

**GALVANİK AKIM METODU KULLANARAK KLORÜR
İYONLARI, ASETAT İYONLARI VE UÇUCU KÜLÜN, BETON
İÇİNDEKİ ÇELİĞİN KOROZYONU ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
(KİMYA MÜHENDİSLİĞİ)**

Abdurrahman ASAN

MART, 1996

552 77

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Hayri Yalçın

Prof. Dr. Hayri YALÇIN

Tez Yöneticisi

Başkan : Prof.Dr.Hayri YALÇIN

Üye : Doç.Dr.Mübeccel ERGÜN

Üye : Doç.Dr.Timur KOÇ

Hayri Yalçın

Mübeccel Ergün

Timur Koç

Bu tez Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

Yalçın

GALVANİK AKIM METODU KULLANILARAK KLORÜR İYONLARI, ASETAT İYONLARI VE UÇUCU KÜLÜN, BETON İÇİNDEKİ ÇELİĞİN KOROZYONU ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ABDURRAHMAN ASAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

1996

ÖZET

Betonarme demirleri normal beton içinde pasif halde bulunur. Bu pasiflik betonun yüksek alkali (pH: 12-13) özelliğinden kaynaklanır. Ancak beton içine klorür iyonlarının girmesi halinde bu pasiflik bozulur ve betonarme demirleri korozyona uğrar. Korozyon sonucu oluşan ürünler hacimsel genleşme oluşturarak, betonda içsel gerilimlere ve çatlaklıklara sebebiyet verir. Bu durum betonun parçalanmasına yol açar. Bu çalışmada, gerçek beton numuneleri içine değişik oranlarda klorür, asetat ve uçucu kül katılarak, betonarme demirlerinin korozyonu üzerine nasıl etki yaptıkları incelenmiştir. Deneylerde ASTM C-871-91 ve galvanik akım ölçüm yöntemleri uygulanmıştır. 100 mm x 100 mm x 100 mm boyutlarında hazırlanmış olan beton numuneleri üzerinde 60 gün süre ile yapılan deneylerde korozyon hızının zamanla değişimi incelenmiştir.

Deneyler sonucunda klorür konsantrasyonunun $2.65 \text{ kg Cl}^-/\text{m}^3$ Beton (1086 ppm)'den fazla olması halinde betonarme demirlerinin korozyona uğradığı belirlenmiştir. Asetat iyonları ise yüksek konsantrasyonlarda bile pasifliği bozucu etki göstermemiştir. Beton içine çimento ağırlığının % 30'u oranında katılan uçucu külün, betonarme demirlerinin korozyonu üzerine ilk 60 gün içinde belirgin bir etkisi gözlenememiştir.

Bilim Kodu : 602.03.02

Anahtar Kelimeler: Betonarme demirlerinin korozyonu, klorür etkisi, asetat etkisi, uçucu kül etkisi, Galvanik Akım Metodu

Sayfa : 54

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Hayri YALÇIN

**INVESTIGATION OF EFFECTS OF CHLORIDE IONS,
ACETATE IONS AND FLY ASHES ON THE CORROSION OF
REINFORCING STEEL IN CONCRETE BY USING GALVANIC
CURRENT METHOD**

(M. Sc. Thesis)

ABDURRAHMAN ASAN

GAZI UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

1996

ABSTRACT

The steels are in passive form in normal concrete. This passivity is due to high alkalinity of concrete (pH= 12-13). However, the steel begins to lose its passivity in the case of penetration of chloride ions into concrete. Deterioration of concrete due to corrosion is the result of the fact that corrosion products occupy a greater volume than the steel and hence exert substantial stresses on the concrete. As a result, the concrete is cracked and spalled. In this study effect of chloride ions, acetate ions and fly ashes on the corrosion of steel were investigated by adding these ions and fly ashes into the concrete in different percentage. ASTM C-871-91 and Galvanik Current methods were utilized as measurement techniques in experiments. Concrete samples were prepared in 100 mm x 100 mm 100 mm dimensions. Then corrosion rate was measured as a function of time in daily periods during the 60 days. As a result of

these experiments, it was determined that the reinforcing steels corroded when the chloride ions concentration in concrete is higher than $2.65 \text{ kg Cl}^-/\text{m}^3$ concrete. Any negative effect of acetate ions on corrosion of steel was not observed even at high concentration. In similar manner, any significant effect of fly ash which added to concrete in 30% of concrete, of corrosion of steel was not observed during 60 days of test period.

Science Code : 602.03.02

Key Words : Corrosion of reinforcing steel, effect of chloride, effect of acetate, effect of fly ashes, Galvanic Current Method

Pages : 54

Adviser : Prof. Dr. Hayri YALÇIN

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde, büyük ilgi ve desteğini gördüğüm, yapıcı ve yol gösterici yaklaşımlarıyla bana her zaman, her konuda yardımcı olan, hocam, Sayın Prof. Dr. Hayri Yalçın'a en içten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Bana büyük emekleri geçen tüm hocalarıma ayrı ayrı teşekkür ederim.

Kullandığım malzeme ve cihazların temininde emeği geçen Hocam Doç. Dr. Timur Koç'a ayrıca teşekkür ederim. Gösterdikleri yakın ilgi ve yardımları dolayısıyla eşim ve tüm dönem arkadaşlarımı saygıyla anıyorum.

Özverilerinden dolayı sevgili anne ve babama sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGE DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
3. TEORİK AÇIKLAMALAR.....	11
3.1. Korozyon Teorisi.....	11
3.1.1. Demir-Su Sisteminde Korozyon.....	11
3.2. Betonarme Demirleri Korozyonunun Elektrokimyasal Mekanizması.....	13
3.3. Beton İçindeki Gelişin Korozyonuna etki Yapan Faktörler.....	14
3.3.1. Klorür İyonu Etkisi.....	14
3.3.2. PH Etkisi.....	18
3.3.3. Karbondioksit Etkisi.....	19
3.3.4. Rutubetin Etkisi.....	19
3.3.5. Oksijen Difüzyonunun Etkisi.....	20
3.3.6. Beton Kalitesi.....	22
3.3.7. Pas Payı Etkisi.....	23
3.3.8. İnhibitör Etkisi.....	23
3.4. Korozyon Hızı Ölçüm Yöntemleri.....	24

3.4.1. Ağırlık Kaybı Yöntemi.....	24
3.4.2. Elektrokimyasal Yöntemler.....	25
- Polarizasyon - Kırılma Yöntemi.....	25
- Lineer Polarizasyon Yöntemi.....	27
3.4.3. Statik Potansiyel Ölçüm Yöntemi.....	28
3.4.4. Galvanik Akım Yöntemi.....	29
4. DENEYSEL MATERYAL VE METOD.....	32
4.1. Elektrotların Hazırlanması.....	32
4.2. Beton Örneklerinin Hazırlanması.....	33
4.3. Galvanik Akım Ölçümleri.....	37
4.4. Korozyon Potansiyeli Ölçümleri.....	37
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	47
KAYNAKLAR.....	50

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1.	Demir Metalinin Sulu Çözeltiler İçindeki Korozifliği.....	12
Şekil 3.2.	Sodyum Klorürün Korozyon Hızı Üzerindeki Etkisi.....	16
Şekil 3.3.	Çeliğin Korozyon Hızının pH'la Değişimi.....	18
Şekil 3.4.	Oksijen Difüzyonunun Kalınlık İle Değişimi.....	21
Şekil 3.5.	Çözünmüş Oksijen Konsantrasyonun, Betonarme Demirleri Korozyon Hızı Üzerindeki Etkisi.....	22
Şekil 3.6.	Oksijensiz Asit Çözeltisindeki Metalin Katodik Polarizasyon Eğrisi.....	25
Şekil 3.7.	Dış Akıma Karşı Polarizasyon Aşırı Gerilimi.....	27
Şekil 3.8.	Galvanik Akım Yönteminin Deney Düzenneği.....	30
Şekil 3.9.	Gerçek Beton Bloklara Galvanik Akım Yönteminin Uygulanması.....	31
Şekil 4.1.	Bitişik Beton Bloklar.....	35
Şekil 4.2.	Sodyum Klorürlü Beton Örneklerinde Galvanik Akımın Zamanla Değişimi.....	44
Şekil 4.3.	Sodyum Klorürlü Beton Örneklerinde Korozyon Potansiyelinin Zamanla Değişimi.....	44
Şekil 4.4.	Kalsiyum Asetatlı Beton Örneklerinde Galvanik Akımın Zamanla Değişimi.....	45
Şekil 4.5.	Kalsiyum Asetatlı Beton Örneklerinde Korozyon Potansiyelinin Zamanla Değişimi.....	45
Şekil 4.6.	Uçucu Küllü Beton Örneklerinde Galvanik Akımın Zamanla Değişimi.....	46
Şekil 4.7.	Uçucu Küllü Beton Örneklerinde Korozyon Potansiyelinin Zamanla Değişimi.....	46

ÇİZELGELER DİZİNİ

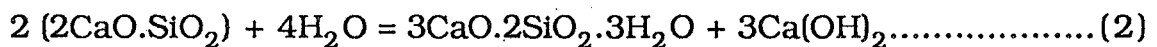
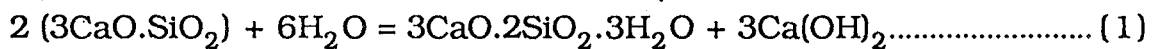
Çizelge 3.1.	Korozyon İçin Zararlı Sayılan Klorür Yüzdeleri.....	17
Çizelge 4.1.	İnşaat Demirinin Kimyasal Bileşimi.....	32
Çizelge 4.2.	Beton Örneklerinin Katkı Oranları.....	34
Çizelge 4.3.	Beton Karışımı (1 Blok İçin).....	36
Çizelge 4.4.	Portland Çimentosunun Kimyasal Analizi.....	36
Çizelge 4.5.	Sodyum Klorürlü Beton Örneklerinde Galvanik Akımın Zamanla Değişimi.....	368
Çizelge 4.6.	Sodyum Klorürlü Beton Örneklerinde Korozyon Potansiyelinin Zamanla Değişimi.....	39
Çizelge 4.7.	Kalsiyum Asetatlı Beton Örneklerinde Galvanik Akımın Zamanla Değişimi.....	40
Çizelge 4.8.	Kalsiyum Asetatlı Beton Örneklerinde Korozyon Potansiyelinin Zamanla Değişimi.....	41
Çizelge 4.9.	Uçucu Küllü Beton Örneklerinde Galvanik Akımın Zamanla Değişimi.....	42*
Çizelge 4.10.	Uçucu Küllü Beton Örneklerinde Korozyon Potansiyelinin Zamanla Değişimi.....	43

1. GİRİŞ

Birçok yapıda temel yapı malzemesi olarak kullanılmakta olan beton, dış etkilere karşı oldukça dayanıklı bir malzemedir. Betonun çekme dayanımını artırmak amacıyla, halk dilinde inşaat demiri olarak bilinen yumuşak çelikler (betonarme demirleri) kullanılmaktadır.

Asit, baz ve kimyasal maddelerle temas etmeyen normal betonlar, betonarme demirleri için iyi bir koruyucudur. Betonun yüksek alkalitede oluşu, çelik yüzeyinde pasif film oluşmasını sağlar. Ayrıca beton permeabilitesinin düşük oluşu, korozyona neden olacak yabancı bileşenlerin beton içine girmesine engel olur. Beton, elektriksel iletkenliği oldukça düşük olan bir elektrolittir. Bu da beton içindeki elektrokimyasal korozyon hücrelerinden akım geçişini güçleştirmektedir. Beton bu özelliklerinden dolayı betonarme demirlerinin korozyon hızını azaltıcı olarak rol oynamaktadır (Yalçın ve Koç, 1991).

Betonun yüksek alkali özelliği, çimento klinker bileşikleri ile suyun kimyasal reaksiyonu sonucudur. Klinkerin bileşiminde bulunan silikatlar ve alüminatlar hidroliz olarak, hidrate klinker bileşikleri yanında kalsiyum hidroksit 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 oksitler de bulunmaktadır. Bunlar suda çok kolay çözünebilen oksitlerdir. Böylelikle betonun pH'ı 13'e kadar yükselmektedir (ACI, 1985).

Deniz atmosferinde kalan metallerin daha çabuk paslanması ve özellikle iskele ayakları ve betonlarının çok çabuk işlevsiz hale gelmesi, bilim adamlarını klorür iyonlarının korozyon hızı üzerindeki etkisini incelemeye sevk etmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalarda, korozyon hızının klorür iyonları ile doğrudan ilişkili olduğu kanıtlanmıştır. Bugünkü araştırmalar, betonarme demirlerinin klorür iyonlarından nasıl korunacağı ve korozyon sonucu zarar gören betonun nasıl onarılabileceği konusunda yoğunlaşmıştır. Bu amaçla betonun tasarımında ve bakımında ne gibi önlemlerin alınabileceği araştırılmaktadır.

Betonarme demirlerinin korozyonunda klorür iyonu birinci derecede etkindir (Hausman, 1964, 1967, Dughanlian, 1982).

Klorür iyonları, betonu oluşturan kum, çakıl ve doğal sularda genellikle az miktarda bulunur. Bu miktar korozyon olayını başlatmaya yeterli olmaz veya korozyon hızını artırıcı etki yapmaz. Ancak, beton prizini çabuklaştırmak için katılan katkı maddelerinde birçok halde klorür iyonları da bulunur. Ayrıca betonun deniz suyu ile temas etmesi ve buzlanmayı önlemek amacıyla kullanılan tuzlar suda çözünerek,

beton boşluklarından betonarme demirlerine ulaşarak korozyon açısından tehlike oluşturmaktadırlar (Yonezawa, 1988).

Beton bünyesine giren klorür iyonları, betonarme demirlerinin yüzeylerinde oluşan pasif oksit filminin ($\gamma \text{Fe}_2\text{O}_3$) bozulmasına neden olur. 1 m³ betonda 1.6 kg (700 ppm)'in üstünde klorür bulunması halinde korozyonun devamı için uygun bir ortam sağlanmış olur (Hausman, 1967).

Betonarme demirlerinin korozyon hızı büyük ölçüde çevre koşullarına bağlıdır. Korozyonun oluşması için oksijen ve rutubetin mutlak surette birarada olması gerekmektedir. Bunlardan herhangi birisinin olmaması durumunda korozyon olayı gerçekleşmez. Çünkü bunlar anodik ve katodik reaksiyonları gerçekleştiren bileşenlerdir (ACI, 1985).

Bugüne kadar yapılan araştırmalarda beton içinde korozyonun hiç oluşmaması için teknik ve ekonomik açıdan uygun bir yöntem bulunamamıştır. Bununla birlikte iyi bir beton yapımı ile klorür iyonlarının beton içine difüzyonunu azaltarak korozyon hızının pratik olarak etkisiz hale getirilebileceği anlaşılmıştır. Buna ek olarak inhibitör kullanımı, betonarme demirlerinin kaplanması, katodik koruma uygulaması, korozyon hızını önemli ölçüde düşürmektedir (Griffin, 1975, ACI, 1985).

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Teorik prensipleri açıklıkla bilinmesine rağmen, arazi koşullarında korozyonun elektrokimyasal yöntemlerle belirlenmesi ve korozyon hızının kontrolü büyük güçlükler çıkarmaktadır. Bu güçlükler, betonun farklı fiziksel ve kimyasal özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Literatürde, betonarme demirlerinin korozyonunu incelemek için iki farklı deney yöntemi kullanılmıştır.

1. Gerçek beton ortamında yapılan deneyler,
2. Beton yerine buna eşdeğer kabul edilen doygun kalsiyum hidroksit çözeltisi kullanılarak yapılan deneyler.

Hausman, (1967), 400 adet demir çubuğu klorür iyonu içeren ve içermeyen doygun kalsiyum hidroksit çözeltisi içinde deneye tabi tutmuştur. Doygun oksijen ortamında 12 gün süreyle çeliğin korozyon potansiyelini ölçerek şu sonuçlara varmıştır.

1. Çelik pasifleştikçe korozyon potansiyeli düşmektedir.
2. Klorürlü ortamda 7 gün sonra pasif tabaka, klorür iyonları tarafından kırılmakta ve korozyon hızla başlamaktadır.
3. Korozyona uğrayan çelikle uğramayan arasında - 300 mV'luk bir potansiyel fark oluşmaktadır.
4. Korozyon, katotta yeterli miktarda oksijen ve klorür iyonu sağlanmadıkça oluşmamaktadır.

5. Korozyonun oluşabilmesi için, beton içindeki klorür konsantrasyonu en az 700 ppm ($1.6 \text{ kg Cl}^-/\text{m}^3$ beton) olmalıdır.

Hausman, (1964), yapmış olduğu çalışmada, beton içindeki çeliklerin, betonun Omik direnci nedeniyle korunduğunu, normal halde çeliklerin kotodik korumaya ihtiyacı olmadığını belirlemiştir.

Griffin, (1967), deniz suyu ile temas etmekte olan betonarme demirlerinin korozyonunu incelemek üzere, 20 adet beton üzerine her gün 5 dakika tuzlu su püskürtmüştür. Beton bloklarda çatlama görülünceye kadar deneylerine devam etmiştir. Deneylerinin sonunda, beton içinde çimento miktarı ve beton kalınlığı arttıkça, korozyon hızının azaldığı sonucuna varmıştır. 2,5 cm.'lik pas payının yetersiz kaldığını, pas payının 2.5-15 cm aralıklarında olması gerektiği, bazı durumlarda 15 cm'lik pas payının dahi yetersiz kalabileceğini öne sürmüştür.

Shalon ve Raphael, (1971), beton karışımının 0.6 kg su/kg çimento oranında olduğu klorür içermeyen rutubetli ortamda, betonarme demirlerinin korozyonunu ağırlık kaybı yöntemiyle tayin etmiş ve korozyon hızının 0.01-0.12 mil/yıl olduğunu ortaya koymuşlardır.

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

1. Ortamda oksijen olmadığı sürece, korozif maddeler bulunsa bile korozyon olayı gerçekleşmemektedir.

2. 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.

3. Doygun kireç çözeltisi korozif ortam olarak beton yapısına çok benzemektedir. Betonun çeliği koruma etkisi, çimento klinkerinin hidrolizi sonucu oluşan Ca(OH)_2 'den ileri gelmektedir.

4. Betonarme demirlerine anodik olarak +0.64 V (SCE), katodik olarak -1.00 V (SCE)'den daha fazla polarize edecek şekilde dış akım uygulanırsa, anot ve katotta sırasıyla hidrojen ve oksijen çıkışı gözlenmektedir.

5. 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.

Locke ve Simon, (1980), 0.4 kg su/çimento oranındaki beton blokların, rutubetli ortamda çeliğin korozyon hızını üç elektrot yöntemi ile ölçmüşlerdir. Hiç klorür iyonu içermeyen örneklerle, içinde ağırlıkça %1'e kadar NaCl içeren farklı konsantrasyonlardaki çözeltiler içerisindeki betonarme demirlerinin korozyon hızını 0.08-5.66 mil/yıl olarak saptamışlardır.

Stratfull, (1968), betonarme demirlerinin korozyonu ile, korozyon potansiyelleri arasında çizelge 2.1.'deki gibi bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur.

Çizelge 2.1. Değişik Korozyon Potansiyellerinde Korozyon Oluşum Olasılıkları

Ecor, V, (Cu/CuSO ₄)	Korozyon Olasılığı
-0.200 <	< %5.0
-0.200 — -0.350	~%50
< -0.350	> %95

Van Daveer, (1975), Stratfull'un çalışmasına çok benzeyen araştırmasında korozyon potansiyelleri ile çeliğin korozyonu arasında Çizelge 2.2.'de verilen ilişkiyi çıkarmıştır.

Çizelge 2.2. Korozyon Potansiyeline Göre Çeliğin Aktif Hali

Ecor, V, (SCE)	Çelik
-0.220 <	Pasif
-0.220 — -0.270	Aktif veya Pasif
< -0.270	Pasif

Arup, (1983), korozyon potansiyelini göz önüne alarak betonarme demirleri için dört durum belirlemiştir.

1. Pasif Hal: Betonarme demirleri, klorür iyonlarının bulunmadığı ve pH'ın 13 olduğu ortamlarda pasif durumdadır. Bu koşullarda çeliğin korozyon potansiyeli +100mV ile -200 mV (SCE) arasındadır.

2. Çukur Korozyonu: Ortamda yeterli miktarda klorür iyonu bulunması halinde görülür. Bu durumda çeliğin korozyon potansiyeli -200mV ile -500mV (SCE) arasında değişmektedir.

3. Genel Korozyon: Karbonatlaşma veya aşırı miktardaki klorürün, çeliğin pasifliğini bozması sonucu oluşur. Bu durumda korozyon potansiyeli -450mV ile -600mV (SCE) arasında değişmektedir.

4. Aktif Hal: Aşırı miktarda oksijen difüzyonunun olduğu durumlarda söz konusudur. Bu durumda çelik pasifliğini koruyamaz. Beton gibi yüksek alkali ortamda -100mV (SCE) korozyon potansiyelde bile aktif olabilir.

Wheat ve Eliezer, (1987), potansiyostatik ve potansiyodinamik yöntemler kullanarak, betonarme demirlerinin korozyon potansiyelinin (Ecor) zamana göre değişimini incelemişlerdir. Genel olarak, korozyon potansiyelinin pozitifliği çeliğin pasifliğini, negatifliği ise çeliğin aktifliğini gösterdiğini belirtmişlerdir. Her zaman doğru olmamakla beraber, korozyon potansiyeli -300mV (SCE)'den daha negatif değerlerde çeliğin aktif halde, daha pozitif değerlerde ise pasif halde olduğunu ortaya koymuşlardır.

Stratfull, (1987), deniz suyu ile temas eden köprü ayaklarının korozyonunu araştırmak için, tuzlu su ile temas eden betonarme demirlerinin korozyonunu potansiyel ölçümleri ile incelemiştir. Ölçümler sonunda, anodik bölgelerin oluşmasında yüksek rutubet ve yüksek tuz konsantrasyonunun en önemli etken olduğunu saptamıştır.

Betonarme demirlerini korozyondan korumak için beton porozitesinin minimum pas payının ise maksimum olması gerektiğini ortaya koymuştur.

Mozer ve arkadaşları, (1965), koroyon olayını, katodik reaksiyonun kontrol ettiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca beton içindeki farklılıkların da (nem, tuz konsantrasyonu, havalandırma vb.) çok önemli bir etken olduğunu belirtmişlerdir.

Lewis ve Copenhagen, (1966), tuz püskürtme kabinleri içerisinde yaptıkları deneylerde şu sonuçlara varmışlardır:

1. Betonun geçirimsizliği korozyon hızını azaltmaktadır.
2. Beton yüzeyi uygun bir malzeme ile kaplanarak korozyon hızı büyük ölçüde azaltılabilir.

Denghanion ve Locke, (1982), farklı tipteki portland çimentosuyla hazırladıkları beton blokların korozyon hızlarını ölçmüşlerdir. Korozyon hızına etki yapan bütün faktörleri aynı oranlarda kullanırken korozyon hızının farklı çıkması, onları kullanılan çimento cinsinin de korozyon hızı üzerinde önemli bir etken olduğu sonucuna vardırırmıştır.

Doğan, (1989), beton içindeki çeliğin aktif-pasif halini belirlemek ve klorür iyonunun korozyon hızı üzerindeki etkisini incelemek üzere, doygun kireç ve gerçek beton ortamlarında yaptığı deneyler sonucunda şu sonuçlara varmıştır:

1. Beton içinde bulunan çelik, betonun yüksek alkanitesi nedeniyle pasif hale gelmektedir.

2. 355 ppm'in üstünde klorür iyonu içeren betonlarda, çeliğin pasifliği bozulmaktadır.

3. Klorürlü ortamda, çeliğin korozyon hızı ve katodik koruma akım ihtiyacı oldukça yüksektir.

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 oramlarında incelemişlerdir. 120 gün süreyle yapılan ölçümler sonunda, klorür iyonu arttıkça korozyon hızının arttığı sonucuna varmışlardır.

Yapmış olduğumuz bu çalışmada Jang ve Iwasaki tarafından geliştirilmiş olan Galvanik Akım Yöntemi kullanılmıştır.

Bu yöntemle,

a) Değişik klorür konsantrasyonlarında betonarme demirlerinin korozyon hızının zamanla değişimi,

b) Buz eritmek amacıyla tuz yerine kullanılması düşünülen asetat iyonlarının betonarme demirlerinin korozyonu üzerine etkileri,

c) Uçucu küllü çimentolarla yapılmış olan betonların betonarme demirlerinin korozyon hızı üzerindeki etkileri,

Üç ayrı deney seti üzerinde incelenmiştir. Bilinen korozyon hızı ölçüm yöntemleri yerine, deneylerimizde Galvanik Akım yönetimini kullanmak suretiyle, değişik ortamların korozif etki açısından birbiri ile kıyaslanması uzun bir zaman aralığında sürekli olarak kontrol edebilme imkanı sağlamıştır.

3. TEORİK AÇIKLAMALAR

3.1. Korozyon

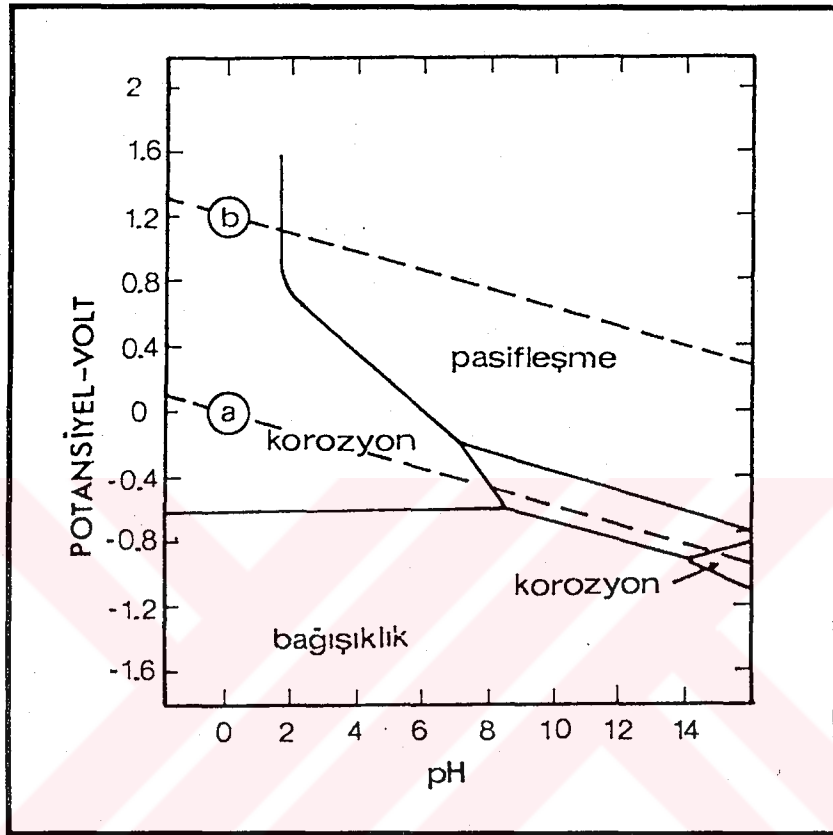
Doğadaki minerallerinden enerji harcanarak elde edilen metaller, doğada buldukları bileşikler haline dönme eğilimindedirler. Metaller doğada en düşük enerji seviyeli bileşikler halinde bulunurlar. Bu serbest enerji azalma eğilimi, korozyon olgusunun yürütücü kuvvetidir. Metalin, bulunduğu ortamın etkisiyle çözünerek metalik özelliğini kaybetmesi olayına korozyon denir.

Korozyon olayı esas itibariyle bir elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşur. Elektrokimyasal korozyon, iyon içeren bir sulu çözelti içinde bulunan metalik malzemede, metal-elektrolit ara yüzeyinde yürüyen elektron transferi sonucu gerçekleşir. Farklı potansiyellere sahip alanların oluşmasıyla bir pil meydana gelir. Anotta oksitlenme sonucu metal iyonları oluşur. Elektronlar metal yüzeyinden potansiyelin daha negatif olduğu bölgelere akar. 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 sonucu elektronlar açığa çıkar. Metal yükseltgenir ve çözünür. Bu elektrokimyasal reaksiyonlar, anot ve katotta aynı anda yürür. Korozyon olayı anotta oluşur.

3.1.1. Demir - Su Sisteminde Korozyon

Demirin sulu çözeltiler içindeki korozyonu ve pasif bölgeleri, elektrolitin pH değeri ve elektrot potansiyeline bağlı olarak

açıklanabilir. Bu konuda Pourbaix (1976), termodinamik hesaplamalara dayanan grafikler ortaya koymuştur (Şekil 3.1.).

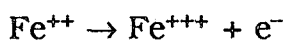
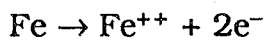


Şekil 3.1. Demir Metalinin Sulu Çözeltiler İçindeki Koroziyifliği (Pourbaix'den 1976)

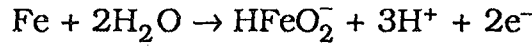
Diyagramda başlıca üç bölge mevcuttur:

1. Korozyon Bölgeleri: Diyagramda iki korozyon bölgesi bulunmaktadır.

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



b) pH değerinin 13'den büyük ve elektrot potansiyelinin -0.8 ile 1.2 V (SHE) arasında olduğu bölge. Burada Şu reaksiyon gerçekleŐmektedir.



2. BaęıŐıklık Bölgesi: Demir elektrot potansiyelinin -0.65 V (SHE)'dan daha negatif olduğu bölgedir. Bu bölgede demir korozyona uğramaz ve pH'dan bağımsızdır. Bu durum, katodik koruma yöntemiyle korozyonu önlemenin temel ilkesini oluşturur.

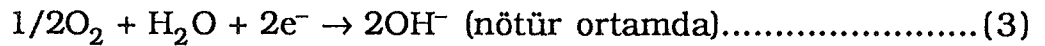
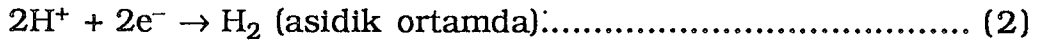
3. Pasiflik Bölgesi: Bu bölgede, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ve $\text{Fe}(\text{OH})_3$ oluŐumuyula metal yüzeyinde bir oksit film oluşur. Oluşan bu film, metal ile elektrolit arasındaki teması keserek, korozyon reaksiyonunu durdurur. Ancak, her hangi bir sebeple, bu film kırılırsa korozyon yeniden başlar. Bu nedenle pasif hal korozyonu önlemede kesin bir çözüm değildir.

3.2. Betonarme Demirleri Korozyonunun Elektrokimyasal Mekanizması

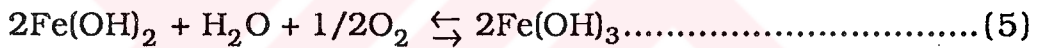
Demirin beton içinde cereyan eden korozyon mekanizması ana prensipler itibariyle elektrolitik içindeki korozyona benzer karakterdedir. Betonun heterojen yapısı nedeniyle farklı elektrokimyasal etkiler oluşmaktadır. Bu etkiler sonucu, betonarme demirlerinin çeŐitli bölgeleri arasında elektropotansiyel farklar meydana gelmektedir. Böylece, oluşan galvanik korozyon hücrelerinde daha negatif elektropotansiyelli bölgeler anot olarak çözünmektedir.



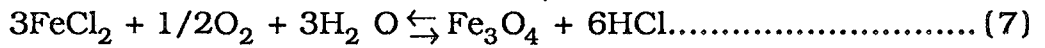
Anot reaksiyonunda oluşan elektronlar metal üzerinden taşınarak katoda gider ve orada aşağıdaki iki reaksiyondan birini oluşturur.



Anodik ve katodik reaksiyonlardan sonra demir $\text{Fe}(\text{OH})_2$ haline dönüşür.



Eğer ortamda yeterli miktarda Cl^{-} iyonu varsa anot reaksiyonu,



şeklinde yürür. Reaksiyon sonunda serbest kalan Cl^{-} iyonu, anot reaksiyonunda kullanılarak, demirin pasifliğini bozar ve sürekli korozyona sebebiyet verir (ACI, 1985).

3.3. Beton İçindeki Çeliğin Korozyonuna Etki Yapan Faktörler

3.3.1. Klorür İyonu Etkisi

Betonarme demirlerinin korozyonuna etki yapan en önemli faktör klorür iyonudur. Hiçbir kirlenici, betonarme demirlerinin

korozyonunda klorür iyonu kadar etkili değildir. Klorür iyonu beton içine iki yolla girer:

a) Beton yapımı sırasında klorür katılımıyla:

Beton prizini çabuklaştırmak için, katkı maddesi olarak önemli miktarda klorür içeren katkı maddeleri kullanılmaktadır. Çimento ağırlığının %2'si oranındaki kalsiyum klorür, çimento hidrotasyonunu büyük ölçüde hızlandırmaktadır. Diğer beton katkı maddelerinde de az miktarda klorür bulunmaktadır (ACI, 1985).

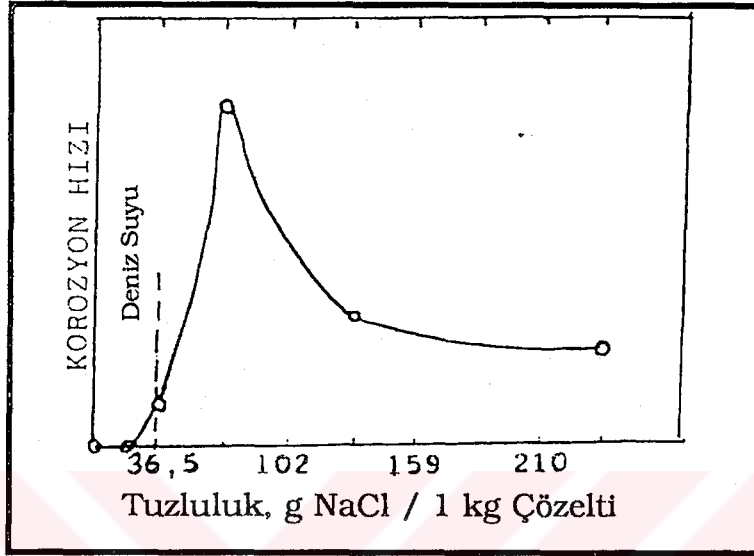
Tatlı suyun bulunmadığı birçok yerde, beton karışım suyu olarak, deniz suyu kullanılmaktadır. Çoğunlukla da denizden çıkarılan kum ve çakıl yıkanmadan kullanılmaktadır. Böylece beton içine önemli miktarda klorür iyonu girmiş olmaktadır.

b) Beton bünyesinde çevreden klorür iyonu difüzyonu ile:

Deniz suyu ile temas, deniz suyunun rüzgarla taşınması veya yollarda buzlanmayı önlemek amacıyla kullanılan tuz, su içinde çözünerek beton boşluklarına difüzlenir. Bunun için betonun çatlamış olması da gerekmemektedir (Griffin, 1967).

Çözelti içinde sodyum klorür konsantrasyonu arttıkça, korozyon hızı artar. Bu artış NaCl konsantrasyonu 75 g NaCl/1kg çözelti değerinde bir maksimuma ulaşır. Bundan sonra tuz konsantrasyonu arttığı halde korozyon hızının azaldığı görülür (Şekil 3.2.). Bunun nedeni tuz konsantrasyonunun fazla olması durumunda oksijen çözünürlüğünün azalmasıdır. çözelti içinde yeteri miktarda

oksijenin bulunmaması korozyon hızını düşürür. Ancak beton içinde tuz konsantrasyonu arttıkça korozyon hızı artar (ACI, 1985).



Şekil 3.2. Sodyum Klorürün Korozyon Hızı Üzerindeki Etkisi (Griffin'den 1967)

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

a) Oksit Filmi Teorisi: Demir yüzeyinde oluşan oksit filmi, korozyona karşı bir kabuk oluşturarak metali pasifleştirir. Ancak klorür iyonlarının girmesiyle bu oksit filmi bozulur ve metal korozyona uğrar.

b) Adsorbsiyon Teorisi: Bu teoriye göre klorür iyonları, oksijen ve hidroksit iyonlarından metal yüzeyinde daha sağlam bir şekilde adsorbe olur. Klorür iyonları metal iyonlarının hidrasyonunu hızlandırır. Böylece oluşan metal hidroksitlerin çözelti içine taşınmasını kolaylaştırır.

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

Korozyon olayının hangi klorür konsantrasyonunda başladığı konusunda, ülkelerin standartlarında farklılıklar bulunmaktadır (Yalçın ve Koç, 1992). Normal ve öngerilimli betonlar için bu standartlar Çizelge 3.1.'de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Korozyon İçin Zararlı Sayılan Klorür Yüzdeleri
(Yalçın ve Koç'dan, 1992)

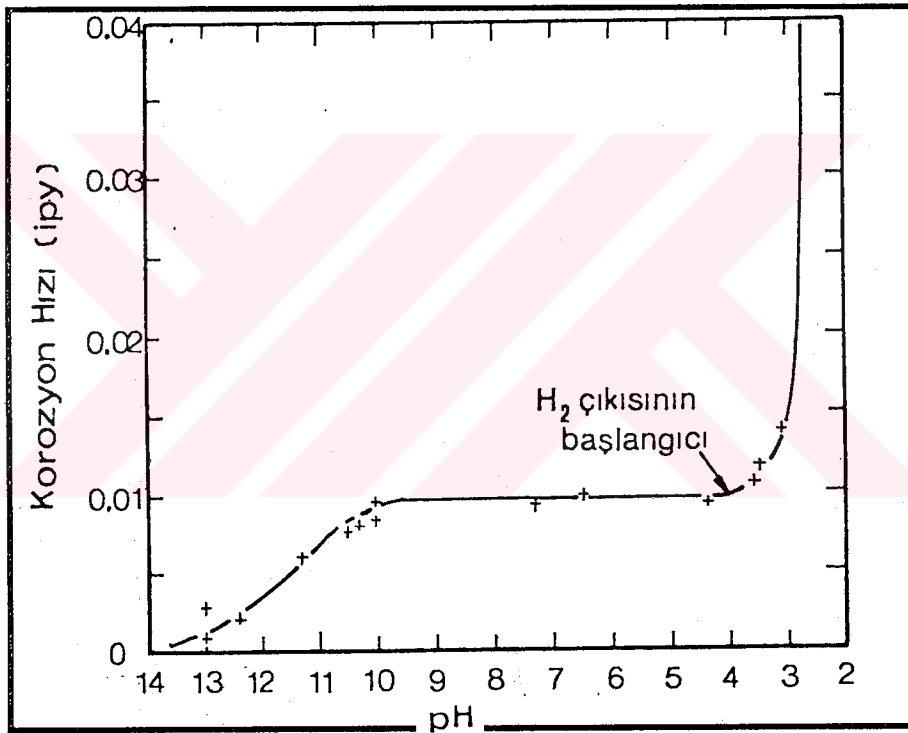
Standart	Normal Beton % Cl^-	Ön Gerilimli Beton % Cl^-
American Concrete Ins.	0.15	0.06
British Code (Cp - 110)	0.35	—
Norwegian Code (NS - 3474)	0.60	0.002*
ASTMC - 114	0.20	0.08*

* Asitte çözünen klorür

3.3.2. pH Etkisi

pH ile elektrot potansiyelleri arasındaki ilişkiyi veren Pourbaix tarafından diyagramında görüldüğü gibi elektrolit pH değerinin korozyon hızı üzerinde önemli etkisi vardır (Şekil 3.1.).

Korozyon hızının pH ile değişimini daha açık bir şekilde veren grafik Şekil 3.3.'te görülmektedir.



Şekil 3.3. Çeliğin Korozyon Hızının pH'la Değişimi (Uhlig, 1971)

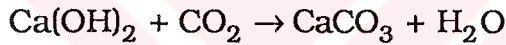
pH'in 10'dan büyük olduğu bölgede, demir pasif durumdadır. Bu bölgede demir yüzeyi bir oksit tabakasıyla kaplanarak koruyucu bir kabuk oluşturmaktadır. Beton boşluk suyunun pH'ı 12 ile 13 aralığında olması, betonarme demirlerinin pasif halde olmasını sağlar.

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

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

3.3.3. Karbondioksit Etkisi

Karbondioksit beton içine difüzlenererek, beton boşluk suyu içinde bulunan Ca(OH)_2 ile tepkimeye girer.



Bunun sonucunda betonun pH'ı düşer. Buna benzer etkiyi SO_x gazları da yapabilir. pH'ın düşüşü, korozyon hızını artıran bir etkendir.

Karbonatlaşma olayı, kuru atmosfer etkisi altında kalan betonlarda daha fazladır. Su altında kalan betonlarda ve yer altında bulunan betonlarda karbonatlaşma olayı olmaz. Yüzeyleri sıvasız ve boyasız olan eski betonların pH değerleri, karbonatlaşma nedeniyle oldukça düşüktür (ACI, 1985).

3.3.4. Rutubetin Etkisi

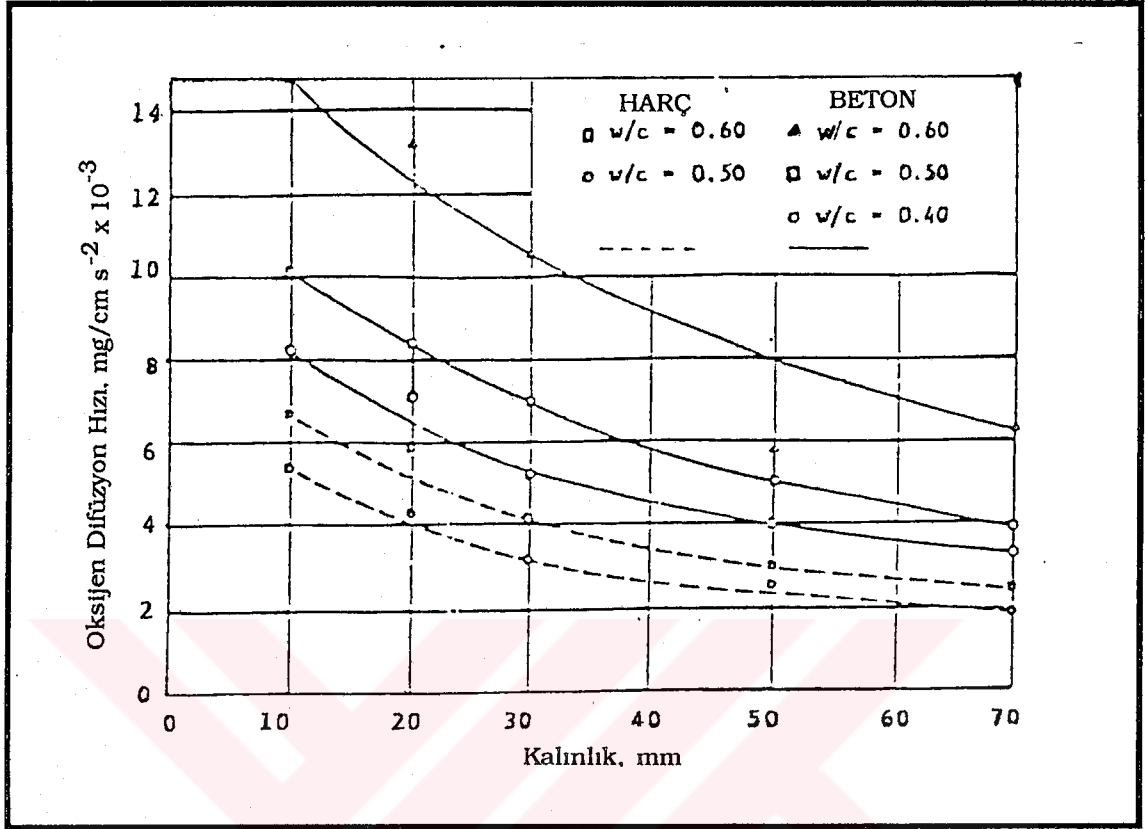
Korozyon olayının gerçekleşmesi için mutlak surette suyun bulunması gerekir. Su beton içine girerken, genellikle beraberinde korozif etkenleri de taşır. Klorür iyonu beton bünyesine su ile birlikte girmektedir. Beton rutubeti, beton içine oksijen difüzyonu açısından

son derece önemlidir. Betonun doygun rutubetli olması halinde, beton içine oksijen ve karbondioksit girmesi son derece güçleşmektedir.

Beton rutubeti, betonun elektriksel iletkenliği açısından da önemli bir etkindir. Beton direnci, başlangıçta çok düşüktür. Ancak, beton zamanla kurudukça beton direnci artar. 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).

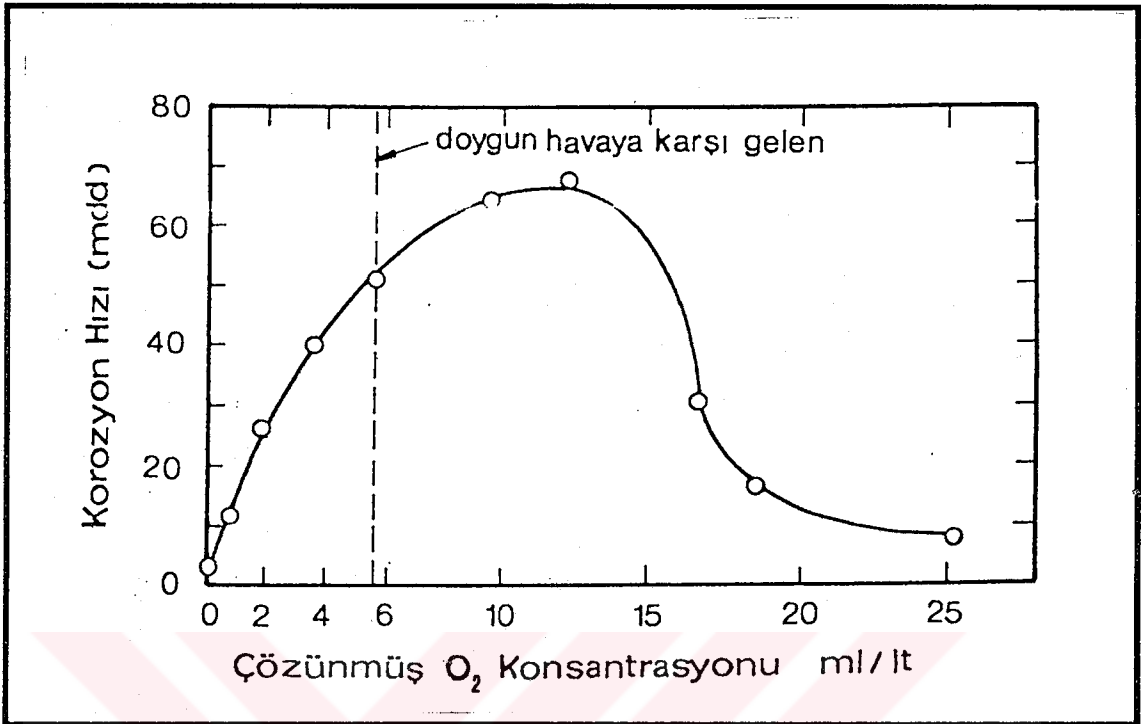
3.3.5. Oksijen Difüzyonunun Etkisi

Beton içindeki çeliğin korozyonu, kototta oksijen indirgenmesi reaksiyonu ile yürür. Bu nedenle korozyon hızı, beton içine difüzlenen oksijen hızına bağlıdır. Beton bünyesine oksijen girişi önlenbilirse, korozyon tamamiyle önlenbilir. Şekil 3.4.'te su ile doygun halde bulunan değişik su/çimento oranındaki beton blokların içine oksijen difüzyon hızının, beton kalınlığına göre değişimi görülmektedir (Gjorv and et al., 1976).



Şekil 3.4. Oksijen Difüzyonunun Kalınlık İle Değişimi (Gjorv and et al.'dan 1976)

Betonarme demirlerin 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. Oksijen, beton içinde suda çözülmüş halde bulunur. Korozyon hızının, çözülmüş oksijen konsantrasyonuna göre değişimi Şekil 3.5.'te görülmektedir (Uhling, 1971).



Şekil 3.5. Çözünmüş Oksijen Konsantrasyonunun, Betonarme Demirleri Korozyon Hızı Üzerindeki Etkisi (Uhlig'den, 1971)

Şekilde görüldüğü üzere, maksimum korozyon hızı 12 ml O₂/l H₂O oksijen konsantrasyonuna karşı gelmektedir. Daha yüksek oksijen konsantrasyonunda çelik pasifleşmektedir.

3.3.6. Beton Kalitesi

Betonarme demirlerinin korozyonuna etki yapan önemli faktörlerden biri de beton permeabilitesidir. Beton permeabilitesini, değiştiren başlıca etkenler ise şunlardır:

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

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.

3.3.7. 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).

3.3.8. İnhibitör Etkisi

Korozyon hızını yavaşlatan kimyasal maddelere "inhibitör" denir. Çeliğin korozyonunu önlemede bir çok 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, potasyum dikromat, kolay(2) klorür, çinko kromat, kurşun kromat, sodyum nitrit ve kalsiyum nitrittir. En çok kullanılan organik inhibitörler ise, sodyum benzoat, etil anilin ve merkaptobenzotiazoldur. İnhibitörler beton içinde 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 et. al., 1977).

3.4. Korozyon Hızı Ölçüm Yöntemleri

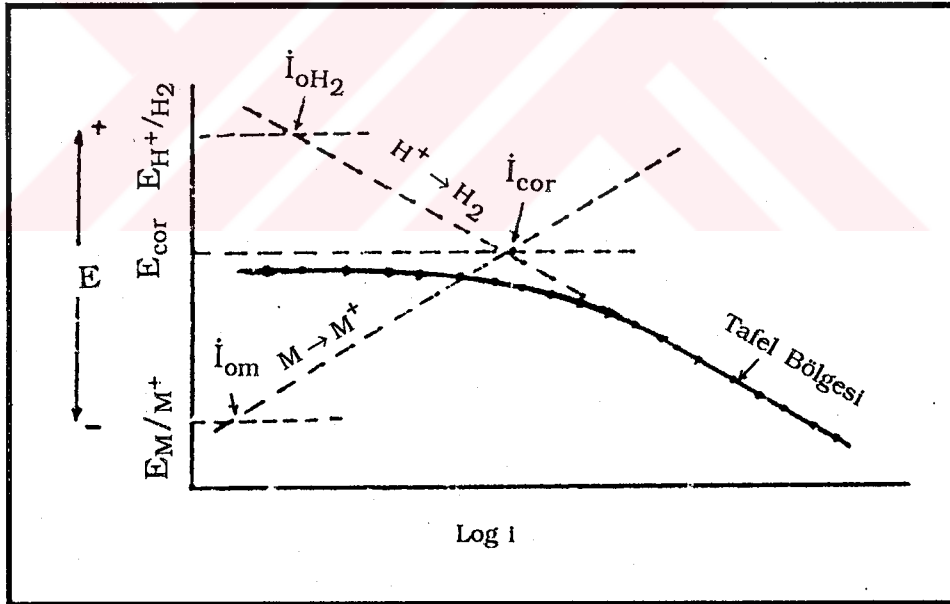
Korozyon hızı değişik yöntemlerle ölçülmektedir. En çok kullanılan yöntemler şunlardır:

3.4.1. Ağırlık Kaybı Yöntemi

Korozif ortamda bulunan metalin birim zaman ve birim yüzey alanındaki ağırlık kaybı, metalin korozyon hızını verir. Bu yöntem, basitlik ve uygulamadaki bazı kolaylıklarına karşın, korozyon hızının yavaş olduğu ve korozyon hızının homojen dağılım göstermediği hallerde güvenilir sonuçlar vemez. Elektrokimyasal yöntemlere göre oldukça ilkel bir yöntemdir.

3.4.2. Elektrokimyasal Yöntemler

a) Polarizasyon - Kırılma 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 yöntemde hem anodik hem de katodik polarizasyon eğrileri elde edilebilir. Şekil 3.6'da oksijensiz bir asit çözeltisine daldırılan bir metalin katodik polarizasyon eğrisi görülmektedir.



Şekil 3.6. Oksijensiz Asit Çözeltisindeki Metalin katodik Polarizasyon Eğrisi (Fontane and Greene'den, 1978)

Metale akım uygulanmadan ölçülen potansiyel değeri E_{cor} 'dur. Şekil 3.6.'da görüldüğü gibi düşük akım yoğunluklarında (μ -logi)

polarizasyon eğrisi lineer değildir. Ancak akım değerinin artmasıyla sonuçta bir lineerleşme gözlenmektedir. Bu bölgeye "Tafel Bölgesi" denir.

Dışardan uygulanan katodik akım, metalin korozyon akımından daha yüksek olursa, anodik akımlar katodik akımlar yanında ihmal edilebilir. Pratikte bu olay 50mV'dan yüksek polarizasyon değerinde gerçekleşebilir. Böylece aşırı gerilim ile uygulanan dış akımın logaritması lineer bir değişim gösterir. Şekil 3.6.'da metalin çözünmesi (anodik reaksiyon) ve hidrojen çıkışı (katodik reaksiyon) kesikli çizgilerle verilmiştir. Grafikten görüleceği üzere, yüksek katodik akım yoğunluğu uygulandığında, katodik polarizasyon eğrisi ile hidrojen çıkış doğrusu birbiri ile çakışmaktadır. İşte bu lineer bölge korozyon potansiyeli değerine ekstrapole edilirse korozyon hızı bulunabilir. Korozyon potansiyelinde hidrojen çıkış hızı, metalin çözünme hızına eşit olacaktır. Dolayısıyla bu noktaya karşı gelen akım yoğunluğu metalin korozyon hızı olarak kabul edilebilir.

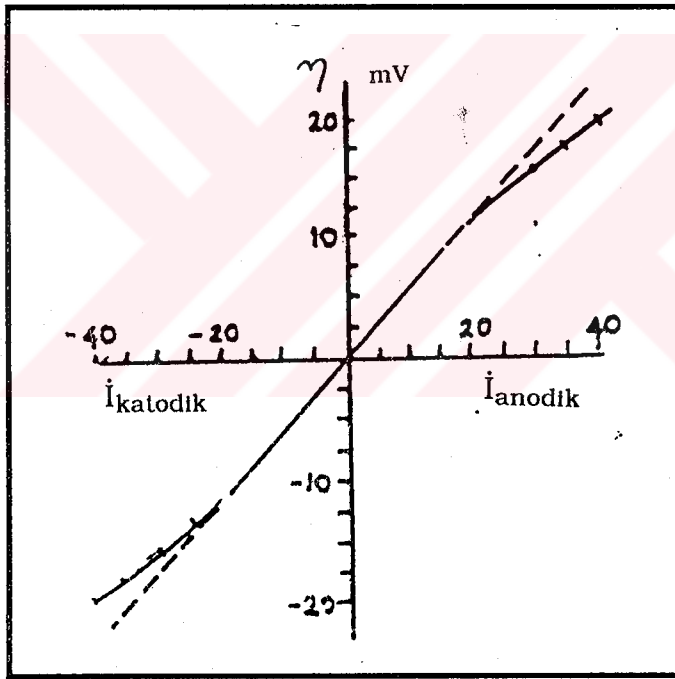
İdeal şartlar altında bulunan sistemlerde, ekstrapolasyon yöntemi ile bulunan korozyon hızı, ağırlık kaybı yöntemi ile bulunan korozyon hızı değerine eşit veya ondan biraz yüksektir. Bu teknik ile çok küçük korozyon hızlarını dahi ölçmek mümkündür. Ayrıca bu yöntemle sürekli olarak korozyon hızı ölçülebilir.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

Bu yöntemle, duyarlı bir sonuç elde edebilmek için Tafel Bölgesi en az 10 kat akım bölgesinde lineer olarak devam etmelidir.

Birçok deneyde bu lineer bölge istenildiği kadar uzun olmaz. Bunun sebebi konsantrasyon polarizasyonu etkisidir.

b) Lineer Polarizasyon Yöntemi

Polarizasyon - kırılma yönteminin dezavatajları lineer polarizasyon yöntemi ile giderilmiştir. Korozyon potansiyelinin $\pm 10\text{mV}$ yakınında uygulanan dış akım ile aktivasyon aşırı gerilimin lineer olarak değiştiği gözlenmiştir. Bu durum Şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.7. Dış Akıma Karşı Polarizasyon Aşırı Gerilimi (Atkinson and Vantroffelaar'dan, 1985)

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

$$\left(\frac{\Delta E}{\Delta I}\right) = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 I_{cor} (\beta_a + \beta_c)} \dots\dots\dots (3.1)$$

$\left(\frac{\Delta E}{\Delta I}\right)$: Polarizasyon direnci, mV/mA

i_{cor} : Korozyon hızı, mA

β_a, β_c : Anodik ve katodik reaksiyon için Tafel sabitleri, mV

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

$$\left(\frac{\Delta E}{\Delta I}\right) = \frac{0.026}{i_{cor}} \dots\dots\dots(3.2)$$

bağıntısı elde edilebilir. Polarizasyon direnci ölçüldüğü takdirde, (3.2) bağıntısıyla korozyon hızı rahatlıkla bulunabilir.

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

3.4.3. 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 değerleri ile betonarme demirlerinin korozyonunu aşağıdaki şekilde değerlendirmektedir.

1. Potansiyelin -0.20 V ile -0.35 V (SCE) arasında olduğu değerlerde, betonarme demirlerinin korozyonu için kesin bir karar verilemez.

2. Potansiyelin -0.20 V (SCE)'den daha pozitif olduğu değerlerde korozyon olayı gerçekleşmemekte, betonarme demirleri pasif halde bulunmaktadır.

3. Potansiyelin -0.35 V (SCE)'dan daha negatif olduğu değerlerde, betonarme demirlerinde aktif halde korozyon söz konusu olmaktadır.

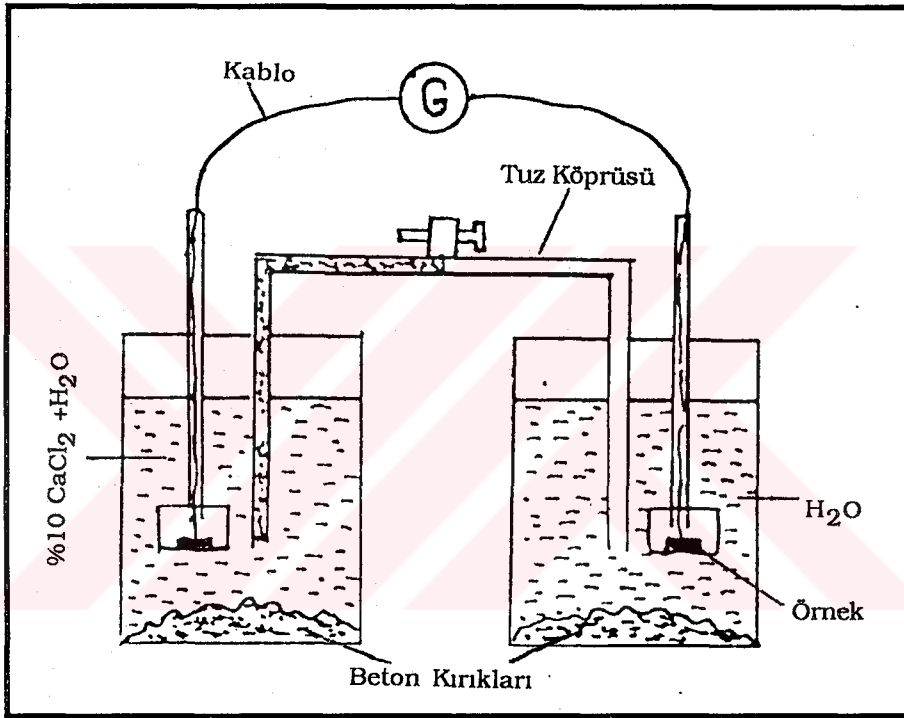
3.4.4. Galvanik Akım Yöntemi

Aynı çözeltili içine daldırılan iki farklı metal arasında bir potansiyel farkı oluşur. Bu iki metal bir iletkenle birbirine bağlanırsa pil oluşur ve devreden akım geçmeye başlar. Buna galvanik korozyon denir. Farklı konsantrasyondaki çözeltilere aynı metalin daldırılması halinde yine bir pil oluşur. Buna konsantrasyon pili denir. Düşük konsantrasyonlu çözeltili içerisindeki metal korozyona uğrar. Galvanik Akım yöntemi bu prensibe dayanır. Bu yöntemle beton içinde bulunan klorür konsantrasyonunun korozyon hızına etkisi tayin edilebilir.

Galvanik Akım yöntemi ilk defa Jang ve Iwasaki tarafından kullanıldı (1991). araştırmacılar "galvanik akım yöntemi" adını verdikleri bu yöntemi iki farklı şekilde uyguladılar.

İki adet betonarme demirinden biri klorür içeren, diğeri klorür içermeyen, beton kırıkları bulunan çözeltili içine daldırılmıştır.

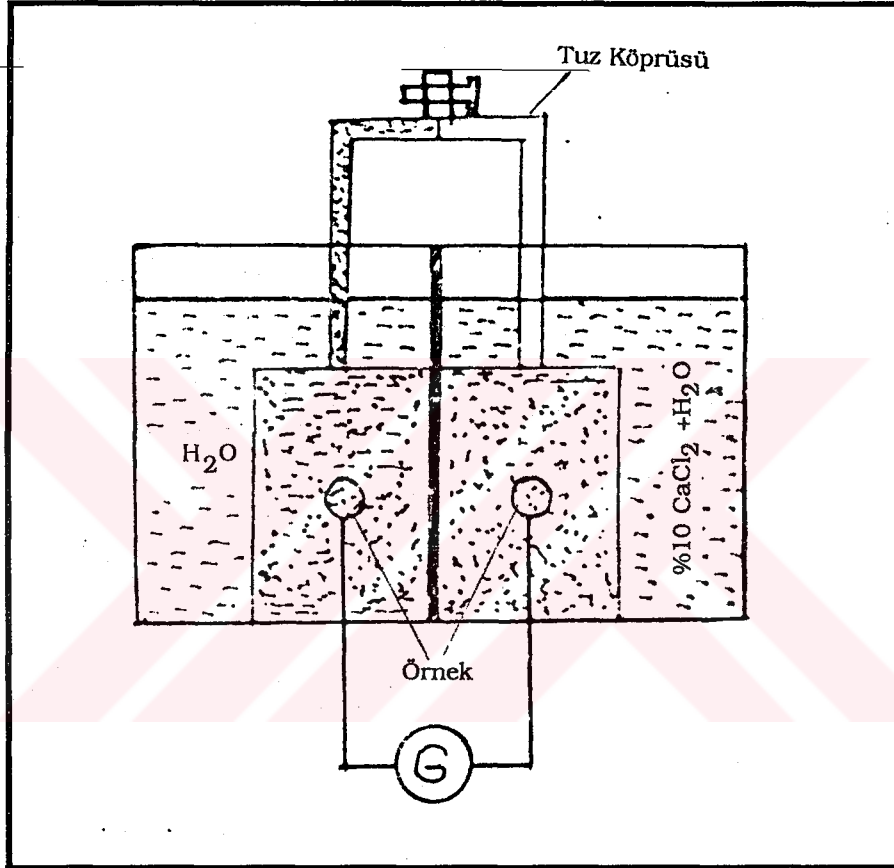
Betonarme demirleri bir kablo ile birbirine bağlanmıştır. Çözeltiler ise, doygun amonyum nitrat tuz köprüsüyle birbirine temas ettirilmiştir. Hücrelerden geçen akım miktarı sıfır dirençli bir ampermetreden okunmuştur. Ayrıca elektrotlar arasındaki potansiyel farkı da ölçülmüştür (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Galvanik Akım Yönteminin Deney Düzenegi (Jang and Iwasaki'den, 1991)

Deney çözeltileri, 500 ml. damıtık su içine 25 g. beton parçacıkları konularak hazırlanmıştır. Beton parçacıkları 3 mm.'lik tane boyutuna kadar ezilmiştir. Klorürlü çözelti olarak %0.1, %1.0 ve %10'luk CaCl_2 çözeltiler kullanılmıştır. Her iki çözeltinin pH değeri yaklaşık 12.5'tur.

Jang ve Iwasaki tarafından aynı deney, beton parçacıkları yerine, 2.0 x 5.0 x 2.5 İnc.'lik iki beton blok kullanılarak da yapılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Gerçek Beton Bloklara Galvanik Akım Yönteminin Uygulanması (Jang ve Iwasaki'den, 1991)

Bu durumda betonlar arasına bir perde konulmuştur. Beton bloklardan biri su içine diğeri klorürlü çözelti içine daldırılmıştır. Beton bloklar bir tuz köprüsü ile birbirine bağlanmıştır. Her iki beton blok içine konulmuş olan çelik numune arasındaki galvanik akım sıfır dirençli bir ampermetre ile okunmuştur.

4. DENEYSEL MATERİYAL VE METOD

Klorür ve asetat iyonlarının, betonarme demirlerinin korozyonuna etkisi 12 adet beton numunesi üzerinde incelendi. Uçucu küllü çimentoların klorürlü ortamdaki korozyonunu incelemek üzere ayrıca 6 adet beton numunesi daha hazırlandı.

Bütün deneylerde daima aynı cins çelik elektrot ve aynı özellikte beton kullanıldı. Beton karışımı kalıplara konurken aynı oranda sıkıştırılmaya özen gösterilmiştir. Böylece elde edilen betonların fiziksel yapısının (porozite ve permeabilite) aynı kalması sağlanmıştır.

Beton numuneleri kalıplarda 24 saat bekletildikten sonra kalıplar sökülmiş ve betonlar laboratuvar ortamında atmosferde bekletilmiştir.

4.1. Elektrotların Hazırlanması

Çalışmalarda elektrot olarak, İskenderun Demir Çelik fabrikalarında üretilen ve kimyasal bileşimi Çizelge 4.1.'de verilen 8 mm.'lik yumuşak çelik (inşaat demiri) kullanıldı.

Çizelge 4.1. İnşaat Demirinin Kimyasal Bileşimi

%C	%Mn	%Ni	%Si	%P	%S
0.100	0.250	0.150	0.070	0.040	0.030

Elektrot olarak kullanılmak üzere, bu demirden 13 cm boyunda 36 adet çubuk kesildi. Çubukların 10 cm²'lik yüzey alanı tornalanıp yüzeyde bulunan pas tabakası temizlendi. Daha sonra,

izopropil alkolle yıkanarak kurutuldu. Geri kalan kısmı ise, epoksi boya ve pelietilen sargıyla sarılarak izole edildi. Elektrotların oksitlenmemesi için, beton dökümüne kadar bir desikatörde saklandı.

4.2. Beton Örneklerinin Hazırlanması

Beton örnekleri için, 10 cm x 20 cm x 10 cm boyutlarında 3 adet ahşap kalıp hazırlandı. Betonların kalıplara yapışmaması için, kalıplar beton dökümünden önce, her seferinde yağlandı.

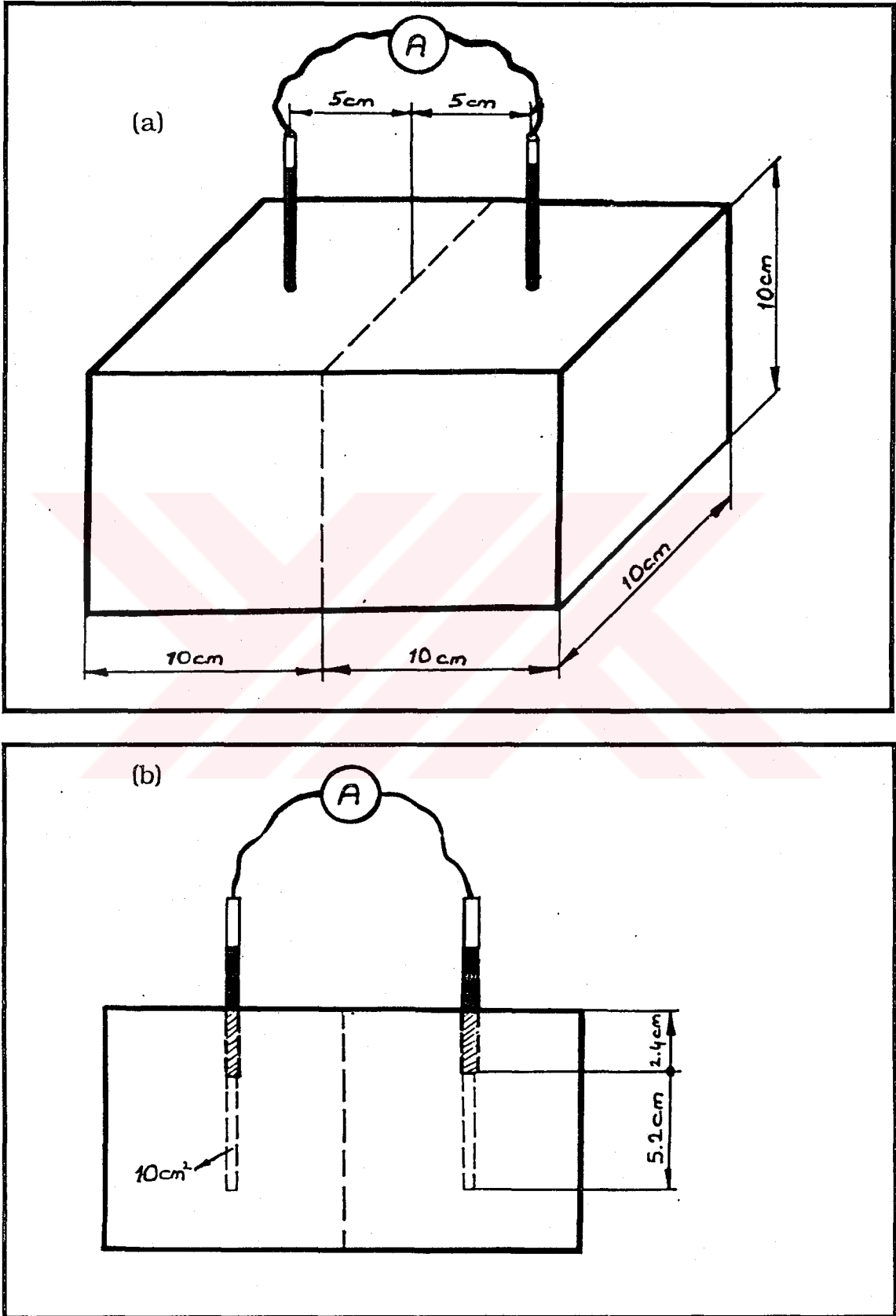
Birbirine yapışık olarak hazırlanmış olan beton bloklardan biri katkılı, diğeri katkısız olarak hazırlanmıştır. Katkı cinsine göre üç grup beton numunesi üzerinde çalışılmıştır. Bu numunelerin özellikleri Çizelge 4.2.'de verilmektedir.

Her gruptan farklı konsantrasyonlarda altı adet beton örneği hazırlanmıştır. A ve C grubu beton örneklerine sırasıyla çimento ağırlığının %0.250, %0.625, %1.250, %2.500, %5.000, %12.500 oranında sodyum klorür katılmıştır. C grubunun çimentosu %30 uçucu kül ihtiva edecek şekilde harmanlanmıştır. Uçucu kül olarak Tunçbilek Termik Santralinde elde edilen elektrofiltre altı küller kullanılmıştır.

Beton dökümü sırasında, 20 cm'lik kalıp boyunun ortasına ince bir levha yerleştirilerek, 10 cm x 10 cm x 10 cm boyutlarında iki bölme oluşturulmuştur. Bölmelerden biri normal beton ile doldurulurken, diğesine klorür, asetat ve uçucu kül katkılı beton yerleştirilmiştir. Böylece bileşimleri farklı, birbirine bitişik iki adet galvanik hücre oluşturulmuştur.

Çizelge 4.2. Beton Örneklerinin Katkı Oranları

NUMUNE		BETON BLOKLAR			
GRUP	NO	SOL	SAĞ		
A	SODYUM KLORÜR	A	Normal Beton		$\frac{\text{NaCl}}{\text{Çimento}}$
		A ₁	"	%0.250	0.530
		A ₂	"	%0.625	1.325
		A ₃	"	%1.250	2.650
		A ₄	"	%2.500	5.300
		A ₅	"	%5.000	10.600
		A ₆	"	%12.500	26.500
B	KALSİYUM ASETAT	B	Normal Beton	$\frac{\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2}{\text{Çimento}}$	$\frac{\text{kg Asetat}}{1 \text{ m}^3 \text{ Beton}}$
		B ₁	"	%0.340	0.850
		B ₂	"	%0.850	2.125
		B ₃	"	%1.700	4.250
		B ₄	"	%3.400	8.500
		B ₅	"	%6.800	17.000
		B ₆	"	%17.000	42.500
C	UÇUCU KÜL + NaCl	C	%30 Uçucu Küllü Beton	$\frac{\text{NaCl}}{\%30 \text{ U.Küllü Çim.}}$	$\frac{\text{kg Klorür}}{1 \text{ m}^3 \text{ Beton}}$
		C ₁	"	%0.250	0.530
		C ₂	"	%0.625	1.325
		C ₃	"	%1.250	2.650
		C ₄	"	%2.500	5.300
		C ₅	"	%5.000	10.600
		C ₆	"	%12.500	26.500



Şekil 4.1. Bitişik Beton Blokları

Sol b6lmeye doldurulan normal betonun, bileşen miktarları çizelge 4.3.'te verilmektedir. Bu bileşen miktarları, tüm beton örneklerinin sol bölmesinde sabit tutulmuştur.

Çizelge 4.3. Beton Karışımı (1 Blok İçin)

Bileşenler	Miktar, g
Çimento*	400
Kum	800
Çakıl	1200
Su	240
Katkı	(değişik)
su/çimento = 0.60	

* Kullanılan Portland çimentosunun kimyasal analizi Çizelge 4.4.'te verilmektedir.

Çizelge 4.4. Portland Çimentosunun Kimyasal Analizi

Bileşenler	% (Kütlesel)
SiO ₂	13.25
Al ₂ O ₃	6.85
Fe ₂ O ₃	4.75
CaO	51.85
MgO	2.45
SO ₃	3.18
Na ₂ O + K ₂ O	2.22
Serbest CaO	0.47
Çözünmeyen Kalıntı	13.28

4.3. Galvanik Akım Ölçümleri

Bu ölçümlerde, klorürlü (A), asetatlı (B), uçucu küllü (C) numunelerinde periyodik olarak galvanik akım değerleri ölçülmüştür. Bağıl korozyon hızları galvanik hücrelerden geçen galvanik akımın elektrot yüzey alanına bölünmesiyle belirlenmiştir.

Galvanik akım ölçümleri 60 gün süresince her gün yapılmıştır. Elde edilen değerler çizelge 4.5., 4.7. ve 4.9.'de tablo halinde, şekil 3.11., 3.13. ve 3.15.'de grafiksel olarak verilmiştir.

4.4. Korozyon Potansiyeli Ölçümleri:

Korozyon potansiyelleri ASTM-C-876-91'e uygun olarak 60 gün süresince her gün yapılmıştır. Ölçümlerde referans elektrot olarak doygun Bakır/Bakır Sülfat referans elektrodu kullanılmıştır. Omik direnç etkisini gidermek amacıyla referans elektrodun ucu ıslak bir sünger ile kaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, çizelge 4.6., 4.8., 4.10.'da tablo halinde, şekil 3.12., 3.14., ve 3.16.'da grafiksel olarak verilmektedir.

Çizelge 4.5. Sodyum Klorürlü Beton Örneklerinde Galvanik Akımın Zamanla Değişimi

Zaman (Gün)	A1(μ A)	A2(μ A)	A3(μ A)	A4(μ A)	A5(μ A)	A6(μ A)
1	10.0	14.3	27.3	21.6	24.0	24.1
2	9.9	11.0	15.0	21.2	25.0	25.8
3	7.1	8.1	8.2	11.6	19.8	25.0
4	3.5	4.8	6.6	9.5	13.0	22.9
7	4.4	4.8	5.3	6.4	16.0	26.0
8	3.2	4.7	4.9	5.7	9.8	20.0
9	3.2	3.9	4.1	4.8	9.0	18.8
10	2.6	2.5	3.1	3.8	7.5	15.8
12	2.4	1.6	2.6	4.1	7.2	15.3
13	2.2	1.4	3.6	4.0	6.9	15.0
14	1.8	1.2	3.4	4.0	6.7	14.6
15	1.3	1.4	2.1	3.5	6.1	13.8
16	1.3	1.1	1.5	3.3	5.3	12.9
19	0.7	0.9	1.6	3.4	4.7	12.2
21	0.7	0.1	1.6	3.4	4.7	12.4
22	0.8	0.9	1.5	3.0	4.5	11.4
23	0.7	0.8	1.1	3.0	4.5	11.4
24	0.8	0.9	1.3	2.2	3.6	9.2
28	0.4	0.6	0.9	2.0	3.5	8.5
29	0.4	0.6	0.9	1.9	3.3	8.0
30	0.5	0.8	0.9	1.9	3.2	7.8
31	0.4	0.5	0.6	1.5	3.0	7.0
32	0.3	0.3	0.4	1.3	2.7	6.4
35	0.2	0.3	0.5	1.5	3.1	7.0
36	0.2	0.3	0.5	1.7	3.1	6.7
37	0.2	0.2	0.5	1.8	3.0	6.5
38	0.2	0.2	0.5	1.7	2.8	5.9
39	0.2	0.2	0.5	1.6	2.5	5.0
41	0.2	0.3	0.4	1.5	2.5	5.0
42	0.2	0.2	0.4	1.5	2.2	4.9
43	0.2	0.2	0.3	1.6	2.2	5.0
44	0.1	0.1	0.3	1.7	2.3	5.4
45	0.1	0.1	0.3	1.6	2.2	5.3
46	0.1	0.1	0.3	1.6	2.4	5.2
50	0.1	0.1	0.2	0.9	2.3	6.0
59	0.1	0.1	0.2	0.1	2.4	6.0
60	0.1	0.1	0.2	0.7	1.8	4.9
63	0.1	0.1	0.2	0.6	1.7	5.2
64	0.1	0.1	0.2	0.6	1.7	5.2
65	0.1	0.1	0.2	0.6	1.7	5.2

Çizelge 4.6. Sodyum Klürorlü Beton Örneklerinde korozyon Potansiyelinin Zamanla Değişimi

Zaman (Gün)	A1(mV)	A2(mV)	A3(mV)	A4(mV)	A5(mV)	A6(mV)
1	-509	-537	-578	-540	-581	-607
2	-470	-478	-543	-562	-570	-587
3	-420	-475	-514	-516	-547	-574
6	-402	-465	-486	-470	-532	-574
7	-387	-457	-464	-468	-530	-560
8	-359	-362	-437	-450	-530	-553
9	-353	-360	-387	-423	-516	-562
10	-279	-303	-359	-420	-514	-561
12	-250	-299	-356	-413	-508	-560
13	-238	-258	-350	-421	-510	-584
14	-207	-288	-346	-418	-496	-558
15	-156	-265	-328	-375	-465	-531
16	-126	-243	-287	-393	-480	-556
19	-144	-221	-255	-410	-490	-560
21	-153	-192	-259	-362	-475	-553
22	-161	-173	-244	-387	-469	-555
23	-161	-185	-233	-366	-461	-539
24	115	-175	-229	-357	-473	-543
28	-111	-114	-237	-327	-435	-501
29	-94	-114	-236	-341	-443	-514
30	-63	-115	-233	-344	-457	-526
31	-85	-111	-230	-338	-458	-513
32	-78	-105	-228	-327	-460	-513
35	-76	-95	-236	-262	-360	-468
36	-52	-77	-196	-328	-402	-452
37	-59	-108	-188	-327	-450	-491
38	-47	-81	-210	-329	-457	-479
39	-72	-90	-196	-362	-454	-478
41	-86	-97	-210	-373	-453	-497
42	-71	-97	-204	-369	-452	-495
43	-79	-80	-215	-370	-464	-507
44	-79	-81	-205	-370	-470	-519
45	-74	-80	-212	-371	484	-520
46	-64	-80	-204	-292	-455	-524
50	-50	-99	-172	-301	-442	-502
59	-42	-95	-189	-277	-439	-504
60	-20	-56	175	-231	-420	-494

Çizelge 4.7. Kalsiyum Asetatlı Beton Örneklerinde Galvanik Akımın Zamanla Değişimi

Zaman (Gün)	B1(μ A)	B2(μ A)	B3(μ A)	B4(μ A)	B5(μ A)	B6(μ A)
1	5.7	8.0	10.0	12.0	13.2	15.6
2	2.2	4.8	4.9	9.0	8.6	11.7
3	1.4	2.9	2.1	6.6	5.9	12.0
4	1.2	1.7	1.3	5.5	5.0	7.8
7	1.0	1.0	0.9	4.6	4.8	8.2
8	1.4	1.3	0.7	3.7	4.4	12.4
9	1.1	1.0	0.8	2.7	3.6	12.5
10	1.1	1.0	0.8	1.3	2.6	13.0
12	0.8	0.7	0.7	1.1	1.9	11.4
13	0.7	0.8	0.6	1.1	1.6	10.0
14	0.5	0.7	0.7	1.1	1.3	8.8
15	0.2	0.5	0.6	1.1	1.4	7.1
16	0.1	0.4	0.6	1.1	1.4	6.5
19	0.1	0.3	0.5	1.1	1.2	6.0
21	0.1	0.3	0.5	0.9	1.4	5.6
22	0.2	0.3	0.4	0.9	1.3	4.2
23	0.1	0.3	0.3	0.5	1.2	3.7
24	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	3.2
28	0	0.1	0.3	0.5	0.9	3.0
29	0	0.1	0.2	0.4	0.8	2.1
30	0	0.1	0.1	0.3	0.6	2.0
31	0	0.1	0.2	0.2	0.5	2.1
32	0	0.1	0.2	0.2	0.4	1.7
35	0	0.1	0.1	0.2	0.3	1.7
36	0	0.1	0.1	0.2	0.2	1.4
37	0	0	0.1	0.1	0.2	1.2
38	0	0	0.1	0.1	0.1	0.7
39	0	0	0	0.1	0.1	0.7
41	0	0	0	0.1	0.1	0.8
42	0	0	0	0	0.1	0.8
43	0	0	0	0	0.1	0.6
44	0	0	0	0	0.1	0.5
45	0	0	0	0	0	0.5
46	0	0	0	0	0	0.5
50	0	0	0	0	0	0.5
59	0	0	0	0	0	0.5
60	0	0	0	0	0	0.2
63	0	0	0	0	0	0.2
64	0	0	0	0	0	0.2
65	0	0	0	0	0	0.2

Çizelge 4.8. Kalsiyum Asetatlı Beton Örneklerinde Korozyon Potansiyelinin Zamanla Değişimi

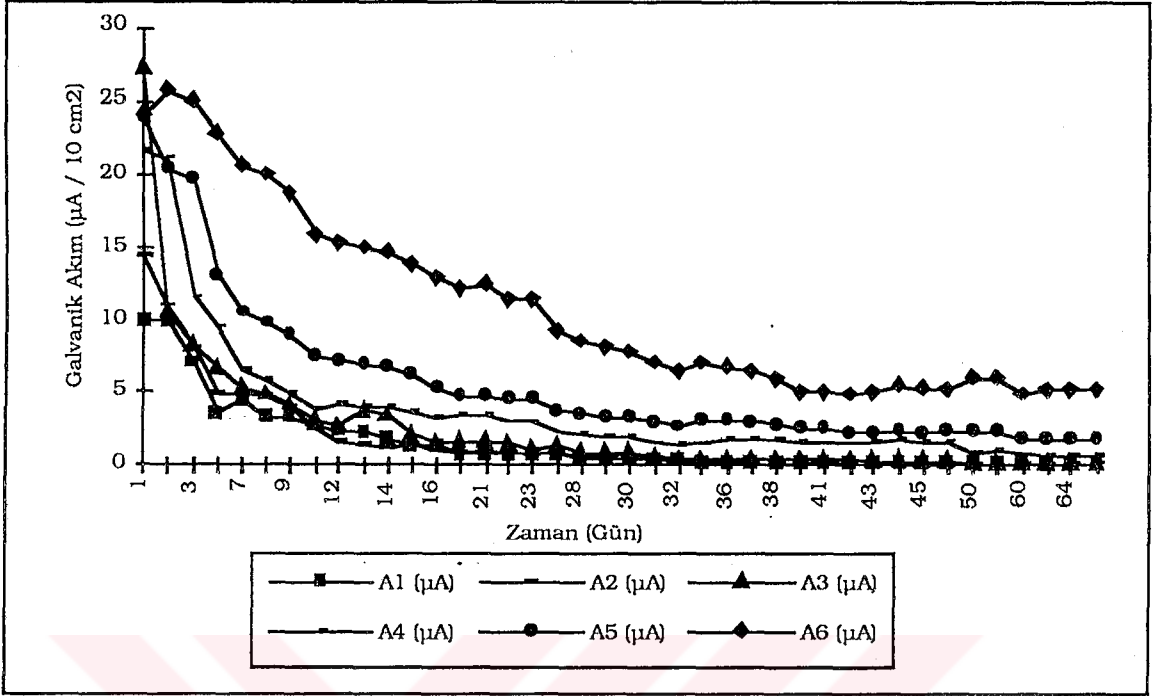
Zaman (Gün)	B1(mV)	B2(mV)	B3(mV)	B4(mV)	B5(mV)	B6(mV)
1	-429	-415	-353	-576	-604	-542
2	-315	-322	-307	-479	-525	-611
3	-307	-277	-294	-475	-508	-512
6	-362	-205	-235	-468	-460	-556
7	-281	-170	-204	-450	-451	-480
8	-242	-111	-191	-404	-430	-487
9	-228	-99	-140	-334	-395	-530
10	-191	-89	-120	-256	-275	-500
12	-163	-86	-144	-259	-269	-490
13	-76	-78	-69	-254	-204	-470
14	-66	-24	-57	-250	-186	-470
15	-56	-18	-56	-200	-190	-431
16	-42	-22	-30	-179	-140	-425
19	-41	-30	-23	-168	-157	-440
21	-36	-17	-12	-80	-50	-400
22	-22	-18	-10	-48	-29	-379
23	-5	-17	-13	-36	-68	-376
24	-8	-15	-12	-45	-54	-374
28	-8	-14	-10	-34	-52	-329
29	-9	-13	-17	-28	-50	-328
30	-7	-12	-16	-32	-44	-296
31	-8	-12	-18	-31	-49	-302
32	-7	-13	-13	-28	-45	-309
35	-7	-12	-13	-29	-42	-296
36	-6	-11	-12	-25	-40	-250
37	-6	-11	-13	-24	-40	-243
38	-5	-11	-12	-22	-38	-238
39	-6	-10	-12	-21	-38	-231
41	-5	-10	-11	-21	-39	-223
42	-5	-10	-11	-21	-37	-230
43	-5	-8	-10	-20	-35	-231
44	-4	-9	-10	-18	-34	-230
45	-4	-9	-10	19	-32	-226
46	-4	-9	-10	-19	-33	-225
50	-3	-7	-8	-15	-30	-224
59	-1	-4	-7	-13	-30	-225
60	-1	-4	-7	-13	-30	-224

Çizelge 4.9. Uçucu Küllü Beton Örneklerinde Galvanik Akımın Zamanla Değişimi

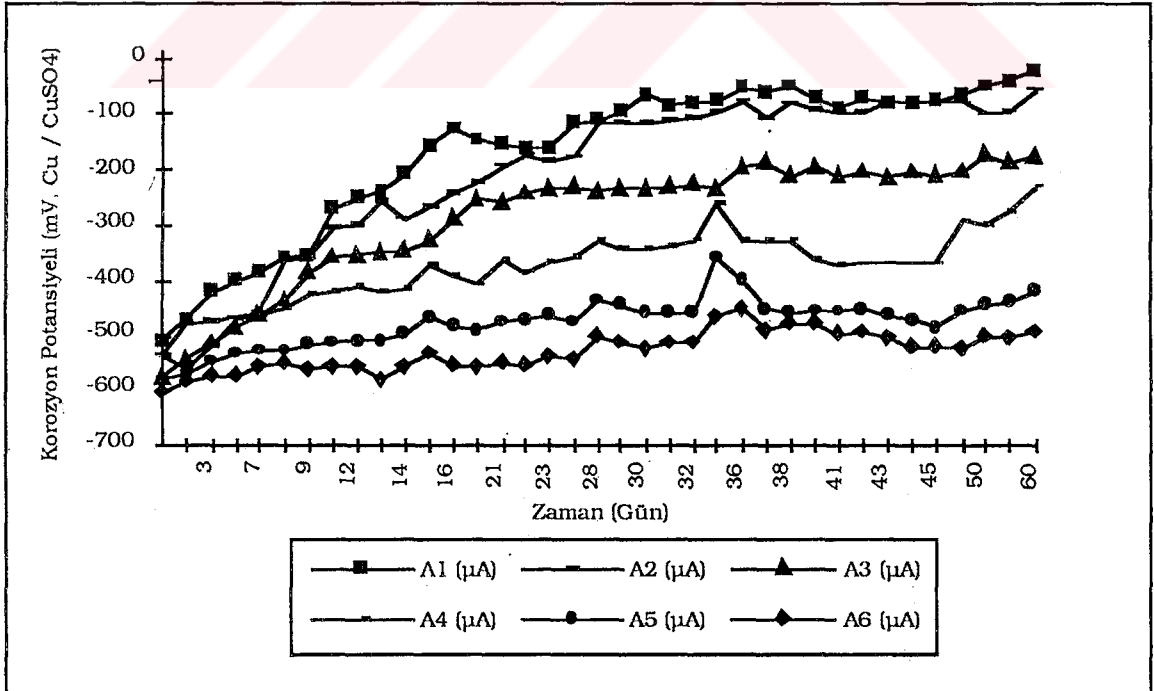
Zaman (Gün)	C1(μ A)	C2(μ A)	C3(μ A)	C4(μ A)	C5(μ A)	C6(μ A)
1	12.0	12.5	13.1	18.8	14.4.	19.7
2	13.3	16.7	11.7	29.3	31.9	34.0
3	9.9	13.8	11.3	12.1	16.9	28.0
6	5.9	9.1	9.3	8.7.	12.6	18.6
8	3.0	6.6	8.1	7.4	11.4	18.2
9	1.9	4.0	4.4	6.1	13.0	15.8
10	2.1	3.0	3.5	5.8	9.9	14.8
11	2.7	2.8	2.8	4.4.	6.9	9.6
15	2.4	2.0	2.2	4.2	6.1	8.9
16	0.9	1.8	2.0	3.9	5.9	8.2
17	0.7	1.6	2.0	3.1	5.5	7.9
18	0.8	1.5	2.0	2.9	5.0	7.3
19	0.7	1.4	1.9	2.1	4.3	7.1
23	0.4	1.5	1.7	2.4	4.3	7.1
24	0.3	1.6	2.0	2.1	4.1	6.7
25	0.2	1.6	2.0	2.2	4.1	6.4
26	0.2	1.6	2.0	1.8	3.5	5.6
27	0.2	1.4	1.8	1.8	3.0	5.4
29	0.2	1.3	1.6	1.6	2.8	5.1
30	0.1	1.1	1.6	1.6	2.7	4.8
31	0.1	1.1	1.5	1.6	3.0	5.1
32	0.1	1.1	1.5	1.6	3.0	5.0
33	0.1	1.1	1.6	1.6	3.0	5.1
34	0.1	1.2	1.8	1.7	2.6	4.6
38	0.1	1.0	1.4	1.9	2.0	4.2
47	0.1	0.8	1.2	1.8	1.9	4.1
48	0.1	0.7	1.3	1.6	1.4	3.4
50	0.1	0.6	0.9	0.8	1.3	3.3
51	0	0.5	0.8	0.8	1.2	2.8
52	0	0.4	0.7	0.8	1.1	2.5
53	0	0.2	0.5	0.7	0.9	2.5
54	0	0.2	0.3	0.6	0.8	2.5
57	0	0.1	0.2	0.4	0.8	2.0
58	0	0.1	0.2	0.2	0.8	1.8
59	0	0	0.1	0.1	0.5	1.5
60	0	0	0.1	0.1	0.4	1.3
61	0	0	0.1	0.1	0.4	1.2
64	0	0	0.1	0.1	0.4	1.2
65	0	0	0.1	0.1	0.4	1.2

Çizelge 4.1 Uçucu Küllü Beton Örneklerinde Korozyon Potansiyelinin Zamanla Değişimi

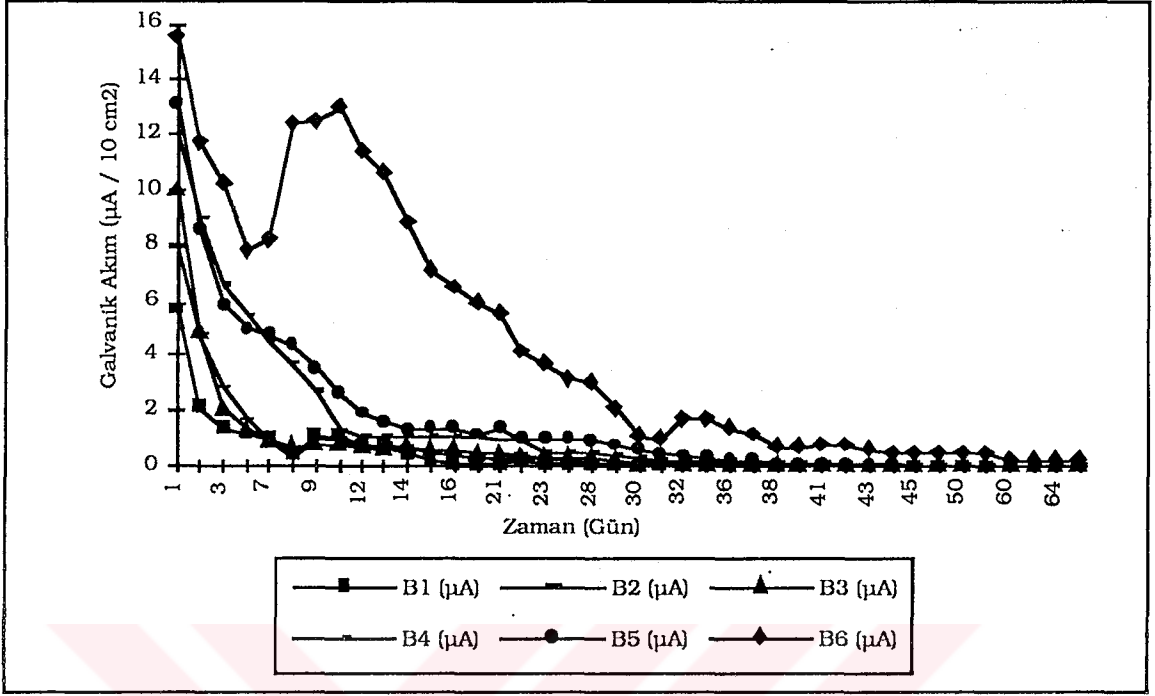
Zaman (Gün)	C1(mV)	C2(mV)	C3(mV)	C4(mV)	C5(mV)	C6(mV)
1	-509	-547	-551	-581	-595	-625
2	-454	-558	-571	-606	-635	-636
4	-382	-475	-495	-534	-565	-570
6	-293	-400	-438	-530	-563	-580
7	-241	-395	-420	-536	-565	-583
8	-233	-372	-410	-512	-562	-584
9	-240	-366	-392	-509	-549	-583
13	-199	-330	-362	-479	-527	-564
14	-180	-323	-355	-475	-531	-564
15	-172	-311	-332	-443	-500	-535
16	-153	-287	-323	-441	-498	-533
17	-133	-271	-322	-441	-493	-531
20	-94	-243	-298	-432	-490	-525
22	-56	-245	-296	-431	-490	-524
24	-40	-241	-292	-412	-481	-522
25	-51	-240	-291	-413	-480	-523
27	-45	-219	-295	-411	-478	-521
30	-43	-221	-281	-411	-477	-522
34	-35	-217	-281	-407	-475	-521
35	-36	-217	-279	-409	-476	-521
36	-35	-218	-278	-408	-473	-520
38	-34	-215	-276	-405	-471	-518
41	-32	-213	-271	-403	-466	-518
45	-15	-198	-265	-401	-459	-516
51	-12	-184	-247	-381	-461	-512
55	-9	-181	-242	-375	-458	-511
58	-8	-179	-241	-373	-457	-510
59	-8	-178	-241	-370	-457	-511
60	-8	-177	-240	-371	-456	-511



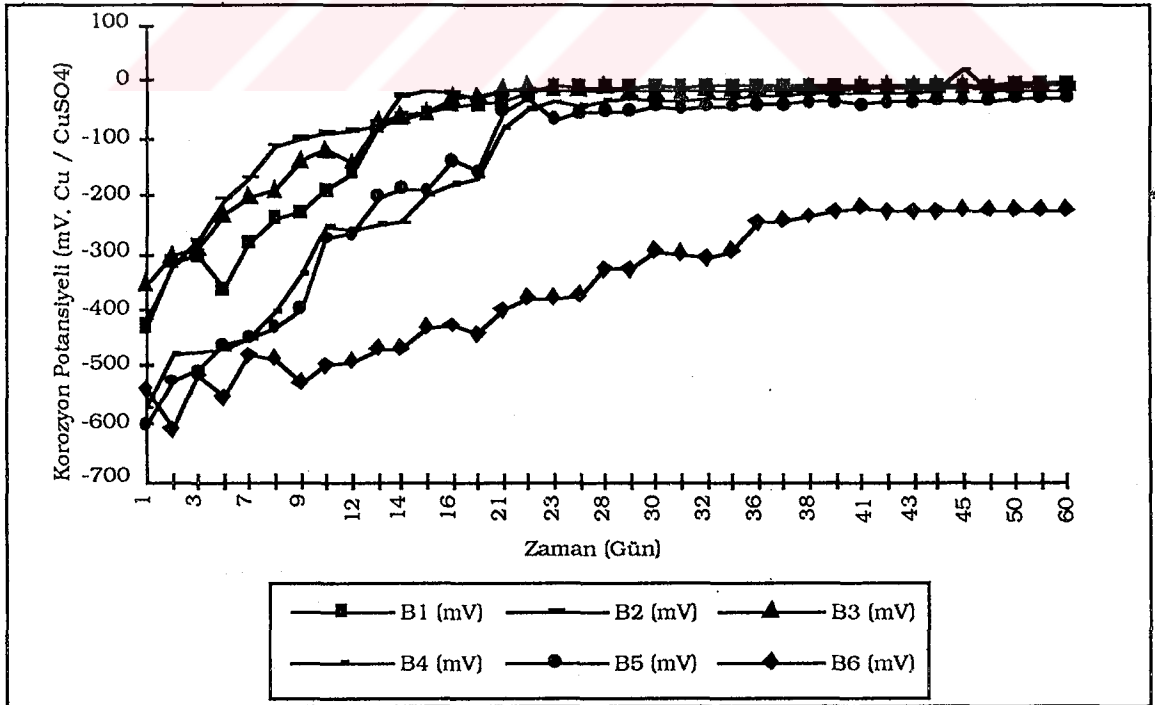
Şekil 4.2. Sodyum Klorürlü Beton Örneklerinde Galvanik Akımın zamanla Değişimi.



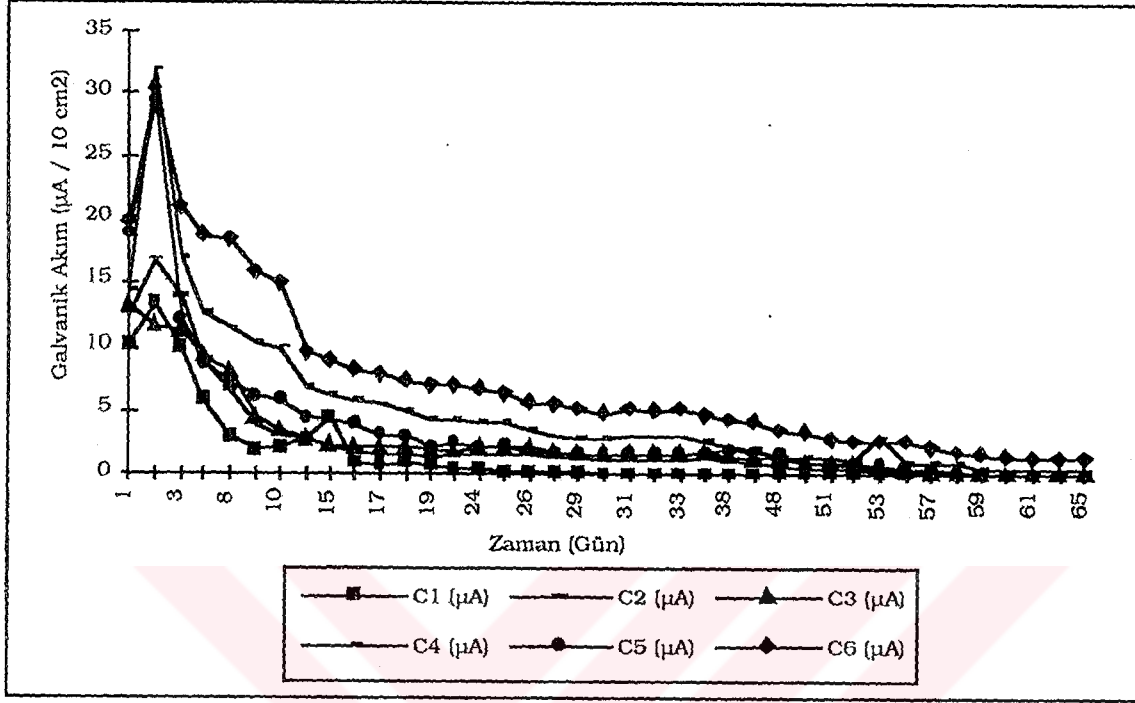
Şekil 4.3. Sodyum Klorürlü Beton Örneklerinde Korozyon Potansiyelinin Zamanla Değişimi.



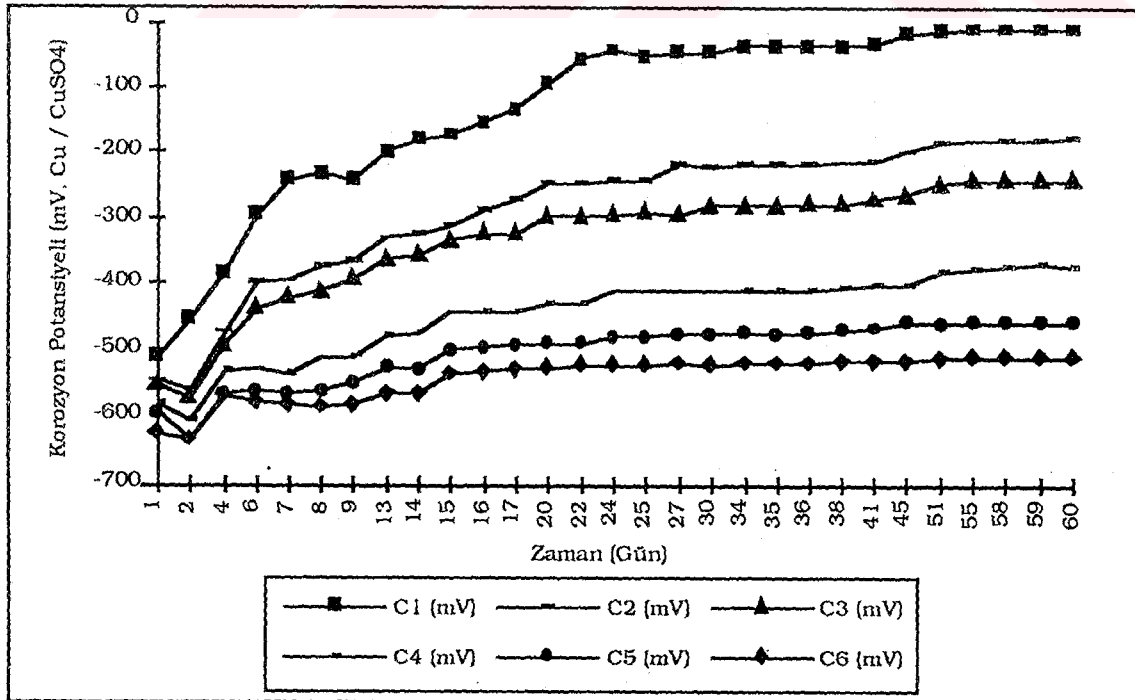
Şekil 4.4. Kalsiyum Asetatlı Beton Örneklerinde Galvanik Akımın Zamanla Değişimi.



Şekil 4.5. Kalsiyum Asetatlı Beton Örneklerinde Korozyon Potansiyelinin Zamanla Değişimi.



Şekil 4.6. Uçucu Küllü Beton Örneklerinde Galvanik Akımın Zamanla Değişimi.



Şekil 4.7. Uçucu Küllü Beton Örneklerinde Korozyon Potansiyelinin Zamanla Değişimi.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Galvanik akım ölçümleri, bütün numunelerde korozyon hızının ilk günlerde süratle azaldığını göstermektedir. Bu duruma, atmosferde bekletilen beton numunelerinin zamanla kuruyarak rutubetinin azalması ve bunun sonucu olarak beton rezistivitesinin artması neden olmaktadır. Ancak ölçülen galvanik akım şiddetlerinin zamanla azalışı bütün numunelerde aynı derecede olmamaktadır. Bileşiminde 2.650 kg. Cl^-/m^3 beton (1086 ppm)'den daha az klorür içeren A_1 , A_2 ve A_3 numunelerin içinde bulunan betonarme demirlerinin, yaklaşık üç hafta sonunda tamamen pasifleştiği gözlenmiştir. Daha yüksek klorür konsantrasyonlarında korozyon altmışıncı güne kadar devam etmiştir.

Buna karşılık asetat iyonu içeren bütün beton numunelerinde, betonarme demirleri ilk 10 gün içinde tamamen pasifleşmiştir.

Ağırlıkça %30 uçucu küllü harmanlanmış, puzolanlı çimento kullanılması, betonun korozyon özelliklerinde, ilk 60 gün içinde herhangi bir fark oluşturmamıştır. Uçucu külün puzolanik etkisinin daha sonraki günlerde kendini göstermesi beklenebilir. Uçucu külün etkisi beton boşluklarının kristalizasyonun zamanla dolması ile açıklanmaktadır. Bu ise uzun bir zaman içinde gerçekleşebilmektedir.

Galvanik akım ölçümleri ile elde edilen bu sonuçlar, (Şekil 4.2, 4.4, 4.6) korozyon potansiyeli ölçümleri ile de doğrulanmıştır (4.3, 4.5, 4.7).

Klorürlü betonlar içindeki betonarme demirlerinin korozyon potansiyeli başlangıçta - 500 mV ile -600 mV (Cu / Cu SO₄) arasında iken zamanla bu değerler, pozitif yöne doğru kaymıştır. Klorür konsantrasyonu 2.65 kg Cl⁻/m³ Beton (1086 ppm)'den daha az olan betonlarda potansiyel ilk yirmi gün içinde - 300 mV (Cu / CuSO₄)'dan daha pozitif hale gelmiştir. Daha yüksek klorür konsantrasyonlu betonlarda ise, betonarme demirleri sürekli olarak aktif bölgede kalmıştır.

Asetat katılmış betonlar içindeki betonarme demirlerinin korozyon potansiyeli de başlangıçta - 500 mV ile - 600 mV (Cu / CuSO₄) arasında olduğu halde, süratle pozitif yöne doğru kayarak ilk 14 gün içerisinde - 200 mV'dan daha pozitif değerlere ulaşmıştır. En yüksek asetat katkılı B₆ numunesi hariç, asetat katılmış betonlar içindeki bütün demirler pasif hale gelmiştir. İçinde 42.5 kg asetat/m³ Beton (1742 ppm) bulunan beton numunesi içindeki betonarme demiri ise ancak 50 gün sonra pasif hale yaklaşmıştır.

İçinde hem klorür, hem de uçucu kül bulunan (C) grubu numunelerde, betonarme demirlerinin korozyon potansiyelinde de pozitif yönde artışlar olmakla beraber C₁ numunesi haricindeki diğer numuneler 60 gün içerisinde aktif bölgede kaldıkları görülmüştür. C₁ numunesinde ise ilk on gün içerisinde pasifleşme gözlenmiştir. Bu durum, uçucu küllü çimentoların, içerisine hiç uçucu kül katılmamış ve normal portland çimentosu ile yapılmış olan betonlardan daha etkisiz olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni şu şekilde açıklanabilir. Uçucu küllü çimentolarla hazırlanmış olan betonların

pH değeri, normal çimentolarla hazırlanmış olan betonlara göre daha düşüktür (pH= 10.5). pH'ın düşük olması betonarme demirlerinin korozyon eğilimini artırıcı olarak rol oynamaktadır.

Galvanik Akım yöntemi ile yapılan ölçümlerde, beton rezistivitesi büyük rol oynamaktadır. Zamanla beton rutubeti azalmaktadır. Bunun sonucu olarak Galvanik Akım ölçüm değerlerinin duyarlılığı azalmaktadır. Bu nedenle Galvanik Akım Yöntemi ile yapılacak deneylerde beton rutubetinin sabit tutulması faydalı olacaktır.

Elde edilen bu sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

1. Bütün beton numunelerinde, korozyon hızı dökümden sonra zamanla azalmaktadır. Bu azalma ilk günlerde daha hızlı olmaktadır.

2. Bileşiminde $2.650 \text{ kg Cl}^-/\text{m}^3$ beton (1086 ppm)'den daha az klorür içeren numunelerin içinde bulunan betonarme demirleri ilk üç hafta içerisinde pasifleşmiş buna karşılık 1086 ppm'den yüksek klorür konsantrasyona sahip numuneler içindeki betonarme demirleri aktif halini korumuştur.

3. Asetat içeren bütün numunelerdeki betonarme demirleri ilk iki hafta içinde pasif hale gelmişlerdir. Ancak çok yüksek oranda ($42.500 \text{ kg Asetat} /\text{m}^3 \text{ Beton} = 1742 \text{ ppm}$) asetat içeren beton numunelerindeki betonarme demirleri aktif halde kalmıştır.

4. Beton içine Portland çimentosu yerine ağırlıkça %30 oranında uçucu kül katılması halinde, ilk 60 gün içinde normal çimentolara göre herhangi bir fark gözlenememiştir. Uçucu külün puzolonik etkisinin daha sonraki günlerde etkili olması beklenebilir.

KAYNAKLAR

1. ACI Journal Committe Report, **Corrosion of metals in concrete**, Ame. Concrete Inst. ACI 222 R-85, Detroit, 3, (1985).
2. Arup, H., **The Mechanisms of the protection of steel by concrete in corrosion of reinforcement in concrete construction**, A.P. Crane, Ed., Ellis Harwood, Ltd., p. 393, (1983).
3. ASTM-C 876 Standart test method for half cell potential of uncoated reinforcing steel in concrete, (1991).
4. Atkinson, J.T.N. and Vantroffelaar, H., "Corrasion and its control"., **National Associotion of Corrasion Engineers**, (1985).
5. Denghanian, C., Locke, C. E., "Electrochemical behavior of steel in concrete as a result of chloride diffusion into concrete: Part 2", **Corrasion-NACE**, 38, 494, (1982).
6. Doğan, M., **Çeliğin beton içinde pasiflik ve koroziflik karakteristüklerinin belirlenmesi**, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Kimya Mühendisliği Bölümü Y. Lisans Tezi, (1989).
7. Fontane M.G. and Green, N.D., **Corrosion Engineering**, Second Edition, Mc Graw - Hill Book Co. New York, 448, (1978).

8. Gjorv, O.E., Vennesland, O., El Busaidy, A.H.S., "Diffusion of dissolved oxygen through concrete", **Materials Protection**, 25, 39, (1986).
9. Griffin, D.F., "Test on reinforced concrete, salt gain accelerates corrosion of steel", **Materials Protection**, 6, 39, (1967).
10. Hausman, D.A., "Electrochemical behavior of steel in concrete", **J. Ame. Concrete Inst. Proceedings**, 61,171, (1964).
11. Hausman, D.A., "Steel corrosion in concrete", **Materials Protection**, 6, 19, (1967).
12. Jang W., and Iwasaki, I., "Rebar corrosion under simulated concrete conditions using galvanik current measurements" **Corrosion - NACE**, 47, 11, 875-883, (1991).
13. Lewis, D.A., and Copenhagen, W.J., "Corrosion of reinforcing steel in concrete", **Material Protection**, 5, 69, (1966).
14. Locke, C.E. and Simon, A., "Electrochemistry of reinforcing steel in salt contaminated concrete", **A symposium corrosion of reinforcing steel in concrete**, ASTM special technical publications, Philadelphia, 713 ASTM 3, 11, (1980).
15. Mozer, J.D. and et. al., "Corrosion of reinforcing bars in concrete", **J. Ame Conc. Inst. Proceedings**, 62, 909, (1965).

16. Paurbaix, M., **Atlas of electrochemical equilibrium in aqueous solutions**, Pergamon Pres Ltd., london, 314, (1976).
17. Rosenberg, A.M. and et all." A corrosion Inhibitor formulated with calcium nitrite for use in reinforced concrete", **Chloride Corrosion of steel in concrete**, STP-629, ASTM, Philadelphia, 89-99, (1977).
18. Scott, G.N., "Corrosion protection propeerties of portland cement concrete", **J. Am. Water Works Assoc.**, 57, 1038, (1965).
19. Shalon R. and Raphael M., **In proceedings International RILEM Symposium: 1**, 177-196, (1971).
20. Stratfull, R.F., "How clorides effect concrete used with reinforcing steel" **Material Protection**, March, 29-34. (1968).
21. Stratfull, R. F., Half-cell potantials and the corrosion of steel in concrete, Highway Research Record 433, p. 12, (1973).
22. Stratfull, R.F., "Comments on the identitication of chloride threshold in the corrosion of steel in concrete" **Corrosion-NACE**, 47, Agust, (1987).
23. Uhlig, H. H., **Corrosion and corrosion control**, John Wiley and sons, New York, (1971).

24. Van Daveer, J. R., "Techniques for evaluating reinforced concrete bridge decks", **J. Ame. Concrete Inst.**, 12, 697, (1975).
25. Verbeck, George J., "Mechanisms of corrosion of steel in concrete" corrosion of metals in concrete, sp-49, **American Concrete Institute**, Detroit, pp. 21-38, (1975).
26. Wheat, H. G. and Eliezer, Z., "Some electrochemical aspects of corrosion of steel in concrete", **Corrosion-NACE**, 41, 640, (1985)
27. Yalçın, H., Koç, T., Demir ve çelik yapıların korozyonu ve katodik koruması, **İller Bankası Genel Müdürlüğü Yayını**, Ankara, Yayın No: 47, (1991).
28. Yonezawa, T., Ashworth, V., Procter, R.P.M., "Pore solution composition and chloride effects on the corrosion of steel in concrete" **Corrosion,NACE**, 44, (7), July, (1988).

ÖZGEÇMİŞ

1969 yılında Mardin ilinin Midyat ilçesine bağlı Acırlı (Derizbin) köyünde doğdu. İlköğrenimini köyünde, orta öğrenimini, parasız yatılı olarak 1988 yılında Kahramanmaraş'ta tamamladı. 1992 yılında Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne kayıt yaptırdı. Halen Kırıkkale Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

