

58/42

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞU VE GÜNEYDOĞU ANADOLU BÖLGELERİNDE ÜRETİMİ
YAPILAN PKÇ/B 32,5 R ÇİMENTOSUNUN BETONARME
YAPILARDAKİ DONATI KOROZYONUNA ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Oğuzhan KELEŞTEMUR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2002

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞU VE GÜNEYDOĞU ANADOLU BÖLGELERİNDE ÜRETİMİ
YAPILAN PKÇ/B 32,5 R ÇİMENTOSUNUN BETONARME
YAPILARDAKİ DONATI KOROZYONUNA ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Oğuzhan KELEŞTEMUR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

Bu tez,8/01/2003 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile başarılı/başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman : Yrd.Doç.Dr. Servet YILDIZ

Üye : Yrd.Doç.Dr. Mustafa AKSOY

Üye : Yrd.Doç.Dr. Salih YAZICIOĞLU

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...15/01/2003... tarih ve3/8..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	IV
ÇİZELGELER LİSTESİ	VI
SEMBOLLER LİSTESİ	VIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	4
1.2. Beton	4
1.3. Çimento	4
1.3.1. Çimentonun Hidratasyonu	6
1.3.2. Sertleşme Olayı (Hidratasyon Yapmış Çimentonun İç Yapısı)	7
1.3.3. Çimento Türleri	9
1.3.3.1. Katkılı Portland Çimentosu (KPC325)	10
1.3.3.2. Traslı Çimento (TÇ 325)	10
1.4. Agregalar	12
1.5. Beton Karma Suyu	14
2. BETON İÇİNDEKİ ÇELİĞİN KOROZYON TEORİSİ	15
2.1. Elektrokimyasal Korozyon	15
2.2. Çeliğin Beton İçindeki Korozyonunun Elektrokimyasal Mekanizması	17
2.3. Demir-Su Sisteminde Elektrokimyasal Reaksiyonlar	19
2.4. Beton İçindeki Çeliğin Korozyonuna Etki Eden Faktörler	21
2.4.1. Beton pH Derecesinin Etkisi	21

2.4.2. Oksijen Difüzyonunun Etkisi	23
2.4.3. Klorür İyonlarının Etkisi	24
2.4.4. Beton Yapısı ve Kalitesinin Etkisi	27
2.4.5. Karbonatlaşma	27
2.4.6. Beton Rutubetinin Etkisi	28
2.4.7. Pas Payı	29
2.4.8. İnhibitör Etkisi	29
3. BETON İÇİNDE ÇELİK DONATISININ KOROZYONU İLE İLGİLİ ARAŞTIRMALAR	31
3.1. Çalışmanın Literatür Işığında Değerlendirilmesi	53
4. KOROZYON HIZI ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ VE POLARİZASYON	55
4.1. Korozyon Hızı Ölçüm Yöntemleri	55
4.1.1. Ağırlık Kaybı Yöntemi	55
4.1.2. Elektrokimyasal Yöntemler	55
4.1.2.1. Polarizasyon-Kırılma (Tafel Ekstrapolasyon) Yöntemi	55
4.1.2.2. Lineer Polarizasyon (Polarizasyon-Direnç) Yöntemi	57
4.1.3. Statik Potansiyel Ölçüm Yöntemleri	58
4.2. Polarizasyon Eğrilerinin Elde Edilmesi	59
4.2.1. Galvanostatik Yöntem	59
4.2.2. Potansiyostatik Yöntem	60
4.3. Polarizasyon ve Polarizasyon Çeşitleri	60
5. DENEY ÇALIŞMALARI	63
5.1. Deney Malzemeleri ve Deney Yöntemleri	63
5.1.1. Elektrotların Hazırlanması	63
5.1.2. Beton Örneklerinin Tasarımı	64

5.2. Deney Yöntemi	71
5.2.1. Korozyon Potansiyeli Ölçümleri	71
5.2.2. Çeliğin Beton İçindeki Anodik ve Katodik Polarizasyon Ölçümleri	73
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	76
6.1. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi	76
6.1.1. ASTM-C-876-91'e Göre Yapılan Korozyon Potansiyelleri Ölçümünün Değerlendirilmesi	76
6.1.2. Galvanostatik Yöntemle Yapılan Polarizasyon Ölçümlerinden Elde Edilen Verilerin Değerlendirilmesi	84
6.2. Genel Sonuçlar ve Öneriler	91
KAYNAKLAR	94
EKLER	98
EK-1 Beton İçerisindeki Çeliğin Korozyon Potansiyeli Değerleri	98
EK-2 Anodik ve Katodik Polarizasyon Deneyi Sonuçları	100

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DOĞU VE GÜNEYDOĞU ANADOLU BÖLGELERİNDE ÜRETİMİ YAPILAN PKÇ/B 32,5 R ÇİMENTOSUNUN BETONARME YAPILARDAKİ DONATI KOROZYONUNA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Oğuzhan KELEŞTEMUR

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

2002, sayfa; 102

Birçok araştırmacı tarafından gerçek beton örnekleri üzerinde yapılan çalışmalarda genellikle değişik klorür iyonu konsantrasyonlarında beton içindeki çeliğin korozyon hızı belirlenmiş ve klorür iyonlarının korozyona neden olan minimum sınır değeri tayin edilmiştir. Bu çalışmada ise beş ayrı ildeki fabrikalardan alınan PKÇ/B 32.5 R türü çimentosunun, oksit kompozisyonundaki farklılıklarından dolayı korozyon hızı üzerine etkisi araştırılmıştır.

Korozif bir ortam oluşturabilmek amacıyla beton numunelerin karışım suyuna deniz suyu baz alınarak % 3 oranında NaCl ilave edilerek deneyler yapılmıştır. Beton numunelerinin karışım oranları TS 802'ye uygun olarak hazırlanmış olup tüm numunelerde aynı malzeme ve malzeme miktarı kullanılmıştır. Beş grup halinde hazırlanan numunelerdeki tek farklılık oksit bileşenleri değişik olan PKÇ/B 32.5 R türü çimentodur.

Yapılmış olan bu çalışmada ilk olarak beton numuneler içerisindeki elektrot potansiyellerinin zamana karşı değişimi 90 gün süresince her gün Cu/CuSO₄ Referans Elektrotu ile tespit edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise beton numunelere galvanostatik yöntem uygulanarak elektrotların korozyon hızları ayrı ayrı tespit edilerek çimentonun oksit kompozisyonundaki farklılığın korozyon hızına etkisi yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Korozyon, Çimento, Beton, Betonarme, Çelik.

ABSTRACT**Master Thesis**

An Investigation on the Effect of PKÇ/B 32.5 R Cement Produced in East and Southeast Anatolia Region on the Corrosion of Reinforced Concrete Structures

Oğuzhan KELEŞTEMUR

Fırat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Construction Education

2002, page; 102

The corrosion rate of steel in the concrete structures has been determined on the concrete samples for various concentrations of chlorine ion and minimum boundary values of chlorine ions stimulated the corrosion rate have been established by many researchers. However, in this study, the corrosion rate due to dissimilarity of oxide concentrations has been studied for PKÇ/B 32,5 R cement which has been taken from five various factories.

3% NaCl which is base for seawater was added into the solution water of the concrete steel for the sake of creating corrosive environment and then tests have been carried out. The mixture rate of concrete samples has been prepared according to TS 802 and the same type and same amount of material have been used for the samples. The samples were prepared as five groups and the unique difference between them was various oxide components existing in PKÇ/B 32.5 types cement depending on various producing center.

In this study, in the first step, the changes in the electrot potential versus time for the concrete samples were determined for 90 days by taking measurement every day and using Cu/CuSO₄ reference electrot. In the second step of the study, the corrosion rate of electrots has been determined separately by applying galvanostatic method to the concrete samples and the effect of various oxide compositions in the cement on the corrosion rate has been interpreted.

Key Words: Corrosion, Cement, Concrete, Reinforced Concrete, Steel.

TEŞEKKÜR

Bu tezin önerilmesi, yönlendirilmesi ve tamamlanması hususunda benden her türlü yardımlarını esirgemeyen danışman hocam sayın Yrd.Doç.Dr. Servet YILDIZ'a ve Yrd.Doç.Dr. Mustafa AKSOY'a teşekkür ederim.

Tez süresince yapmış olduğum çalışmalarda her türlü bilgi ve görüşlerine başvurduğum Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü Hocalarına ve özellikle Dr. Abdurrahman ASAN hocama teşekkür ederim.

Ayrıca deney düzeneğimi oluştururken bana yardımcı olan ve emeği geçen tüm arkadaşlarıma ve hocalarıma da teşekkür ederim.

Deneyleirim süresince laboratuvar imkanlarını sunan Yapı Eğitimi Bölüm Başkanı sayın Yrd.Doç.Dr. Mehmet TUĞAL'a ve deney süresince benden yardımlarını esirgemeyen sayın Arş.Gör. Erdiñç ARICI'ya teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen değerli aileme de teşekkür sunmayı bir borç bilirim.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Porozite ve geçirgenlik göstergeleri	8
Şekil 2.1. Katotta hidrojen çıkışı	16
Şekil 2.2. Çeliğin beton içindeki korozyonunun elektrokimyasal mekanizması	17
Şekil 2.3. Demir yüzeyinde pasın oluşması	18
Şekil 2.4. Sodyum klorürlü ortamda demirin korozyonu	19
Şekil 2.5. Demir-su sistemi için potansiyel-pH diyagramı	19
Şekil 2.6. Demir-su sisteminde pH-potansiyel ilişkisine bağlı olarak oluşan bileşikler	21
Şekil 2.7. Çeliğin korozyon hızının pH'la değişimi	22
Şekil 2.8. Beton içine oksijen difüzyon hızının su/çimento oranı ve beton kalınlığına göre değişimi	23
Şekil 2.9. Beton içindeki çeliğin korozyonu üzerine çözünmüş oksijen konsantrasyonunun etkisi	24
Şekil 2.10. Klorür iyonlarının çeliğin korozyon hızına etkisi	26
Şekil 2.11. Betonun su doygunluk derecesi ile rezistivite arasındaki bağıntı	28
Şekil 3.1. Doygun kireç çözeltisi içine daldırılmış çelik çubukların korozyon potansiyeli değişimi	33
Şekil 4.1. Oksijensiz asit çözeltisindeki metalin katodik polarizasyon eğrisi	56
Şekil 4.2. Dış akıma karşı polarizasyon aşırı gerilimi	57
Şekil 4.3. Galvanostatik yöntemle yapılan ölçümde kullanılan düzenek	59
Şekil 4.4. Potansiyostatik polarizasyon incelemelerinde kullanılan deney düzeneği	60
Şekil 4.5. Polarizasyon çeşitleri	61
Şekil 5.1. Desikatör içerisinde koruma altına alınan elektrotlar	64

Şekil 5.2. Beton bloğun şematik görünüşü	65
Şekil 5.3. Cu/CuSO ₄ referans elektrodu ile beton içerisindeki elektrodun korozyon potansiyeli ölçümü	72
Şekil 5.4. Betonarme demirlerinin korozyon potansiyeli ölçümleri için kullanılan sistem	73
Şekil 5.5. Galvanostatik yöntemle yapılan polarizasyon ölçümünün şematik görünüşü	74
Şekil 5.6. Galvanostatik yöntemle yapılan polarizasyon ölçümünün fotoğrafı	75
Şekil 6.1. A numunesi içerisinde bulunan çeliğin korozyon potansiyeli değerinin zamana göre değişimi	77
Şekil 6.2. B numunesi içerisinde bulunan çeliğin korozyon potansiyeli değerinin zamana göre değişimi	78
Şekil 6.3. C numunesi içerisinde bulunan çeliğin korozyon potansiyeli değerinin zamana göre değişimi	79
Şekil 6.4. D numunesi içerisinde bulunan çeliğin korozyon potansiyeli değerinin zamana göre değişimi	80
Şekil 6.5. E numunesi içerisinde bulunan çeliğin korozyon potansiyeli değerinin zamana göre değişimi	81
Şekil 6.6. Çeliğin korozyon potansiyeli değerinin 5 ayrı beton numune içerisinde zamana göre değişimi	82
Şekil 6.7. A numunesinin katodik polarizasyon eğrisine göre korozyon hızının tespiti	85
Şekil 6.8. B numunesinin katodik polarizasyon eğrisine göre korozyon hızının tespiti	85
Şekil 6.9. C numunesinin katodik polarizasyon eğrisine göre korozyon hızının tespiti	86
Şekil 6.10. D numunesinin katodik polarizasyon eğrisine göre korozyon hızının tespiti	86
Şekil 6.11. E numunesinin katodik polarizasyon eğrisine göre korozyon hızının tespiti	87

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1.1. Portland çimentosu yapısındaki fazlar	6
Çizelge 1.2. Türkiye’de üretilen çimentolar ve kullanıldıkları alanlar	10
Çizelge 1.3. Puzolanlı çimentoların kimyasal özellikleri	12
Çizelge 1.4. Betonda kullanılacak agrega için sınıflandırma	13
Çizelge 3.1. Değişik korozyon potansiyellerinde korozyon oluşum olasılıkları	35
Çizelge 3.2. Bazı korozyon inhibitörlerinin doygun kireç çözeltisi içinde çeliğin korozyon hızı üzerine etkisi	35
Çizelge 3.3. Korozyon potansiyeline bağlı olarak çeliğin durumunun değişimi	36
Çizelge 3.4. Değişik NaCl konsantrasyonlarında beton içindeki çeliğin üç elektrot yöntemiyle belirlenen korozyon hızları	37
Çizelge 5.1. Deneylerde kullanılan çeliğin ağırlıkça analizi	63
Çizelge 5.2. A çimentosuna (PKÇ/B 32,5 R) ait kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları	66
Çizelge 5.3. B çimentosuna (PKÇ/B 32,5 R) ait kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları	67
Çizelge 5.4. C çimentosuna (PKÇ/B 32,5 R) ait kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları	68
Çizelge 5.5. D çimentosuna (PKÇ/B 32,5 R) ait kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları	69
Çizelge 5.6. E çimentosuna (PKÇ/B 32,5 R) ait kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları	70
Çizelge 5.7. TS 802’ye uygun olarak hazırlanan beton karışım miktarları	71
Çizelge 6.1. Oksit kompozisyonundaki değişikliğin ana bileşenlerin kompozisyonuna etkisi	89

Çizelge Ek-1.1. Cu/CuSO₄ Referans elektrotu ile potansiyel ölçümleri	98
Çizelge Ek-2.1. A numunesinin anodik ve katodik polarizasyon deneyi sonuçları	100
Çizelge Ek-2.2. B numunesinin anodik ve katodik polarizasyon deneyi sonuçları	100
Çizelge Ek-2.3. C numunesinin anodik ve katodik polarizasyon deneyi sonuçları	101
Çizelge Ek-2.4. D numunesinin anodik ve katodik polarizasyon deneyi sonuçları	101
Çizelge Ek-2.5. E numunesinin anodik ve katodik polarizasyon deneyi sonuçları	102



SEMBOLLER LİSTESİ

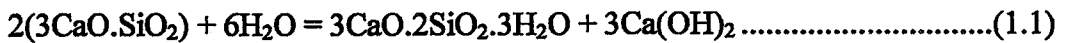
- β_a** : Anodik Tafel Sabiti, mV.
- β_c** : Katodik Tafel Sabiti, mV.
- E** : Potansiyel, V.
- E_{cor}** : Korozyon Potansiyeli, V.
- I** : Akım Yoğunluğu, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.
- i_{cor}** : Korozyon Akımı, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.
- i_{py}** : İnç/yıl (yılda inçç).
- mdd** : Mg/dm^2 (günde dm^2).
- mpy** : Mil/yıl (yılda mil).
- PFA** : Tozlaştırılmış Yakıt Külü.
- SCE** : Standart Kalomel Elektrot.
- SHE** : Standart Hidrojen Elektrot.
- W/C** : Su/Çimento Oranı.

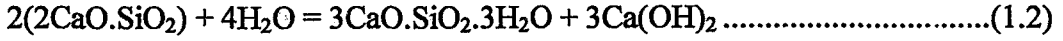
1. GİRİŞ

İnşaat malzemelerinin başında gelen ve her çeşit yapıda kolaylıkla kullanılabilen beton, dış etkilere karşı fiziksel ve kimyasal olarak oldukça dayanıklıdır. Basınca karşı dayanımı çok yüksek olan betonun, çekmeye karşı düşük olan dayanımını artırmak üzere çelik takviye kullanılmaktadır. Pratikte “inşaat demiri” olarak bilinen bu demirler aslında yumuşak çelik çubuklardır.

Betonarme demiri olarak kullanılmakta olan yumuşak çelikler atmosferde ve sulu ortamlarda korozyona karşı dayanıksız bir metaldir. Buna rağmen betonarme demirleri beton içinde korozyona uğramadan uzun süre dayanır. Bunun nedeni betonun yüksek alkali özelliğe sahip olmasıdır. Alkali ortamlarda demir yüzeyinde pasif bir oksit filmi oluşarak korozyon hızını azaltır. Diğer taraftan beton poroz yapıda olmasına rağmen geçirgenliği düşük bir malzemedir. Bu nedenle betonarme demirlerinin korozyonuna neden olan bileşiklerin (oksijen, su ve klorür) çevreden beton içine girmesi ve demire kadar ulaşması güçleşir. Betonun özellikle kuru halde iken elektriksel iletkenliği de oldukça düşüktür. Yani beton rezistivitesi yüksek bir elektrolit gibi davranır. Bunun sonucu olarak betonarme demirlerinin pratik olarak korozyona uğramayacağı söylenebilir, (Scott, 1965 ; ACI Committee Report, 1985 ; Halvorsen, 1993).

Beton; agrega, çimento ve su karışımından meydana gelir. Betonun yüksek alkali özelliği, çimento klinker bileşiklerinin hidrolizi sonucu oluşur, (ACI, 1985 ; Halvorsen, 1993). Çimento klinkerleri başlıca; trikalsiyum silikat ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), beta dikalsiyum silikat ($\beta\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), beraberinde daha az değişken olan trikalsiyum alüminat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), tetrakalsiyum alüminoferrit ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) veya bir miktar demir fazındaki katı çözültisi, periglas (MgO), serbest kireç (CaO) ve bunlara benzer birçok değişik bileşikten oluşur, (Mugner, 1984). Klinkerin bileşiminde bulunan silikatlar ve alüminatlar hidroliz olarak, hidrate klinker bileşikleri yanında kalsiyum hidroksit [$\text{Ca}(\text{OH})_2$]’de oluştururlar. Trikalsiyum silikat ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ve dikalsiyum silikat ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) bileşiklerinin su ile reaksiyonu şöyledir, (ACI, 1985).





Bu reaksiyonlar sonucu oluşan kalsiyum hidroksit beton prizi sırasında, beton boşluklarında kalmakta ve betonun pH'ını 12'ye kadar çıkarmaktadır. Klinker bileşiminde Na_2O ve K_2O gibi az miktarda alkali oksitlerde bulunmaktadır. Bunlar suda kolay çözülebilen oksitler olup beton boşluk suyu içinde çözünerek betonun pH'ını 13'e kadar yükseltmektedirler, (ACI, 1985).

Beton pH derecesinin yüksek oluşu betonarme demirleri yüzeyinde kısa zamanda $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ filminin oluşmasına neden olur. Herhangi bir dış etki olmaz ise, bu film tabakası betonarme demirlerinin uzun süre pasif olarak kalmasını sağlar. Ancak betonun poroz yapısı nedeniyle atmosferde bulunan CO_2 , SO_x , NO_x gibi asit inhidriti olan bazı gazlar beton boşluklarına difüzlenebilir. Asit karakterli bu gazlar boşluk suyu içinde kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek beton pH derecesinin düşmesine neden olurlar. Bu olaya "Karbonasyon" denir. Karbonasyon etkisi ile betonun pasifleşme etkisi kaybolur, (Halvorsen, 1993).

Eğer beton karışımı sırasında kullanılan malzemeler ile birlikte (karışım suyu, kum, çimento v.b.) beton içine klorür iyonu girmiş ise, bu klorür iyonları betonarme demirlerinin pasifleşmesine engel olur. Aynı olay, sertleşmiş bir beton bünyesine sonradan klorür iyonlarının girmesi halinde de kendini gösterir. Daha önce pasif hale gelmiş olan betonarme demirlerinin üzerinde bulunan pasif tabaka yer yer bozulur ve bu bölgede pitting tipi korozyon olayı başlar. Klorür iyonu beton içine çeşitli yollarla girebilir. Başlıca klorür kaynağı, buzları eritmek üzere yollara ve köprülere atılan tuzlardır. Ayrıca deniz suyu ile temas eden betonlar veya deniz atmosferinde kalan betonlarda da tuz birikmesi gözlenebilir. Klorür iyonları beton bünyesine suda çözünmüş olarak difüzlendir. Daha sonra su buharlaşarak uzaklaşır. Böylece beton boşluklarında bulunan tuz konsantrasyonu gittikçe artar. Tuz konsantrasyonu belli bir değere erişince betonarme demirlerinin korozyonu başlar, (Hausmann,1964 ; Boyd and Tripler, 1968 ; Mozer, 1969).

Betonarme demirlerinin korozyonu sonucu yalnız demir çürümekle kalmaz, korozyon ürünlerinin meydana getirdiği hacim büyümesi nedeniyle betonda iç gerilmeler olur. Bunun sonucunda beton çatlar, hatta parçalanabilir. Bu durum yalnız

korozyonun etkisinde kalmış olan bölge için değil, yapının tamamı için tehlikeli sonuçlar doğurabilir, (Lewis and Copenhagen, 1959).

Beton içinde bulunan çeliğin korozyon hızı üzerine çeşitli faktörler etki eder. Bunların en önemlileri şunlardır, (Boyd and Copenhagen, 1959).

a. Betonda kullanılmış olan malzemeler ve beton yapısı ile ilgili etkenler; çimento cinsi ve dozajı, su/çimento oranı, agrega cinsi ve granülometrisi, beton içine katılmış olan katkı maddeleri,

b. Beton dökümü ve kürü ile ilgili etkenler; Döküm sırasında yapılan vibrasyon, ortam sıcaklığı ve relatif rutubet,

c. Beton yapının tasarımı ve konumu ile ilgili etkenler; Betonarme demirlerinin yüzeye olan uzaklığı, tuzlu sular ile temas süresi ve şekli.

Korozyon sonucu çatlamış veya kısmen parçalanmış olan bir beton yapının tamiri pratik olarak son derece güçtür. Bu nedenle bu konuda yapılan araştırmaların büyük bir bölümü, korozyon olayını önlemeye yöneliktir. Bu olaylar pratik olarak dört grup altında toplanabilir, (ACI, 1985).

a. Beton dış yüzeylerini sağlam ve geçirimsiz bir kaplama ile kaplayarak, çevreden beton içine korozyon yapıcı maddelerin girmesini önlemek,

b. Katodik koruma yapmak,

c. Beton içindeki betonarme demirlerinin korozyonunu azaltıcı inhibitörler kullanmak. Günümüzde betonarme demirlerini korumak amacıyla sodyum kromat, sodyum nitrit ve sodyum benzoat etkili bir şekilde kullanılmaktadır, (Berke, 1989)

d. Beton kalitesini artırıcı ve permeabilitesini azaltıcı önlemler; Bunlar çimento dozajını artırmak, su/çimento oranını azaltmak, döküm sırasında betonun boşluksuz olmasını sağlamak üzere vibrasyon yapmak beton dökümünden sonraki ilk günlerde uygun kür koşullarını sağlamak olarak özetlenebilir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Şimdiye kadar betonarme demirlerinin korozyonu üzerine etki eden faktörlerden biri olan çimento etkisi ile ilgili bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların odak noktası genelde farklı türden çimentoların betonarme donatısı üzerindeki korozyon etkisi olmuştur.

Bu çalışmada ulaşılmak istenen amaç Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerindeki farklı fabrikalarda üretilen PKÇ/B 32,5 R çimentosunun bileşimindeki hammadde kaynaklarının ve kimyasal bileşenlerin standart olmamasından dolayı meydana gelen farklılıkların betonarme donatısı üzerinde oluşturabileceği korozyon etkisinin araştırılmasıdır.

Deneyler, karışım suyuna NaCl katılarak hazırlanan beton bloklar içerisindeki çelik üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her beton örneği içerisindeki çeliğin ASTM-C-876-91'e uygun olarak korozyon potansiyel değerleri ölçülerek zamana göre potansiyel değişimleri incelenmiş ve aynı numuneler üzerinde daha sonra polarizasyon-kırılma yöntemi ile korozyon hızlarının belirlenmesine çalışılmıştır.

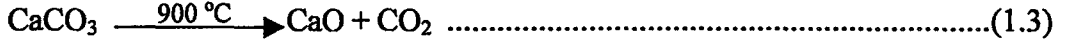
1.2. Beton

Beton, çimento-agrega-su ve gerektiğinde katkı maddelerinin uygun oranlarda karıştırılması ile başlangıçta plastik kıvamlı olup zamanla çimentonun hidratasyonu ile katılaşp sertleşen dayanımı yüksek bir yapı malzemesidir. Bu yapı malzemesini oluşturan temel malzemelerin bileşimlerinin çok karmaşık olması, betonun özelliklerini yakından ilgilendirmekte ve sürekli araştırmalara neden olmaktadır.

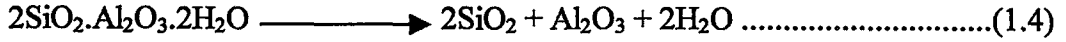
1.3. Çimento

Havada ve/veya su altında su ile etkileşerek katılaşabilen ve sertleştikten sonra suya dayanıklı, temelde kireç, silis, kil ve demiroksit bileşiklerinden oluşan hidrolik bağlayıcı maddedir.

Çimentonun ilkel maddeleri kil ve kalkerdir. Bu maddeler belirli oranlarda karıştırıldıktan sonra döner fırınlarda 1400-1450 °C sıcaklıkta pişirilir. Yüksek sıcaklıkta ilkel maddeler önce ayrılır. Kilin ayrışması sonucunda SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ meydana gelir. %90-98 arasında CaCO₃ yapısı içeren kalker 900 °C'da CaO'e dönüşür.



Kil içinde bulunan en önemli madde 2SiO₂.Al₂O₃.2H₂O formülüne sahip bulunan kaolinit'tir. 500 °C civarında bir sıcaklıkta dehidratasyona uğrayarak,



yapısına dönüşür. Sıcaklık artışı ile bu oksitler; 750-900 °C'da CaO.Al₂O₃ (mono kalsiyum alüminat); CaO.SiO₂ (mono kalsiyum silikat) ve az miktarda CaO.Fe₂O₃ (mono kalsiyum ferrit); 900-950 °C'da 5CaO.3Al₂O₃ (penta kalsiyum tri alüminat); 940-1200 °C'da 2CaO.SiO₂ (di kalsiyum silikat); 1200-1300 °C'da 3CaO.Al₂O₃ (tri kalsiyum alüminat) ve 4CaO. Al₂O₃ .Fe₂O₃ (tetra kalsiyum alümino ferrit); 1200-1450 °C'da 3CaO.SiO₂ (trikalsiyum silikat) yapılarına dönüşür, (Hakdiyen, 1980).

Klinker adı verilen bu karmaşık ürünlerin bağlayıcı özelliği yeterli değildir, su ile bağlayıcı özellik kazandıran bir reaksiyon vermez. Ancak ince bir şekilde öğütüldükten sonra su ile tepkimeye girmesi daha kolay ve hızlı olacağından bağlayıcılık özelliği kazanır. Klinkere katılma süresini düzenlemek için %3 civarında alçı taşı (CaSO₄.2H₂O) katılır ve çelik bilyalı öğütücülerde öğütülür. Boyutları 90 mikron ile 6,5 mikron arasında değişen çok ince tanelerden oluşmuş çimento elde edilir.

Çimento yapısındaki oksitlerin her biri kısaltılmış olarak bir sembolle gösterilir. CaO = C ; SiO₂ = S ; Al₂O₃ = A ; Fe₂O₃ = F ; Hidrate H₂O = H

Çimento yapısındaki oksitlerin ağırlıkça % değerleri kullanılarak Bogue tarafından öne sürülen ampirik eşitlikler yardımıyla çimentonun ana bileşenleri belirlenebilmektedir, (Neville, 1987).

Bogue eşitlikleri;

$$\text{C}_3\text{S} = 4,07 (\text{CaO}) - 7,60 (\text{SiO}_2) - 6,72 (\text{Al}_2\text{O}_3) - 1,43 (\text{Fe}_2\text{O}_3) - 2,85 (\text{SO}_3)$$

$$C_2S = 2,87 (SiO_2) - 0,754 (3CaO.SiO_2)$$

$$C_3A = 2,65 (Al_2O_3) - 1,69 (Fe_2O_3)$$

$$C_4AF = 3,04 (Fe_2O_3)$$

şeklinde verilmektedir.

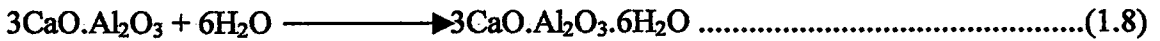
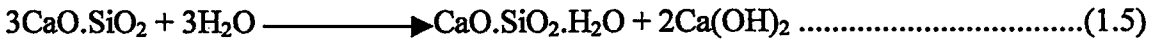
Portland tipi çimentolarda Çizelge 1.1'de belirtilen fazların kesin olarak bulunduğu belirtilmektedir, (Neville, 1987).

Çizelge 1.1. Portland çimentosu yapısındaki fazlar

Bileşiğin Adı	Oksitleri	Kısa Gösterilişi
Tri kalsiyum silikat	$3CaO.SiO_2$	C_3S
Di kalsiyum silikat	$2CaO.SiO_2 (\beta)$	βC_2S
Tri kalsiyum alüminat	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
Tetra kalsiyum alümino ferrit	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

1.3.1. Çimentonun hidratasyonu

Çimento bünyesindeki ana bileşenler, su ile etkileşerek aşağıda gösterildiği gibi bir dizi ekzotermik reaksiyon verirler ve hidrate ürünler oluştururlar. Bu olaya çimentonun prizlenmesi denir. Çimentonun prize başlama süresi 1 saatten az 10 saatten fazla olmamalıdır, genelde 2-3 saat kadar sürer.



Çimento su ile birlikte önce hafif bir katılaşma gösterir, buna priz başlangıcı denir. Ortam $Ca(OH)_2$ bakımından doygunluğa erişince $Ca(OH)_2$ çökmeye başlar. Gerek bu kristaller ve gerekse kalsiyum hidroksit kristalleri ile şekilsiz kristallerin

çökmesi, ortamın suyunu kaybetmesi priz oluşumunu sağlar. Katılaştıran çimento zamanla mukavemet kazanır, bu sürece çimentonun olgunlaşması denir.

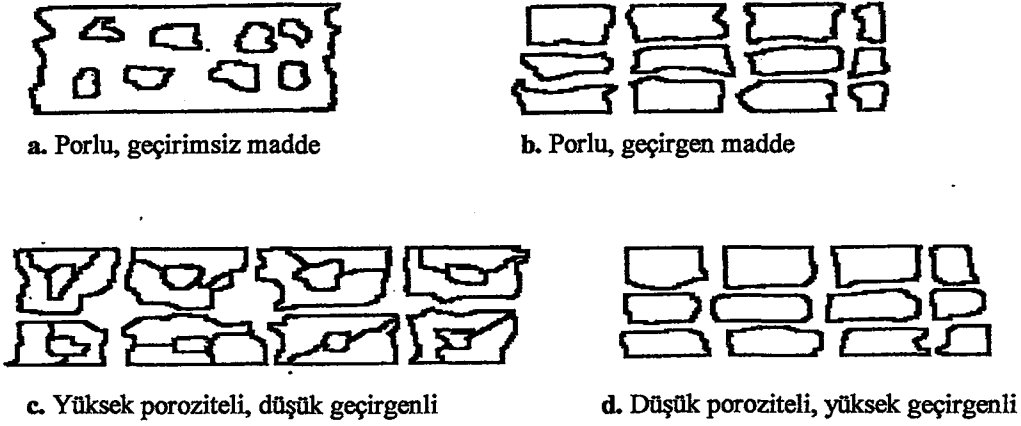
1.3.2. Sertleşme olayı (Hidratasyon yapmış çimentonun iç yapısı)

Hidratasyon ve onu izleyen katılaşma olayı sonunda sertleşmekte olan çimento hamurunun iç yapısı değişik mikroskobik incelemeler sonucunda belirlenmiştir. Bu yapıda hidratasyon sonunda meydana gelen hidrat elemanlar bulunmaktadır. Bunlar gelişmesini tamamlamamış ve bu nedenle düzenli bir kristal yapıya kavuşamamıştır. Birde hegzagonal kristal şeklinde serbest kireç veya portlandit elemanları vardır. Hidratasyon sonucunda meydana gelen bütün bu hidrat elemanları aralarında muhtelif boşluklar bırakarak bir araya gelmişlerdir. Çimento hamurundaki boşluklar boyut bakımından şu şekilde sınıflandırılabilir;

- a. Makro boşluk : Bu tür boşlukların boyutları 10^4 °A'dan büyüktür.
- b. Kılcal boşluk : Bu gruptaki boşlukların boyutları 10^4 - 10^2 °A arasındadır.
- c. Mikro boşluklar : Burada boşlukların boyutları 10^3 - 10^2 °A arasındadır.
- d. Jel boşlukları : Bu boşluklarda boyutlar 10^2 °A'dan daha küçüktür.

Zaman ilerledikçe makro boşluklar azalır, buna karşılık mikro boşluklar ve jel boşlukları artar, (Postacıoğlu, 1986).

Beton içine zararlı iyonların girişi betonun porozitesi ile ilişkilidir. Yalnız porozite geçirgenlikle eş anlamlı değildir. Porselende olduğu gibi kapalı gözenek sistemleri için sıvı geçişi kesinlikle söz konusu değildir, geçirgen betonlar ise daima gözeneklidir. Porozite ve geçirgenlik arasındaki fark Şekil 1.1'de görüldüğü gibi açıklanabilir.



Şekil 1.1. Porozite ve geçirgenlik göstergeleri

Betonun bütünündeki porozite esas olarak çimento pastasının porozitesine bağlıdır, jel halindeki gözeneklerden (por) ve kapiler gözeneklerden (por) oluşur. İlk etapta jel porları pasta hacminin yaklaşık %28'ini oluşturur. Pastadaki kapiler gözeneklerin hacmi pasta hacminin %0-40 kadarlık kısmını oluşturur ve jelden daha önemli boyutlara sahiptir. Kapiler gözeneklerin birbirlerine kolayca geçebilmeleri nedeniyle geçirgenlikteki katkıları çok önemlidir. Pasta geçirgenliğini etkileyen önemli faktörler;

- a. W/C (Su/Çimento) oranı,
- b. Kır süresinin kuruma derecesidir.

W/C oranının artmasıyla geçirgenlikte artmaktadır, (Massazza, 1989). Zamanla jel boşluklarının artması ve normalde su içeren deliklerin dereceli doldurulması nedeniyle hidrasyon süreciyle geçirgenlik azalır. Kurumadan sonra meydana gelen daralmalardan dolayı jel duvarlarında oluşan çatlaklar, bundan dolayı kapiler oluşumları ve bu yarıklara sıvıların kolayca nüfuz edebilmesi nedeniyle kuruma ile birlikte geçirgenlik artar, (Massazza, 1989).

Pastanın geçirgenliğini etkileyen faktörler beton içinde geçerlidir. Bunların dışında aşağıdaki faktörlerde betonun geçirgenliğini etkiler;

- a. Çimento bileşenleri,
- b. Agreganın maksimum boyutu,
- c. Dökme homojenliği,
- d. Sıkıştırma derecesi,
- e. Agreganın derecelenmesi,
- f. Çimento tipi.

Çimento bileşenlerindeki artış betonun geçirgenliğini düşürmektedir. Çimentodaki karmaşık bileşen miktarları, hidratasyonun gelişme seyrini değiştirmeleri ve rötre (büzülme) ile şişme olaylarına neden olmalarından dolayı etkindirler. Hidratasyon hızının zamanla gelişmesi geçirimliliğin zamanla azalmasına yol açar. İri agrega olarak kırma taş değil de doğal malzeme yani çakıl kullanılırsa geçirgenliği az beton elde edilir. Diğer taraftan beton üretiminde kullanılacak agregaların porozitesinin küçük olması gerekir, (Postacıoğlu, 1987 ; Massazza, 1989).

1.3.3. Çimento türleri

Çimento inşaat sektöründe çok geniş uygulama alanı bulan bir malzeme olduğundan, kullanılacağı ortamın durumuna göre katkı maddeleri ile ana bileşenlerin değişik kompozisyonları oluşturulmuş ve buna bağlı olarak mekanik özellikleri geliştirilmiştir. Beton yapımında en önemli rolü üstlenen bileşenlerden biri çimentodur. Her yapının özelliğine göre kullanılacak çimentonun cinsi değişir.

Türkiye’de üretilen ve TS’de yer alan çimento çeşitleri ve kullanıldıkları yerler Çizelge 1.2’de verilmiştir.

Çizelge 1.2. Türkiye’de üretilen çimentolar ve kullanıldıkları alanlar

ÇİMENTONUN ADI	STANDART NO	KULLANILDIĞI ALANLAR
Portland Çimentosu (PÇ325)	TS 19	Normal inşaatlarda
Portland Çimentosu (PÇ400)	TS 19	Yüksek dayanım isteyen inşaatlarda
Portland Çimentosu (PÇ500)	TS 19	Yüksek dayanım isteyen inşaatlarda
Katkılı Portland Çimentosu (KPÇ325)	TS 10156	Normal inşaatlarda
Demirli Portland Çimentosu (DPÇ325)	TS 20	Düşük hidratasyon ısısı isteyen kütle betonlarda
Cüruf Çimentosu (CÇ325)	TS 20	Sualtı yapılarında, korozyonun az olduğu inşaatlarda
Beyaz Portland Çimentosu (BPÇ325)	TS 21	Normal dayanımlı ve dekoratif inşaatlarda
Harç Çimentosu (HÇ160)	TS 22	Harç sıvalarında
Trashlı Çimento (TÇ325)	TS 26	Düşük hidratasyon ısısı istenen kütle betonlarda
Uçucu Küllü Çimento (UKÇ325)	TS 640	Sualtı yapılarında, korozyonun az olduğu inşaatlarda
Sülfatlı Cüruf Çimentosu (SCÇ325)	TS 809	Sualtı yapılarında, korozyonun az olduğu inşaatlarda
Erken Dayanımlı Yüksek Çim. (EYÇ510)	TS 3646	Demiryolu traverslerinde

1.3.3.1. Katkılı portland çimentosu (KPÇ 325)

KPÇ 325; Portland çimentosu klinkeri, alçı taşı ve puzolanik maddelerin birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen 28 günlük basınç dayanımı en az 32,5 N/mm² olan portland çimentosudur, (TS 10156, 1992).

1.3.3.2. Trashlı çimento (TÇ 325)

Trashlı çimento; Kütlece %20-40 kısım tras ile karşılıklı olarak %60-80 kısım portland çimentosu klinkerinin bir miktar alçı taşı (CaSO₄.2H₂O) ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcıdır, (TS26, 1992).

Yalnız başına kullanıldığı zaman bağlayıcı madde olmayan fakat kireç veya çimento ile karıştırıldığı zaman su ile yaptığı reaksiyon sonunda bağlayıcı madde özelliği kazanan maddelere “puzolan” denmektedir. Puzolan denilen maddelerin içinde fazla miktarda kolloidal halde silis ve alümin bulunmaktadır. Bu maddelerin kireçle yapmış olduğu reaksiyon sonunda puzolan bağlayıcı özellik kazanmaktadır.

Puzolanlar doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Doğal puzolan olarak bilinen maddeler volkanik küller, killi şist, diatome toprağı ve ponza taşıdır. Bunlar dünyanın belirli bölgelerinde bulunmaktadır. Doğal puzolanların en önemlisi Almanya’da Ren vadisinden çıkarılan ve “tras” adı verilen puzolandır. Bizim ülkemizde Çorum civarında Mecitözü’nde geniş puzolan yatakları bulunmaktadır. Yapay puzolan olarak bilinen maddelerin en önemlilerinden biri pişmiş kildir. Bu amaçla kil bileşimine bağlı olarak 600-900 °C arasında pişirilir. Elde edilen madde çimento inceliğinde öğütüldükten sonra çimentoya belirli oranlarda karıştırılarak kullanılır.

Puzolanlı çimentoların portland çimentosuna göre şu üstünlükleri vardır;

a. Kimyasal mukavemette gayet önemli artış vardır. Bundan dolayı puzolanlı çimentolar her türlü zararlı suların etkisine, karıştırıldığı çimentodan çok daha fazla dayanıklıdır.

b. Puzolanlı çimentolarda priz esnasında açığa çıkan ısı miktarı, portland çimentosunda açığa çıkan ısıdan çok daha azdır. Bu nedenle bu çimentolar baraj yapımında kullanılmaya çok elverişlidir.

c. Puzolanlı çimento kullanarak, serbest kirecin tespit edilmiş olmasından dolayı geçirgenliği daha az olan harç ve beton üretilebilir.

d. Bu çimento ile üretilen betonlar, geçirgenliğin daha az olmasından dolayı donmaya karşı daha dayanıklıdır.

e. Puzolanların çimentoya karıştırılmasıyla bağlayıcı maddenin maliyet bedelinde önemli bir azalma sağlanır.

Bu üstünlüklerine karşın puzolanlı çimentoların kullanılmasının bazı sakıncalı tarafları da vardır.

a. Pozolanların çimentoya karıştırılması mekanik mukavemetlerin zamanla artış hızını bir miktar düşürür. Mukavemetteki bu azalma zamanla azalarak en sonunda tamamen kaybolur.

b. Hidratasyon ısısının daha az olmasından dolayı pozolanlı çimentolar soğuk havalarda kullanılmaya elverişli değildir.

c. Pozolanlı çimentolar kullanılarak üretilen betonların daha uzun süre ve daha iyi koşullar altında korunması gerekmektedir, (Postacioğlu, 1986).

Ülkemizde pozolanlı çimento olarak biri “trashlı çimento”, diğeri de “uçucu küllü çimento” olmak üzere iki tür çimento üretilmektedir. Bu iki çimentoda TS’ye göre aranan kimyasal özellikler Çizelge 1.3.’de şöyle verilmektedir

Çizelge 1.3. Pozolanlı çimentoların kimyasal özellikleri

Bileşenler	Trashlı Çimento	Uçucu Küllü Çimento
MgO en çok	%5	%5
SO ₃ en çok	%3,5	%4
Kızdırma Kaybı en çok	%5	%5
Çözünmeyen Kalıntı en çok	-	%29

1.4. Agregalar

Doğal, yapay veya her iki cins yoğun mineral malzemenin genellikle 100 mm’ye kadar çeşitli büyüklüklerdeki tanelerin oluşturduğu karışım agregası olarak adlandırılmaktadır, (TS 706, 1980).

Bağlayıcı maddeler (Çimento v.b.) genel olarak mineral kökene sahip çeşitli boyutta sert tanelerden oluşan ve agregası adı verilen malzeme ile birlikte kullanılır.

Agregası ile çimento arasındaki aderans fiziksel bir özellikten doğar, agregası ile çimento hiçbir zaman kimyasal reaksiyona girmez. Bu iki eleman arasındaki aderans fiziksel bir olay olan kristalleşme sonucu ortaya çıkar.

Agregaların dane büyüklüklerine göre sınıflandırılmasında esas olarak kare gözlü elekler alınmıştır ve bu standartlar TS 706'da belirtilmiştir.

Betonda kullanılacak olan agrega için sınıflandırma Çizelge 1.4.'de gösterilmektedir.

Çizelge 1.4. Betonda kullanılacak agrega için sınıflandırma

Agrega Çeşidi	Tabii Agregalr (mm)				Kırma Taş (mm)			
Dane Boyutu	0-1	1-3	3-7	7-30	0-0,1	0,1-7	7-15	19-30 19-70
İsim	İnce kum	Orta kum	Kaba kum	Çakıl	Filler	Mıcır I	Mıcır II	Mıcır III

Doğal agregalr nehirlerden, denizlerden, göllerden ve taş ocaklarından elde edilen kırılmış veya kırılmamış yoğun yapılı agregalardır. Yapay agregalr, yüksek fırın cüruf taşı gibi sanayi ürünü olan kırılmış veya kırılmamış yoğun yapılı agregalardır.

Betonda kullanılacak agregalar temiz, sert, dış etkilere dayanıklı ve su emmesi az olmalıdır. Agreganın içinde betonun sertleşmesine, mukavemetine mani olacak veya donatıyı bozacak maddeler bulunmamalıdır. Bu zararlı maddeler şunlardır:

- Kil ve buna benzer maddeler,
- Organik maddeler,
- Kömür ve linyit,
- Yüksek fırın cürufunun cam gibi olan kısımları.

Agregalar içine karışabilen bu gibi maddelerin mukavemetleri çok düşüktür, bunların hacim sabitliği özelliği yoktur, donma olayına maruz kaldıkları zaman kolaylıkla parçalanırlar. Ayrıca bu maddeler bir çok hallerde çimento için zararlı maddeler içerir, (Postacıoğlu, 1987).

1.5. Beton Karma Suyu

Beton üretiminde kullanılan karma suyu bağlayıcı maddelerin hidratasyonunu sağlar, kum ve agrega tanelerini ıslatır ve betonun işlenebilme özelliğinin istenen düzeyde olmasını sağlar. Hidratasyon olayı çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonlarla gerçekleşir. Bu nedenle beton yapımı sırasında çimento, agrega ve su karıştırılırken kullanılan suyun miktarı, kalitesi ve bileşimi çok önemlidir.

Karma suyu olarak kullanılacak suda betonu kimyasal yönden etkileyerek dayanımını olumsuz etkileyecek ve hizmet süresini azaltacak iyonlar bulunmamalıdır. Literatürde karma suyu genel anlamda içilebilir su olarak ifade edilmektedir, (Neville, 1987). Acı ve tuzlu sularda klorür ve sülfatlar vardır. Klorürler 500 ppm'i, sülfatlar 1000 ppm'i geçmedikçe beton üzerine zararlı etki yapmadığı, ancak su içerisindeki toplam tuz oranı yüksek ise dikkatli olunması gerektiği belirtilmektedir, aynı zamanda alkali karbonat ve bikarbonat oranı da 1000 ppm'e kadar sınırlandırılmaktadır.

Beton karma suyunun kalitesinin yanında kullanılacak suyun miktarı da çok önemlidir. Belirli miktar çimento, agrega kullanılarak beton üretilmek istendiğinde gerekli olan bir optimum su miktarı vardır ki bu miktar suyun kullanılmasıyla dayanımı maksimum olan beton elde edilir. Optimum miktardan daha az su kullanılması halinde çimento hidratasyonunu tam olarak yapamayacaktır. Betonun işlenebilme özelliği yeterli düzeyde olmayacaktır. Karışımda kullanılacak su, çimento ağırlığının %36-42'si çimentonun hidratasyonu için yeterlidir. Çimento bileşenlerinin hidratasyonları için, bileşenlere bağlı olarak gerekli su miktarı tepkimelerde farklıdır. (1.5) ve (1.8) denklemlerindeki C_3S için gerekli su miktarı ağırlığının yaklaşık %24'ü kadar, C_2S için bu miktar %21'i, C_3A için %40'ı, C_4AF için ise bu miktar yaklaşık %37'dir. Aynı zamanda çimento hamurunda jel boşlukları bulunmaktadır. Bu boşlukların iç yüzeyleri adsorpsiyon yolu ile önemli miktarda su tutmaktadır. Bu yüzden hidratasyon için kullanılacak su miktarına absorpsiyon suyunun ilave edilmesi gerekecektir. Eğer bu yapılmaz ise boşluk yüzeyleri bir miktar su tutacağından geriye hidratasyon için gerekli miktarda su kalmayacaktır. Hidratasyon tamamlanmayınca, çimento hamurunun porozitesi azalmayacak ve dayanım beklenen değere erişemeyecektir. Gereğinden %10 eksik su, basınç dayanımında %10 azalmaya, karma suyunun %20 fazla olması halinde de basınç dayanımında %30 azalmaya neden olduğu belirtilmektedir, (Postacıoğlu, 1987)

2. BETON İÇİNDEKİ ÇELİĞİN KOROZYON TEORİSİ

2.1. Elektrokimyasal Korozyon

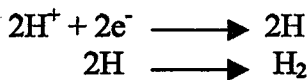
Genel olarak korozyon, metal ve alaşımlarının çevreleri ile kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonları sonucu bozunmaları şeklinde tanımlanabilir, (Doruk, 1982).

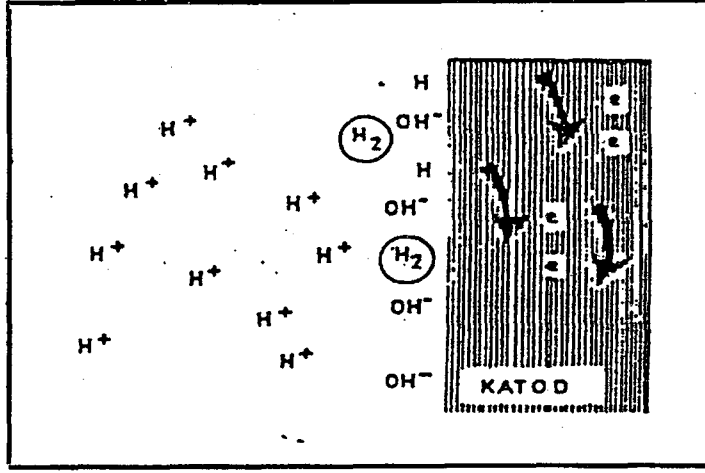
Korozyon olayı esas itibarıyla bir elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşur. Elektrokimyasal korozyon, iyon içeren bir sulu çözelti (elektrolit) içinde bulunan metalik malzemede veya metalde, metal-elektrolit ara yüzeyinde yürüten elektron transferi nedeniyle değişik potansiyellere sahip alanların oluşması neticesinde madde kaybının meydana gelmesidir. Elektronlar metal yüzeyinden potansiyelin daha negatif olduğu bölgelere doğru akarlar. Pozitif potansiyele sahip bölgeler anot, negatif potansiyele sahip bölgeler katot olarak davranır. Katot bölgesinde biriken elektronlar katotta oluşan indirgenme reaksiyonu ile harcanır. Anotta ise oksidasyon reaksiyonu sonucu elektron açığa çıkar, metal yükseltgenir ve çözünür. Anot ve katotta ki oksidasyon ve redüksiyon elektrokimyasal reaksiyonları aynı anda yürür. Korozyon anotta oluşur, (Yalçın ve Koç, 1991).

Korozyon olayının devam edebilmesi için açığa çıkan elektronların dış bağlantı ile katoda taşınması gerekir. Eğer anotta toplanan elektronlar taşınmıyorsa anot reaksiyonu kısa bir süre sonra dengeye erişerek durur, (Othmer, 1982).

Katodik olay için iki temel reaksiyon vardır. Hidrojen çıkışıyla yürüten katot reaksiyonu ve oksijen indirgenmesiyle yürüten katot reaksiyonudur.

pH değerinin küçük olduğu elektrolitler içinde hidrojen çıkışı kolaylaşır. Hidrojen çıkışı ile yürüten katot reaksiyonu aşağıdaki şekilde iki basamaklı yürür. Katotta hidrojen çıkışı Şekil 2.1.'de görülmektedir.

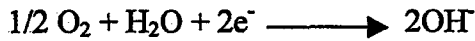




Şekil 2.1. Katotta hidrojen çıkışı (Yalçın ve Koç'dan, 1991)

Çözeltideki H^+ iyonları katottan elektron alarak önce H atomu haline geçer. H atomları metal yüzeylerine yapışır. Hidrojenin gaz halinde uzaklaşması iki hidrojen atomunun birleşerek hidrojen molekülü haline dönüşmesi gerekir. Bu olay katotta yüzeyinde yeterli miktarda hidrojen atomunun toplanması ile oluşur. Hidrojen çıkışı katot bölgesinde OH^- birikimine neden olur. Bu iyonlar anotta oluşan metal iyonları ile birleşerek metal hidroksitleri oluşturur. Böylece korozyon için gerekli oksijen sudan sağlanmış olur, (Moskvin, 1980).

Oksijen indirgenmesi yoluyla yürüten katot reaksiyonu, içinde bir miktar çözünmüş oksijen bulunan doğal sularda gerçekleşir. Çözünmüş halde bulunan oksijen katottan elektron alarak aşağıdaki reaksiyonla hidroksit iyonu haline dönüşür, (Othomber, 1982; Moskvin, 1980; Yalçın ve Koç, 1991).

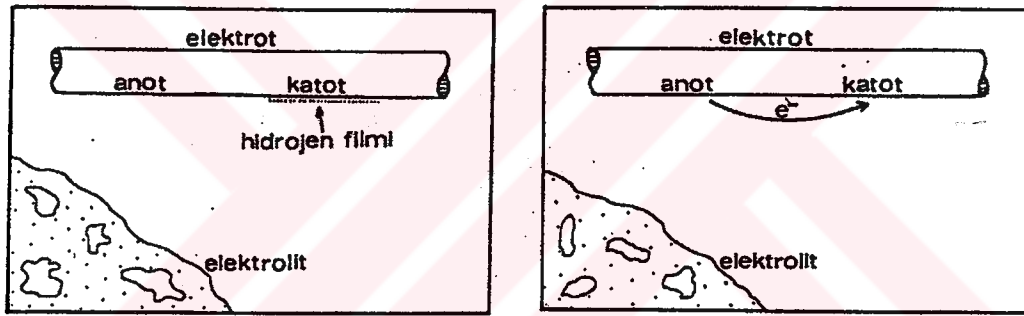


Elektrolit içine oksijen difüzyonu genellikle atmosferden olur. Eğer katot bölgesi yeterli oksijeni alamazsa bu reaksiyon bir süre sonra durur. Bu nedenle yer altı ve sualtı korozyonunda korozyon hızı, çoğu zaman katot bölgesine oksijen difüzyon hızına bağlı kalır.

2.2. Çeliğin Beton İçindeki Korozyonunun Elektrokimyasal Mekanizması

Betonun kapiler boşlukları arasında bulunan az miktarda su, kalsiyum tuzlarıyla birlikte çeşitli iyonlar içerir. Bu nedenle beton, heterojen yapılı kuvvetli bir elektrolit gibi kabul edilebilir. Çeliğin beton içindeki korozyonu, sulu çözeltiler içindeki korozyon olayına benzer. Korozyon, metal-elektrolit ara yüzeyinde elektron transferi ile yürür, (Mozer ve ark., 1969; ACI, 1985). Heterojen yapılı kuvvetli bir elektrolit olarak kabul edilen betonun içinde bulunan çeliğin yüzeyinde değişik potansiyellere sahip alanlar oluşur. Bu yerel potansiyel farklarından dolayı çelik yüzeyinde elektronlar, potansiyelin pozitif olduğu bölgelerden negatif olduğu bölgelere doğru hareket ederler. Pozitif potansiyelli bölgeler anot, negatif potansiyelli bölgeler katot olarak davranır.

Şekil 2.2. çeliğin beton içindeki korozyonunun elektrokimyasal mekanizmasını gösterir.



a. Katotta hidrojen filminin oluşması

b. Hidrojen filminin bozulmasıyla korozyonun başlaması

Şekil 2.2. Çeliğin beton içindeki korozyonunun elektrokimyasal mekanizması

(Mozer et. all, 1969)

Anotta demir metalinin elektrokimyasal oksidasyonla iyonlaşması olayı aşağıdaki reaksiyonla gerçekleşir.

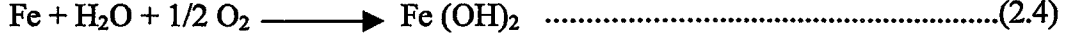


Bu reaksiyonla açığa çıkan elektron metal üzerinden katoda taşınır, (Şekil 2.2). Katotta aşağıdaki reaksiyonlardan biri gerçekleşir;

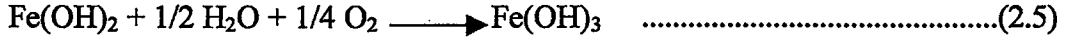


(2.2) numaralı reaksiyon asitli ve oksijensiz ortamda, (2.3) numaralı reaksiyon da oksijenli ortamlarda meydana gelir. Bu reaksiyonlar, katodik reaksiyonlardır.

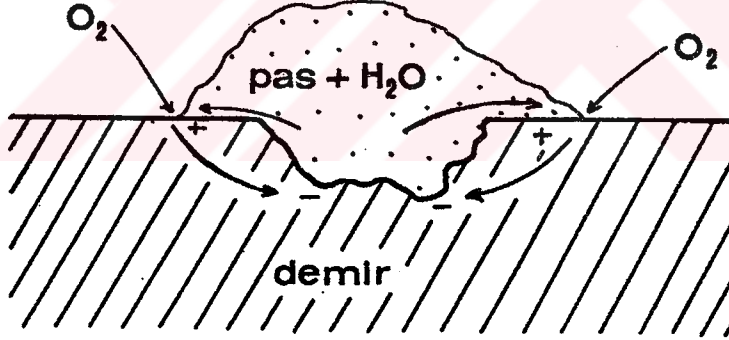
Elektrotta meydana gelen bu anodik ve katodik reaksiyonlardan sonra demir, $Fe(OH)_2$ (veya $FeO.nH_2O$) haline dönüşür.



Daha sonra da $Fe(OH)_3$ (yani pas) haline yükseltgenir.

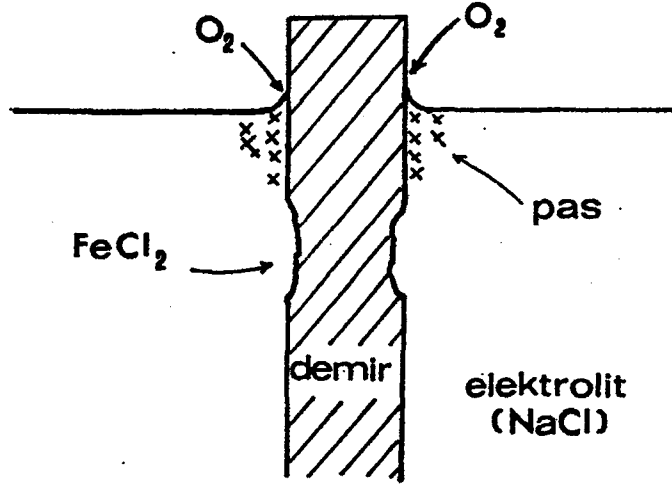


Bu reaksiyonlar sonucu anot bölgesinde yer yer paslanmalar meydana gelir. Bunun sonucu metal yüzeyi ince bir pas tabakası ile kaplanır. Yüzeydeki bu pas tabakası korozyonun daha fazla devam etmesini önler. Şekil 2.3.'de demir yüzeyindeki pas oluşumu gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Demir yüzeyinde pasın oluşması

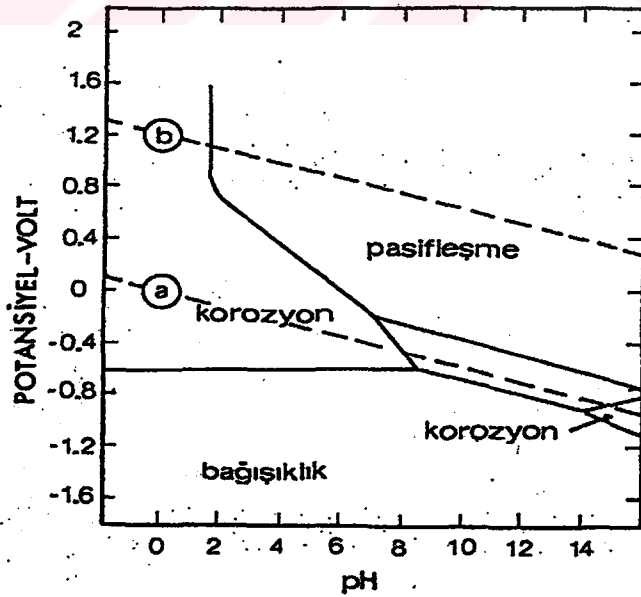
Bileşiminde sodyum klorür ($NaCl$) ihtiva eden bir elektrolit içerisinde ise, oksit tabakası klorür etkisi ile bozulur. Klorür iyonları demir üzerinde bir bölgede aşınma yaparak demirin sürekli olarak korozyona (çukurcuk tipi) uğramasına neden olur, (ACI, 1985). Bu olay Şekil 2.4'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2.4. Sodyum klorürlü ortamda demirin korozyonu

2.3. Demir - Su Sisteminde Elektrokimyasal Reaksiyonlar

Pek çok elementin sulu çözeltiler içinde elektrokimyasal açıdan davranışlarını incelemek üzere Pourbaix tarafından potansiyel-pH diyagramları çizilmiştir. Demir-su sistemi için potansiyel-pH diyagramı Şekil 2.5'de görülmektedir.

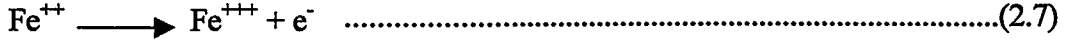


Şekil 2.5. Demir-su sistemi için potansiyel-pH diyagramı (Pourbaix'den, 1976)

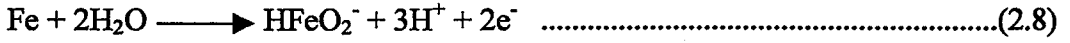
Bu diyagramda başlıca üç bölge mevcuttur :

1. Korozyon bölgeleri : Diyagramda iki korozyon bölgesi bulunmaktadır.

a. pH'ın 9'dan küçük, elektrot potansiyelinin -0.65 (SHE) Volttan daha pozitif olduğu bölge. Bu bölgede şu reaksiyonlar gerçekleşmektedir.



b. pH değerinin 13'den büyük ve elektrot potansiyelinin -0.8 ile -1.2 V (SHE) arasında olduğu bölge. Bu bölgede aşağıdaki reaksiyona göre korozyon olayı gerçekleşir.

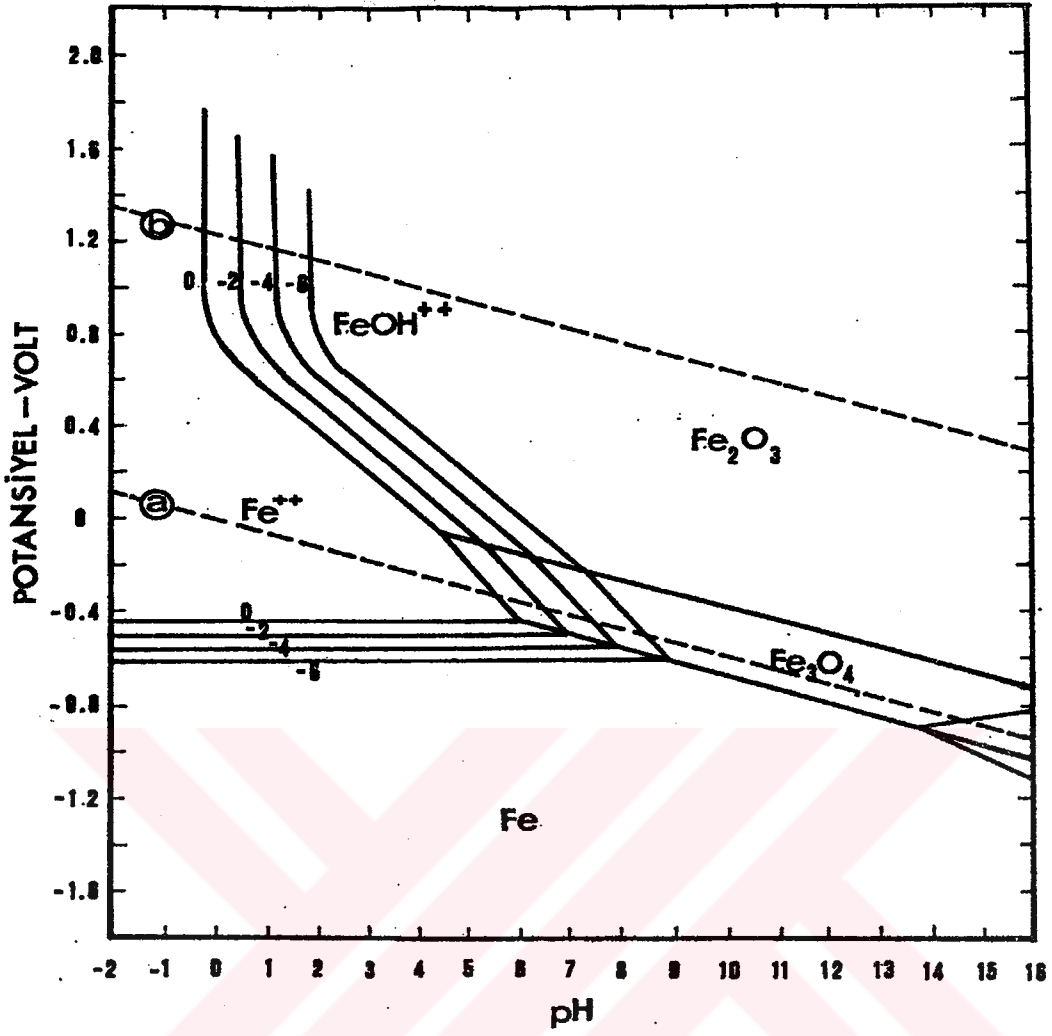


2. Bağışıklık bölgesi (Katodik koruma bölgesi) : Demir elektrot potansiyelinin -0.65V (SHE)'dan daha negatif olan bu bölgede, çelik dayanıklı davranış göstererek korozyona uğramaz ve pH'dan bağımsızdır. Bu -0.65 Volt'luk (SHE) potansiyel değeri, doymuş bakır/bakır sülfat referans elektrotuna göre -0.850 Volt'a karşı gelir.

3. Pasiflik bölgesi : Pasifleşme, genellikle metalin elektrot potansiyelindeki şiddetli bir artış olarak tanımlanır. Pasiflik bölgesinde, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ve $\text{Fe}(\text{OH})_3$ oluşumuyla metal yüzeyinde bir oksit film oluşur. Oluşan bu oksit film, metal ile elektrolit arasındaki teması keserek, korozyon reaksiyonunu durdurur. Ancak herhangi bir sebeple, bu film kırılacak olursa korozyon yeniden başlar. Bu nedenle pasif hal korozyonu önlemede kesin bir çözüm değildir.

Demir-su sistemlerinde değişik bölgelerde oluşan demir bileşikleri Şekil 2.6'da gösterilmektedir.

Termodinamik hesaplamalarda elde edilen bu diyagramlar yardımıyla çeliğin hangi bölgede olduğu hakkında bilgi edinilebilir. Fakat korozyon reaksiyonunun hızı hakkında hiçbir bilgi edinilemez. Genel olarak bir demir sulu çözeltide 10^{-6} g Fe iyonu/l'ten daha az çözünüyorsa korozyona uğramıyor, daha çok çözünüyorsa korozyona uğruyor kabul edilir. Korozyonu daha ayrıntılı inceleyebilmek için hız ölçmelerinden veya polarizasyon eğrilerinden yararlanmak gerekir.



Şekil 2.6. Demir-su sisteminde pH-potansiyel ilişkisine bağlı olarak oluşan bileşikler (ACI, 1985)

2.4. Beton İçindeki Çeliğin Korozyonuna Etki Eden Faktörler

Beton çok kompleks bir malzemedir. Betonarme demirlerinin korozyonu büyük ölçüde içinde bulunduğu betonun fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Şimdi bu özellikleri ayrı ayrı inceleyelim.

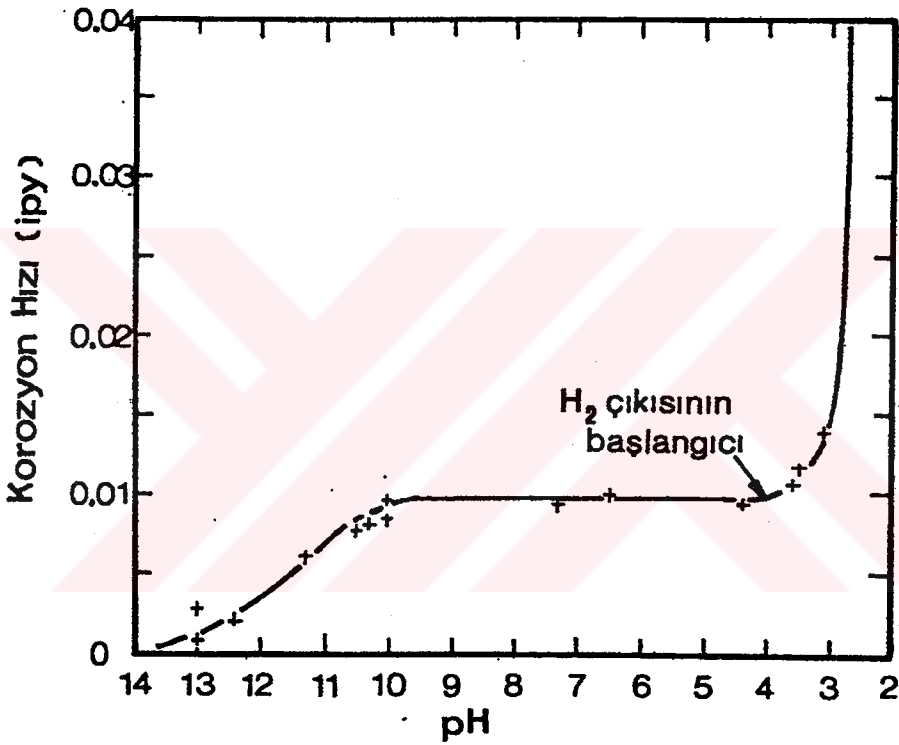
2.4.1. Beton pH derecesinin etkisi

Portland çimentosu ile hazırlanmış olan betonlarda beton boşluk suyu pH derecesi 12-13 arasındadır. Bu alkali ortam çimento klinker bileşiklerinde su ile

reaksiyona girerek hidrat bileşikler oluşturmaları sırasında açığa çıkan kalsiyum hidroksitten ileri gelir.

pH ile elektrot potansiyelleri arasındaki ilişkiyi veren Pourbaix diyagramında görüldüğü gibi, elektrolit pH değerinin korozyon hızı üzerinde önemli etkisi vardır. (Şekil 2.5.)

Korozyon hızının pH ile değişimini daha açık bir şekilde veren grafik Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2.7. Çeliğin korozyon hızının pH'la değişimi (ACI'dan, 1985)

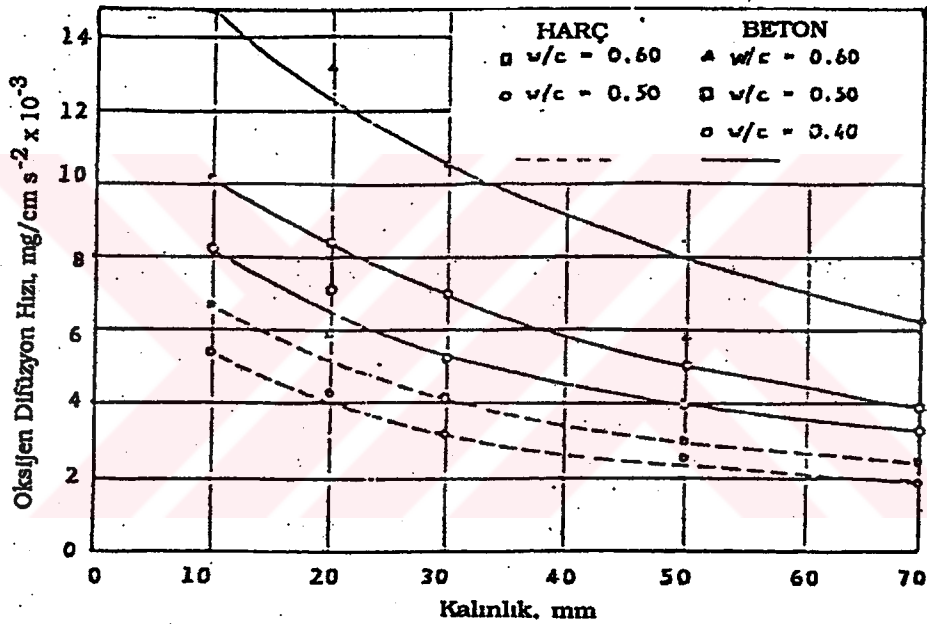
pH'nın 10'dan büyük olduğu bölgede, demir pasif durumdadır. Bu bölgede demir yüzeyi bir oksit tabakasıyla kaplanarak koruyucu bir kabuk oluşturmaktadır. Beton boşluk suyunun pH'ı 12 ile 13 aralığında olması, betonarme demirlerinin pasif halde olmasını sağlar.

4 ile 10 pH aralığında, korozyon hızı pH'dan bağımsızdır. Bu bölgede korozyon hızını tamamıyla oksijen difüzyonuna bağlı olarak oksijen miktarı kontrol eder.

pH'nın 4'ten küçük olduğu bölgede ise, demir hidrojen çıkışıyla şiddetli korozyona uğrar. Bu bölgede oksijen difüzyonunun bir etkisi olmaz. Korozyon hızı, katotta hidrojen çıkışının etkisi altındadır (ACI, 1985)

2.4.2. Oksijen difüzyonunun etkisi

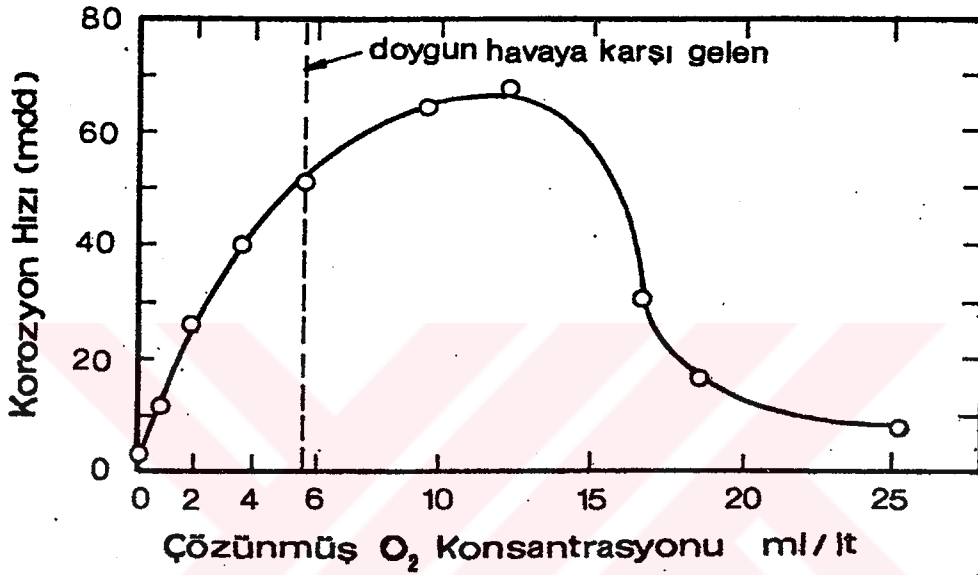
Beton içindeki çeliğin korozyonu, katotta oksijen indirgenmesi reaksiyonu ile yürür. Bu nedenle korozyon hızı, beton içine difüzlenen oksijen hızına bağlıdır. Beton bünyesine oksijen girişi önlenabilirse, korozyon tamamıyla önlenir. Şekil 2.8'de su ile doymun halde bulunan değişik su/çimento oranındaki beton blokların içine oksijen difüzyon hızının, beton kalınlığına göre değişimi görülmektedir, (Gjorv ve ark., 1986).



Şekil 2.8. Beton içine oksijen difüzyon hızının su/çimento oranı ve beton kalınlığına göre değişimi, (ACI'dan, 1985)

Aynı kalınlıkta, aynı su/çimento oranında beton içine oksijen difüzyonu kireçli harca göre daha fazladır. Aynı kalınlıktaki kireçli harç ve betonda su/çimento oranı yükseldikçe oksijen difüzyonu artmaktadır. Kalınlık arttıkça oksijen difüzyonu azalır.

Betonarme demirlerinin farklı miktarda hava alması durumunda, az hava alan bölgeler anot, çok hava alan bölgeler katot olur. Bu durumda şiddetli derecede korozyon gerçekleşir. Beton içine oksijen difüzyonu kuru betonlarda daha hızlıdır. Yalnız beton ne kadar kuru olursa olsun içinde daima bir miktar su bulundurur. Oksijen, beton boşluk suyunda çözülmüş halde bulunur. Korozyon hızının, çözülmüş oksijen konsantrasyonuna göre değişimi Şekil 2.9'da görülmektedir.



Şekil 2.9. Beton içindeki çeliğin korozyonu üzerine çözülmüş oksijen konsantrasyonunun etkisi (Uhlig'den, 1971)

Şekil 2.9'da görüldüğü üzere maksimum korozyon hızı 12 mg/lt oksijen konsantrasyonuna karşı gelmektedir. Daha yüksek konsantrasyonlarda demir pasifleşir, (Yalçın H., 1991). Demirin pasifleşmesi korozyon hızının düşmesine neden olur. Korozyon hızı mdd ($\text{mg/dm}^2 \text{ gün}$) olarak şekilde verilmiştir.

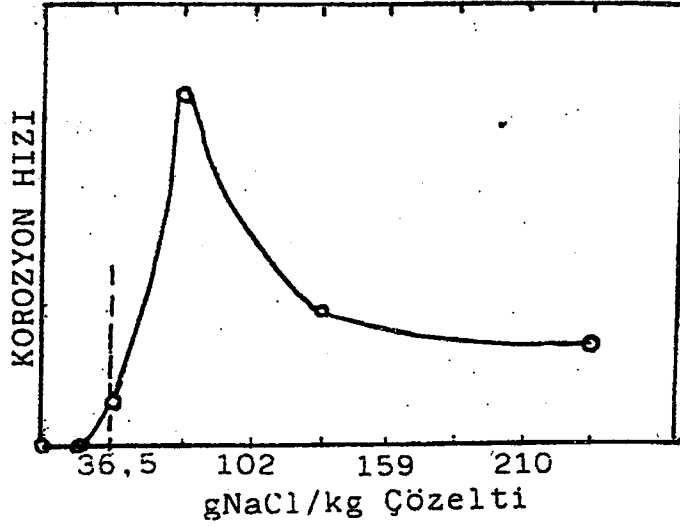
2.4.3. Klorür iyonlarının etkisi

Betonarme demirlerinin korozyonuna etki yapan en önemli faktör klorür iyonudur. Hiçbir kirletici betonarme demirlerinin korozyonunda klorür iyonu kadar etkili değildir.

Temiz ve doğal malzemelerle hazırlanmış bir beton içinde çok az miktarda klorür iyonu bulunur. Agrega ve karışım suyundan kaynaklanan bu klorürün konsantrasyonu korozyona sebep olması için yeterli değildir. Bazı hallerde beton prizini çabuklaştırmak için, katkı maddesi olarak önemli miktarda klorür içeren katkı maddeleri kullanılmaktadır. Çimento ağırlığının %2'si oranındaki kalsiyum klorür, çimento hidratasyonunu büyük ölçüde hızlandırmaktadır. Diğer beton katkı maddelerinde de az miktarda klorür bulunmaktadır, (ACI,1985). Karışım sırasında beton içine girmiş olan klorür iyonlarının bir kısmı çimento hidratasyonu sırasında hidroliz olan trikalsiyum alüminat ile birleşerek trikalsiyum kloro alüminat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) halinde bağlanır. Bu durumda bulunan klorür beton içerisindeki suda çözünmediğinden korozif etki yapmaz, (Yalçın ve Koç, 1992 ; ACI, 1985).

Betonarme demirlerinin korozyonu açısından asıl tehlike beton içine sonradan giren klorür iyonlarından ileri gelir. Klorür doğada bol bulunan bir elementtir. Başlıca klorür kaynağı, bileşiminde yaklaşık %3 oranında tuz (NaCl) bulunan deniz suyudur. Deniz suyu ile temas eden veya yakın deniz atmosferinde bulunan betonlarda zamanla klorür iyonu birikimi meydana gelir. Diğer önemli klorür kirlenmesi de kış aylarında yollardaki ve köprülerdeki buz eritmek için kullanılan tuzdan kaynaklanır. Tuz, su içinde çözülmüş olarak beton bünyesine girer. Beton kuruduğunda su buharlaşarak uzaklaşır. Klorür ise beton boşlukları içindeki suda çözülmüş olarak kalır. Bu olay geçirgenliği yüksek olan betonlarda daha etkili şekilde görülür.

Çözelti içinde sodyum klorür konsantrasyonu arttıkça, korozyon hızı artar. Bu artış sodyum klorür konsantrasyonu 75 g $\text{NaCl}/1\text{kg}$ çözelti değerinde maksimuma ulaşır. Bundan sonra tuz konsantrasyonu arttığı halde korozyon hızının azaldığı görülür. Bunun nedeni tuz konsantrasyonunun fazla olması durumunda oksijen çözünürlüğünün azalmasıdır. Çözelti içinde yeteri miktarda oksijen bulunmaması korozyon hızını düşürür. Ancak beton içinde tuz konsantrasyonu arttıkça korozyon hızı artar. Şekil 2.10.'da klorür iyonlarının çeliğin korozyon hızına etkisi görülmektedir.



Şekil 2.10. Klorür iyonlarının çeliğin korozyon hızına etkisi (ACI'dan, 1985)

Beton ortamında klorür iyonlarının varlığı beton içindeki çeliğin pasifliğinin bozulmasına neden olur. Klorür iyonları Fe^{++} iyonlarıyla birleşerek çözünür, korozyona neden olur. Klorür iyonlarının hangi konsantrasyonlarda bulunması halinde betonarme demirlerinin korozyonu için zararlı boyutlarda olacağı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Stratfull, $1m^3$ beton içinde 0,8 kg'dan daha fazla klorür bulunması halinde betonarme demirlerinin pasifliğinin bozulduğunu göstermiştir, (Stratfull, 1987).

Çeliğin pasifleşmesi ve klorür iyonlarının pasifliği bozucu etkilerini elektrokimyasal olarak açıklayan üç önemli teori bulunmaktadır, (ACI, 1985).

a. Oksit Film Teorisi : Metal yüzeyinde korozyon olayı kısa bir süre devam ettikten sonra, metal yüzeyine yapışan sağlam bir oksit filmi $[Fe(OH_2)]$ oluşur. Oluşan bu oksit filmi korozyona karşı bir kabuk oluşturarak metali pasifleştirir. Bu teoriye göre, klorür iyonları bu oksit filmin gözenekleri arasından metal yüzeyine kadar ilerleyerek bazı noktalarda oksit filmin parçalanmasına neden olur.

b. Absorbsiyon Teorisi : Metal yüzeyinde klorür iyonları, hidroksit iyonlarından daha kuvvetli absorbe edilir. Bunun sonucu olarak metal yüzeyine ulaşan klorür iyonları oradaki hidroksit iyonlarını sökerek onun yerini alır. Böylece pasifliği sağlayan oksit filmi yer yer bozularak bu bölgelerde korozyon devam eder.

c. Geçici Kompleks Oluşturma Teorisi : Klorür iyonları demirin korozyonu sonucu oluşan Fe^{++} iyonlarıyla birleşerek bu iyonları çözeltiye çeker. Böylece Fe^{++} iyonları anottan uzaklaşmış olur. Bunun sonucu olarak $Fe(OH)_2$ filminin oluşması önlenmiş olur. Elektrottan belli bir uzaklığa ulaşınca demir klorür kompleksi hidroliz olarak parçalanır. Demir hidroksit çöker. Serbest kalan klorür iyonu yeniden anota hareket eder, (Foley, 1975).

2.4.4. Beton yapısı ve kalitesinin etkisi

Betonarme demirlerinin korozyonuna etki yapan önemli faktörlerden biride beton permeabilitesidir. Beton permeabilitesini değiştiren başlıca etkenler ise şunlardır;

- Çimento cinsi ve dozajı,
- Su/çimento oranı,
- Agrega granülometrisi,
- Betonun kalıplara sıkıştırılma derecesi ve beton kürü.

Betonun hazırlanmasında su/çimento oranı, agreganın granülometrisi, 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 difüzyonu minimum hale indirilebilir, (Gjorv and Vennesland, 1986).

Beton kalitesinde, kullanılan çimento cinsi büyük önem taşır. Normal portland çimentosu yerine, puzolanlı çimentonun kullanılması korozyon açısından daha faydalıdır. Puzolanlar, çimento klinker bileşiklerin hidrolizi sonucu oluşan kalsiyum hidroksitle birleşerek, beton boşlukları içerisinde kristalize olur. Böylece beton boşluk yüzdesi ve permeabilitesi büyük ölçüde azalır.

2.4.5. Karbonatlaşma

Karbondioksit, atmosferden betonun boşluklarına girerek beton boşluk suyu içinde bulunan kalsiyum hidroksitle birleşip kalsiyum karbonat oluşturur.

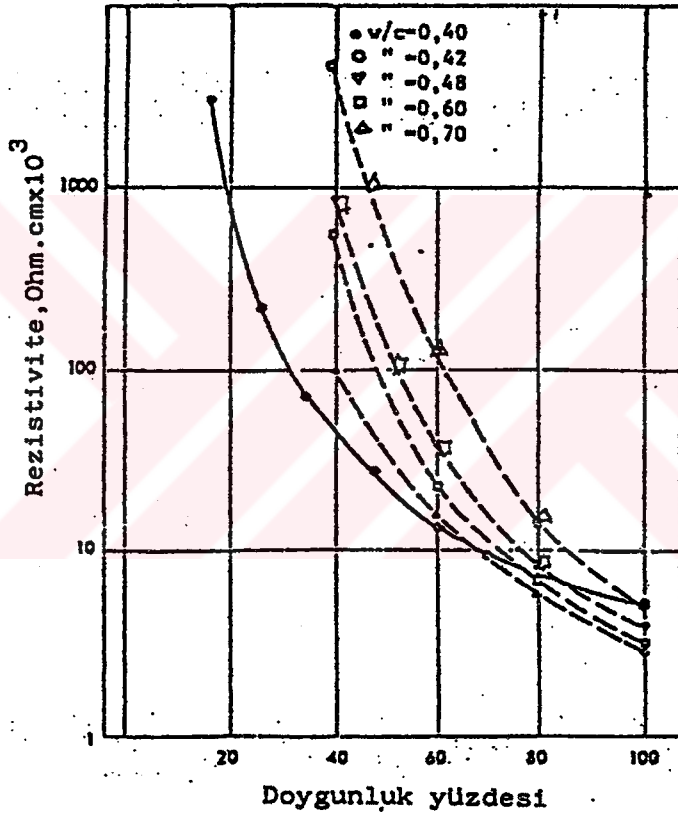


Bu reaksiyon sonucunda betonun pH'ı 13'den yaklaşık 8,5 değerine kadar düşer. pH değerinin azalması çelik yüzeyinde oluşan pasif tabakanın bozulmasına ve korozyonun başlamasına neden olur. Oldukça az su içeren ve kuru beton olarak

tanımlanan betonlarda ve gözenekleri suyla doymun halde bulunan betonlarda karbonatlaşma problemi görülmez. Yapılan araştırmalarda %50 suyla doymun betonda karbonatlaşma hızı maksimum olarak gözlenmiştir, (ACI, 1985 ; Halvarsen, 1993).

2.4.6. Beton rutubetinin etkisi

Korozyon olayının meydana gelebilmesi için mutlaka suya ihtiyaç vardır. Beton boşluklarında daima su bulunur. Bu su betonun iyonik iletken olmasını da sağlar. Beton rutubet derecesi arttıkça elektriksel iletkenliği de artar. Betonun su ile doymunluk derecesi ile iletkenliğinin artışı (rezistivitesinin azalışı) Şekil 2.11’de görülmektedir.



Şekil 2.11. Betonun su doymunluk derecesi ile rezistivite arasındaki bağıntı
(ACI'dan, 1985)

Şekil 2.11'den açıkça görüldüğü üzere betonun su ile doymunluk derecesi %40'ın altında iken rezistivitesi son derece yüksektir. Buna karşılık %100 su ile doymun halde bulunan betonlarda rezistivite değeri 7×10^3 ohm.cm altındadır. Beton rutubeti

azaldıkça beton rezistivitesinde 100 kata varan artışlar görülür. Beton rezistivitesinin 50.000–70.000 ohm.cm'den büyük olduğu durumlarda, betonarme demirlerinin korozyonu ihmal edilecek kadar azdır. Yapılan son çalışmalar, beton rezistivitesinin 100.000 ohm.cm'den büyük olduğu durumlarda klorür ve oksijen olmasına rağmen korozyon hızının çok düşük olduğunu göstermiştir, (ACI, 1985). Bu durum beton rutubetinin artması halinde betonarme demirleri korozyonunun önemli ölçüde artacağını gösterir.

Ancak beton rutubeti arttıkça, beton boşlukları su ile dolacağı için, atmosferden beton içine oksijen difüzyonu gittikçe güçleşir. Bunun sonucu olarak katodik reaksiyon için gerekli olan oksijen demir yüzeyine ulaşamaz ve korozyon hızı azalır. Yani hem kuru halde bulunan betonlar, hem de doygun rutubetli betonlar içinde betonarme demirlerinin korozyonu önemsizdir. Betonarme demirlerinin korozyonu açısından en tehlikeli durum, zaman zaman ıslanan ve kuruyan betonlarda görülür.

2.4.7. Pas payı

Betonarme demirlerini korozyondan korumak için gerekli olan minimum beton kalınlığına “pas payı ” denir. Pas payının korozyon hızı üzerinde büyük etkisi vardır. Çünkü, korozyona neden olan bütün zararlı bileşenler çevreden gelmektedir. Beton kalınlığının artırılmasıyla zararlı bileşenlerin beton içine girmeleri engellenebilir. Tasarım aşamasında beton kalınlığının en az 5.0-7.5 cm olmasına dikkat edilmelidir. Pas payı ile korozyon hızı arasındaki bağıntı lineer değildir, (Verbeck, 1975).

2.4.8. İnhibitör etkisi

Korozyon hızını yavaşlatan kimyasal maddelere “inhibitör” denir. Beton içine bazı inhibitörler katılmak suretiyle betonarme demirlerinin korozyon hızı büyük ölçüde azaltılabilmektedir. İnhibitörler metal yüzeyinde koruyucu bir kabuk oluşturulmasına yardımcı olarak metalin çevresi ile reaksiyona girmesini engelleyici rol oynamaktadır. Ancak kullanılan inhibitör dozunun çok iyi belirlenmesi gerekmektedir. İnhibitör konsantrasyonunun yetersiz olması halinde inhibitör etkisi tersine dönerek korozyon hızını artırıcı rol oynamaktadır, (Howell, 1990).

Çeliğin korozyonunu önlemede birçok organik ve inorganik katkı maddeleri kullanılmaktadır. Ancak bunlardan bir kısmı beton prizini geciktirmekte veya

mukavemetini düşürmektedir. Bir kısmı da beton içinde yıkanarak etkisini kaybetmektedir.

Kullanılan başlıca inorganik inhibitörler, kalsiyum nitrit, sodyum nitrit, potasyum dikromat, çinko kromat, kurşun kromat. En çok kullanılan organik inhibitörler ise sodyum benzoat, etil anilin. İnhibitörler beton içine katılarak kullanılır. Bu maddelerin inhibitör etkisi yanında, betonun diğer özelliklerinde bozucu etki yapmaması gerekmektedir. Uygun ve yeterli miktarda inhibitör kullanımıyla, klorürün zararlı etkisi yok edilebilir, (Rosenberg ve ark., 1977).

İnhibitörler içerisinde en uygun olanının kalsiyum nitrit olduğu ileri sürülmektedir. 1 m³ beton içine 10 kg kalsiyum nitrit Ca(NO)₂ katılması halinde betonarme demirlerinin korozyonunun klorür etkisinde bile önlenebildiği deneysel olarak ortaya konulmuştur, (Berke, 1989).

Collins (1993), 16 farklı inhibitörün performansını belirlemek üzere klorür ortamlarında yapmış olduğu deneyler sonunda kalsiyum nitritin en etkili olduğu sonucuna varmıştır.

Keskin (1993), doygun kireç çözeltisi içinde yapmış olduğu deneylerde, kalsiyum nitritin kromat ve borakstan daha etkili olduğunu ortaya koymuştur.

3. BETON İÇİNDE ÇELİK DONATISININ KOROZYONU İLE İLGİLİ ARAŞTIRMALAR

Çimento, agrega ve su karışımından oluşan beton, heterojen yapıda bir elektrolittir. Betonun prizlenmesiyle çimento ve su arasındaki reaksiyon sonucu kalsiyum hidroksit oluşur. Bu nedenle sertleşmiş beton boşluklarında bulunan su doygun kalsiyum hidroksit çözeltisi halindedir. Betonarme çelikleri bu çözelti ile temas halindedir.

Çeliğin beton içindeki korozyon olayını incelemek betonun heterojen yapıda oluşu nedeniyle oldukça güçtür. Beton içerisine atmosferden oksijen difüzyonu betonun permeabilite, rutubet v.b. fiziksel özelliklerine bağlıdır. Bu özellikleri kontrol altında tutabilmek oldukça güçtür. Bu nedenle literatürde beton yerine genellikle daha kolay kontrol edilebilen doygun kalsiyum hidroksit çözeltisi kullanılması yolu tercih edilmektedir. Ancak doygun kalsiyum hidroksit çözeltisi içinde yapılan çalışmalar, gerçek beton içindeki çeliğin korozyonunu yansıtmaktan uzak kalmıştır.

Betonarme demirlerinin korozyonu üzerine etki yapan faktörler konusunda pek çok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalar başlıca aşağıdaki konularda yoğunlaşmıştır.

a. Betonda kullanılan çimento cinsi ve dozajı, su/çimento oranı, beton katkı maddeleri ve inhibitörlerin korozyon üzerine etkileri,

b. Betonun permeabilitesi (geçirgenliği), porozitesi, mukavemeti, rutubet yüzdesi, elektrik iletkenliği gibi fiziksel özelliklerinin betonarme demirlerinin korozyonu üzerine etkileri,

c. Beton içine çevreden difüze olan zararlı gaz ve iyonların betonarme demirlerinin pasifliğini bozucu etkileri araştırılmıştır.

Bu konuda ilk elektrokimyasal çalışmalara 1950'li yıllarda başlanmıştır.

SHALON ve RAPHAEL (1959), yaptıkları çalışmada su/çimento oranı azaldıkça betonarme demirlerinin korozyon hızının da azalmakta olduğunu göstermişlerdir. Araştırmacılar beton pH derecesinin de betonarme demirlerinin korozyon hızı üzerinde etkili olduğunu ve beton pH derecesinin 11,5'den büyük olduğu hallerde betonarme demirlerinin pasifleştiğini ortaya koymuşlardır.

LEWIS ve COPENHAGEN (1959), beton içindeki çeliğin statik potansiyel değeri (Açık devre yarı hücre potansiyeli) ile korozyon hızı arasında bir bağıntı olduğunu ileri sürerek betonarme demirleri pasifleştikçe, potansiyel değerlerinin pozitif yöne doğru kaymakta olduğunu ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar ağırlık kaybı yöntemi ile yapmış oldukları deneylerde, su/çimento oranı azaldıkça ve çimento/kum oranı arttıkça betonarme demirlerinin korozyon hızının azalmakta olduğunu belirlemişlerdir.

HAUSMANN (1964), yapmış olduğu çalışmada beton içindeki çeliklerin, betonun omik direnci nedeniyle korunduğunu, normal halde çeliklerin katodik korumaya ihtiyacı olmadığını belirlemiştir.

SCOTT (1965), yapmış olduğu çalışmada beton blokları 7 gün süreyle rutubetli ortamda beklettikten sonra, %1 NaCl içeren çözelti içerisine koymuştur. Betonarme demirlerine bir dış akım uygulayarak, elde ettiği polarizasyon eğrilerini yorumlayarak şu sonuçlara varmıştır:

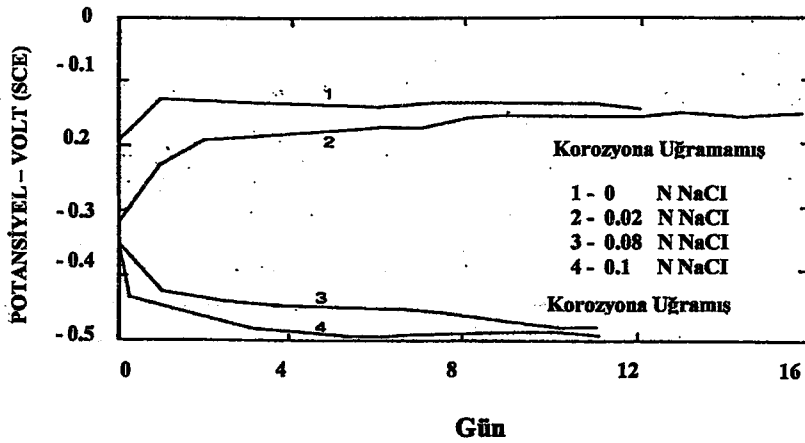
- a. Ortamda oksijen olmadığı sürece, korozyon maddeleri bulunsun bile korozyon olayı gerçekleşmemektedir.
- b. Beton, betonarme demirlerini bir kabuk halinde örtmekte ve oksijenin, rutubetin, anyonların çelik yüzeyine temasını güçleştirmektedir. Bu nedenle beton, betonarme demirleri için iyi bir koruyucu rolü oynamaktadır.
- c. Doygun kireç çözeltisi korozyon ortamı olarak beton yapısına çok benzemektedir. Betonun çeliği koruma etkisi, çimento klinkerinin hidrolizi sonucu oluşan Ca(OH)_2 'den ileri gelmektedir.
- d. Betonarme demirlerine anodik olarak +0,64 V (SCE), katodik olarak -1,00 V (SCE)'den fazla polarize edecek şekilde dış akım uygulanırsa, anot ve katotta sırasıyla hidrojen ve oksijen çıkışı gözlenmektedir.
- e. Katodik koruma betonarme demirleri için genellikle gerekmemektedir. Ancak yapı potansiyeli -0,65 V (SCE) ile -0,75 V (SCE) aralığında kalmak şartıyla, beton kaplamanın bozuk olduğu bölgelerde uygulanabilir.

CORNET ve BRESLER (1966), beton içindeki galvanizli ve yumuşak çeliğin korozyonunu iki değişik çalışma ortamında incelemişlerdir. Beton içindeki galvanizli ve

yumuşak çelik ilk olarak laboratuvar şartlarında 3 gün %4'lük NaCl çözeltisine maruz bırakılmıştır. İkinci olarak beton örnekleri 4 gün kurutulduktan sonra çelik yüzeyinde ortalama 20 mA/ft² akım yoğunluğu verecek şekilde 3mA'lık akım uygulanarak %4'lük NaCl çözeltisine daldırılmıştır. Korozyon şartlarındaki bu ölçümlerde çelik örneklerinin zamana karşı ortalama parçalanma uzunlukları 20.000 PSI'de ölçülmüştür. Yumuşak çeliğin ortalama parçalanma uzunluğu ve genişliği galvanizli çeliğe göre daha fazla olduğu, dolayısıyla korozyon hızının yumuşak çelikte daha fazla olduğu görülmüştür.

HAUSMANN (1967), araştırmacı 400 adet çelik numunesini, pH'ı 11,6-13,2 arasında olan klorür iyonu içeren ve içermeyen doymuş kalsiyum hidroksit çözeltisi içinde deneye tabii tutmuştur. Deneyler çözeltiden sürekli oksijen geçirilerek doymuş oksijen ortamında yapılmıştır. Çelik elektrotun potansiyelindeki değişim 12 gün süre ile kontrol edilmiştir. Bu deneylerden aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Çelik pasifleştikçe potansiyeli daha pozitif yöne doğru kaymaktadır. Pasif halde olan çeliğin potansiyeli -100 mV ve -200 mV (SCE) arasındadır. (Bu değerler bakır-bakır sülfat referans elektrotuna göre -160 mV ile -260 mV'a karşı gelir). eğer beton içinde klorür yoksa pasif halde potansiyel değeri -300 mV' kadar düşmektedir.
- Klorürlü ortamlarda pasif tabaka yaklaşık 7 gün sonra bozulduğundan potansiyelde aniden azalma olmaktadır. Bu durum korozyonun başladığını gösterir.
- Korozyona uğrayan çelik ile uğramayan çeliğin potansiyelleri arasında yaklaşık 300 mV kadar bir fark oluşmaktadır. (Şekil 3.1.)



Şekil 3.1. Doygun kireç çözeltisi içine daldırılmış çelik çubukların korozyon potansiyeli değişimi

d. Çeliğin beton içinde veya eşdeğer alkali çözelti içindeki hücre korozyonu, katot yüzeyine yeterli oksijen difüzyonu ve klorür iyonu olmadıkça gerçekleşmemektedir.

e. Çeliğin beton içindeki korozyonu için en az 700 ppm ($1,6 \text{ kg Cl}^-/\text{m}^3$ beton) klorür bulunması gerekmektedir. Eğer katot bölgesinde yeterli oksijen yoksa, bu değerden daha yüksek klorür konsantrasyonlarında da korozyon olayı meydana gelmemektedir.

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

g. Doygun kireç çözeltisi içinde bulunan pasifleşmiş çelik yüzeyindeki oksit filmi, potansiyel -300 mV 'dan -400 mV 'a yükseldiği anda bozulmaktadır.

GIFFIN (1967), içinde betonarme demiri bulunan kalın ve ince olmak üzere hazırlattığı 20 adet harç betonu örneği üzerinde çalışmalar yapmış, bu örnekler üzerine her gün 5 dakika süreyle deniz suyu püskürtmüştür. Bu deneyler birkaç yıl devam etmiştir. Yapılan deneyler sonucunda beton içine giren tuzun etkisiyle betonarme demirlerinde korozyon oluşmuştur. Su/çimento oranı ve geçirgenlik azaldıkça korozyonun azaldığı, beton kalınlığı azaldıkça korozyonun arttığı sonucuna varılmıştır.

STRATFULL (1968), yapmış olduğu çalışmada beton içindeki klorür iyonlarının betonarme çeliğinin korozyonu üzerindeki etkisini araştırmıştır. Değişik miktarda çimento içeren ve klorür iyonu absorblanmış beton örneklerinin dirençlerini ölçmüştür. Beton direncinin artmasının veya düşmesinin beton içinde bulunan su ve çimento miktarına doğrudan bağlı olduğu, beton karışımına eklenen klorür iyonlarının betonun başlangıç direncini artırdığı, ancak bu betonlar ıslanma-kuruma işlemine tabii tutulduğunda beton direncini azaltıcı yönde etki yaptığı gözlenmiştir.

STRATFULL (1968), yapmış olduğu bir diğer çalışmada betonarme demirlerinin korozyonu ile korozyon potansiyelleri arasında Çizelge 3.1'deki gibi bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur.

Çizelge 3.1. Değişik korozyon potansiyellerinde korozyon oluşum olasılıkları

Ecor, (V) (Cu/CuSO ₄ referans elektrota göre)	Muhtemel Korozyon Olasılığı
> -0.200	< %5
< -0.200 ile > -0.350	%50
< -0.350	> %95

HAUSMANN (1968), klorür iyonlarının betonarme demirlerinin korozyonu üzerine etkisini incelemiştir. Araştırmacı doymuş kireç çözeltisi içine değişik oranlarda NaCl katarak yapmış olduğu deneyler ile çeliğin pasifliğinin bozulduğu klorür eşik konsantrasyonunu belirlemiştir. Deneyler sonunda pasif haldeki çeliğin potansiyelinin -100 mV (SCE) ile -200 mV (SCE) arasında kaldığı pasifliğin bozulması halinde ise potansiyelin yaklaşık olarak 300 mV negatif yöne doğru arttığı ortaya konulmuştur.

BOYD (1968), içlerinde boraks bileşeninin de bulunduğu 13 adet organik inhibitörün, betonarme demirlerinin korozyonu üzerine etkilerini araştırmıştır. Araştırmacı doymuş kireç çözeltisi içerisine %3,5 oranında sodyum klorür katarak beton özelliklerine eşdeğer kabul ettiği bu ortamda inhibitörlerin değişik dozdaki etkinliğini ölçmüştür. Bu deneyler sonunda en etkili bulunan inhibitörlerin betonarme demirleri korozyon hızı üzerindeki etkileri Çizelge 3.2'deki gibi bulunmuştur.

Çizelge 3.2. Bazı korozyon inhibitörlerinin doymuş kireç çözeltisi içinde çeliğin korozyon hızı üzerine etkisi

İnhibitör	İnhibitör Dozajı g/lt	Korozyon Hızı	
		$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Mpy
İnhibitörsüz	0	21.7	9.8
Sodyum Kromat	1.0	3.1	1.4
Sodyum Nitrit	0.5	13.9	6.3
	1.0	8.4	3.8

SHALON ve RAPHAEL (1971), bağıl nemin %55-%95 olduğu, su/çimento oranının 0,60 seçildiği, klorür iyonlarının bulunmadığı şartlarda ağırlık kaybı yöntemi ile beton içindeki çeliğin korozyonunu 0,01-0,12 mpy (mil/yıl) aralığında değiştiği sonucuna varmışlardır.

ALEKSEEV ve ROZENTAL (1974), bağıl nemin %90 olduğu, su/çimento oranının 0,50-0,70 olarak değiştiği ve ortamda %5 CaCl_2 bulunduğu şartlarda ağırlık kaybı yöntemi ile korozyon hızının 0,124-0,887 mil/yıl aralığında elde etmişlerdir.

VAN DEVEER (1975), Stratfull'un çalışmasına çok benzeyen araştırmasında beton içinde bulunan çeliğin korozyon potansiyeline dayanarak çeliğin korozyonu hakkında fikir edinilebileceğini ileri sürmüştür. Araştırmacı Çizelge 3.3.'de korozyon potansiyeline bağlı olarak çeliğin durumunun değişimini yorumlamıştır.

Çizelge 3.3. Korozyon potansiyeline bağlı olarak çeliğin durumunun değişimi

Ecor, (V), (SCE)	Çeliğin Durumu
> -0.220	Pasif
< -0.220 ile > -0.270	Aktif veya Pasif
< -0.270	Aktif

LOCKE ve SİMON (1980), gerçek beton örnekleri üzerinde yaptıkları çalışmalarda beton örneklerinde su/çimento oranını 0,40 olacak şekilde tasarlamışlardır. Betonun hazırlanması sırasında beton içine %0 - %1 aralığında NaCl çözeltisi katarak klorür iyonlarının korozyon hızına etkisini üç elektrot polarizasyon-direnç yöntemi ile incelemişlerdir. Korozyon hızını 0,08-5,66 mil/yıl olarak elde etmişlerdir. Değişik NaCl konsantrasyonlarında beton içindeki çeliğin üç elektrot yöntemiyle belirlenen korozyon hızları Çizelge 3.4.'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Değişik NaCl konsantrasyonlarında beton içindeki çeliğin üç elektrot yöntemiyle belirlenen korozyon hızları

NaCl (%)	$\Delta i/\Delta E \times 10^6$ (A/V)	β_a (mV)	β_c (mV)	Korozyon Hızı (mil/yıl)
0	100	320	460	0.08
0.05	80	360	450	0.07
0.08	70	360	380	0.06
0.1	100	470	400	0.09
0.2	250	860	1050	0.52
0.5	700	850	950	1.39
1.0	2000	1570	1080	5.66

DEGHANIAN ve LOCKE (1982), yapmış oldukları çalışmada TipI ve TipV portland çimentosuyla hazırladıkları beton örneklerine NaCl eklememişlerdir. %100 nemli olacak şekilde 28 gün kür odasında beklettikten sonra %0,1 ve %2 aralığında değişen farklı NaCl içeren tuz çözeltilerine maruz bırakmışlardır. Polarizasyon-direnç yöntemiyle M_0/M_0O_3 referans elektrotunu kullanarak beton içindeki çeliğin korozyonunu araştırmışlardır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre;

Yüksek konsantrasyondaki tuz çözeltileriyle temasta bırakılan TipI ve TipV portland çimentosuyla hazırlanan beton örnekleri içindeki çeliğin korozyon akımı yüksek bulunmuştur. Tuz çözeltisiyle temas süresi arttıkça beton içine klorür iyonu girişi fazla olduğundan korozyon artmıştır.

TipV portland çimentosuyla hazırlanmış beton örneği içindeki çeliğin korozyonu, TipI ile hazırlanmış beton örneği içindeki çeliğine göre daha düşüktür.

ARUP (1983), yapmış olduğu çalışmada korozyon potansiyelini göz önüne alarak betonarme demirleri için dört durum belirlemiştir.

1. Pasif Hal :

Betonarme demirleri, klorür iyonlarının bulunmadığı ve pH'm 13 olduğu ortamlarda pasif durumdadır. Bu koşullarda beton içindeki çeliğin korozyon potansiyeli genellikle +100 mV ile -200 mV (SCE) arasında bulunmaktadır.

2. Çukurcuk Korozyonu :

Çukurcuk 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 etkisiyle çelik pasiflik özelliğini kaybeder. Bu durumda korozyon potansiyeli oldukça negatiftir. Tipik olarak -450 mV ile -600 mV (SCE) arasında bulunur.

4. Aktif Hal :

Fazla miktarda oksijen difüzyonu söz konusu olduğu ortamlarda çelik pasif halini koruyamaz. Beton gibi yüksek alkali ortamlarda aktif halde olan bir çeliğin potansiyeli -100 mV (SCE) değerine kadar düşer.

FİSCHER ve ark. (1984), su/çimento oranının $0,55-0,60$ olduğu şartlarda, içine silika katılmış ve içinde silika bulunmayan beton örnekleri içindeki çeliğin korozyonunu incelemek için örnekleri 20 °C'da iki yıl deniz suyuna maruz bırakmışlardır. Deniz suyuna maruz kalma periyodunda polarizasyon çalışmaları ve klorür analizleri yapılmıştır. Referans elektrot olarak doygun Ag/AgCl kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre;

Silika eklenmiş beton içine klor penetrasyonu daha azdır. Bunu difüzyon katsayısının değeri yansıtmaktadır. Silika içermeyen betonda difüzyon katsayısı $1,5 \cdot 10^{-7}$ cm²/s iken %16 silika içeren betonda $6 \cdot 10^{-9}$ cm²/s dir.

Betondaki toplam klorür konsantrasyonu (kuru beton ağırlığı olarak) %0,4'ün üstünde olduğundan korozyon hızı önemli ölçüde artmaktadır.

STRATFULL (1987), 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. Bunlar;

1. Rutubetin yüksek olduğu,
2. Tuz yüzdesinin arttığı bölgeler.

olarak belirlenmiştir. Betonarme demirlerinin korozyonunu önlemek üzere, betonun porozitesinin minimum olması ve demir üzerindeki betonun kalınlığının maksimum olması gerektiğini ileri sürmüştür.

WHEAT ve ELİEZER (1987), çeliğin beton içindeki korozyon potansiyelinin (Ecor) zamana göre değişimini incelemişlerdir. Araştırmacılar potansiyostatik ve potansiyodinamik yöntemler kullanarak betonarme çelikleri üzerinde üç ayrı tipte deney yapmışlardır. Deneylerde beton bloklar %10 NaCl çözeltisi içine konularak polarize edilmişlerdir. Bu deneylerden aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

a. 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 içinde bekletilen numunelerde çelik yüzeyinde yeterli kalınlıkta bir korozyon ürünü oluştuğu için yukarıda sözü edilen farklılıklar azalmaktadır.

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

c. Korozyon potansiyellerinin bütün numunelerde aynı şartlarda ölçülmesi, sonuçların birbiri ile karşılaştırılması bakımından büyük önem taşımaktadır. Aksi halde korozyon potansiyelinin daha negatif olması halinde bu durumun, pasif filmin kırılışı sonucu veya daha fazla oksijen difüzyonu sonucunu ileri geldiğini belirlemede mümkün olmaz.

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

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

b. 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.

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

T. YONEZAWA ve ark. (1988), yaptıkları bu çalışmada beton içindeki çeliğin korozyon mekanizması ve korozyonu etkileyecek eşik klorür miktarı ile ilgili araştırmalar yapmışlardır. Bu araştırmalar elektrokimyasal ölçümler (korozyon potansiyelinin zamanla değişimi, polarizasyon direncinin zamanla değişimi), por çözeltisinin analizi, SEM (Scanning Electron Microscopy) ile deneyler sonunda betona veya harca batırılmış çeliğin yüzey yapısının incelenmesi ile sürdürülmüştür.

Deneyler aşağıdaki yöntemlerle yapılmıştır,

1. Çeliğin harca batırılarak hazırlanan kalıpların elektro kimyasal tavrıları,
2. Çeliğin direkt olarak doygun $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çözeltisi veya $0,4 \text{ M KOH} + 0,2 \text{ M NaOH}$ çözeltisine batırıldığı koşullardaki elektrokimyasal tavrılarının belirlenmesi.

Daldırma testlerinden sonra çelik elektrotlar betondan ayrılarak çelik-harç ara yüzeyi ve elektrot yüzeyi SEM ile incelenmiştir.

Elektrotlar Cl^- içermeyen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çözeltisinde bekletildiğinde çelik elektrotlar pasifleşmiş ve korozyon hızı azalmıştır. Çözelti $0,52 \text{ M}$ veya $2,84 \text{ M NaCl}$ ihtiva ettiğinde elektrotlarda aktif korozyonun sürdüğü deneylerde gözlenmiştir.

En yüksek $[\text{Cl}^-/\text{OH}^-]$ oranında bile beton harç içindeki çeliğin pasifliği, bir alkali çözeltisine daldırılan çeliğin pasifliğinden daha kuvvetli bulunmuştur. Betonun, alkali çözeltisinden daha iyi koruma sağladığı görülmüştür. Beton içindeki çeliğin korozyonuna sebep olan klorür miktarının başlangıç değeri, $[\text{Cl}^-/\text{OH}^-]$ oranı gibi bir parametre ile belirlenememiştir. Bu başlangıç değerinin çelik-beton ara yüzey şartlarına bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

J.T. HINATSU ve ark. (1988), yaptıkları çalışmada portland çimentosundan yapılmış harca batırılmış demir çubukların siklik voltametri ile davranışlarını incelemişlerdir. Bu metotla beton korozyonu çalışmalarında hızlı sonuç almak

bakımından olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Tarama hızının etkisi, klorür ilavesi ve demirin alkali çözeltilerinde pasifleşmesinde $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in rolü ortaya çıkarılmıştır.

Voltamogramlar çizilirken potansiyel -1.4 V ve $+0.4 \text{ V}$ aralığında değiştirilmiş, $0,050 \text{ V/S}$ tarama hızı uygulanmıştır, IR düzeltmesi yapılmıştır. Ayrıca çimentoyla kaplanmamış demir elektrotlar kullanılarak voltamogramlar çizilmiştir. Demirin $0,1 \text{ M KOH}$ ve $0,1 \text{ M KOH} + 0,3 \text{ mM Ca}(\text{OH})_2$ çözeltisindeki voltamogramları çimento kaplı demir ve $0,1 \text{ M KOH}$ 'e $0,3 \text{ mM Ca}(\text{OH})_2$ ilave edilmiş çözeltideki demirin voltamogramı birbirlerine çok benzemektedir. Çok az miktarda ilave edilen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ demirin pasifliğine büyük katkı sağlamaktadır.

Çimento kaplı elektrotun doygun $\text{Ca}(\text{OH})_2 + 1 \text{ M NaCl}$ içerisindeki voltagramı alındığında klorür ilavesi ile pasifliğin bozulduğu ve buna bağlı olarak akımın arttığı gözlenmiştir. Sonuçlardan alkali çözeltisi içindeki demir ile çimento içerisindeki demirin reaksiyon mekanizmalarının benzerlik gösterdiği saptanmıştır.

AVCI (1988), betonarme demirlerinin korozyonu üzerine puzolanların etkisini incelemiştir. Çimento içine ağırlıkça %20 oranında puzolan katılarak hazırlanmış betonlar ile hiç puzolan katılmamış beton numuneleri %5'lik NaCl çözeltisi içerisinde bekletilmişlerdir. Başlangıçta puzolan katılmamış olan betonlar içindeki demirlerin daha az korozyona uğradığı gözlenmiştir. Ancak 80 günden sonra puzolanlı çimentoların etkisi görülmüş ve aynı su/çimento oranında, puzolanlı çimentolar ile hazırlanmış olan beton numuneleri içinde bulunan çeliğin korozyon hızının puzolansız betonlardan yarı yarıya az olduğu ortaya çıkmıştır.

A.J. AL-TAYYIB ve ark. (1988), yaptıkları bu çalışmada laboratuarda donatı çeliğinin korozyonu üzerine sülfat iyonlarının etkisini araştırmışlardır. 1020 karbon çeliği örnekleri doygun $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çözeltisine batırılmış ve farklı konsantrasyonlarda sülfat iyonları ilave edilerek korozyon hızları lineer polarizasyon direnci ve A.C. impedans tekniği ile belirlenmiştir. Sülfat iyonlarının 22°C 'de aktif korozyon sonuçlarında değişerek oluşan koruyucu sülfat filmi (pasif film), orijinal demir oksit filminden daha az koruyucudur. Bununla birlikte sülfat iyonlarının birleştirilmiş etkisi sıcaklık yükseldikçe normal sıcaklıkta klorür iyonlarının bilinen etkisi ile mukayese edildiğinde korozyon hızı yedi defa artmaktadır. Deneyler 22°C 'de laboratuvar sıcaklığında yapılmış, sıcaklık 50°C 'ye yükseltilerek yükselen sıcaklığın korozyon hızı

üzerine etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde sülfat konsantrasyonu 0'dan 0,5'e arttığında R_p değerleri azalmış ve korozyon hızı artmıştır. Sadece $\text{Ca}(\text{OH})_2$ içeren çözeltide 22 °C'de farklı daldırma zamanlarına göre R_p değerleri elde edilmiştir. Daldırma zamanının artmasıyla polarizasyon dirençleri artmıştır ki bu da zamanla çeliğin yüzeyinde pasif film oluştuğunu gösterir. Sülfat iyonunun etkisi klorür iyonundan farklıdır. Sülfat iyonunun etkisi incelendiğinde bütün konsantrasyonlarında difüzyon kontrollü yük transferi zincirleme reaksiyonda değişmediği belirlenmiştir.

DOĞAN (1989), konsantrasyonu 0.01-0.35 N aralığında değişen NaCl çözeltisi içeren doygun $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çözeltisi içindeki çeliğin korozyonunu incelemiştir. Araştırmada, sisteme dışarıdan oksijen gönderilmiştir. Çeliğin pasif halde kaldığı, oksijenin varlığından dolayı etkilenmediği, ortama klorür iyonlarının eklenmesiyle pasifliğin bozulduğu, zararlı klorür iyonları miktarının sınır değerinin 355 ppm olduğu, potansiyelin pasif halde iken -0.150 volt (SCE)'dan daha pozitif, aktif halde iken potansiyelin -0.450 volt (SCE)'dan daha negatif olduğu gözlenmiştir. Klorürlü ortamda çeliğin korozyon hızı ve katodik koruma akım ihtiyacı oldukça yüksektir. ($i_{\text{cor}} = 2.5 \text{ mA/m}^2$, $i_{\text{cp}} = 6 \text{ mA/m}^2$). Bu değerlerin zamanla azalması mümkündür.

C.A. LOTO ve E.T. ODUMBO (1980), yapılan çalışmada beton içindeki çeliğin çevre sıcaklığında, farklı test ortamlarına kısmen daldırılmış durumda korozyon ve koruma tavrı potansiyel izleme tekniği ile araştırılmıştır. Beton bloklar portland çimentosu kullanılarak hazırlanmış, bazı beton bloklara hazırlanırken belirli miktarda NaCl ilave edilmiştir. Betonların bir kısmı çinkoca zengin epoksi boyalar kullanılarak boyanmıştır. Test ortamları 0,2 M NaHCO_3 çözeltisi, deniz suyu ve musluk suyudur. Önceden NaCl ilave edilerek hazırlanmış betonlar test ortamlarına kısmen daldırılarak ölçümler alınmış, ölçülen potansiyeller zamanla daha negatif değerlere ulaşmıştır. Potansiyellerin negatife kayması batırılmış çelik yüzeyinde anodik çözünmeye neden olmaktadır. Bu çukurcuk korozyonu şeklinde veya genel korozyon şeklindedir.

Betona batırılmış çeliğin korozyonunu test ortamındaki karbonat, sülfat, klorür iyonlarının difüzyonu, absorbe olan su, su/nem oranları artırmaktadır. Çelik, boya ile kaplandığında (betona gömülmeden önce) koruma olmaktadır. Beton blokların dıştan

boyanması betonları daha çok korumaktadır. Hem çeliğin hem de betonun dıştan boyanması korozyondan korunma için çok etkili olmaktadır.

B.B. HOPE ve ark. (1989), tarafından kalsiyum klorür ihtiva eden, oksijen geçirilmiş kirece daldırılan çelik örneklerinde kalsiyum nitrit ve kalay klorürün korozyondan koruma etkisi elektrokimyasal ve görünüm olarak incelenmiştir. Elektrokimyasal ölçümler yarı hücre potansiyeli, AC impedansı, polarizasyon direnci ve tafel eğimini içermektedir.

İnhibitör olarak $\text{Ca}(\text{NO})_2$ %0,1-%0,3 arasında kullanılmıştır. Oksijenli kireç suyuna konulan çelik örneklerin yüzeyinde görülebilir korozyona rastlanmamıştır. Çeşitli çeliklerde potansiyel SCE'ye karşı -0.120 V ile -0.150 V olarak belirlenmiştir. Çözeltiye %1'lik CaCl_2 eklendiğinde çelik yüzeyi üzerinde pas lekeleri oluşmuş, potansiyel daha negatif değerlere kaymıştır. (-0.480 V ile -0.520 V (SCE)). İmpedans diyagramları çelik örneklerin aktif korozyon altında olduğunu göstermektedir. Korozyon akımı polarizasyon direnci ve tafel eğimi ile hesaplanmış ve 1,5-3,0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ bulunmuştur. %0,1 $\text{Ca}(\text{NO})_2$ ilave edildikten sonra çelik yüzeyi gümüş gibi beyaz bir tabaka ile örtülmüş ve çelik yüzeyine sıkıca yapışmıştır. Potansiyel -0.110 ile -0.200 V (SCE)'a kaymıştır. Pasif film şekli impedans diyagramında da görülmektedir. Korozyon akımı 0,10 ve 0,40 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak hesaplanmıştır.

İnhibitör olarak kalay klorür (SnCl_2) ilave edildiğinde, oksijenli kireç suyuna %1 CaCl_2 ve %0,1 SnCl_2 ilave edildiğinde çelik yüzeyinde pas lekeleri görülmüş, potansiyel -0.450 ile -0.480 V (SCE) arasında ölçülmüştür. İmpedans diyagramı çeliğin aktif korozyonunu göstermektedir. Korozyon akımı 1,2-2,6 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak bulunmuştur. Konsantrasyonlar değiştirilerek deney serileri tekrarlanmış ve sonuç olarak bu çalışmada deney koşulları altında $\text{Ca}(\text{NO})_2$ korozyon inhibitörü özelliği göstermektedir. Nitrit ve klorür iyonları oranı 0,07 ve 0,09 arasındaysa korozyonun başladığı ve kalay klorürde inhibitör özelliği görülmediği belirlenmiştir.

F. DERRIEN ve ark. (1990), beton içine batırılmış çeliğin davranışlarını katodik polarizasyonla belirlemişlerdir. Çeşitli yaşlarda benzer betonlar aynı miktarlarda karbonat ve klorür iyonlarıyla kirletilmiş sulu çözeltilerde incelenmiştir. Karışımlarda (Na^+ , K^+) alkali katyonları ve OH^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} anyonları bulunmaktadır. Deneyler potansiyodinamik eğrilerin çizimi, polarizasyon direncinin ölçülmesi ve

çeliğin yüzey koşullarının incelenmesini içermektedir. Daha önceki yapılan çalışmalardan $C = [Cl^-]/[OH^-] \geq 1$ olduğunda korozyon meydana geldiği belirlenmiş ve bu çalışmada C oranı 0,1 ve 2 olarak alınmıştır. Çeliğin 5 farklı çözeltideki potansiyodinamik eğrilerinden elde edilen Ecor ve İcor değerleri farklı C oranları ile karşılaştırıldığında yüksek pH'lı iki çözeltide Ecor fazla değişmemektedir. Polarizasyon testleriyle korozyon potansiyeli (Ecor) ve polarizasyon direnci belirlenmektedir. Korozyon potansiyeli pH'ı yüksek (pH=13,2) ve (pH=11,9) olan iki çözeltide klorür iyonunun ilavesi ile daha negatif değerlere kaymakta diğer çözeltilerde ise daha pozitif değerlere kaymaktadır.

Yüzey koşulları incelendiğinde pH'ı yüksek iki çözeltide C=1 olduğunda çelik yüzeyinde pas ve beyaz birikim görülmüş, C=2 olduğunda da aynı yüzey koşulları saptanmıştır. Diğer çözeltilerde ise C'nin bütün değerlerinde de hiçbir birikim görülmemiştir.

H. GALİP ve ark. (1990), yaptıkları çalışmada sülfat (SO_4^-) iyonlarının klorürlü ortamlarda demirli malzemelerin korozyonu üzerine etkilerini incelemişlerdir. Yapay deniz suyu içinde SO_4^- iyonlarının demirin korozyonu üzerine etkisi kütle kaybı ve elektrokimyasal yöntemlerle araştırılmıştır. Araştırma pH=8-4 arası değişik pH'larda yapılmış ve SO_4^- iyonu derişimi kademeli olarak 0-0,1 M arasında değiştirilmiştir. Açık havada metalin korozyon potansiyeli belirlendikten sonra polarizasyon dirençleri ölçülmüştür. Ayrıca korozyon potansiyeli dolayında akım-zaman ilişkisi izlenmiştir. Rp-logc ve İ-t grafiklerinden pH=8'de SO_4^- iyonunun yapay deniz suyu içinde demir korozyonuna zayıf inhibisyon etkisi yaptığı, pH=6'da net bir etki görülmezken pH=4'de SO_4^- iyonlarının demirin korozyonunu artırdığı ileri sürülmüştür.

J.K. BOAH ve ark. (1990), yapılan çalışmada Cl^- , SO_4^- , CO_3^- iyonları ihtiva eden doygun $Ca(OH)_2$ çözeltisi içine batırılmış çeliğin doygun $Ca(OH)_2$ çözeltisinde pasif bir film tabakasıyla kaplanır ve çelik korozyona uğramaz ama $Ca(OH)_2$ çözeltisine ilave edilen Cl^- , SO_4^- , CO_3^- iyonları çelik yüzeyi üzerindeki pasif filmin bozulmasına ve korozyon hızının artmasına neden olur. Düşük klorür konsantrasyonlarında pasifliğin bozulmaya başlaması difüzyon kontrollü olmakta, klorür konsantrasyonunun artmasıyla ara yüzey reaksiyonları yük transfer kontrollü olmaktadır. Na_2SO_4 miktarı arttıkça

doğru $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çözeltisindeki karbon çeliğinde korozyon hızının arttığını belirtmişlerdir.

S. GONI ve ark. (1990), yaptıkları bu çalışmada sentetik beton por çözeltisine farklı konsantrasyonlarda Cl^- ilave ederek bu çözeltilere batırılmış beton demirinin korozyon hızını araştırmışlardır. $\text{pH}=11,64$ ile $\text{pH}=13,22$ arasında değişik pH değerlerinde çalışılmıştır. Çözeltilerin pH değerleri, iyonik kuvveti, direnci ve $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ oranları ölçülmüştür. Buna bağlı olarak por çözeltisinin kimyasal parametreleri saptanmıştır. Korozyon yoğunluğunun zamanla değişimi polarizasyon direnci yöntemi ile izlenmiştir. Por çözeltisinin kimyasal parametreleri ve korozyon yoğunluğu değerleri ile ikisi arasında bağıntı kurulmuştur. Çukur potansiyeli (E_c) ve pH arasında elde edilen sonuçlardan faydalanarak bir lineer bağıntı elde edilmiştir. (Çukur potansiyeli (E_c) potansiyokinetik veya yarı-potansiyostatik polarizasyon eğrilerinden belirlenmiştir). pH arttıkça E_c değerleri daha soy değerlere kaymıştır. pH ile E_c değerleri arasında bağıntı ;

$$\text{pH} = 12,5 + 0,0016 E_c$$

şeklinde dir. Aynı klorür konsantrasyonunda NaCl ve CaCl_2 içeren çözeltilerden, CaCl_2 içeren çözelti daha agresif görülmekte ve $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ oranı yükseldikçe korozyon hızının artmasına neden olmaktadır.

H.T. CAO ve ark. (1990), yaptıkları bu çalışmada farklı çimentolarla hazırlanan çözeltilere batırılan çeliğin korozyon karakteristiklerini klorür içeren ve içermeyen ortamlarda araştırmışlardır. Araştırmada kullanılan çimentolar; düşük C_3A ihtiva eden OPC, yüksek C_3A içeren OPC, curuf çimentosu ve uçucu kül içeren çimento. Bu çimentolardan hazırlanan çözeltiler klorür iyonu içermediğinde bu çözeltilere batırılan çeliğin korozyon karakteristikleri, kireçle doğru suda elde edilen karakteristiklere çok benzemektedir. Çeliğin çözeltilerde farklı korozyon potansiyellerine rağmen bütün çözeltilerde çelik pasiftir. Deneylerde akım-potansiyel değişimleri potansiyostat ile ölçülmüştür. Ortamlarda klorür iyonu sağlamak için NaCl (0,01 mol/L) kullanılmıştır.

Çeliğin çözeltilere batırılmasından üç gün sonra çeliğin anodik davranışı incelendiğinde farklı çözeltiler için, çeliğin korozyon karakteristikleri farklı büyüklükler göstermiştir. NaCl ilavesi ile çeliğin pasifliği ve pasif filmin kararlılığı kaybolmaktadır. Bunun için eşik değer düşük C_3A içeren OPC için 0,015 mol/L diğerleri için 0,025

mol/L NaCl'dir. Yedinci günde de çeliğin anodik davranışları incelenerek klorür eşik değerleri belirlenmiştir. Bütün çözeltilerde klorür konsantrasyonu arttıkça korozyon potansiyelleri de daha negatif değerlere kaymıştır. 0,05 mol/L NaCl ilave edildiğinde bütün çözeltilerden elde edilen korozyon-akım değerleri farklılık göstermektedir. Korozyon akımlarına bağlı olarak korozyon hızları hesaplandığında yapılan deney koşullarında çeliğe klorür iyonlarının minimum zarar verdiği ortam curuf çimentosu çözeltisi, en çok zarar verdiği ortamda düşük C_3A içeren OPC çimentosu çözeltisi olmuştur.

J.T. HINATSU ve ark. (1990), yapılan çalışmada portland çimento pastasına daldırılmış demir çubukların davranışları voltametrik metotla incelenmiştir. Bu çalışmada;

- a. Çimentoya batırılmış demir üzerinde oluşan pasif film,
- b. NaCl ilavesi ile pasif filmin bozulması,
- c. Pasif filmin korunması için çimento pastasına korozyon inhibitörleri ilave edilmesi.

Korozyon inhibitörleri olarak sodyum nitrit, potasyum kromat ve sodyum benzoat kullanılmış ve etkileri incelenmiştir.

%0,5 sodyum nitrit ilavesinin faydalı etki yaptığı, %0,75 - %1,0 sodyum nitrit ilavesinin etkili olmadığı gözlenmiştir. Potasyum kromat %1,7 oranında kullanılmış ve ortamda NaCl miktarının düşük olduğu (0,1 mol/L'den az) koşullarda etkili olduğu saptanmıştır. Na-benzoat ise %1,6 oranında kullanılmış ve NaCl miktarının 0,2 mol/L'den az olduğu koşullarda etkili olduğu belirlenmiştir. En etkili inhibitörün $NaNO_2$ olduğu saptanmıştır. Diğerlerine göre daha yüksek NaCl konsantrasyonu olduğunda bile etkinliğini korumuştur.

RASHEEDUZZAFAR ve ark. (1990), yaptıkları çalışmada yüksek trikalsiyum alüminat içeren çimentodan yapılmış betonların yapısının betona batırılmış çeliğin korozyonu üzerine etkilerini araştırmışlardır. Tip1 %9,5 C_3A içeren çimentonun %2,8 C_3A içeren Tip5 çimentosundan daha fazla etkili olduğu, betona batırılmış çeliğin korozyonunun başlama zamanını geciktirdiği belirlenmiştir. Bu görünüm çimento içindeki serbest Cl ile C_3A 'nın kompleks yapabilmesiyle uygunluk göstermektedir.

Deneylerde iki t p  imento kullanılmıştır. Trikalsiyum al minatın etkisini araştırmak içinde %2 - %14 arasında dört tip C_3A içeren seri hazırlanmış, W/C oranı 0,40 ile 0,65 arasında değiştirilmiştir. Örnekler 28 gün suda bekletilerek k r uygulanmış ve kısmi olarak %5'lik NaCl çözeltisine batırılmış ve örneklerin yarı hücre potansiyelleri izlenmiştir. Çimentonun ihtiya ettiği C_3A miktarı arttıkça beton içindeki  elik çubukların korozyonunun başlama süreleri artmaktadır, aynı şekilde beton örtüsünün kalınlığı arttıkça korozyonun başlama süreleri artmaktadır. Aynı beton kalınlığında düşük C_3A içeren betonlara göre daha fazla C_3A içeren betonlarda korozyonun başlama süresi artmaktadır. C_3A 'nın Cl^- ile kompleks oluşturma kapasitesi için XRD ile yapı analizleri yapılmış ve %2 C_3A içeren çimentodan hazırlanan betonun yapısında 700 günün sonunda kalsiyum kloro alüminat görülmemiş, %11 C_3A ve %14 C_3A içeren betonlarda g r lm ştir. %9,11 ve 14 C_3A içeren beton örneklerinde korozyonun başlama süreleri %2 C_3A içeren beton örneklerine göre sırasıyla 1.75, 1.93 ve 2.45 kat daha iyi olmaktadır.

T.P. CHENG ve ark. (1990), tarafından yapılan bu çalışmada betonarme demirlerinin korozyonunda klorür ve sülfat iyonlarının rolü laboratuvar koşullarında araştırılmıştır. Düşük karbonlu  elik  rnekleri Tip1 ve Tip5 portland çimentosundan yapılmış beton örneklerle batırılmış ve aynı beton örnekleri birde polimerle muamele edilerek hazırlanmıştır. Bütün  rnekler yapay deniz suyuna ve konsantre sülfat çözeltisine daldırılarak elektrokimyasal testler yapılmıştır. Korozyon hızları AC impedans tekniği ile belirlenmiştir. Yapay deniz suyuna daldırılan Tip1 ve Tip5 portland çimentosundan yapılmış örneklerde açık devre potansiyeli daha negatif değerlere kaymış, daldırıldıktan yaklaşık 10 gün sonra kararlı hale ulaşmıştır. Polimerlerle muamele edilmiş örneklerde yapay deniz suyuna daldırıldığında potansiyel değişimleri diğer örneklerle benzerlik göstermiştir. Hazırlanan beton örnekleri sülfat çözeltisine daldırıldığında açık devre potansiyelleri negatif değerlere kaymış fakat kararlı hale 100 gün sonra ulaşmıştır. Konsantre sülfat çözeltisine daldırılan örneklerde açık devre potansiyelleri yapay deniz suyuna daldırılan örneklerden daha pozitif değerlerdedir. Elektrokimyasal impedans ölçümlerinde yüzey filminin etkisi yapay deniz suyunda açıkça gözlenememiştir, fakat sülfat çözeltisi içinde daha belirgindir. Sülfat iyonlarının parametrelerinin değişimi yüzey filminde daha önemlidir. Sülfatın

neden olduğu korozyon problemleri daha şiddetli olmaktadır. Polimerlerle doyurulmuş betonlarda, beton direnci artmakta ve korozyonu önleyici etki yapmaktadır.

JANG ve IWASAKI (1991), galvanik akım yöntemini ilk defa kullanarak, klorür iyonlarının betonarme demirleri korozyonu üzerindeki etkisini beton kırıkları ile doyurulmuş su ve gerçek beton ortamlarında incelemişlerdir. 120 gün süreyle yapılan ölçümler sonunda, klorür iyonu arttıkça korozyon hızının arttığı sonucuna varmışlardır.

İ.M. RODRIGUEZ ve ark. (1991), yaptıkları bu çalışmada klorür içeren çimento veya Ca(OH)_2 çözeltisine batırılmış çeliğin katodik polarizasyon altında elektrokimyasal tavrı farklı tekniklerle mukayese edilerek incelenmiştir. Birinci teknikte çeliğe sabit potansiyel uygulayarak polarizasyon direnci belirlenmiştir. İkinci teknik ise sabit akım ile polarizlenmiş çelikte hızlı akım azalmasıdır. Bununla transfer direnci ve çift tabaka kapasitesini belirlemek mümkündür. Elde edilen sonuçlar test işlemleri arasında uyumludur.

Doygun Ca(OH)_2 veya Cl^- iyonu içeren çözeltiye batırılmış çeliğe potansiyodinamik polarizasyon uygulanmıştır. Ecor değeri ölçülmüş ve tafel ekstrapolasyonundan İcor değeri belirlenmiştir. Elektrokimyasal impedans spektroskopisiyle çeliğin çeşitli katodik potansiyellerdeki tavrı belirlenmiştir. Cl^- içeren ve Ca(OH)_2 çözeltisinde çelik için $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ oranı arttıkça Ecor azalmış ve İcor artmıştır. Her iki teknik ile klorür iyonu içeren mortar veya Ca(OH)_2 çözeltisine batırılmış çeliğin polarizasyon dirençleri ölçülmüş ve her iki metotta da çelik katodik polarizasyon altında iken benzer sonuçlar elde edilmiştir.

H.T. CAO ve ark. (1991), tarafından yapılan bu çalışmada farklı miktarda silika füme ihtiva eden farklı dayanım gücündeki beton içerisine batırılmış çeliklerin korozyon hızını ölçmek için 0.400 V'luk sabit potansiyel uygulanan bir korozyon hücresi geliştirilmiştir.

Klorür iyonlarının olmadığı koşullarda beton içindeki çeliğin korozyon hızı çok düşük olmakta ve çok düşük akım göstermektedir. Düşük korozyon hızı beton içindeki çeliğin pasif koşullarda olduğunu göstermektedir. Beton kalıplar tuz çözeltisine batırıldığında hücre akımı yükselmektedir. Hücre akımının yükselmesi aynı zamanda beton dayanımı ile ilgilidir. Düşük basınç dayanımlı betonlarda akım artışı, yüksek basınç dayanımlı betonlara göre daha yüksektir.

OPC kullanılarak yapılan betonlarda dayanım gücünün artması ile beton özdirenci de artmaktadır. Beton içine klorür girmesiyle beton özdirenci düşmekte ve beton içindeki çeliğin korozyon hızı artmaktadır. Silika fümünün etkisine gelince %20 silika füme beton özdirencini artırmakta ve çelikteki korozyon hızı da artmaktadır. Buda muhtemelen klorürün etkilemesi için gerekli konsantrasyon miktarını düşürmesindendir. %10 silika füme ihtiva eden betonlarda korozyon hızı düşmekte ve beton özdirenci artmaktadır. Klorür etkisine karşı %10 silika füme kullanmak avantaj sağlamaktadır.

ZHANG ve ark. (1992), %100 bağıl rutubette 26 değişik çeşitli beton karışım üzerinde çalışmışlardır. Beton örnekleri değişik miktarlarda uçucu kül ve süper plastikleştiriciler eklenerek hazırlanmıştır. Araştırmada beton örneklerinin mukavemet değerleri, klorür iyonu geçirgenlikleri, farklı derinliklerden klorür iyonlarının penetrasyonu ve korozyon hızı tespit edilmiştir. Beton içindeki çeliğin korozyon potansiyeli zamana karşı doygun kalomel elektrotla ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre W/C oranı 0,66 tutulup içine kimyasal katkı maddeleri eklenmemiş (süper plastikleştirici, uçucu kül) beton örnekleri içindeki çeliğin korozyonu yüksek bulunmuştur. W/C oranı değiştirilip beton içine kimyasal katkı maddeleri eklenerek hazırlanan beton içindeki çeliğin korozyonu, beton içine klorür penetrasyonu ve geçirgenliği, W/C oranı ve eklenen kimyasal maddelerin türüne, miktarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

L. HACHANI ve ark. (1992), yapmış oldukları çalışmada betondaki çelik korozyonuna klorür ve sülfat etkisini “Elektrokimyasal impedans spektrofotometri (EIS)” ve “Stepping down the current (SDC)” yöntemlerini kullanarak araştırmışlardır. EİS metodu ile elde edilen sonuçların daha önce yapılan çalışmalarla uyumlu olduğu belirlenmiştir. Sağlam beton içindeki çelik için elde edilen Nyquist diyagramı bir loop içermektedir ki buda çeliğin pasif olduğunu ifade etmektedir. Klorür veya sülfat ihtiva eden agresif sulu çözeltilere batırılan betondaki çelik için elde edilen Nyquist diyagramı iki loop içermektedir, buda pasifliğin bozulduğunu göstermektedir. SDC metodu ile elde edilen sonuçlar EIS metodu ile elde edilen sonuçlara uyum sağlamaktadır.

A.V. SAETTA ve ark. (1993), yaptıkları çalışmada kısmen doygun betonda klorür difüzyonunu beton parametreleri ve değişebilen iyon difüzyon katsayılarını dikkate alarak incelemişlerdir. Deney sonuçları göstermiştir ki klorür hızı sıcaklığa,

beton gözenekliliğine, çimento tipine, Cl^- iyonlarının katyonlarının türüne ve kür koşullarına bağlıdır. Gözeneklilik su/çimento oranının direkt fonksiyonudur. Oran arttığında difüzyon karakteristikleri de artacaktır. Su/çimento oranı arttığında gözeneklilik de artmaktadır. Yapılan deneylerde su/çimento oranına bağlı olarak elde edilen difüzyon katsayıları $W/C=0,32$ olduğunda $D=0,59.10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$; $W/C=0,44$ olduğunda $D=1,57.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ve $W/C=0,55$ iken $D=1,46.10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ bulunmuştur. Görüldüğü gibi su/çimento oranının artmasıyla difüzyon katsayısı da artmaktadır.

D. BAWEJA ve ark. (1993), tarafından yapılan bu çalışmada beton içerisine batırılmış çeliğin korozyonu potansiyodinamik anodik polarizasyonu işlemleri kullanılarak dört yıllık bir periyotta izlenmiştir.

Deneylerde beton kalıpların su/çimento oranı 0.85, 0.45 ve 0.65 olarak alınmıştır. Beton kalıplar %3'lük NaCl çözeltisine kısmen daldırılmış, 50 ± 5 bağıl nem içeren laboratuvar koşullarında çalışılmıştır. Örneklerin bir kısmının daldırıldığı çözelti sıcaklığı 23°C , bir kısım örneklerin ($W/C=0,85$) kısmen daldırıldığı çözeltinin sıcaklığı 40°C 'dir.

Potansiyodinamik anodik polarizasyon testlerinde doymuş kalomel elektrot referans elektrot olarak kullanılmış, çalışma elektrotu olarak beton içindeki demir çubuklar kullanılmıştır. Potansiyodinamik anodik polarizasyon taramalarından elde edilen elektrokimyasal veriler bilgisayar programı kullanılarak Ecor ve tahmini korozyon akımı İcor hesaplanmıştır. Ağırlık kaybı ve elektrokimyasal veriler arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır.

R.K. DHIR ve ark. (1993), yaptıkları çalışmada beton içine batırılmış çelikte klorürün neden olduğu korozyonun şiddetini ve hızını yarı hücre potansiyel testleri ile belirlemişlerdir. Laboratuvar çalışmaları farklı tipte çimentolar kullanılarak beton örnekler hazırlanarak yapılmış üzerine 5 M NaCl çözeltisi püskürtülmüştür. Diğer deneyler deniz kıyısında direk ve kolonlar hazırlanarak çalışılmıştır. Klorür ölçümleri; suda çözünmüş ve toplam klorür miktarları deneylerle saptanmıştır. Beton üzerine yerleştirilen referans elektrotla beton içine batırılmış demir çubuk arasında bağlantı sağlanarak korozyon potansiyelleri ölçülmüştür. Korozyon şiddeti arttığında potansiyel daha negatif değerlere kaymaktadır. Potansiyel değişimlerine karşı I değerleri ölçülmüş V/I grafiği çizilerek eğiminden polarizasyon direnci hesaplanmış ve Stern-Geary eşitliği

kullanılarak i_{cor} belirlenmiştir. B sabiti çeliğin korozyon koşulları için 0,026 V olarak alınmıştır.

$$i_{cor} = B/R_p = B/(\Delta V/\Delta I) = B \cdot \Delta I/\Delta V$$

F. GIANETTI ve ark. (1994), tarafından yapılan çalışmada beton dayanıklılığını artırmak için korozyon inhibitörü olarak $Ca(NO_2)_2$ ' in etkinliği araştırılmıştır. $Ca(NO_2)_2$ katkısının beton özelliklerine etkileri şöyledir;

Kalsiyum nitrit bir priz hızlandırıcıdır ve ayrıca betonun işlenebilmesini artırmaktadır. Normal portland, traslı ve curufllu çimentolarla kullanılabilir. $Ca(NO_2)_2$ kritik klorür içeriği (eşik değeri) sayılan $0,89 \text{ kg/m}^3$ değerini 10 katına kadar yükseltmektedir. Sonuç olarak $Ca(NO_2)_2$ iyi kaliteli bir betonla birlikte kullanıldığında korozyon direncinde önemli artışlar sağlanabilmektedir. Bu katkı betonun mekanik özelliklerini bozmamakta aksine yararlı olmaktadır. Her türlü çimento ile kimyasal ve mineral beton katkıları ile uyum içindedir. Uzun dayanıklılık sağlama açısından $Ca(NO_2)_2$ inhibitörü kullanmak güvenilir bir çözüm olmaktadır.

H. YALÇIN ve ark. (1994), yaptıkları bu çalışmada beton demirlerinin korozyon hızını üç elektrot yöntemiyle ölçmüşlerdir. Klorürlü, klorürsüz ve asetat katılmış betonlar üzerinde yapılan deneylerde çeliğin 1, 7, 28 gün, 2 ve 3 ay sonundaki korozyon hızları iki ayrı yöntemle tayin edilmiştir. Akım-potansiyel ölçüm değerleri lineer bölgede polarizasyon direnci yöntemiyle, Tafel bölgesinde de polarizasyon-kırılma yöntemi ile değerlendirilmiştir.

Aynı koşullarda hazırlanmış ve bekletilmiş klorürlü ve asetatlı beton numuneleri üzerinde korozyon hızları tayin edilmiş ve şu sonuçlar çıkarılmıştır;

a. Beton içindeki çeliğin korozyonu ilk günlerde maksimumdur. Korozyon hızı zamanla azalarak bir ay sonra yaklaşık %90 düşüş göstermektedir.

b. Beton içinde belli miktarda klorür bulunması halinde çeliğin korozyon hızı klorürsüz hale göre birkaç kat artış göstermektedir. Asetat katılmış betonlarda ise korozyon hızında normal haldekinden daha hızlı bir azalma gözlenmiştir. Korozyon potansiyeli değerlerinin incelenmesinde bu pasifleşme olayı açık bir şekilde gözlenmektedir. Asetat içeren betonlarda çeliğin potansiyeli başlangıçta klorürlü

betonlarda olduğu gibi -0.500 V (Cu/CuSO₄ elektrota karşı) civarında olduğu halde ilk bir ay içinde pozitif yöne doğru kayarak yaklaşık 15 gün içinde pasif bölgeye geçmiştir.

c. Polarizasyon kırılma yöntemiyle bulunan korozyon hızı değerleri lineer polarizasyon yöntemiyle elde edilen korozyon hızı değerlerinden daima düşük bulunmuştur. Bu durum beton özgül direncinin yüksek oluşundan ve betonun polarizasyon ölçümleri için uygun bir elektrolit olmayışından kaynaklanmıştır.

G. BALABANIC ve ark. (1996), yapılan çalışmada beton içerisine batırılmış çeliğe klorürün neden olduğu korozyonda beton kalitesinin etkisi, beton örtüsünün kalınlığı, su ile doygunluk derecesinin korozyon akım yoğunluğu üzerine etkisi matematiksel model için analizler uygulayarak araştırılmıştır.

Yapılan deneylerde sonuçlar incelendiğinde ($W/C=0,40$ iyi kalite beton ve $W/C=0,70$ kötü kalite beton) her iki tip betonda, su doygunluk derecesi artığında oksijen difüzyon hızı yavaşlamış fakat elektriksel iletkenlik artmıştır. $W/C=0,70$ olan betonlarda oksijen difüzyon hızı diğer betona göre daha yüksektir.

Beton kalınlıklarına göre elde edilen sonuçlarda ise $W/C=0,40$ olan betonlarda beton kalınlığı 5 cm ve 10 cm olduğunda korozyon akım yoğunlukları birbirine çok yakındır. $W/C=0,70$ olduğunda ise korozyon akım yoğunluğunun beton kalınlığı 5 cm olduğunda daha fazla olduğu belirlenmiştir.

G. BARONIO ve ark. (1996), yaptıkları bu çalışmada normal ve hafif betonlara batırılmış çeliğin korozyon hızını 4 aşamalı ortamda incelemişlerdir. Klorür tuzu püskürtme, kurutma, sülfat çözeltisine daldırma ve kurutma. Bu çalışmada çok agresif deniz kıyısı ile ilişkili beton yapıların; farklı tip ve miktarlarda çimento ve agrega karışımlarının, farklı tipte betonların korozyona karşı koruyucu özellikleri değerlendirilmiştir. Betonlar normal ağırlıklı agregalar ile iri, kaba ve ince uçucu küllü hafif agregalar kullanılarak yapılmıştır. 12 tip beton örneği hazırlanmış ve iki tip çimento kullanılmıştır. Portland curuf çimentosu (%30 curuf içeren) ve portland çimentosu (%30 PFA içeren). Her iki çimentoya beton karışımının %10'u kadar (ağırlığının) silika fume ilave edilmiştir. Hafif betonu geliştirmek için bir süper plastikleştirici ve hava sürükleyici kullanılmıştır.

28 günlük basınç dayanım testleri sonucunda, hafif betonlar için 40-60 MPa, normal ağırlıklı betonlar için 60-90 MPa arasında basınç dayanım değerleri elde

edilmiştir. Normal betonlar içindeki çelik çubuklar çevre etkilerine maruz kalmakla birlikte serbest korozyon potansiyelleri farklı değişim göstermemiş ve soy potansiyeller göstermiştir. Hafif betonlarda potansiyelde 0.400 V'dan fazla dalgalanmalar görülmüş, sülfat çözeltilisine daldırıldıktan sonra çok düşük potansiyellere kaymıştır. 5 yıllık testlerde normal ağırlıklı betonların takviyeleri ana hatlarıyla tamamen pasiftir. Hafif betonların takviyelerinde ise çevreye maruz kalmasından, aktif ve pasif aralığın üst üste binmesinden dolayı korozyonun başlaması potansiyel ölçümlerinden belli olmamaktadır.

G. KILINÇÇEKER (1998), tarafından yapılan çalışmada demir, bakır, çinko ve pirincin sülfatlı ortamlardaki korozyon davranışlarına fosfat iyonlarının etkileri farklı sıcaklık ve pH'larda araştırılmıştır. Demir, bakır, çinko ve pirinç kalomel elektroda karşı ölçülen korozyon potansiyelinden itibaren katodik ve anodik yönde polarizlenerek akım-potansiyel eğrileri çizilmiştir. Çizilen bu akım potansiyel eğrilerinden faydalanılarak anodik ve katodik tafel eğrileri belirlenmiş ve bulunan bu eğimler yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlardan, yüksek pH'larda SO_4^- iyonlarına göre $\text{SO}_4^- + \text{PO}_4^{3-}$ iyonlarının birlikte demir, bakır ve pirincin korozyon hızını azalttığı belirlenmiştir. Düşük pH'larda (pH=2,1) ise sıcaklık arttıkça çalışılan metallerin korozyon hızının SO_4^- ve $\text{SO}_4^- + \text{PO}_4^{3-}$ lı ortamlarda arttığı gözlenmiştir.

3.1. Çalışmanın Literatür Işığında Değerlendirilmesi

Literatürde betonarme demirlerinin korozyonu üzerine etki yapan faktörler konusunda pek çok araştırma yapılmıştır. Gerçek beton örnekleri üzerinde yapılan çalışmalarda genellikle klorür iyonu konsantrasyonlarında beton içindeki çeliğin korozyon hızı belirlenmiş ve klorür iyonlarının korozyona neden olan minimum sınır değeri tayin edilmiştir. Bunun yanı sıra betonun permeabilitesi (geçirgenliği), porozitesi, mukavemeti, rutubet yüzdesi ve elektriksel iletkenliği gibi fiziksel özellikleri ile çimento cinsi ve dozajı, su/çimento oranı, beton katkı maddeleri ve inhibitörlerin korozyon üzerine etkileri araştırılmıştır. Betonarme donatısının korozyonu üzerine çimentoların etkisi ile ilgili araştırmalarda farklı türden çimentolar karşılaştırılarak bunların korozyona etkileri incelenmiştir. Yapılan bu çalışmada farklı türden çimentolar kullanmak yerine piyasada yaygın olarak kullanılan PKÇ/B 32,5 R türü çimentosunun betonarme donatısının korozyonu üzerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın amacı

Çimento hammaddesinin oksit kompozisyonunda meydana gelen küçük değişikliklerin ana bileşenlerin oranlarında önemli değişikliklere yol açacağı mantığından hareket ederek bu değişikliklerin korozyon hızı üzerindeki etkilerini belirlemektir. Bu nedenle beş ayrı ilden alınan PK/B 32,5 R imentosu ile hazırlanan deney numuneleri üzerinde 90 gün süresince açık devre yarı hücre potansiyelleri elde edilmiş ve ardından da galvanostatik yöntem ile korozyon hızları tespit edilmiştir. Deneyler sonunda grlmştir ki PK/B 32,5 R imentosunun üretiminde kullanılan hammadde farklılığının oksit bileşenlerinde değişikliğe neden olmasından dolayı korozyon hızlarını da farklı yönde etkilemiştir.

4. KOROZYON HIZI ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ VE POLARİZASYON

4.1. Korozyon Hızı Ölçüm Yöntemleri

Korozyon hızı değişik yöntemlerle ölçülmektedir. En çok kullanılan yöntemler şunlardır;

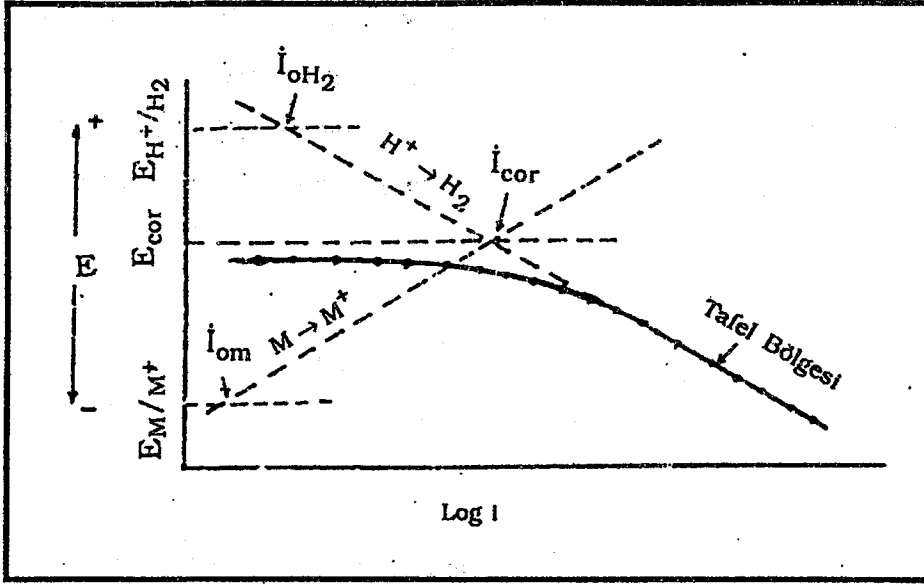
4.1.1. Ağırlık kaybı yöntemi

Korozyon hızını ölçmek üzere kullanılan en eski yöntem ağırlık kaybı yöntemidir. Bu yöntemde korozyon ortamda belli bir süre bekletilen metalin birim yüzey alanı başına birim zamandaki kütle kaybı ölçülür. Sonuç ($\text{gram/dm}^2 \cdot \text{gün}$ (mdd)) veya ($\text{mg/dm}^2 \cdot \text{yıl}$) olarak verilir. Çoğu zaman korozyonun üniform karakterde olduğu kabul edilerek, bu korozyon hızı değerleri metal kalınlığının azalmasına dönüştürülerek (inç/yıl=ipy) veya (mm/yıl) olarak ifade edilir. Bu yöntemin basitlik ve uygulamadaki bazı kolaylıklarına karşın deney sürelerinin uzun olması, özellikle korozyon hızının çok düşük olduğu hallerde ve korozyon hızının üniform dağılım göstermediği hallerde güvenilir sonuçlar vermez, (Perry, 1984).

4.1.2. Elektrokimyasal yöntemler

4.1.2.1. Polarizasyon–kırılma (Tafel ekstrapolasyon) yöntemi

Bu yöntemde bir yardımcı elektrot kullanarak elektroda bir dış akım uygulanır ve buna karşılık gelen potansiyeldeki artış bir referans elektrot yardımıyla ölçülür. Bir reosta yardımıyla akım her seferinde değiştirilerek potansiyeldeki artış kaydedilir. Böylece değişik akım ve potansiyel değerinde tutulan metalin istenen bölge aralığında akım-potansiyel eğrileri çizilir. Bu yöntemle hem anodik hem de katodik polarizasyon eğrileri elde edilebilir. Daha kolay elde edilmesi bakımından katodik polarizasyon eğrisi tercih edilmektedir. Şekil 4.1'de oksijensiz bir asit çözeltisine daldırılan bir metalin katodik polarizasyon eğrisi görülmektedir.



Şekil 4.1. Oksijensiz asit çözeltisindeki metalin katodik polarizasyon eğrisi
(Fontane ve Greene'den, 1978)

Metale akım uygulanmadan önce ölçülen potansiyel değeri E_{cor} 'dur. Eğer uygulanan akımın logaritmasına karşı elektrotun ölçülen potansiyeli grafiğe geçirilirse yarı logaritmik polarizasyon eğrisi elde edilir. η -logi eğrisi şekilde görüldüğü üzere küçük akım yoğunluklarında lineer değildir. Fakat logi değeri belli bir büyüklüğe erişince lineer bir bölge elde edilir. Bu bölgeye "Tafel Bölgesi" denir.

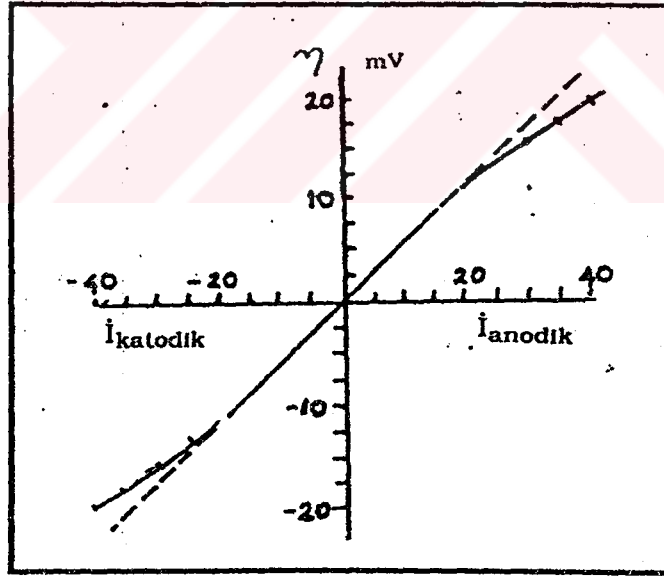
Dışarıdan uygulanan katodik akım, metalin korozyon akımından daha yüksek olursa, anodik akımlar katodik akımlar yanında ihmal edilebilir. Pratikte bu olay 50 mV'dan daha yüksek polarizasyon değerinde gerçekleşebilir. Böylece aşırı gerilim ile uygulanan dış akımın logaritması lineer bir değişim gösterir. Şekil 4.1'de metalin çözünmesi (anodik reaksiyon) ve hidrojen çıkışı (katodik reaksiyon) kesikli çizgilerle verilmiştir. Grafikten görüleceği üzere yüksek katodik akım yoğunluğu uygulandığında katodik polarizasyon eğrisi ve hidrojen çıkışı doğrusu birbiriyle çakışmaktadır. Stern ve Geary bu lineer bölge korozyon potansiyeli değerine ekstrapolasyon yapılarak korozyon hızının bulunabileceğini göstermiştir, (Stern, Geary, 1957). Korozyon potansiyelinde hidrojen çıkış hızı, metal çözünme hızına eşit olacaktır. Dolayısıyla bu noktaya karşı gelen akım yoğunluğu metalin korozyon hızı olarak kabul edilebilir.

İdeal şartlar altında bulunan sistemlerde, ekstrapolasyon yöntemi ile bulunan korozyon hızı, ağırlık kaybı yöntemi ile bulunan korozyon hızı değerine eşit veya ondan biraz yüksektir. Bu teknik ile çok küçük korozyon hızlarını dahi ölçmek mümkündür. Ayrıca bu yöntemle sürekli olarak korozyon hızı ölçülebilir. Çünkü bir katodik polarizasyon eğrisi çok kısa bir süre içerisinde oluşturulabilmektedir. Oysa ağırlık kaybı yöntemiyle belli bir süre içindeki ortalama korozyon hızı ölçülmektedir.

Bu yöntemle duyarlı bir sonuç elde edebilmek için Tafel Bölgesi en az 10 kat akım bölgesinde lineer olarak devam etmelidir. Birçok deneylerde bu lineer bölge istenildiği kadar uzun olmaz. Bunun sebebi konsantrasyon polarizasyonu etkisidir.

4.1.2.2. Lineer polarizasyon (Polarizasyon-direnç) yöntemi

Korozyon hızını izlemeye genellikle kullanılan bu yöntemle korozyon hızını kısa sürede ölçmek mümkündür. Yöntemin temeli, polarizasyon akım eğrilerinin elde edilmesi ve bundan faydalanarak korozyon akımı bulunmasına dayanır. Korozyon potansiyelinin ± 10 mV yakınında uygulanan dış akım ile polarizasyon aşırı geriliminin lineer olarak değiştiği gözlenmiştir. Bu durum Şekil 4.2'de görülmektedir.



Şekil 4.2. Dış akıma karşı polarizasyon aşırı gerilimi
(Atkinson ve Vantroffelaar'dan, 1985)

Bu lineer kısmın eğimi için Stern-Geary (1957) tarafından aşağıdaki bağıntı geliştirilmiştir.

$$\frac{\Delta E}{\Delta i} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{(\beta_a + \beta_c) 2.3 i_{cor}} \dots\dots\dots(4.1)$$

$$\frac{\Delta E}{\Delta i} = \text{Polarizasyon direnci, mV/mA}$$

i_{cor} = Korozyon hızı, mA

β_a = Anodik tafel sabiti, mV

β_c = Katodik tafel sabiti, mV

(4.1) bağıntısından görüldüğü gibi polarizasyon direnci, korozyon hızı ile ters orantılıdır. Anodik ve katodik tafel sabitlerinin bu dirence etkisi oldukça azdır. Bu sabitler 0.12 V olarak alınırsa,

$$\frac{\Delta E}{\Delta i} = \frac{0.026}{i_{cor}} \dots\dots\dots(4.2)$$

bağıntısı elde edilebilir. Polarizasyon direnci ölçüldüğü takdirde, (4.2) bağıntısıyla korozyon hızı rahatlıkla bulunabilir.

Lineer polarizasyon yöntemi, kısa sürede sonuç vermesi, çok hassas ölçümler yapması gibi avantajlarının yanında, ağırlık kaybı yönteminin uygulanamadığı ortamlarda rahatlıkla uygulanabilmektedir.

4.1.3. Statik potansiyel ölçüm yöntemleri

Statik potansiyel ölçümleri, beton içindeki çeliğin korozyonu konusunda kalitatif bir fikir vermesi açısından pratikte sıkça kullanılmaktadır. Denge potansiyelinin zamanla pozitif yöne sapması, korozyon hızının azaldığını, negatif yöne sapması halinde ise korozyon hızının arttığını göstermektedir, (Stratfull, 1973).

ASTM-C-876-91 standardı, betonlarda ölçülen statik potansiyel değeri ile betonarme demirlerinin korozyonunu aşağıdaki şekilde değerlendirmektedir.

Korozyon bölgesi : Potansiyelin -0.350 Volt'tan (SCE) daha negatif olduğu bölgedir.

Korozyon açısından belirsiz bölge : Potansiyelin -0.200 ile -0.350 Volt (SCE) arasındaki bölgedir.

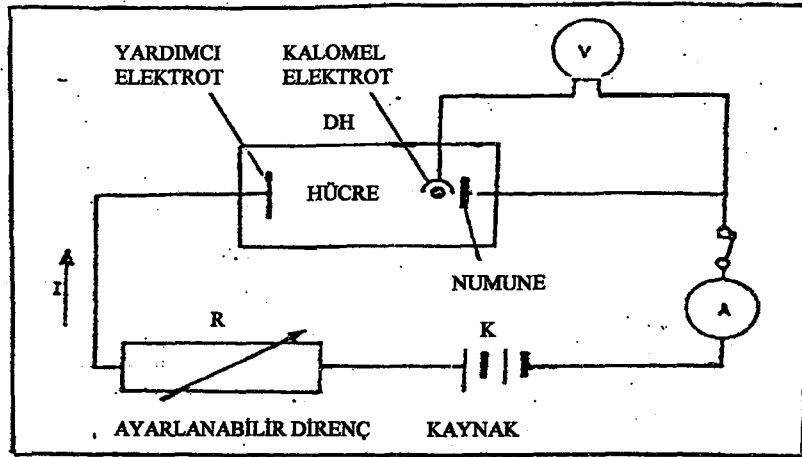
Korozyonun olmadığı bölge : Potansiyelin -0.200 Volt'tan (SCE) daha pozitif olduğu bölgedir.

4.2. Polarizasyon Eğrilerinin Elde Edilmesi

Deneyssel olarak akım potansiyel eğrilerini belirlemek için iki yöntem vardır;

4.2.1. Galvanostatik yöntem

Kontrol edilen değişken akım yoğunluğudur. Sıfırdan itibaren belli basamaklarda artırılır. Bunlara karşılık elektrot potansiyelleri okunur. Potansiyel-akım yoğunluğu eğrileri elde edilir. Şekil 4.3. galvanostatik polarizasyon incelenmesinde kullanılan düzeneği gösterir, (Doruk, 1993). K doğru akım kaynağından çekilen DH deney hücresinden, A ampermetre ve R ayarlanabilir direnç (reosta) üzerinden devresini tamamlar. Deney hücresinden geçen akımın veya örnek birim yüzeyine gelen akım yoğunluğunun basamaklı olarak değiştirilmesi için R direncini değiştirmek yeterlidir. İncelenen metal veya alaşımın potansiyeli referans elektrota karşı V voltmetreyle ölçülür. Galvanostatik ölçüm yöntemi Potansiyel-Akım yoğunluğu ilişkisinin kararlılık gösterdiği alanlarda doğru sonuç verir, (Doruk, 1993).



Şekil 4.3. Galvanostatik yöntemle yapılan ölçümde kullanılan düzenek (Doruk, 1993)

4.2.2. Potansiyostatik yöntem

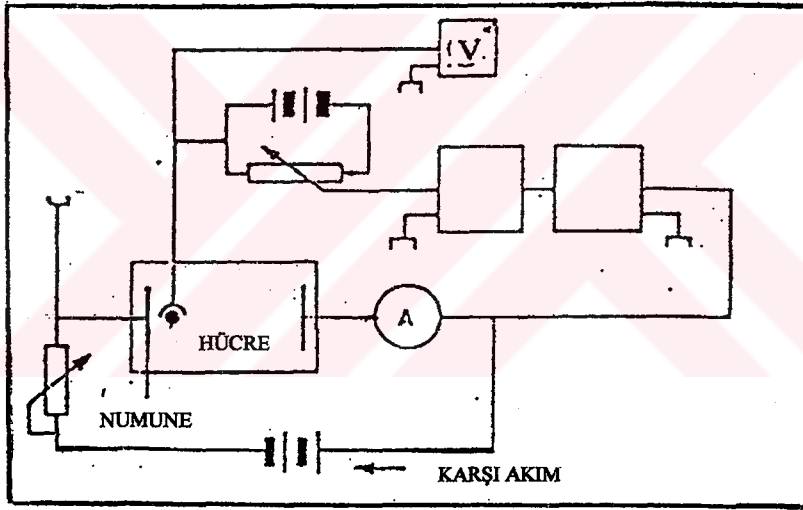
Bu yöntemde potansiyel kontrol altında tutularak akım değişimi belirlenir. Üç şekilde uygulaması vardır:

a. Yarı kararlı potansiyostatik yöntem : Basamak basamak değiştirilen potansiyel değerlerinde belirli bir süre beklenerek elde edilen akım değerleridir.

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

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

Şekil 4.4.'de potansiyostatik yöntem için kullanılan deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 4.4. Potansiyostatik polarizasyon incelemelerinde kullanılan deney düzeneği (Doruk'dan, 1993).

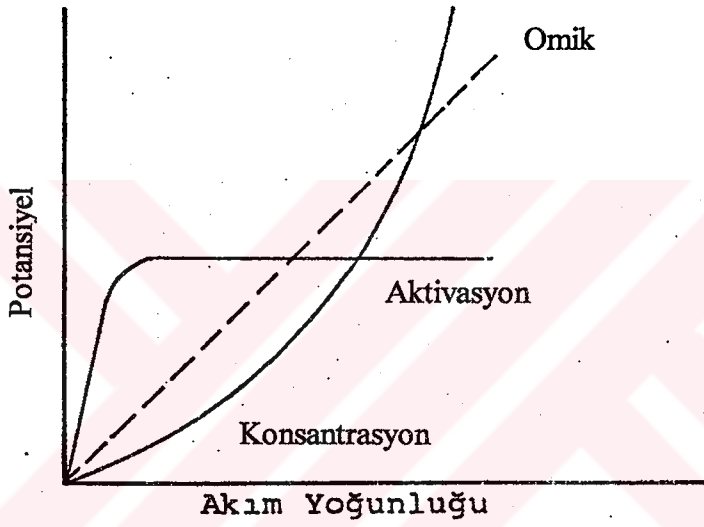
4.3. Polarizasyon ve Polarizasyon Çeşitleri

Korozyon hücresinden net bir akım geçtiğinde, anot ve katot da meydana gelen reaksiyonların etkisiyle elektrot potansiyelinde gözlenen değişme polarizasyon olarak tanımlanır. Polarizasyon sonucu, korozyon hücresinin anot ve katot potansiyel farkı gittikçe azalır, (Atkinson and Vandroffelaar, 1985).

Herhangi bir andaki polarizasyon değeri, akım altında ölçülen elektrot potansiyeli ile denge potansiyeli farkına eşittir. Katodik koruma sistemleri, metalin katodik olarak polarize edilmesi ilkesine dayanır. Elektrot sistemine dışarıdan katodik bir akım uygulandığında polarizasyon söz konusu olur. Bu esnada metal yüzeyinde korozyon olayı varsa tamamen durdurulacaktır.

Polarizasyon çeşitleri, elektrot polarizasyonu nedenlerine göre üç değişik grupta sınıflandırılabilir.

Bunlar; omik polarizasyon, konsantrasyon polarizasyonu ve aktivasyon polarizasyonudur. Şekil 4.5.'de polarizasyon çeşitleri görülmektedir.



Şekil 4.5. Polarizasyon çeşitleri

Konsantrasyon Polarizasyonu : Akım geçişi ile birlikte elektrot yüzeyi yakınında meydana gelen konsantrasyon değişiminden kaynaklanır. Elektrotun yakın çevresinde bazı bileşenlerin konsantrasyonu azalırken, bazılarında artış olabilir. Bunun sonucu olarak zamanla elektrot potansiyelinde değişme meydana gelir. Konsantrasyon polarizasyonu akım yoğunluğuna lineer olarak bağlı değildir, (Şekil 4.5.). Elektrolit içinden elektrot yüzeylerine doğru iyon taşınımı ile ilgilidir, (J.H. Morgan, 1959).

Omik Polarizasyon : Elektrolitin ve elektrot yüzeyindeki film tabakasının omik direncinden dolayı oluşur. Bu polarizasyon doğrudan doğruya akıma bağlıdır. Akım kesildiği anda omik direnç hemen yok olur.

Aktivasyon Polarizasyonu : Elektrot reaksiyonunun kinetik engellenmesinden dolayı meydana gelir, (ACI, 1985). Bu polarizasyon türünde, akım yoğunluğu ile potansiyel arasında bir bağıntı vardır. Bu bağıntıya “Tafel denklemi” adı verilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\eta = a + b.\log i$$

Burada a ve b Tafel sabitleridir. Aynı zamanda elektrotta meydana gelen her reaksiyon için farklıdır. Bu sabitler akım yoğunluğunun potansiyele karşı çizilen grafikten bulunur.

5. DENEY ÇALIŞMALARI

5.1. Deney Malzemeleri ve Deney Yöntemleri

Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde yer alan beş farklı ildeki fabrikalardan alınan PKÇ/B 32,5 R türü çimentonun betonarme demirlerinin korozyonuna etkisi 15 adet beton numunesi üzerinde incelenmiştir. Deneyler iki aşama halinde yapılmıştır. İlk aşamada çeliğin beton içerisindeki zamana karşı korozyon potansiyeli incelenmiştir. İkinci aşamada ise çeliğin beton içerisindeki anodik ve katodik polarizasyon değerleri elde edilerek, katodik polarizasyon eğrileri yardımıyla korozyon akımları tespit edilmiştir.

5.1.1. Elektrotların hazırlanması

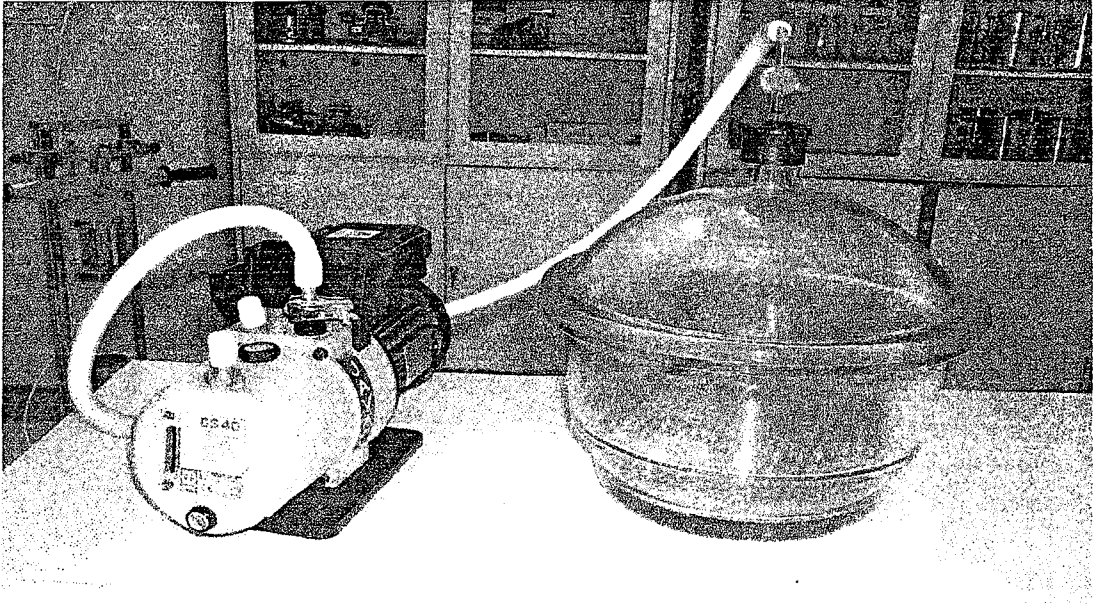
Elektrot olarak, inşaat sektöründe temel yapı malzemesi olan Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları üretimi 1010 yumuşak çelik çubuklar kullanılmıştır. Bu çeliğin kimyasal bileşimi Çizelge 5.1.'de verilmektedir.

Çizelge 5.1. Deneylerde kullanılan çeliğin ağırlıkça analizi

Element	Demir (Fe)	Karbon (C)	Mangan (Mn)	Silisyum (Si)	Fosfat (P)	Kükürt (S)	Krom (Cr)	Nikel (Ni)	Bakır (Cu)
Ağırlıkça, %	99,439	0,09	0,26	0,05	0,005	0,046	0,01	0,07	0,03

8 mm. çapındaki çelik çubuklardan, 13 cm. uzunluğunda, 30 adet kesilmiş ve yüzeyleri tornalanarak mekanik olarak temizlenmiştir. Daha sonra elektrot yüzeyleri demir zımparasıyla perdelanarak pürüzsüz bir yüzey elde edilmiştir. Atmosferik şartlardan etkilenerek yüzeylerinde oksit tabakasının oluşmaması için elektrotlar deney başlayıncaya kadar bir desikatörde saklanmıştır.

Desikatörde koruma altına alınan elektrotların fotoğrafı Şekil 5.1.'de görülmektedir.



Şekil 5.1. Desikatör içerisinde koruma altına alınan elektrotlar

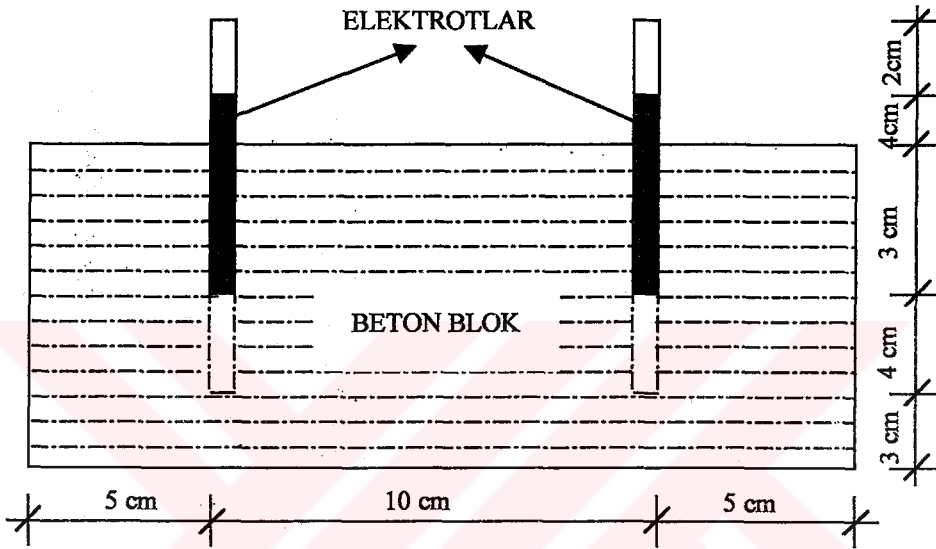
Beton karışımı hazırlanmadan önce, daha önceden hazırlayıp desikatör içerisinde koruma altına aldığımız bu elektrotların betona gömülecek olan uçlarında 10 cm^2 'lik yüzey alanı açık bırakılmıştır. Deney esnasında çeliğin potansiyelinin kolayca ölçülebilmesi için çelik elektrotun diğer ucuna vida dişi açılarak, bu vidalara kablolar bağlanmıştır. Elektrotun geriye kalan bölgeleri ise önce epoksi reçinesi ile sonrada polietilen sargı ile kapatılarak dış etkilere karşı korunmuştur.

5.1.2. Beton örneklerinin tasarımı

Deneyler için $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ boyutlarında 15 adet dökme demirden yapılmış özel kalıplar kullanılmıştır. Betonun kalıplara yapışmaması için, kalıplar beton dökümünden önce yağlanarak hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan beton karışımı kalıplara yerleştirilerek, daha önceden hazırladığımız iki adet elektrot harç içerisine Şekil 5.2.'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Beton içerisine yerleştirilen elektrotların, beton ile temasta olan yüzey alanları 10cm^2 'dir. Beton harç karışımı kalıplara yerleştirilirken aynı oranda sıkıştırılmaya özen gösterilmiştir. Böylece elde edilen

betonların fiziksel yapısının (Porozite ve Permeabilite) aynı kalması sağlanmıştır. Beton numuneleri, laboratuvar ortamında 24 saat kalıplarda bekletildikten sonra kalıplar söktülmüştür. Deney süresince laboratuvar ortamında bulunan beton numunelere iletkenliklerini kaybetmemeleri için ıslak bezlerle kür uygulaması yapılmıştır.

Hazırlanan beton blok ve içerisine yerleştirilmiş olan elektrotların boyutları şematik olarak Şekil 5.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Beton bloğun şematik görünüşü

Çimento dozajı, su/çimento oranı, agrega miktarı, korozif bir ortam oluşturmak amacıyla katılan NaCl miktarı aynı olan ve TS 802'ye uygun olarak karışım hesabı yapılan ancak beş farklı ilde ki fabrikalardan alınan PKÇ/B 32,5 R türü çimentonun kullanıldığı beş grup beton örneği yukarıdaki anlatıma uygun olarak hazırlanmıştır.

Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerinde yer alan beş farklı ildeki fabrikalardan alınan PKÇ/B 32,5 R türü çimentoların betonarme içerisindeki donatı korozyonuna etkisini araştırdığımız bu çalışmada ticari açıdan sakıncalar doğurmaması ve yanlış anlaşılmalara yol açmaması için çimento örneklerinin temin edildiği fabrikaların isimlerini kullanmak yerine bu çimentolarla hazırlanmış beton numunelerine; A numunesi, B numunesi, C numunesi, D numunesi ve E numunesi

şeklinde isimler verilerek deneyler yapılmıştır. Sırasıyla bu numunelerin hazırlandığı, farklı fabrikalardan temin edilen PKÇ/B 32,5 R çimentolarına ait kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları tablo halinde Çizelge 5.2., 5.3., 5.4., 5.5. ve 5.6.'da yer almaktadır.

Çizelge 5.2. A çimentosuna (PKÇ/B 32,5 R) ait kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları

Bileşenler	(Kimyasal Değerler)	Bulunan (%)
Toplam silisyum dioksit	(SiO ₂)	29.12
Alüminyum oksit.	(Al ₂ O ₃)	8.63
Demir oksit.	(Fe ₂ O ₃)	6.00
Kalsiyum oksit.	(CaO)	43.85
Magnezyum oksit.	(MgO)	3.74
Kükürt trioksit.	(SO ₃)	2.14
Klorür.	(Cl)	0.006
Kızdırma kaybı	(K.K.)	2.50
Tayin edilemeyen	(T.E.)	4.02
Serbest Kireç	(S.CaO)	1.57
Toplam katkı miktarı		30.00
Fiziksel Değerler		
Özgül ağırlık.	gr/cm ³	3.03
Özgül Yüzey.	cm ² /gr.Blaine	4589
Lö şatölye=hacim genleşmesi	mm	3
Priz başlama süresi	saat/dakika	2 ⁵⁵
Priz sonu	saat/dakika	3 ²⁵
Su ihtiyacı	%	32.5
Basınç Mukavemetleri		
2 günlük mukavemet	N/mm ²	17.4
7 günlük mukavemet	N/mm ²	26.0
28 günlük mukavemet	N/mm ²	36.9

Çizelge 5.3. B çimentosuna (PKÇ/B 32,5 R) ait kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları

Bileşenler	(Kimyasal Değerler)	Bulunan (%)
Toplam silisyum dioksit	(SiO ₂)	27.74
Alüminyum oksit.	(Al ₂ O ₃)	7.27
Demir oksit.	(Fe ₂ O ₃)	3.96
Kalsiyum oksit.	(CaO)	49.97
Mağnezyum oksit.	(MgO)	2.85
Kükürt trioksit.	(SO ₃)	2.21
Klorür.	(Cl)	0.0102
Kızdırma kaybı	(K.K.)	4.99
Serbest kireç.	(S.CaO)	1.06
Toplam katkı miktarı		28.99
Fiziksel Değerler		
Özgül ağırlık.	gr/cm ³	2.93
Özgül Yüzey.	cm ² /gr.Blaine	4705
Lö şatölye=hacim genleşmesi	mm	1
Priz başlama süresi	saat/dakika	3 ¹⁸
Priz sonu	saat/dakika	4 ¹³
200 mikron elek üzeri	%	-
90 mikron elek üzeri	%	2.5
Basınç Mukavemetleri		
2 günlük mukavemet	N/mm ²	14.4
7 günlük mukavemet	N/mm ²	26.6
28 günlük mukavemet	N/mm ²	43.3

Çizelge 5.4. C çimentosuna (PKÇ/B 32,5 R) ait kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları

Bileşenler	(Kimyasal Değerler)	Bulunan (%)
Toplam silisyum dioksit	(SiO ₂)	23.51
Alüminyum oksit.	(Al ₂ O ₃)	6.15
Demir oksit.	(Fe ₂ O ₃)	4.00
Kalsiyum oksit.	(CaO)	58.51
Mağnezyum oksit.	(MgO)	2.27
Kükürt trioksit.	(SO ₃)	2.37
Klorür.	(Cl)	0.10
Kızdırma kaybı	(K.K.)	2.04
Erimez kalıntı	(E.K.)	12.46
Serbest kireç.	(S.CaO)	0.55
Toplam katkı miktarı		24.49
Fiziksel Değerler		
Özgül ağırlık.	gr/cm ³	3.03
Özgül Yüzey.	cm ² /gr.Blaine	3661
Lö şatölye=hacim genleşmesi	mm	2
Priz başlama süresi	saat/dakika	2 ³⁵
Priz sonu	saat/dakika	3 ⁴⁵
200 mikron elek üzeri	%	0.2
90 mikron elek üzeri	%	3.2
Basınç Mukavemetleri		
1 günlük mukavemet	N/mm ²	6.6
2 günlük mukavemet	N/mm ²	10.3
7 günlük mukavemet	N/mm ²	20.2
28 günlük mukavemet	N/mm ²	36.0

Çizelge 5.5. D çimentösuna (PKÇ/B 32,5 R) ait kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları

Bileşenler	(Kimyasal Değerler)	Bulunan (%)
Toplam silisyum dioksit	(SiO ₂)	27.08
Alüminyum oksit.	(Al ₂ O ₃)	6.24
Demir oksit.	(Fe ₂ O ₃)	5.01
Kalsiyum oksit.	(CaO)	52.54
Mağnezyum oksit.	(MgO)	4.38
Kükürt trioksit.	(SO ₃)	2.81
Klorür.	(Cl)	-
Kızdırma kaybı	(K.K.)	1.17
Erimez kalıntı	(E.K.)	13.03
Tayin Edilemeyen	(T.E.)	0.71
Serbest kireç.	(S.CaO)	1.28
Toplam katkı miktarı		-
Fiziksel Değerler		
Özgül ağırlık.	gr/cm ³	3.03
Özgül Yüzey.	cm ² /gr.Blaine	3465
Lö şatölye=hacim genişmesi	mm	1
Priz başlama süresi	saat/dakika	3 ⁴⁵
Priz sonu	saat/dakika	4 ²⁷
200 mikron elek üzeri	%	-
90 mikron elek üzeri	%	-
Basınç Mukavemetleri		
2 günlük mukavemet	N/mm ²	12.9
7 günlük mukavemet	N/mm ²	24.5
28 günlük mukavemet	N/mm ²	35.4

Çizelge 5.6. E çimentosuna (PKÇ/B 32,5 R) ait kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları

Bileşenler	(Kimyasal Değerler)	Bulunan (%)
Toplam silisyum dioksit	(SiO ₂)	23.45
Alüminyum oksit.	(Al ₂ O ₃)	8.55
Demir oksit.	(Fe ₂ O ₃)	7.50
Kalsiyum oksit.	(CaO)	50.82
Mağnezyum oksit.	(MgO)	3.61
Kükürt trioksit.	(SO ₃)	2.92
Klorür.	(Cl)	-
Kızdırma kaybı	(K.K.)	2.43
Erimez kalıntı	(E.K.)	14.74
Tayin edilemeyen	(T.E.)	0.25
Serbest kireç.	(S.CaO)	-
Fiziksel Değerler		
Özgül ağırlık.	gr/cm ³	3.08
Özgül Yüzey.	cm ² /gr.Blaine	3345
Lö şatölye=hacim genleşmesi	mm	0
Priz başlama süresi	saat/dakika	2 ³⁰
Priz sonu	saat/dakika	5 ⁰⁰
200 mikron elek üzeri	%	0.2
90 mikron elek üzeri	%	4.65
Basınç Mukavemetleri		
1 günlük mukavemet	N/mm ²	5.64
2 günlük mukavemet	N/mm ²	10.8
7 günlük mukavemet	N/mm ²	23.8
28 günlük mukavemet	N/mm ²	34.8

Beton karışım harcındaki tek farklılığın beş ayrı fabrikadan alınan PKÇ/B 32,5R türü çimentonun olduğu beş grup numunede, diğer tüm karışım malzemeleri ve oranları eşit olarak kullanılmıştır. TS 802'ye uygun olarak hazırladığımız bu beton karışım oranları Çizelge 5.7.'de verilmektedir.

Çizelge 5.7. TS 802'ye uygun olarak hazırlanan beton karışım miktarları

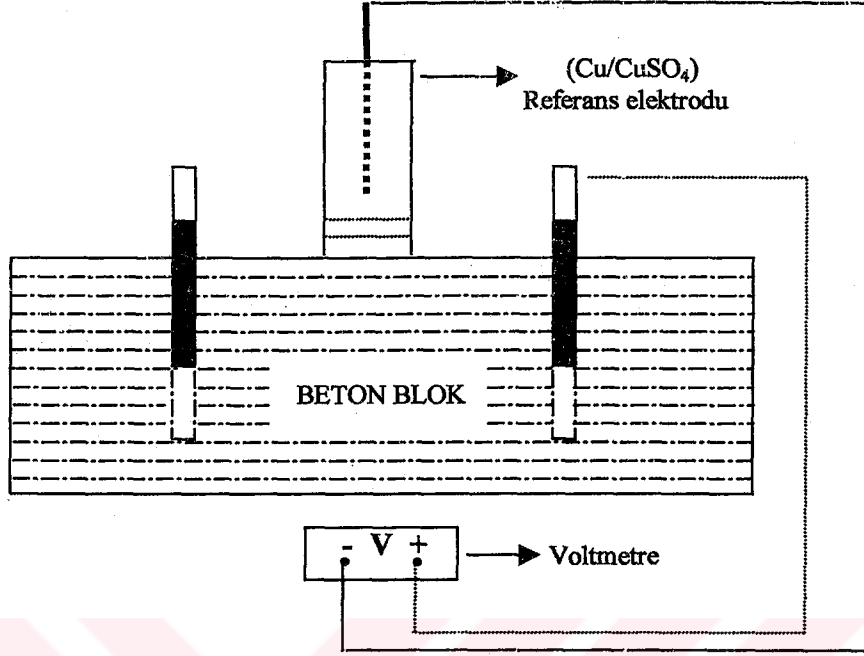
Kalıp Ebadi : 10 cmx10 cmx20 cm (2 dm ³)		
PKÇ/B 32,5 R Çimento miktarı	:	920 gr
Kum (0-4 mm) miktarı	:	1.8 kg
Çakıl (4-8 mm) miktarı	:	1.7 kg
Su miktarı	:	533.5 gr
Sodyum Klorür (NaCl) miktarı	:	16.5 gr
Su/Çimento oranı	:	0.60

Not: NaCl miktarı, karışım suyu miktarının %3'ü olarak alınmıştır.

5.2. Deney Yöntemi

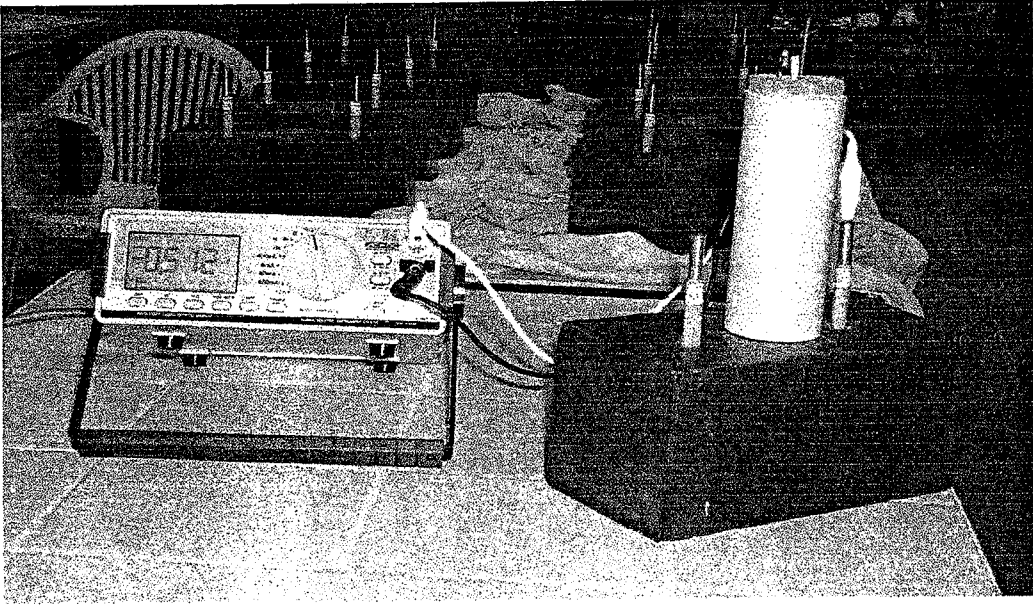
5.2.1. Korozyon potansiyeli ölçümleri

Korozyon potansiyelleri ASTM-C-876-91'e uygun olarak 90 gün boyunca her gün ölçülmüştür. Korozyon potansiyeli ölçümlerinde referans elektrot olarak doygun Bakır/Bakır Sülfat (Cu/CuSO_4) referans elektrodu kullanılmıştır. Korozyon potansiyellerinin zamana göre değişimleri çeliğin aktif veya pasif halde bulunduğunu belirlemek üzere grafiğe geçirilmiştir. Cu/CuSO_4 referans elektrodu yardımıyla, açık devre yarı hücre potansiyellerinin tespit edilmesi Şekil 5.3.'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Cu/CuSO₄ referans elektrodu ile beton içerisindeki elektrodun korozyon potansiyeli ölçümü.

Cu/CuSO₄ referans elektrodu; yaklaşık 4 cm çapında, 13 cm yüksekliğinde plastik boru içerisine konulmuş bir bakır çubuk ve doymuş bakır sülfat çözeltisinden oluşur. Çözeltinin içerisine doygunluğunu yitirmemesi için CuSO₄ kristalleri de ayrıca eklenmiştir. Plastik borunun altı gözenekli tahtadan (çam) yapılmış bir tıkaçla kapatılmıştır. Çözeltinin kirlenmemesi ve herhangi bir devrilme anında boşa akmaması için plastik borunun üstünde aynı tahtadan yapılmış bir tıkaçla kapatılmıştır. Omik direnç etkisini gidermek amacıyla, referans elektrodun en alt kısmı ıslak bir sünger ile kaplanmıştır. Şekil 5.4.'de betonarme demirlerinin korozyon potansiyeli ölçümleri için kullanılan sistemin fotoğrafı gösterilmiştir.



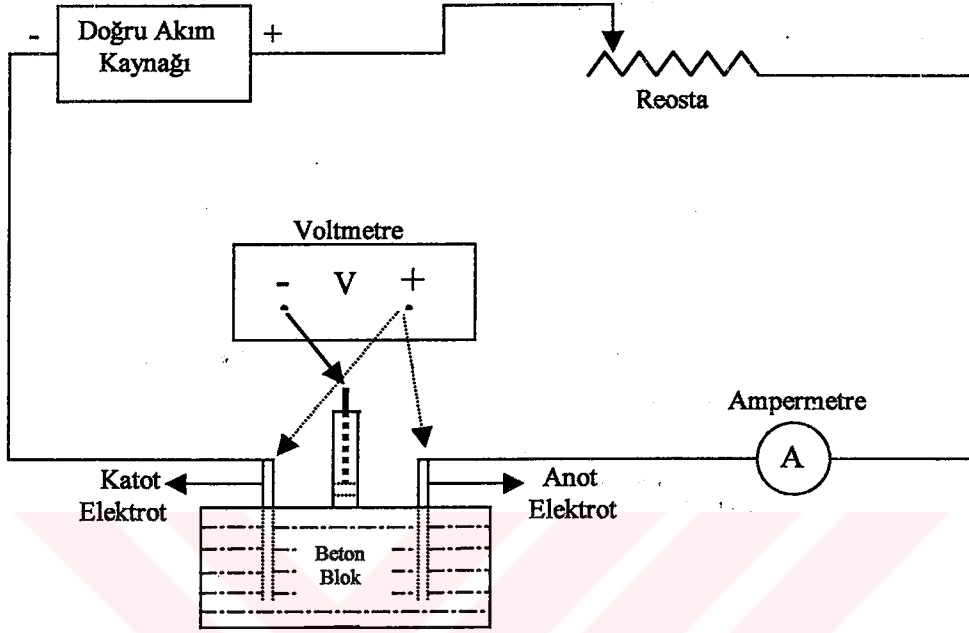
Şekil 5.4. Betonarme demirlerinin korozyon potansiyeli ölçümleri için kullanılan sistem

Bu yöntemle göre zamana karşı yapılan potansiyel ölçümlerinde beton örnekleri içindeki inşaat demirlerinin korozyonu kalitatif olarak incelenmiştir. ASTM-C-876-91 standardına göre elde edilen veriler EK-1’de grafikler ise Bölüm 6’da verilerek yorumlanmıştır.

5.2.2. Çeliğin beton içindeki anodik ve katodik polarizasyon ölçümleri

Çeliğin beton içerisindeki denge potansiyeli deneyi 90 gün süresince yapıldıktan sonra aynı beton bloklar anodik ve katodik polarizasyon deneylerinde de kullanılmıştır.

Polarizasyon deneyi galvanostatik yöntemle yapılmıştır. Galvanostatik yöntemin uygulanması için kullanılan deney düzeneği Şekil 5.5.’de şematik olarak gösterilmektedir. Bu sistem doğru akım uygulayabilen bir güç kaynağı, reosta, ampermetre ve voltmetreden meydana gelmiştir. Şekil 5.6.’da ise sistemin fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 5.5. Galvanostatik yöntemle yapılan polarizasyon ölçümünün şematik görünüşü

Deney düzeneğinde yer alan iki adet çelik elektrot dan biri anot diğeri de katot olarak kullanılmıştır.

Çalışma elektrotu ve yardımcı elektrotlardan herhangi birisine anodik, diğerine de katodik yönde akım uygulanmadan önce devreden akım geçmediği andaki anot ve katodun potansiyelleri ölçülür. Sonra belli adımlarla akım değiştirilerek potansiyelin kararlılığa ulaşması için yaklaşık 10 dk. beklenir. Daha sonra anot ve katodun potansiyelleri okunur. Devreden belli bir akım geçtiği anda okunan anodik potansiyel ile devreden hiç akım geçmediği durumda okunan anot potansiyeli arasındaki fark anodik aşırı voltaj, aynı şekilde devreden belirli bir akım geçtiği anda okunan katodik potansiyel ile devreden hiç akım geçmediği durumda okunan katot potansiyeli arasındaki fark katodik aşırı voltaj olarak kaydedilir.

Ölçümlerde anot ve katot elektrotlara eşit akım yoğunluğunda dış akım uygulanarak her iki elektrotun anodik ve katodik polarizasyon değerleri aynı anda okunmuştur. Dış akım uygulamasına $0.01 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'den başlanarak $25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'ye kadar artırılmış ve tafel bölgesinin oluşması sağlanmıştır. Polarizasyon ölçümleriyle elde edilen deneysel veriler EK-2'de, grafikler ise Bölüm 6'da verilerek yorumlanmıştır.



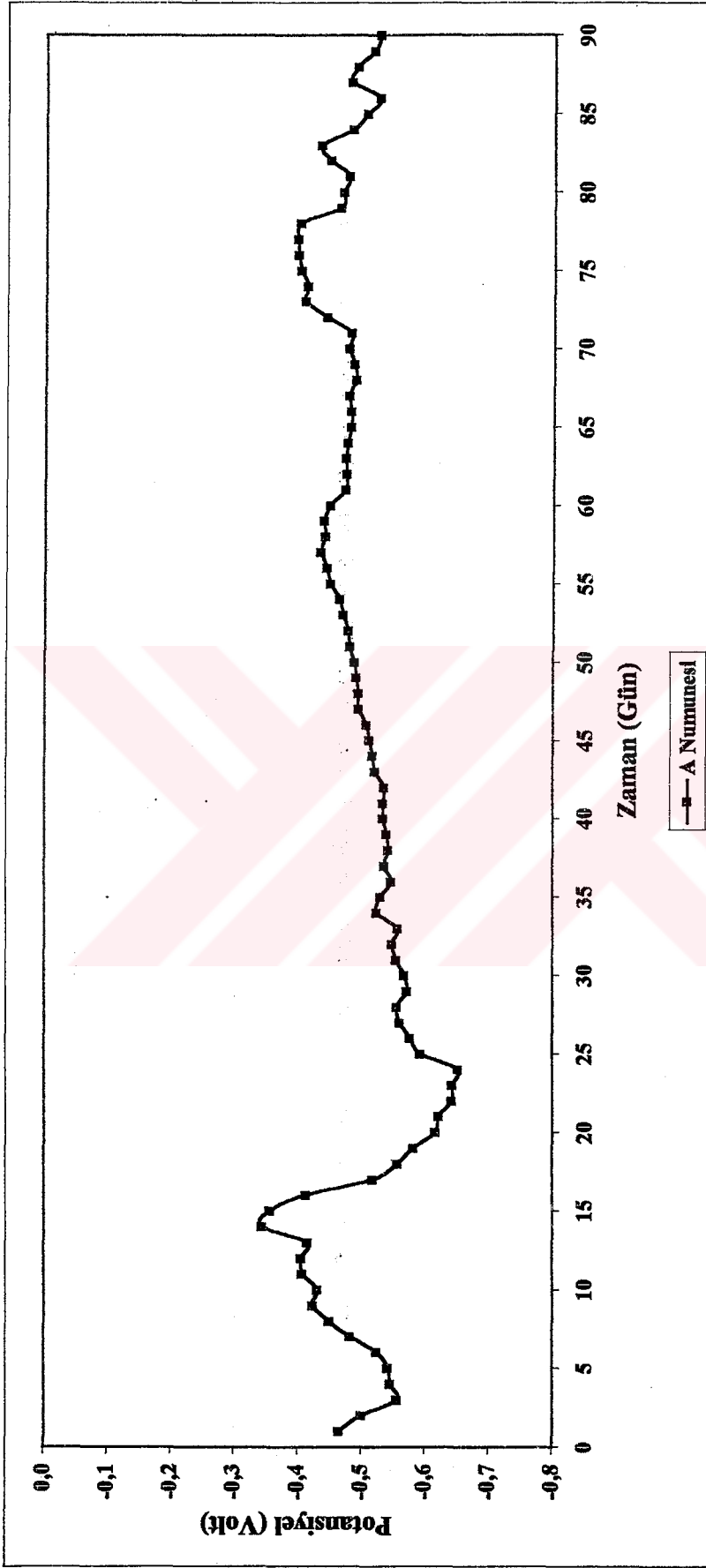
Şekil 5.6. Galvanostatik yöntemle yapılan polarizasyon ölçümünün fotoğrafı

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

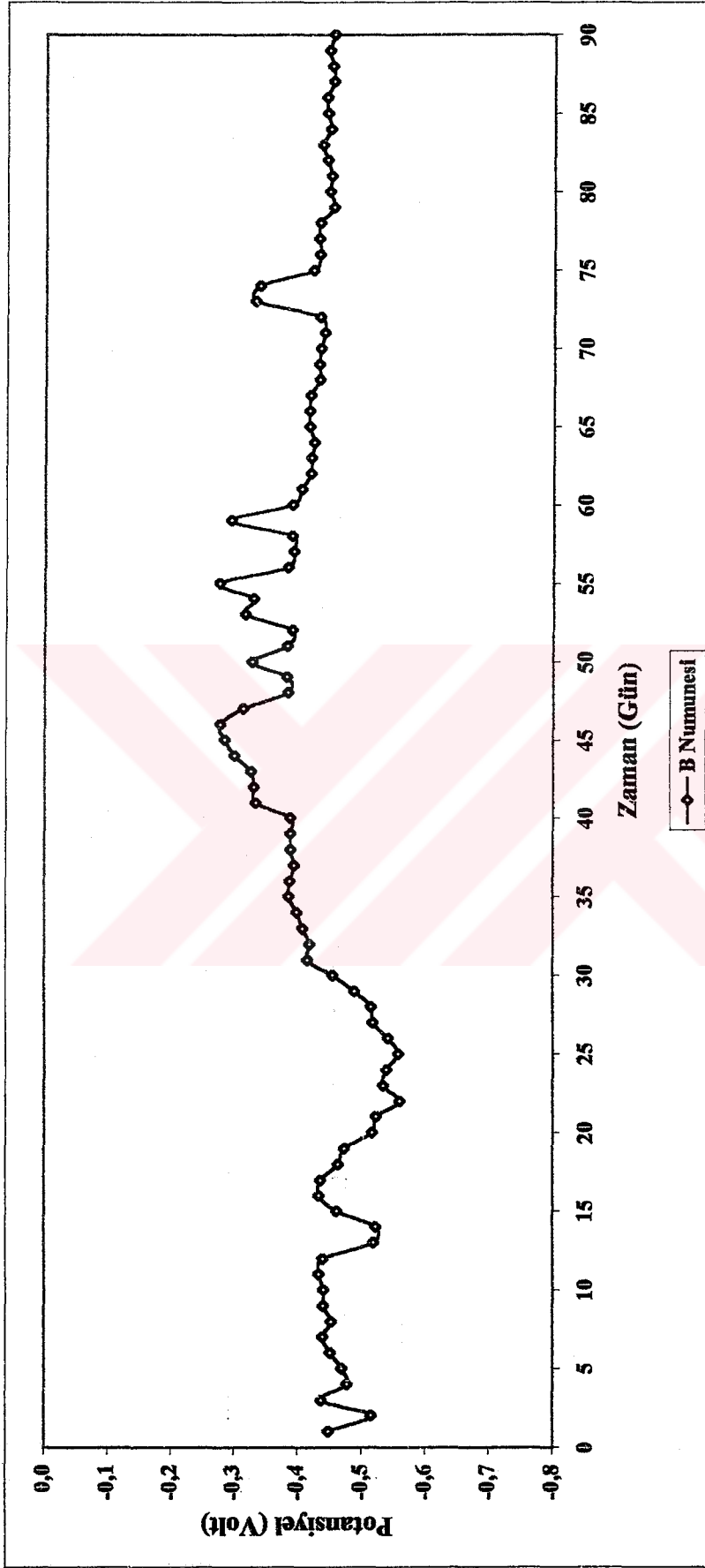
6.1. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

6.1.1. ASTM-C-876-91'e göre yapılan korozyon potansiyelleri ölçümünün değerlendirilmesi

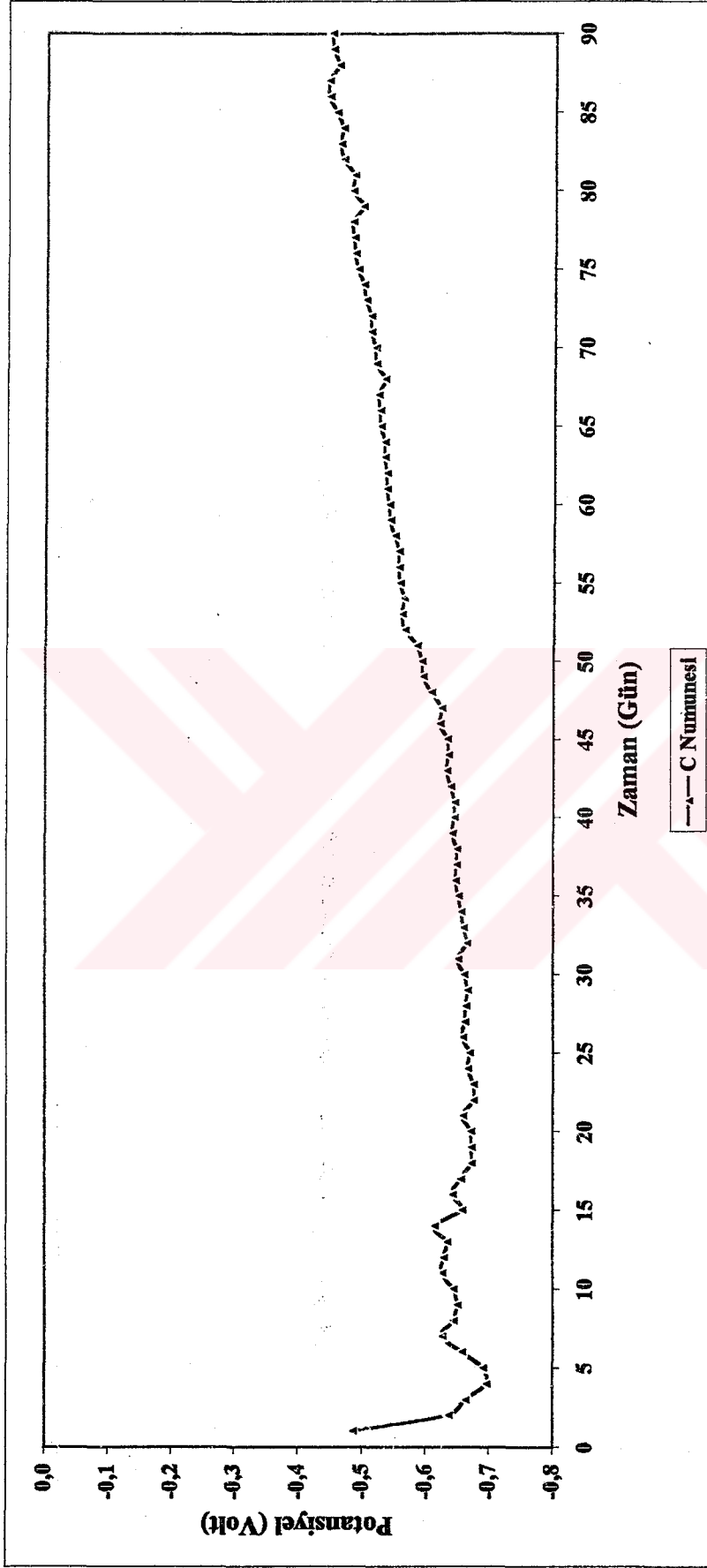
Beş grup halinde hazırlanan beton numunelerin her birinde elektrot potansiyelleri ölçümü için, Cu/CuSO_4 (Bakır/Bakır Sülfat) referans elektrotu kullanılarak ASTM-C-876-91'e göre elektrotların korozyon potansiyelleri 90 gün süresince her gün ölçülmüştür. Elde edilen deneysel verilerin ortalaması tablo halinde EK-1.'de verilmiştir. Ayrıca her numune grubu için bu potansiyel değerlerinin ortalaması zamana göre grafiğe geçirilmiş ve sonuçlar Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da grafiksel olarak verilerek yorumlanmıştır.



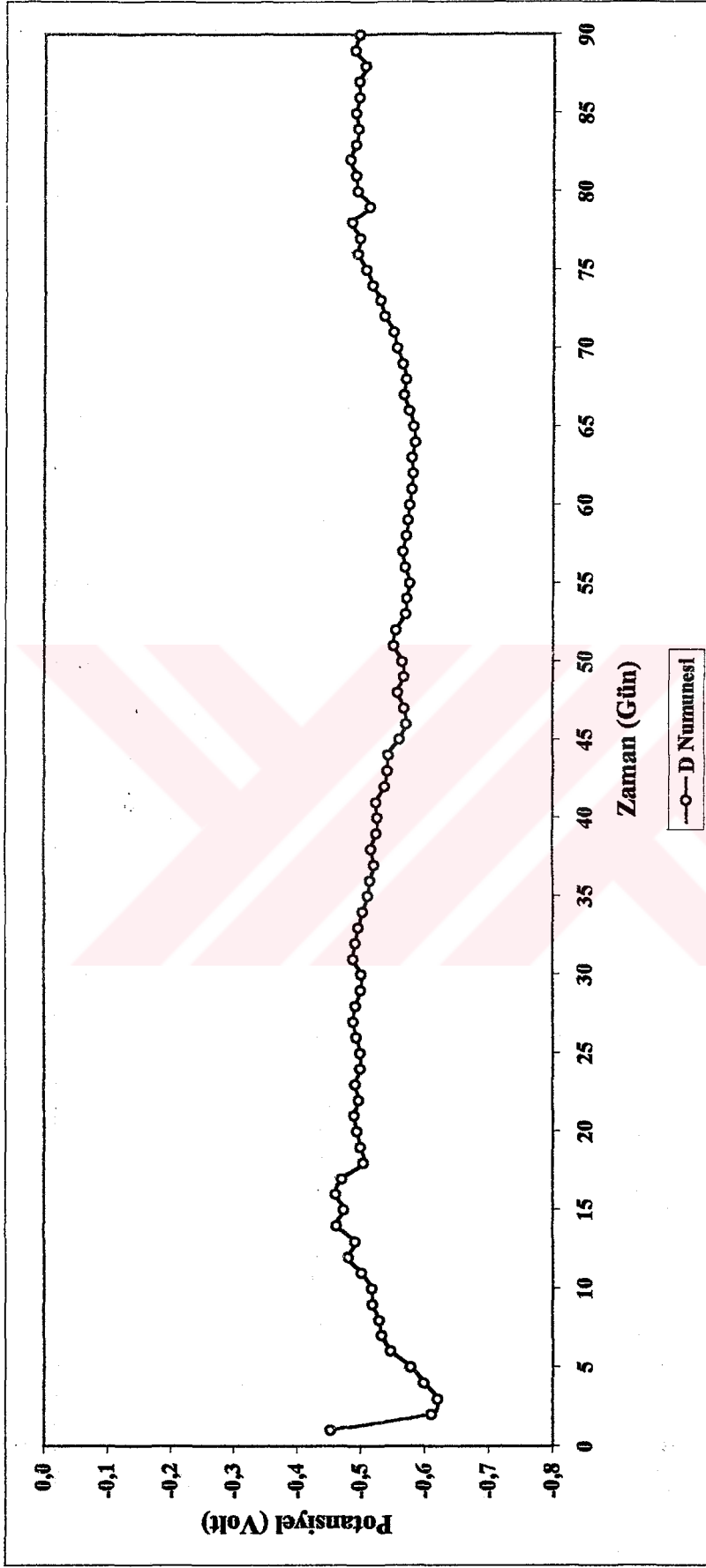
Şekil 6.1. A numunesi içerisinde bulunan çeliğin korozyon potansiyeli değerinin zamana göre değişimi



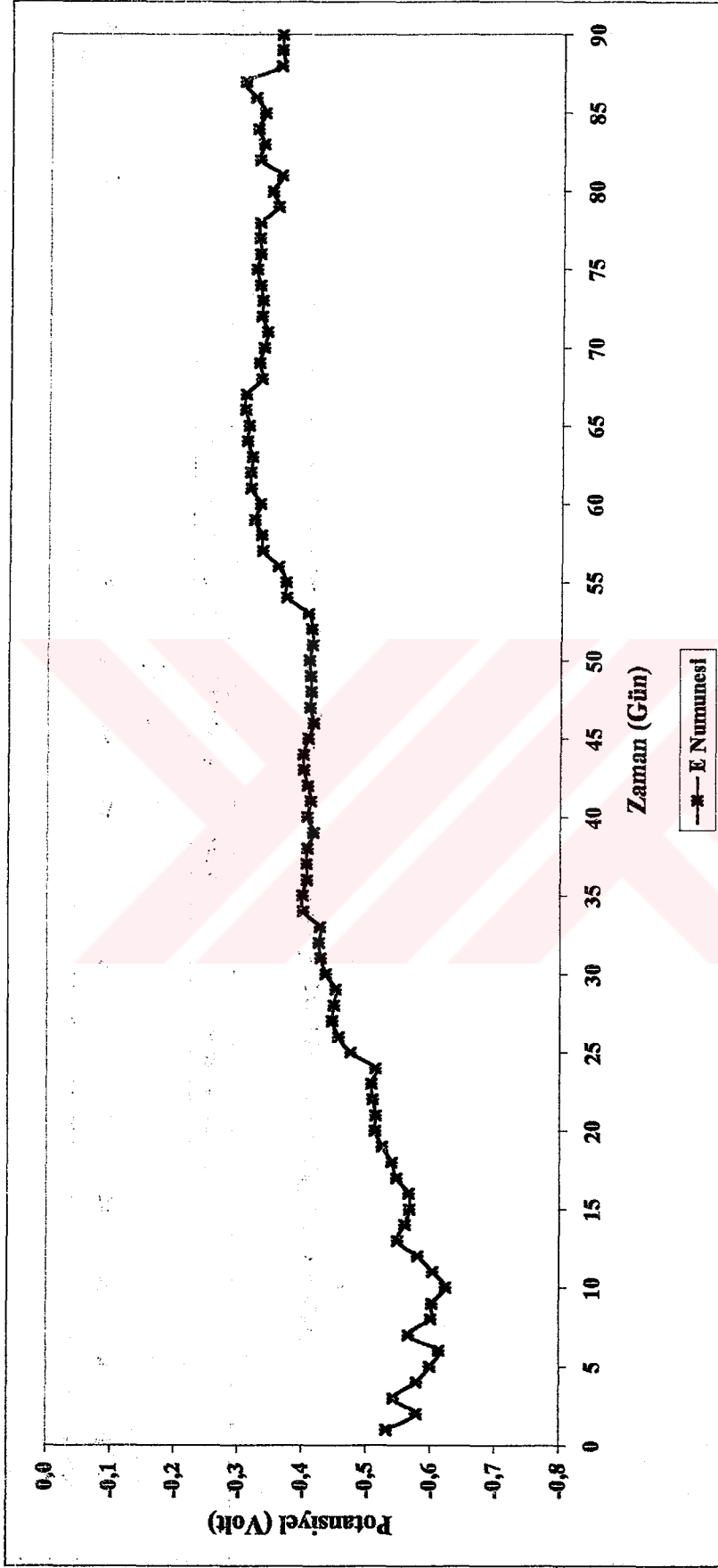
Şekil 6.2. B numunesi içerisinde bulunan çeliğin korozyon potansiyeli değerinin zamana göre değişimi



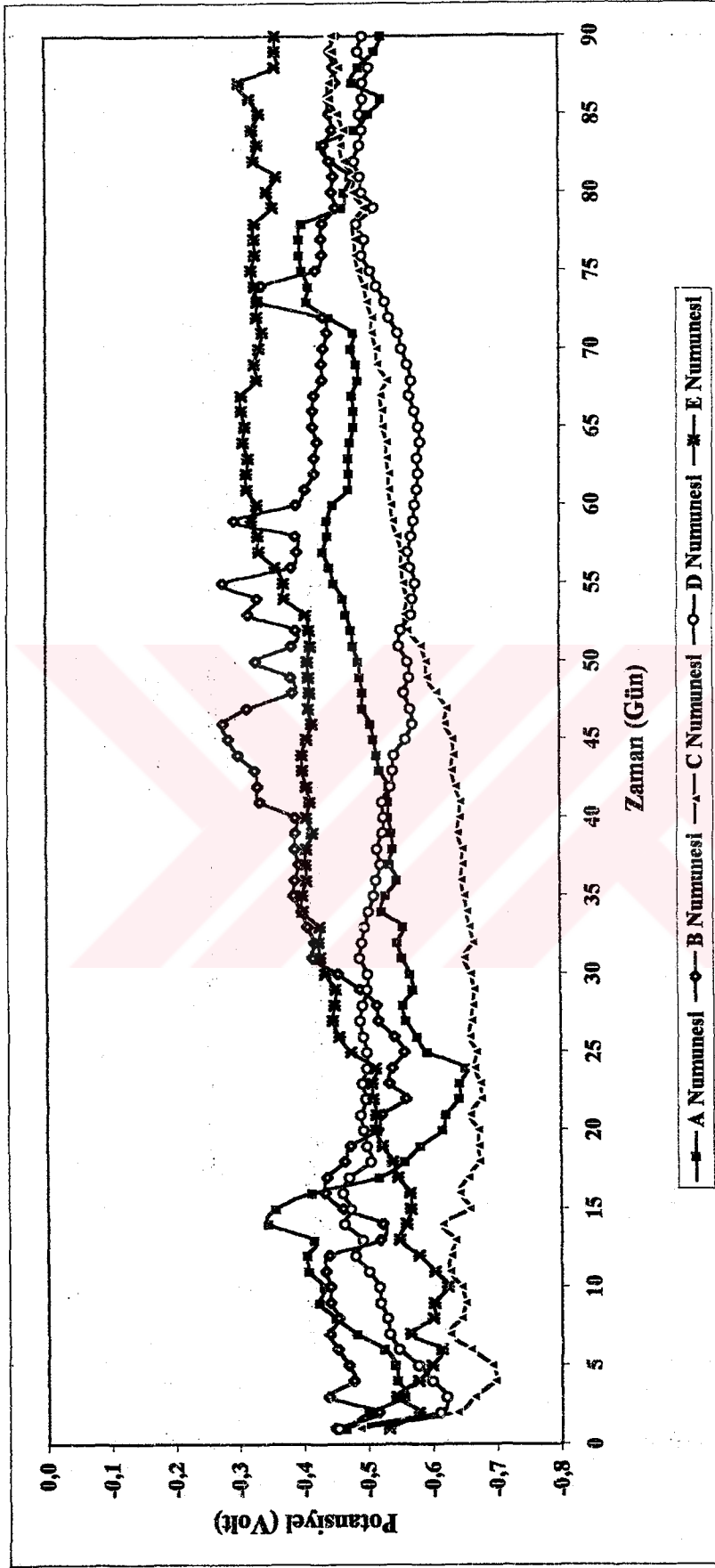
Şekil 6.3. C numunesi içerisinde bulunan çeliğin korozyon potansiyeli değerinin zamana göre değişimi



Şekil 6.4. D numunesi içerisinde bulunan çeliğin korozyon potansiyeli değerinin zamana göre değişimi



Şekil 6.5. E numunesi içerisinde bulunan çeliğin korozyon potansiyeli değerinin zamana göre değişimi



Şekil 6.6. Çeliğin korozyon potansiyeli değerinin 5 ayrı beton numune içerisinde zamana göre değişimi

Bu grafikler ayrı ayrı incelenerek şu şekilde yorumlanmıştır:

Korozif bir ortam oluşturabilmek amacıyla beton karışım suyu ile birlikte beton bünyesine karıştırılan %3 oranındaki NaCl'nin etkisi neticesinde beton numuneleri içerisindeki çeliğin zamana karşı potansiyel ölçümleri sonucunda elektrot potansiyellerinin korozyon açısından aktif bölgede oldukları saptanmıştır. Şayet beton numuneleri dökümden sonra atmosfer ortamında bırakılacak olursa bünyesinde NaCl bulundurmuş dahi olsalar, zamanla bu numunelerin içerisindeki çeliğin potansiyeli pozitif yöne doğru kayacaktır. Bunun nedeni ise betonun atmosfer ortamında bekletildiği süre zarfında kuruyarak elektrik direncinin gittikçe artması ve bunun sonucu olarak elektrot ile referans elektrot arasındaki omik direncin artarak potansiyel değerlerinin pozitif yöne doğru sapmasıdır.

Yapmış olduğumuz bu çalışma süresince, daha hassas sonuçlar elde edebilmek amacı ile betonun elektriksel iletkenliğini yitirmemesi gerektiğinden tüm beton numunelerine aynı ortam ve şartlar altında ıslak bezler ile kür uygulaması yapılmıştır. Böylece tüm beton numunelerinin deneyler süresince aynı oranda nemli kalması sağlanmıştır.

Potansiyel değerlerinin büyüklüğü korozyon akımının büyüklüğünden ileri geldiği gibi başka nedenlerden de kaynaklanabilir. Örneğin, klorür konsantrasyonunun yüksekliği, çelik yüzeyindeki Fe^{++} iyonlarının azalmasına neden olur. Bu durumda potansiyel daha negatif bir değer alır.

Deneylerde kullanmış olduğumuz beton numunelerinin karışım suyunun %3'ü oranında NaCl ihtiva etmeleri ve deney süresince kür uygulamasına tabii tutularak nemli kalmaları nedeniyle, tüm beton numuneleri içerisindeki çeliğin pozitif yöndeki potansiyel artışı çok düşük kalarak korozyon açısından aktif bölgede kalmıştır.

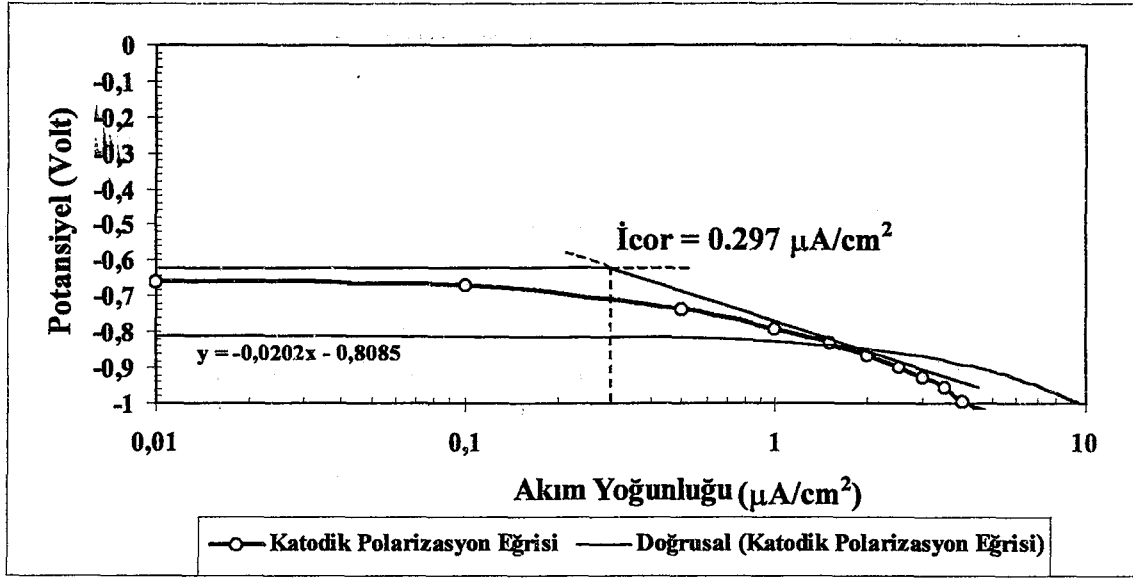
Statik potansiyel ölçümleri ile elde edilen potansiyel değerleri, betonarme demirlerinin korozyona uğrayıp uğramadıkları hakkında bir fikir verse de bu değerler ile korozyon hızları hakkında bir fikir edinilemez. Ancak yapmış olduğumuz deneyler neticesinde elde edilen değerlerden beton numuneler içerisindeki çelik elektrotların potansiyelleri ile galvanostatik yöntem ile yapılan deneyler neticesinde elde edilen korozyon akımları arasında bir bağıntının olabileceği dikkat çekmiştir.

Açık devre yarı hücre potansiyeli ölçümleri neticesinde elde edilen korozyon potansiyeli değerlerinden, korozyon potansiyeli değeri negatif olarak en büyük olan (en aktif olan) elektrotun bulunduğu numunedeki korozyon hızının en fazla olduğu galvanostatik yöntem ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen değerlerden görülmektedir. Aynı şekilde korozyon potansiyeli diğer numunelere göre daha pozitif olan elektrotun korozyon hızının da diğer numunelerdeki elektrotların korozyon hızları arasında en düşük olduğu tespit edilmiştir.

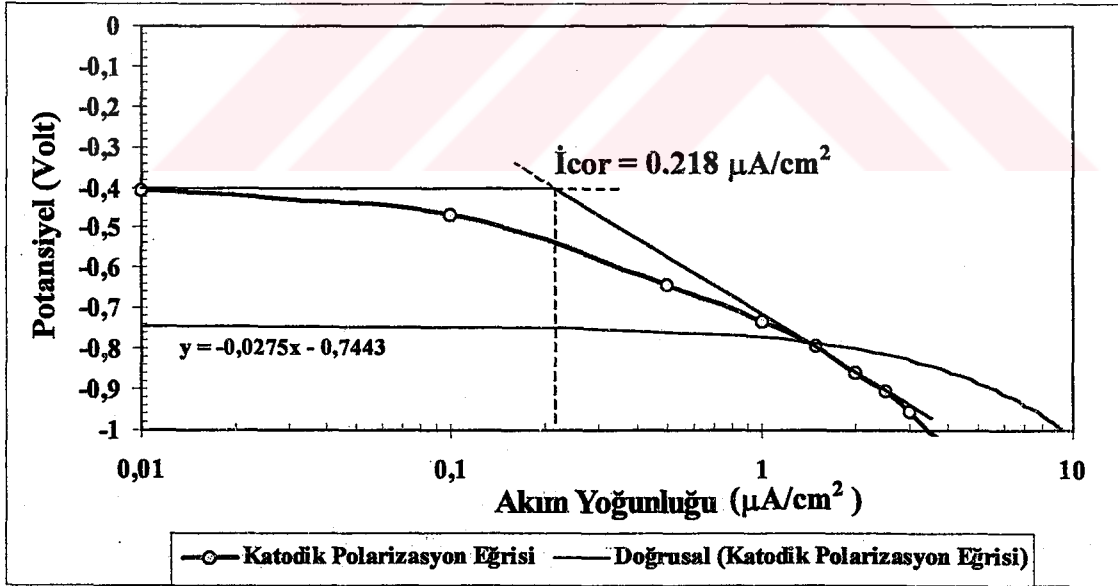
Buradan, statik potansiyel ölçümleri sonucunda potansiyeli negatif yönde en büyük olan (en aktif olan) elektrotun muhtemelen korozyon hızının da diğer elektrotlara göre daha yüksek olabileceği kanısına varılabilir.

6.1.2. Galvanostatik yöntemle yapılan polarizasyon ölçümlerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi

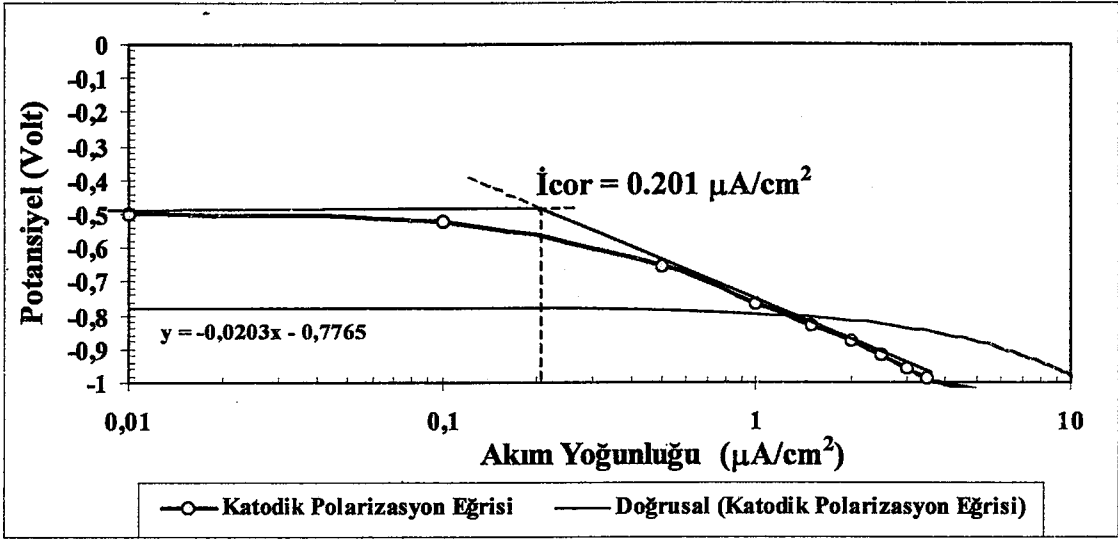
Galvanostatik yöntemle yapılan polarizasyon ölçümlerinden elde edilen veriler tablolar halinde EK-2.'de verilmiştir. Deneyler esnasında yapılan okumalar neticesinde anodik ve katodik polarizasyon değerleri elde edilmiş ancak EK-2.'de yer alan tablolardan da görüleceği üzere bazı numunelerin anodik polarizasyon değerlerinde sapmalar meydana gelmiştir. Bu nedenle elde edilen katodik polarizasyon değerlerine göre oluşturulan katodik polarizasyon eğrisinden yeterli uzunlukta bir tafel bölgesi sağlanmış ve korozyon potansiyeline ekstarpolasyon yapılarak beş ayrı numunede yer alan elektrotların korozyon akımları Şekil 6.7, Şekil 6.8, Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'de grafiksel olarak gösterilmiş ve yorumlanmıştır.



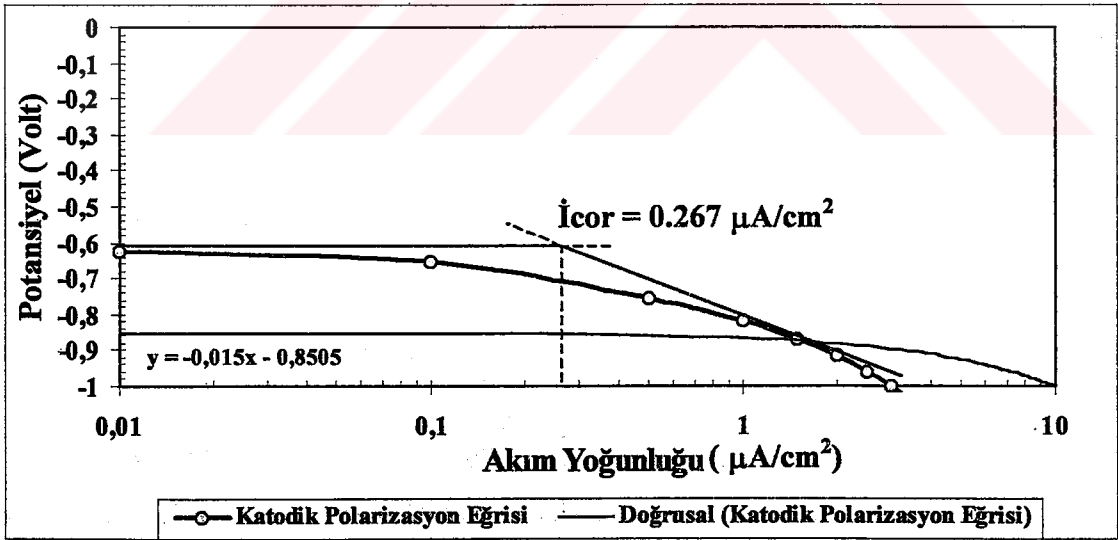
Şekil 6.7. A numunesinin katodik polarizasyon eğrisine göre korozyon akımının tespiti



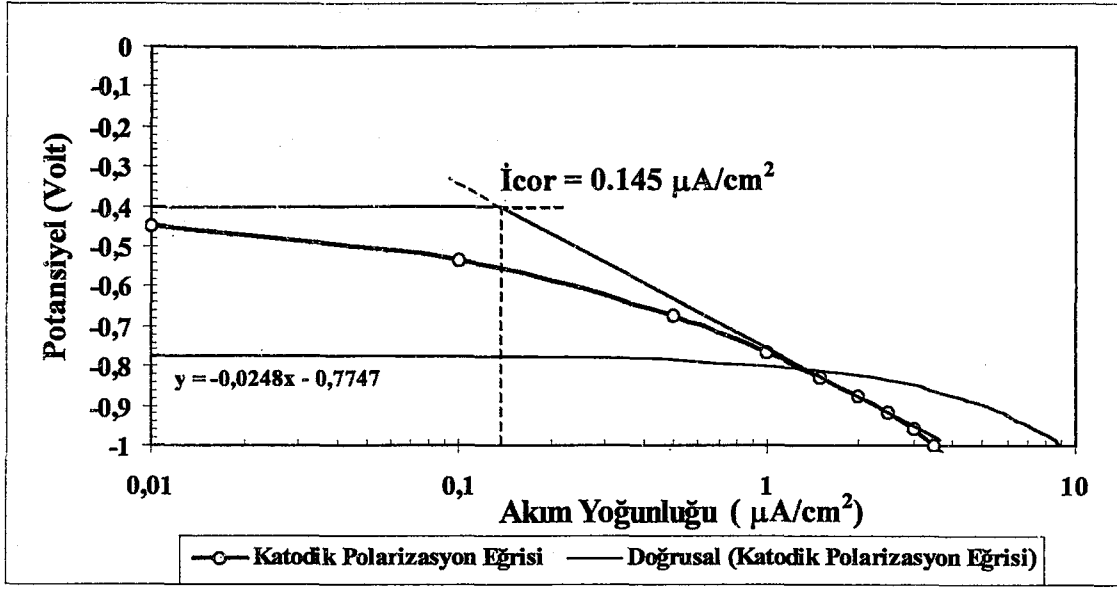
Şekil 6.8. B numunesinin katodik polarizasyon eğrisine göre korozyon akımının tespiti



Şekil 6.9. C numunesinin katodik polarizasyon eğrisine göre korozyon akımının tespiti



Şekil 6.10. D numunesinin katodik polarizasyon eğrisine göre korozyon akımının tespiti



Şekil 6.11. E numunesinin katodik polarizasyon eğrisine göre korozyon akımının tespiti

Galvanostatik yöntem neticesinde elde edilen katodik polarizasyon eğrisi grafikleri ayrı ayrı incelenerek şu şekilde yorumlanmıştır:

1. Çimento dolayısı ile beton içerisindeki en önemli olay hidrasyon olayıdır. Çimento bünyesindeki ana bileşenler ile su etkileşerek bir dizi ekzotermik reaksiyon vererek hidrat ürünler oluştururlar. Bu olaya çimentonun prizlenmesi denir. Çimentonun prize başlama süresi 1 saatten az 10 saatten fazla olmamalıdır, ortalama 2-3 saat kadar sürer. Hidrasyon ve onu izleyen katılaşma olayı sonunda sertleşmekte olan çimento hamurunun iç yapısında hidrasyon sonunda meydana gelen hidrat elemanlar bulunmaktadır. Bu hidrat elemanların gelişimini tamamlayarak düzgün bir kristal yapıya kavuşabilmeleri hidrasyon süresine bağlıdır. Hidrasyon sonucunda meydana gelen hidrat elemanları aralarında muhtelif boşluklar bırakarak bir araya gelmektedir. Şayet hidrasyon süresi yeterli düzeyde ise meydana gelen hidrat elemanları gelişimlerini büyük ölçüde tamamlayarak daha düzgün bir kristal yapıya sahip olacak ve bir araya gelen bu elemanlar arasındaki boşluklar daha az olacaktır. Böylece elde edilen

çimento hamuru dolayısı ile de beton daha düşük poroziteye haliyle de daha düşük bir geçirimliliğe sahip olacaktır.

Deney numunelerinde kullanmış olduğumuz beş ayrı ildeki fabrikalardan alınan PKÇ/B 32.5 R türündeki çimentolara ait analiz raporları incelendiğinde, galvanostatik yöntem ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen korozyon akımlarından, korozyon akımı en yüksek olan elektrotun bulunduğu beton numunedeki çimento hidratasyon süresinin en kısa olduğu, korozyon akımı en düşük olan elektrotun bulunduğu beton numunedeki çimento hidratasyon süresinin ise en uzun olduğu görülmektedir.

Yukarıda bahsetmiş olduğumuz bilgilerin ışığında bulmuş olduğumuz değerlere göre şu sonuca ulaşabiliriz. Yapılan deneyler neticesinde korozyon hızı en yüksek bulunan elektrotun bulunduğu A numunesindeki çimento hidratasyonu çok kısa sürerek gelişimini tam olarak tamamlayamamış hidrat elemanlarının oluşması neticesinde porozitesi dolayısı ile de geçirgenliği yüksek bir beton elde edilmiş olunabileceği düşünülmüş, buna bağlı olarak da A numunesinde korozyon hızının yüksek çıkmasına neden olan etkenlerden birinin bu olay olduğu kanısına varılmıştır.

2. K_2O (Potasyum oksit), Na_2O (Sodyum oksit) ve TiO_2 (Titanyum oksit) çimento analizlerinde tayin edilemeyen bileşikler (T.E.) oluşturan bileşenlerdir. Tayin edilemeyen bileşiklerin çimento içerisindeki oranının en fazla %1 olması istenir.

Yapmış olduğumuz çalışmada galvanostatik yöntem uygulanarak elde edilmiş olan korozyon akımlarına göre, A numunesi içerisindeki elektrotun korozyon hızının en yüksek çıkmasına neden olan etkenlerden birinin de, bu numuneyi oluşturan çimento bünyesindeki tayin edilemeyen bileşiklerin maksimum sınır olan %1'den ve diğer numuneleri oluşturan çimentolardaki tayin edilemeyen bileşiklerden çok fazla olmasından ileri gelebileceği düşünülmektedir.

3. Çimento bileşimine giren kirecin (CaO) tamamı daima temel bileşenlere dönüşmektedir. Böylece açıkta kalan kirece serbest kireç denir. Çimento bileşiminde fazla miktarda serbest kireç ($sCaO$) bulunması hacim değişikliğine (genleşmeye) yol açar. Bu hacim artışı doğal olarak betona zarar vermektedir. Diğer taraftan serbest kireci fazla olan çimentolar agresif (kemirici) sulardan daha fazla zarar görmektedir.

Serbest kirecin çimento içerisinde %1'den fazla olmaması istenir. Serbest kireç oranı fazla olan çimento, betonda çatlamalara yol açar ve zararlı etkilerin betonu tahrip

etmesine neden olur. Aynı zamanda beton içinde oluşan boşluklardan dolayı betonun mukavemeti düşer, porozitesi dolayısıyla da geçirimliliği artar.

Yapmış olduğumuz çalışma neticesinde elde edilen korozyon akımlarına göre A numunesi içerisindeki çelik elektrotun korozyon hızının en yüksek çıkmasına neden olan etkenlerden birinin de, bu elektrotun bulunduğu numunedeki çimento bünyesinde yer alan serbest kireç miktarının istenilen düzeyden ve diğer numunelerdeki çimentolarda yer alan serbest kireç miktarlarından daha fazla olmasıdır şeklinde yorumlanabilir.

4. Çimento hammaddesinin oksit kompozisyonundaki küçük değişiklikler, çimentoda oluşacak olan ana bileşenlerin oranlarında önemli değişikliklere yol açmaktadır. Çizelge 6.1.'de örnek olarak verilen değerler bu hususu açıkça ortaya koymaktadır.

Çizelge 6.1. Oksit kompozisyonundaki değişikliğin ana bileşenlerin kompozisyonuna etkisi

Oksit	(A) Tipi çimento (%)	(B) Tipi çimento (%)
CaO	64,9	63,9
SiO ₂	22,2	23,2
Al ₂ O ₃	5,8	5,8
Fe ₂ O ₃	3,1	3,1
Diğer	4,0	4,0
Bileşen	(A) Tipi çimento (%)	(B) Tipi çimento (%)
C ₃ S	52,0	40,5
C ₂ S	24,5	36,0
C ₃ A	10,0	10,0
C ₄ AF	9,5	9,5

Çizelge 6.1.'den görüldüğü gibi, A çimentosunun oksit kompozisyonunun B çimentosununkine göre farkı sadece CaO miktarının %1 daha fazla ve SiO₂ miktarının da %1 daha az oluşudur. Buna karşın ana bileşenlerin oranlarında büyük farklılıklar mevcuttur ve tamamen ayrı ayrı özellikte iki değişik çimento tipi ortaya çıkmaktadır.

Özet olarak denilebilir ki, oksit kompozisyonundaki çok küçük değişiklikler dahi çimento özelliklerini büyük ölçüde etkileyebilmektedir.

Yapmış olduğumuz çalışma neticesinde elde edilen korozyon akımlarından A numunesi içerisindeki elektrotun korozyon akımının en yüksek, E numunesindeki elektrotun korozyon akımının da en düşük çıkmasına neden olan etkenlerden birinin de, bu elektrotların bulunduğu beton numunelerde yer alan çimentolardaki (PKÇ/B 32,5 R) asit oksit ve baz oksit miktarlarının farklılığından kaynaklanabilecek pH değerlerindeki değişimin olabileceği düşünülmektedir.

Deneylerimizde kullanmış olduğumuz, Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde bulunan beş ayrı fabrikadan alınan PKÇ/B 32,5 R türü çimentolara ait analiz raporları incelendiğinde korozyon hızı en yüksek olan elektrotun bulunduğu A numunesindeki çimento bünyesinde yer alan asit oksitlerin miktarı, korozyon hızı en düşük olarak tespit edilen elektrotun bulunduğu E numunesindeki çimento bünyesinde yer alan asit oksitlerin miktarından fazla olduğu ayrıca A numunesindeki çimento bünyesinde yer alan baz oksit miktarlarının E numunesi içerisinde yer alan çimento bünyesindeki baz oksit miktarlarından daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Asit oksit kompozisyonundaki artışa karşılık baz oksit kompozisyonundaki azalma A numunesinin pH değerini düşürerek ortamdaki elektrotların korozyon hızlarında artışa sebebiyet vermiş olabileceği düşünülmektedir.

6.2. Genel Sonuçlar ve Öneriler

Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

1. Korozyon bir ortam oluşturabilmek amacıyla beton karışım suyu ile birlikte beton bünyesine katılan %3 oranındaki NaCl'in etkisi ve beton numunelerinin kuru koşullarında bulunuyor olması nedeniyle beton numuneleri içerisindeki çeliğin zamana karşı potansiyel ölçümleri sonucunda elektrot potansiyellerinin hemen hemen hepsi korozyon açısından aktif bölgede oldukları saptanmıştır.

90 gün süresince her gün ASTM-C-876-91'e uygun olarak yapılan potansiyel ölçümleri neticesinde 90. gün sonunda elde edilen elektrot potansiyeli değerleri sırasıyla -0,526 V, -0,454 V, -0,474 V, -0,496 V ve -0,360 V olarak tespit edilmiştir. Bu değerlerden sadece E numunesi içerisindeki elektrota ait potansiyel değerleri, literatürde belirtilmiş olan aktif-pasif bölgede yer alıp diğer beton numunelere ait elektrot potansiyelleri korozyon açısından aktif bölgede kalmışlardır.

2. Yapılan deneyler neticesinde beton numuneler içerisindeki çelik elektrotların potansiyelleri ile korozyon hızları arasında bir bağıntının olabileceği dikkati çekmiştir. Açık devre yarı hücre potansiyeli ölçümleri neticesinde elde edilen korozyon potansiyeli değerlerinden, korozyon potansiyeli değeri negatif olarak en büyük olan (-0,526 V) elektrotun bulunduğu A numunesindeki korozyon akımının en fazla olduğu ($0,297 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) galvanostatik yöntem ile yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerden görülmektedir. Aynı şekilde korozyon potansiyeli değeri diğer numunelere göre daha küçük olan (-0,360 V) elektrotun bulunduğu E numunesindeki korozyon akımının da en düşük olduğu ($0,145 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) tespit edilmiştir.

Buradan çıkarabileceğimiz sonuç korozyon potansiyeli en aktif olan elektrotun korozyon hızının da en büyük çıkabileceği ihtimalinin yüksek olduğudur.

3. Galvanostatik yöntem ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen korozyon akımlarından, korozyon akımı en yüksek olan ($0,297 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) elektrotun bulunduğu A numunesindeki çimento hidratasyon süresinin en kısa olduğu (30 dk.), korozyon akımı en düşük olan ($0,145 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) elektrotun bulunduğu E numunesindeki çimento

hidratasyon süresinin ise (150 dk.) en uzun olduğu çimento analiz raporlarından görülmektedir.

Elde edilen verilerden şu şekilde bir sonuca ulaşabiliriz. Korozyon akımı en yüksek bulunan elektrotun bulunduğu A numunesindeki çimento hidratasyonu çok kısa sürerek gelişimini tam olarak tamamlayamamış hidrat elemanlarının oluşması neticesinde porozitesi dolayısıyla da geçirgenliği yüksek bir beton elde edilmiş olunabileceği düşünülmüş, buna bağlı olarak da korozyon akımının bu numunede en yüksek çıkmasına neden olan etkenlerden birinin bu olay olduğu kanısına varılmıştır.

4. A numunesi içerisindeki elektrotun korozyon akımının en yüksek ($0,297 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) çıkmasına neden olan etkenlerden birinin de bu numuneyi oluşturan çimento bünyesindeki tayin edilemeyen bileşiklerin miktarının (% 4,02) oldukça yüksek olduğundan kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Standartlarda tayin edilemeyen bileşiklerin çimento içerisindeki oranının en fazla %1 olması istenir.

5. Galvanostatik yöntem ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen korozyon akımlarına göre, A numunesi içerisindeki elektrotun korozyon akımının en yüksek ($0,297 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) çıkmasına neden olan bir diğer etkenin ise, bu numunedeki çimento bünyesinde yer alan serbest kireç (sCaO) miktarının (% 1,57) çok fazla olmasından ileri gelmiş olabileceği düşünülmektedir.

Standartlarda serbest kirecin çimento içerisinde % 1'den fazla olmaması istenir.

6. Yapmış olduğumuz deneyler neticesinde elde edilen korozyon akımlarından A numunesi içerisindeki elektrotun korozyon akımının en yüksek ($0,297 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), E numunesindeki elektrotun korozyon akımının da en düşük ($0,145 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) çıkmasına neden olan en önemli etkenlerden birinin de, bu elektrotların bulunduğu beton numunelerde yer alan çimentolardaki asit oksit ve baz oksit miktarlarının farklılığından kaynaklanabilecek pH değerlerindeki değişimin olabileceği düşünülmektedir.

Bu numunelerde kullanılan çimentolara ait analiz raporları incelendiğinde, korozyon akımı en yüksek olan elektrotun bulunduğu A numunesindeki çimento bünyesinde yer alan asit oksitlerin miktarı, korozyon akımı en düşük olarak tespit edilen elektrotun bulunduğu E numunesindeki çimento bünyesinde yer alan asit oksitlerin miktarından fazla olduğu ayrıca A numunesindeki çimento bünyesinde yer alan baz

oksit miktarlarının E numunesi içerisinde yer alan çimento bünyesindeki baz oksit miktarlarından daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Asit oksit kompozisyonundaki artışa karşılık baz oksit kompozisyonundaki azalma A numunesinin pH değerini düşürerek ortamdaki elektrotların korozyon hızlarında artışa sebebiyet vermiş olabileceği düşünülmektedir.

ÖNERİLER

Literatürde betonarme demirlerinin korozyonu üzerine etki eden faktörlerden biri olan çimento ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların odak noktası farklı türden çimentoların betonarme donatısı üzerindeki korozyon hızına etkisini belirlemektir.

Araştırma sonucunda, farklı bölgelerden alınan aynı tür çimentoların standartlarının aynı olması gerekirken, Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerindeki farklı fabrikalardan alınmış olan PKÇ/B 32,5 R çimentosunun bileşimindeki hammadde kaynaklarının ve kimyasal bileşenlerinin farklı olmasından dolayı, bu çimentonun betonarme donatısının korozyon hızını farklı şekilde etkilediği görülmüştür. Araştırma sonucunda elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

1. PKÇ/B 32,5 R çimento türü için en uygun hammadde kaynağı tespit edilip, bu çimento türünün kalitesi daha da artırılarak betonarme donatısının korozyonuna olan etkisi minimum seviyeye indirilebilir.

2. Benzer araştırmaların tüm bölgelerde uygulanmasıyla, Türkiye genelinde üretim yapan fabrikalarda hammadde kaynağı ve kimyasal bileşenler yönünden bir standardizasyon sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

ACI JOURNAL COMMITTEE REPORT, 1985, **Corrosion of Metals in Concrete**, Ame. Concrete Inst., ACI 222 R-85, Detroit, 3.

ASAN, A., 1996, **Galvanik Akım Metodu Kullanılarak Klorür İyonları, Asetat İyonları ve Uçucu Külün, Beton İçindeki Çeliğin Korozyonu Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması**, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

ATKINSON, J.T.N. and VANDROFFELAAR, H., 1985, **Corrosion and Its Control**, NACE, March.

BERKE, N.S., 1989, **A Review of Corrosion İnhibitors in Concrete**, Material Performance, October, 41-44.

BOYD, W.K. and TRIPLER, A.B., 1968, **Corrosion of Reinforcing Steel Bars in Concrete**, Materials Protection, October.

COLLINS, W.D. at all., 1993, **Chemical Treatment of Corroding Steel Reinforcement After Removal of Chloride Contaminated Concrete**, Corrosion, Vol.49, No:11, pp-74-88.

DOĞAN, Ö.M., 1989, **Çeliğin Beton İçinde Pasiflik ve Koroziflik Karakteristiklerinin Belirlenmesi**, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

DORUK, M., 1982, **Korozyon ve Önlenmesi**, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Müh. Fak., Yayın No:70, Ankara.

DORUK, M., 1993, **Atmosferik Korozyon, Yer altı Korozyonu ve Katodik Koruma**, Kimya Müh. Odası, Seminer Kitabı, Ankara, 26-34.

ERDOĞAN, T.Y., 1995, **Betonu Oluşturan Malzemeler (Çimentolar)**, ODTU, Ankara.

FOLEY, R.T., 1975, **Complex Lons and Corrosion Journal Electrochemical Society**, V-122, No:11.

FONTANA, M.G. and GREENE, N.D., 1978, **Corrosion Engineering**, Second ed., McGraw Hill Inc., Newyork, 342-345.

GJORV, O.E. and VENNESLAND, O. and EL BUSAİDY, A.H.S., 1986, **Diffusion of Dissolved Oxygen Through Concrete**, Materials Protection, 25, 39.

HAKDİYEN, İ., 1980, **Genel ve Teknik Kimya**, Birsen Kitapevi Yayınları, İstanbul.

HALVORSEN, G.T., 1993, **Protecting Rebar in Concrete**, Materials Performance, August, 31-33.

HAUSMAN, D.A., 1964, **Electrochemical Behaviour of Steel in Concrete**, ACI Journal, 61, (2), February, 170-187.

HAUSMAN, D.A., 1967, **Steel Corrosion in Concrete**, Materials Protection, November, 19-23.

HOŞHAN, P., 1994, **Beton İçindeki Çeliğin Korozyonunun Üç Elektrot Yöntemi İle İncelenmesi**, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

HOWWEL, K.M., 1990, **Corrosion of Reinforced Concrete Slab Foundations**, Materials Protection, December.

KAHYAOĞLU, H., 1998, **Betonarme Korozyonunu Önlemek Amacıyla Uygulanabilir Yöntemlerin Geliştirilmesi**, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı Doktora Tezi, Adana.

KESKİN, F., 1993, **Betonarme Demirlerinin Korozyonu Üzerine İnhibitör Etkisinin Belirlenmesi**, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

LABAHN, O., 1973, **Çimento Mühendisleri İçin El Kitabı**, Şafak Matbaası, Ankara.

LEWIS, D.A. and COPENHAGEN, W.J., 1959, **Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete in Marine Atmospheres**, Corrosion-Nace, Vol-15, July.

MASSAZZA, F., 1989, **Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları**, Dayanıklılık, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Seminer, Ankara.

MORGAN, J.H., 1959, **Sacrificial Anodes Cathodic Protection**, AMIEE, London, 79.

MOSKVIN, V., 1980, **Electrochemical Behaviour of Steel in Concrete**, Concrete and Reinforced Concrete Deterioration and Protection, Moskova, 11, 264-281.

MOZER, J.D. and BIANCHINI, KESLER, C.E., 1969, **Corrosion of Reinforcing Bars**, ACI Journal, August, 904-920.

MUGNER, C.G., 1984, **Corrosion Prevention by Protective Coatings**, Published Nace, 288.

NEVILLE, A.M., 1972, **Properties of Concrete**, Pitman Publishing Corporation, Newyork.

NEVILLE, A.M., 1987, **Properties of Concrete**, Longman Scientific and Technical, Longman Group UK Limited, Longman House, Essex CM20 2JE, UK.

OTHMER, K., 1982, **Encyclopedia of Chemical Technology**, John Wiley & Sons, Newyork, 113-141.

ÖNEN, H.Y., 2000, **Korozyon ve Yapı Güvenliği**, VII. Uluslararası Korozyon Sempozyumu Bildiriler Kitabı , Sayfa no: 125, İstanbul.

ÖZDEMİR, B., 1973, **Çimento Teknolojisi**, Şafak Matbaası, Ankara.

PERRY, R. and GREEN, D., 1984, **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, Sixth ed., Mc Graw Hill inc., Newyork, 23.3-23.14.

POSTACIOĞLU, B., 1986, **Beton (Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton)**, Cilt 1, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul, 175 S.

POSTACIOĞLU, B., 1987, **Beton (Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton)**, Cilt 2, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul, 229 S.

POURBAIX, M., 1976, **Atlas of Electrochemical Equilibrium in Aqueous Solutions**, Pergamon Press Ltd., London, 307-321.

RIDER, R. and HEIDERSBACH, R., 1980, **Degration of Metal Fiber Reinforced Concrete Exposed a Marine Environment**, Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete, ASTM STP 713, American Society for Testing and Materials, 75-92.

ROSENBERG, A.M. and et all., 1977, **A Corrosion İnhibitor Formulated With Calcium Nitrite for Use in Reinforced Concrete**, Chloride Corrosion of Steel in Concrete, STP-629, ASTM, Philadelphia, 89-99.

SCOTT, G.N., 1965, **Corrosion Protection Properties of Portland Cement Concrete**, J.Am. Water Works Assoc., 57, 1038.

SHREVE, N.R. and BRINK, A.J., 1983, **Kimyasal Proses Endüstrileri 1**, İnkılap ve Aka Kitapevleri A.Ş., İstanbul.

STERN, M. and GEARY, A.L., 1957, **Journal of Electrochemical Society**, January, 54-57.

STRATFULL, R.F., 1987, **Comments on the Identification of Chloride Threshold in the Corrosion of Steel in Concrete**, Corrosion-NACE, 47, August.

STRATFULL, R.J., 1973, **Half-Cell Potentials and the Corrosion of Steel in Concrete**, Highway Research Record 433, p.12.

TS 26, 1992, **Çimento-Trashlı Çimento**, Türk Standartları Enstitüsü, Nisan, Ankara

TS 706, 1980, **Beton Agregaları**, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

UHLIG, H.H., 1971, **Corrosion and Corrosion Control**, John Wiley and Sons, New York.

ÜNERİ, S., 1998, **Korozyon ve Önlenmesi**, Korozyon Derneği, Poyraz Ofset, Ankara.

VERBECK, G.J., 1975, **Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete**, Corrosion of Metals in Concrete, sp-49, American Concrete Institute, Detroit, pp. 21-38.

YALÇIN, H., 1991, **Çinko Anotların Muhtelif Anot Yatağı İçinde Korozyon Hızlarının Tayini**, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi, Ankara.

YALÇIN, H. ve KOÇ, T., 1991, **Demir ve Çelik Yapıların Korozyonu ve Katodik Koruması**, İller Bankası Genel Müdürlüğü Yayını, Yayın No:47, Ankara.

YALÇIN, H. ve KOÇ, T., 1992, **Öngerilimli Beton Boruların Korozyonu ve Alınacak Önlemler**, 3. Korozyon Sempozyumu, Ankara, 257-275.

YALÇIN, S., 1996, **Kolemanitli Çimentoların Betonarme Demirlerinin Korozyonu Üzerine İnhibitif Etkisi**, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

EKLER

EK-1

BETON İÇERİSİNDEKİ ÇELİĞİN KOROZYON POTANSİYELİ DEĞERLERİ

Çizelge Ek-1.1. Cu/CuSO₄ Referans elektrotu ile potansiyel ölçümleri

Çeliğin Elektrot Potansiyeli (Volt) (Cu/CuSO ₄ referans elektroda göre)					
Zaman (Gün)	A Numunesi	B Numunesi	C Numunesi	D Numunesi	E Numunesi
1	- 0.465	- 0.449	- 0.486	- 0.454	- 0.532
2	- 0.501	- 0.516	- 0.637	- 0.612	- 0.579
3	- 0.557	- 0.438	- 0.663	- 0.621	- 0.544
4	- 0.546	- 0.478	- 0.696	- 0.600	- 0.579
5	- 0.543	- 0.470	- 0.691	- 0.579	- 0.599
6	- 0.525	- 0.452	- 0.657	- 0.547	- 0.613
7	- 0.483	- 0.440	- 0.626	- 0.534	- 0.566
8	- 0.450	- 0.454	- 0.644	- 0.530	- 0.601
9	- 0.424	- 0.441	- 0.650	- 0.520	- 0.603
10	- 0.431	- 0.441	- 0.644	- 0.518	- 0.623
11	- 0.408	- 0.434	- 0.626	- 0.502	- 0.604
12	- 0.406	- 0.440	- 0.629	- 0.481	- 0.580
13	- 0.416	- 0.520	- 0.634	- 0.492	- 0.549
14	- 0.345	- 0.523	- 0.614	- 0.463	- 0.560
15	- 0.357	- 0.462	- 0.657	- 0.474	- 0.567
16	- 0.413	- 0.434	- 0.642	- 0.462	- 0.566
17	- 0.519	- 0.437	- 0.655	- 0.471	- 0.547
18	- 0.558	- 0.464	- 0.672	- 0.505	- 0.539
19	- 0.583	- 0.474	- 0.672	- 0.500	- 0.524
20	- 0.617	- 0.517	- 0.671	- 0.495	- 0.513
21	- 0.622	- 0.523	- 0.659	- 0.490	- 0.514
22	- 0.643	- 0.561	- 0.676	- 0.498	- 0.510
23	- 0.644	- 0.535	- 0.675	- 0.493	- 0.508
24	- 0.653	- 0.539	- 0.666	- 0.500	- 0.513
25	- 0.594	- 0.558	- 0.669	- 0.500	- 0.475
26	- 0.578	- 0.542	- 0.658	- 0.494	- 0.456
27	- 0.561	- 0.518	- 0.662	- 0.489	- 0.446
28	- 0.556	- 0.515	- 0.663	- 0.493	- 0.449
29	- 0.572	- 0.489	- 0.666	- 0.501	- 0.451
30	- 0.568	- 0.455	- 0.661	- 0.502	- 0.436
31	- 0.555	- 0.416	- 0.651	- 0.489	- 0.428
32	- 0.548	- 0.419	- 0.664	- 0.493	- 0.425
33	- 0.557	- 0.408	- 0.659	- 0.497	- 0.427
34	- 0.524	- 0.399	- 0.655	- 0.504	- 0.401
35	- 0.530	- 0.387	- 0.651	- 0.512	- 0.400
36	- 0.547	- 0.388	- 0.646	- 0.515	- 0.406
37	- 0.537	- 0.395	- 0.648	- 0.522	- 0.405
38	- 0.542	- 0.389	- 0.649	- 0.518	- 0.407
39	- 0.539	- 0.389	- 0.641	- 0.526	- 0.416
40	- 0.534	- 0.388	- 0.644	- 0.527	- 0.406
41	- 0.534	- 0.334	- 0.645	- 0.525	- 0.412
42	- 0.536	- 0.331	- 0.638	- 0.538	- 0.407
43	- 0.521	- 0.327	- 0.632	- 0.542	- 0.401
44	- 0.517	- 0.301	- 0.635	- 0.544	- 0.400
45	- 0.512	- 0.286	- 0.633	- 0.562	- 0.407

46	- 0.507	- 0.278	- 0.621	- 0.572	- 0.415
47	- 0.495	- 0.314	- 0.624	- 0.569	- 0.410
48	- 0.495	- 0.385	- 0.608	- 0.559	- 0.412
49	- 0.491	- 0.383	- 0.595	- 0.568	- 0.411
50	- 0.488	- 0.329	- 0.593	- 0.565	- 0.409
51	- 0.480	- 0.384	- 0.585	- 0.552	- 0.413
52	- 0.478	- 0.391	- 0.565	- 0.555	- 0.412
53	- 0.470	- 0.317	- 0.561	- 0.571	- 0.406
54	- 0.464	- 0.330	- 0.563	- 0.572	- 0.372
55	- 0.450	- 0.277	- 0.557	- 0.577	- 0.371
56	- 0.444	- 0.384	- 0.555	- 0.570	- 0.359
57	- 0.434	- 0.393	- 0.555	- 0.566	- 0.334
58	- 0.441	- 0.390	- 0.549	- 0.571	- 0.332
59	- 0.439	- 0.295	- 0.541	- 0.574	- 0.321
60	- 0.449	- 0.391	- 0.539	- 0.577	- 0.330
61	- 0.473	- 0.405	- 0.536	- 0.580	- 0.315
62	- 0.474	- 0.420	- 0.536	- 0.582	- 0.314
63	- 0.473	- 0.420	- 0.532	- 0.580	- 0.317
64	- 0.476	- 0.424	- 0.532	- 0.585	- 0.309
65	- 0.481	- 0.417	- 0.526	- 0.582	- 0.312
66	- 0.481	- 0.417	- 0.525	- 0.576	- 0.306
67	- 0.479	- 0.419	- 0.522	- 0.568	- 0.306
68	- 0.488	- 0.432	- 0.533	- 0.571	- 0.330
69	- 0.486	- 0.431	- 0.518	- 0.565	- 0.327
70	- 0.478	- 0.434	- 0.517	- 0.556	- 0.334
71	- 0.481	- 0.440	- 0.510	- 0.551	- 0.339
72	- 0.443	- 0.433	- 0.510	- 0.537	- 0.330
73	- 0.409	- 0.331	- 0.502	- 0.530	- 0.331
74	- 0.412	- 0.338	- 0.498	- 0.518	- 0.328
75	- 0.402	- 0.422	- 0.489	- 0.508	- 0.322
76	- 0.397	- 0.432	- 0.484	- 0.495	- 0.328
77	- 0.396	- 0.430	- 0.482	- 0.498	- 0.326
78	- 0.401	- 0.432	- 0.480	- 0.486	- 0.327
79	- 0.463	- 0.454	- 0.496	- 0.513	- 0.355
80	- 0.468	- 0.447	- 0.480	- 0.495	- 0.346
81	- 0.477	- 0.450	- 0.483	- 0.492	- 0.361
82	- 0.447	- 0.444	- 0.466	- 0.483	- 0.326
83	- 0.433	- 0.436	- 0.462	- 0.492	- 0.332
84	- 0.483	- 0.448	- 0.465	- 0.495	- 0.323
85	- 0.505	- 0.444	- 0.455	- 0.491	- 0.334
86	- 0.525	- 0.443	- 0.444	- 0.496	- 0.320
87	- 0.480	- 0.454	- 0.443	- 0.496	- 0.304
88	- 0.490	- 0.451	- 0.458	- 0.506	- 0.359
89	- 0.516	- 0.446	- 0.449	- 0.490	- 0.360
90	- 0.526	- 0.454	- 0.447	- 0.496	- 0.360

EK-2

Çizelge Ek-2.1. A numunesinin anodik ve katodik polarizasyon deneyi sonuçları

Zaman (dk)	Uygulanan Dış Akım (μA)	Akım Yoğunluğu ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Anot Potansiyeli E (Volt)	Aşırı Voltaj (mv)	Katod Potansiyeli E (Volt)	Aşırı Voltaj (mv)
0	0	0	- 0.615	-	- 0.620	-
10	0.1	0.01	- 0.610	5	- 0.657	37
20	1	0.1	- 0.578	37	- 0.670	50
30	5	0.5	- 0.273	342	- 0.735	115
40	10	1.0	- 0.022	593	- 0.796	176
50	15	1.5	+ 0.142	757	- 0.832	212
60	20	2.0	+ 0.331	946	- 0.866	246
70	25	2.5	+ 0.497	1112	- 0.897	277
80	30	3.0	+ 0.430	1045	- 0.930	310
90	35	3.5	+ 0.218	833	- 0.956	336
100	40	4.0	+ 0.175	790	- 0.993	373
110	50	5.0	+ 0.216	831	- 1.027	407
120	100	10.0	+ 0.543	1158	- 1.100	480
130	150	15.0	+ 0.666	1281	- 1.143	523
140	200	20.0	+ 0.742	1357	- 1.177	557
150	250	25.0	+ 0.748	1363	- 1.226	606

Çizelge Ek-2.2. B numunesinin anodik ve katodik polarizasyon deneyi sonuçları

Zaman (dk)	Uygulanan Dış Akım (μA)	Akım Yoğunluğu ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Anot Potansiyeli E (Volt)	Aşırı Voltaj (mv)	Katod Potansiyeli E (Volt)	Aşırı Voltaj (mv)
0	0	0	- 0.397	-	- 0.400	-
10	0.1	0.01	- 0.365	32	- 0.407	7
20	1	0.1	- 0.241	188	- 0.466	66
30	5	0.5	+ 0.027	424	- 0.645	245
40	10	1.0	+ 0.293	690	- 0.735	335
50	15	1.5	+ 0.460	857	- 0.795	395
60	20	2.0	+ 0.547	944	- 0.857	457
70	25	2.5	+ 0.494	891	- 0.907	507
80	30	3.0	+ 0.414	811	- 0.957	557
90	35	3.5	+ 0.341	738	- 1.007	607
100	40	4.0	+ 0.294	691	- 1.036	636
110	50	5.0	+ 0.309	706	- 1.060	660
120	100	10.0	+ 0.680	1077	- 1.125	725
130	150	15.0	+ 0.851	1248	- 1.188	788
140	200	20.0	+ 0.899	1296	- 1.238	838
150	250	25.0	+ 0.978	1375	- 1.303	903

Çizelge Ek-2.3. C numunesinin anodik ve katodik polarizasyon deneyi sonuçları

Zaman (dk)	Uygulanan Dış Akım (μA)	Akım Yoğunluğu ($\mu A/cm^2$)	Anot Potansiyeli E (Volt)	Aşırı Voltaj (mv)	Katod Potansiyeli E (Volt)	Aşırı Voltaj (mv)
0	0	0	- 0.450	-	- 0.482	-
10	0.1	0.01	- 0.410	40	- 0.500	18
20	1	0.1	- 0.292	158	- 0.525	43
30	5	0.5	- 0.071	379	- 0.657	175
40	10	1.0	+ 0.103	553	- 0.768	286
50	15	1.5	+ 0.300	750	- 0.830	348
60	20	2.0	+ 0.506	956	- 0.879	397
70	25	2.5	+ 0.662	1112	- 0.919	437
80	30	3.0	+ 0.710	1160	- 0.957	475
90	35	3.5	+ 0.690	1140	- 0.988	506
100	40	4.0	+ 0.435	885	- 1.007	525
110	50	5.0	+ 0.206	656	- 1.024	542
120	100	10.0	+ 0.452	902	- 1.070	588
130	150	15.0	+ 0.516	966	- 1.105	623
140	200	20.0	+ 0.564	1014	- 1.138	656
150	250	25.0	+ 0.661	1111	- 1.172	690

Çizelge Ek-2.4. D numunesinin anodik ve katodik polarizasyon deneyi sonuçları

Zaman (dk)	Uygulanan Dış Akım (μA)	Akım Yoğunluğu ($\mu A/cm^2$)	Anot Potansiyeli E (Volt)	Aşırı Voltaj (mv)	Katod Potansiyeli E (Volt)	Aşırı Voltaj (mv)
0	0	0	- 0.595	-	- 0.610	-
10	0.1	0.01	- 0.580	15	- 0.624	14
20	1	0.1	- 0.492	103	- 0.653	43
30	5	0.5	- 0.197	398	- 0.755	145
40	10	1.0	+ 0.033	628	- 0.818	208
50	15	1.5	+ 0.223	818	- 0.868	258
60	20	2.0	- 0.099	496	- 0.916	306
70	25	2.5	- 0.159	436	- 0.959	349
80	30	3.0	- 0.169	426	- 1.002	392
90	35	3.5	- 0.149	446	- 1.043	433
100	40	4.0	- 0.147	448	- 1.051	441
110	50	5.0	- 0.134	461	- 1.053	443
120	100	10.0	- 0.022	573	- 1.076	466
130	150	15.0	+ 0.004	599	- 1.093	483
140	200	20.0	+ 0.064	659	- 1.112	502
150	250	25.0	+ 0.116	711	- 1.130	520

Çizelge Ek-2.5. E numunesinin anodik ve katodik polarizasyon deneyi sonuçları

Zaman (dk)	Uygulanan Dış Akım (μA)	Akım Yoğunluğu ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Anot Potansiyeli E (Volt)	Aşırı Voltaj (mv)	Katod Potansiyeli E (Volt)	Aşırı Voltaj (mv)
0	0	0	- 0.385	-	- 0.402	-
10	0.1	0.01	- 0.313	72	- 0.450	48
20	1	0.1	- 0.130	255	- 0.535	133
30	5	0.5	- 0.024	361	- 0.673	271
40	10	1.0	+ 0.223	608	- 0.767	365
50	15	1.5	- 0.007	378	- 0.829	427
60	20	2.0	- 0.167	218	- 0.875	473
70	25	2.5	- 0.191	194	- 0.916	514
80	30	3.0	- 0.171	214	- 0.957	555
90	35	3.5	- 0.166	219	- 0.998	596
100	40	4.0	- 0.127	258	- 1.034	632
110	50	5.0	- 0.120	265	- 1.078	676
120	100	10.0	+ 0.010	395	- 1.150	748
130	150	15.0	+ 0.108	493	- 1.187	785
140	200	20.0	+ 0.210	595	- 1.222	820
150	250	25.0	+ 0.259	644	- 1.254	852