

## Korozyon Etkisine Maruz Bırakılmış Betonarme Kirişlerin Eğilme Davranışı

İbrahim ERTUÇ<sup>1</sup>, Hakan YALCINER<sup>2\*</sup>, Atila KUMBASAROĞLU<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Erzincan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzincan, Türkiye

<sup>2\*</sup>Erzincan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzincan, Türkiye

<sup>3</sup>Erzincan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzincan, Türkiye

Geliş / Received: 29/11/2017, Kabul / Accepted: 16/04/2018

### Öz

Korozyona maruz kalmış betonarme yapılarının deprem performanslarının daha doğru bir şekilde değerlendirilmesi için yeni yöntem ve deneysel sonuçlardan elde edilecek verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Korozyon beton içerisinde paslanan betonarme donatısının kesit alanının azalmasına neden olurken beraberinde aderans kaybı gibi önemli sorunlara da neden olmaktadır. Aderans kaybı ise donatı sıyrılmasına sebebiyet vererek ek yanal deplasmanların oluşmasına neden olabilmektedir. Ancak mevcut alan yazında literatürde tam ölçekli paslandırılmış betonarme elemanları üzerine yeterli deneysel veriler olmadığından korozyonun etkisi yapı performansı değerlendirmelerinde yalnızca donatı çapındaki azalma olarak alınmaya devam etmektedir. Bu çalışmada tam ölçekli betonarme kirişleri farklı pas oranlarında eğilme deneylerine tabi tutularak mevcut alan yazına veri sağlanması amaçlanmıştır deneysel elde edilen yük-deplasman ilişkileri; artan korozyon oranı, donatı çapındaki azalma, hızlandırılmış korozyon yöntemi sırasında meydana gelen birincil çatlaklar, donatı üzerindeki nervürlerin hasar görmesi ve buna bağlı olarak radyal sürtünme kuvvetindeki azalmanın neden olduğu aderans kayıpları gibi parametreler açısından tartışılmıştır. Beş adet betonarme kirişi hızlandırılmış korozyon yöntemi kullanılarak paslandırılmıştır. Betonarme kirişlerindeki gerçek korozyon oranları eğilme deneylerinden sonra betonarme kirişlerinin kırılarak ve içerlerinden betonarme donatılarının çıkartılması ile elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda korozyon oranının %3 değerlerinde yapı elemanlarında sünekliği arttığı ancak artan korozyon oranına bağlı olarak nihai yük taşıma ve süneklik değerlerinde azalmalara sebebiyet verdiği bulunmuştur. Aynı korozyon oranına sahip iki farklı betonarme kirişindeki eğilme davranışlarının farklılığı, sargı donatılarındaki farklı korozyon oranları ile tespit edilmiştir. Elde edilen deney sonuçları, korozyona maruz kalmış betonarme yapılarda aynı korozyon oranı kabulü yerine korozyon haritalandırma yöntemlerinin mevcut yapıların daha doğru değerlendirilmesi için geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme kirişleri, Korozyon, Yük-deplasman

### Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Subjected to Corrosion

#### Abstract

New methods and experimental results are needed to more accurately evaluate the seismic performance of reinforced concrete structures exposed to corrosion. Corrosion causes to decrease in the cross-sectional area of the corroded reinforcement bars in the concrete, which also causes significant problems such as loss of bond. Loss of adherence can lead to slippage in reinforcement bars which can cause additional lateral displacements. However, since there is not enough experimental data on full-scale corroded reinforced concrete members in the current field literature; the effect of corrosion continues to be taken only as a decrease in the diameter of reinforcement bar in building performance evaluations. In this study, it was aimed to provide data for the available literature for full scaled reinforced concrete beams that were subjected to flexural tests at different ratios of corrosion. In this study, experimental load-displacement relations of full-scale reinforced concrete beams subjected to bending tests at different ratios are discussed in terms of parameters such as increased corrosion rate, reduction in reinforcement, primary cracks occurring during accelerated corrosion, damage to reinforcements and adherence losses caused by the reduction of radial frictional forces. Five reinforced concrete beams were corroded by using the accelerated corrosion method. The actual corrosion ratios in reinforced concrete beams were obtained by crushing the reinforced concrete beams and extracting the reinforcement bars after flexural tests. As a result of the experimental study, it was found that corrosion ratio at 3% increased the ductility of structural members but decreases the ultimate load-carrying and ductility as the corrosion rate was increased. The difference in the bending behavior of two different reinforced concrete beams with the same corrosion rate was determined by different corrosion rates in transverse reinforcement bars. Experimental test results showed that instead of accepting the same corrosion rate in reinforced concrete structures exposed to corrosion, corrosion mapping methods have to be developed to evaluate existing structures more accurately.

**Keywords:** Corrosion, Reinforced concrete beams, Load-displacement

## 1. Giriş

Betonda donatı korozyonunun, betonarme bozulmasının en yaygın nedenlerinden biri olduğu düşünülmektedir (Zhu ve François, 2014). Betonarme yapıların sismik performans seviyeleri donatı çubuklarında korozyon başladıktan sonra azalır. Çelik donatının tamamen pasifleşmesi esas olarak betonun karbonat ve klorid kirlenmesinden kaynaklanmaktadır (Cavaco vd., 2017a). Çelik donatıların etrafındaki koruyucu pasif film, klorür ve karbonatlaşma etkisi altında donatı kesit alanında kayıplara neden olabilmektedir. Çelik donatıların kesit alanı korozyona bağlı olarak azalırken, donatı çubuklarının etrafındaki korozyon ürünleri de beton bölgesinde hacimsel genişlemeye neden olmaktadır. Bazant (1979) tarafından yapılan çalışma betonun çatlamasına neden olan korozyon pas hacminin, korozyonsuz donatı çubuklarının hacminden 2 ile 4 kat daha büyük olduğunu göstermiştir. Beton ve çelik çubukların mekanik özelliklerinde meydana gelen değişikliklerin bir sonucu olarak korozyon, betonarme yapıların süneklik oranında, yük taşıma kapasitesinde, aderans ve kayma mukavemetinde kayıplara neden olabilmektedir. Aderans dayanımında meydana gelen azalmalar sonucunda, donatının gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ile uyumlu olmayacağından betonarme elemanın geleneksel tasarımı için şartnamelerde kullanılan kesit analizi geçerliliğini koruyamamaktadır.

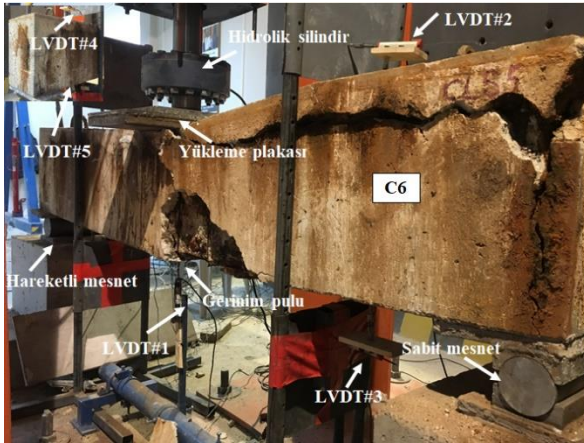
Korozyona maruz kalan betonarme donatısını çevreleyen korozyon ürünlerinin beton yüzeyine oluşturduğu radyal basınç kuvvetlerinden dolayı betonarme elemanın en-kesitinin özellikle pas payı kısmında korozyon çatlakları meydana gelmektedir. Betonarme yapılarının yanal deformasyon kapasitesi değerlendirmeleri açısından bu çatlamların ölçülmesi oldukça önemlidir. Bu yaklaşım, yapının hizmet ömrü kaybının, korozyon seviyesinin ve buna bağlı eğilme

kapasitesinin değerlendirilmesinde yaygın şekilde kullanılan bir mühendislik modelidir (Vidal vd., 2004; Torres-Acosta vd., 2007). Korozyona maruz kalmış betonarme yapıların, aksel deformasyon kapasitesi değerlendirmeleri açısından ölçülen düşey deplasmanlar ve eğrilikler bazı araştırmacılar tarafından yapıların süneklik kaybını belirtmek için kullanılan başka bir modeldir (Capozucca ve Cerri, 2000; El Maaddawy vd. 2005a; Malumbela vd., 2009). Korozyona uğramış betonarme kirişlerin yapısal dayanımını araştırmak için mevcut literatürde farklı çalışmalar yer almaktadır. El Maaddawy vd. (2005b) yapmış oldukları deneysel çalışma sonucunda korozyonun; betonarme kirişlerinin nihai dayanımının azalmasına neden olduğunu ve bu azalmanın donatı kesit alanındaki azalmayla orantılı olduğu sonucuna varırken, Du vd. (2007) korozyonun; kiriş eğilme direncini azaltmasının yanı sıra göçme modunu da değiştirdiğini belirtmişlerdir. Deneysel çalışmalardan farklı olarak deneysel verilere dayanan ve tamamen korozyona maruz kalmış betonarme kirişlerinin davranışları farklı yöntem yaklaşımları (sonlu elemanlar yöntemi) ile incelenmeye başlanmıştır (Dekoster vd., 2003; Xiaoming ve Hongqian, 2012; Saether ve Sand, 2012). Ayrıca, korozyonun taşıyıcı elemanlar üzerindeki etkileri haricinde korozyona maruz kalmış betonarme donatılarının mekanik özellikleri de deneysel olarak araştırılmıştır (Saifullah, 1994; Palsson ve Mirza, 2002; Du vd., 2005).

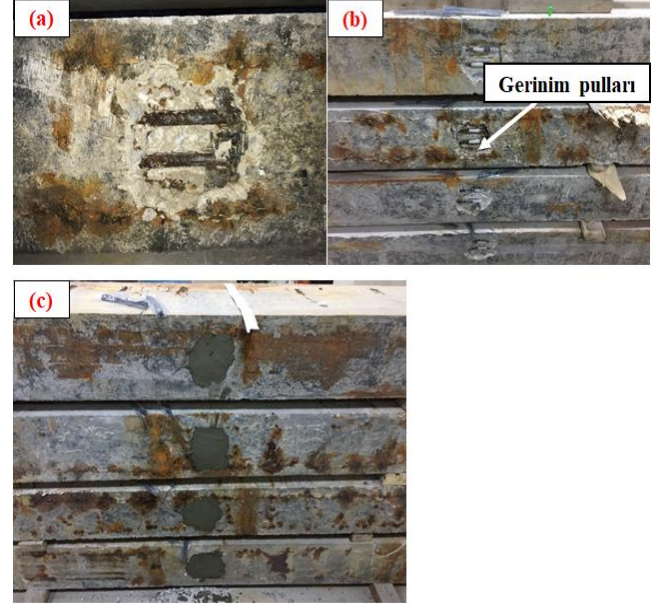
Mevcut literatürde korozyona maruz kalmış betonarme kirişleri üzerine yapılan çalışmalarda numune boyutlarının küçük ölçekli olması ve bundan dolayı eğilme kapasitelerinin sınırlı kalması mevcut yapı stokunu temsil edememektedir. Tam ölçekli paslandırılmış betonarme elemanları üzerine yeterli deneysel veriler olmadığından dolayı korozyonun etkisi yapı performansı değerlendirmelerinde yalnızca donatı çapında



yerleştirilen bir adet 0.01 mm hassasiyetinde potansiyometre ile yük-yer değiştirmeler eş zamanlı olarak kayıt edilmiştir. Betonarme kirişleri tasarlanan iki adet beton blok üzerine yerleştirilmiştir. Deneyler sırasında beton blokların üzerine mesnetlerden birinin sabit diğerinin ise hareketli mesnet olacak şekilde çelik plakalar monte edilmiştir. Donatılardaki birim şekil değiştirmelerinin ölçülebilmesi için iki adet çekme donatısına gerinim pulları yerleştirilmiştir. Gerinim pullarının donatılara yapıştırılması işlemi, donatıların paslanmasına bağlı olarak hasar görebileceği ve özelliklerini yitirebileceği gibi riskler göz önüne alınarak, paslandırma sürecinden sonra yapılmıştır. Paslandırma sürecinin tamamlanması ile birlikte donatı tespit cihazı kullanılarak kiriş açıklığının orta noktasındaki iki adet çekme donatısı tespit edilmiştir. Tespit edilen bölgeler kirişlere çok fazla zarar vermeyecek şekilde açılmış ve gerinim pulları yapıştırılmıştır. Bu işlemin ardından açılan yüzeyler tamir harcı ile kapatılarak on gün boyunca kür edilmiştir. Şekil 3'te yukarıda aşamaları ile bahsedilen gerinim pullarının yapıştırılması işlemi gösterilmektedir. Ayrıca deney sonuçlarının herhangi bir değişkenlikten etkilenip etkilenmediğinin izlenebilmesi için, paslandırılmamış korozyon oranına sahip betonarme kirişlerinde de gerinim pullarının yapıştırılması aynı işlemler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Yükleme düzeneği.

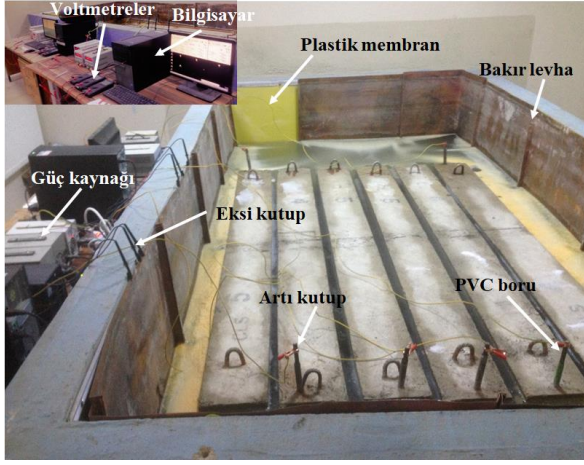


Şekil 3. Gerinim pullarının yapıştırılması: (a) çekme donatılarının tespit edilmesi; (b) donatı yüzeylerinin temizlenmesi ve gerinim pullarının yapıştırılması; (c) açılan boşlukların tamir harcı ile kapatılması

### 2.3 Hızlandırılmış korozyon yöntemi

Donatı bağlama ve beton döküm işlerinden önce tüm boyuna ve enine donatılar önce temizlenerek tartılmış ve ardından mevcut kütleleri kayıt edilmiştir. Tartımın hassas yapılabilmesi için çalışma kapsamında iki noktadan yük hücreli özel bir tartı imal ettirilerek çalışmada kullanılmıştır. Çalışma kapsamında hızlandırılmış korozyon yöntemi için kullanılan tam ölçekli paslandırma havuzu Şekil 4'de gösterilmektedir. Şekil 4'de gösterilen tam ölçekli paslandırma havuzunun boyutları; yüksekliği 85 cm, genişliği 175 cm ebadında olacak şekilde tasarlanmıştır. Havuzun betonarme olması ve olası elektrik akım kaçaklarını önlemek amacı ile paslandırma havuzunun tüm yatay ve dikey yüzeyleri plastik membran ile kaplanmıştır. Her bir betonarme kirişine bağlı ayarlanabilir 60 volt kapasitesindeki güç kaynakları betonarme kirişlerinden uzatılan bir çekme donatısına pozitif yüklemeye sağlayacak şekilde bağlanmıştır.





Şekil 4. Paslandırma havuzu ve düzenek

Numuneler için beton yüzeyindeki noktasal paslanmayı önlemek ve akımın beton içerisine iletilmesini sağlamak amacıyla uzatılan ve beton dışında kalan çekme donatıları beton dökümü öncesi PVC borular ile izole edilmiştir (Şekil 5). Hızlandırılmış korozyon yöntemi kapsamında elektriksel akım devresini sağlayacak ve betonarme elemanlarının her bir yüzeyinde eşit pas oranlarının elde edilmesine imkân sağlayacak negatif yükleme, betonarme kirişlerini çevreleyen paslanmaz bakır levhalar ile sağlanmıştır. Şekil 5'te gösterildiği üzere, paslandırma sürecinde çekme donatısına bağlanan artı kutbun tüm boyuna donatılara ve etriyelere akımı daha iyi iletebilmesi için tüm boyuna donatılar ve boyuna donatıları saran enine donatıları birbirlerine bakır kablolar ile ayrıca bağlanmıştır.



Şekil 5. Bakır tellerin boyuna ve sargı donatılarına bağlanması

Kontrollü paslanmanın sağlanabilmesi için sistemden geçen akımlar her 60 saniyede bir kaydedilmiştir. Bunun için devreyi tamamlayan güç kaynağı (pozitif kutup) ile bakır levhalar arasına (negatif kutup) her bir betonarme kirişleri için voltmetreler yerleştirilerek, geçen akımlar bilgisayarlar aracılığı ile kaydedilmiştir. Kontrollü paslandırma (teorik paslandırma) Faraday Kanunu'na göre hesaplanmıştır.

$$m = \frac{t(s) \times I(A) \times 55.847}{2 \times 96,487} \quad (1)$$

Faraday Kanunu'na göre; Denklem 1'de  $t$  saniyeyi,  $I$  ise sistemden geçen akımı göstermektedir. Sistemden geçen her bir saniyedeki akımın kayıt edilmesi ile birlikte hedeflenen kütle kaybı ve buna bağlı olarak tasarlanan paslandırma oranları elde edilebilmektedir. Her saniyede sistemden geçen akım, betonun heterojen yapısından dolayı aynı beton sınıfına sahip numuneler için eşit olmayabilir. Bu duruma karşılık, Faraday Kanunu'na göre sistemden geçen akımlar her 60 saniye için kaydedilip, hedeflenen pas oranına ulaşılması için gerekli süre hesaplandıktan sonra geçen süreç de dikkate alınarak sistemin belirlenen zamanında sonlandırılması şeklinde bir yol izlenmiştir. Paslanma oranının hesaplanmasında kullanılan Faraday Kanunu, çelik donatıların doğrudan elektrik akımına tabi tutularak geliştirildiği bir modeldir. Geliştirilen modelde çelik donatılar beton içerisinde olmadığından ve elektrik akımının verilmeye başlandığı andan itibaren paslanma meydana geldiğinden dolayı kütle kaybı doğru olarak ölçülebilmektedir. Ancak donatıların beton içerisinde olması durumunda, paslanmanın başlayabilmesi için belirli bir miktar enerji potansiyeline ve süreye ihtiyaç vardır. Bundan dolayı Faraday Kanunu'na göre teorik olarak hesaplanan pas oranları gerçek pas oranlarından her zaman daha fazladır (Yalciner vd., 2018). Hedeflenen korozyon oranlarına daha yakın korozyon oranları elde

etmek için Faraday Kanunu'na göre teorik olarak hesaplanan korozyon oranları daha önce Yalciner vd. (2012) tarafından geliştirilen ampirik model ile ilişkilendirilmiştir. Çalışma kapsamında betonarme kirişlerindeki gerçek pas oranları, deneye tabi tutulan betonarme kirişlerinin eğilme deneylerinden sonra betonun kırılarak içerisindeki boyuna donatıların ve etriyelerin çıkartılıp kütlelerinin ikinci kez tartılarak hesaplanmasıyla elde edilmiştir. ASTM G1-03 (2003) standardında belirtilen hem mekanik hem de kimyasal temizleme yöntemleri uygulanarak donatı yüzeyindeki pas ürünü kaldırılmış ve tüm donatılar ikinci kez tartılarak gerçek pas oranları elde edilen kütle kayıplarına bağlı olarak hesaplanmıştır. Gerçek pas oranlarının hesaplanması için Denklem 2 kullanılmıştır:

$$C_L = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (2)$$

Denklem 2'de  $C_L$  korozyon oranını,  $W_i$  betonarme donatılarının paslanmadan önceki kütlesini,  $W_f$  ise paslanmış ve ardından pas ürünün kaldırılarak ikinci kez tartım ile elde edilen donatıların son kütlelerini ifade etmektedir.

### 3. Bulgular

#### 3.1 Korozyon oranları

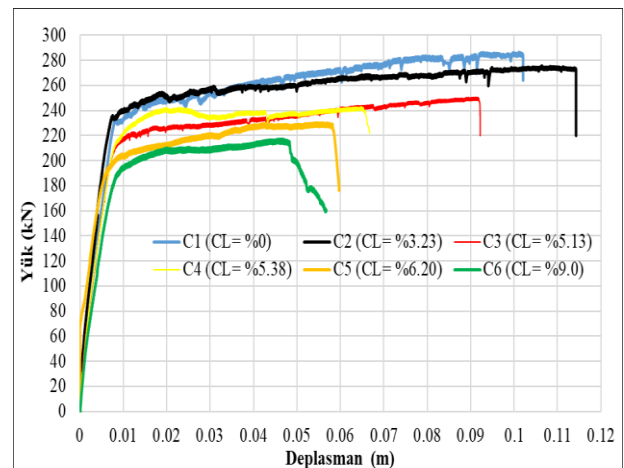
Betonarme kirişleri, yükleme deneylerinden sonra kırılarak tüm betonarme donatıları beton içerisinden çıkartılmıştır. Daha önce kodlamaları yapılan donatılar aynı şekilde ikinci tartım için hazır hale getirilmiştir. Donatı tartımından önce tüm betonarme kirişleri görsel tespit yoluyla incelenerek olası noktasal paslanmalar ve donatı kopmaları kayıt edilmiştir. Betondan çıkarılan donatılarda ASTM G1-03 (2003) yönetmeliğine göre önce mekanik ardından kimyasal temizlik yapılmıştır. Mekanik temizleme için tel fırçalar ile donatı yüzeyinde kütle ölçümünü etkileyecek tüm

beton parçaları temizlenmiştir. Kimyasal temizleme işlemi için alüminyum bir havuz inşa edilmiş ve içerisine su kütlesinin %5'i kadar hidroklorik asit ilave edilmiştir. Donatılar hidrolik asitli suya daldırılmak suretiyle donatı yüzeyindeki pas ürünleri kaldırılmıştır. Şekil 6'da betonarme kirişlerinden çıkarılan donatılara, mekanik ve kimyasal temizleme işlemleri uygulama aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 6. Yükleme sonrası betonarme kirişlerinin kırılması: (a) beton kırım işleri; (b) betonarme kirişlerinden çıkartılan boyuna ve sargı donatıları

Mekanik ve kimyasal temizlemenin ardından tüm boyuna donatılar ve etriyelerin ikinci kez tartılarak korozyon oranlarının elde edildiği gravimetrik sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 7. Betonarme kirişlerde yük-deplasman ilişkisi

**Tablo 1.** Gravimetrik test sonuçları

Numune	İlk kütle (g)		Faraday kütle kaybı (g)	Gerçek kütle kaybı (g)		Faraday korozyon oranı (%)	Gerçek korozyon oranı (%)		Akım-saat (A.h)
	S	L		S+L	S		L	S	
C1	<b>Paslandırılmamış betonarme kirişi</b>								
C2	8848.5	23836.5	1646.29	519	537	5.04	5.87	2.25	1580.16
	<b>Toplam: 32685</b>			<b>Toplam: 1056</b>			<b>Toplam: 3.23</b>		
C3	8856.5	23761.5	3012.06	542.5	1131.5	9.23	6.13	4.76	2891.08
	<b>Toplam: 32618</b>			<b>Toplam: 1674</b>			<b>Toplam: 5.13</b>		
C4	8844	23527.5	3002.32	813.5	926.5	9.27	9.20	3.94	2881.73
	<b>Toplam: 32371.5</b>			<b>Toplam: 1740</b>			<b>Toplam: 5.38</b>		
C5	8885	23620.5	3957.94	642	1372	12.18	7.23	5.81	3804.94
	<b>Toplam: 32505.5</b>			<b>Toplam: 2014</b>			<b>Toplam: 6.20</b>		
C6	8827	23724	4756.55	1069	1860.5	14.61	12.11	7.84	4565.5
	<b>Toplam: 32551</b>			<b>Toplam: 2929.5</b>			<b>Toplam: 9.0</b>		

### 3.2 Yük-yer değiştirme sonuçları

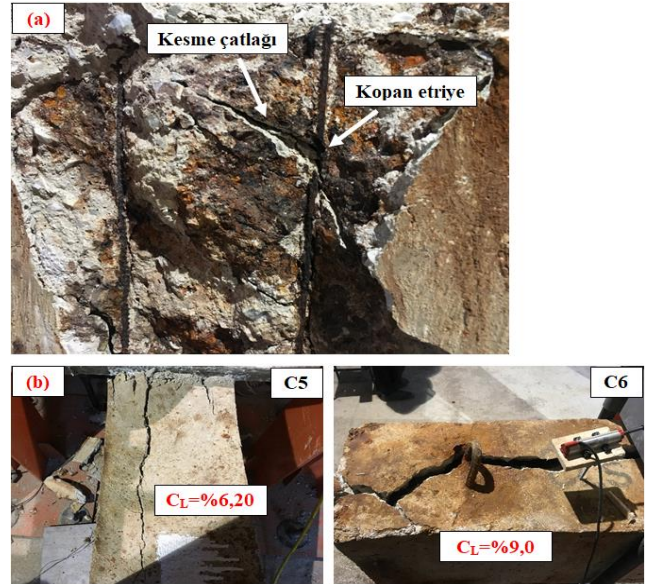
Korozyonsuz betonarme kiriş için, DBYBHY (2007)'deki teorik yük taşıma kapasitesi varsayımlarına göre hesaplanan yük taşıma kapasitesi ile mevcut çalışmada deneysel olarak elde edilen yük taşıma kapasitesi arasında iyi bir ilişki elde edilmiştir. Şekil 7'de betonarme kirişlerinin yük-deplasman ilişkileri farklı korozyon oranları için gösterilmektedir. Şekil 7'de gösterildiği üzere korozyon oranına bağlı olarak C<sub>1</sub> kirişinin nihai yük taşıma kapasitesinde ve deplasmana bağlı süneklik oranında azalmalar meydana gelmiştir. Fakat belirli bir korozyon oranına kadar korozyon ürünlerinin beton ve donatı arasındaki aderans kuvvetine katkısı sayesinde paslanmamış betonarme kirişi C<sub>1</sub>'in sünekliği, C<sub>2</sub> kirişinde artış göstermiştir. Şekil 7'de görüldüğü üzere paslandırılan C<sub>2</sub> kirişinin nihai yük taşıma kapasitesi paslanmamış C<sub>1</sub> kirişine oldukça yakın ve deplasmana bağlı süneklik oranı %3.23'lük bir korozyon oranında %11 oranında artmıştır. C<sub>2</sub> kirişin %3.23'lük bir korozyon oranında kesitin akma kapasitesindeki artışı C<sub>1</sub> kirişine kıyasla çok fazla olmasa da bu artış kesitdeki boyuna donatıların elastik sınırlar içerisinde daha fazla birim deformasyon olarak donatı sıyrılmasını donatıdaki aderans kuvvetinin artmasına bağlı olarak sınırlamıştır.

Korozyon oranının artması ile birlikte; donatı çapındaki azalma, hızlandırılmış korozyon yöntemi sırasında birincil çatlakların meydana gelmesi, donatı üzerindeki nervürlerin hasar görmesi ve buna bağlı olarak radyal sürtünme kuvvetindeki azalmanın neden olduğu aderans kayıpları nihai yük taşıma ve deplasmana bağlı süneklik oranı üzerinde azalmalara sebebiyet vermiştir. Şekil 7'de paslandırılmamış betonarme kirişi C<sub>1</sub>'in yük taşıma kapasitesi sırasıyla %5.13'lük korozyon oranına sahip C<sub>3</sub>'de 251 kN'a, %5.38'lik korozyon oranına sahip C<sub>4</sub>'de 243 kN'a, 6.20%'lik korozyon oranına sahip C<sub>5</sub>'de 230 kN'a ve %9'luk korozyon oranı sahip C<sub>6</sub>'da 217 kN'a azalmıştır. Paslandırılan C<sub>2</sub> kirişi haricinde diğer kirişlerin deplasmana bağlı olarak süneklikleri de pas oranındaki artışa bağlı olarak azalmıştır. C<sub>1</sub> betonarme kirişi için deplasmana bağlı olarak hesaplanan 13 m/m süneklik oranı %5.13'lük korozyon oranı C<sub>3</sub>'de 8 m/m'ye, %5.38'lik korozyon oranı C<sub>4</sub>'de 7.5 m/m'ye, %6.20'lik korozyon oranı C<sub>5</sub>'de 7m/m'ye, ve %9'luk korozyon oranı C<sub>6</sub>'da 6 m/m'ye azalmıştır. Her bir kiriş için ve her bir betonarme kirişinde yer alan sargı ve boyuna donatılarının gerçek korozyon oranlarının elde edilmesi ile birlikte hemen hemen aynı korozyon oranlarına sahip C<sub>3</sub> (C<sub>L</sub>=5.13%) ve C<sub>4</sub> (C<sub>L</sub>= 5.38%) kirişlerindeki



süneklik farkları betondan çıkartılan donatılardaki korozyon dağılımı ile açıklanabilir. Tablo 1’de görüldüğü üzere C<sub>3</sub> ve C<sub>4</sub> betonarme kirişlerinin toplam korozyon oranları birbirine yakın ancak sargı donatılarının toplam korozyon oranına katkıları değişkenlik göstermektedir. C<sub>3</sub> betonarme kirişindeki sargı donatılardaki pas oranı %6.13 iken bu oran C<sub>4</sub> kirişinde %9.20 olarak hesaplanmış ve sargı donatılardaki pas oranlarındaki farklılık nedeni ile süneklik davranışları da beklediği üzere farklılık göstermiştir. Bu durum; hızlandırılmış korozyon yönteminde Faraday kanuna göre ya da kesilip çıkartılan bir donatı yardımı ile hesaplanan bir donatıdaki korozyon oranının tüm kirişi temsil edemeyeceğini göstermiştir. Bu iki yöntem; donatıların betondan çıkartılarak ikinci kez tartılmasına kıyasla hem zamandan hem de iş gücü açısından oldukça fayda sağlamaktadır. Bu sebeple daha çok tercih edilen bu yöntemlere ve ileri çalışmalara referans olması bakımından; Faraday kanuna göre hesaba katılacak korozyon oranlarında sargı donatılardaki korozyon oranlarının boyuna donatılara göre bir buçuk kat alınabileceği ve kesilip çıkartılan boyuna donatı yöntemi için ise özellikle sıklaştırma bölgesindeki etriyelerin de kesilip çıkarma yönteminde dikkate alınması gerektiği önerilmektedir. C<sub>6</sub> betonarme kirişindeki taşıma gücü kapasitesindeki ve özellikle sünekliğindeki azalma, betondan çıkarılan ve üzerinde görsel değerlendirmeleri yapılan donatılar ile açıklanabilir. Korozyon oranlarının yüksek değerlerde oluşması ile birlikte özellikle sargı donatılarında bölgesel paslanmalar meydana gelmiştir. Kesit alanında bölgesel paslanmaya bağlı yaşanan kayıplar C<sub>6</sub> kirişi için sekiz adet sargı donatısının kopmasına neden olmuştur. Teorik olarak sargı donatılarının moment taşıma kapasitelerine katkıları ihmal edilse de özellikle pas durumlarında sargı donatılarının görevi bir kat daha ön plana çıkmakta ve elemanın nihai yük taşıma kapasitelerinde etkili

olmaktadırlar. C<sub>6</sub> kirişinde kopan sekiz adet sargı donatısı bu betonarme kirişinde hem nihai yük taşıma gücü kapasitesinde hem de sünekliğin azalmasında başlıca etken olmuştur. Şekil 8, yükleme sonrası kesme çatlağının izlediği yolu göstermektedir. Şekil 8’de gösterildiği üzere, yükleme sırasında noktasal paslanmadan dolayı kopan sargı donatısı, kesme kuvvetlerini karşılama yeteneğini yitirmiştir. Aynı zamanda betonarme numunenin kesme kapasitesi, basınç donatılarının paslanması ile birlikte betonun basınç bölgesindeki nihai birim kısalma değerine daha düşük yüklerde ulaşmasına neden olmuştur ve betonarme kirişinin sünekliğinde de ciddi azalmalar meydana getirmiştir.



Şekil 8. (a) Kesme çatlağı, (b) Kiriş basınç bölgesindeki kırılma

#### 4. Sonuç ve Tartışma

Tam ölçekli paslandırma havuzu kullanılarak paslandırılan betonarme kirişlerinin davranışlarına ilişkin yapılan deneysel çalışma kapsamında aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır. Korozyonun belirli sınır değerlerine kadar yapı elemanlarına süneklik kazandırdığı, ancak belirli oranlardan sonra taşıma kapasitesinde ve sünekliğinde ileri boyutlarda hasarlara neden olduğu tespit edilmiştir. Korozyonun belirli oranlara kadar yapı elemanlarında süneklik



kazandırması beton ile donatı arasında artan aderans kuvvetinin, donatı sıyrılmasını sınırlaması ile açıklanması gerektiği bir kez daha bu çalışma ile ortaya konulmuştur. Korozyona maruz kalmamış betonarme elemanlarında dahi donatı sıyrılmasının, toplam deplasmana katkısının yaklaşık olarak %25-30 arasında olduğu göz önüne alındığında, korozyon etkisinin mevcut yapıların değerlendirilmesinde yalnızca donatı çapındaki azalma olarak göz önüne alınmaması gerektiği önerilmektedir. Yapılan çalışma kapsamında korozyon ürünün hacimsel artışa bağlı olarak birincil çatlakları meydana getirerek bu çatlakların yüklemeye etkisi ile kendini daha fazla göstermiş ve kesit alanında azalmalara sebebiyet vermiştir. Böylelikle özellikle elamanın eğriliğe bağlı sünekliği azalarak; tasarım aşamasında göz önüne alınmayan bir olumsuzluğu beraberinde getirmiştir. Boyuna ve sargı donatılarının kesit alanlarının azalması ile birlikte elemanın taşıma güce kapasitesi korozyon oranına bağlı olarak azalmıştır. Korozyon etkisi ile birlikte hem sargı hem de boyuna donatılarının mekanik özellikleri değişmiş ve özellikle sargı donatılarının çaplarının daha az olması sebebi ile daha erken kopmaları gözlenmiştir. Kopan sargı donatıları işlevini yitirerek gevrek kırılmalara sebep olmuştur. Yapılan çalışmada betonarme donatılarındaki gerçek korozyon oranları betonun kırılarak ve içinden donatıların çıkartılması ile elde edilmiştir. Elde edilen pas oran dağılımları ile gerçek korozyon oranlarının hesaplanması için Faraday kanunu veya mevcut literatürde Faraday kanunu referans gösterilerek sunulan modeller, tüm donatılar için geçerli olmadığı sonucuna varılmıştır. Korozyon oranlarının hesaplanması için sunulan mevcut ampirik modellerin iş gücü ve zaman açısından donatıların betondan çıkartılmadan yaklaşık değerler sağlaması önemlidir. Mevcut çalışmadan elde edilen gerçek korozyon dağılım oranları göz önüne alındığında; ilgili elemanın boyuna donatıları için beton

yüzeyine yakın ve sargı donatıları için sıklaştırma bölgeleri için pas oranlarının ileriye yönelik çalışmalarda Faraday kanununun kullanılması durumunda artırılabilceği önerilmektedir.

## 5. Teşekkür

Bu çalışma Erzincan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü FBA-2016-330 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

## 6. Kaynaklar

ASTM G:1-03, 2003. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens.

Bazant, Z.P. 1979. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures— theory. Journal of the Structural Division, 105(6), 1137-1153.

Capozucca, R. Cerri, M.N. 2000. Identification of damage in RC beams subjected to corrosion. ACI Structural Journal, 97(6), 902–9.

Cavaco, E.S. Neves, L.A.C., Casas, J.R. 2017a. Reliability-based approach to the robustness of corroded reinforced concrete structures. Structural Concrete, 18(2), 316–325.

DBYBHY-2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.

Dekoster, M. Buyle-Bodin, F. Maurel, O. Delmas, Y. 2003. Modelling of the flexural behaviour of RC beams subjected to localized and uniform corrosion. Engineering Structures, 25(10), 1333–41.

Du, Y.G. Clark, L.A. Chan, A.H.C. 2005. Residual capacity of corroded reinforcing bars. Magazine of Concrete Research, 57(3), 135–47.

- Du, Y.G. Clark, L.A. Chan, A.H.C. 2007. Impact of reinforcement corrosion on ductile behavior of reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*, 104(3), 285–93.
- El Maaddawy, T. Soudki, K. Topper, T. 2005a. Analytical model to predict nonlinear flexural behaviour of corroded reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*, 102(4), 550–9.
- El Maaddawy, T. Soudki, K. Topper, T. 2005b. Long-term performance of corrosion damaged reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*, 102(5), 649–56.
- Malumbela, G. Moyo, P. Alexander, M. 2009. Behaviour of RC beams corroded under sustained service loads. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3346–51.
- Palsson, R. Mirza, M.S. 2002. Mechanical response of corroded steel reinforcement of abandoned concrete bridge. *ACI Structural Journal*, 99(2), 157–62.
- Saether, I., Sand B. 2012. FEM simulations of reinforced concrete beams attacked by corrosion. *ACI Structural Journal*, 39(2), 15–31.
- Saifullah, M. 1994. Effect of reinforcement corrosion on bond strength in reinforced concrete PhD thesis. UK: The University of Birmingham 29(6), 1145-52.
- Torres-Acosta, A.A., Navarro-Gutierrez, S., Terán-Guillén, J. 2007. Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 29, 1145–52.
- TS500-2000. Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Vidal, T. Castel, A. François, R. 2004. Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 165–74.
- Xiaoming, Y., Hongqiang, Z. 2012. Finite element investigation on load carrying capacity of corroded RC beam based on bond-slip. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 6(1), 134–46.
- Yalciner, H., Eren, O., Sensoy, S. 2012. An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level, *Cement and Concrete Research*, 42(5), 643-55.
- Yalciner, H., Kumbasaroglu, A., Ertuc, İ., Turan, A.İ. 2018. Confinement effect of geo-grid and conventional shear reinforcement bars subjected to corrosion. *Structures*, 13, 139-152.
- Zhu, W. François, R. 2014. Corrosion of the reinforcement and its influence on the residual structural performance of a 26-year-old corroded RC beam. *Construction and Building Materials*, 51, 461-472.