

Farklı Gerilme Miktarlarının Donatı Çeliğinin Korozyonuna Etkisi

İslam Çelik¹, İlker Ustabas^{1*}, Ali Paşa Hekimoğlu² ve Murat Haciosmanoğlu²

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Türkiye

²Makine Mühendisliği Bölümü / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Türkiye

*(ilker.ustabas@erdogan.edu.tr)

Özet – Beton ve çeliğin birlikte kullanılmasıyla üretilen betonarme yapı elemanları geniş bir kullanım alanına sahiptir. Donatı çeliği malzemesinin özellikleri ve yapı elemanlarının servis gördüğü çevrenin şartları donatıları korozyona uğratabilmektedir. Donatı korozyonu yapıların servis ömrünü kısaltan, önemli ekonomik kayıplara yol açan bir bozulma mekanizmasıdır. Beton, pas payının yetersizliği, karbonatlaşma ile pH değerinin düşüklüğü, klor gibi agresif iyonların varlığı, imalat hataları gibi durumlardan dolayı donatıyı koruyabilme özelliğini kaybedebilmektedir. Korozyona maruz donatı çeliği kesitini kaybetmekte ve taşıyıcı elemanlardaki asıl görevi olan çekme kuvvetlerini karşılayamamaktadır.

Bu çalışmada saf suya maruz B420C sınıfı donatı çeliğinde ön gerilme uygulamaksızın ve belirlenen seviyelerde ön gerilme uygulandıktan sonra donatı çeliğinin korozyon hızları ölçülmüştür. Uygulanan ön gerilme seviyeleri elastik, akma, çekme ve kopma bölgelerinde olacak şekilde belirlenmiştir. Donatının korozyon hızları elektrokimyasal yöntem ile deneysel olarak ölçülmüştür.

Çalışma sonucunda donatı çeliğine ön gerilme yüklemesinin donatı çeliğinin korozyon hızını artırdığı tespit edilmiştir. En yüksek donatı korozyon hızı çekme bölgesinde gerilme uygulanan donatıda görülmüştür. Çekme gerilmesi ve kopma gerilmesi uygulanan numuneler karşılaştırıldığında çekme mukavemeti değerinde gerilme uygulanan numunede daha az korozyon hızı ortaya çıktığı gözlenmiştir. Bu durum donatı çeliğinin yapısında gerilmeler nedeniyle ortaya çıkan değişimlere dayandırılarak irdelenmiştir. Çalışma sonucunda laboratuvarında ölçülen donatı korozyon hızlarıyla yapının servis gördüğü çevre şartlarındaki donatı çeliğinin korozyon hızlarının tahmin edilebileceği anlaşılmıştır.

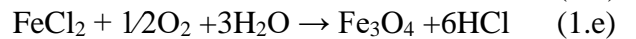
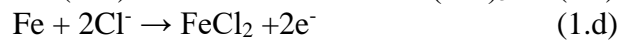
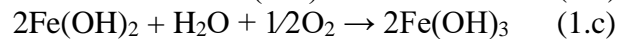
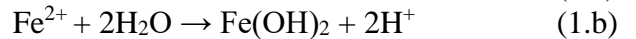
Anahtar Kelimeler – Donatı Korozyonu, Tafel Eğrisi, Korozyon Hızı, Korozyon Direnci, Çekme Dayanımı

I. GİRİŞ

Donatı korozyonu, çelik donatının doğada bulunan düşük enerjili temel hal seviyesine dönmek için kimyasal veya elektro kimyasal reaksiyonlar sonucunda meydana gelir. Dünya atmosferinde donatı çeliği kararlı halde değildir. Donatı çeliği su ve nemin bulunduğu her ortamda reaksiyona girme eğilimindedir. Donatı korozyonu kendiliğinden gerçekleşen bir olaydır ve donatı çeliği içeren yapı elemanlarında hasarlara yol açabilir. Korozyonun önlenmesi için donatı çeliğinde korozyona karşı önleyici tedbirler almak gerekir.

Korozyon olayında elektronların açığa çıktığı anodik reaksiyonlar ve elektronların tüketildiği katodik reaksiyonlar gerçekleşir. 1.a, 1.b, 1.c, 1.d, 1.e ve 2.a'da bu reaksiyonlar gösterilmiştir.

Anot Reaksiyonları:



Katot reaksiyonları:



Ortamda Cl⁻ iyonunun bulunması donatı korozyonunun şiddetini artırmaktadır. TS EN 206 (2012) standardında Cl⁻ miktarı çimento ağırlığının yüzdesi olarak çelik donatı ihtiva etmeyen betonlarda %1, çelik donatı ihtiva eden betonlarda %0,2 – 0,4, öngermeli betonlarda ise %0,1 – 0,2 aralığında olması gerektiği belirtilmiştir [1]. Miyagawa [2] betondaki klor miktarının çimento kütlesine göre %0,3'ten az

olması durumunda düşük korozyon, %0,3 ile %1 arasında orta derecede korozyon ve %1'den fazla klor bulunması durumunda yüksek korozyon oluşacağını tespit etmiştir. Genellikle beton veya betonarme elemanlarla ilgili standartlarda betonun klorür içeriğine sınırlandırmalar getirilerek korozyona karşı direnç sağlanmaktadır. Ancak betonarme elemanlarda serbest klorür miktarının bilinmesi korozyon için yeterli değildir. Beton-donatı arayüzündeki boşluk suyunda $[Cl^-]/[OH^-]$ oranının kritik değer olan 0,6'yı aşması durumunda donatıda koruyucu film tabakası parçalanır ve donatı korozyona karşı korumasız hale gelir [3].

Beton yüksek pH değerinden kaynaklanan alkali ortam sayesinde donatı çeliğini korozyona karşı koruyan bir yapı malzemesidir. Gözenekliliği (porozitesi) düşük, yoğunluğu fazla, örtü beton kalınlığı (paspayı) yeterli ve kaliteli imal edilmiş bir betonda korozyon tehlikeli sınırlara ulaşmamaktadır. Üretim sırasında yapılan yanlışlıklar veya betonun servis gördüğü ortamdan kaynaklanan karbonatlaşma, sülfat saldırısı gibi kimyasal reaksiyonlar, ya da aşınma, erozyon, donma çözünme gibi fiziksel beton bozulma mekanizmaları betonun donatı çeliğini koruyucu özelliğini ortadan kaldırmaktadır. Betonun koruyucu etkisinin azalması ya da tamamen ortadan kalkmasıyla suyun ve nemin donatıya ulaşması sonucunda donatı korozyonu başlamaktadır.

Betonun pH değerinin azalması donatı korozyonu reaksiyonlarının hızlanmasına yol açan durumdur. Betona gömülü donatı çubuklarının korozyonunun başlaması çoğunlukla, betonun yüksek alkali durumunda donatının yüzeyinde oluşan pasif filmin klorür kaynaklı parçalanmasının bir sonucudur. Donatı yüzeyinde belirli bir kritik klorür seviyesi olduğu zaman pasif film parçalanır ve donatıyı korozyona karşı koruyan etken ortadan kalkmış olur. Beton içindeki pH'ın karbonatlaşma vb. olaylar sonucunda düşmesi ile beton donatının pasif kalması için gerekli olan ortamı oluşturamaz ve bunun sonucunda korozyonun başlaması için gerekli olan kritik klorür seviyesi daha da düşerek donatının korozyona başlama süresi azalır [4]. Burada dikkat edilmesi gereken husus, yüksek pH'ın olduğu ortamda da korozyonun başlaması için belirli bir kritik klorür içeriği bulunması gereğidir. Ancak pH'ın düşük olduğu duruma göre bu kritik klorür içeriği daha yüksektir. Bu durum da ortamda birikmesi gereken klorür miktarını arttırır ve pH'ın yüksek olması yapının belirli bir miktar

klorür konsantrasyonuna ulaşınca kadar korozyona uğramadan stabil ve güvenli şekilde kalmasını sağlar. Donatı korozyonu, beton içinde birbirine yakın ya da uzak bölgelerde çeliğin yüzeyindeki elektrokimyasal potansiyel farklılıklar nedeni ile anodik ve katodik bölgeler oluşturan bir elektrolit ve beton gözenek çözeltisi arasında meydana gelir [5]. Sıradan bir portland çimentosu ile hazırlanan betonun pH'ı 12,5 civarındadır. Gözenek çözeltisinin pH'ı 10,5'ten yüksek olduğunda donatı üzerinde koruyucu pasif bir oksit tabaka oluşur. Bu koruyucu tabaka 1 mm kalınlığında yoğun bir γ FeOOH filmidir ve doğası gereği dinamiktir. Yani aynı zamanda hem bozulur hem de yeniden oluşur. Bu film tabakası uygun koşullar altında uzun süre dayanabilmektedir [6]. Bu pasif tabaka beton içinde demir katyonlarının (Fe^{2+}) elektrolit içindeki çözeltiliye girmesini ve oksijen anyonlarının (O^{2-}) çelik yüzeyle temas etmesini engelleyerek bir bariyer görevi görür [7]. Çelik donatının yüzeyindeki bu pasif katman beton içinde iki yolla bozulabilir. Birincisi karbonatlaşma veya yanlış üretim ile betonun pH'ının düşmesi, ikincisi ortamda klorür iyonlarının var olmasıdır. Bu iki durumdan klorür iyonları beton içinde donatı korozyonunu başlatan temel unsur olarak kabul edilir. Klorür iyonları da betona ya beton hazırlanırken kullanılan karma suyu ve mineral katkıları yoluyla ya da hizmet ömrü boyunca deniz ve yeraltı suyu gibi dış ortama maruz kalması durumunda girebilir [8].

Çelik donatının korozyonu yapılar için en önemli hasar nedenlerinden biridir ve dünya çapında önemli miktarda ekonomik kayıplara neden olur. Donatı korozyonu yapının servis ömrünü etkilemektedir. Donatı korozyonu yapıya uygulanacak bakım ve onarımlarında göz önünde tutulması gereken önemli bir olaydır. Donatı çelikleri yapılarda kullanılmak için kesilme ve bükülme gibi mekanik etkilere maruz kalmaktadır. Söz konusu çelikler servis gördüğü ortamda da elastik ve plastik deformasyon bölgelerindeki kuvvetlere maruz kalabilmekte ve özellikle çekme kuvvetlerini taşımaktadır. Bu çalışmada farklı gerilmelere maruz bırakılıp yük kaldırıldıktan sonra belli boyutlarda kesilen donatı çeliği numunelerinin korozyon hızları elektrokimyasal yöntem ile deneysel olarak ölçülmüştür.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Kullanılan Malzeme Özellikleri ve Uygulanan İşlemler

Çalışmada kullanılan B420C sınıfı donatı çeliğinin kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan donatı çeliğinin kimyasal bileşimi (% ağırlık)

Element	Fe	C	Si	Mn	Cr	P	S
%	97,7	0,22	0,53	1,44	0,06	0,03	0,02

Tablo 1’de kimyasal bileşimi verilen Ø14 mm çapındaki B420C donatı çeliğinden 450 mm uzunluğunda hazırlanan Şekil 1a’da fotoğrafı verilen numunelerden ön gerilme uygulanmadan ve ön gerilme uygulandıktan sonra yüksekliği 5 mm ve yüzey alanı 1 cm² olacak şekilde silindirik korozyon deney numuneleri (Şekil 1b) tornada işleme yöntemiyle hazırlanmıştır.

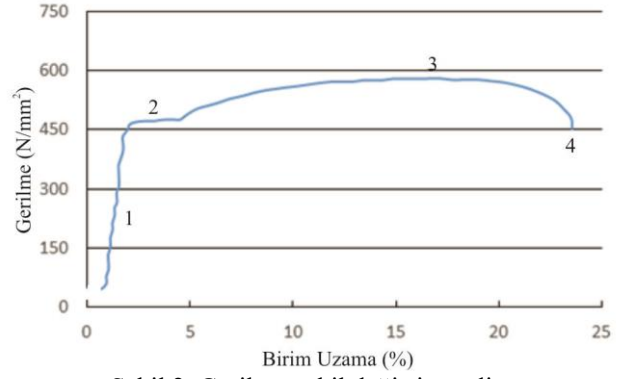


Şekil 1. (a) Tornada işlenmiş donatı çeliği (b) Donatı çeliğinden kesilen parça

Çelik numunelere uygulanan gerilme değerleri söz konusu çeliğin Şekil 2’de verilen gerilme-birim uzama eğrisi göz önüne alınarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan donatı çeliğinin ortalama akma gerilmesi 460 MPa, çekme gerilmesi 550 MPa ve kopma dayanımı 450 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 2’deki gerilme birim uzama eğrisinde 1 numaralı kısım elastik, 2 numaralı kısım akma, 3 numaralı kısım çekme ve 4 numaralı kısım kopma bölgesi olup, uygulanan gerilme değerleri bu bölgelerde olacak şekilde belirlenmiş ve söz konusu değerler Tablo 2’ verilmiştir.

Tablo 2. Donatı çeliğine uygulanan ön gerilme değerleri

Bölge No	1	2	3	4
Gerilme (N/mm ²)	300±10	455±10	550±10	445±10



Şekil 2. Gerilme-şekil değiştirme diyagramı

B. Korozyon Deneyleri

Bu çalışmada gerçekleştirilen korozyon deneyleri Ivium marka Vertex Potansiyostat/Galvanostat, Zahner marka KMZ-3 model korozyon hücresi ve verilerin deney boyunca sürekli kaydedildiği bir bilgisayardan oluşan deney düzeneğinde gerçekleştirildi. Deneyler oda sıcaklığında, -0,6V ile +0,6V potansiyel aralığında, 1 mV gerilim adımı ve 5mV/s tarama hızında yapılmıştır. Deneylere başlamadan önce korozyon hücresinin elektrokimyasal olarak denge durumuna gelmesi numuneler yaklaşık 30 dakika çözelti içerisinde bekletildi. Bu esnada açık devre potansiyel (OCP) eğrisi takip edilerek sistemin dengeye gelip gelmediği sürekli kontrol edildi. OCP dengeye gelince deneylere başlanarak Tafel polarizasyon eğrileri elde edildi. Tafel polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon akım değerleri Denklem 3’teki formülde yerine yazılarak korozyon hızları hesaplandı.

$$KH = (3272 \times I_{corr} \times EW) / (d \times A) \quad (3)$$

Bu formülde; KH: korozyon hızı, I_{corr}: korozyon akımını, EW: malzeme özgül eşdeğer kütle, d: malzemenin yoğunluğunu, A: korozyon test numunesinin yüzey alanını ifade etmektedir. Korozyon hızını bulmak için Denklem 3’te kullanılan malzeme özgül eşdeğer kütlesi (EW) ise Denklem 4 [9] kullanılarak hesaplandı.

$$EW = \sum W_i / (n_i \cdot f_i) \quad (4)$$

Burada; EW: malzeme özgül eşdeğer kütle, W_i: demir numunenin yapısında bulunan her bir elementin atom ağırlığı, f_i: demir numunenin yapısında bulunan her bir elementin kütle oranı, n_i: demir numunenin yapısında bulunan her bir elementin değerliğini göstermektedir.

Numunelerin korozyon dirençleri (R_p) ise bulunan korozyon akımlarına göre Denklem (5) kullanılarak hesaplandı.

$$I_{corr} = (\beta_a \cdot \beta_c) / (2.303(\beta_a + \beta_c)) \cdot 1/R_p \quad (5)$$

Burada β_a ve β_c sırasıyla tafel polarizasyon eğrilerin anodik ve katodik kollarının eğimleri, I_{corr} korozyon akımı ve R_p korozyon direncidir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çelik donatılarda meydana gelen korozyonun inşaat sektöründe ortaya çıkardığı ekonomik ve yapısal zararlar oldukça büyüktür. Bu nedenle çelik donatıların korozyona uğrama süreçleri, korozyon mekanizmaları ve korozyon hızlarının izlenmesi vazgeçilmez bir önem arz etmektedir. Donatı çeliğinin servis gördüğü ortamdaki korozyona uğrama hızlarının bilinmesi durumda yapının ömrü, bakım görme süreleri gibi hususlar tespit edilebilmektedir. Yapıda kullanılan çelik donatılar eğilip bükülme ve kesilme gibi şekil değiştirme ve gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu çalışmadaki çelik donatının korozyonunun, çelik donatıya uygulanan gerilmelerden dolayı donatı üzerinde meydana gelen çatlaklardan ve deformasyonlardan nasıl etkilendiğini incelenmiştir. Çelik donatılar üzerine uygulanan gerilmelerden akma dayanımından büyük olanlar tasarımsal olarak aşırıdır ve gerçek bir yapıda bu seviyede yüklemeler gerçekçi değildir. Ancak betonarme yapıların imalat süreci boyunca donatıların özellikle gönye, etriye, pilye ve kanca gibi kısımlarında donatılar plastik şekil değiştirmelere maruz kalmaktadır. Bu plastik şekil değiştirmelerden dolayı donatı üzerinde meydana gelecek olan korozyonun donatı üzerindeki etkisini ve eğilimini gözlemlemek amacıyla çekme ve kopma dayanımları da kullanılmıştır.

Korozyon deneylerinden elde edilen korozyon potansiyeli (E_{corr}), korozyon akımı (I_{corr}), korozyon direnci (R_p) ve korozyon hızı değerleri Tablo 3'te, Tafel polarizasyon eğrileri ise Şekil 3'te verilmiştir. Tablo 3'ten görüleceği üzere uygulanan gerilme arttıkça malzemenin gerilme birim uzama eğrisinde gözlenen çekme mukavemeti değerine kadar korozyon hızının arttığını, bu değerden sonra ise korozyon hızının azaldığını göstermektedir. Kopma noktasında alınan numunelerde çekme ve akma gerilmesi uygulanmış numunelere göre daha düşük korozyon hızı ölçülmüştür.

Tablo 3. Elektrokimyasal korozyon deneyleri sonucunda bulunan sonuçlar

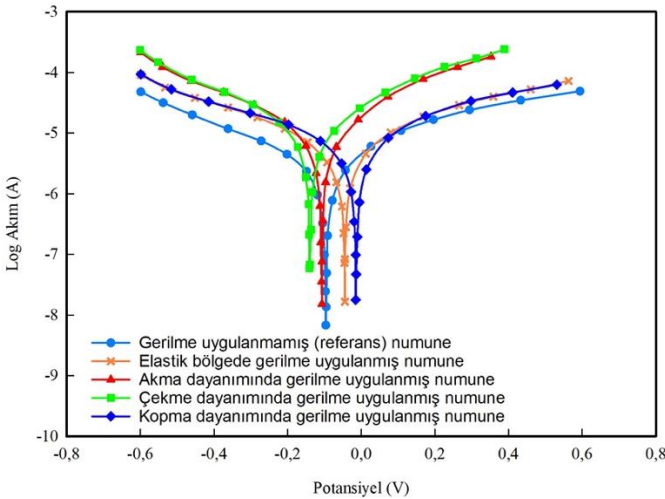
Çözelti	Gerilme bölgeleri	E_{corr} (V)	I_{corr} ($A.cm^{-2}$)	Korozyon direnci R_p (ohm)	Korozyon hızı (mm/yıl)
Saf su	Referans	0,1756	$4,5 \times 10^{-6}$	$2,57 \cdot 10^4$	0,053
	Elastik	0,0676	$5,5 \times 10^{-6}$	$2,43 \cdot 10^4$	0,063
	Akma	0,1110	$8,3 \times 10^{-6}$	$1,53 \cdot 10^4$	0,097
	Çekme	0,1733	$9,4 \times 10^{-6}$	$1,46 \cdot 10^4$	0,109
	Kopma	0,1129	$6,8 \times 10^{-6}$	$1,70 \cdot 10^4$	0,079

Korozyon deneyleri sonucunda çelik numunelere uygulanan gerilme miktarının artmasının korozyon hızında artmaya ve korozyon dirençlerinde azalmaya neden olduğu Tablo 3'te görülmektedir. Bu durumu açıklamak gerekirse; numunelere çekme gerilmeleri uygulandığında, çeliğin tane sınırlarında mikro/nano çatlakların meydana geldiği düşünülebilir. Yüksek enerjili bölgeler olan bu tane sınırlarında oluşan çatlaklar korozyona karşı daha hassas hale gelir. Bu nedenle çekme gerilmeleri etkimiş bir çelikte çatlak ucunda meydana gelen elektrokimyasal ve mekanik faktörlerin etkileriyle korozyon artmaktadır [10]. Gerilme miktarı artırıldığında özellikle akma dayanımı ve sonrasında çelik donatılarda boy uzamaları meydana gelmekte ve donatı üzerinde iş yapılmaktadır. Yapılan bu iş ve uygulanan gerilme neticesinde ortaya çıkan bu mikro/nano çatlaklar büyümekte ve donatıda enerji birikmesi olarak donatı yüksek enerjili hale gelmektedir. Bu enerji birikmesi çelik donatı kopana kadar devam etmektedir. Donatının yüksek enerjili halde olması ve çatlakların varlığı sebebiyle donatı korozyona karşı daha duyarlıdır ve bu durum oluşacak olan korozyonu önemli ölçüde artırır. Bu nedenle gerilme uygulanmış numunelerde meydana gelen mekanik ve elektrokimyasal faktörlerin birleşmesi ile bu numunelerde korozyon miktarının artması olası bir sonuçtur. Bu çalışmada elde edilen verilere göre gerilme miktarının artması ile korozyon akımı (I_{corr}) ve hızının arttığı anlaşılmaktadır. Çelik donatılara gerilme uygulanması sonucunda donatılarda mekanik ve elektrokimyasal değişimler meydana gelmekte ve bunun sonucunda korozyon miktarında artış meydana gelmektedir.

İnşaatlarda kullanılan donatı çeliği göz önüne alındığında, özellikle pilye, etriye veya kanca oluşturmak için donatıda uygulanan işlemler donatının plastik şekil değiştirmesine ve bir gerilme ile yüklenmesine neden olduğu bilinmektedir. Bu işlemler sırasında pilye, etriye ve kancalarda donatının bükülen kısımlarda basınç ve çekme gerilmeleri oluşacaktır. Oluşan bu gerilmeler

sonucunda donatının bükülen yerlerinde çatlaklar meydana gelmekte ve bu çatlaklar sonucunda korozyon hızının işlem görmemiş donatılardan daha fazla korozyon hızına sahip olabilecektir. Bu çalışmamızda ortaya çıkan sonuçlar bu olguyu desteklemektedir. Nitekim sonuçlarımıza göre donatılara uygulanan gerilme miktarı arttığında meydana gelen korozyon hızı ve miktarı da artmıştır.

Çelik donatılarda akma dayanımından düşük miktarda yani elastik bölgede gerilme uygulanması durumunda gerilme kaldırıldıktan sonra donatıda plastik bir deformasyonun oluşmadığı kabul edilmektedir. Bu durumda çelik donatının içyapısında hatalar oluşmadığı düşünülebilir. Ancak yaptığımız bu çalışmada elastik bölgede gerilme uygulanan numuneler gerilme uygulanmayan numunelerden ortalama %19 daha fazla korozyon hızı göstermiştir. Bu şekilde korozyon hızında meydana gelen artış donatının içyapısında oluşan dislokasyonların ve mekanik etkilerin neden olduğu elektrokimyasal değişikliklerin etkisinden kaynaklanmış olabilir. Oluşan bu hataların gerilme miktarının artmasıyla daha da artarak korozyonu artırdığı düşünülebilir.



Şekil 3. Saf su ortamdaki korozyon deneylerinden elde edilen Tafel polarizasyon eğrileri

Çelik donatılara çekme gerilmesi uygulanması donatılar üzerinde boy uzamasına, çelik donatısındaki boşlukların gelişmesine ve donatı üzerinde iş yapılarak enerjisinin artmasına neden olmaktadır. Meydana gelen bu enerji artışı donatının kopması sırasında harcanır ve donatıda hem mekanik hem de elektrokimyasal değişiklikler meydana gelir. Ortaya çıkan bu durumda donatı daha düşük enerjili hale gelir. Bu durumda donatı

üzerinde gerilme uygulanmış duruma kıyasla korozyona karşı daha duyarsızdır ve üzerinde daha az korozyon olması beklenir.

Tablo 3'te görüldüğü gibi genel olarak kopma dayanımındaki numunelerin korozyon hızı, çekme dayanımı ve akma dayanımındaki numunelere göre daha az olmuştur. Bu durumun kopma dayanımında donatıdaki iç enerjinin tüketilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak korozyon hızında meydana gelen bu azalma düzenli değildir. Söz konusu düzensizliğin kopma sırasında her bir donatının parmak izi gibi kendine has mekanik ve elektrokimyasal değişiklikler sergilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada çekme gerilmeleri uygulanmış çelik donatıların saf su çözeltisinde meydana gelen korozyon davranışı incelenmiş ve gerilme uygulanmamış durum ile karşılaştırılmıştır. Çalışmamızda elde ettiğimiz sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

1. Donatı çeliğine gerilme uygulanması çekme bölgesindeki gerilme değerlerine kadar korozyon hızını arttırmaktadır.
2. Gerilme uygulanmış donatıların korozyon hızı gerilme uygulanmamış numunelere göre daha fazla olmaktadır.
3. Kopma bölgesinde gerilme uygulanmış donatıda çekme bölgesinde gerilme uygulanmış donatıya göre daha az korozyon oluşmaktadır.
4. Çelik donatıya elastik bölgede çekme gerilmesi uygulanması, gerilme uygulanmamış duruma göre korozyon miktarında artışa neden olmaktadır. Bu artış donatıya elastik bölgede de gerilme uygulansa bile donatı içyapısında mekanik ve elektrokimyasal değişiklikler olabileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] TS EN 206, *Concrete – property, performance, fabrication and suitability*, Turkish Standards Institute, Ankara, 2004.
- [2] T. Miyagawa, "Durability design and repair of concrete structures: Chloride corrosion of reinforcing steel and alkali-aggregate reaction," *Magazine of Concrete Research*, vol. 43(156), pp. 155-170, 1991.
- [3] H. Yu, K.T.K. Chiang, and L. Yang, "Threshold chloride level and characteristics of reinforcement corrosion initiation in simulated concrete pore solutions," *Construction and Building Materials*, vol. 26(1), pp. 723-729, 2012.

- [4] M. Moreno, W. Morris, M.G. Alvarez, and G.S. Duffo, "Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions: Effect of carbonation and chloride content," *Corrosion Science*, vol. 46(11), pp. 2681-2699, 2004.
- [5] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Radaelli, and R. Polder, *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis.*, Wiley-Vch, 2013, pp. 434.
- [6] F. Shaheen, and B. Pradhan, "Effect of chloride and conjoint chloride-sulfate ions on corrosion of reinforcing steel in electrolytic concrete powder solution (ECPS)," *Construction and Building Materials*, vol. 101(1), pp. 99-112, 2015.
- [7] O.S.B. Al-Amoudi, and M. Maslehuddin, "The effect of chloride and sulfate ions on reinforcement corrosion," *Cement and Concrete Research*, vol. 23(1), pp. 139-146, 1993.
- [8] N.R. Jarrah, O.S.B Al-Amoudi, M. Maslehuddin, O.A. Ashiru, A.I. Al-Mana, "Electrochemical behaviour of steel in plain and blended cement concretes in sulphate and/or chloride environments," *Construction and Building Materials*, vol. 9(2), pp. 97-103, 1995.
- [9] ASTM G 102 – 89, *Calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements*, American Society For Testing And Materials, Pennsylvania, 7 p., 1999.
- [10] A. Poursaee, and Y. Zhang, "Passivation and corrosion behavior of carbon steel in simulated concrete pore solution under tensile and compressive stresses," *American Society of Civil Engineers*, vol. 27(8), 2014.