



Hadaan Pehlivan
Mahmut Aytekin

Kilis 7 Aralık University, Kilis-Turkey
hadaantaban@kilis.edu.tr; mahmutaytekin@kilis.edu.tr

DOI	http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2019.14.2.3A0089	
ORCID ID	0000-0002-2646-9080	0000-0002-2646-9080
CORRESPONDING AUTHOR	Mahmut Aytekin	

YUMUŞAK BETONARME ÇELİĞİNİN BETON BOŞLUK SUYU VE NaCl ÇÖZELTİSİ İÇERİSİNDE KOROZYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZ

Betonarme yapı sistemi, çok farklı çevresel etkiler altında kaldığı için, beton ve donatı açısından önemli dayanıklılık sorunlarını da beraberinde getirmektedir [1]. Korozyon çelik konstrüksiyonlu yapılarda kaçınılmazdır. Ancak etkileri ve sonuçları etkin bir koruma sağlayarak en aza indirilebilir [2]. Çalışmada beton boşluk suyu içerisine sırasıyla %0.06, %0.09, %0.12, %0.15' lik konsantrasyonlarda NaCl eklenerek hazırlanan çözelti içerisinde yumuşak betonarme çeliğinin korozyon davranışı incelenmiştir. Elektrokimyasal ölçümler 3 elektrot yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu ölçümler ile yumuşak betonarme çeliğini açık devre potansiyelleri, Nyquist eğrileri ve Tafel eğrileri elde edilerek incelenmiş ve sonuçları oransal olarak kıyaslanmıştır. Beton boşluk suyu ve beton boşluk suyuna farklı konsantrasyonlarda sırasıyla eklenen %0.06, %0.09, %0.12, %0.15' lik NaCl' nin yumuşak betonarme çeliği üzerindeki etkisi elektrokimyasal yöntemlerle incelendiğinde; beton boşluk suyu içerisindeki NaCl miktarı arttıkça betonarme çeliğinin korozyon akım yoğunluğunun arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Beton, Beton Boşluk Suyu, Korozyon, Yumuşak Betonarme Çeliği, Dayanıklılık

INVESTIGATION OF CORROSION BEHAVIOR OF MILD REINFORCED CONCRETE STEEL IN CONCRETE PORE WATER AND NaCl SOLUTION

ABSTRACT

Reinforced concrete structure system can be used under a wide range of environmental influences and also brings significant durability problems in terms of concrete and reinforcement [1]. Corrosion is inevitable in steel construction structures. However, its effects and results can be minimized by providing effective protection [2]. In the study, the corrosion behavior of mild reinforced concrete steel in solution prepared by adding NaCl at %0.06, %0.09, %0.12 and %0.15 concentrations in concrete pore water, respectively. Electrochemical measurements were made using 3 electrode method. With these measurements, the open circuit potentials of the mild reinforced concrete steel, Nyquist curves and Tafel curves were investigated and the results were compared proportionally. When the effects of %0.06, %0.09, %0.12 and %0.15 NaCl on the mild reinforced concrete steel were investigated by electrochemical methods, respectively, added to the concrete pore water at different concentrations. It was observed that as the amount of NaCl in the concrete pore water increased, the corrosion current density increased in reinforced concrete steel.

Keywords: Concrete, Concrete Pore Water, Corrosion, Mild Reinforced Concrete Steel, Durability

How to Cite:

Pehlivan, H. ve Aytekin, M., (2019). Yumuşak Betonarme Çeliğinin Beton Boşluk Suyu ve NaCl Çözeltisi İçerisinde Korozyon Davranışının İncelenmesi, *Physical Sciences (NWSAPS)*, 14(2):11-18, DOI: 10.12739/NWSA.2019.14.2.3A0089.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Beton çimento, agrega, su ve gerektiğinde katkı maddelerinin uygun oranlarda karıştırılmasıyla üretilen başlangıçta plastik kıvamlı olup zamanla çimentonun hidrasyonu sonucu sertleşen bir yapı malzemesidir. Betonun zaman içinde çevresel etkilere karşı kalıcı olması gerekmektedir. Dayanıklılık olarak ifade edilen bu olay betonun iç ve dış fiziksel, kimyasal veya fizikokimyasal etkilere karşı direnc göstermesi şeklinde tanımlanmaktadır [3]. Korozyon, ortamın elektrokimyasal etkisinden kaynaklanan malzeme kayıplarıdır [4]. Daha kapsamlı bir ifade ile korozyon, bir malzemenin yüzeyinin dıştan kimyasal etkiler veya elektrokimyasal yollarla değişime uğraması olarak tanımlanabilir [5]. Yapılarda kullanılan betonun karışım oranlarının ve bileşen malzemelerinin, dayanım, dayanıklılık, kıvam, yoğunluk ve donatının korozyondan korunmasına yönelik özellikleri sağlaması gerekmektedir [6]. Betonarme betonu üretiminde, donatının korozyona uğramasına, sertleşmiş betonun hacim değişmesine, beton yüzeyinde çirçiklenmeye ve lekelenmeye neden olabilecek maddelerin bulunmamasına dikkat edilmelidir. Araştırmalara göre deniz suyunun beton karma suyu olarak kullanılmasının donatı korozyonuna neden olmasından dolayı kullanılmaması önerilmektedir [7].

Beton donatısının korozyonu öncelikle elektrokimyasal mekanizmaya göre gerçekleşirken beton, kimyasal korozyona uğrar. Korozyona uğrayan betonun dayanımı ile birlikte beton içinde gömülü çeliğin dayanımı da azalmaktadır. Betonarme yapılardaki korozyon, değişken doğal ortam nedeni ile koroziif ortam-beton ve beton-donatı ara yüzeylerinde sürekli olarak meydana gelen elektrokimyasal ve kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşur. Betonarmedeki çevre-beton-donatı sisteminde, çevrenin değişen koşullarının oluşturduğu kimyasal korozyonla beton kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinde kalite kaybına uğrar. Böylece betonun demire sağladığı pasifleştirici alkali ortam, koroziif ortama dönüşürken donatı çeliğinin üzerindeki koruyucu pasif tabaka da etkisini kaybeder. Bunun sonucunda beton-donatı ara yüzeyinde oluşan hacimli korozyon ürünleri betonu çatlatacak seviyede içsel gerilmelerin ortaya çıkmasına yol açarlar [3]. Açık devre koşullarında korozyona uğrayan elektrotun akım veya potansiyelinde titreşim şeklinde kendiliğinden olan değişimler, çok iyi bilinen ve kolayca gözlenebilen bir olaydır. Gelişigüzel olan bu değişimler aralık korozyonu ve çukur korozyonunun meydana geldiği durumlar için incelenmiştir. İster elektrot dıştan polarize edilsin, isterse açık devre koşullarında bulunsun akım veya potansiyeldeki bu titreşimlerin kaynağı, yüzeyde oluşan mikro korozyon hücreleri ve aynı yüzeyde yürüyen reaksiyonların farklı bölgelerde farklı hızlarda devam etmesidir. Elektrokimyasal sistemlerde kendiliğinden olan bu titreşimler için elektrokimyasal gürültü ifadesi kullanılmaktadır [8 ve 9].

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Çalışma yumuşak betonarme çeliğinin beton boşluk suyu ve NaCl çözeltisi içerisinde korozyon davranışının incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Beton boşluk suyu pH değeri 12-13 aralığında olup bazik karakterdedir. Bu nedenle korozyon ölçümleri benzer özellikte doygun Ca(OH)₂ çözeltisi kullanılarak alınmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

3.1. Kullanılan Kimyasal Maddeler ve Elektrotlar (Chemical Substances and Electrodes)

Korozyon çalışmalarında beton boşluk suyuna benzer karakterde olan Ca(OH)₂ çözeltisi kullanılmıştır. Farklı oranlarda NaCl-ikamesiyle hazırlanan çözeltilerin bileşenleri şu şekildedir:

Doygun $\text{Ca(OH)}_2 + 0.00 \text{ NaCl}^-$
Doygun $\text{Ca(OH)}_2 + 0.06 \text{ NaCl}^-$
Doygun $\text{Ca(OH)}_2 + 0.09 \text{ NaCl}^-$
Doygun $\text{Ca(OH)}_2 + 0.12 \text{ NaCl}^-$
Doygun $\text{Ca(OH)}_2 + 0.15 \text{ NaCl}^-$

Çalışmada korozyon ölçümlerini yapabilmek için çalışma elektrotu olarak yüzey alanı 0.785cm^2 olan donatı çeliği, karşıt elektrot olarak 1cm^2 yüzey alanına sahip platin elektrot ve referans elektrot olarak ise gümüş-gümüş klorür elektrotu (Ag/AgCl , Cl^-) kullanılmıştır. Elektrokimyasal korozyon parametrelerinin belirlenmesinde üç elektrotlu ölçüm yöntemi kullanılmıştır ve voltametrik ölçümler CHI604e programı ile bilgisayar kontrollü CH Instruments (600E) model potansiyostat cihazı kullanılarak yapılmıştır. Çözeltilerin pH değerlerinin belirlenmesinde ise ATC marka pH metre kullanılmıştır. Çalışma elektrodunun açık devre potansiyelleri (yarı hücre potansiyeli), elektrokimyasal empedans ve Tafel ölçümleri alınmıştır.

3.2. Yarı Hücre Potansiyel Yöntemi (Half-Cell Potential Method)

Korozyon hasarının tespitinde, korozyon olasılığının meydana geldiği aktif alanları gösteren potansiyel haritalar sıklıkla kullanılmaktadır. Bu test yönteminde, takviye çeliğinin korozyon aktivitesini belirlemek için elektrik yarı-hücre potansiyeli yerinde ya da laboratuvarında ölçülür. Korozyon potansiyelinin ölçülmesine dayanan bu yöntemde, elektrokimyasal korozyon kolay ve hızlı bir şekilde gözlenmektedir. Yarım hücre potansiyeli yönteminde, referans elektrod beton yüzeye temas ettirilir, betondaki takviye ile referans elektrod arasındaki potansiyel fark, yüksek empedanslı bir voltmetre ile ölçülür. Betonun elektrik iletkenliği yüksek ise, iletkenliği sağlamak için referans elektrod ve beton arasına özel bir sıvı ile nemlendirilmiş bir sünger koyulur. Bu yöntem, betonun donatı üzerindeki kalınlığını dikkate almaz, beton elemanın herhangi bir servis döneminde uygulanabilir [10 ve 11].

3.3. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi Yöntemi (EIS) (Electrochemical Impedance Spectroscopy Method)

Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) çeşitli tekniklerle ölçüm sonuçlarını değerlendiren ve hatasız kinetik sonuçlar veren çok yararlı bir elektrokimyasal yöntemdir. Alternatif akım (AC) kullanılarak uygulanan Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) yöntemi, doğrusal akım (DC) yöntemlerine göre; ölçme tekniğinden gelen hataların minimum olması, reaksiyonun mekanizmasının aydınlatılması ve sistemin modellenmesi gibi konularda avantajlı olduğu için bu çalışmada kullanılmıştır. EIS ölçümleri için üç elektrotlu ölçüm tekniğine göre; çalışma elektrotu olarak korozyonu ölçülecek betonarme çeliği, karşıt elektrot olarak da doygun kalomel elektrot kullanılmıştır. Betonarme çeliğinin korozyon hızı ölçümlerinde farklı elektrokimyasal yöntemler kullanılabilir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) olarak adlandırılan bu yöntem ile metal yüzeyine uygulanan küçük genlikli AC, yüzey yapısını fazla değiştirmeyeceği için diğer yöntemlere göre daha doğru sonuç vermesi beklenmektedir. Ayrıca AC empedans yöntemi özellikle empedansın yüksek olduğu veya iletkenliğin çok düşük olduğu ortamlarda donatı-beton ara yüzeyine ait polarizasyon direnci ve kapasitans özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Nyquist eğrisi AC empedans veri değerlendirmeleri için kullanılan yaygın bir tekniktir [1].

3.4. Tafel Ekstrapolasyon Yöntemi (TP) (Tafel Extrapolation Method)

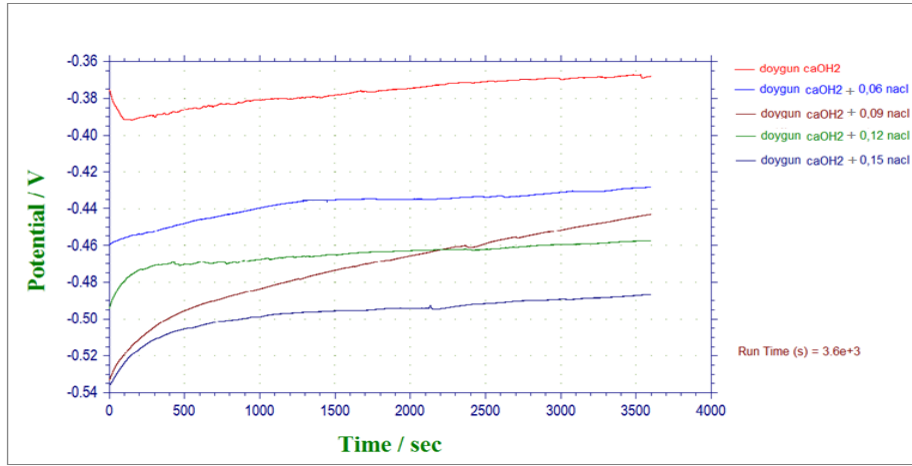
Korozyon akımı veya korozyon hızı, anodik ve katodik polarizasyon eğrilerinin Tafel bölgelerinin korozyon potansiyeline göre hesaplanmasıyla belirlenir. Anodik ve katodik Tafel bölgeleri birlikte elde edilemediğinde, sadece bir tanesi korozyon potansiyelinin ekstrapolasyonu ile korozyon hızına sahip olabilir. Korozyon olayları tek bir çözünme reaksiyonundan ibaret değildir. Elektrot yüzeyi boyunca birçok indirgeme ve oksidasyon reaksiyonları gerçekleşir. Bu reaksiyonlar özellikle alaşımlar için daha karmaşıktır. Bu nedenle, korozyon olayını elektrokimyasal yöntemlerle araştırırken, tüm sistemin davranışını toplu olarak gösteren karma potansiyel teorisi kullanılır. Tek bir elektrokimyasal olayda, iki veya daha fazla indirgeme ve oksidasyon reaksiyonlarının bir kombinasyonunda toplam indirgeme akımının toplam oksidasyon akımına eşit olması potansiyeli, oksidasyon akımının indirgenme akımına eşit olduğu potansiyel olarak denge potansiyelleri (E_d) ile korozyon potansiyeli (E_{COR}) olarak adlandırılır. Korozyon potansiyelinde net bir akım bulunur. Fakat toplam anodik akım toplam katodik akıma eşit olduğu için, bu akım okunmaz. Doğrudan ölçülmeyen bu akan korozyon akımı (I_{COR} ($\mu A/cm^2$)) olarak adlandırılır. Korozyon akımının elektrotun yüzey alanına bölünmesiyle de elde edilen akım yoğunluğu (I_{COR} ($\mu A/cm^2$)), metalin korozyon hızını verir. Akım-potansiyel eğrileri, akımlardan veya potansiyellerden birini kontrollü bir şekilde değiştirerek ve diğerinin değerlerini grafiğe geçirerek elde edilir. Korozyona uğrayan metal için anodik ve katodik Tafel eğrileri deneysel olarak belirlenir. Test sonuçları çizildiğinde, doğrusal bölümler uzatılır ve bu sistem için aşınma oranı kesme noktalarında bulunur [12].

4. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSIONS)

Yapılan ölçümler sonucunda açık devre ölçümleri, empedans ölçümlerinden elde edilen Nyquist diyagramları ve Tafel eğrileri elde edilmiştir.

4.1. Açık Devre Potansiyel Ölçümleri (Measurements of Open Circuit Potential)

Açık devre potansiyeli devreden hiç akım geçmiyorken ölçülür. Bu ölçüm grafiklerinde değerler pozitiften uzaklaştıkça korozyon davranışı artar [13]. Açık devre potansiyel ölçümleri sonuçları incelendiğinde çözelti içerisinde çeliğin elektrokimyasal reaksiyonlara uğradığı görülmüştür. Referans olarak kullanılan doymuş $Ca(OH)_2$ çözeltisi içinde yumuşak betonarme çeliğin korozyon potansiyeli -0.3754V, sırasıyla eklenen NaCl ile birlikte; -0.4594V, -5332V, -0.4943V, -0.5363V olarak ölçülmüştür. Ayrıca bu ölçümler grafiksel olarak Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Doygun $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + %0.00, %0.06, 0.09, 0.12, 0.15 NaCl açık devre ölçümü
(Figure 1. Saturated $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + %0.00, %0.06, 0.09, 0.12, 0.15 NaCl open circuit measurement)

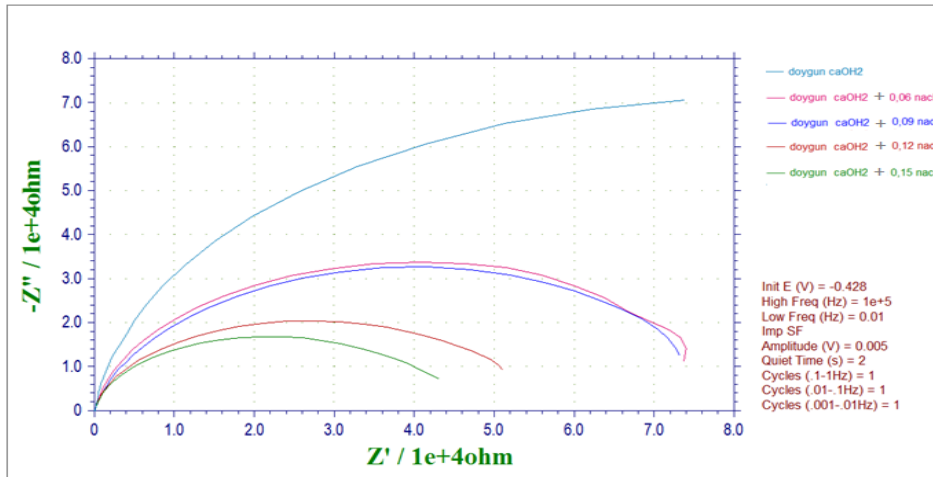
Tablo 1. Açık devre potansiyel ölçüm sonuçları
(Table 1. open circuit potential measurement results)

Numune Adı	%'lik NaCl derişimi	Potansiyel (V)
Referans	0.00	-0.3757
1	0.06	-0.4594
2	0.09	-0.5332
3	0.12	-0.4943
4	0.15	-0.5363

Fakat malzemelerin korozyon davranışı belirlenirken sadece açık devre potansiyeline göre değerlendirme yapmak yeterli değildir. Nyquist ve Tafel eğrilerinin de incelenmesi daha doğru bir değerlendirme için faydalı olacaktır.

4.2. Empedans Ölçümleri (Measurements of Impedance)

Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) yöntemi kullanılarak elde edilen Nyquist eğrileri Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Doygun $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + 0.00, 0.06, 0.09, 0.12, 0.15 NaCl içerisinde elde edilen nyquist eğrileri
(Figure 2. Saturated $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + 0.00, 0.06, 0.09, 0.12, 0.15 NaCl nyquist curves obtained)

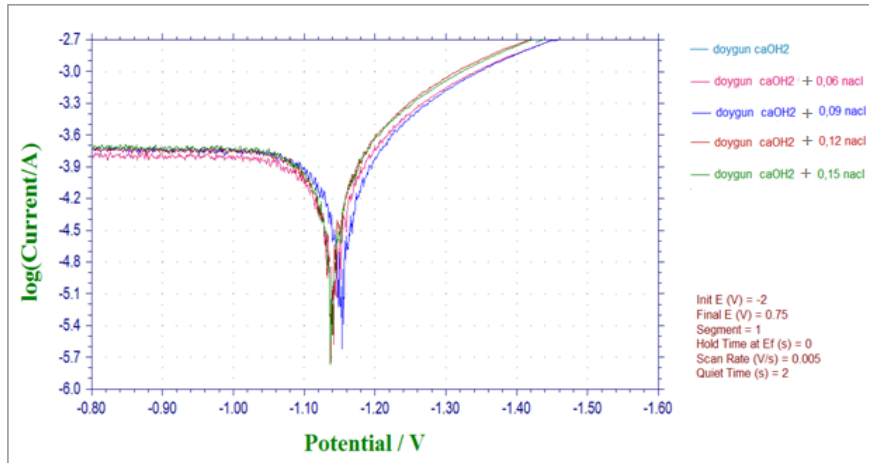
Beton içine gömülü betonarme çeliği Nyquist diyagramında, yüksek frekans bölgelerinde ikinci bir loop görülmektedir. Bu bölgenin temsil ettiği direnç beton örtüsünün direnci (R_d) yani difüz tabaka direncidir. Bu direnç beton olgunlaşma süreci tamamlandığında oluşan ve beton porlarının tıkanmasına paralel gelişen oldukça büyük bir dirençtir. Bu çalışmada ise betonarme çeliği korozif çözelti içerisine doğrudan daldırılıp korozyon ölçümleri yapıldığı için sade ikinci loop oluşmuştur.

Tablo 2. Nyquist eğrileri direnç değerleri
(Table 2. Nyquist curves resistance values)

Çözelti	NaCl Derişimi (%)	Rs (Çözelti) (ohm)	Rp (Numune) (Ohm)
Referans	0.00	90.29	156.800
1	0.06	66.25	77.803
2	0.09	56.60	78.176
3	0.12	56.86	50.512
4	0.15	48.73	42.307

4.3. Tafel Ölçümleri (Measurement of Tafel)

Yapılan çalışmaya ait Tafel eğrileri Şekil 3'de verilmektedir. Grafikler incelendiğinde isesadece $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çözeltisi ve bu çözelti içerisine NaCl eklenmeye başlandıktan sonraki durumu arasında çok belirgin bir değişiklik olmamakla beraber, eklenen %0.06, %0.09, %0.12, %0.15'lik NaCl eklenmesinden sonra korozyon potansiyeli az miktarda daha negatif değere kaydığı ve korozyon akım yoğunluğunda artış olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 3. Doygun $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + 0.00, 0.06, 0.09, 0.12, 0.15 NaCl içerisinde tafel ölçümleri
(Figure 3. Saturated $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + 0.00, 0.06, 0.09, 0.12, 0.15 NaCl tafel measurements)

Tablo 3. Numunelerin Tafel Ölçüm sonuçları
(Table 3. Tafel Measurement Results of Samples)

Çözelti Adı	NaCl Derişim (%)	Korozyon Potansiyeli (V)
Referans	0.00	-1.1260
1	0.06	-1.1398
2	0.09	-1.1589
3	0.12	-1.1368
4	0.15	-1.1365

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Yumuşak betonarme çeliğinin elektrokimyasal özellikleri, beton boşluk suyuna benzer özellikte doygun Ca(OH)_2 çözeltisine farklı konsantrasyonlarda sırasıyla eklenen 0.00, 0.06, 0.09, 0.12, 0.15'lik NaCl ortamında incelenmiştir. Çözelti içerisindeki NaCl miktarı arttıkça çeliğinde korozyon akım yoğunluğunun da arttığı görülmüştür. Çimentolu sistemlerde betonarme çeliğinin korozyon özelliklerini araştırmak için, sistem içerisine betonarme çeliğini gömmek yerine pratik olarak beton boşluk suyunu kimyasal olarak temsil eden doygun Ca(OH)_2 çözeltisi ortamı kullanılabilir. Korozyonu önlemek için; beton içerisine NaCl girmesi olabildiğince engellenmeli, engellenemiyorsa da minimum düzeyde tutulmaya çalışılmalıdır. Bunun için betonun; su geçirimsizliğini, s/ç oranını, kılcallığını azaltacak, doluluk oranını arttıracak katkı maddeleri kullanılabilir. Ayrıca segregasyon oluşturmadan vibratör kullanımına özen gösterilmeli ve kür koşullarına dikkat edilmelidir. Deprem bölgelerinde ise daha dikkatli yapı tasarımı yapılmalı ve beton permeabilitesi minimum düzeyde olmalıdır. Ayrıca yapının bulunduğu yere ve çevre koşullarına göre paspayına ve beton sınıfına dikkat edilmeli, donatı mümkün olduğu kadar dış etkilerden korunmalıdır.

NOT (NOTICE)

Bu çalışma, 26-28 Eylül 2018 tarihinde Hatay-Türkiye'de düzenlenen 5. Uluslararası Korozyon Sempozyumu'nda (KORSEM'18), sözlü bildiri olarak sunulmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yiğiter, H., (2008). Betonarme Donatısında Klorid Korozyonu Gelişiminin Elektrokimyasal Yöntemlerle Belirlenmesi. Doktora Tezi. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [2] Kaftan, M.A., (2006). Çelik Yapılarda Korozyon Oluşumu ve Korozyondan Korunma Yöntemlerinin Maliyet Açısından Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Denizli: Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [3] Taban (Pehlivan), H., (2010). Farklı Oranlarda Zeolitik Tüf Katkısının Beton Özellikleri ve Betonarme Çeliği Korozyonuna Etkisinin Araştırılması. Doktora Tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [4] Onaran, K., (1986). Malzeme Bilimi. İstanbul: Çağlayan Basımevi.
- [5] Baradan, B., (1998). Yapı Malzemesi. İzmir: II. İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi Müh. Fakültesi Yayıncılık.
- [6] Zongjiin, L., (2011). Advanced Concrete Technology. ISBN:978-0-470-43743-8.
- [7] Şimşek, O., (2007). Beton ve Beton Teknolojisi. Ankara: Seçkin Yayınevi.
- [8] Searson, P.C. and Dawson, J.L., (1988). Analysis of Electrochemical Noise Generated By Corroding Electrodes Under Open-Circuit Conditions. J. Electrochem. Soc. 135(8), ss:1908-1915.
- [9] Hladky, K. and Dawson, J.L., (1981). The measurement of Localised Corrosion Using Electrochemical Noise. Corrosion Science. 21(4):317-322.
- [10] Khan, M.S., (1991). Corrosion State of Reinforcing Steel in Concrete at Early Ages. ACI Materials Journal. 88(1):37-40.
- [11] Liam, K.C., Ray, S.K., and 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.



-
- [12] Üneri, S., (1998). *Korozyon ve Önlenmesi*. Ankara: Korozyon Derneği Yayını.
- [13] Taban (Pehlivan) H. ve Çolak, H., (2014). Zeolitik Tüf Katkısının Betonarme Çeliği Korozyon Özelliklerine Etkisinin Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) Yöntemi İle İncelenmesi. *Uluslararası Hakemli Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 1(Issue:02), ss:38-51.