

BETONARME YAPILARDA KOROZYON ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ VE HASAR TESPİTİ

Nabi YÜZER(*)

1. GİRİŞ

Betonarme yapılarda donatı korozyonunun gözlenen en belirgin göstergesi beton örtünün çatlamasıdır. Bu yapılarda olası hasarların teşhis ve kontrolü için, gözle görülen semptomlar yardımı ile korozyonun kalitatif olarak belirlenmesine, korozyon hızının sistematik olarak ölçülmesine ve korozyon ile ilgili bazı parametrelerin tespit edilmesine ihtiyaç vardır [1]. Korozyon, metallerin bulunduğu ortam içinde, kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu bozulması şeklinde tanımlanmaktadır. Korozyon nedeni ile metal veya alaşımın fiziksel, kimyasal veya elektriksel özelliğinin istenmeyen değişikliklere uğraması önemli maddi kayıplara yol açar. Örneğin Türkiye'deki korozyon kayıplarının GSMH'nin %4.36'sına eşit olduğu araştırmalar sonucu elde edilmiştir [2]. DIE'nin 2000 yılı rakamlarına göre Ar-Ge harcamalarının GSMH içindeki payının ~%0,64 olduğu dikkate alınırsa, konunun önemi açıkça görülmektedir. Betonarme yapılarda, korozyondan kaynaklanan hasarlardaki artış (Şekil 1) ve bunlar için ayrılması gereken mali kaynakların büyüklüğü, korozyondaki erken teşhisin önemini ortaya koymaktadır. Yapıyı korozyondan korumak için üretimde kullanılacak malzemelerin yeterliliğinin deneysel olarak araştırılması, sonradan yapılacak pahalı onarımların önüne geçilmesini sağlayacaktır. Korozyon ile ilgili deneyler, doğrudan agresif ortamın bulunduğu doğal çevrede veya laboratuvarda yapılır. Arazide veya denizde yapılan deneylerde yapı elemanının kendisi, bir diğer deyişle prototipi deney numunesi olur. Korozyon hasarı, gözlem sonucu kalitatif olarak veya paslanma miktarı yani penetrasyon derinliği ölçülerek değerlendirilir. Laboratuvar deneylerinde amaç, genellikle koruma için alınan önlemlerin



Şekil 1-BOTAŞ-Ceyhan Dört Yol İşletme Tesislerindeki Donatı Korozyonu[4].

yeterliliğinin, örneğin Cl^- difüzyonunun önlenip önlenmediğinin incelenmesidir [3].

1.1. Gözlemsel Metotlar

Korozyonun araştırılmasında uygulanan gözlemsel metotlar, pratik ve tahribatsız olmalarına rağmen, değişimlere tepkinin hızı düşük olduğu için özellikle korozyon direnci yüksek sistemlerde değişikliğin ortaya çıkması ve anlamlı sonuç elde edilmesi uzun zaman alır. Bu yöntemde gözlemler çok hızlı yorumlanabildiği halde donatıdaki değişiklikler doğrudan belirlenemez; pas lekeleri, çatlama ve parça atmalar gibi semptomların açıkça görülmeye başlanmasından itibaren korozyondan şüphelenilir, ancak bu durumda korozyon önemli derecede ilerlemiş olabilir.

1.2. Deneysel Metotlar

Betonarme yapılarda korozyon hızının ölçümü için yerinde ve laboratuvarda yapılan deneyler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Ağırlık Kaybını Esas Alan Deneyler

Donatıda korozyonun oluşturduğu kesit kaybını araştırmak için ağırlık kaybından yararlanılarak penetrasyon derinliği belirlenebilir. Bunun için korozi ortamda bekletilen metal numunenin, belirli süre sonunda, yüzeyinde meydana gelen malzeme

(*) Y. Doç. Dr., Y.T.Ü., İnşaat Fakültesi, İstanbul.

kaybı tespit edilerek malzemenin ortalama yıllık penetrasyon hızı (1.1) bağıntısı ile hesaplanır. Bu ifadede P, cm/yıl olarak penetrasyon hızını; WK metalin korozyonla ağırlık kaybını (g); S, korozyona maruz kalan yüzeyi (cm²); t, deney süresini (saat); Δ ise metalin yoğunluğunu göstermektedir [5].

$$P = \frac{W_K}{\Delta.S.t} \times 24 \times 365 \quad (1.1)$$

Korozyon nedeni ile birim zamanda, metal yüzeyinden taşınan tabakanın kalınlığını ifade eden ve literatürde korozyon hızı olarak tanımlanan bu bağıntı, mpy (mil/yıl: 25.4μ/yıl) cinsinden (1.2) standartlarda da yer almaktadır [6]. Korozyon hızı, ağırlık kaybının oranı olarak (%) veya yüzeyden ağırlık kaybı olarak (mg/cm²) [7] ya da ortalama kesit kaybı (mikron) [8] olarak ifade edilmektedir. Ancak literatürde hem zamanı hem de yüzeyi dikkate alan ve en sık kullanılan ifade mpy'dir.

$$\text{Korozyon Hızı (mpy)} = \frac{3,45 \times 10^6 W_K}{\Delta.S.t} \quad (1.2)$$

Korozyon nedeni ile oluşan ağırlık kaybı, pas tabakasının Clarke Çözeltisi olarak bilinen kimyasal sıvı (1000 mL HCl, 24 g Sb₂O₃ ve 71.3 g SnCl₂.2H₂O) ile temizlenmesinden sonra belirlenir [9].

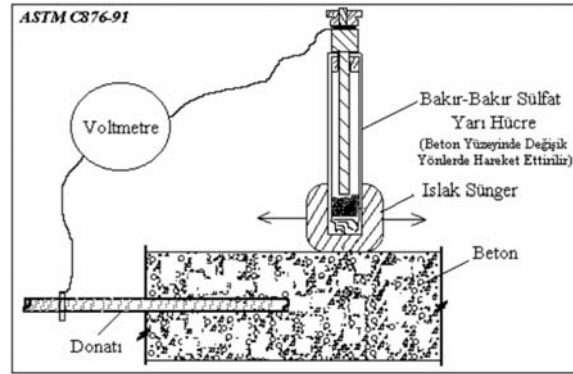
Aköz vd. [10], 300 gün süre ile farklı konsantrasyonlarda Cl⁻ içeren çözeltilerde bekletilen harç içindeki donatıların ağırlık kaybının ihmal edilebilir düzeyde olduğunu belirtmişlerdir. Ancak Andrade vd. [11], donatı kesitindeki ihmal edilebilir kayıpların betonun çatlamasına neden olabileceğini göstermişlerdir. Al-Tayyib ve Khan [12], ağırlık kaybı yönteminin uzun zaman ve/veya çok daha fazla korozif ortam gerektirdiğini, korozyon ölçümünde elektrokimyasal tekniklerin daha uygun olacağını ifade etmişlerdir.

Potansiyel Haritaları

Korozyon hasarının tespitinde yapının korozyona uğrama ihtimalinin çok arttığı aktif bölgelerin gösterildiği potansiyel haritalarından çok sık yararlanılır. Bu deney metodunda donatı çeliğinin korozyon aktivitesini belirlemek amacıyla yerinde veya laboratuarda donatının elektriksel yarı hücre potansiyeli ölçülür [13,14]. Korozyon potansiyelinin (E_{corr}) ölçülmesine dayanan bu yöntemde elektro kimyasal korozyon kolay ve hızlı bir şekilde izlenir. Yarı hücre potansiyeli metodunda Şekil 2'de görüldüğü gibi referans elektrotu beton yüzeyine değdirilir, beton içindeki donatı ile referans elektrotu arasında meydana gelen potansiyel farkı, yüksek empedanslı bir volt-

metre ile ölçülür. Betonun elektriksel direnci yüksek olduğundan iletkenliği sağlamak amacı ile referans elektrot ile beton arasına özel bir sıvı ile nemlendirilmiş sünger konulur. Bu metotta donatı üzerindeki beton kalınlığı dikkate alınmaz, beton elemanın herhangi bir servis süresinde uygulanabilir. Yarı-hücre potansiyeli değerine göre olası korozyon durumunu veren değerlendirmeler Tablo 1 ve 2'de verilmiştir.

Referans elektrotu olarak en çok bakır-bakır sülfat (CSE), gümüş-gümüş klorür veya kalomel elektrot kullanılır. Bunlardan KCl eriğine daldırılmış Hg/Hg₂Cl₂ Kalomel elektrotu, KCl çözeltisinin normalitesine bağlı olarak 0.1N; 1N veya doymuş kalomel elektrot adlarını alır. Yapılması ve muhafazasının kolaylığı bakımından ve 1mV'luk hassasiyet yeterli



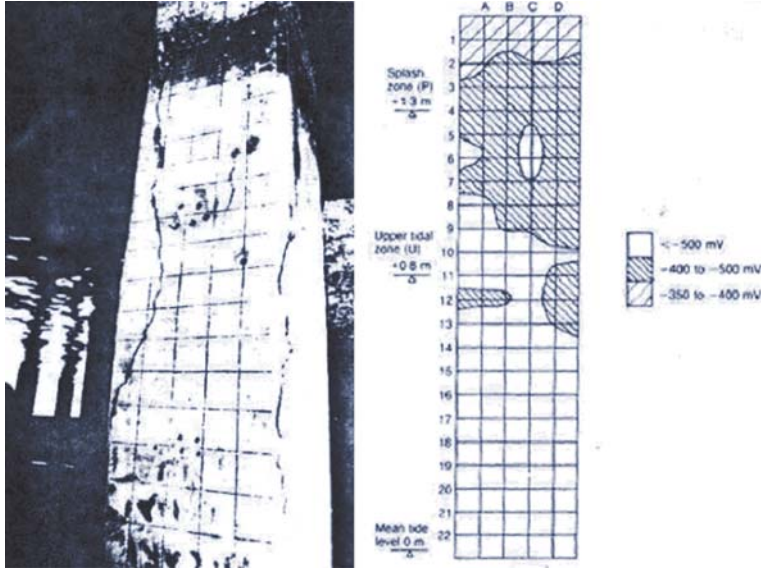
Şekil 2 - Bakır-Bakır Sülfat Yarı Hücre Devresi [15].

Tablo 1 - ASTM C 876'ya göre potansiyel kriterleri [15]

Yarı-hücre potansiyel değerleri, CSE (SCE)	Korozyon Olasılığı
E < -350mV (-270mV)	%90 güvenirlikle donatının korozyona uğrama olasılığı vardır
-350mV < E < -200mV (-120mV)	belirsizlik vardır, kesin bir şey söylenemez
-200mV < E	%90 güvenirlikle korozyon yoktur

Tablo 2 - H. Arup'un Potansiyel Kriterleri [14]

Yarı-hücre potansiyel değerleri, (SCE)	Ortam	Korozyon Durumu
-600mV < E < +200mV	Cl ⁻ iyonu yok, pH=13	Pasif
-200mV < E < +100mV	Normal koşullardaki betonarme	Durum
-500mV < E < -200mV	Ortamda Cl ⁻ iyonu var	Çukurcuk Korozyonu
-600mV < E < -450mV	Karbonatlaşma ve Cl ⁻ iyonu nedeni ile depasivasyon	Genel Korozyon
-1000mV	Oksijen girişinin sınırlandırıldığı ve pasif filmin korunamadığı ortam	Aktif



Şekil 3 - Betonarme İskele Kazığında Çıkarılmış Potansiyel Haritasına Örnek [13].

olduğundan doymuş kalomel elektrot (SCE) daha yaygın olarak kullanılır ($E=0.2425$ volt). Sharp vd [16], bu üç farklı referans elektrotu karşılaştırdıkları deneysel çalışmada; bakır-bakır sülfat elektrotunun beton boşluk suyuna benzeyen sodyumhidroksit çözeltisinde kararsız olduğunu, deniz suyunda ise elektrot potansiyelinin 150 mV'a varan salınımlar yaptığını, diğer iki elektrotun iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.

Singapur'un kuzeyindeki Woodlands'ta 24 yıllık bir betonarme rıhtımının (Şekil 3) korozyon incelemesini yapmak üzere potansiyel haritalarını çıkaran Liam vd. [13], donatı korozyon düzeyini belirlemek ve izlemek için korozyon potansiyeli ölçümünün güvenilir ve uygun bir metot olduğunu belirtmişlerdir.

Diğer Metotlar

Korozyonun gelişmesi hakkında bilgi sağlayan yöntemlerden biri de polarizasyon eğrilerinin çıkarıldığı polarizasyon teknikleridir. Polarizasyon eğrileri elektro-kimyasal hücre içinde anot ve katodun polarizasyonu sonucu gelişen, akımın şiddeti ile potansiyeli arasındaki bağıntıyı gösteren eğrilerdir. Betonun elektriksel direncinin çok yüksek oluşu nedeni ile doğru akımla (DC) veya düzeltilmiş alternatif akımla (AC) yapılan ölçümede hatalar ola-

Tablo 3 - 3LP Aleti ile Ölçülen Verilerin Değerlendirilmesi

i_{corr}	Değerlendirme
$<0.21 \text{ mA/cm}^2$	Hasar beklenmiyor
$0.21-1.07 \text{ mA/cm}^2$	10-15 yıl içinde olası hasar
$1.07-10.7 \text{ mA/cm}^2$	2-10 yıl içinde olası hasar
$>10.7 \text{ mA/cm}^2$	2 yıldan daha kısa süre içinde olası hasar

bilir. Daha güvenilir sonuçlar elde etmek üzere, betonarme elemanlar için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Rodriguez vd.'ne göre [1], en çok kullanılan yöntemlerden bazıları, Koruma Çemberi, Coulostatik, Elektro-kimyasal Gürültü ve Elektro-kimyasal İmpedans Spektroskopisi'dir. Ancak bütün bu elektro-kimyasal izleme yöntemleri, bir dereceye kadar Lineer Polarizasyon Metoduna yardımcı olurlar. Günümüzde beton içindeki çeliğin korozyon akım yoğunluğunu (korozyon hızı) lineer polarizasyon metodu esasına göre ölçen aletler mevcuttur. Bunlardan en yaygın kullanılanı 3LP (3 elektrot lineer polarizasyon) aletidir. Bu alet kullanılarak ölçülen korozyon hızının değerlendirilmesi Tablo 3'te verilmiştir [17].

Korozyon akım yoğunluğu ile ağırlık kaybından bulunan korozyon hızı arasında, ilişki kurmaya yönelik çalışmalar da vardır. Bu çalışmalarda, 1 A/m^2 'lik korozyon akım yoğunluğunun, çelik yüzeyindeki ortalama 1.16 mm/yıl 'lık korozyon hızına eşdeğer olduğu görülmüştür. Örneğin pasif durumdaki çeliğin yaklaşık $0.1 \mu\text{m/yıl}$ 'lık korozyon hızı sadece $10-4 \text{ A/m}^2$ iken, klorür iyonları etkisindeki yaklaşık 0.1 mm/yıl 'lık korozyon hızı $10-1 \text{ A/m}^2$ 'dir [18]. Betonarme elemanın servis ömrünün bir ifadesi olarak korozyon için $0.1-0.8 \mu\text{A/cm}^2$ arasındaki akım yoğunluğu ihmal edilebilir değer olarak kabul edilmektedir [19, 20].

Donatı korozyonunun gözlenen en belirgin sonucu beton örtünün çatlamasıdır ve korozyon başlangıç süresi için esas alınan önemli parametrelerden biridir. Özellikle deniz yapılarında beton yüzeyinde ilk çatlağın oluştuğu an kritiktir ve onarım kaçınılmazdır [21].

Çünkü donatının çapına bağlı olarak metalde $10-50 \mu\text{m}$ 'luk kayba neden olan ve korozyon sırasında oluşan demiroksit, 2-3 cm'lik beton örtünün çatlaması için yeterlidir. Bunun anlamı sadece $10-30 \mu\text{m/yıl}$ 'lık korozyon hızında beton örtünün 1-3 yıl içinde çatlayacağıdır [22]. İlk çatlağın süresi (t) esas alınarak (1.3) bağıntısında görüldüğü gibi, betonda 0.3-0.4 mm'lik çatlağa neden olan donatı çapındaki azalmaya ilişkin basit nümerik modeller geliştirilmiştir [23].

$$t = \frac{\text{donatı çapındaki azalma}}{\text{korozyon hızı (mm/yıl)}} \quad (1.3)$$

Günümüzde konu ile ilgili çalışmalar devam etmekte ve yeni korozyon ölçüm teknikleri geliştirilmektedir

[24]. Donatı korozyonu bakımından betonun performansının değerlendirildiği ve kritik çatlama süresinin önceden tahmini için laboratuarda hızlandırılmış deneyler yapılmaktadır. Bu deneylerde, donatı korozyonunu hızlandırmak için, sabit gerilim (voltaj) veya sabit gerilimin yanı sıra donatı ile beton arayüzüne sabit aderans gerilmesi de uygulanmaktadır [25,26].

2. HASAR TESPİTİ

Betonarme yapılarda korozyon hasarı nedeni ile betonun çatlaması, parça atması gibi sorunların araştırılmasında ilk aşamayı oluşturan hasar tespiti aşağıdaki adımlarda yapılması önerilmektedir [27].

1. Elemanlar yerinde tespiti esas olacak şekilde kodlanmalı,
2. Her bir elemanda gözlem ve inceleme yapılmalı,
3. Donatıların yeri, sayısı ve örtü betonunun kalınlığı manyetik alet ile araştırılmalı, belirli bölgelerde beton kaldırılarak donatılarda korozyon nedeni ile kesit kaybı belirlenmeli,
4. Elemanlarda Schmidt beton test çekici ve ultrases aleti ile tahribatsız ölçümler yapılmalı,
5. Donatıların yeri belirlendikten sonra donatıların kesilmemesi koşulu ile belirli bölgelerden karot numuneler alınmalı,
6. Standart bir elektrot yardımı ile donatıların yarı hücre potansiyeli ölçülmeli, belirlenen değerler uluslararası standartlarda verilen korozyon potansiyeli ile karşılaştırılmalı, donatıların korozyon seviyesi belirlenmeli,
7. Çıkarılan karot numunelerde yüzeye fenoltalein çözeltisi püskürtülerek karbonatlaşma derinliği belirlenmeli,
8. İnceleme konusu deniz yapısı ise yukarıda belirtilen çalışmalara ilave olarak kazıklarda, su-kum ayrım bölgesinde, su içinde kalan bölgede, su-hava ayrım bölgesinin su içinde kalan ve su üstünde kalan kısımlarında, su üstünde kalan bölgede, kazık ile başlık birleşim bölgesinde, başlıkta, tabliyenin alt yüzeyinde ve tabliyenin üst yüzünde olmak üzere özellik arzeden noktalarda video-kamera çekimi yapılmalı, video çekimleri incelenerek hasarlı bölgeler tespit edilmeli, numune alınacak ve ölçüm yapılacak bölgeler belirlenmeli,
9. Kazıklardan, belirlenen bölgelerden su altında çekiçe kırılarak beton numuneler alınmalı,
10. Deniz suyunda analiz yapılmak üzere farklı derinliklerden numuneler alınmalıdır.

3. SONUÇ

Son yıllarda, ekonomik ve sosyal problemler nedeni ile önem kazanan donatı korozyonu ile ilgili araştırmaların sayısı artmakta, donatı korozyonu deney yöntemleri geliştirilmektedir. Gerek bu deneylerin, gerekse korozyon hasarı sonrası tespit ve onarımın zahmetli ve pahalı bir iş olduğu görülmüştür. Hasarın geciktirilmesi ve en aza indirilmesi için projenin hazırlanmasından itibaren donatının korozyonu ve neden olacağı hasarlar dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Rodriguez, P., Ramirez, E. ve Gonzalez, J. A., (1994), "Methods for Studying Corrosion in Reinforced Concrete", *Magazine of Concrete Research*, 46(167):81-90.
2. Çakır, A. F., (1994), "Türkiye'nin Metalik Korozyon Kaybı", *IV.Korozyon Sempozyumu*, 25-27 Ekim, İTÜ İstanbul, s.1-8.
3. Akman, M. S., (1992), *Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi*, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul.
4. Biçer, A., Koç, T., Alıcılar, A., (2000), "Ceyhan Bölge, Dörtüyl İşletme Tesislerindeki Beton Korozyonu Raporu", *BOTAŞ, Ekim*.
5. Saraylı, M. A., (1978), *Yapı Malzemeleri Bilimi, Kutulmuş Matbaası, İstanbul*.
6. ASTM G1- 90, *American Society for Testing and Materials, Standard Pratices for Preparing, Cleaning and Evalvating Corrosion Test Specimens*.
7. Kouloumbi, N. ve Batis, G., (1992), "Chloride Corrosion of Steel Rebars in Mortars with Fly Ash Admixtures", *Cement and Concrete Composites*, 14:199-207.
8. Rasheeduzzafar, Dakhil, F. H., Bader, M. A. ve Khan, M. M., (1992), "Performance of Corrosion Resisting Steel in Chloride-Bearing Concrete", *ACI Materials Journal*, 89(5):439-448.
9. Parkins, R. N., (1994), "Intergranular Corrosion and Stress Corrosion and Stress Corrosion Cracking of Mild Steel in Clarke's Solution", *Corrosion Science*, 36(12):2097-2110
10. Aköz, F., Yüzer, N. ve Koral, S., (1996), "Silis Dumanı Katkılı ve Katkısız Harç İçindeki Çeliğe Farklı Konsantrasyonlardaki Magnezyum Klörürün Etkisi", *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 4. Ulusal Beton Kongresi*, 30-31. 10 - 11. 1996, İstanbul, 317-326.
11. Andrade, C., Alonso, C. ve Molina, F.J., (1993), "Cover Cracking as a Function of Bar Rebar Corrosion : Part I-Experimental Test", *Materials and Structures*, 26:453-464.

12. Al-Tayyib, A. J. ve Khan, M. S., (1988), "Corrosion Rate Measurements of Reinforcing Steel in Concrete by Electrochemical Techniques", *ACI Materials Journal*, May-June:172-177.
13. Liam, K. C., Ray, S.K. ve Nortwood, D. O., (1992), "Chloride Ingress Measurement and Corrosion of Potential Mapping Study of a 24-year-old Reinforced Concrete Jetty Structure in a Tropical Marine Environment", *Magazine of Concrete Research*, 44(160):205-215.
14. Khan, M. S., (1991), "Corrosion State of Reinforcing Steel in Concrete at Early Ages", *ACI Materials Journal*, 88(1):37-40.
15. ASTM C-876-91, American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.
16. Sharp, J. W., Figg, J. W. ve Leeming, M.B., (1988), "The Assessment of Corrosion of the Reinforcement in Marine Concrete by Electrochemical and Other Methods", II. International Conference on Performance of Concrete in Marine Environment, 21-26. 8.1988, New Brunswick, Canada, 105-125.
17. Zemañtis, J., (1998); *Modeling the Time to Corrosion Initiation for Concretes with Mineral Admixtures and/or Corrosion Inhibitors in Chloride-Laden Environments*, Ph Degree, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
18. Hansson, C. M., (1984), "Comments on Electrochemical Measurements of the Rate of Corrosion of Steel in Concrete", *Cement and Concrete Research*, 14(4):574-584.
19. Alonso, C., Andrade, C. ve Gonzalez, J. A., (1988), "Relation Between Resistivity and Corrosion Rate of Reinforcements in Carbonated Mortar Made with Several Cement Types", *Cement and Concrete Research*, 18(5):687-698.
20. Gulikers, J. J. W. ve Mier, J. G. M., (1991), "The Effect of Patch Repairs on The Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete", II. CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Canada, Supplementary Papers, 445-460.
21. Uomoto, T. ve Mısra, S., (1988), "Behavior of Concrete Beams and Columns in Marine Environment when Corrosion of Reinforcing Bars Takes Place", II. International Conference on Performance of Concrete in Marine Environment, 21-26. 8.1988, New Brunswick, Canada, 127-146.
22. Gonzalez, J. A., Andrade, C., Alonso, C. ve Feliu, S., (1995), "Comparison of Rates of General Corrosion and Maximum Pitting Penetration on Concrete Embedded Steel Reinforcement", *Cement and Concrete Research*, 25(2):257-264.
23. Andrade, C., Alonso, C. ve Molina, F. J., (1993), "Cover Cracking as a Function of Bar Rebar Corrosion : Part I-Experimental Test", *Materials and Structures*, 26:453-464.
24. Andrade, C. and Martinez, I., (2003), "Advances in the Corrosion Rate Monitoring in Real Structures", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5.Ulusal Beton Kongresi, Betonun Dayanıklılığı (Dürabilite), 1-3 Ekim, İstanbul, 215-226.
25. Yüzer, N., (1998), "Silis Dumanı Katkılı Betonarme Elemanlara Klorür Etkisinin Hızlandırılmış Korozyon Deneyi ile Araştırılması", Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
26. Güneyisi, E., Özturan, T., Gesoğlu, M., (2003), "Farklı Çimento Tipleri Kullanılarak Üretilen Beton İçindeki Donatının Korozyonunun Hızlandırılmış Deney ile İncelenmesi", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5.Ulusal Beton Kongresi, Betonun Dayanıklılığı (Dürabilite), 1-3 Ekim, İstanbul, 237-246..
27. Aköz, F., Zorbozan, M., Yüzer, N., (2000), "Betonarme Yapılarda Korozyon Hasarının Tespiti, Onarım İçin Öneriler", *Metal Dünyası*, Ekim, 25-28.