ESKİŞEHİR TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLİM VE TEKNOLOJİ DERGİSİ B- TEORİK BİLİMLER

Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology B- Theoritical Sciences

2018, Cilt:6 - syf. 152 - 162, DOI: 10.20290/aubtdb.489580
4.Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı Özel Sayısı

ZEMİN KATI KOROZYONA MARUZ KALMIŞ BİR BİNANIN PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

İsa YÜKSEL, Gökhan Barış SAKCALI *

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, Türkiye

ÖZET

Türkiye'de mevcut az veya orta katlı betonarme binaların birçoğu düşük performanslı beton kullanımı, yapım ve tasarım hataları nedeniyle deprem yükleri altında düşük yapısal performans göstermektedir. Betonarme binalarda donatı korozyonu taşıyıcı elemanları ve yapısal sistemin bütününü olumsuz etkiler. Bu çalışmada aderans kaybı, beton ve donatı özelliklerinde değişime neden olan donatı korozyonuna maruz bir binanın yapısal performans değişimi ele alınmaktadır. Bu amaçla zemin katında farklı korozyon senaryoları uygulanan 5 katlı tipik bir betonarme bina tasarlanmıştır. Binanın her bir korozyon senaryosu altında EC-8'e göre yapısal performansı değerlendirilmiştir. Statik itme analizinde Seismostruct 2016 yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, uzun süreli etkiyen ileri seviyede seyreden donatı korozyonunun yapısal performansı olumsuz etkilediğini göstermektedir. Binanın korozyonsuz durumuna kıyasla, performans seviyelerinde ve hedef deplasmanlarında kayda değer değişimler gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aderans, Betonarme bina, Korozyon, Performans değerlendirmesi

ABSTRACT

Many of the low or medium-story reinforced concrete buildings existing in Turkey have poor structural performance under earthquake loads due to use of low performance concrete, design and construction errors. Rebar corrosion adversely affects structural performance of all structural members and the entire structural system in reinforced concrete buildings. This paper presents structural performance changes on a selected building affected rebar corrosion that cause important changes in concrete, reinforcement steel properties and bond loss. A typical five-story reinforced concrete building is designed to apply different rebar corrosion scenarios at ground floor. Structural performance evaluation of the building with different corrosion scenarios are performed according to EC-8. The software Seismostruct 2016 is used for pushover analysis. The results show that structural performance of the building is negatively affected from high level and long term rebar corrosion aspect. Significant changes in performance levels and in target displacements of the building are observed as compared with the results of the uncorroded state of the building.

Keywords: Bond, Corrosion, Performance evaluation, Reinforced concrete.

1. GİRİŞ

Betonarme yapılarda donatı korozyonu zaman içinde taşıyıcı sistem performansının düşmesine neden olmaktadır. Betonarme elemanlarda korozyon olayı betonarme davranışının gerçekleşebilmesi için özel önem arz eder. Betonun donatı ile birlikte çalışarak kendinden beklenen davranışı gösterebilmesi için donatı-beton bağının başlangıçta oluşması ve sonraki süreçte azalmaması gerekir. Oysa beton maruz kaldığı yıpratıcı çevresel etkiler karşısında donatıyı servis ömrü boyunca koruyamamaktadır. Bu durumda betonarme taşıyıcı elemanlar özellikle deprem yükleri altında normalden daha erken ve daha kolay bir şekilde göçme durumuna gelirler. Betonarme donatısındaki korozyon; donatıda çap kaybı, betonda çatlama ve dökülmeler, aderans kaybı, donatının sıyrılması, donatı çeliğinin mekanik özelliklerinde olumsuz değişimlere neden olabilmektedir. Aderansın tümden kaybı veya azalması halinde donatı akma sınırına erişemeden betondan sıyrılabilir ve sıyrılma taşıyıcı eleman davranışını önemli ölçüde etkiler. Donatı korozyonunun olumsuz sonuçlarından belki de en önemlisi eleman veya sistem davranışının sünekten gevreğe dönüşmesine neden olabilmesidir. Literatürde buna örnek

*Sorumlu Yazar: gokhan.sakcali@btu.edu.tr
Geliş: 23.03.2018 Kabul:01.08.2018

gösterilebilecek çalışmalar vardır. Eğilme etkisi altında korozyona maruz kalmış birçok deney kirişi üzerine yapılan araştırmalar sonucunda, kirişin moment taşıma gücündeki azalmanın yanı sıra, göçme şeklinin sünekten gevreğe döndüğü gösterilmiştir [1-4]. Betonarme bir yapının istenen performansa sahip olması kritik kesitlerinin elastik-ötesi deformasyon yapabilmesine bağlıdır. Son yıllarda yapılan araştırmalarda kritik kesitlerin davranışını ifade eden ve eğilme davranışını esas alan farklı modeller bulunmasına karşın; kesme, aderans kaybı ve sıyrılmayı bir arada dikkate alan model bulunmamaktadır [5].

Betonarme yapıların doğrusal olmayan davranışlarında bağ sıyrılmasını kapsayan farklı modeller [6-14] geliştirilmiştir. Bazı çalışmalarda, korozyonsuz donatılarda bile sıyrılma deformasyonunun toplam deformasyonun %25'i ile %40'ı arasında olabileceği belirtilmiştir [15]. Eğilmeye maruz bir elemanda çatlamaların da meydana geleceği düşünüldüğünde bağ dayanımının daha da düşeceği ve sıyrılma deformasyonunun toplam deformasyon içindeki oranının artacağı açıktır.

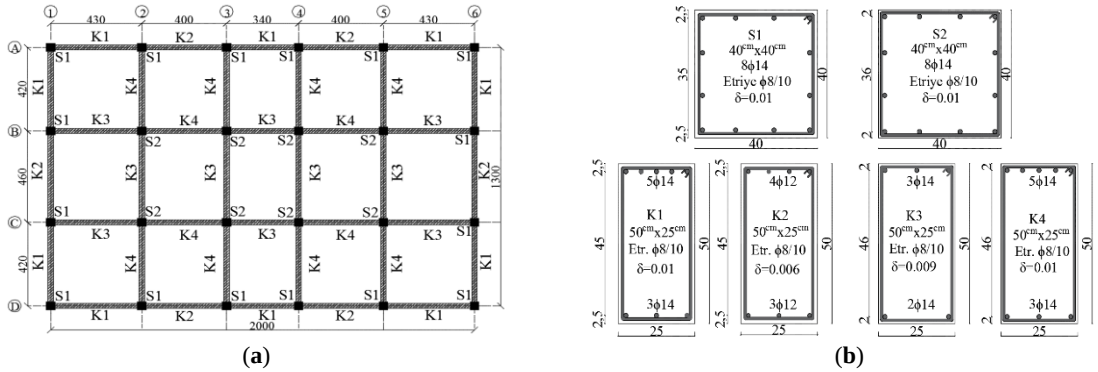
Donatı korozyonunun betonda bağ dayanımı ve buna bağlı olarak sıyrılma üzerinde büyük etkisi vardır. Monotonik yükleme altında, korozyon nedeniyle %16 kesit kaybı gözlenen donatılarda bağ dayanımının %50 düzeyinde azaldığı belirtilmektedir. %16' dan daha düşük korozyon seviyelerinde korozyonlu elemandaki kırılma, eleman rijitliğinde azalmayla birlikte sıyrılma ve kırılma bir arada gerçekleşmektedir. Çevrimsel yükleme altında da, korozyonun başlangıçta donatı-beton arasındaki bağı az miktarda artırıyor olmasına karşın; daha sonrasında, hızlı bir şekilde düşürdüğü görülmektedir [16].

Bu çalışmada örnek olarak seçilen bir bina modelinin yalnız zemin kattan etkiyecek şekilde farklı korozyon senaryoları için Seismostruct programı ile statik itme analizi ve peşinden performans değerlendirmesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar referans (korozyonsuz) sistem sonuçları ve korozyonlu senaryolar birbirleri ile karşılaştırılarak hasarların yapının genel davranışına etkileri değerlendirilmiştir.

2. SAYISAL UYGULAMA

2.1. Seçilen Bina Modeli

DBYBHY-2007 [17]'ye göre tasarlanmış 1Z+4N kattan oluşan bir model bina seçilmiştir (Şekil 1.a). Bu binanın alt katı işyeri olarak kullanılan yaygın görülen binalara benzetilmesi amacıyla zemin kat yüksekliği 4.5 m, normal katlarının yüksekliği ise 3 m olarak seçilmiştir. Malzeme C20/25-S420 seçilmiştir. Şekil 1 (b)'de binaya ait kesit detayları verilmiştir. Bina yerel zemin sınıfı B ve önem sınıfı ise II olarak seçilmiştir. Döşeme kalınlığı 12 cm; döşeme üzerindeki hareketli yük 2 kN/m^2 olarak alınmıştır.



(**a**) (**b**)

Şekil 1. (a) Seçilen bina kalıp planı; (b) Taşıyıcı eleman kesitleri

2.2. Korozyon Senaryoları

Tablo 1'de referansla birlikte seçilen 6 farklı korozyon senaryosu, korozyon öncesi ve sonrası donatı çapları ve kütle kayıp oranları gösterilmiştir. Senaryo kodları (kod-hız-etkime süresi) formunda verilmiştir. Örneğin "S1-0.1-20" kodunun anlamı "0.1 μA/cm^2 sabit hızında 20 yıl süresince etkiyen S1 kodlu korozyon" senaryosunu ifade etmektedir. Binanın ilk 15 yılı korozyonun başlangıç evresi olarak kabul edilmiştir. Elektrokimyasal üniform korozyon etkisi altındaki bir donatı çubuğu çapında meydana gelecek çap kaybı ve kütle kaybı için Bağıntı (1-2) kullanılmıştır. Bu bağıntılarda ϕ(t) t anında donatı çapını (mm), ϕ_0 nominal donatı çapını (mm), t_{in} donatı yüzeyinde korozyonun başlamasından itibaren geçen zamanı (yıl), P_x ise penetrasyonun (işleme derinliğinin) ortalama değerini (mm) göstermektedir. Faraday kuralına göre saldırının penetrasyonu donatı çapındaki kayıp cinsinden tanımlanır [18].

$$\%\Delta w = \frac{\phi_0^2 - \phi(t)^2}{\phi_0^2} x100 \tag{1}$$

$$\phi(t) = \phi_0 - 2P_x = \phi_0 - 2i_{corr}k(t - t_{in}) \tag{2}$$

Tablo 1. Korozyon senaryoları

Senaryo kodu	Başlangıçta çap (mm)	i_{corr} (μA/cm^2)	t_p (yıl)	Korozyon sonrası çap (mm)	Kütle kaybı (%)
S0	8	0	0	8.00	0.00
	12	0	0	12.00	0.00
	14	0	0	14.00	0.00
S1-0.1-20	8	0.1	20	7.99	0.29
	12	0.1	20	11.99	0.19
	14	0.1	20	13.99	0.17
S2-0.1-30	8	0.1	30	7.97	0.87
	12	0.1	30	11.97	0.58
	14	0.1	30	13.97	0.50
S3-0.5-20	8	0.5	20	7.94	1.44
	12	0.5	20	11.94	0.96
	14	0.5	20	13.94	0.83
S4-0.1-50	8	0.1	50	7.92	2.02
	12	0.1	50	11.92	1.35
	14	0.1	50	13.92	1.16
S5-1.0-20	8	1.0	20	7.88	2.88
	12	1.0	20	11.88	1.92
	14	1.0	20	13.88	1.65
S6-0.5-30	8	0.5	30	7.83	4.30
	12	0.5	30	11.83	2.88
	14	0.5	30	13.83	2.47

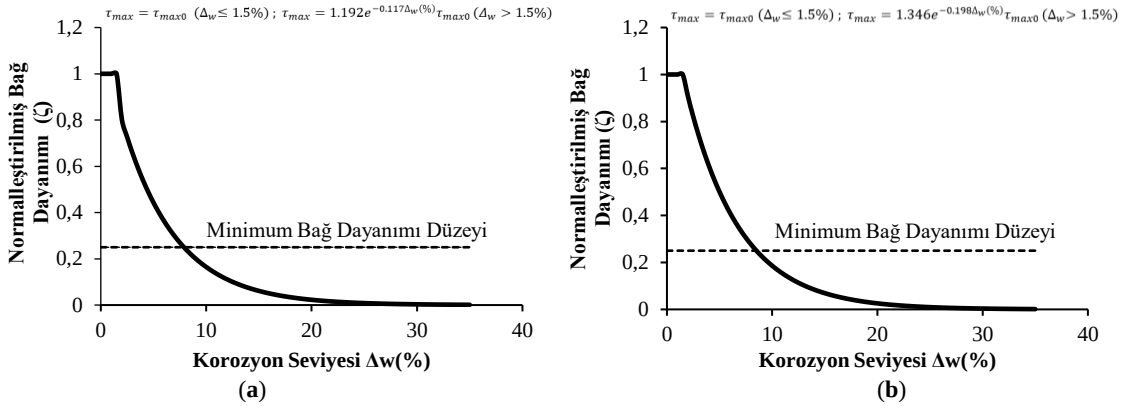
2.3 Donatı Mekanik Özellikleri ve Sıyrılma

Tüm donatılar için ikili-doğrusal malzeme modeli kullanılmıştır. Sıyrılma etkisi altındaki donatıda sıyrılma sonrası pekleşme ihmal edilmiştir. Korozyona maruz kalmış bir donatının malzeme özelliklerinde gözlenen değişimler için Bağıntı (3) kullanılmıştır [19].

$$A = \left(1 - Bx\frac{\Delta w}{100}\right) * C \tag{3}$$

Burada, A hesaplanan parametreyi ($б_y$, $б_u$, E_s, ε_u), B hesaplanan parametreye bağlı katsayıları göstermekte olup $б_y$ için 1.24, $б_u$ için 1.07, E_s için 0.75 ve ε_u için 1.95 değerindedir. C parametresi ise hesaplanan parametrenin ($б_y$, $б_u$, E_s, ε_u) başlangıçtaki ($б_{y0}$, $б_{u0}$,E_{s0} ve ε_{u0}) değerleridir. Burada $б_y$, $б_u$, E_s, ε_u ifadeleri sırasıyla donatının korozyon sonrasındaki akma dayanımını, kopma dayanımını, elastisite modülü ve kopma şekil değiştirmesini göstermektedir [20]. Sıyrılma etkisinin göz önüne alınması için

Bhargava vd., [21] tarafından verilen çekip-çıkarma (pull-out) ve eğilme deneyleri ile ayrı ayrı elde edilmiş olan normalleştirilmiş "bağ dayanımı-korozyon düzeyi" ilişkileri kullanılmıştır (Şekil 2).

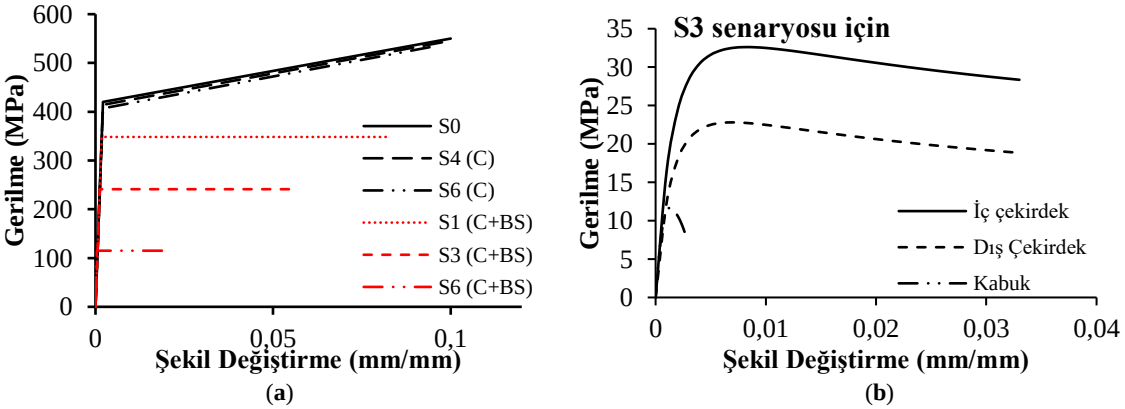


Şekil 2. Normalleştirilmiş bağ dayanımı-korozyon düzeyi; (a) Çekip-çıkarma deneyine göre, (b) Eğilme deneyine göre [21]

Şekil 2'de minimum bağ dayanımı değeri %25 olarak tayin edilmiştir. Şekil 2'de τ_{max} ve τ_{max0} sırasıyla korozyondan dolayı ve başlangıçtaki bağ gerilmesi değerlerini ifade etmektedir. Elde edilen bağ dayanımı değerleri Bağıntı (4)'de verilen donatı akma dayanımının sıyrılma etkisi nedeniyle azaltma katsayısını (ϕ) bulmak için kullanılmıştır. Bu şekilde akmaya erişmeden sıyrılmaya uğrayan donatılar göz önüne alınmaktadır. Bağıntı (4)'de L_{eu} değeri kenetlenmemiş eşdeğer uzunluğu göstermekte olup, kolon kritik kesitindeki donatıdaki sıyrılmanın çubuktaki maksimum birim boy değişimine oranı ile elde edilmektedir. Böylece korozyona maruz kalmış bir donatının dayanımında sıyrılma olayından ötürü meydana gelen düşüşler göz önüne alınmıştır [21]. Ayrıca 8 mm çaplı donatılar sadece etriye olarak kullanıldığı için bu donatılarda sıyrılma etkisi göz önüne alınmamıştır. Korozyon etkisiyle donatıda çeliği mekanik özelliklerindeki değişim ve sıyrılma etkisi bir arada göz önüne alınmıştır.

Kolon donatılarının korozyona uğramasıyla meydana gelen gerilme-birim şekil değiştirme diyagramındaki değişimler ile sıyrılma etkisiyle ilaveten meydana gelen kayıplar kolonda 14 mm çaplı donatı için CEB-FIP Model Code 1990 [22]' da verilen bağıntılardan elde edilerek Şekil 3 (a)' da örnek olarak gösterilmiştir. Burada 'C (corrosion)' korozyon etkisini ve 'C+BS (corrosion and bond-slip)' korozyon etkisi ve bağ dayanımı-sıyrılma ilişkisinden dolayı meydana gelen dayanım düşüşünü ifade etmektedir.

$$\phi = \frac{L_{eu}(korozyona\ uğramamış)}{L_{eu}(korozyona\ uğramış)} \tag{4}$$

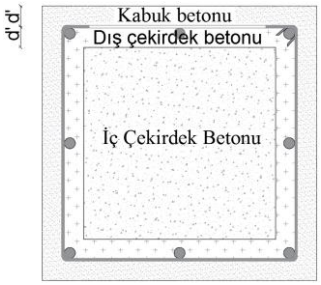


Şekil 3. Kolonda kullanılan malzemelerin gerilme-birim şekil değiştirmeleri (a) Boyuna Donatı; (b) Beton

2.4. Beton Özellikleri ve Yumuşama Etkisi

Korozyonun uzun süreli etkisi, önce betonarme elemanların kabuk bölgesini etkiler. Daha sonra iç bölgelere nüfuz ederek çekirdek betonun belli bir bölümünü de etkisine alır. Bu bölgeler çatlama ve yumuşamaya maruz kalır. Çatlama ve akabinde yumuşamaya başlayan betonda rijitlik azalır. Rijitliği azalan ve çatlaklı vaziyette dayanımı azalmış betonda korozyonun çok ileri aşamalarında dökülmeler de meydana gelir. Betonda meydana gelen çatlamalar ve yumuşama etkisi Bağıntı (5) [23]' de verilmiş katsayı ile dikkate alınmış ve betonun gerilme-birim şekil değiştirme grafiği modifiye edilmiştir. Şekil 3 (b)'de iki senaryo için beton gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri gösterilmiştir.

Şekil 3 (b)'de S1 kolonu ve S3-0,5-20 senaryosu için beton gerilme-şekil değiştirme ilişkileri verilmiştir. Yapılan çalışmada sargılı beton için Mander [24] modeli kullanılmıştır. Çalışma kapsamında betonarme elemanın beton kısmı 3 katman şeklinde tanımlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Üç katman halinde tanımlanan tipik betonarme kesiti

$$\zeta = \frac{0.9}{\sqrt{1+600\varepsilon_r}} \tag{5}$$

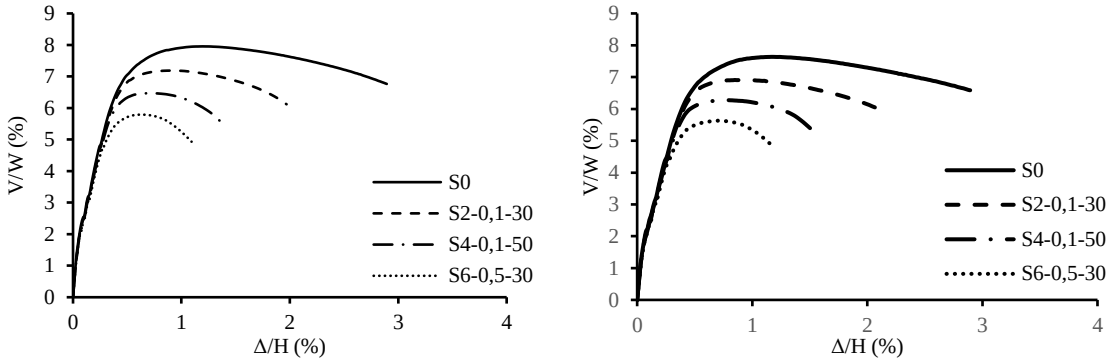
2.5. Yapılan Analizler

Bu çalışmada, Sesimostruct yazılımı kullanılarak her senaryo için seçilen taşıyıcı sistemin statik itme analizi yapılmıştır. Tüm kiriş ve kolon elemanlarda kuvvete dayalı elastik olmayan çerçeve eleman (fiber eleman-yayılı inelastik model) [25] kullanılmıştır. Dönme istem değerleri Eurocode-8 (EC-8)'e göre hesaplanmıştır. Bu kapsamda NC sınırı için EC-8 (A.1.) bağıntısı ve DL sınırı için EC-8 (A.10a.) bağıntısı kullanılmıştır. SD dönme sınırını belirlemek için EC-8 (A.1.) bağıntısında bulunan nihai dönme kapasitesinin 3/4 'ü kadar bir dönme istemi gerekmektedir [26].

3. DEĞERLENDİRME

3.1. Statik İtme (Pushover) Eğrisi

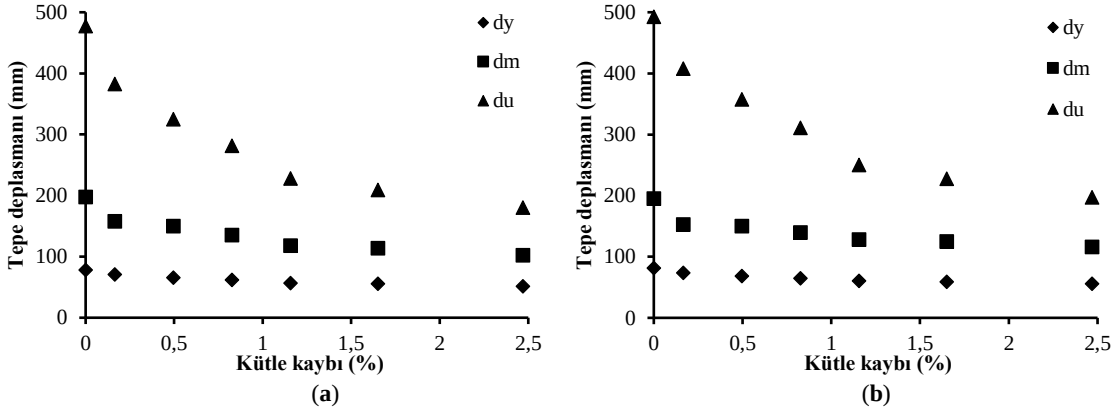
Statik itme analizi sonucunda S0,S2,S4 ve S6 senaryoları için çizilen boyutsuz itme eğrileri toplu halde X ve Y yönleri için ayrı ayrı olmak üzere Şekil 5'de gösterilmiştir. İtme eğrilerinde korozyonun bina davranışı üzerindeki etkisi açıkça görülebilmektedir. Gerek taban kesme kuvveti cinsinden ve gerekse binanın yanal ötelenme kapasitesi cinsinden korozyon senaryolarına bağlı olarak önemli kayıplar söz konusudur. Yapılan hesaplamalara göre senaryolar içerisinde en olumsuz etkiyi yapan S6-0,5-30 senaryosu ile korozyonsuz durum arasında binanın yanal ötelenme kapasitesinde %62, taban kesme kuvvetinde ise %26 gibi büyük oranlarda kayıp olduğu görülmektedir. Diğer senaryolar bunların arasında değerler vermektedir. Y yönü için de benzer bir eğilim gözlenmiştir. Kapasite eğrisi yapı davranışı hakkında önemli bilgiler vermektedir. Yapının zemin kattaki korozyon etkisi ile yanal ötelenme kapasitesinin büyük ölçüde düşmesine rağmen, ötelenmelerin katlar arasındaki dağılımına bakıldığında korozyon etkisine maruz katta önemli bir yoğunlaşma olduğu görülmektedir. Bu durum korozyona maruz katın diğer katlara göre daha yumuşak bir hal aldığını göstermektedir.



Şekil 5. Statik İtme (pushover) eğrileri

3.2. Akma/Göçme Tepe Yer Değiştirmesi-Korozyon Seviyesi İlişkisi

Şekil 6'da X ve Y yönleri için çatı deplasmanı-kütle kaybı ilişkisi gösterilmiştir. Bu ilişki 14 mm çaplı donatı kütle kaybı esas alınarak elde edilmiştir. Şekil 6'daki değişimler 3 ayrı parametreye (akma deplasmanı (d_y), maksimum çatı deplasmanı (d_m), göçme deplasmanı (d_u)) göre gösterilmiştir. Göçme noktası maksimum taban kesme kuvvetindeki azalma %15 düzeyine eriştiği an olarak kabul edilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü üzere akma noktasına kadar olan evrede kütle kaybının çatı deplasmanına etkisi belirgin değildir. Ancak binanın maksimum taban kesme kuvveti veya göçme noktası esas alınırsa donatılardaki kütle kaybının artışına bağlı olarak çatı yanal deplasmanı azalmaktadır. Buradan anlaşılıyor ki kütle kaybına bağlı olarak binanın yapabileceği çatı deplasmanı azalmakta, taşıyıcı sistem davranışı sünekten gevreğe doğru geçiş göstermektedir. Sayısal olarak örneklemek gerekirse; korozyonsuz vaziyetteki yapı göçme anına gelebilmesi için X yönünde yaklaşık 478 mm çatı deplasmanı yapabilecek iken, bu değer %2.47 kütle kaybı yaratacak korozyon düzeyinde (30 yıl boyunca 0.5 $\mu A/cm^2$ sabit hızda korozyon etkisi altında) en çok 180 mm olabilecektir. Görüldüğü üzere zemin katı etkileyen korozyon binanın çatı deplasman kapasitesini önemli ölçüde azaltmaktadır ki, bu sistem davranışının değişmesi olarak algılanmalıdır. Bu sonuç korozyonun sistem üzerinde yarattığı hasarın bir sonucu olarak değerlendirilmektedir.

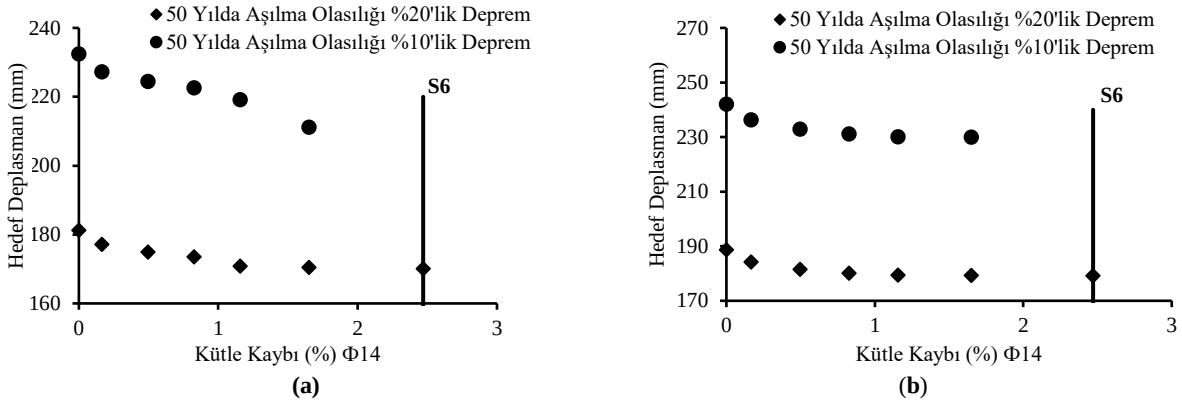


Şekil 6. Çatı deplasmanı-kütle kaybı ilişkisi (a) x doğrultusu için; (b) y doğrultusu için

3.3. Hedef Deplasmanlar

Yapısal performansı ortaya koymak ve korozyonun buna etkisini araştırmak üzere 50 yılda aşılma olasılığı %20 ve %10 olan iki deprem etkisi göz önüne alınmıştır. Bu deprem etkileri altında her bir senaryo için hedef deplasman değerleri hesaplanmış ve Şekil 7'de kütle kaybına oranla çizilerek

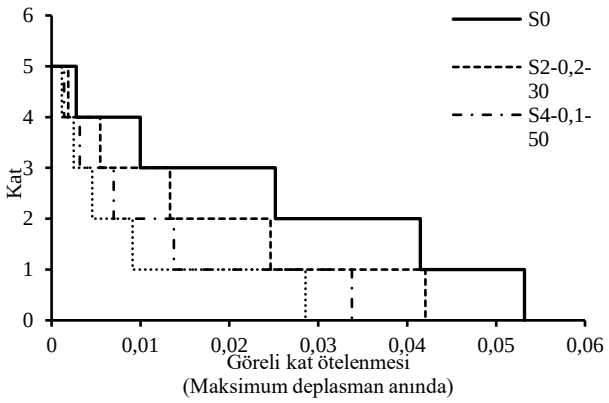
gösterilmiştir. Şekil 7'ye göre, X ve Y yönleri için benzer sonuçlar elde edilmiştir. X yönünde hesapta bulunan hedef deplasman değerleri korozyon oranı arttıkça azalma göstermektedir. En olumsuz senaryo için örnek alınan yapı sistemi 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem için hedef deplasmana ulaşamayıp yıkılmaktadır. Görüldüğü üzere korozyonun zamana bağlı yıpratıcı ve yıkıcı etkisi binanın uzun vadede davranışını olumsuz etkilemiştir. Bu durum korozyona maruz kalmış eski binalar için önemli bir sonuç olarak kabul edilebilir. Ayrıca korozyona uğramış ve güçlendirilecek binalar için de dikkate alınması gereken bir husustur.



Şekil 7. Kütle kaybına bağlı hedef deplasman değişimi, (a) X-yönünde; (b) Y-yönünde

3.4. Göreli Kat Ötelenmeleri

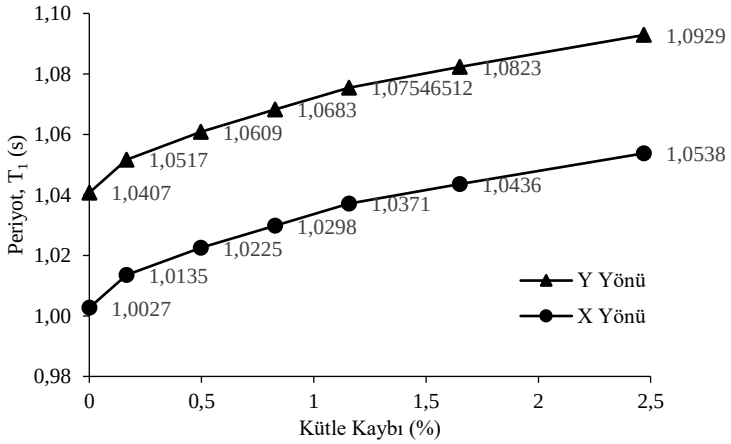
Şekil 8' de binanın X doğrultusunda göçme anına ait göreli kat ötelenmesinin katlara ve senaryolara göre değişimi görülmektedir. Zemin kattan üst katlara doğru tüm senaryolarda gittikçe azalan bir göreli kat ötelenmesi gözlenmektedir. Korozyonsuz sistemin göreli kat ötelenmesi kapasitesinin en büyük, korozyon bakımından en olumsuz olan senaryoda ise en az olacak şekilde bir seyir izlenmektedir. Şekil 5'den de görüleceği üzere taban kesme kuvvetleri de senaryolardaki bu değişimi takip ederek, korozyon hasarı arttıkça daha az taban kesme kuvveti ve yanal ötelenme kapasitesi ortaya koymaktadır. Bu ikisi birlikte düşünüldüğünde, korozyon nedeniyle taşıyıcı sistemin göreli kat ötelenmelerinde belirgin düşüşler olmaktadır. Özellikle birinci katta bu düşüş 2 kattan fazla bir oranda gerçekleşmiştir. Bu beklenen bir durumdur. Çünkü korozyonun zemin katta etkili olduğu varsayımı incelenmektedir. Bu nedenle oluşan korozyon hasarları zemin katta yoğunlaştığından, sistem davranışını etkileyen en önemli kat da zemin kat olmaktadır. Benzer davranış Y doğrultusunda da gözlenmiştir.



Şekil 8. Bina göçme anında X yönündeki göreli kat ötelenmeleri

3.5. Kütle Kaybı-Periyot İlişkisi

Şekil 9' da taşıyıcı sistemin X ve Y yönleri için birinci periyodun 14 mm çaplı donatıda hesaplanan kütle kaybına göre değişimi gösterilmiştir. Bu değişim donatı çapına göre değişkenlik göstermektedir. Kolonlarda ana donatı olarak 14 mm çaplı çubuk kullanılmış olmasına dayanarak söz konusu kütle kaybı burada 14 mm çaplı donatı üzerinden hesaplanmıştır. Periyot hesabında taşıyıcı elemanların çatlamış kesitleri göz önüne alınmıştır. Her iki yönde de kütle kaybı arttıkça birinci periyodun arttığı görülmektedir. Artış oranı her iki doğrultu için %2,5 kütle kaybı için %4,8 oranında gerçekleşmiştir. Bu artışın nedenleri olarak; donatıdaki çap kaybı, betonda çatlama ve sıyrılma etkisinin artmasına bağlı olarak rijitlik kayıpları gösterilebilir. Bu değişimler sayısal değer olarak nispeten küçük değişimlerdir.



Şekil 9. Birinci periyodun kütle kaybına göre değişimi

3.6. Hasarlı Eleman Oranları

50 yılda aşılma olasılığı %20 ve %10 olan depremler için hasar düzeyleri incelendiğinde hasarın kolonlarda korozyon seviyesine göre artışı dikkat çekmektedir. Tablo 2'de örnek olarak X yönündeki analize ait görülen hasar durumları gösterilmiştir. Beklendiği üzere kolonlarda, korozyon hızı ve etkime süresi arttıkça hasar da arttığından, hasar durumu sadece "DL" hasar seviyesine ulaşan eleman yüzdesi azalırken sadece "SD" ve "NC" hasar seviyesine ulaşan eleman yüzdesi artmaktadır. Kirişler içinse, sadece hesap doğrultusunda olan elemanlar göz önüne alınmıştır. S0 senaryosu 50 yılda aşılma olasılığı %20 ve %10' luk depremler için kirişlerde gözlenen hasar yüzdeleri sırasıyla; sadece NC hasar seviyesini aşan elemanlar için %10 ve %20, sadece DL hasar sınırı aşan elemanlar için %90 ve %80 olduğu gözlenmiştir. Diğer senaryolar için kiriş elemanların tamamının DL hasar sınırında kaldığı gözlenmiştir. Sıyrılma etkisi nedeniyle kolonlarda kapasite düşüşü kirişlere göre daha fazla olduğundan bu durumun ortaya çıktığı düşünülmektedir. Korozyon hasarlarının, sistemi "güçlü kiriş-zayıf kolon" durumuna doğru sürüklediği görülmektedir. Bu durum çok önemli bir değişim demektir.

Tablo 2. Farklı depremler için X yönünde hasar durumları

50 yılda aşılma olasılığı %20'lik deprem						50 yılda aşılma olasılığı %10'luk deprem					
Senaryo	**Eleman**	**NC**	**SD**	**DL**	**SAFE**	**Senaryo**	**Eleman**	**NC**	**SD**	**DL**	**SAFE**
S0	Kolon	0.00	0.00	75.00	25.00	S0	Kolon	8.33	50.00	33.33	8.33
	Kiriş (çalışan doğ.)	10.00	0.00	90.00	0.00		Kiriş (çalışan doğ.)	20.00	0.00	80.00	0.00
S1	Kolon	8.33	50.00	41.67	0.00	S1	Kolon	58.33	25.00	16.67	0.00
	Kiriş (çalışan doğ.)	0.00	0.00	100.00	0.00		Kiriş (çalışan doğ.)	0.00	0.00	100.00	0.00
S2	Kolon	25.00	45.83	29.17	0.00	S2	Kolon	83.33	0.00	16.67	0.00
	Kiriş (çalışan doğ.)	0.00	0.00	100.00	0.00		Kiriş (çalışan doğ.)	0.00	0.00	100.00	0.00
S3	Kolon	66.67	16.67	16.67	0.00	S3	Kolon	83.33	8.33	8.33	0.00
	Kiriş (çalışan doğ.)	0.00	0.00	100.00	0.00		Kiriş (çalışan doğ.)	0.00	0.00	100.00	0.00
S4	Kolon	83.33	8.33	8.33	0.00	S4	Kolon	100.00	0.00	0.00	0.00
	Kiriş (çalışan doğ.)	0.00	0.00	100.00	0.00		Kiriş (çalışan doğ.)	0.00	0.00	100.00	0.00
S5	Kolon	83.33	8.33	8.33	0.00	S5	Kolon	100.00	0.00	0.00	0.00
	Kiriş (çalışan doğ.)	0.00	0.00	100.00	0.00		Kiriş (çalışan doğ.)	0.00	0.00	100.00	0.00
S6	Kolon	100.00	0.00	0.00	0.00	S6	Kolon	Hedef Deplasmana Ulaşılamıyor			
	Kiriş (çalışan doğ.)	0.00	0.00	100.00	0.00		Kiriş (çalışan doğ.)				

NC: Limit State of Near Collapse (Göçme Sınırı); **SD**: Limit State of Significant Damage (Güvenlik Sınırı); **DL**: Limit State of Damage Limitation (Minimum Hasar Sınırı)

3.7. Yumuşak Kat Oluşumu

Zemin kat için DBYBHY-2007 [17] esaslarına göre yapılan yumuşak kat düzensizliği rijitlik düzensizlik katsayısının 2 den büyük olması durumunda yumuşak kat düzensizliği olduğunu belirtir. S0 başlangıç senaryosunda sistemde düzensizlik olmamasına rağmen, X yönündeki deprem için tüm korozyon senaryoları ve Y yönündeki deprem için S3, S4, S5 ve S6 senaryoları için yumuşak kat düzensizliği oluştuğu görülmüştür. Ayrıca korozyon seviyesi arttıkça rijitlik düzensizliği katsayısı artmış ve sistemde yumuşak kat düzensizliği oluşması ihtimalinin de arttığı gözlenmiştir (Tablo 3). Bunun nedeni olarak; zemin katta, kolonlar ve kirişlerde hasar artış oranının fazla olması ve zemin katın bir üst kata göre, korozyon etki düzeyindeki artışa bağlı olarak, daha fazla yanal yerdeğiştirme yapması gösterilebilir. Özetle; normal şartlar altında yumuşak kat düzensizliği yokken, yalnız zemin katta oluşan korozyon hasarlarının birikmesiyle bu kat yumuşak kat haline gelebilmektedir.

Tablo 3. Korozyon senaryoları için yumuşak kat düzensizliği kontrolü

Senaryo	**Rijitlik düzensizliği katsayısı**		**Düzensizlik Durumu**
	x yönündeki deprem için	**y yönündeki deprem için**	
S0	1.71	1.42	Düzenli
S1	2.28	1.58	x yönündeki deprem için düzensiz
S2	2.67	1.81	x yönündeki deprem için düzensiz
S3	2.71	2.09	x ve y yönündeki deprem için düzensiz
S4	3.35	2.51	x ve y yönündeki deprem için düzensiz
S5	3.55	2.75	x ve y yönündeki deprem için düzensiz
S6	4.17	3.08	x ve y yönündeki deprem için düzensiz

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada yalnız zemin kattan etki eden üniform korozyon hasarının etkileri seçilen bir örnek bina üzerinde farklı korozyon etkileri altında analiz edilmiştir. Korozyon düzeyine göre değişken hasarın mertebesine göre statik itme eğrisinin hem tepe yerdeğiştirmesi hem de taban kesme kuvveti bakımından önemli derecede değişime uğrayarak kapasite kayıpları olduğu görülmüştür. Korozyonsuz

duruma kıyasla kolon ve kirişlerde hasarlı eleman sayısı ve bunlardaki hasar düzeyleri artmış, genel anlamda bina performansı kötüleşmiştir. Bina birinci periyodu korozyona bağlı donatı kütle kaybı ile orantılı şekilde büyümüş, sistemin akma ve göçme yerdeğiştirmeleri farklılaşmıştır. İleri düzeyde korozyon hasarı sonucunda taşıyıcı sistemin zemin katında yumuşak kat düzensizliği ortaya çıkabilmektedir. Bu durum zemin kattan etkiyen korozyonun bina davranışını tümden değiştirebilecek kadar etkili olabileceğini ve analizlerde mutlaka göz önüne alınması gerektiğini göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma BTÜ BAP biriminin 2016-91-024 nolu bilimsel araştırma projesinin bir kısım sonuçlarını içermektedir. Yazarlar Bursa Teknik Üniversitesi Rektörlüğü'ne projeye desteklerinden ötürü teşekkür ederler.

REFERANSLAR

[1] Mangat P, Elgarf M. Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement, ACI Struct J.;1999; 97(1): 149–59.

[2] Rodriguez J, Ortega LM, Casal J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement, Const. Build. Mater.; 1997; 11(4): 239–48.

[3] Almusallam AA, Al-Gahtani AS, Aziz AR, Dakhil FH. and Rasheeduzzafar. Effect of reinforcement corrosion on flexural behaviour of concrete slabs, J Mater Civil Eng.;1996; 8: 123–7

[4] Mohammed TU, Hamada H, Yamaji T. Concrete after 30 years of exposure –Part II: Chloride ingress and corrosion of steel bars., ACI Mater J.; 2004; 101(1): 13–8.

[5] Fallah MM, Shooshtari A, Ronagh HR. Investigating the effect of bond slip on the seismic response of RC structures, Structural Engineering and Mechanics; 2013; 46 (5): 695-711.

[6] Otani S, Sozen M. Behavior of multistory reinforced concrete frames during earthquake, Structural Research; 1972; University of Illinois, Urbana, Illinois; 392.

[7] Filippou FC, Popov EP, Bertero VV. Effect of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints, Earthquake Engineering Research Center; 1983; University of California, Berkeley; Report No. EERC 83/19.

[8] Morita S, Kaku T. Slippage of reinforcement in beam-column joint of reinforced concrete frames, Proceeding of the 8th World Conference on Earthquake Engineering; 1984; San Francisco, 6: 477-484.

[9] Alsiwat JM, Ozcebe G, Saatcioglu M. Hysteretic behavior of anchorage slip in R/C members, Journal of Structural Engineering, ASCE; 1992; 118(9): 2439-2458.

[10] Limkatanyu S, Spacone E. Reinforced concrete frame element with bond interfaces; Part I:Displacement-based,force-based, and mixed formulations, Journal of Structural Engineering, ASCE; 2002; 128: 346-355.

[11] Kwak HG, Kim JK. Implementation of bond-slip effect in analyses of RC frames undercyclic loads using layered section method, Journal of Engineering Structures; 2006; 28: 1715-1727.

[12] Oh BH, Kim SH. Realistic models for local bond stress-slip of reinforced concrete under repeated loading, J. Struct. Eng.; 2007; 133(2): 216-224.

[13] Sezen H, Setzler EJ. Reinforcement slip in reinforced concrete columns, ACI Structural Journal; 2008; 105(3): 280-289.

[14] Dominguez N, Fernandez MA., Ibrahimbegovic A. Enhanced solid element for modeling of reinforced concrete structures with bond-slip, Comput. Concrete; 2010; 7(4): 347-364.

[15] Sezen H, Moehle JP. Seismic test of concrete columns with light transverse reinforcement, American Concrete Institute Structural Journal; 2006; 103 (6): 824-849.

[16] Kivell A, Palermo A, Scott A. Effects of Bond Deterioration due to Corrosion in Reinforced Concrete, ingProccedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Eartquake-Resilient Society; Paper Number:81; 14-16 April 2011; Auckland, New Zealand.

[17] T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi, Deprem bölgelerinde yapilacak binalar hakkinda yönetmelik, 2007.

[18] Berto L, Seatta A, Simioni P, Vitaliani R. Nonlinear static analyses of RC frame structures: influence of corrosion on seismic response, Proceedings of the 8th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM8) and 5th. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008); June-July 2008;Venice, Italy.

[19] Lee HS, Cho YS. Evaluation of the mechanical properties of steel reinforcement embedded in concrete specimen as a function of the degree of reinforcement corrosion, International Journal of Fracture, 2009; 157(1–2): 81–88.

[20] Ou YC, Fan HD, Dang N, Long-term seismic performance of reinforced concrete bridges under steel reinforcement corrosion due to chloride attack, Earthquake Engng Struct. Dyn., 2013.

[21] Bhargava K, Ghosh AK, Yasuhiro M, Ramanujam S. Suggested empirical model for corrosion-induced bond degradationin reinforced concrete, Journal of Structural Engineering; 2008; 134(2); 221–30.

[22] Comite Euro-International du Beton-Federation International de la Precontrainte Design Code (CEB-FIP), Thomas Telford, London; 1990,pp. 82–87.

[23] Hsu TTC. Unified Theory of Reinforced Concrete. CRC-Press Inc., Boca Raton, FL: 1993.

[24] Mander JB, Priestley MJN, Park R, Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Division, ASCE; 1988, 114(8): 1804-26

[25] Calabrese A, Almeida JP, Pinho R, Numerical Issues in Distributed Inelasticity Modeling of RC Frame Elements for Seismic Analysis, Journal of Earthquake Engineering; 2010, 14(sup1): 38–68.

[26] EN 1998-3, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance -Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, 2004.