kalitatif bir fikir verebilmektedir. Potansiyel pasif halde -0.150 V'den daha pozitif, ak-

tif halde -0.450 V'den daha negatif durumdadır.

4- Klorürlü ortamda çeliğin korozyon hızı ve katodik koruma akım ihtiyacı oldukça yüksektir ($\dot{I}_{cor} = 2.5 \text{ mA/m}^2$, $\dot{I}_{cp} = 6 \text{ mA/m}^2$). Ancak bu değerlerin zamanla azalması mümkündür.



Şekil 2.5- Doymun kireç çözeltisindeki korozyon potansiyeli eğrileri

Hahin (19) portland çimentosuyla yaptığı deneylerde, betonun homojenliğinin, karışımın su / çimento oranının ve epoksi kaplamaların beton içindeki çeliğe olan etkilerini incelemiştir. Araştırmacı yaptığı deneylerde şu sonuçlara varmıştır :

1- Su / çimento oranı düşük (0.4 - 0.5) betonların mukavemetleri daha yüksek olmaktadır.

2- Betonun mümkün olduğunca homojen olmaması, ıslak veya kuru zamanlarda betondaki iyonların kimyasal konsantrasyonuna etki etmektedir ve bu durum değişik potansiyellere sahip korozyon hücrelerinin oluşumunu sağlamaktadır. Homojen bir karışımı olmayan betonda yükleme sırasında çatlaklar oluşmakta ve bu da çeliğin korozyona uğramasına sebep olmaktadır.

3- Beton, karışımındaki su oranı ağırlıkça en az % 4-8 ve portland çimentosu oranı da ağırlıkça % 10-16 olacak şekilde imal edilmelidir.

4- Çeliğin beton yüzeyine olan mesafesi (pas payı), korozyon ürünlerinin dışarıya doğru yayılmasına engel olacak şekilde alınmalıdır.

5- Epoksiyle kaplanmış çelikler, genelde önemli iyonik intrüzyonun meydana geldiği yerlerde ve pas payının az olduğu yerlerde kullanılabilirler.

3. ELEKTROLİTİK KOROZYON TEORİSİ VE ÇELİĞİN BETON İÇİNDEKİ KOROZYONU

3.1. Korozyon

Metallerin, birkaç istisna dışında hemen hemen tümü tabiatta bileşik halinde bulunurlar. Başka bir deyişle metallerin en kararlı şekilleri bileşik halleridir. Bu bileşiklerden üretilen metal ve alaşımların tekrar kararlı halleri olan bileşik haline dönme eğilimleri yüksektir. Bunun sonucu olarak metaller içinde buldukları ortamın elemanları ile reaksiyona girerek, önce iyonik hale ve oradan da ortamdaki başka elementlerle birleşerek bileşik haline dönmeye çalışırlar, yani kimyasal değişime uğrarlar ve bozunurlar (20).

Geniş anlamda korozyon, katı maddelerin çeşitli etkiler altında dıştan içe doğru ilerleyen aşınmasıdır. Bir metalin korozyonu denilince onu elementel halden, ya çözülmüş veya yüzey tabakası halinde bir bileşiğe dönüştüren tepkimelerin tümü ile metalin aşınması anlaşılır.

Korozyonun aslı hemen hemen her yerde aynıdır. Bu olay, elektrik akımını geçirebilen ve elektrolit dediğimiz bir çözelti aracılığı ile bir metal yüzeyinin bazı bölgeleri arasında elektrik akımı oluşması şeklindedir. Bu elektrokimyasal etki, bir metalin anot denilen bölgelerinin aşınmasına sebep olur. Bu anot bölgelerinde elektrik akımı metali bırakır ve metal çözeltiliye girer.

Bir metal üzerinde pek çok sayıda anot ve katot bölgeleri bulunur. Korozyon olayı sırasında çözünen bölgeler anot bölgeleridir. Korozyon ilerledikçe anot bölgeleri yer değiştirir ve böylece metal yüzeyinin her tarafı aynı biçimde çözünür (21).

Korozyon, oluşumunu sağlayan reaksiyonun türüne göre kimyasal ve elektrokimyasal korozyon olmak üzere iki türdür. Kimyasal korozyon metal ve alaşımlarının

gaz ortamlar içindeki oksitlenmesidir. Metal ve alaşımlarının sulu ortamlar içinde bozunmaları ise elektrokimyasal korozyon olarak adlandırılır (22).

Beton imali sırasında ortaya çıkan kalsiyum hidroksit çözeltisi, betonun prizini almaya başlamasından sonra beton içindeki boşluklarda kalır. Bu çözelti, çelikle direkt temas ettiği için meydana gelecek olan korozyon da elektrokimyasal olarak kabul edilir (23).

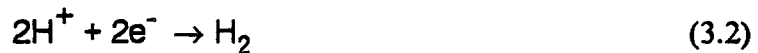
3.2. Elektrokimyasal Korozyon

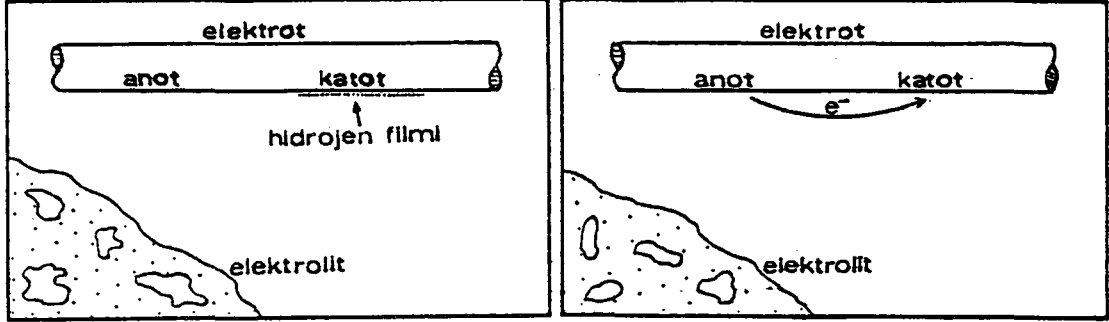
Sulu ortamlarda korozyon, demir ve elektrolit arasında elektron transferi ile beraber yürür. Elektrolit içine daldırılan metal yüzeyinde değişik potansiyellere sahip alanlar meydana gelebilir. Bu lokal potansiyel farklarından dolayı metal üzerinde elektronlar hareket eder. Çelik üzerinde elektronlar, potansiyeli pozitif olan bölgelerden negatif olan bölgelere doğru akar. Pozitif potansiyele sahip bölgeler anot, negatif potansiyele sahip olan bölgeler ise katot rolü oynar. Yeraltına konulmuş bir çelik boru üzerinde anot ve katot bölgelerinin oluşması Şekil 3.1'de görülmektedir (18).

Anotta demir metalinin elektrokimyasal oksidasyonla iyonlaşması aşağıdaki reaksiyonla gerçekleşir.



Bu reaksiyonda açığa çıkan elektron metal üzerinden katoda taşınır ve burada (Şekil 3.1) aşağıdaki reaksiyonlardan birinin gerçekleşmesine sebep olur (18).



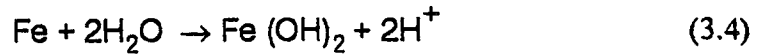


a) Katotta hidrojen filminin oluşması

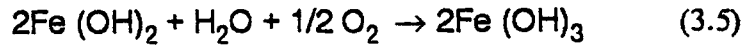
b) Hidrojen filminin bozulmasıyla korozyonun başlaması

Şekil 3.1. Bir yeraltı çelik boru hattında korozyon hücresinin oluşması.

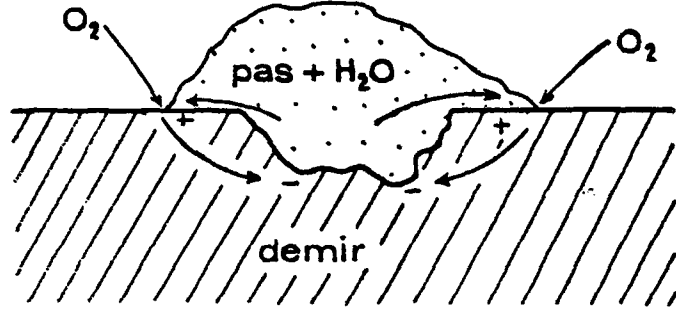
(3.2) numaralı reaksiyon oksijensiz ortamda, (3.3) numaralı reaksiyon da oksijenli ortamlarda meydana gelir. Bu reaksiyonlar, katodik reaksiyonlardır. Elektrotta meydana gelen bu anodik ve katodik reaksiyonlardan sonra demir, $Fe(OH)_2$ (veya $FeO \cdot nH_2O$) haline dönüşür.



Daha sonra da $Fe(OH)_3$ haline yükseltgenir. Bu da bizim pas dediğimiz haldir.

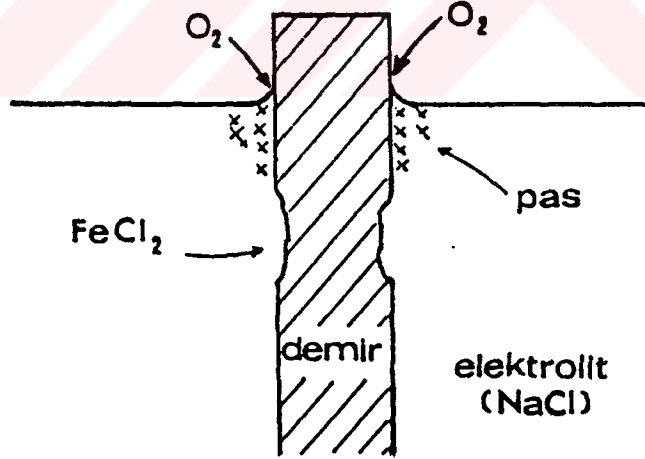


Bu reaksiyonlar sonucu anot bölgesinde yer yer paslanmalar meydana gelir. Bunun sonucu metal yüzeyi ince bir pas tabakası ile kaplanır (Şekil 3.2). Yüzeydeki bu pas tabakası korozyonun daha fazla devam etmesini önler (24).



Şekil 3.2- Demir yüzeyinde pasın oluşması

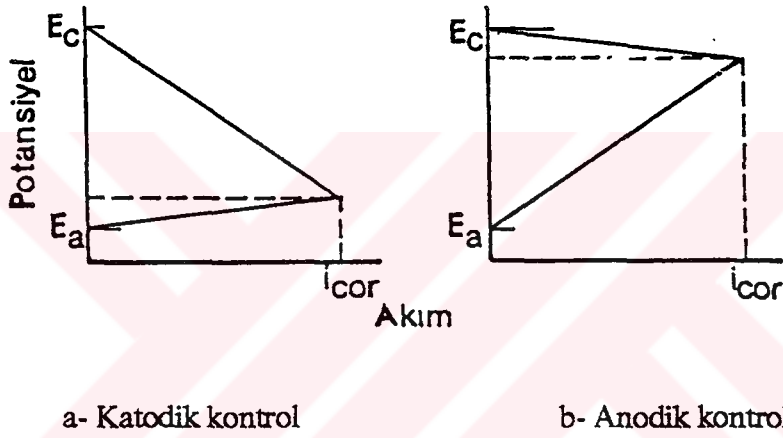
Bileşiminde sodyum klorür ihtiva eden bir elektrolit içerisinde ise, oksit tabakası klorür iyonları etkisi ile bozulur. Klorür iyonları demir üzerinde bir bölgede aşınma yaparak demirin sürekli olarak korozyona uğramasına sebep olur. Bu olay Şekil 3.3'de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.3- Sodyum klorürlü ortamda demirin korozyonu

Faraday yasasına göre, anotta ve katotta olan reaksiyonlar aynı anda ve eşdeğer miktarlarda meydana gelmelidir. Elektrot yüzeyinde meydana gelen galvanik

hücrede akımın geçişi ancak anot veya katot bölgelerindeki reaksiyonların herhangi birinin oluşmaması sebebiyle önlenir. Galvanik hücreden akımın geçişi, anot bölgesindeki reaksiyonlar tarafından kısıtlanıyorsa hücre anodik kontrol, tersi halinde ise katodik kontrol altındadır (18). Bu durumlar Şekil 3.4'de görülmektedir.



Şekil 3.4- Katodik ve Anodik kontrol altında olan hücreler

Bu şekiller, kendi halinde çözünen bir metalin şematik polarizasyon diyagramını göstermektedir. Katodik kontrol altındaki bir korozyon hücresinde metalin korozyon potansiyeli (E_{cor}) anot açık devre potansiyeline (E_a) daha yakındır. Bu halde metalin genel elektrokimyasal tutumu aktif olarak nitelenebilir. Anodik kontrol altındaki hücrelerde ise katot açık devre potansiyeline (E_c) daha yakındır. Bu durumda metalin genel elektrokimyasal tutumu için soy veya pasif deyimini kullanılır (25).

3.3. Akım - Potansiyel Eğrileri

Metallerin korozif bir ortamdaki davranışlarının elektrokimyasal kinetiği akım - potansiyel eğrileri yardımıyla elde edilebilir. Korozyona uğrayacağı belirlenen bir metalin korozyon hızı da akım - potansiyel eğrileri yardımıyla tayin edilebilir (22).

Akım - potansiyel eğrileri akım veya potansiyelden birinin kontrollü olarak değiştirilmesi ve buna karşı elde edilen diğer değişken değerlerin grafiğe geçirilmesi ile elde edilir.

Bir elektrolit içine daldırılan bir çelik elektrot yüzeyinde bir süre sonra denge potansiyeli oluşur. Oluşan bu potansiyel elektrot yüzeyinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlarla ilgilidir. Denge halindeki bir elektroda dışarıdan bir akım uygulanırsa, dengedeki reaksiyonlar yapılan etkinin büyüklüğü ve şiddetine bağlı olarak değişir.

Bir sistemde, sistemin oksidasyon akımının redüksiyon akımına eşit olduğu potansiyele denge potansiyeli adı verilir. Birden fazla reaksiyonun söz konusu olduğu ortamlarda toplam oksidasyon akımlarının, toplam redüksiyon akımlarına eşit olduğu potansiyele ise korozyon potansiyeli denir (18).

3.4 Akım - Potansiyel Eğrilerini Elde Etme Metodları

Deneysel olarak akım potansiyel eğrilerini belirlemek için iki metod vardır:

3.4.1. Potansiyostatik metod

Bu metodda potansiyel kontrol altında tutularak akım değişimi belirlenir. Üç

şekilde uygulaması vardır :

a- Yarı kararlı potansiyostatik metod: Basamak basamak değiştirilen potansiyel değerlerinde belirli bir süre beklenerek akım değerleri elde edilir.

b- Kararlı potansiyostatik metod: Potansiyel belirli bir değere kadar artırılarak, akımın sabit olması için beklenir. Akım sabitleşince potansiyel tekrar artırılır.

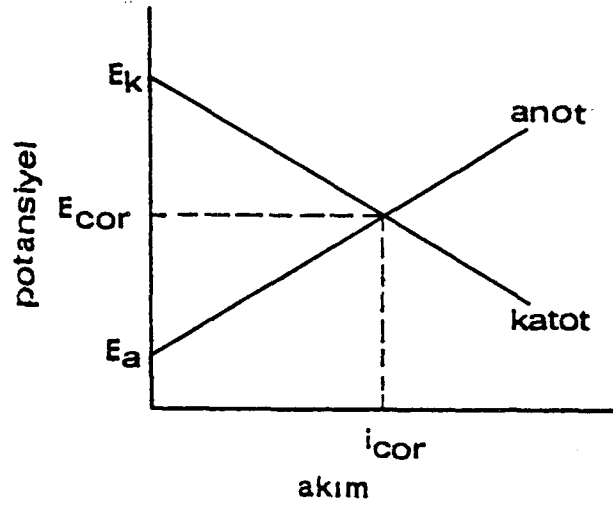
c- Potansiyodinamik metod: Potansiyel belirli bir hızda değiştirilerek akım değerleri okunur.

3.4.2. Galvanostatik metod

Bu metotta, akım yoğunluğu belli bir değerde sabit tutularak potansiyeldeki değişim gözlenir. Çok hızlı yürüyen reaksiyonlar için bu metodun uygulanması zorunludur (22).

3.5. Polarizasyon

Polarizasyon, bir elektroda dıştan uygulanan akımın sebep olduğu potansiyeldeki değişim olarak tanımlanmaktadır. Katodik koruma sistemleri, metalin katodik olarak polarize edilmesi ilkesine dayanır. Elektrot sistemine dışarıdan katodik bir akım uygulandığında polarizasyon söz konusu olur. Bu sırada metal yüzeyinde korozyon olayı varsa tamamen durdurulacak kadar akım verilecektir. Şekil 3.5'de anodik ve katodik polarizasyon eğrileri görülmektedir. Metale (I_{cor}) akımı uygulanarak (E_o) potansiyeline kadar polarize edilirse korozyon akımları tam olarak yok olur (24).



Şekil 3.5- Anodik ve katodik polarizasyon eğrileri

3.6. Çeliğin Beton İçindeki Korozyonu

Beton en önemli inşaat malzemelerinden biridir. Dış etkilere karşı fiziksel ve kimyasal olarak oldukça dayanıklı bir malzemedir. Basınca karşı mukavemeti yüksek olan betonun çekme mukavemetinin telafi edilmesi için betonarme çeliği kullanılmaktadır.

Betonarme çelikleri atmosfer etkisinde ve sulu çözeltiler içinde korozyona karşı dayanıksızdır. Buna karşı, çeliğin beton içindeki korozyon hızı çok düşüktür. Bu durum başlıca betonun yüksek alkali özelliğinden ileri gelir. Diğer taraftan beton içindeki çelik yüzeylerine atmosferden oksijen difüzyonu da az olduğundan korozyon hızı önemli ölçüde azalır.

Beton esas itibariyle agrega + çimento + su karışımından oluşur. Çimentonun bağlayıcı özelliğini sağlayan asıl kimyasal reaksiyon, su ile çimento bileşikleri arasında meydana gelir. Agrega, betonun fiziksel yapısını oluşturan inert bir dolgu malzemesi olarak kullanılır. Çimento 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 kalsiyum hidroksit meydana gelir. Kuvvetli bazik özellikte olan kalsiyum hidroksit, betonun sertleşmesinden sonra da, beton boşlukları içinde doymuş çözeltili halinde kalır. Bunun sonucu olarak ve çimento bileşiminde bulunan az miktardaki alkali oksitlerinin de etkisi ile taze betonun pH derecesi, doymuş kireç çözeltisinde olduğu gibi yaklaşık 12.5 değerine yükselir. Beton yaşlandıkça, atmosferden karbon dioksitin beton bünyesine difüzyonu sonucu pH değerinde azalma gözlenir. Ancak eski betonlarda bile pH derecesi 12'nin altına düşmez.

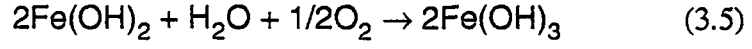
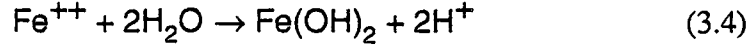
Beton pH derecesinin yüksek oluşu, beton içinde bulunan çelik yüzeylerinde kısa süre içinde γ Fe_2O_3 filminin oluşmasına ve metalin pasifleşmesine neden olur (26).

3.6.1. Çeliğin beton içindeki korozyonunun elektrokimyasal mekanizması

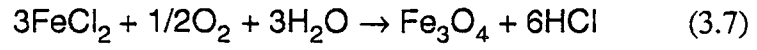
Beton kapiler boşlukları içinde daima az miktarda su bulunur. Bu su, başta kalsiyum tuzları olmak üzere, çeşitli iyonları içerir. Bu özellikleri sebebiyle beton, heterojen yapılı kuvvetli bir elektrolit olarak kabul edilebilir.

Çeliğin beton içindeki korozyonu da diğer sulu çözeltiler içindeki korozyonuna benzer şekildedir. Sulu çözeltiler içinde korozyon olayı esas itibarıyla, mikrokorozyon hücrelerinde meydana gelir. Anotta demir çözünerek aşağıdaki reaksiyonlar sonucu pası $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ oluşturur (Şekil 3.2).





Eğer ortamda yeterli miktarda klorür iyonu varsa, anot reaksiyonu aşağıdaki şekilde yürür.



Reaksiyon sonunda klorür iyonu yine serbest kalır ve yeni anot reaksiyonu için kullanılabilir. Böylece klorür iyonu anot reaksiyonu için bir çeşit katalizör rolü oynar.

Sulu çözeltiler içinde katot reaksiyonu, ya hidrojen çıkışı şeklinde ;



veya oksijen redüksiyonu ile ;



ile yürür. Bunlardan hidrojen çıkışı reaksiyonu pH'ın 7'den düşük olduğu çözeltiler içinde söz konusudur. Beton pH derecesi çok yüksek olduğundan beton içinde katot reaksiyonu daima oksijen redüksiyonu ile birlikte yürür. Bu durum, beton içindeki çeliğin korozyonunda, beton bünyesine oksijen difüzyonunun önemini ortaya koyar (26).

3.7. Pasifleşme

Betonun pH derecesi yüksek olduğundan betonarme demirlerinin korozyonu sonucu oluşan demir iyonu kısa zaman içinde γ Fe_2O_3 haline dönüşür. Bu oksit metal yüzeyini kaplayarak korozyon reaksiyonunun yavaşlamasına neden olur. Bu olaya pasifleşme denir.

Bu koruyucu tabaka iki şekilde bozulabilir (27):

1- pH değerinin düşmesi ile : Atmosferden karbondioksit difüzyonu sonucu, beton içinde çözülmüş olan kalsiyum hidroksit, kalsiyum karbonat halinde çöker. Bunun sonucu olarak pH düşer.

2- Klorür iyonları etkisi ile : Klorür iyonları oksit tabakasının delinmesine neden olur.

Pasif tabaka bozulduktan sonra, atmosferden metal yüzeyine olan oksijen difüzyonu kolaylaşır ve katodik olay oksijen difüzyonu kontrolü altına girer. Bu sebeple bileşiminde sodyum klorür bulunan beton içindeki çeliğin korozyonu çevreden oksijen difüzyonu hızının kontrolündedir.

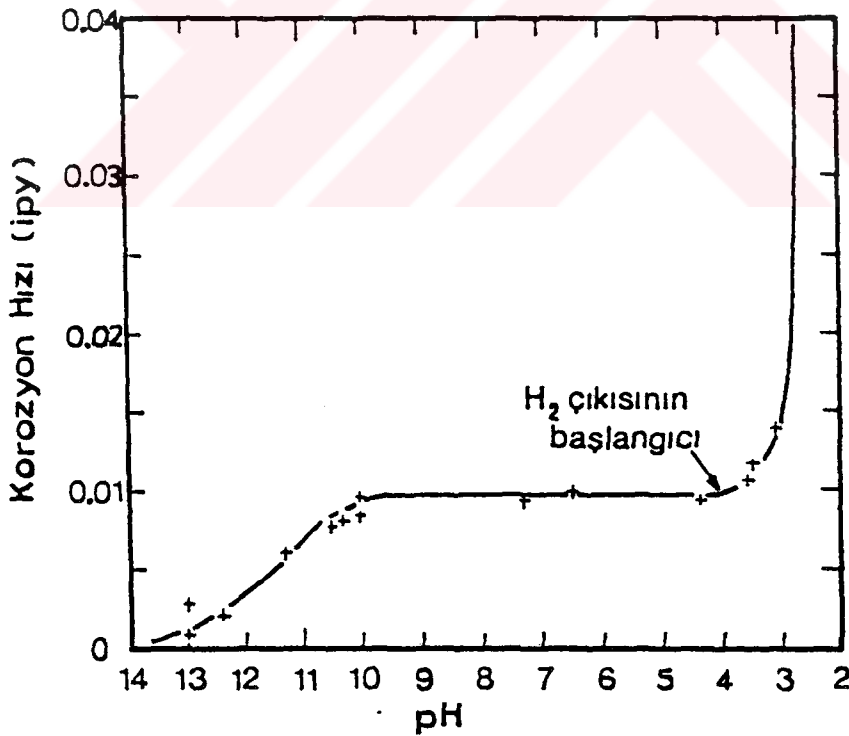
Beton içinde oksijen difüzyonu hızı esas itibariyle betonun geçirgenliğine bağlıdır. Diğer taraftan, betonun nem yüzdesi de oksijen difüzyon hızına büyük ölçüde etki yapar. Beton gözeneklerinin su ile dolu olması oksijen difüzyonunu güçleştirir. Bütünüyle su altında bulunan betonlarda oksijen difüzyonu çok güçlükte yürür.

Beton içinde bulunan çeliğin katot reaksiyonu, pH çok yüksek olduğundan ancak oksijen difüzyonu ve (3.3) numaralı denklem ile yürür. Bu reaksiyonun yürüebilmesi için oksijen moleküllerinin metal yüzeyine kadar ulaşması gerekir.

3.8. Korozyon Üzerinde pH'ın Etkisi

Elektrolit pH'ı korozyon açısından büyük önem taşır. Purbaix (28) tarafından pek çok sistemin potansiyel - pH diyagramları çizilmiştir. Demir - su sistemleri için potansiyel pH diyagramı Şekil 3.7'de verilmiştir. Bu grafikte pH'ın değişmesiyle çeliğin korozyona uğrayıp uğramayacağını potansiyel değerlerinden doğrudan anlayabilmekteyiz.

Betonda ve beton özelliklerini sağlayan diğer ortamlarda pH, 12.5 veya biraz daha büyük değerlere sahiptir. Şekil 3.6'da pH'ın çeliğin korozyon hızına etkisi görülmektedir.



Şekil 3.6- Çeliğin korozyon hızının pH'la değişimi

Burada $\text{pH} < 4$ olduğu zaman demirin şiddetle çözüldüğü görülmektedir. Bu bölgede korozyonun devamı için oksijen difüzyonuna da gerek duyulmaz. Çünkü korozyon hızı katotta hidrojen çıkışının kontrolü altındadır. $\text{pH} = 4$ olduğunda hidrojen çıkışı başlar. 4 ile 10 arasında korozyon hızı pH 'a bağlı değildir. Ancak metal yüzeyine oksijen difüzyon hızına bağlıdır. Bu aralıkta oksijen konsantrasyonu reaksiyon hızını belirlemektedir.

$\text{pH} > 10$ olduğunda, çeliğin korozyonunda büyük bir azalma gözlenir.

3.8.1. Demir - su sistemi için elektrokimyasal denge diyagramı

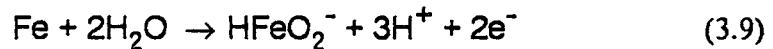
Pek çok elementin sulu çözeltiler içinde elektrokimyasal açıdan davranışlarını incelemek üzere Pourbaix (28) tarafından potansiyel - pH diyagramları çizilmiştir. Demir - su sistemi için potansiyel pH diyagramı Şekil 3.7'de görülmektedir.

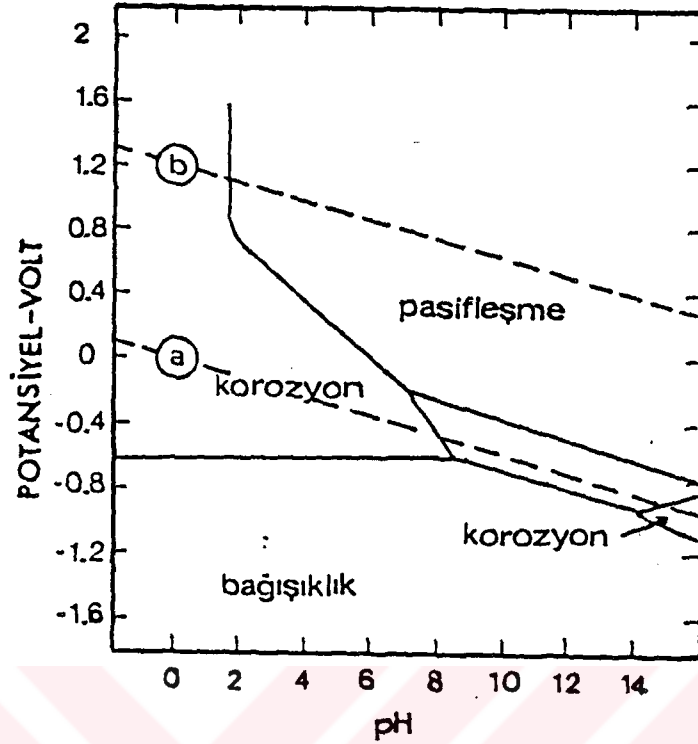
Bu diyagramda üç bölge vardır :

1- Korozyon bölgesi : İki korozyon bölgesi vardır. Birincisi potansiyelin -0.65 V 'den daha pozitif, pH 'ında 8'den az olduğu bölgedir. Burada ;



reaksiyonlar olmaktadır. Bunlardan ilk reaksiyon bu bölgenin alt kısmında ikincisi ise üst kısmında oluşur. Diğer korozyon bölgesinde ise (potansiyeli -0.8 ile -1.2 V arasında pH 'ı 14'den büyük olan bölge) aşağıdaki reaksiyona göre korozyon olayı meydana gelmektedir.

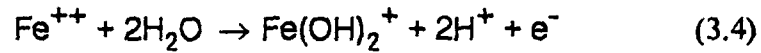




Şekil 3.7- Demir - Su sistemi için potansiyel - pH diyagramı

2- Bağışıklık bölgesi (Katodik koruma bölgesi) : Potansiyelin -0.65 V'den daha negatif olan bu bölgede, çelik dayanıklı davranış gösterecektir. Bu -0.65 V'lik potansiyel değeri standart hidrojen elektroda göredir. Doymun bakır / bakır sülfat referans elektroduna göre bu değer -0.85 V'ye karşı gelir.

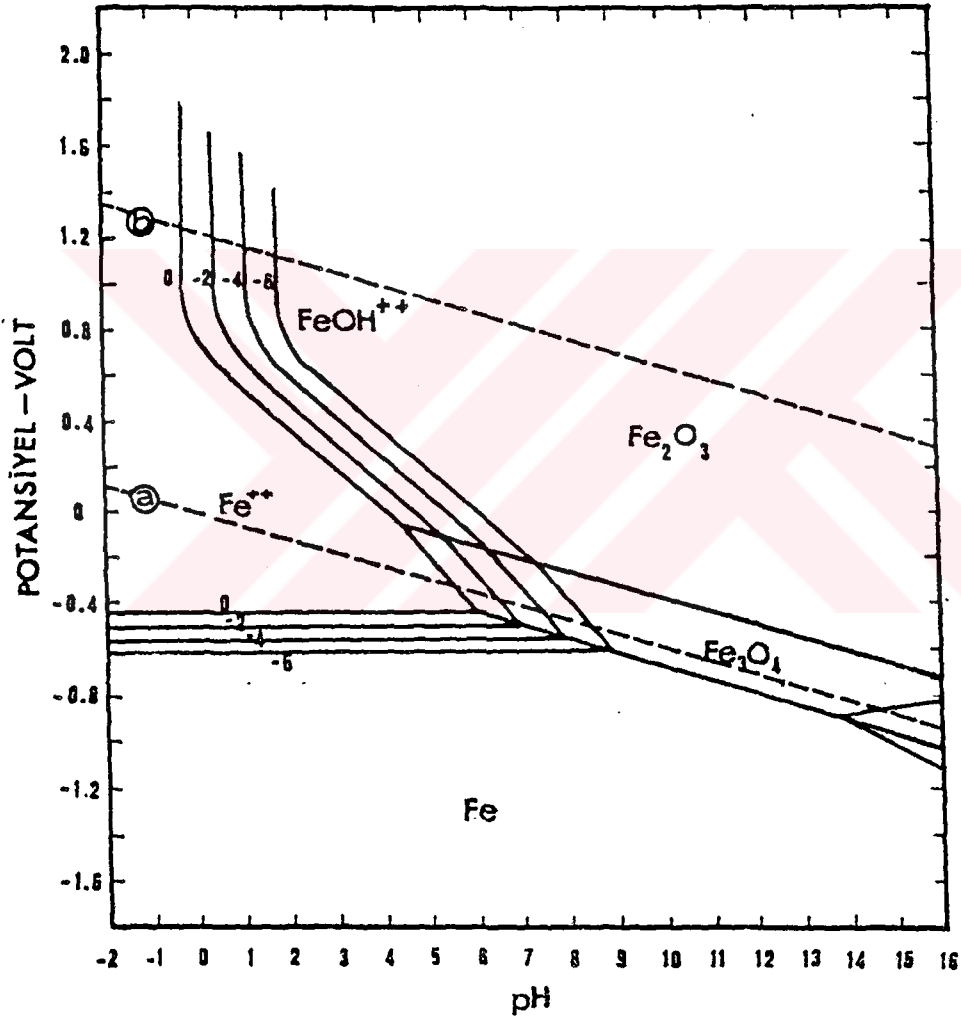
3- Pasiflik bölgesi : a ile b kesikli çizgilerinin arasında kalan bu bölgede, çelik yüzeyinde $\text{Fe}(\text{OH})_2$ tabakasının oluşmasıyla, çelik pasifleşecektir.



Demir - su sistemlerinde değişik bölgelerde oluşan demir bileşikleri Şekil 3.8'de görülmektedir.

Termodinamik hesaplamalarda elde edilen bu diyagramlar yardımıyla çeliğin

hangi bölgede olduğu hakkında bilgi edinilebilir. Fakat korozyon reaksiyonunun hızı üzerinde hiçbir bilgi edinilemez. Genel olarak bir demir sulu çözeltide 10^{-6} gr Fe iyonu / l'den daha az çözünüyorsa korozyona uğramıyor, daha çok çözünüyorsa korozyona uğruyor kabul edilir.

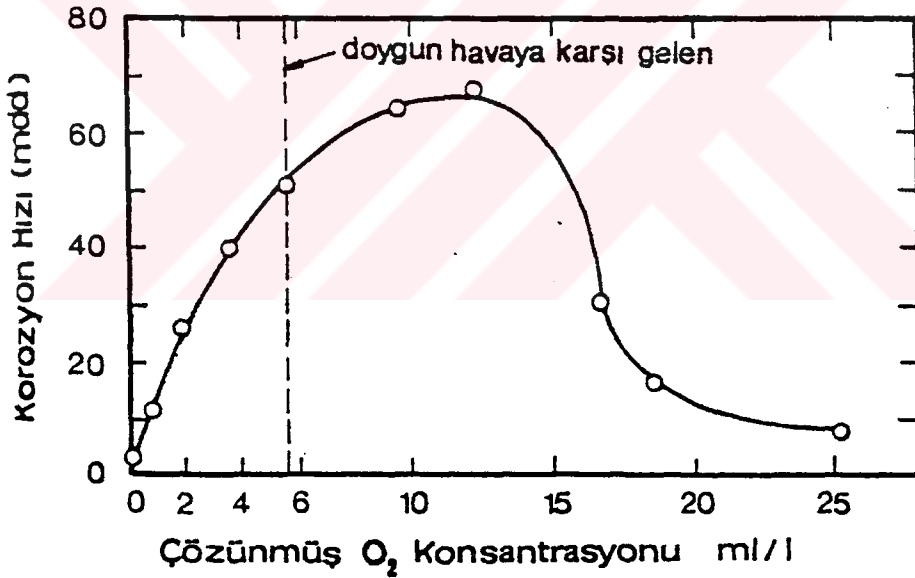


Şekil 3.8- Demir - Su sisteminde değişik bölgelerde oluşan bileşikler.

3.9. Çözünmüş Oksijenin Korozyon Hızı Üzerindeki Etkisi

Beton içinde bulunan çeliğin korozyonuna etki yapan en önemli faktörlerden biri, beton boşluklarında bulunan su içinde çözünmüş olan oksijendir. Çözünmüş oksijen, pasifliğin bozulmuş olduğu bölgelerde korozyona neden olur (26).

Betonun içine oksijen difüzyonu kuru betonda daha hızlıdır. Oksijen genellikle çözünmüş halde bulunur ve katodik reaksiyonlarda kullanılır. Bu yüzden çözünmüş oksijenin konsantrasyonu önemlidir. Korozyon hızının oksijen konsantrasyonuna göre değişimi Şekil 3.9'da görüldüğü gibidir.



Şekil 3.9- Beton içindeki çeliğin korozyonu üzerine çözünmüş oksijen konsantrasyonunun etkisi .

Maksimum korozyon hızı 12 ml / l oksijen konsantrasyonuna karşı gelmektedir. Daha yüksek konsantrasyonlarda demir pasifleşir. Demirin pasifleşmesi korozyon

hızının düşmesine neden olur. Korozyon hızı mdd ($\text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{gün}$) olarak şekilde verilmiştir ve bu da $4.64 \times 10^{-3} \text{ mm / yıl}$ 'a eşittir.

Nötr çözeltilerde korozyon hızı ile oksijen konsantrasyonu yaklaşık doğru orantılı olarak artar.

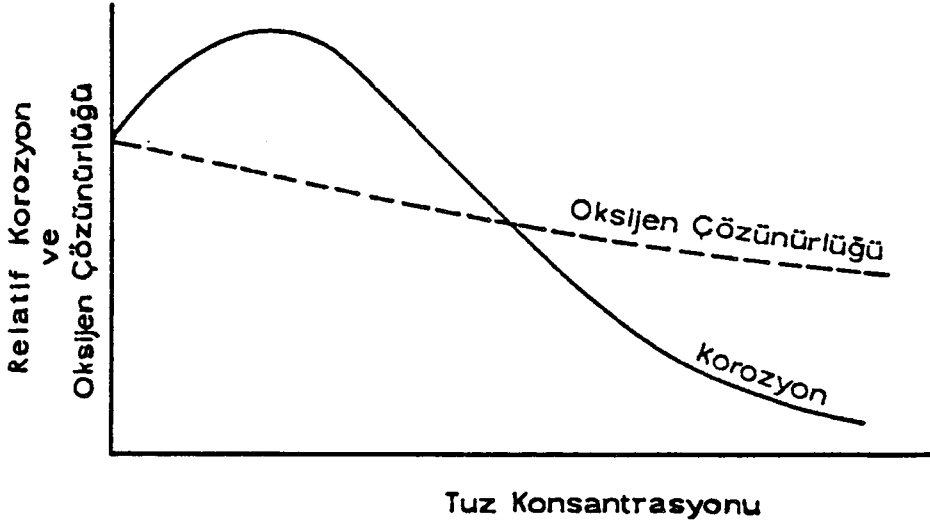
3.10. Klorür İyonlarının Etkisi

Bir beton ortamında klorür iyonu bulunursa çeliğin korozyon ihtimali artar. Çünkü klorür iyonu demir iyonları ile birleştiği zaman demir çözünür ve korozyona uğrar. Klorür iyonunun bu etkisini engellemek için beton yapı, içindeki çelik yüzeyi üzerinde pasif bir film tabakası oluşturmaya çalışır (27).

İçerisinde çelik bulunan beton yapılarda klorür iyonu bulunmuyorsa, genellikle korozyon olayına rastlanmaz. Ama ortamdaki klorür iyonu konsantrasyonu arttıkça korozyonun etkinliği gittikçe artar. Ancak çözünmüş tuz konsantrasyonu çok artarsa oksijenin çözünürlüğü belirli bir şekilde azalır. Bunun sonucu olarak korozyonda da azalma görülür (Şekil 3.10).

Şekil 3.10'da tuz konsantrasyonunun korozyon hızı ve oksijen çözünürlüğüne bağlılığı görülmektedir. Korozyon hızındaki düşüş oksijen çözünürlüğündeki düşüşle orantılı değildir. Yani oksijen çözünürlüğünde az miktardaki azalmaya karşılık korozyon hızındaki azalma daha fazladır (18, 26).

Betonun 1m^3 'ünde yaklaşık olarak 0.7 - 1.2 kg'dan fazla klorür bulunması halinde korozyonun devamı için uygun bir ortam sağlanmış olur (26).



Şekil 3.10- Tuz konsantrasyonunun korozyon hızı ve oksijen çözünürlüğüne etkisi.

3.10.1. Serbest klorür iyonlarının elektrokimyasal rolü

Çeliğin korozyonu üzerinde klorür iyonlarının etkisi üç teori ile açıklanmaktadır (18) :

1- Oksit film teorisi : Metal yüzeyindeki oksit film tabakası pasifleşme ve korozyona karşı koruma için güvenilirdir. Ancak klorür iyonları bu filmin gözeneklerine girerek oksit filminin kolayca bozunmasına sebep olurlar.

2- Adsorpsiyon teorisi : Klorür iyonları, çözülmüş oksijen ya da hidroksil iyonlarının birleşmesiyle metal yüzeyinde adsorplanır ve burada metal iyonlarının hidrasyonunu artırır. Böylece metal iyonlarının çözünmesini kolaylaştırır.

3- Geçici kompleks teorisi : Bu teoriye göre, klorür iyonları korozyonla üretilen demir iyonlarıyla hidroksi klorür kompleksi oluşturarak çözünür. Bu kompleks, korozyonun sürmesine neden olur. Elektrodun bazı yerlerinde kompleks bozulur.

Demir hidroksit çöker. Böylece serbest kalan klorür iyonları yeni demir iyonları ile kompleks yapar ve klorür iyonları sürekli olarak metal yüzeyinden çevreye demir hidroksit taşınmasına neden olarak korozyonu sürdürür.

3.11. Beton İçindeki Çeliğin Korozyonuna Etki Yapan Diğer Faktörler

Beton içindeki çeliğin korozyonu, elektrokimyasal faktörler yanında daha birçok faktöre bağlıdır. Bunlardan en önemli olanları şöyle özetlenebilir.

3.11.1. Beton kalitesi

Betonun permeabilite, porozite ve mukavemeti gibi fiziksel özellikleri de betonarme demirinin korozyonuna etki yapar. Betonun hazırlanması sırasında, su / çimento oranı, agreganın gronülometrisi, çimento cinsi ve dozajı, özellikle beton katkı maddeleri iyi ayarlanmak suretiyle permeabilitesi düşük ve mukavemeti yüksek bir beton elde edilebilir. Böylece beton bünyesine oksijen ve klorür iyonu girişi minimum hale indirilebilir.

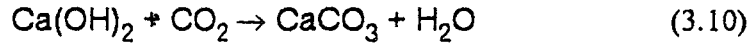
Beton kalitesinde, kullanılan çimento cinsi de büyük önem taşır. Normal portland çimentosu yerine pozolanlı çimentoların kullanılması korozyon açısından daha faydalıdır. Pozolanlar çimento bileşiklerinin hidrolizi sonucu oluşan kalsiyum hidroksit ile birleşerek beton boşlukları içinde kristalize olur. Böylece beton permeabilitesi büyük ölçüde azalır (26).

Diğer taraftan, betonarme demirlerinin beton yüzeyine olan uzaklığı da korozyon açısından büyük önem taşır. Bu kalınlık ne kadar fazla ise, atmosferden metal

yüzeyine oksijen difüzyonu da o kadar az olacaktır. Bu kalınlık TS 3440'da BS 16 için en az 50 mm'dir.

3.11.2. Karbonatlaşma etkisi

Atmosferde bulunan karbon dioksit, beton kapiler boşluklarından beton bünyesine girerek, orada bulunan kalsiyum hidroksit ile,



reaksiyonunu verir. Bu reaksiyon sonunda mevcut kalsiyum hidroksit, kalsiyum karbonat halinde çöker. Böylece çözelti pH değerinde azalma meydana gelir.

Karbonatlaşma olayı, kuru atmosfer etkisinde kalan betonlarda daha etkilidir. Su altında ve yeraltında bulunan betonlarda karbonatlaşma olayı meydana gelmez.

Bazı hallerde beton (sülfat iyonlarına karşı korumak için) karbondioksitli su kullanarak karbonatlaştırılır (29). Bu durum pH'ın düşmesine dolayısıyla betonarme donatısında korozyona sebep olabilir.

3.11.3. Priz hızlandırıcı katkı maddeleri

Özellikle kış aylarında beton dökülmek için kullanılan bazı katkı maddeleri de korozyona sebep olabilirler. İçinde klorür bulunan bileşiklerin (kalsiyum klorür ve diğer klorür bileşikleri) katkı maddesi olarak kullanılması sakıncalıdır (23).

3.12. Korozyondan Korunma Metodları

Betonarme eliklerinin korozyonunu önlemek üzere ilk yapılacak iç, beton bünyesine oksijen gazı ve klorür iyonunun girmesini önlemektir. Bu nlemleri almak pratikte her zaman mümkün olamamaktadır. Ancak alınacak bazı önlemler ile korozyon hızı büyük lde azaltılabilir.

3.12.1. Beton dökümü sırasında alınacak nlemler

Beton dökümü sırasında alınacak bazı önlemler ile korozyon azaltılabilir. Beton dökümü esnasında, beton yüzeyinde su birikerek gl oluşturmasını önleyecek tedbirler alınabilir. Yüzeyde biriken kirlı ve tuzlu sular beton bünyesine klorür iyonu girmesine neden olabilir. Biriken suların yağmur suyu veya tatlı su olması halinde, bu sular beton bünyesinde bulunan kalsiyum hidroksiti czerek uzaklaştırır. Böylece hem beton pH derecesi düşer, hem de beton içinde boşluklar oluşur.

Beton dökümü sırasında imento dozajı, su / imento oranı, agrega gronlometrisi, beton kıvamı, betonun vibrasyonu ve krne dikkat edilerek geçirimsiz, sağlam bir beton yapılması sağlanabilir.

Beton dökümünde kullanılacak karışım suyu da klorürsüz olmalıdır. şebeke suları ve bütün tatlı sularda bulunan az miktardaki klorür korozyon bakımından önemsizdir.

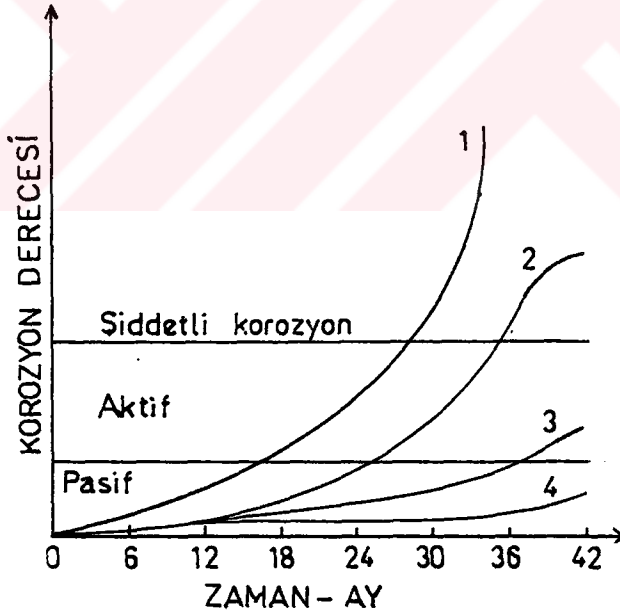
Korozyonu azaltmak üzere, betonarme demirlerinin kullanımdan önce herhangi bir malzeme ile kaplanması (galvaniz hariç), betonun aderansını azaltması bakımından uygun bulunmamaktadır.

Beton dökümünden sonra, beton yüzeylerinin uygun bir malzeme ile kaplanması (beton asfalt, epoksi reçineleri veya boya), korozyonu nleme açısından çok etkilidir. Ancak bu işlemler beton kr tamamlandıktan sonra yapılmalıdır (26).

3.12.2. İnhibitör kullanımı

Korozyon hızını yavaşlatan kimyasal maddelere inhibitör denilmektedir. Bunlar negatif etkili katalizör olarak düşünülebilir. Yani korozyon reaksiyonuna doğrudan katılmayıp, yalnızca hızını azaltıcı etki yaparlar (26, 30, 31).

Beton içindeki çeliğin korozyon hızını azaltmak üzere başta nitritler, benzoatlar ve kromatlar olmak üzere birçok kimyasal madde inhibitör olarak kullanılabilir. İnhibitörler döküm sırasında beton içine katılarak kullanılır. Bu maddelerin inhibitör etkisi yanında, betonun diğer özelliklerine bozucu bir etki yapmaması gerekir. Bu özellikler gözönüne alındığında, en etkili ve en uygun inhibitör kalsiyum nitrittir. Kalsiyum nitrit inhibitörünün korozyon hızını azaltıcı etkisi Şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3.11- Kalsiyum nitrit inhibitörünün betonarme demirinin korozyonu

üzerine etkisi

1. Su / çimento = 0.47, Kalsiyum nitrit = 0
2. Su / çimento = 0.34, Kalsiyum nitrit = 0
3. Su / çimento = 0.47, Kalsiyum nitrit = 5 kg / m³
4. Su / çimento = 0.34, Kalsiyum nitrit = 10 kg / m³

Şekilden görüleceği üzere, içinde hiç kalsiyum nitrit bulunmayan betonlarda 18 - 20 ay içinde betonarme demirleri şiddetli korozyona uğramaktadır. Su / çimento oranı yüksek olan betonlarda korozyon hızı daha fazladır. Bileşiminde yeterli miktarda kalsiyum nitrit bulunan betonun içindeki demir korozyona uğramamıştır (26).

3.12.3 Pozolan kullanımı

Betonarme çeliğinin korozyona karşı mukavemetini artırmak için kullanılan maddelerden biri de pozolandır. Pozolan, betonun hidrasyon ısı ile sülfat etkisini azaltır ve betonda yoğun bir yapı elde edilir. Pozolan ara boşlukları doldurup, geçirgenliği azaltır ve serbest kalsiyum hidroksit ile reaksiyonu sonucu kalsiyum silikat hidrat oluşturur. Böylece hidrasyona uğramış ürünün betonarme çeliğe tutunma mukavemeti artar. Pozolan içeren taze betonun akışkanlığı da artarak kolay işlenebilir hal alır. Bu durum betonun fiziksel özelliklerine iyi yönde etki eder (32).

3.12.4. Zararlı suyun uzaklaştırılması veya nötralizasyonu

Bu önlemler ;

a) Yeraltı suyu seviyesinin drenaj yoluyla düşürülmesi,

b) Geçirimsiz perde yapılarak yeraltı suyu hareketinin engellenmesi

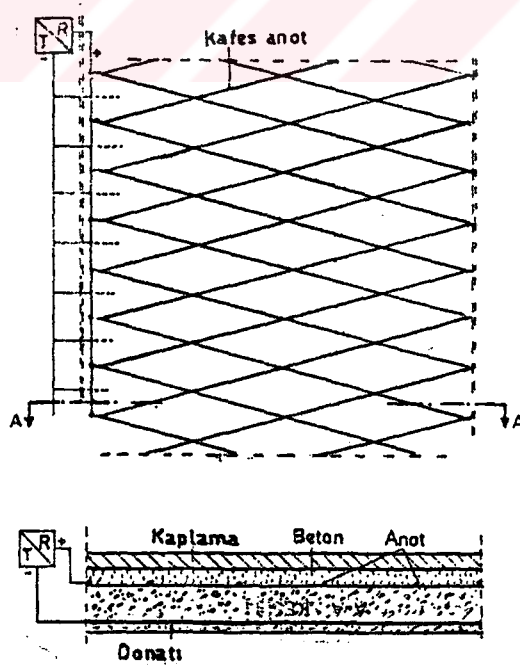
şeklinde olabilir. Bu tedbirlerden en güvenilir olanı drenaj yoluyla yeraltı suyu seviyesini düşürmektir. Geçirimsiz perde yapılması zorda kalırsa uygulanabilir. Çünkü bu yapının uzun vadede tahrip olabileceği de gözönünde tutulmalıdır (29).

3.12.5. Katodik koruma

Bu metod diğerlerine oranla daha pahalı fakat en güvenilir tedbirdir. 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 birbiri ile temas etmekle beraber, bu temas düşük voltajlı elektrik akımını iletme için yeterli değildir. En iyisi betonarme demirlerinin birbirine kaynak edilmesidir.

Beton içindeki betonarme demirlerinin dengeli bir şekilde katodik olarak korunabilmesi için üniform bir akım dağılımı gerekir. Bu sebeple anot biçimi ve boyutlarının seçimi büyük önem taşır. Katodik koruma için en uygun anot, oksit kaplı, titanyumdan yapılmış olan tel kafes şeklindeki anotlardır (Şekil 3.12) (26, 33).



Şekil 3.12- Betonarme çeliğinin katodik korumasında kullanılan kafes anot sistemi

4. MATERYAL VE METOD

4.1. Materyal

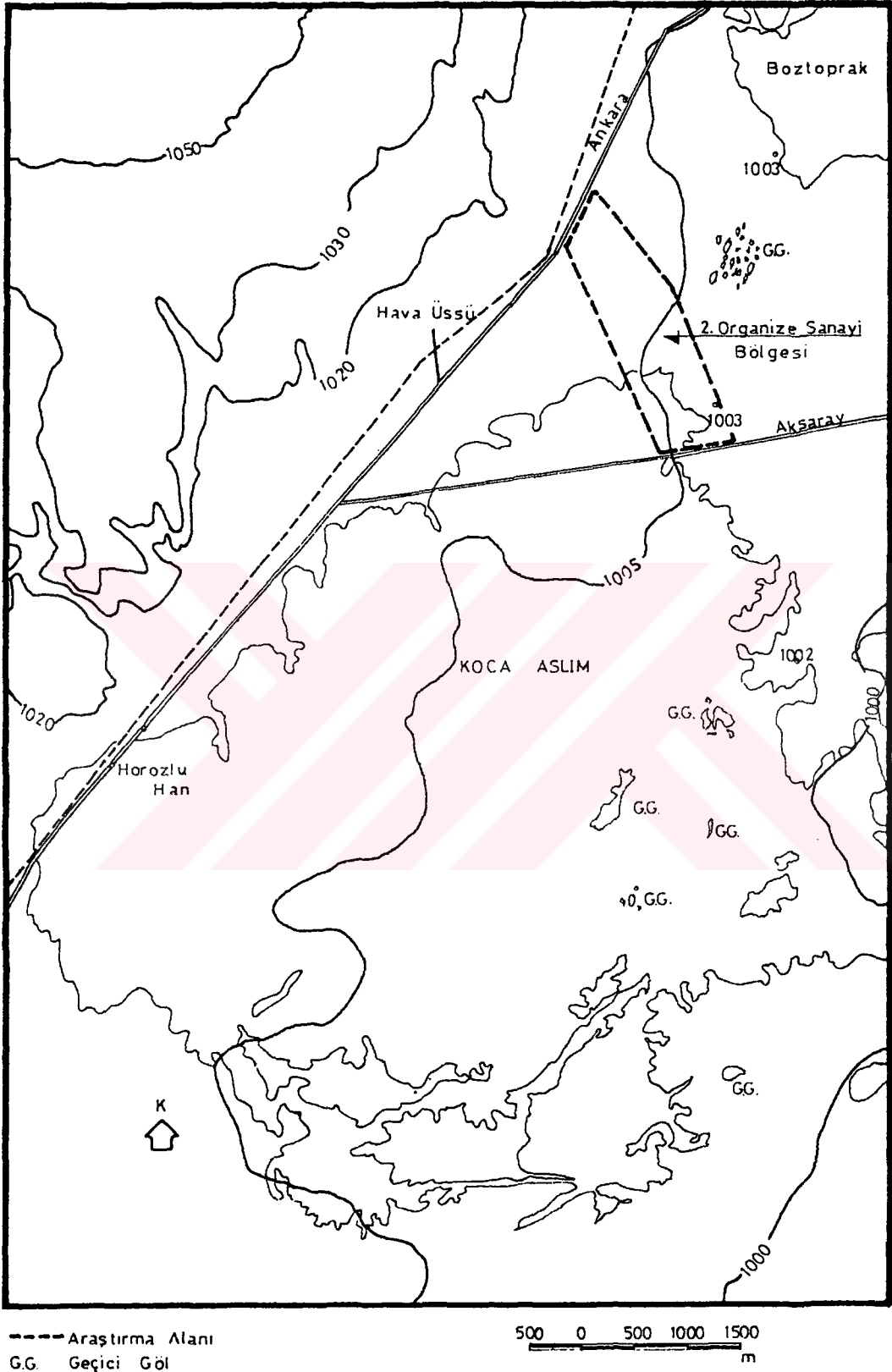
4.1.1. Araştırma alanının yeri

Araştırma alanı Konya Şehir merkezinin kuzey doğusunda Konya - Ankara, Konya - Aksaray yolları arasında olup Şehir merkezinden yaklaşık 15 km uzaklıktadır. II. Organize Sanayi Bۆlgesinin 300 ha alan ۆzerine kurulması projelendirilmiştir (Şekil 4.1).

4.1.2. Araştırma alanı toprakları

Araştırma alanı toprakları Konya kapalı havzasında 164876 hektar alana yayılan hidromorfik alüviyal toprakların bir kısmını oluşturur. Çok fena drenaj Őartlarının hakim olduğu bu topraklar akarsular veya göller tarafından oluşturulmuşlardır.

Araştırma alanında daha ۆnce yapılan çalışmalar, bۆlge topraklarının 0.9 m'lik derinliğinde tuzluluğun 1250 - 4360 milimhos / m olduğunu gۆstermiřtir (34). Bu veriler bize bۆlgenin ağır bir tuzluluk ve sodyumluluk problemi ile karşı karşıya olduğunu gۆstermektedir. Bu sorunların oluşmasında tabii meylin yetersizliği, i bۆkey topoğrafya, yeraltından beslenme, taşkımlar ve yaz aylarında aşırı buharlaşma, yıllık yağış azlığı ve drenaj sisteminin yokluğu rol oynamaktadır. Dolayısıyla bۆlge topraklarında drenaj, tuzluluk ve sodyumluluk gibi ۆnemli ve çözüm bekleyen ana problemler ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.1- Araştırma alanı sınırları

4.1.3. Araştırma alanının topoğrafyası ve yeraltı suyu durumu

Araştırma alanı topoğrafyası düz veya iç bükey, meyil düz veya düze yakındır. Deniz seviyesinden ortalama 1004 m yükseklikindedir (Şekil 4.1). Araştırma alanı bölgenin hemen en düşük kota sahip bölgesi olduğundan etrafındaki yüksek alanlardan gelen yeraltı suları ile beslenmektedir. Yeraltı suyunun beslenmesinde en önemli kaynak yeraltı suyu olmasına rağmen yağışlar ve kent merkezinin evsel ve endüstriyel atık sularının yeraltı suyu beslenmesinde payı bulunmaktadır. Yıl içinde yeraltı suyu zemin yüzeyine 0.60 m'ye kadar yaklaşabildiği gibi 1.60 m'ye kadar da düşebilmektedir (34).

4.1.4. Araştırma alanının iklimi

Araştırma alanının özel bir iklimi yoktur. Alan İç Anadolu ikliminin etkisi altındadır. Yazlar kurak ve sıcak, kışlar yağışlı ve çok soğuk geçer. Yıllık ortalama yağış 332.70 mm, yıllık ortalama buharlaşma ise 1173.10 mm'dir. Yıllık ortalama nisbi nem ise % 59.83'tür.

Bazı önemli meteorolojik değerlerin çok yıllık ortalamaları ile araştırmanın yapıldığı 1990 yılına ait bilgiler Tablo 4.1 verilmektedir. Bu değerler Konya Meteoroloji İstasyonundan alınmıştır.

Tablo 4.1- Konya ili'ne ait bazı meteorolojik değerler.

Çok yıllık ortalama												
Meteorolojik Elemanlar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Ortalama Sıcaklık (°C)	-0.3	1.7	5.3	11.0	15.8	19.8	23.2	22.8	18.0	12.3	6.5	1.8
Ortalama Yağış (mm)	40.9	34.8	39.8	30.2	43.6	25.4	7.0	5.5	11.4	30.2	28.4	35.5
Ortalama Buharlaşma (mm)	21.4	32.0	66.1	103.2	117.5	146.3	201.8	202.5	138.0	81.9	39.5	22.9
Ortalama Nisbi Nem (%)	78	74	65	57	56	49	41	40	47	59	72	80
1990 yılına ait değerler												
Ortalama Sıcaklık (°C)	-4.5	-0.2	5.8	10.1	13.8	19.3	23.7	21.3	17.4	12.0	7.6	2.4
Ortalama Yağış (mm)	9.2	24.9	3.0	17.1	41.4	8.0	0.2	-	25.7	27.3	22.5	51.7
Ortalama Buharlaşma (mm)	-	-	-	27.7 ¹	69.9	129.7	168.3	149.4	104.2	68.2	11.8 ²	-
Ortalama Nisbi Nem (%)	76.4	77.8	55.4	58.1	60.8	47.3	42.7	40.6	48.3	55.6	71.4	78.1
Ocak, Şubat, Mart, Aralık aylarında buharlaşma ölçülmemiştir. 16-30 Nisan, 1-10 Kasım tarihleri arasında buharlaşma ölçülmüştür.												

1- 16-30 Nisan

2- 1-10 Kasım

4.1.5. Araştırma alanı zemin suyu özellikleri

Araştırma alanında daha önce yapılan çalışmalar bölgenin toprak ve yeraltı suyu itibariyle ağır tuzluluk ve sodyumluluk problemleri ile karşı karşıya olduğunu göstermektedir. Bu çalışmalardan elde edilen zemin suyu kimyasal analizlerine ait örnekler Tablo 4.2'de verilmektedir (34, 35). Analiz sonuçları değerlendirildiğinde, suda bulunan anyon ve katyonların en düşük konsantrasyonlarının bile limit değerlerin 20 - 70 katına kadar çıkabildiği görülmektedir.

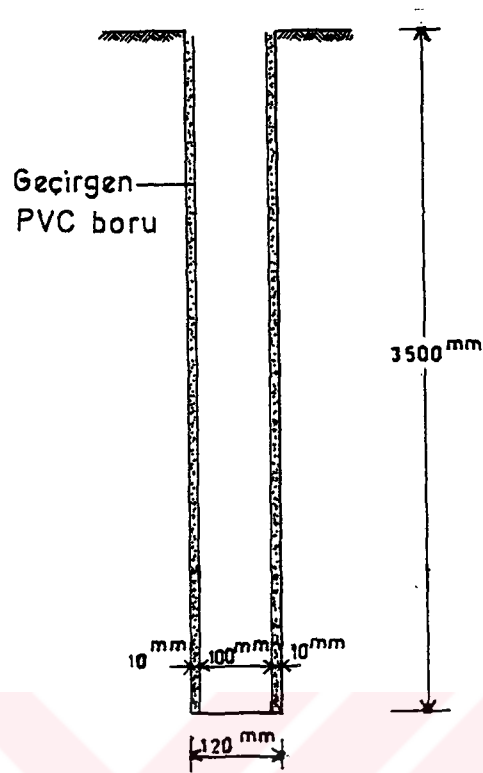
Tablo 4.2- Araştırma alanı zemin suyunun kimyasal analiz sonuçları

Numune alınma tarihi	Elek. İletken microm/cm	Katyonlar (mg / l)				Anyonlar (mg / l)				
		pH	Na	K	Ca	Mg	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄
1986	200000	7.2	33350	327.6	2000	6075	-	323.3	62480	14800
1986	122000	7.5	16675	97.5	2600	4253	-	231.8	35145	9100
1988	177785	7.3	26588	15.6	714	7745	-	988	45476	25939

4.2. Metod

4.2.1. Araştırma alanında kuyu açılması

Laboratuvarda kullanılacak suyun temini için arazide 100 mm çapında ve 3.5 m derinliğinde bir kuyu açıldı (Şekil 4.2). Kuyunun açılması için 120 mm çaplı bir burgu kullanıldı. Açılan kuyuya 100 mm çaplı bir PVC delikli boru konularak çevresine ince kum konuldu. Kuyuya dışarıdan herhangi bir maddenin girmemesi için kuyu ağzı PVC bir kapakla kapatıldı.



Şekil 4.2- Açılan kuyu boy kesiti

4.2.2. Deneysel çalışmalar

Deneysel çalışmalar iki aşamalı olarak yapılmıştır.

1- Su numunelerinin alınması ve kimyasal analizlerinin yapılması.

2- Labaratuvarında yapılan deneyler. Bu deneyler iki gruba ayrılarak yapılmıştır.

a- Çeliğin, kalsiyum hidroksitle doymuş olan araştırma alanı zemin suyu, şehir şebeke suyu ve saf su çözeltileri içindeki denge potansiyellerinin belirlenmesi ve grafike edilmesi.

b- Çeliğin beton içindeki katodik polarizasyonunun yapılp, eğrilerinin çizilmesi.

4.2.3. Su numunelerinin alınması ve kimyasal analizleri

3.5 m boyunda ve 100 mm çapındaki gözlem kuyusundan su alınabilmesi için 50 mm çapında ve 150 mm boyunda paslanmaz çelikten bir kap kullanılmıştır. Kuyudan su alımları TS 5090'da belirtilen kurallara uygun olarak yapılmıştır. Alınan su numunelerini koymak için 2 l kapasiteli cam bir kap kullanılmıştır. Bu kap, numunenin özelliklerinin bozulmaması için önceden saf su ile iyice yıkanıp kurutulmuştur. Daha sonra alınan numuneler kabın içinde hiç boşluk (hava) kalmayacak şekilde doldurulmuş ve ağzı sıkıca kapatılmıştır. Böylece numunenin, gaz fazı ile reaksiyonu ve taşıma sırasındaki sarsıntısı, CO₂ miktarındaki değişiklikleri ve dolayısıyla pH'ındaki değişimler önlenmiştir.

Numuneler 9 ay boyunca düzenli aralıklarla alınmış ve bekletilmeden analiz edilmek üzere DSİ kimya laboratuvarına götürülmüştür. Alınan numunelerin analizinde A.B.D. Tuzluluk Laboratuvarı'nın metodları kullanılmıştır (36). Analiz sonuçları Bölüm 5'de verilmiştir.

Numunelerin her ay alınışları sırasında, zeminden aşağı doğru olmak üzere zemin suyunun seviye tespiti yapılmıştır.

4.2.4. Elektrot numunelerinin hazırlanması

Piyasadan temin edilmiş olan 14 mm'lik (Φ 14) çelik çubuklar (S 220) her biri 200 mm uzunluğunda kesildi. Bu uzunluk standart olmayıp deneylerde kullanılan yüzey alanıyla doğru orantılı olarak artabilir veya azalabilir. Yapılan deneylerde 5000 mm²'lik yüzey alanı kullanılmıştır. Bu alan çubuğun 156.6 mm'lik kısmı tarafından karşılanmış, geri kalan kısmı ise kablo bağlantıları için kullanılmıştır.

Kesilen çubuklar 10.1 mm çapında silindirik bir şekil alıncaya kadar tornada mekanik olarak inceltildi. Daha sonra; elektrot yüzeyleri önce demir zımparasıyla, sonra

da su zımparasıyla perdahlanarak çubuklar 10 mm çapına indirildi ve pürüzsüz bir yüzey elde edildi (18). Daha sonra bu numuneler, içinde âlkol ve aseton bulunan bir solvent ile yıkanarak kurutuldu. Atmosferik şartlardan etkilenerek yüzeylerde oksit tabakasının oluşmaması için elektrotlar, deney başlayıncaya kadar bir desikatörde saklandı.

Deneyden önce çeliğin potansiyelinin kolayca ölçülmesi için çelik elektrotların birer uçlarına kablo bağlantıları yapılmıştır. Deneyde çelik elektrodun 80 mm'lik bir bölümü çözelti içine daldırılmıştır. Çelik elektrodun elektrolit dışında kalan kısmı ise izole edilmiştir. Bu izolasyon, çelik elektrodun dışında kalacak kısmının parafilm ile kaplanması suretiyle yapılmıştır.

4.2.5. Çeliğin doygun kalsiyum hidroksit çözeltisi içindeki denge potansiyeli ölçümleri

Bu deneyde, doygun oksijenli bir çözelti içinde çeliğin potansiyelleri 504 saat süreyle ölçülmüştür. Doygun kalsiyum hidroksit çözeltileri, araştırma alanında açılan kuyudan alınan su, şehir şebeke suyu ve saf su ile yapılmıştır.

4.2.5.1 Elektrolitlerin hazırlanması

Deneylere Eylül ayı içinde başlandığından dolayı, araştırma alanında ve şebekeden bu ay içinde alınan su numuneleri kullanılmıştır. Daha önce alınan numunelerin kullanılmamasının sebebi ise ihtiva ettikleri anyon ve katyon değerlerinin zamanla değişebileceği ihtimalidir.

Deneylerde çözelti olarak kullanılan araştırma alanı zemin suyu ve şehir şebeke suyunun Eylül ayı itibariyle analiz sonuçları Tablo 4.3'de ve çözeltilerin birleşim miktarları da Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.3- Deneyleerde kullanılan suların analiz sonuçları

Numune	pH	EC	Kasyonlar (ppm)				Anyonlar (ppm)			
			Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	CO ₃ ⁼	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁼
Araştırma alanı zemin suyu	7.20	117470	17160	358	1046	6688	-	721.63	29150	25548
Şehir şebeke suyu	7.65	790	36.8	7.8	80	45.6	-	390.4	24.85	120

Tablo 4.4- Deneysel numunelerinin birleşim oranları

DENEY NO	ÖZELLİK	MİKTAR (ml)	Kalsiyum Hidroksit	pH
1	Araştırma alanı zemin suyu	1800	Doygun	12.82
2	Şehir şebeke suyu	1800	Doygun	12.84
3	Saf su	1800	Doygun	12.85

4.2.5.2. Deneysel seti

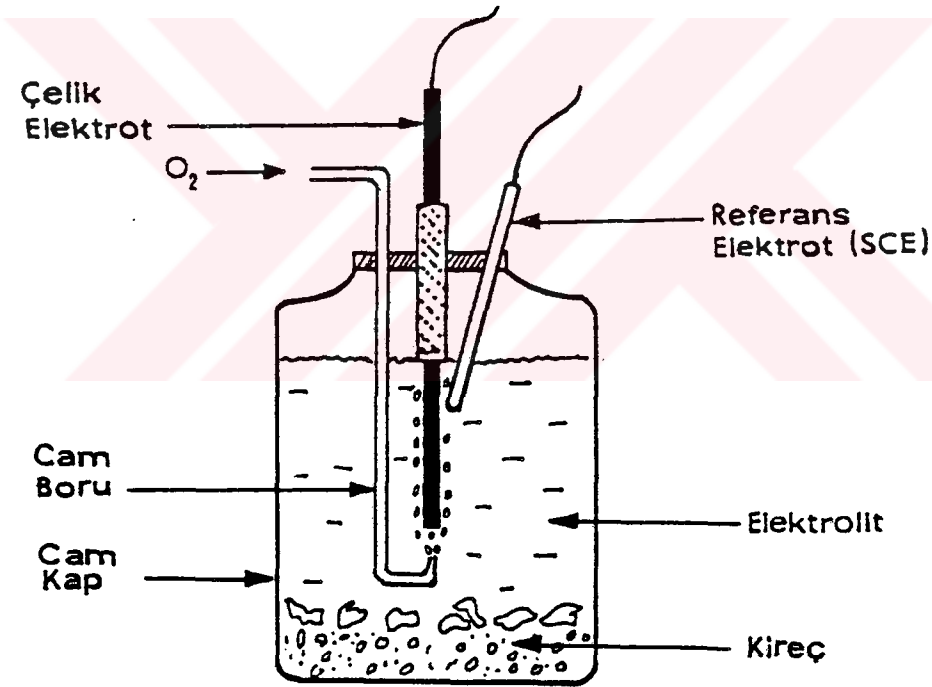
Deneysel kabı olarak 2 litre kapasiteli bir cam kap kullanılmıştır. Bu kabın içine, hazırlanan çözeltiden 1800 ml konulmuştur. Deneylede ortamın devamlı bazik kalabilmesi için katı kireç (kalsiyum hidroksit) kullanılmıştır. Kabın şematik görünüşü Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

Önceden hazırlanan elektrot kabın ortasına gelecek şekilde konulmuştur. Elektrotun, elektrolit içine giren kısmı 80 mm²'dir. Elektrolit ile temas eden yüzey alanı 2590 mm²'dir.

Kabın ortasına yerleştirilen elektrodun yüzeyine, mümkün olduğunca yakın olarak referans elektrot yerleştirilmiştir. Deneylede referans elektrot olarak doygun kalomel elektrot (SCE) kullanılmıştır.

Çözeltiden devamlı olarak oksijen gazı geçirilerek, çözelti oksijenle doygun halde tutulmuştur. Oksijen gazının çözelti içine üniform bir şekilde gönderilmesini sağlamak için, kaba girişinden önce rotametre konulmuştur.

Deney müddetince elektrot potansiyeli periyodik olarak ölçülmüştür. Bu amaçla Metex M 3630 dijital multimetresi kullanılmıştır.

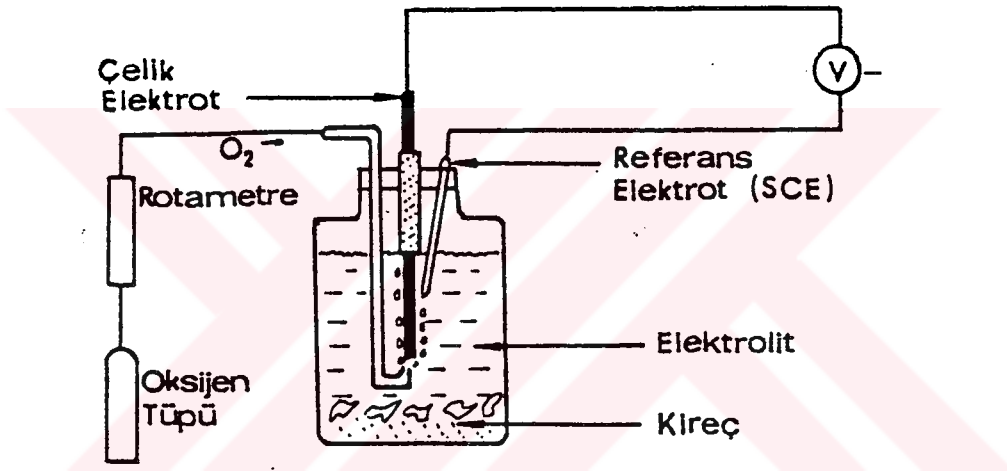


Şekil 4.3- Deney kabının şematik görünüşü

Deney oda sıcaklığında (25 ± 2 °C) yapılmıştır. Sıcaklığın sabit kalabilmesi için deney kabı daha geniş bir plastik kaba konulmuş ve kabın içine 10 l su konul-

muştur. Bu kaba bir ısıtıcı ve bir de karıştırıcı konulmuştur. Isıtıcı termostatlı olup su sıcaklığı 25°C'yi aştığında kapanmakta ve bu sıcaklığın altına düştüğünde tekrar açılmaktadır. Karıştırıcı da ısının kabın her noktasında aynı olmasını sağlamıştır.

Yapılan deney düzeneğinin şematik görünüşü Şekil 4.4'de olduğu gibidir.



Şekil 4.4- Doygun kalsiyum hidroksit çözeltisiyle yapılan deneyin şematik görünüşü.

4.2.5.3. Deneyin yapılışı

Deneyde, elektrolit içindeki çelik için korozif etkiler yapabilecek iyonların, çelik elektrodu korozyona uğrattığı hakkında fikir edinmek üzere potansiyel değişimi incelenmiştir. Deneyler Hausmann'ın (1) geliştirdiği metoda uygun olarak

yapılmıştır.

Daha önceden hazırlanarak desikatörde korunan çelik numuneler, bu rutubetsiz ortamdan alınarak tekrar aseton ile yıkama işlemine tabi tutulmuştur. Bu şekilde kullanıma hazır hale getirilen elektrotlar, hazırlanan çözelti içine yerleştirilmiştir. Referans elektrot, çelik elektrot yüzeyine yakın ve numuneye paralel olarak yerleştirilmiştir.

Elektrolitin dibine kadar bir cam boru vasıtasıyla getirilen oksijen gazı elektrot yüzeyinden sürekli olarak geçirilerek, çözelti oksijene doymun halde tutulmuştur.

Deney başlamadan önce ısıtıcı ve karıştırıcı çalıştırılmış ve sıcaklığın 25°C'ye çıkması beklenmiştir.

Daha sonra oksijen tüpü açılmış ve emniyetli çalışması için çıkış basınç ayarı yapılmıştır. Ayrıca çözeltiye verilen gaz habbeciklerinin düzgün ve devamlı bir şekilde olması için rotametreden ayar yapılmıştır. Bütün bu işlemler bittikten sonra çelik elektrotlar çözeltiye yerleştirilmiş ve 504 saat (21 gün) süreyle potansiyel okumaları yapılmıştır.

4.2.6. Çeliğin beton içindeki denge potansiyeli ve katodik polarizasyon eğrisi

Çeliğin beton blok içindeki korozyon hızını belirlemek üzere katodik polarizasyon eğrisi çizilmiştir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 5'de verilmiştir.

4.2.6.1. Beton numunelerinin ve deney düzeneğinin hazırlanması

Bu deney için her tipten birer adet olmak üzere iki tip beton blok hazırlanmıştır. Bunlar;

- 1- Gözlem kuyusundan alınan suyla imal edilen beton blok,
- 2- Şehir şebeke suyuyla imal edilen beton blok.

Bu bloklar karşılaştırma yapabilmek amacıyla iki tip halinde dökülmüştür. Uygulamada araştırma alanı zemin suyu, beton karma suyu olarak kullanılmamaktadır. Bu suyun kullanılmasının sebebi, bu suyla imal edilen beton bloğun gözeneklerinde bulunan doygun kalsiyum hidroksit çözeltisinin (az oksijenli ortamda) beton içindeki çeliğe olan etkisiyle, doğrudan hazırlanan doygun kalsiyum hidroksit çözeltisinin (çok oksijenli ortam) beton içindeki çeliğe olan etkisi arasındaki farkı ortaya çıkarmaktır. Bu fark bizi daha rasyonel sonuçlara ulaşmamızı sağlamıştır. Ayrıca bu durum literatüre de uygun düşmektedir (8, 13, 18).

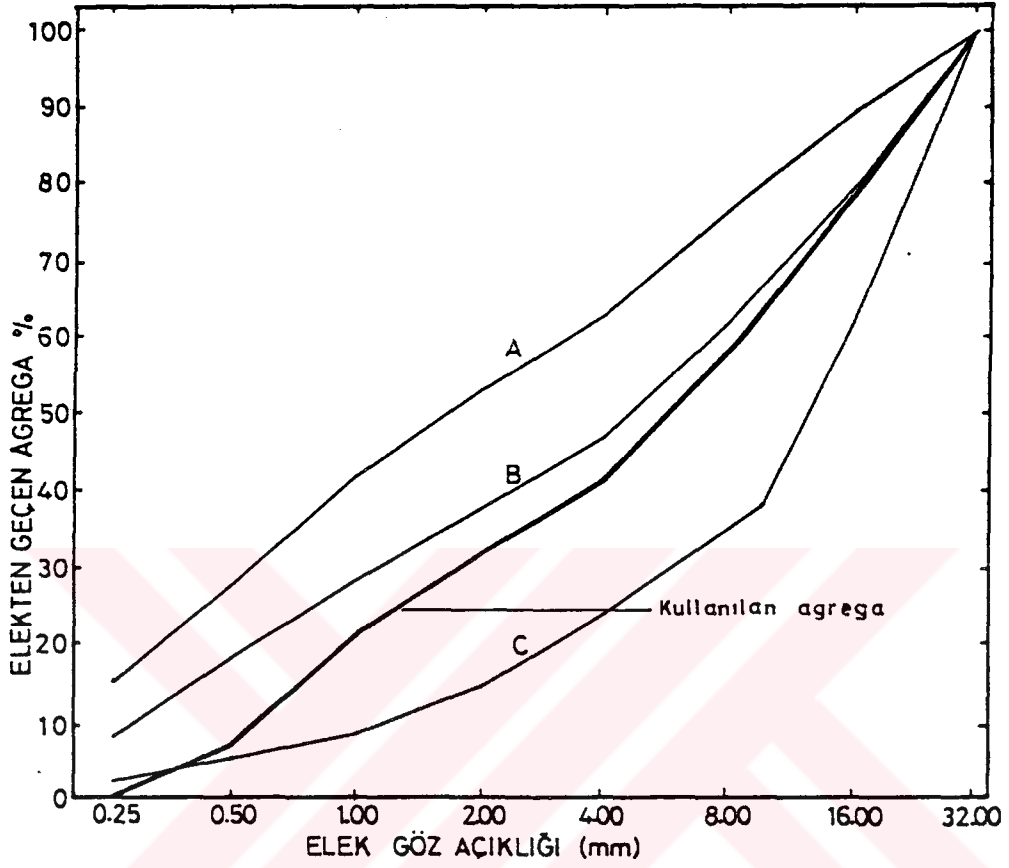
Beton bloklar BS 16 (C 16, 16 MPa) olarak imal edilmiştir. Beton karışım özellikleri TS 802'ye göre yapılmıştır. Bu sınıf beton araştırma alanında inşa edilen yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Beton dökümü için 100 x 200 x 300 mm boyutlarında dikdörtgen prizma şeklinde iki adet ahşap kalıp hazırlanmıştır. Beton kalıpların içine yerleştirilen çelik numuneler, her iki kenarında 50 mm uzaklıktadır. TS 3440'da ortamda klorür iyonu bulunması halinde oksijenle teması biraz olsun kesebilmek amacıyla bu paspayı uygun görülmüştür. Beton blokların içine yerleştirilen elektrotların beton ile temas eden yüzey alanı 5000 mm²'dir.

İmal edilen beton blokların, beton karışım miktarları Tablo 4.5'de ve kullanılan agreganın gronülometrik özellikleri de Şekil 4.5'de görülmektedir.

Tablo 4.5- Beton karışım miktarları

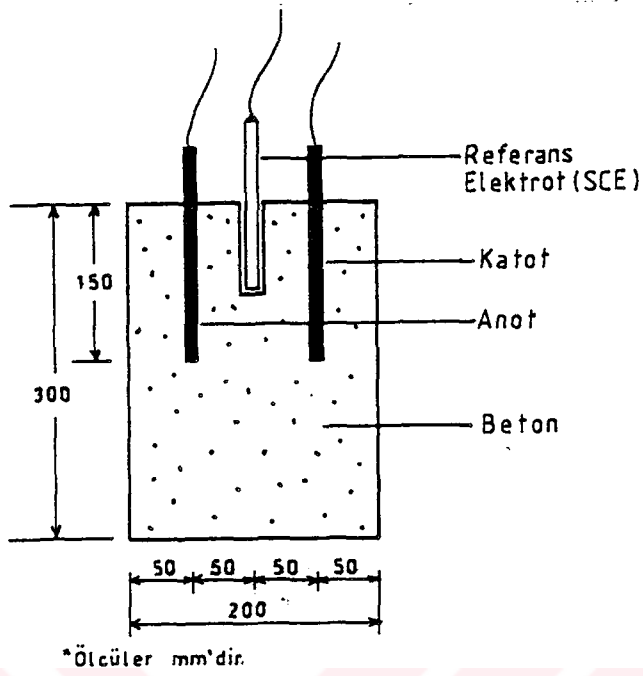
Portland çimentosu miktarı (kg)	2.30
Agrega (kg)	10.7
Su miktarı (kg)	1.40
Su / Çimento oranı	0.60



Şekil 4.5- Beton blokların imalinde kullanılan agrega gronölometrisi

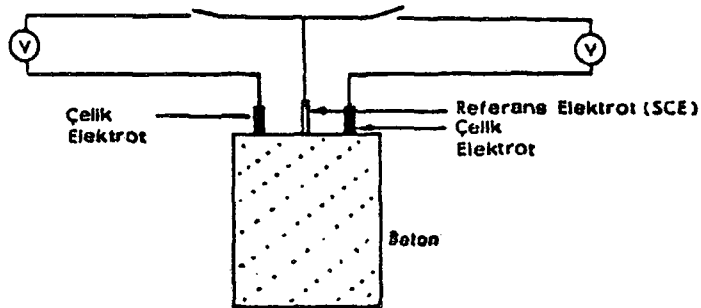
Beton bloklarında kullanılan araştırma alanı zemin suyu ve şehir şebeke suyu analizleri DSİ kimya laboratuvarında yapılmıştır (Tablo 4.3).

Hazırlanan beton karışımı, ahşap kalıba dökülmüş ve elektrotlar Şekil 4.6'daki gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 4.6- Beton numunenin ve elektrotların şematik görünüşü

Beton dökülüp elektrotlar yerleştirildikten sonra, elektrotlarla voltmetre ve referans elektrot (SCE) arasındaki bağlantılar Şekil 4.7'deki gibi yapıp deneye başlanmıştır.



Şekil 4.7- Betonda yapılan deneyin şematik görünüşü

Beton dökülmesiyle, ilk değer okuması arası yaklaşık 5 dakikadır. Bu süre gerekli bağlantılar için kullanılmıştır. Beton prizini aldıktan sonra (24 saat sonra) beton numunelerin hava ile temasını sağlamak için ahşap kalıplar sökülüştür. Deneyler oda sıcaklığında yapılmıştır.

4.2.6.2. Çeliğin beton içindeki denge potansiyelinin ölçülmesi

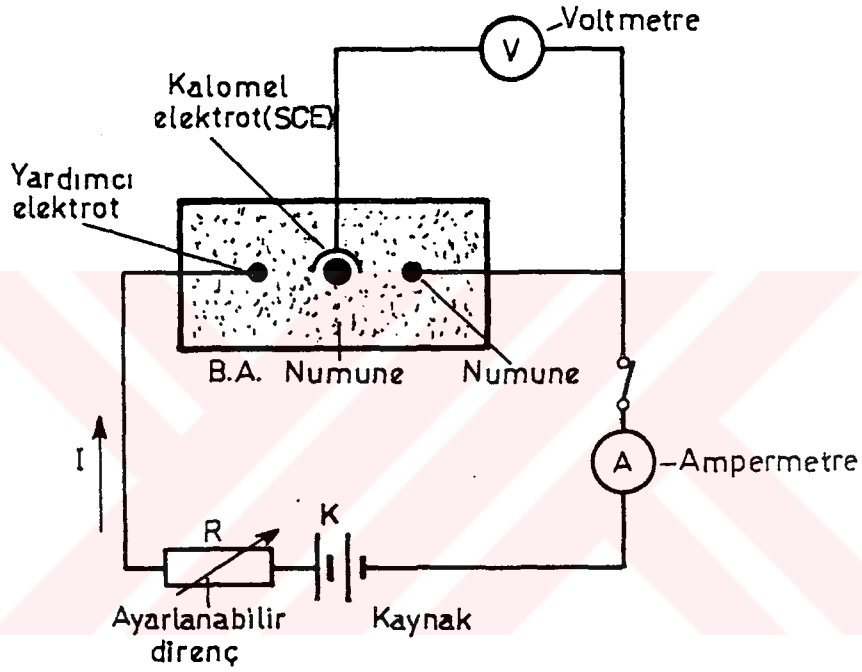
Çelik elektrotlar beton içine yerleştirildikten hemen sonra deneye başlanmış ve deney 696 saat (29 gün) boyunca devam etmiştir. Deney düzeneği sürekli kontrol edilmiş ve periyodik aralıklarla voltmetre ile potansiyel ölçümleri yapılmıştır. Başlangıçta süratle değişim gösteren elektrot potansiyelleri 13. günden sonra kararlı hale gelmiştir. Potansiyelde negatif veya pozitif yönlerde herhangi bir kaymanın olup olmayacağını izlemek amacıyla deneye 16 gün daha devam edilmiş ve denge halinin bozulmadığı görülünce deneye 29. gün son verilmiştir.

4.2.6.3. Çeliğin beton içinde katodik polarizasyonunun belirlenmesi için deney düzeneği

Araştırma alanı zemin suyuyla imal edilmiş beton bloğun denge potansiyeli ölçme deneyi yapıldıktan hemen sonra, aynı beton blok katodik polarizasyon deneyinde de kullanılmıştır.

Polarizasyon deneyi galvanostatik metodla yapılmıştır. Bu metod, çok hızlı yürüyen reaksiyonlar için kullanılmaktadır (22). Beton gözeneklerindeki dolgun kalsiyum hidroksit çözeltisi içinde bulunan klorür miktarı çok fazla olduğundan meydana gelen kimyasal reaksiyon çok hızlı olmuş ve sonuçta polarizasyon deneyinin galvanostatik metodla yapılmasına karar verilmiştir.

Deney için bir ampermetre (0.01 μ A ile 1 A arasında ölçüm yapabilen), bir voltmetre ve ayarlanabilir direnç kullanılmıştır. Beton blokta bulunan iki elektrottan birisi katot, diğeri de yardımcı elektrot olarak kullanılmıştır. Bu deneyin şematik görünüşü Şekil 4.8'deki gibidir.



Şekil 4.8- Galvanostatik metodla yapılan polarizasyon deney düzeneği

4.2.6.4. Katodik polarizasyon deneyinin yapılışı

Bağlantılar, Şekil 4.8'deki gibi yapıldıktan sonra deneye başlanmıştır. Kaynak olarak 1.5 V'lik bir kalem pil kullanılmıştır.

Doğru akım üreten 1.5 V'lik pil vasıtasıyla 10'ar dakikalık periyodik aralıklarla 0.6 μ A'dan 500 μ A'ya kadar sabit akım uygulanmıştır. Bu sabit akım

altında tutulan elektrotların potansiyeli bir süre değişmiş ancak 7 - 9 dakika içinde sabit kalmıştır.

Deneyde katot, katodik olarak polarize edilmiştir. Birim alana düşen akım (akım yoğunluğu) artırılarak potansiyelin katottaki değişimi ölçülmüştür.



5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Konya II. Organize Sanayi Bölgesi zemin suyunun beton içindeki çeliğe olan etkilerini belirlemek üzere laboratuvarında yapılan deneyler sonunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

5.1. Yeraltı Suyu Numunelerinin Analiz Sonuçları

Konya II. Organize Sanayi Bölgesinde açılan gözlem kuyusundan 9 ay boyunca her ay düzenli olarak numuneler alınmış ve bu numuneler DSİ kimya laboratuvarında analiz edilmiştir. Analiz sonuçları Tablo 5.1'de görülmektedir.

Numuneler üzerinde yapılan kimyasal analizlerde şu sonuçlara varılmıştır :

1- Araştırma süresince yeraltı suyu seviyesi (zemin yüzeyinden aşağıya doğru) 0.80 - 2.35 m arasında değişmiştir. Kış aylarında yüksek olan seviye Mart ayından başlayarak, Eylül ayına kadar devamlı düşüş göstermiştir. Bu düşüş, yağış azlığı, yazın oldukça sıcak geçmesi ve buharlaşmanın çok fazla olması gibi olaylarla açıklanabilir.

2- Numunelerin pH değerleri fazlaca bir değişiklik göstermemiştir.

3- Sıcaklık artışından dolayı olan buharlaşma neticesinde yeraltı suyundaki anyon ve katyon konsantrasyon değerleri artmış ve bu da elektriksel iletkenliğin artmasına sebep olmuştur. Ocak ayında 111050 micromhos / cm olan elektriksel iletkenlik Temmuz'da 139525 micromhos / cm'ye yükselmiştir. Bu durum suyun tuzluluğunun da arttığını göstermektedir.

4- Beton içindeki çeliğe olan etkisi bakımından en önemli iyon olan klorürün

değeri, çok fazla bir değişme göstermemiştir. Beton içindeki çeliğin korozif karakter gösterebilmesi için ortamda en az 700 mg/l klorür iyonunun bulunması gerekir (1). Araştırma alanı yeraltı suyu numunelerindeki en düşük klorür iyonu değeri Eylül ayı içinde görülmüş ve 29150 mg/l olarak tespit edilmiştir. Bu değer kritik değerin yaklaşık 42 katı kadardır. Bu durum bize bu suyun donatıyla teması halinde donatının şiddetli bir şekilde korozyona uğrayacağını göstermektedir. Nitekim yapılan deneylerle bu durum tespit edilmiştir.

5- Yeraltı suyu içinde bulunan diğer anyon ve katyon değerleri de limit değerlerin çok çok üstündedir. Beton için tahrip edici özelliği olan sülfat iyonu değeri TS 3440'da belirtilen değerin yaklaşık 19-20 katına kadar çıkabilmektedir. Bu suyun beton içindeki çeliğe ulaşabilmesi, su içinde bulunan sülfat iyonunun beton kabuğunu tahrip etmesiyle olmaktadır. Dolayısıyla yeraltı suyundaki sülfat iyonu miktarı da donatının korozyonuna ikinci derecede etki etmektedir.

Tablo 5.1- Gözlem kuyusundan alınan suların analiz sonuçları.

Numunenin alındığı tarih	Su seviyesi (m)	pH	EC micron-hos / cm	KATYONLAR (mg/l)				ANYONLAR (mg/l)			
				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁼
13 Ocak 1990	0.80	7.30	111050	1160	6313	16008	343	-	724	30077	20616
13 Şubat 1990	0.80	7.60	115 860	1196	6201	16657	358	-	737	30180	21470
13 Mart 1990	0.85	7.50	122500	1312	6942	16893	363	-	751	30256	25334
13 Nisan 1990	0.98	7.40	129600	1368	6639	17601	362	-	774	29843	26055
13 Mayıs 1990	1.13	7.40	131850	1278	6566	18179	360	-	763	30011	26518
13 Haziran 1990	1.35	7.60	126000	1164	6568	17929	355	-	756	30206	25512
13 Temmuz 1990	1.65	7.20	139525	1108	6991	17563	369	-	745	29467	27302
13 Ağustos 1990	2.20	7.30	120300	1040	6831	17372	361	-	730	29417	26626
13 Eylül 1990	2.35	7.20	117470	1046	6688	17160	358	-	722	29150	25548

5.2. Doymun Kalsiyum Hidroksit Ortamda Yapılan Deneyler

Betonarme çeliğın doymun kalsiyum hidroksit çözeltili içinde ve oksijenli ortamda 21 gün bekletilerek potansiyel değışimleri ölçülmüştür.

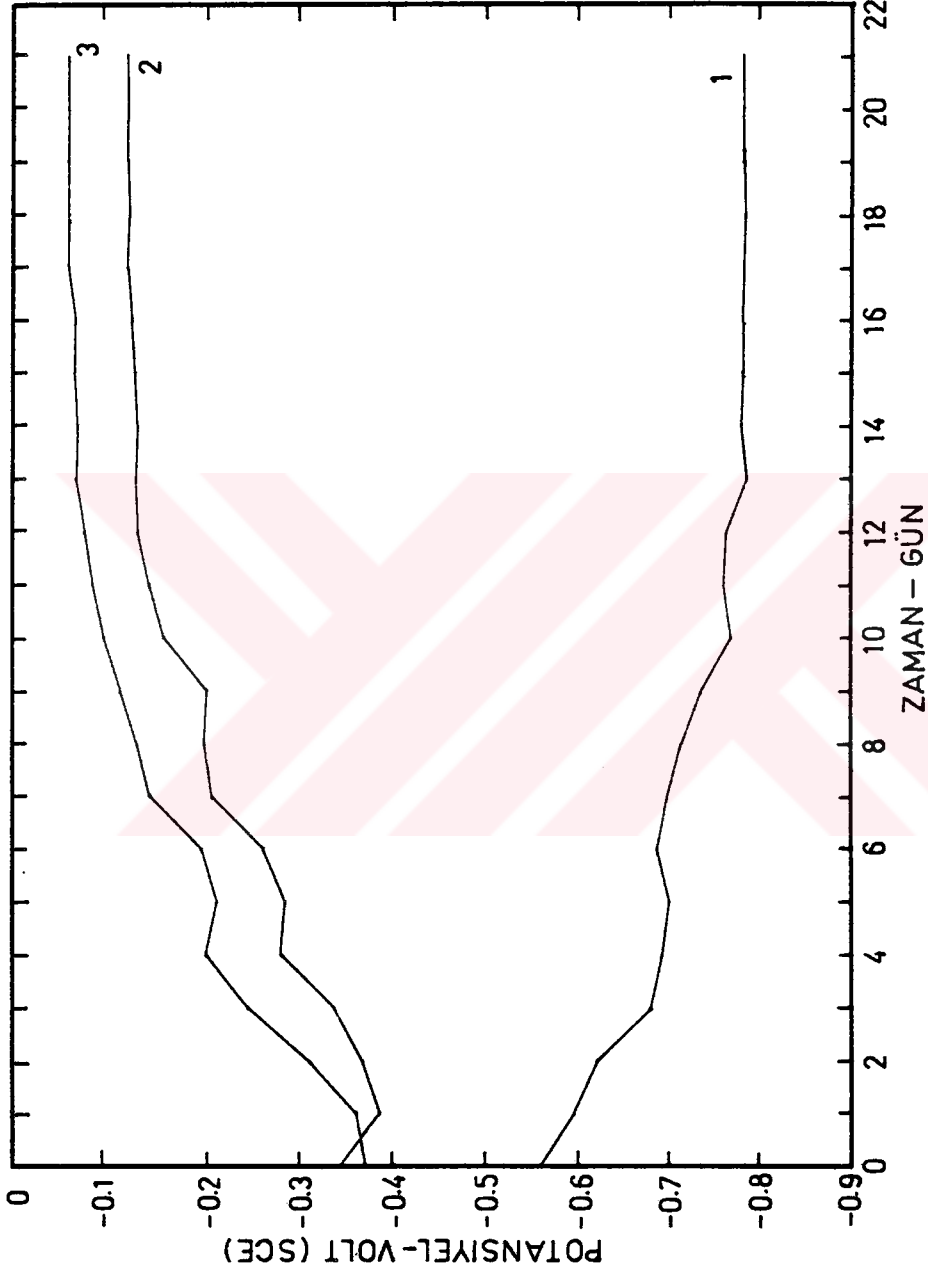
Bileşiminde hiç klorür bulunmayan kalsiyum hidroksitle doymun saf su çözeltili içindeki çelik potansiyelinin, ilk günlerde negatif yöne doğru kaydığı fakat takibeden günlerde potansiyelin pozitif olarak yön değıştirdiği gözlenmiştir. Pasifleşme işlemleri yaklaşık 15 gün içinde tamamlanmış ve potansiyel değeri yaklaşık olarak kararlı hale gelmiştir.

Bileşiminde çok az klorür bulunan kalsiyum hidroksitle doymun şehir şebeke suyu çözeltili içindeki çelik potansiyeli de yaklaşık kalsiyum hidroksitle doymun saf su çözeltili gibi olmuş fakat içindeki çok az miktardaki klorürün etkisiyle potansiyelde 54 mV'lik negatif bir sapma gözlenmiştir.

Klorür iyonunun çok yüksek olduğu (29150 ppm) II. Organize Sanayi Bölgesi zemin suyu içindeki çeliğın potansiyeli devamlı negatif yönde artış göstermiş ve yaklaşık 13'üncü günden sonra kararlı hale gelmiştir. Bu durumlar Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.2- Çeliğin doygun kalsiyum hidroksit içindeki denge potansiyel değerleri

ZAMAN (GÜN)	ARAŞTIRMA ALANI	ŞEHİR ŞEBEKE SUYU	SAF SU
	ZEMİN SUYU	POTANSİYEL	POTANSİYEL
	POTANSİYEL VOLT (SCE)	VOLT (SCE)	VOLT (SCE)
	DENEY 1	DENEY 2	DENEY 3
0	-0.560	-0.346	-0.372
1	-0.597	-0.387	-0.361
2	-0.622	-0.369	-0.312
3	-0.681	-0.340	-0.244
4	-0.692	-0.282	-0.200
5	-0.701	-0.290	-0.209
6	-0.687	-0.262	-0.192
7	-0.697	-0.202	-0.151
8	-0.716	-0.196	-0.141
9	-0.735	-0.199	-0.118
10	-0.767	-0.167	-0.103
11	-0.759	-0.153	-0.091
12	-0.766	-0.141	-0.082
13	-0.785	-0.138	-0.071
14	-0.780	-0.140	-0.074
15	-0.783	-0.135	-0.069
16	-0.781	-0.133	-0.071
17	-0.783	-0.127	-0.063
18	-0.782	-0.129	-0.062
19	-0.783	-0.127	-0.064
20	-0.782	-0.128	-0.063
21	-0.783	-0.127	-0.063
Denge Potansiyeli	-0.783	-0.127	-0.063



- 1 : Araştırma alan zemin suyu ile hazırlanan doygun kalsiyum hidroksit çözeltisi içindeki çelik.
2 : Şehir şebeke suyu ile hazırlanan doygun kalsiyum hidroksit çözeltisi içindeki çelik.
3 : Saf su ile hazırlanan doygun kalsiyum hidroksit çözeltisi içindeki çelik.

Şekil 5.1- Doygun kireç çözeltisindeki korozyon potansiyeli eğrileri.

Bu grafiğin incelenmesinden aşağıdaki sonuçlara varılmıştır :

1- Bileşiminde hiç klorür bulunmayan beton içindeki çelik pasif hale gelmektedir. Ortamda yeterli oksijen olması çeliğin pasifleşmesine engel teşkil etmemektedir.

2- Düşük klorür konsantrasyonlarında da pasifleşme söz konusu olmaktadır. Ancak ortamda klorür iyonunun bulunması çeliğin potansiyelinde negatif yönde sapmalara sebep olmaktadır.

3- Şehir şebeke suyu gibi bünyesinde çok az klorür iyonu bulunan suların beton karma suyu veya temas suyu olarak kullanılmasında hiç bir sakınca olmamaktadır. Çünkü bu sular çeliğin pasifleşmesine engel teşkil etmemektedirler.

4- Temasta bulunduğu çözeltide yüksek konsantrasyonlarda klorür iyonu bulunan beton içindeki çelik pasif halini koruyamamakta ve potansiyeli negatif yönde devamlı artış göstermektedir.

5- Araştırma alanı zemin suyu içindeki klorür miktarının çok fazla olması (29150 ppm) çeliğin pasif hale gelmesini önlemektedir.

6- Onbeşinci günden itibaren aktif (araştırma alanı zemin suyunun beton karma suyu olarak kullanılması halinde) ve pasif (şehir şebeke suyunun beton karma suyu olarak kullanılması halinde) çelik potansiyelleri arasında yaklaşık 650 mV'lik bir fark olmuştur. Bu fark aktif hale gelen çeliğin, pasif hale gelen çeliğe oranla çok fazla korozyona uğradığını göstermektedir. Bu durum literatüre de uygun düşmektedir (5, 6, 18).

5.3. Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Deneyler

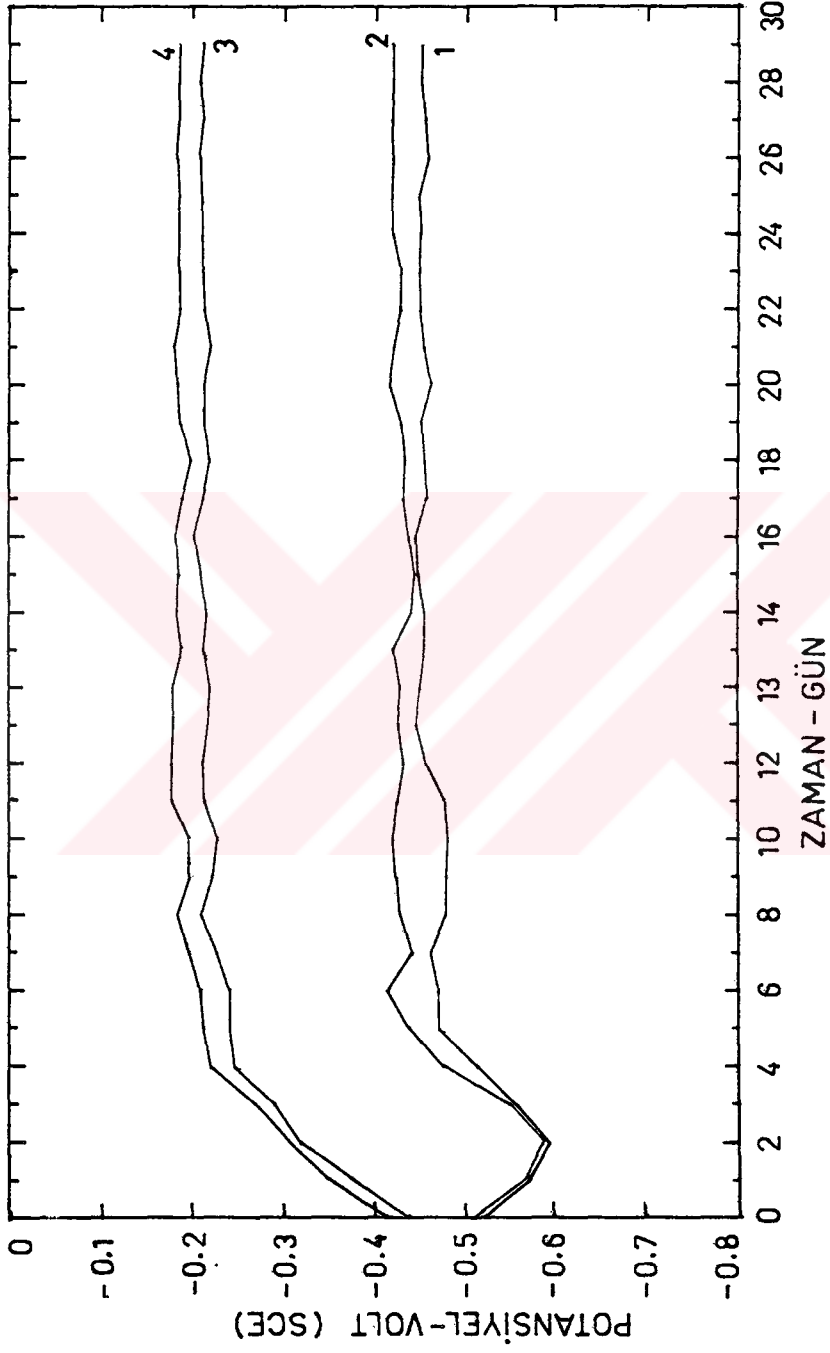
Beton numuneler üzerinde yapılan deneylerin, doygun kireç çözeltisi içinde yapılmış olanlardan farkı, beton içine oksijen difüzyonunun daha az oluşudur.

Yapılan deneyin birinci kısmında, atmosferde 29 gün bekletilen beton numuneleri içinde bulunan çelik çubukların potansiyeli incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.2'de ve Tablo 5.2'de görülmektedir.

Grafikten görüleceği üzere şehir şebeke suyuyla karılmış beton içindeki çelik potansiyeli ilk günden itibaren pozitif yönde artış göstermiş ve yaklaşık 12 gün içinde denge potansiyeline gelmiştir. Fazla miktarda klorür iyonu içeren araştırma alanı zemin suyuyla karılmış olan beton içindeki çelik ise ilk iki gün negatif yönde bir azalma göstermiş daha sonra pozitif yönde bir artış göstererek yaklaşık 13 günde denge potansiyeline ulaşmıştır. Daha negatif değerler olması gerekirken pozitif yönde olan bu potansiyel değişmesi, ölçüm esnasında betonun kuruyarak elektriksel direncini artırmasından ileri gelmiştir. Bunun sonucu olarak çelik elektrot ile referans elektrot arasındaki omik direnç artmış ve potansiyeller daha pozitif bulunmuştur.

Tablo 5.3- Beton içinde çelik elektrotların potansiyelinin zamanla değişimi

ZAMAN (GÜN)	Karışımında araştırma alanı zemin suyu bulunan beton numuneleri potansiyel - volt (SCE)		Karışımında şehir şebeke suyu bulunan beton numuneleri potansiyel - Volt (SCE)	
	DENEY 1	DENEY 2	DENEY 3	DENEY 4
0	-0.524	-0.513	-0.435	-0.410
1	-0.569	-0.567	-0.375	-0.350
2	-0.592	-0.587	-0.326	-0.309
3	-0.558	-0.549	-0.289	-0.269
4	-0.513	-0.475	-0.248	-0.223
5	-0.470	-0.440	-0.242	-0.212
6	-0.468	-0.415	-0.241	-0.210
7	-0.460	-0.437	-0.227	-0.197
8	-0.477	-0.428	-0.209	-0.184
9	-0.479	-0.423	-0.224	-0.194
10	-0.480	-0.420	-0.227	-0.198
11	-0.478	-0.425	-0.216	-0.182
12	-0.458	-0.433	-0.214	-0.183
13	-0.444	-0.425	-0.217	-0.184
14	-0.450	-0.428	-0.219	-0.186
15	-0.452	-0.429	-0.215	-0.190
16	-0.455	-0.440	-0.217	-0.185
17	-0.449	-0.445	-0.210	-0.184
18	-0.447	-0.436	-0.203	-0.182
19	-0.457	-0.432	-0.211	-0.191
20	-0.453	-0.433	-0.218	-0.201
21	-0.450	-0.427	-0.215	-0.188
22	-0.461	-0.416	-0.214	-0.185
23	-0.453	-0.420	-0.220	-0.183
24	-0.449	-0.427	-0.215	-0.187
25	-0.448	-0.428	-0.212	-0.185
26	-0.450	-0.418	-0.211	-0.184
27	-0.449	-0.417	-0.212	-0.186
28	-0.449	-0.418	-0.211	-0.185
29	-0.449	-0.418	-0.211	-0.185
Denge potansiyeli	-0.449	-0.418	-0.211	-0.185



1 ve 2 : Karma suyu A.A. zemin suyu olan numune içindeki çelik.
3 ve 4 : Karma suyu Ş. Şebeke suyu olan numune içindeki çelik

Şekil 5.2- Çeliğin beton içindeki denge potansiyel eğrileri.

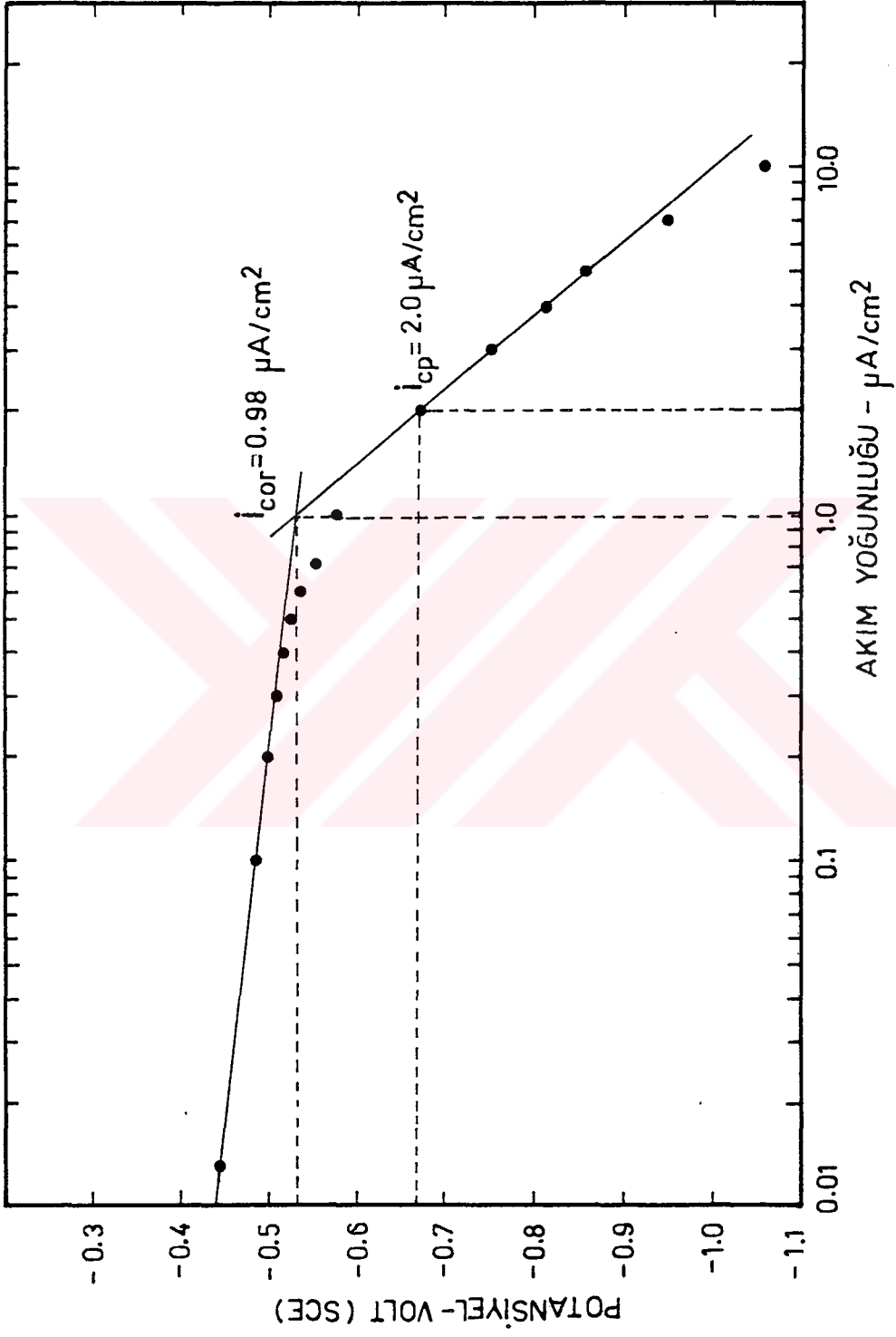
Araştırma alanı zemin suyuyla karılmış beton numune üzerindeki deneyin ikinci bölümünde yapılan katodik polarizasyon eğrisi de ideal biçimi ile elde edilmiştir. Katodik polarizasyon eğrisinden yeterli uzunlukta bir Tafel bölgesi sağlanmış ve korozyon potansiyeline ekstrapolasyon yapılarak (Şekil 5.3) $I_{cor} = 9.8 \text{ mA/m}^2$ bulunmuştur. Ayrıca katodik koruma akım ihtiyacı olarak $I_{cp} = 20 \text{ mA/m}^2$ değeri elde edilmiştir.

Şehir şebeke suyuyla imal edilen beton içindeki çelik numunenin pasifleşmesi polarizasyon deneyini gerekli kılmamaktadır.

Tablo 5.4- Polarizasyon değerleri

ZAMAN (Dakika)	UYGULANAN AKIM (μA)	AKIM YOğUNLUğU ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)*	NUMUNE (1) POTANSİYELİ E(VOLT) (SCE)	η (mV)
0	-	-	-0.442	-
10	0.6	0.012	-0.444	2
20	5	0.10	-0.486	44
30	10	0.20	-0.497	55
40	15	0.30	-0.508	66
50	20	0.40	-0.516	74
60	25	0.50	-0.525	83
70	30	0.60	-0.536	94
80	35	0.70	-0.559	117
90	50	1.00	-0.574	132
100	100	2.00	-0.673	231
110	150	3.00	-0.752	310
120	200	4.00	-0.813	371
130	250	5.00	-0.857	415
140	350	7.00	-0.946	504
150	500	10.00	-1.059	617

* Çelik elektrot alanı 50cm^2 dir.



Şekil 5.3. Beton içindeki çeliğin katodik polarizasyon eğrisi

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Labaratuvarında yapılan deneyler ve bu deneylerin araştırma alanıyla olan ilişkilerine ait sonuçlar aşağıda çıkarılmıştır.

1- II. Organize Sanayi Bölgesi zemin suyu hem beton hem de beton içindeki çelik için son derece tahrip edici özelliğe sahiptir.

2- Bu su içinde bulunan ve beton çeliği için aktifleştirici özelliği olan klorür iyonu (En yüksek 30256 mg / l, en düşük 29150 mg / l) kritik değer 40-45 katı arasında değişmektedir (1). Yine bu suda bulunan ve beton için tahrip edici özelliği bulunan sülfat değeri (En yüksek 26518 mg / l, en düşük 20616 mg / l) TS 3440'da belirtilen kritik değerlerin 19-20 katı arasında değişmektedir.

3- II. Organize Sanayi Bölgesi zemin suyu seviyesi 0.80-2.35 m arasında değişmektedir. Bu seviyenin, bölgede yapılan veya yapılacak olan bodrumlu yapıları etkileme ihtimali yüksektir.

4- Beton karma suyu olarak Konya şehri şebeke suyu kullanılmış olan beton içindeki çelik, betonun yüksek âlkalinitesi ($pH > 12.0$) sebebiyle pasif hale gelmektedir. Oksijenin bulunması pasifliğin bozulmasına engel teşkil etmemektedir. Bu durum Moskwin'e (27) göre de uygun düşmektedir.

5- Beton bünyesinde az miktarda klorür bulunması (şehir şebeke suyunda $Cl^- = 24.85$ mg / l) çeliğin pasifleşmesine engel teşkil etmemektedir. Yalnız çeliğin potansiyelinde negatif yönde sapmalar olmaktadır. Bu sonuçlar Hausmann (1) ve Doğan'ın (18) çalışmalarına da uygun düşmektedir.

6- Beton karma suyu (veya temas suyu) olarak Konya II. Organize Sanayi Bölgesi zemin suyunun kullanılması, su içinde bulunan klorür iyonu miktarının çok fazla olması (29150 mg / l) sebebiyle çelik pasifleşmemekte ve hızla korozyona uğramaktadır.

7- Karma suyu olarak kullanılan Konya II. Organize Sanayi zemin suyuyla imal edilen beton içindeki çeliğin potansiyeli (-449 mV) ile aynı suyun doygun kal-siyum hidroksit çözeltisi içindeki çeliğin potansiyeli (-783 mV) arasında yaklaşık 330 mV fark olmaktadır. Bu fark beton bünyesine oksijen girişinin az oluşu ve betonun yüksek iç direncinden ileri gelmektedir.

8- Araştırma alanı zemin suyunun çok fazla klorür içermesi ve bu durumda beton içindeki çeliğin potansiyelinin -418 mV ile -449 mV arasında değişmesi, do-natının Arup'a (7) göre çukur tipi korozyona uğrama ihtimalini güçlendirmektedir. Bu durum çeliğin taşıma gücünün azalması bakımından bir çok sakıncalar doğurmaktadır.

9- Araştırma alanı zemin suyuyla yapılan beton numunesi içindeki çeliğin ko-rozyon hızı ($I_{cor} = 9.8 \text{ mA/m}^2 = 1.13 \times 10^{-2} \text{ mm/yıl}$) ve katodik koruma akım ihtiyacı ($I_{cp} = 20 \text{ mA/m}^2$) oldukça yüksektir. Ancak bu değerler betonun iç direncinin zamanla artması sonucu daha küçük değerler alabilir.

Yapılan labaratuvar deneylerinden elde edilen kalitatif ve kantitatif sonuçlar, Konya II. Organize Sanayi Bölgesi zemin suyunun hem betona hem de beton içindeki çeliğe şiddetli korozif etkiler yapabilecek kadar ağır tuzluluk problemi ihtiva ettiğini göstermektedir. Bu durum, bölgede daha önceden inşaa edilen yapıların bu suyun oluşturduğu etkiler bakımından ileride istenmeyen durumlara maruz kalabileceğini göstermektedir. Bölgede hiç bir tedbir alınmadan inşaa edilecek yapıların önce beton kabukları hasara uğrayacak, daha sonra da donatıda şiddetli korozif reaksiyonlar başlayacaktır. Ortaya çıkan bu sonuçlar bölgede alınabilecek tedbirleri de gündeme ge-tirmektedir. Bu tedbirler, bölgede inşaa edilen ve edilecek olan sanayi yapılarıyla bera-ber, bölgeye götürülen ve götürülecek olan altyapı tesislerini de içine almalıdır. Alınabilecek tedbirler yeraltı suyunun seviyesine, yapıların temel seviyesine ve altyapı tesislerinde kullanılan malzemelerin cinsine göre değişiklik göstermektedir.

Bölgede alınması gereken en önemli tedbir yeraltı suyu seviyesinin düşürülmesidir. Bu da bölgeye etkili bir drenaj ağının yapılmasıyla mümkündür. Bu

tedbir, tek tek bütün yapılara drenaj sistemi uygulamaktan hem daha ekonomik hem de daha etkili ve kalıcı çözüm olacaktır. Etkili bir drenaj ağı kurulsa bile, yeraltı suyu seviyesi birden bire düşmeyeceğinden inşaa edilecek yapılarda diğer tedbirlerden de bir kaçı uygulanmalıdır.

Araştırma alanında alınabilecek en pratik ve uygun koruma tedbirlerinden biri de beton kalitesinin artırılmasıdır. İmal edilecek betonun permeabilitesi ve su / çimento oranı düşük tutulmalı, betonun çimento miktarı ve cinsi, gronülometrisi, beton kıvamı, betonun vibrasyonu ve kürüne dikkat edilerek geçirimsiz ve sağlam bir beton elde edilmelidir. Bu şekilde betona klorür ve oksijen difüzyonu en aza indirilerek meydana gelecek kimyasal reaksiyonların yavaşlaması sağlanabilir. Beton imalinde kullanılacak olan çimentonun cinsi de önemlidir. Daha sıkı ve permeabilitesi düşük bir beton elde etmek için pozolanlı çimento kullanılmalıdır. Pozolan betonun hidrasyon ısısı ile sülfat etkisini azaltır, ara boşlukları doldurup betonda daha yoğun bir yapının oluşmasını sağlar ve hidrasyona uğramış ürünün çeliğe tutunma mukavemetini (aderansını) artırır (32).

Bölgede uygulanabilecek olan bir diğer tedbir de, beton dökümünden sonra beton yüzeylerinin uygun bir malzeme ile kaplanmasıdır. Bu tedbir, pahalı olmasına karşılık, beton içine klorür ve oksijen girişini büyük bir ölçüde engellediğinden iyi sonuç vermektedir (26). Kaplama malzemesi olarak beton asfalt, epoksi reçineleri ve boya kullanılabilir.

Alınabilecek tedbirlerden bir diğeri de inhibitör kullanımıdır. Beton içindeki çeliğin korozyon hızını azaltmak için uygulanan en etkili inhibitör kalsiyum nitrittir. Bu inhibitör, gronülometrisi iyi ayarlanmış, su / çimento oranı ve permeabilitesi düşük olarak imal edilen betonda kullanılması halinde çok etkilidir (26).

Bölgeye uygulanması ve bakımı oldukça zor ve pahalı olan bir diğer koruma metodu da beton içindeki çeliği katodik olarak korumaktır. Fakat bu metod, yapıların temellerinde uygulandığında, hidrojen çıkışı olmakta ve etrafa kötü kokular

yayılabilir. Bundan dolayı bu metod daha çok yeraltına döşenen çelik boruların korunmasında kullanılmaktadır.

Yukarıda tavsiye edilen tedbirlerin yanında proje aşamasında da bir takım hususların gözönünde bulundurulması gerekir. Özellikle temel hesapları yapılırken pas paylarının yüksek tutulması (minimum 50 mm) donatı yüzdesi düşük tutulup betonarme kesitin büyütülmesi ve emniyet gerilmesinin düşük tutularak kesit hesaplarının yapılması gereklidir.

Bölgenin ağır tuzluluk problemi yapılarda alınacak tedbirleri de karmaşık hale getirmektedir. Yani yapıları korozyondan korumak için sadece bir tek tedbirin alınması yeterli olmayabilir. Bundan dolayı yukarıda bahsedilen tedbirlerden birkaçının uygulanması bölgeye yapılacak yapının güvenliği ve geleceği açısından oldukça faydalı olacaktır.

Konya II. Organize Sanayi Bölgesi zemin suyunun gerek beton gerekse beton içindeki çeliğe olan etkilerini azaltmak veya yok etmek için uygulanan metodların bölgede uygulanabilirliği araştırılmalıdır. Bu metodların geçerliliğini ve ne dereceye kadar beton ve çeliği koruduğunu öğrenebilmek için aşağıdaki deneyler yapılabilir :

- 1- Su / çimento oranı ve permeabilitesi düşük beton içindeki çeliğin, aktiflik ve pasiflik karakterlerinin belirlenmesi,
- 2- İnhibitör kullanımının korozyona ne ölçüde etki edeceğinin belirlenmesi,
- 3- Pozolan kullanımının korozyona ne ölçüde etki edeceğinin belirlenmesi,
- 4- Kaplama malzemeleriyle deney yapıp bu suya karşı hangisinin daha etkili olduğunun belirlenmesi.

Bütün bu deneyler yapıldığında bölge hakkında daha kesin bilgiler elde edilebilir ve alınabilecek tedbirler daha gerçekçi olarak ortaya konulup uygulanabilir.

KAYNAKLAR

1. HAUSMANN, D.A., 1967. Steel corrosion in concrete. *Materials Protection* 6:19-23
2. SCOTT, G.N., 1964. Corrosion protection properties of portland cement concrete. *ACI Journal*. 61:1038-1051
3. WHEAT, H.G., ELIEZER, Z., 1985. Some electrochemical aspect of corrosion of steel in concrete. *Corrosion-NACE*. 41:11.640-645
4. WHEAT, H.G., ELIEZER, Z., 1987. Comments on the identification of a chloride threshold in the corrosion of steel in concrete. *Corrosion-Nace*. 43:2.126-128
5. STRATFULL, R.F., 1987. Comments on the identification of a chloride threshold in the corrosion of steel in concrete. *Corrosion-NACE*. 43:8.483-485
6. VAN DAVEER, J.R., 1975. Techniques for evaluating reinforced concrete bridge decks. *ACI Journal*. 12:697-704
7. ARUP, H., 1983. The mechanism of the protection of steel by concrete in corrosion of reinforcement in concrete construction. A.P. Crane. Ed. Ellis Hadwood Ltd.
8. MONFORE, G.E., VERBECK, G.J., 1960. Corrosion of prestressed wire in concrete. *ACI Journal*, 32:491-515
9. GRIFFIN, D.F., 1967. Tests on reinforced concrete, salt gain accelerates corrosion of steel. *Materials Protection*. 6 : 39-41
10. LEWIS, D.A., COPENHAGEN, W.J., 1959. Corrosion of reinforcing steel in concrete in marine atmospheres. *Corrosion - NACE*. 15 : 382-388.

11. CORNET, I., BRESLER, B., 1966. Corrosion of steel and galvanized steel in concrete. *Materials Protection*. 5 : 69-71.
12. STRATFULL, R.F., 1957. The corrosion of steel in a reinforced concrete bridge. *Corrosion-NACE*. 13:173-178
13. MUDD, C.J., MUSSINELLI, G.L., TETTEMANTI, M., PEDEFERRI, P., 1988. Cathodic protection of steel in concrete. *Materials Protection*. 27:18-24
14. LOTO, C.A., ODUMBO, E.T., 1989. Electrochemical potential monitoring of corrosion and coating protection of mild steel reinforcement in concrete. *Corrosion-NACE*. 45:7.553-557
15. CORNET, I., ISHIKAWA, T., BRESLER, B., 1968. The mechanism of steel corrosion in concrete structures. *Materials Protection*. 7:44-47
16. WYATT, B.S., IRWINE, D.J., 1987. A review of cathodic protection of reinforced concrete. *Materials Performance*. 29:12-20
17. WEST, R.E., HIME, W.G., 1985. Chloride profiles in salty concrete. *Materials Performance* , 29-33
18. DOĞAN, Ö.M., 1989 Çeliğin beton içinde pasiflik ve korozyon karakteristiklerinin belirlenmesi. G.Ü. Fen Bil. Ens. Y. Lisans Tezi. Ankara
19. HAHIN, C., 1984. Corrosion resistant design guidelines for portland cement concrete. *Materials Performance*:42-46
20. ÇAKIR, A.F., 1990. Korozyonun ilkeleri. Korozyon ve katodik koruma semineri. D.S.İ. Gn. Müd. 2:1-10, Bursa
21. ÜNERİ, S., 1988. Elektrokimya. A.Ü. Fen. Fak. Yay. 138.1:285-316, Ankara
22. DORUK, M., 1982. Korozyon ve Önlenmesi. ODTÜ Müh. Fak. Yayın No:70, Ankara

23. AĞACIK, G., 1988. Betonarme donatısının korozyonu. D.S.İ. Teknik Bülteni. 65.3-8
24. UHLIG, H.H., 1971. Corrossion and corrossion control. İkinci baskı. John Wiley and Sons Inc., Newyork
25. DORUK, M., 1972. Korozyon olayının elektrokimyasal ilkeleri. ODTÜ Müh. Fak. Yayın No:42, Ankara
26. YALÇIN, H., 1990. Çeliğin beton içindeki korozyonu ve alınacak önlemler. Korozyon ve katodik Koruma Sem. DSİ Gn Müd. 3.1-19, Bursa
27. MOSKWIN, V., 1980. Concrete and reinforced concrete deteriation and protection. 243-382, Moskow
28. PURBAIX, M., 1976. Atlas of electrochemical equilibrium in aques solitions. Pergamen Press Ltd. 314, London
29. GÜNER, A., 1984. Kimyasal zararlı ortamda beton-üretim, bakım ve önlemler. Beton Semineri. D.S.İ. Gn. Müd. 100-109
30. ERBİL, M., 1988. Korozyon inhibitörleri. 1. Korozyon Simpozyumu.63-83, Ankara
31. SÖNMEZ, A. Ü., 1989. Beton katkı maddeleri ve çeşitli uygulamaları. TMMOB İzmir Şb.Hb. Bül. 25.5-8, 18
32. AVCI, E., 1988. Betonarme yapılardaki çeliklerin korozyonuna pozolanın etkisi. 1. Korozyon Simpozyumu. 354-352, Ankara
33. MUSSUNELLI, G.L., TETTEMANTI, M., TOGAY, A., 1988. Cathodic protection of steel in concrete with mixed metal. 1. Korozyon Simpozyumu. 355-365

34. YILMAZ, T., YÜCEER, A., BERKTAY, A., 1988. Konya II. Organize Sanayi, Tümosan ve yakın gelecekte yapımı düşünülen Tarım fuarı park bölgesinde zeminin yaratabileceği problem ve çözüm yolları. Plânlı dönemde Türkiye’de Şehir. ve Kon. Örn. Simpozyumu, Konya
35. AĞACIK, G., 1986. Konya II. Organize Sanayi Bölgesi Sülfat Problemi ile İlgili Rapor. DSİ Gn. Müd. Ankara.
36. U.S.A. Salinity Laboratory Staff. 1953. Diagnosis and improvement of Saline and Alkali Soils. U.S.D.A. Agricultural Handbook, No : 60.

