

Korozyon Etkisine Maruz Kalmış Betonarme Kirişlerin Doğrusal Olmayan Analizi

^{1,2}Rojda Orman Subaşı, ^{1,2}İlker Subaşı, ^{*3,4}Naci Çağlar, ⁵Gökhan Dok ve ³Hakan Öztürk
¹Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Arel Üniversitesi, Türkiye
²Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya Üniversitesi, Türkiye
^{*3}Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Türkiye
^{*4}Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye
⁵Deprem Çalışmaları Uygulama ve Araştırma Merkezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye

Özet

Geçmişte ve günümüzde yapı güvenliğini etkileyen en önemli unsurlardan biri korozyon olayıdır. Meydana gelen korozyon sonrası betonda dökülme ve çatlamlar, donatı kesit alanında ve beton ile donatı arasındaki bağ kuvvetlerinde azalma meydana gelmektedir. Bu durum betonarme yapı elemanlarının süneklik, rijitlik ve dayanım gibi önemli özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Yapılan çalışma kapsamında korozyon etkisine maruz kalmış betonarme kirişlerin eğilme yükü etkisi altındaki davranışını temsil edebilen doğrusal olmayan bir sonlu eleman modeli (SEM) geliştirilmiştir. Bu amaçla, literatürden seçilen farklı seviyelerde korozyon etkisine maruz betonarme kirişler için sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Söz konusu betonarme kirişlerin eğilme yükü etkisi altındaki davranışını simüle etmek için ABAQUS paket programı kullanılmıştır. Elde edilen nümerik sonuçların literatürden seçilen deneysel çalışma sonuçlarını başarılı bir şekilde yansıttığı görülmüştür. Simülasyon çalışmasına ek olarak değişen korozyon ve donatı oranının betonarme kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Parametrik çalışma sonuçları korozyon seviyesine ve donatı oranına bağlı olarak karşılaştırmalı bir şekilde incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Korozyona Etkisi, Betonarme Kiriş, Eğilme Davranışı, Doğrusal Olmayan Sonlu Eleman Analizi

1. Giriş

Donatı korozyonu yapı güvenliğini olumsuz yönde etkileyen en önemli problemlerden biridir. Betonarme yapılarda kalifiye olmayan işçilik, yetersiz paspayı, projeye uygun olmayan malzeme kullanımı gibi etkiler donatı korozyonuna neden olmaktadır. Betonarme elemanların deniz suyu ile temas ettiği ve ya klorür açısından zengin ortamlarda bulunduğu durumlarda donatı korozyonu oldukça yaygın bir sorun haline gelmektedir [1, 3]. Betonarme bir kirişin korozyona uğraması donatının dayanım kaybına, mekanik özelliklerinin bozulmasına, beton ile donatı arasında oluşan aderansın azalmasına ve eleman üzerinde çatlak oluşumuna neden olmaktadır. Korozyonun yapı ve yapı elemanları üzerindeki etkilerini inceleyen birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda korozyon nedeniyle oluşan hacimsel genleşme [4, 7], donatı ile beton arasındaki aderans ilişkisi [8-9] ve korozyon etkisine maruz kalmış donatıların mekanik özelliklerinde ki değişim incelenmiştir [10, 12]. El Maaddawy ve diğ. [13] ve Sanchun ve diğ. [14] tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, betonarme kirişler üzerinde oluşan korozyon sonucunda dayanımda meydana gelen azalma ile donatı kesit alanında oluşan azalmanın ilişkili olduğu belirtilmiştir.

*Corresponding author: Address: Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering Sakarya University, 54187, Sakarya TURKEY. E-mail address: caglar@sakarya.edu.tr, Phone: +902642955752

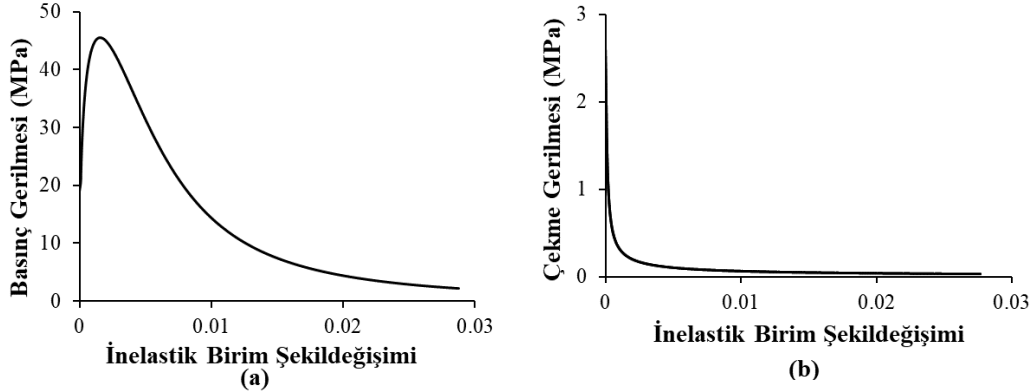
Betonarme kirişlerde korozyon seviyesi arttıkça, yük taşıma kapasitesindeki azalmasının yanı sıra süneklik ve rijitlikte de azalma olduğunu vurgulanmıştır [15]. Ayrıca Du ve diğ. [16] betonarme kirişlerde oluşan korozyonun göçme modlarını da değiştirdiğini açıklamıştır. %14'ün altındaki korozyon seviyeleri için eğilme mukavemeti kaybı %20'ye kadar ulaşabilmektedir [17]. Lee ve diğ. [18] donatı korozyonu nedeniyle hasar gören betonarme kirişlerin eğilme mukavemeti ile donatı korozyon derecesi arasındaki ilişkiyi deneysel ve doğrusal olmayan sonlu eleman modeli (SEM) kullanarak incelemiştir. Korozyon seviyesi arttıkça korozyon çatlak genişliği artmıştır. Korozyon etkisine maruz kalmış betonarme kiriş elemanlarının akma ve maksimum dayanımının azaldığı, deney sonuçları ile SEM arasında tutarlılık olduğu gözlemlenmiştir. Biswas ve diğ. [19] korozyon etkisinin donatılar üzerinde düzgün dağılmamasının yapısal davranış üzerindeki etkilerini deneysel ve SEM analizi ile incelemiştir. Önerilen SEM, üniform bir şekilde korozyona uğramamış betonarme kirişlerin davranışını akma yükü, nihai yük ve çatlak dağılımı açısından başarılı bir şekilde yansıtmıştır. Yapılan deneysel ve sayısal çalışma sonucunda, üniform olmayan korozyonun betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesinde ve sünekliğinde azalma olduğu gözlenmiştir. Jnaid ve Aboutaha [20] geliştirmiş oldukları SEM'e dayalı nümerik çalışmada, farklı korozyon derecesine sahip betonarme kirişlerin dayanım kaybı ile korozyon uzunluğunun ilişkisini incelemişlerdir. Yüksek korozyon derecesine sahip betonarme kirişlerde oluşan dayanım kaybının donatı kesit alanındaki azalmadan ve donatıya ait dayanım kaybının fazla olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Düşük korozyon derecesine sahip kirişlerde ise dayanım kaybının donatı ile beton arasındaki aderansın azalmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Al-Bayti [21] yapmış olduğu çalışmada korozyon seviyesinin, servis yüklerinin, beton basınç dayanımının ve donatı oranının korozyon etkisine maruz kalmış betonarme kirişler üzerindeki etkisini deneysel ve SEM kullanarak incelemiştir. Donatı oranı düşük olan numunelerde, servis yüklerinin artmasıyla nihai yük taşıma kapasitesinin ve süneklikteki azalmanın daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca donatı oranının artması korozyona uğramış betonarme kirişlerin nihai yük taşıma kapasitesini arttırarak hizmet ömrünü uzatmaktadır. Zhao ve diğ. [22] korozyona uğramış basit mesnetli betonarme kirişin statik yük taşıma kapasitesini nümerik olarak incelemiştir. Düşük korozyon seviyesindeki betonarme kirişte aderansta ve yük taşıma kapasitesinde meydana gelen azalmanın çok önemli olmadığı, ancak yüksek korozyon seviyesinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir.

Literatürde bulunan çalışmalar dikkate alındığında korozyon etkisine maruz kalmış betonarme kirişlerin davranışının sonlu eleman modeline doğru yansıtılabileceği ve nümerik analizler yardımıyla davranışı hakkında bilgi sahibi olunabileceği görülmektedir. Bu çalışma kapsamında değişen korozyon seviyeleri ve çekme donatısı oranının korozyona uğramış betonarme kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Nümerik olarak gerçekleştirilen çalışmada ABAQUS [23] programı yardımıyla doğrusal olmayan sonlu eleman modeli geliştirilmiştir.

2. Referans Alınan Deneysel Çalışma

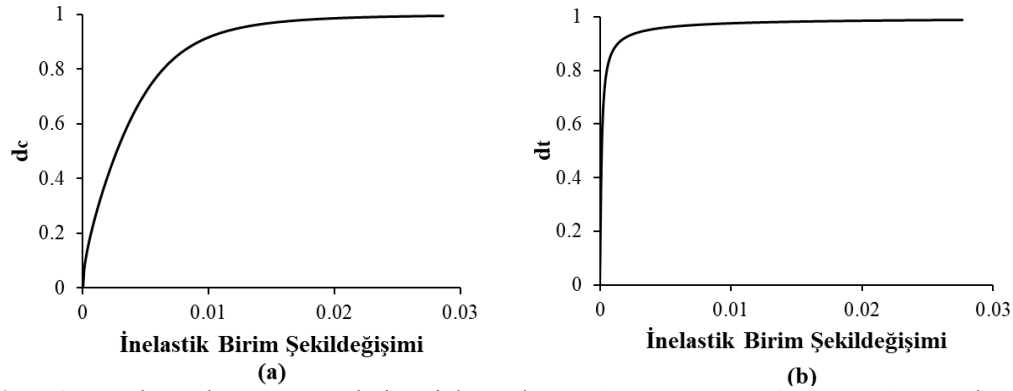
Geliştirilen sonlu eleman modelinin doğrulanması için literatürden seçilmiş olan deneysel çalışma kullanılmıştır. Tamai ve diğ. [24] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmadaki kiriş numunesinin şematik gösterimi Şekil 1'te verilmiştir. Bu çalışma kapsamında korozyon etkisine maruz kalmış ve kalmamış betonarme kirişlerin eğilme davranışı inceleneceğinden S-N, S-L2 ve S-L3 deney numuneleri referans olarak kabul edilmiştir. Bu deney numunelerine ait hedeflenen ve

ilişkisi Şekil 2(b)'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Betonun basınç gerilmesi-inelastik şekil değiştirme ilişkisi (a) [25], betonun çekme gerilmesi-inelastik şekil değiştirme ilişkisi (b) [26]

Betonun basınç hasar parametresi (d_c) Şekil 3(a)'da, beton çekme hasar parametresi (d_t) Şekil 3 (b)'de gösterilmiştir. d_c betonun basınç yükü etkisindeki, d_t ise çekme yükü etkisindeki elastik rijitlikteki azalmayı ifade etmektedir. Söz konusu hasar parametreleri, 0 (hasarsız durum) ile 1 (tam hasarlı durum) arasında değişmektedir. BHP modelinde tanımlanması gereken önemli parametreler Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 3. Referans alınan deney numunelerine ait beton basınç hasar parametresi (a) [25], beton çekme hasar parametresi (b) [26]

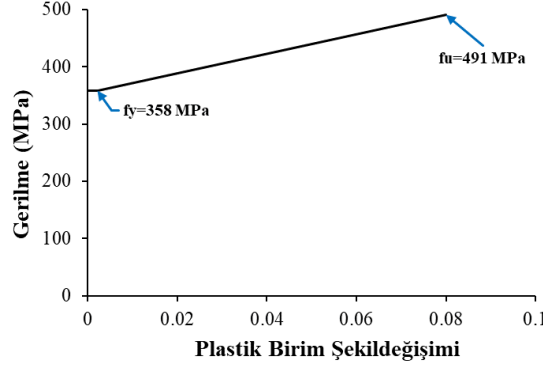
Tablo 2. BHP Modeline Ait Parametreler

Parametre	Değer
Dilatasyon Açısı (ψ)	50
Eksantriklik (ϵ)	0.1
σ_{b0}/σ_{co}	1.16
K	0.667
Viskozite Parametresi (μ)	0.0001

3.2. Donatı Modeli

Kiriş numunelerinde kullanılan boyuna ve enine donatılar için, pekleşmeli elastoplastik malzeme

davranışını yansıtabilecek şekilde, kullanılan gerilme şekil değiştirme ilişkisi Şekil 4'te gösterilmiştir.



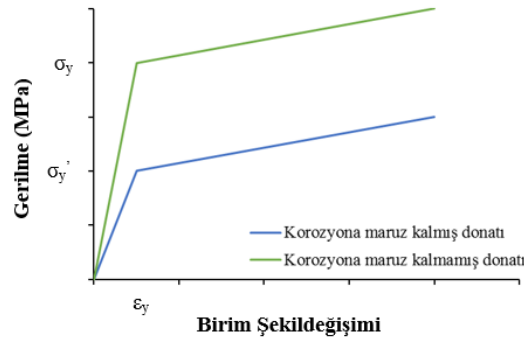
Şekil 4. Donatıya ait gerilme plastik birim şekil değiştirme ilişkisi

3.3. Korozyon Etkisi

Korozyon etkisine maruz kalmış betonarme kiriş elemanlarının sonlu eleman modellemesi oluşturulurken donatıda meydana gelen dayanım ve rijitlik kaybı, donatı ile beton arasındaki aderans kaybı ve korozyon nedeniyle betonda çatlak oluşumuna sebep olabilecek genleşme basıncı etkisi göz önüne alınmıştır [27]. Donatılarda meydana gelen dayanım (σ'_y) ve rijitlik (E'_y) kaybı ise Denklem 1 ve Denklem 2 yardımıyla hesaplanmış olup korozyon etkisine maruz kalmış donatıların gerilme şekil değişimi ilişkisi Şekil 5'te gösterilmiştir.

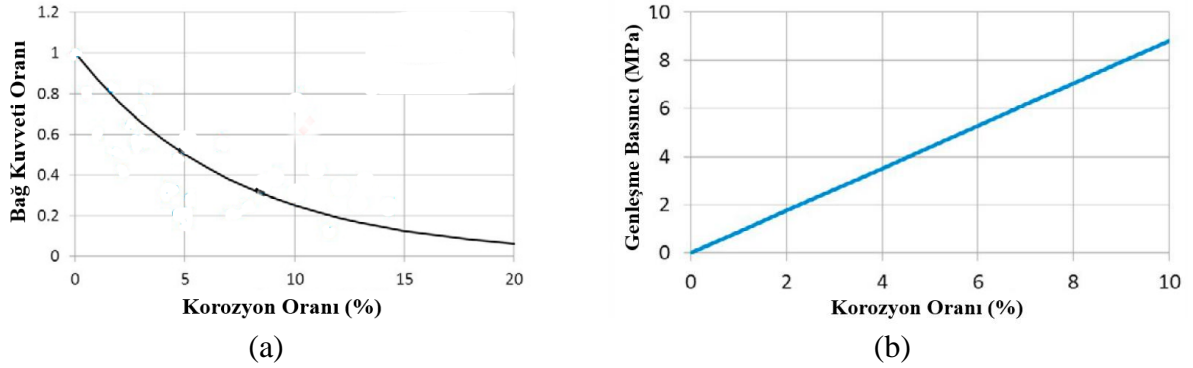
$$\sigma'_y = \left(1 - \frac{w}{100}\right) \sigma_y \quad (1)$$

$$E'_y = \left(1 - \frac{w}{100}\right) E_y \quad (2)$$



Şekil 5. Korozyonun donatı modeli üzerindeki etkisi

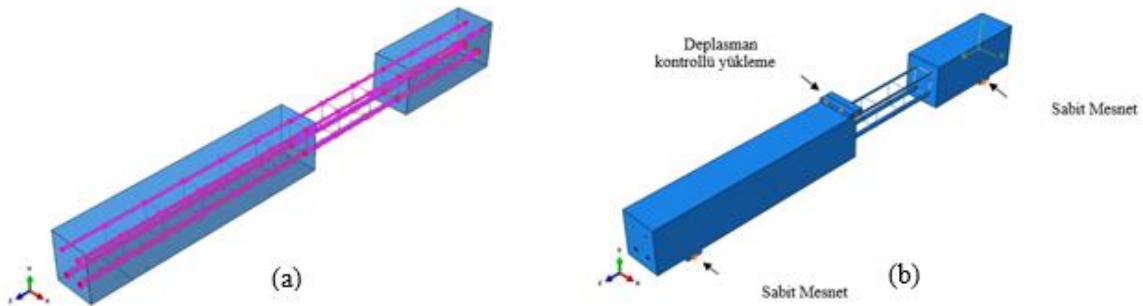
Korozyon etkisinin sonlu eleman modeline aktarılması amacıyla beton ile donatı arasına bir ara yüz elemanı oluşturulmuştur. Korozyon oranına bağlı olarak gerçekleşen aderans kaybı Şekil 6 (a) kullanılarak belirlenmiştir. Donatılarda oluşan korozyon sonucunda, beton yüzeyine doğru bir genleşme basıncı meydana gelmektedir. Bu genleşme basıncı, beton ile donatı ara yüzüne tanımlanmakta ve Şekil 6 (b)'de görüldüğü gibi korozyon oranına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 6. Korozyon oranına göre bağ kuvvetindeki azalma (a), Korozyon oranı genleşme basıncı ilişkisi (b) [27]

3.4. Sonlu Eleman Modelindeki Geometri ve Sınır Koşulları

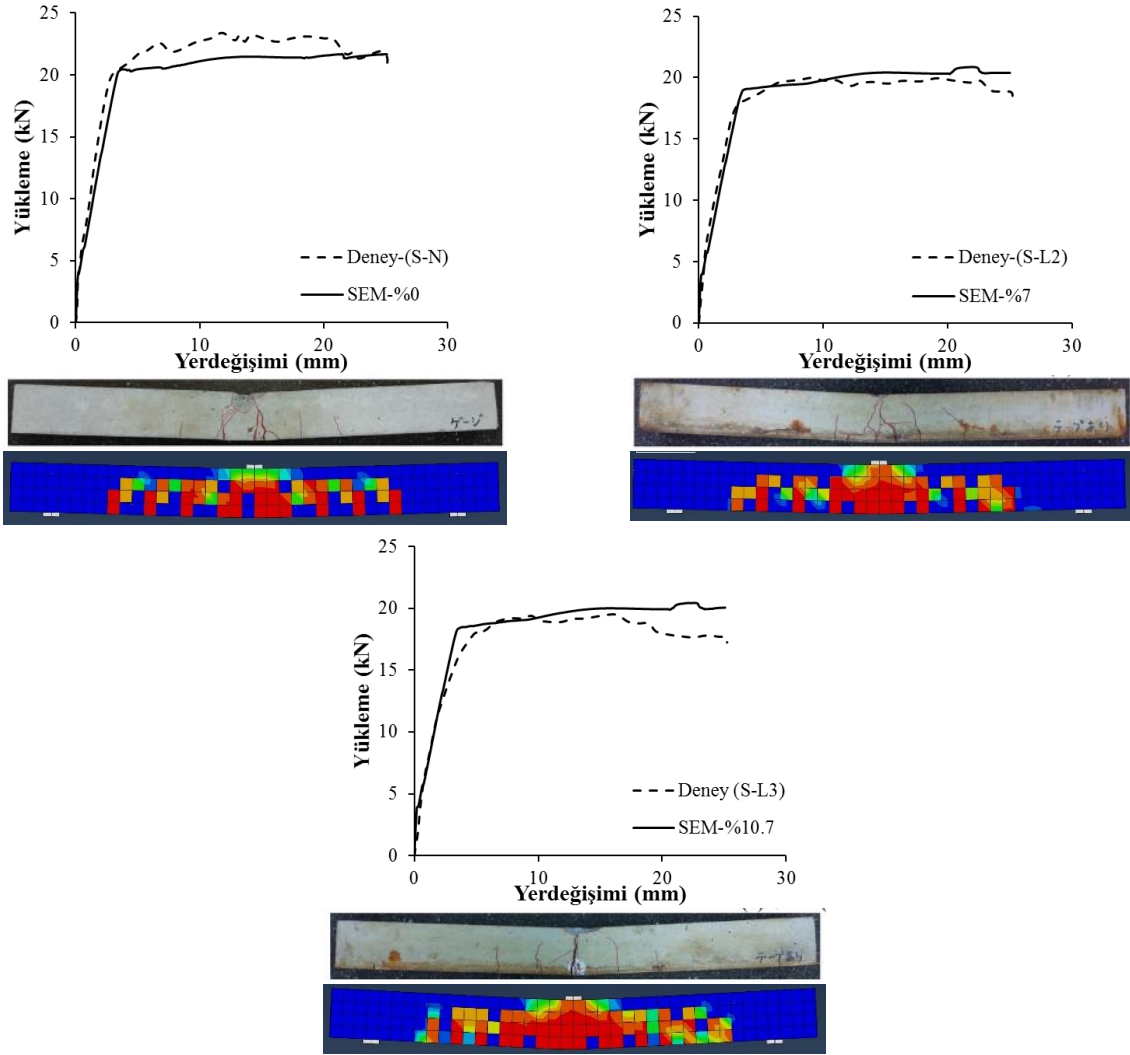
Referans alınan deneysel çalışmadaki kiriş numuneleri, sonlu eleman tabanlı ABAQUS paket programında tasarlanmıştır. Kullanılan beton ve boyuna donatılar; üç serbestlik dereceli, 8 düğüm noktalı, doğrusal kübik eleman (C3D8R) olarak, enine donatı ise; iki noktalı, doğrusal, üç boyutlu çubuk eleman (T3D2) olarak oluşturulmuştur. Deney düzeneğinde kullanılan mesnetler dikkate alınarak geliştirilen modelde sabit mesnet kullanılmıştır. Geliştirilen sayısal model Şekil 7 (a)'da gösterilmiştir. Deney düzeneğinde bulunan mesnetler ve yükleme başlığı sonsuz rijit olarak modellenmiştir. Referans alınan deneysel çalışmaya uygun olacak şekilde deplasman esaslı bir yükleme protokolü kullanılarak 25 mm'ye ulaşınca kadar yük uygulanmıştır. Sonlu eleman modelinde kullanılan mesnet ve yükleme koşulları Şekil 7 (b)'de belirtilmiştir.



Şekil 7. Geliştirilen sonlu eleman modeli (a), mesnet ve yükleme koşulları (b)

4. Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanması

Geliştirilen sonlu eleman modeli, Tamai ve diğ. [24] tarafından yapılan deneysel çalışmadaki S-N, S-L2, S-L3 adlı deney numuneleri ile doğrulanmıştır. Nümerik model sonuçları ile deney sonuçları Şekil 8'de karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde doğrusal olmayan sonlu eleman modeli ile referans alınan deney sonuçlarının tutarlı olduğu görülmektedir. Geliştirilen sonlu eleman modeli, korozyona maruz kalmış ve kalmamış eğilme etkisindeki betonarme kiriş elemanlarda, lineer ve nonlinear bölge için kuvvet-yer değiştirme ilişkisini gerçeğe yakın bir şekilde yansıtmaktadır.



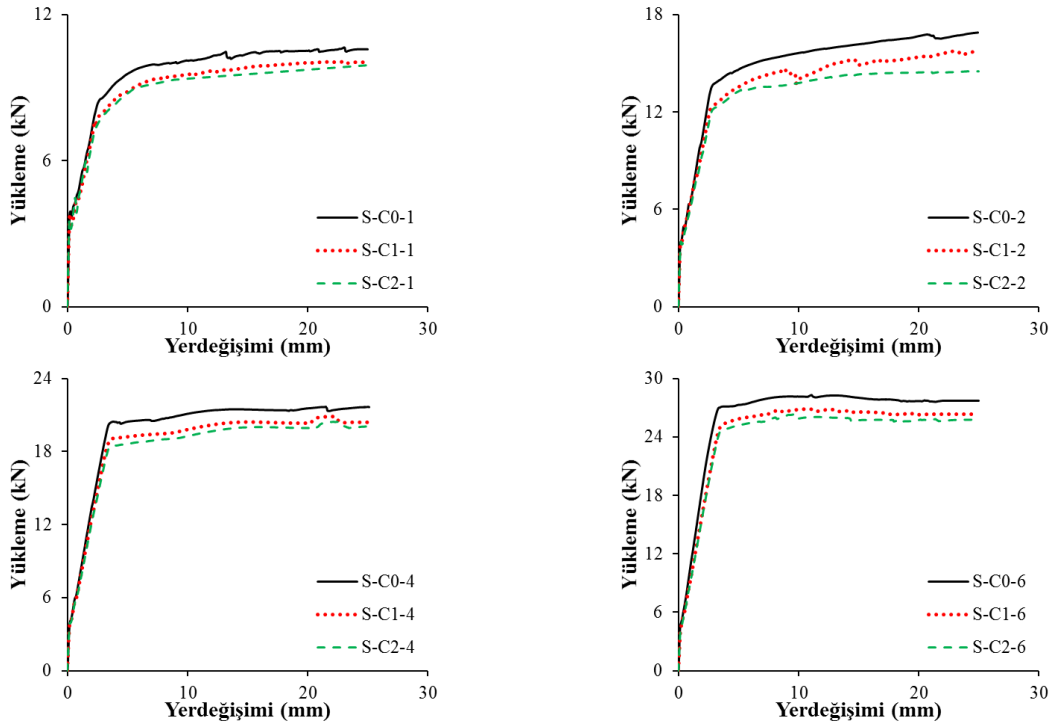
Şekil 8. Doğrusal olmayan sonlu eleman modeline ait sonuçlar ile deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması

5. Parametrik Çalışma ve Sonuçlar

Literatürde yer alan deneysel çalışma ile doğrulanmış SEM kullanılarak sayısal bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada farklı donatı oranları kullanılarak, farklı oranlarda korozyona uğramış betonarme kirişlerin eğilme davranışındaki değişim incelenmiştir. Parametrik çalışmada kullanılan modellerin çekme bölgesindeki donatı adedi, oranı ve korozyon seviyesi Tablo 2’de verilmiştir. ρ_{min} değerinin hesaplanmasında TBDY 2018 [28]’den yararlanılmıştır. Yapılan sayısal çalışmada, donatı oranını artması sonucunda maksimum yük taşıma kapasitesinde ve rijitlikte artış olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 9). Japonya’da yapılan statik yük etkisi altındaki betonarme kirişlerin donatı korozyonu nedeniyle eğilme mukavemetinde meydana gelen dayanım kaybı incelemiştir [24]. Bunun sonucunda %7 korozyon seviyesi için ortalama dayanım kaybı % 5, %10.7 korozyon seviyesi için ise ortalama dayanım kaybı %10 olduğu belirtilmiştir. Yapılan bu çalışmada ortaya çıkan sonuçlar incelendiğinde oluşan dayanım kayıplarının literatürde belirtilen oranlara oldukça yakın olduğu görülmektedir (Şekil 10).

Tablo 1. Parametrik çalışma verileri

Analiz Adı	ρ (%)	Korozyon Oranı
S-C0-1	2 ϕ 6	0
S-C1-1	(1.5 ρ_{min})	7
S-C2-1		10.7
S-C0-2	2 ϕ 8	0
S-C1-2	(2.7 ρ_{min})	7
S-C2-2		10.7
S-C0-4	2 ϕ 10	0
S-C1-4	(4.3 ρ_{min})	7
S-C2-4		10.7
S-C0-6	2 ϕ 12	0
S-C1-6	(6.2 ρ_{min})	7
S-C2-6		10.7

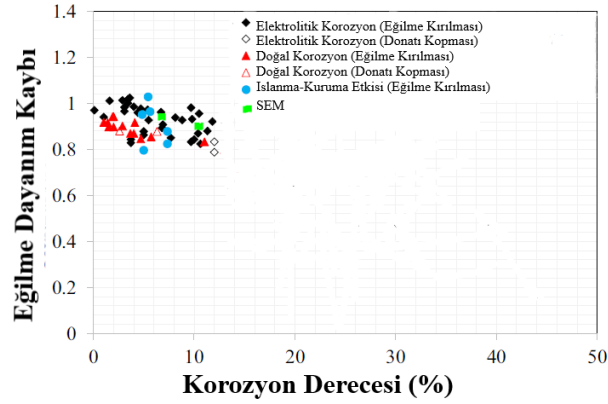
**Şekil 9.** Nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması

6. Çıkarım

Yapılan bu çalışmada, farklı oranlarda korozyona uğramış betonarme kirişlerin eğilme davranışları nümerik olarak incelenmiştir.

1. Geliştirilen sonlu eleman modeli ile literatürden seçilen deney sonuçlarının oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Literatürde ki çalışmalarda betonarme kirişlerin donatı korozyonu nedeniyle eğilme dayanımında oluşan kaybın, yapılan sayısal çalışmada ortaya çıkan dayanım kayıpları ile oldukça yakındır. Bu nedenle geliştirilen sonlu eleman modeli makul ve gerçekçi tahminler vermektedir.

2. Ayrıca bu çalışmada farklı seviyelerde korozyona uğramış betonarme kirişlerde çekme donatısının etkisi de incelenmiştir. Donatı oranını artması sonucunda maksimum yük taşıma kapasitesinde ve rijitlikte artış olduğu gözlemlenmiştir.
3. Korozyon oranının artması dayanım ve rijitlik kayıplarına yol açmaktadır. Korozyon seviyesi arttıkça donatı oranından bağımsız olarak rijitlik ve dayanım kaybı görülmektedir.
4. Yapılan bu çalışmada korozyonun üniform dağılım gösterdiği varsayılmıştır ve çıkan tüm sonuçlar üniform korozyon tipi için geçerlidir.
5. Bu çalışmada donatı korozyonu modellenirken Lu ve diğ. [27] yapmış olduğu çalışmadan yararlanılmıştır. Söz konusu çalışmada %15 korozyon seviyesi için deney sonuçlarının yakalanamadığı görülmektedir. İlerleyen çalışmalarda literatürden seçilecek farklı korozyon modelleri yardımıyla daha yüksek seviyelerde korozyon oranlarının modellenmesi yapılabilir.



Şekil 10. Sayısal modeldeki ortalama dayanım kaybının literatürdeki veriler ile karşılaştırılması [24]

Referanslar

- [1] Uomoto T. Misra S. Behaviour of concrete beams and columns in marine environment when corrosion of reinforcing bars takes place. ACI Sympo. Publ. Am. Concr. Inst. 1984;109:127–146.
- [2] Webb N.C. Cathodic protection of reinforced concrete. Constr. Build. Mater. 1992;6 (3): 179–183.
- [3] Novokshchenov V. Deterioration of reinforced concrete in the marine industrial environment of the Arabian Gulf-A case study. Mater. Struct. 1995;28:392–400.
- [4] Li CQ. Lawanwisut W. Zheng JJ. KiJawatworawet W. Crack width due to corroded bar in reinforced concrete structures. Int J Mater Struct Reliab 2005;3(2):87–94.
- [5] El Maaddawy T. Soudki KA. A model for prediction of time from corrosion initiation to corrosion cracking. Cem Concr Compos 2007;29(3):168–75.
- [6] Ghantousa RT. Poyeta S. L'Hostisa V. Tranb N-C. Françoisc R. Effect of crack openings on carbonation-induced corrosion. Cem Concr Res 2017;95:257–69.
- [7] Malumbela G. Alexander MG. Moyo P. Interaction between corrosion crack width and steel loss in RC beams corroded under load. Cem Concr Res 2010;40(9):1419–28.
- [8] Sajedi S. Huang Q. Probabilistic prediction model for average bond strength at steel concrete interface considering corrosion effect. Eng Struct 2015;99:120–31.

- [9] Lina H. Zhaoa Y. Ožboltb J. Hans-Wolffb R. The bond behavior between concrete and corroded steel bar under repeated loading. *Eng Struct* 2017;140:390–405.
- [10] Saifullah, M. Effect of reinforcement corrosion on bond strength in reinforced concrete. PhD thesis. UK: The University of Birmingham 1994; 29(6):1145-52.
- [11] Palsson R. Mirza M.S. Mechanical response of corroded steel reinforcement of abandoned concrete bridge. *ACI Structural Journal* 2002;99(2):157–62.
- [12] Du Y.G. Clark L.A. Chan A.H.C. Residual capacity of corroded reinforcing bars. *Magazine of Concrete Research* 2005;57(3):135–47.
- [13] El Maaddawy T. Soudki K. Topper T. Long-term performance of corrosion damaged reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal* 2005b;102(5):649–56.
- [14] Sanchun Y. Kejin W. Weiss J.W. Surendra S.P. Interaction between loading, corrosion, and serviceability of reinforced concrete. *ACI Mater J.* 2000;97(6).
- [15] Li Q. Jin X. Yan D. Fu C. Xu J. Study of wiring method on accelerated corrosion of steel bars in concrete. *Construction and Building Materials* 2021;269:121286.
- [16] Du Y.G. Clark L.A. Chan A.H.C. Impact of reinforcement corrosion on ductile behavior of reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal* 2007;104(3):285–93.
- [17] Mangat P.S. Elgarf M.S. Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement. *ACI Struct. J.* 1999;96 (1):149–158.
- [18] Lee H. S. Kage T. Noguchi T. Tomosawa F. The evaluation of flexural strength of RC beams damaged by rebar corrosion. In *Eighth International Conference on Durability of Building Materials and Components* 1999;8:320-330.
- [19] Biswas R. K. Iwanami M. Chijiwa N. Uno K. Finite element analysis of RC beams subjected to non-uniform corrosion of steel bars. 2019.
- [20] Jnaid F. Aboutaha R. S. Residual flexural strength of corroded reinforced concrete beams. *Engineering Structures* 2016;119:198-216.
- [21] Al-Bayti A. Structural Performance of Reinforced Concrete Beams Subjected to Service Loads Coupled with Corrosion of Flexural Reinforcement. Doctoral dissertation. Université d'Ottawa/University of Ottawa 2022.
- [22] Zhao G. Xu J. Li Y. Zhang M. Numerical Analysis of the Degradation Characteristics of Bearing Capacity of a Corroded Reinforced Concrete Beam. *Advances in Civil Engineering* 2018.
- [23] ABAQUS 2018 Research Edition. Abaqus Unified FEA. Dassault Systèmes SE: 10 rue Marcel Dassault CS 40501 78946 Vélizy-Villacoublay Cedex, France.
- [24] Tamai H. Sonoda Y. Bolander J. E. Impact resistance of RC beams with reinforcement corrosion: Experimental observations. *Construction and building materials* 2020;263: 120638.
- [25] Sinaei H. Shariati M. Abna A. H. Aghaei M. Shariati A. Evaluation of reinforced concrete beam behaviour using finite element analysis by ABAQUS. *Scientific Research and Essays* 2012;7(21):2002-2009.
- [26] Cao X. Wu L. Li Z. Behaviour of steel-reinforced concrete columns under combined torsion based on ABAQUS FEA. *Engineering Structures* 2020;209:109980.
- [27] Lu C. Tamai H. Sonoda, Y. A numerical study on the impact resistant capacity of RC beams with corroded reinforcement. *Procedia engineering* 2017;210:341-348.
- [28] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Resmi Gazete, Sayı: 30364 (Mükerrer), 18 Mart 2018.