DEPREM YÜKLERİNE MARUZ BETONARME BİNALARDA DONATI KOROZYONUNUN YAPISAL DAVRANIŞA ETKİLERİ

İ. Yüksel[1]

[1] *Doçent Doktor, İnşaat Müh. Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa*
E-mail: isa.yuksel@btu.edu.tr

ÖZET:

Bu çalışmada tasarım deprem yüküne maruz ve donatı korozyonuna uğramış betonarme binalardaki yapısal davranış değişiklikleri araştırılmaktadır. 2007 Deprem Yönetmeliğine göre tasarlanmış, düzensizlik içermeyen, dört katlı ve iki açıklıklı bir çerçeve sistem boyutlandırılmıştır. İki farklı hızda (yavaş ve hızlı) korozyon içerecek şekilde 6 korozyon senaryosu göz önüne alınmıştır. Bu senaryolarda korozyonun yayılma süreleri 10 yıl olarak sabit kabul edilmiştir. Korozyonsuz durum referans olmak üzere toplam yedi adet senaryo için statik itme analizleri yapılmıştır. Korozyon nedeniyle değişken olarak; donatı çapı kaybı, donatı mekanik özeliklerindeki değişim, aderans kaybı ve kesit düzeyindeki hasar limitlerinin değişimi dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, yayılma sürecinde donatı korozyonunun, çerçevenin tepe yerdeğiştirmesi, taban kesme kuvveti ve sistem sünekliğinde önemli azalmalara neden olduğunu göstermektedir. Donatı korozyonunun hızı ve sistem üzerindeki yaygınlığı çerçeve sistemin yapısal davranışını yönlendiren önemli parametrelerdir. Özellikle senaryo S2 ve senaryo S6'nın yapısal davranışa etkileri göçme modu bakımından birbirine benzemektedir. Güçlü yıpratıcı çevresel etkilere maruz güçlendirilecek mevcut betonarme binalarda korozyon durumunun dikkatli bir şekilde analiz edilerek hesaplarda buna yer verilmesi önerilmektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Betonarme, deprem, korozyon, yapısal davranış.

ABSTRACT:

Structural behavior changes are investigated under design earthquake loads in reinforced concrete buildings that subjected to rebar corrosion. A four-story and two-bay moment resisting frame system that has not structural irregularity is designed according to Turkish Earthquake Code-2007 (TEC-2007). Six corrosion scenario which are in two different corrosion rates (slow and high) are considered for this investigation. Propagation times of these scenarios are assumed as constant with ten years. Static pushover analyses are performed on totally seven corrosion scenarios including un-corroded state of the frame system as reference. Loss in cross sectional area of rebar, loss of mechanical properties of rebar, loss in bond strength and variations in damage limits of concrete sections are assumed as variables due to rebar corrosion. The results showed that the progressive deterioration of the frame over propagation time cause serious reductions on the base shear and top displacement capacity and also structural ductility of the frame. The intensity and extensity of rebar corrosion on the frame are important parameters governing the effect of rebar corrosion on earthquake response of the frame. Especially, the results of scenarios S2 and S6 are similar in terms of failure mode. It is advised that corrosion damages should be analyzed carefully and considered in rehabilitation projects of existing buildings subjected to strong harmful environmental actions.

KEYWORDS: Earthquake, rebar corrosion, reinforced concrete, structural behavior.

1. GİRİŞ

Bu çalışmada deprem yüklerine maruz ve çeşitli şekillerde donatı korozyonuna uğramış betonarme binalardaki davranış değişiklikleri kesit, eleman ve sistem düzeyinde ele alınmaktadır. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik-2007 (DBYBHY-2007) esaslarına göre tasarlanmış, yapısal düzensizlik içermeyen, dört katlı ve iki açıklıklı bir çerçeve sistem boyutlandırılmıştır. Bu çerçeve sistemin; bir kısmında, tamamında ve yalnız zemin katında olacak şekilde ve iki farklı hızda korozyon seçilerek altı adet korozyon senaryosu öngörülmüştür. Bu sistemlerin 10 yıl süre ile seçilen sabit hızlarda korozyona maruz kaldığı kabul edilmiştir. Toplamda yedi senaryo için analizler yapılmıştır. Öncelikle elemanların korozyon hasarlı vaziyette ve korozyonsuz durum için kesit analizleri yapılmıştır. Ardından, çerçeve sistemin her bir senaryo için statik itme analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar eleman ve sistem davranışı yönünden değerlendirilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Betonarme yapıların korozyonu ile ilgili pek çok deneysel ve analitik çalışma yapılmıştır. Korozyon sonucunda oluşan pas tabakası metalin korozyona uğrayan bölümünün hacimce kat kat üstündedir. Bu nedenle oluşan iç basınç beton çekme dayanımını aştığında beton önce çatlar, sonra parçalanıp dökülmeler başlar. Donatı-beton arasındaki bağ kuvveti zayıflar veya kaybolur. Bu durumdaki donatı dışarıdan gelen yıpratıcı etkilere daha fazla maruz kalacağından korozyon hasarı gittikçe artar. Almusallam *et al.* 1996, Rodriquez *et al.* 1997, Mangat *et al.* 1999, Mohammed *et al.* 2004 gibi araştırmacıların taşıyıcı sistem bütününde yaptığı çalışmalar korozyon nedeniyle taşıyıcı sistemin göçme mekanizmasının değişebileceğini göstermiştir.
Revathy et al. (2009) taşıyıcı elemanlar üzerinde korozyon etkisini incelemişler ve kolonların eksenel yük taşıma gücü ve sünekliğinin korozyon hızındaki artışla paralel bir şekilde azaldığını göstermişlerdir. Özellikle oyuklanma korozyonu donatı çubuğu sünekliğini azaltmaktadır. Allam et al. (1994) yaptıkları çalışmada paslanmanın donatı çubuğunun akma ve kopma dayanımı üzerinde önemsiz etkileri olduğunu belirtmişlerdir. Ancak Almusallam (2001) korozyona uğramış döşemelerde yaptığı çalışmalarda döşemenin göçme şekli ile donatının korozyon düzeyi arasında ilişki olduğunu öne sürmüştür. Kütlece %13 düzeyinde kayba uğramış donatı ihtiva eden döşemelerin ani göçmeye uğradığını göstermiştir. Palsson and Mirza (2002) ise korozyona uğramış köprülerden aldıkları donatı çubuğu örnekleri üzerinde yaptıkları çekme deneylerinde çubukların gevrek kırıldıklarını tespit etmişlerdir. Apostolopoulos and Papadakis (2008) ise korozyon nedeniyle yaşlı bir yapıda birikmiş hasarın mevcut olduğunu ve donatı mekanik özelliklerinin de kötüleştiği sonucuna varmışlardır. Ying *et al.* (2012) ileri düzeyde korozyon altında yüksek düzeyde eksenel yükün histeretik döngü stabilitesinin bozduğunu, dayanım ve rijitlikte ortaya çıkan kayıplarla beraber eleman sünekliğinin azaldığını göstermiştir.

Betonarmede elemanlarda donatı-beton arasındaki bağ kaybolursa davranış gergili kemer davranışına dönüşmeye zorlanır. Betonarme bir elemanda sıyrılmaya karşı direnç o kadar yüksek olmalı ki, donatı akma gerilmesine ulaşarak göçmeye zorlanmalıdır. Bunu sağlayacak bağ dayanımı ise beton çekme dayanımının bir fonksiyonudur. Bağ dayanımı birçok faktörden etkilenmekle birlikte, kayma dayanımı ile etkileşimi davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Bağ dayanımı ve korozyon düzeyi arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için birçok araştırma yapılmıştır. Bunların sonucunda, bağ dayanımı ile korozyon düzeyi ilişkisini gösteren bağıntılar önerilmiştir. Örneğin Chung *et al.* (2008) çekip-çıkarma (pull-out) deney sonuçlarından yararlanarak donatı kütle kaybı ile bağ dayanımını ilişkilendirmiştir. Buna göre; bağ dayanımı başlangıçta(düşük korozyon düzeyleri için) bir miktar artış göstermekte fakat daha sonar artan korozyon düzeyine bağlı olarak düşüşe geçmektedir. Auyeung *et al.* (2000) deneysel çalışmalar sonucunda %2 lik bir çap kaybının elemanın eğilme kapasitesinde düşüşe yol açtığı sonucuna varmıştır. Ghandehari *et al.* (2000) yüksek oranda sargılama olması halinde korozyonun bağ dayanımı üzerindeki etkisinin ihmal edilebileceğini göstermiştir. Korozyonun betonarme kolon ve kirişlerin eğilme kapasitesine etkisini araştıran az sayıda çalışma vardır. Ayrıca bu çalışmaların da her birinin kendine göre sınırlayıcı tarafları vardır. Wu (2012) tarafından önerilen bir analitik model ile korozyona uğramış

betonarme elemanların artık eğilme kapasiteleri hesaplanabilmektedir. Buna göre, donatı ile beton arasındaki aderans eğilme kapasitesinin bozulmasına neden olan ana etkendir.

Çevresel etkiler ve mekanik zorlamalar nedeni ile yapılarda meydana gelen bozulmaları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modelleme çalışmaları yapılmış ve günümüze kadar birçok model (Coronelli and Gambarova 2004, Wang and Liu 2004, Seatta, 2005) geliştirilmiştir. Bu modellerde doğrusal olmayan davranış belirli kesitlerde yayılı plastisite yaklaşımı ile göz önüne alınmaktadır. Yayılı plastisite modellerinde malzemenin bozulması plastik mafsallarda ana denklemlerin modifikasyonu ile yapılmaktadır. Bu modifikasyonu yapmak için iki yöntem kullanılmaktadır. Birinci yöntem farklı korozyon seviyeleri için mekanik ve kimyasal hasarların doğrusal olmayan davranış üzerindeki etkilerinin doğrudan sonlu elemanlar çözümlerine yansıtılmasına dayanır. İkinci yöntem birinciye göre daha makro düzeyde bir hesaplamaya dayanır. Bunda her bir plastik mafsal için korozyon seviyesine göre deneysel ve analitik çalışmalar sonucu özel olarak geliştirilen moment-eğrilik ilişkileri kullanılır. Her iki yöntem için de henüz genel kabul görmüş bir hesaplama şekli mevcut değildir. Özellikle korozyon nedeniyle donatı-beton bağ dayanımı değişiminin global sistem çözümlerine yansıtılmasında bir genelleştirilmiş yöntem bulunmamaktadır. Donatı boyunca ortaya çıkan beton çatlakları korozyon hasarının gözle görülen sonucudur. Rodriquez et al. (1994) 0.015 ila 0.040 mm çap kaybı olması halinde betonda ilk çatlakların oluştuğu sonucuna varmıştır. Bu değerler çapı küçük donatı çubukları için enkesit alanında %2'den az bir kayba karşılık gelmektedir. Lundgren (2007) korozyon nedeniyle kabuk betonun çatlaması halinde bağ dayanımındaki kaybın maksimum düzeyde olduğunu belirtmiştir. Almusallam (1996) korozyonun yüksek sevilere (>12%) ulaşması halinde korozyon ürünlerinin yağlama etkisi yaparak bağ dayanımını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Korozyon türünün bağ dayanımı üzerindeki etkisi de önemlidir. Genel korozyon olması halinde bağ dayanımı oyuklanma korozyonuna göre daha fazla olumsuz etkilenmektedir (Kivell et al. 2011a; Kivell et al. 2011b). Çevrimsel yükleme altında bağ-sıyrılma davranışı üzerine az sayıda çalışma vardır. Fang (2006) bir çalışmasında %5 oranındaki bir korozyon durumunda çevrimsel yükleme altında bağ dayanımı kaybının maksimum olduğunu belirtmiştir. Oysa Fang et al. (2006) monotonik yükleme altında bu düzeyde bir korozyonun maksimum bağ dayanımı verdiği sonucuna ulaşmışlardır. Saito et al. (2007) elektrokimyasal korozyonun sargı donatılarının kuşatma etkisini azaltması nedeniyle kolon boyuna donatılarında erken burkulmaya neden olduğunu göstermiştir. O' Flaherty et al. (2010) nervürlü donatılı basit kirişler deneylerinde korozyon düzeyi arttıkça rijitliğin azaldığını ve %20 korozyon düzeyinde göçme mekanizmasının eğilmeden kaymaya döndüğünü gözlemiştir. Ou et al. (2010) korozyona uğramış kirişlerin çevrimsel yük altındaki davranışını incelemişler ve çapının küçük olmasından dolayı enine donatıların daha çok bozulmaya uğradığını görmüşlerdir. Bu durum da göçme mekanizmasının eğilmeden kaymaya dönmesine neden olmuştur. Ayrıca, göçme mekanizmasının tamamen kaymaya dönüşünden önce boyuna donatıların da burkulmaya müsait hale geldiğini görmüşlerdir.

3. UYGULAMA

Deprem yüklerine maruz ve çeşitli şekillerde üniform donatı korozyonuna uğramış betonarme binalardaki davranış değişikliklerini incelemek üzere 2 açıklıklı ve 4 katlı bir düzlem çerçeve sistem seçilmiştir (Şekil 1). Çerçeve sistemin ölü yükleri, boyutları ve eleman numaraları şekil üzerinde gösterilmiştir. Kat yükseklikleri her katta aynı olup 3 m seçilmiştir. Malzeme C25/30 sınıfı beton ve S420 sınıfı çelik olarak seçilmiştir. Öncelikle çerçeve güncel yönetmeliklere göre boyutlandırılmıştır. Korozyonun yapı üzerindeki yaygınlığı, etkime hızı gibi parametrelere göre Tablo 1'de gösterilen senaryolar öngörülmüştür. Tüm senaryolarda korozyonun yayılma süresi 10 yıl olarak kabul edilmiş ve 10 yıl süresince hızın sabit kalacağı varsayılmıştır.

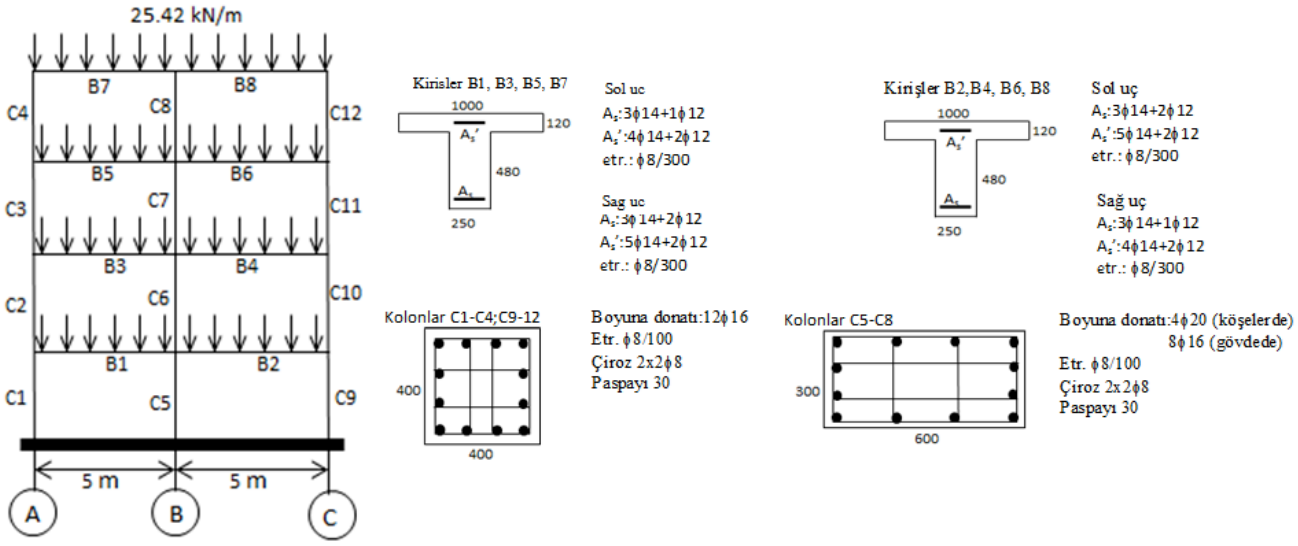
Korozyon nedeniyle yapıda donatı çap kaybı, donatı çeliği mekanik özelliklerinde bozulma, donatıyı saran betonun çatlama ve korozyon ürünleri nedeniyle oluşan aderans kaybını temsilen histeretik döngüdeki değişimler dikkate alınmıştır. Kesit düzeyinde yapılan analizlerle moment-eğrilik, normal kuvvet-moment değişimleri

dikkate alınmıştır. Her bir senaryo için elde edilen değerler kullanılarak sistemin statik itme analizi yapılmıştır. G+0.3Q yüklerinin tamamı analizin birinci adımında sisteme düğüm noktalarında tekil yük şeklinde uygulanmış ve diğer adımlarda sabit olarak yer almıştır. Önceden hesaplanan eşdeğer deprem yükleri adım adım artırılmak suretiyle IDARC-2D V.7 programı kullanılarak statik itme analizi yapılmıştır. Kolon ve kirişlerin her iki ucu için multi-lineer histeretik modelleme parametreleri kullanılmıştır. Bunlar rijitlik kaybı parametresi (a), süneklik esaslı dayanım kaybı parametresi (b_1), histeretik enerji esaslı dayanım kaybı parametresi (b_2), sıyrılma parametresi (g) olup bunlar için her bir korozyon senaryosu ve referans sistem için uygun değerler seçilmiştir (Tablo 2). Kolon ve kirişlerin öncelikle XTRACT(2001) programı vasıtasıyla kesit analizleri yapılmış, buradan elde edilen sonuçlar kullanılarak her bir senaryo için IDARC programına veri olarak her bir kolon ve kirişin moment-eğrilik diyagramı ve P-M etkileşim diyagramı tanıtılmıştır. Donatı çap kaybı için Bağıntı (1) kullanılmıştır.

Donatı mekanik özelliklerindeki değişim için deneysel çalışma sonuçlarına göre çıkarılan Lee et al. (2009) bağıntıları kullanılmıştır. Bu bağıntıların genel formatı Bağıntı 2'de gösterilmiştir. Bağıntı (1)'de f(t) (mm) t zamanındaki çapı; f_0 (mm) nominal çapı, t_{in} (yıl) korozyon yayılma başlangıç zamanını; i_{corr} ($\mu A/cm^2$) korozyon hızını; k donatı çeliği için "mA/cm^2" biriminden "mm/yıl" birimine çevirme katsayısını göstermektedir. Bağıntı 2'de A korozyon sonrası çeliğin karakteristik özelliğini (akma dayanımı veya elastik modülü veya uzama oranı); Δ_w kütle kaybı cinsinden korozyon yüzdesini; B deneysel olarak elde edilmiş bir katsayıyı; C çeliğin nominal karakteristik özelliğini (akma dayanımı veya elastik modülü veya uzama oranı) göstermektedir.

Tablo 1. Öngörülen korozyon senaryoları

Senaryo	Korozyonun yeri	Korozyon hızı, i_{corr} ($\mu A/cm^2$)
S0	Korozyon yok	-
S1	Tüm yapıda tüm elemanlarda	1
S2	Tüm yapıda tüm elemanlarda	4
S3	Yalnız 1 cephede (A aksında)	1
S4	Yalnız 1 cephede (A aksında)	4
S5	Yalnız zemin kat kolon alt uçlarında	1
S6	Yalnız zemin kat kolon alt uçlarında	4



Şekil 1. Seçilen çerçeve sistem ve eleman detayları

$$\emptyset(t) = \emptyset_0 - 2i_{corr}\kappa(t - t_{in}) \quad (1)$$

$$A = \left(1 - B\left(\frac{\Delta_w}{100}\right)\right)C \quad (2)$$

Tablo 2. IDARC programında kolon ve kirişler için histeretik modelleme parametreleri

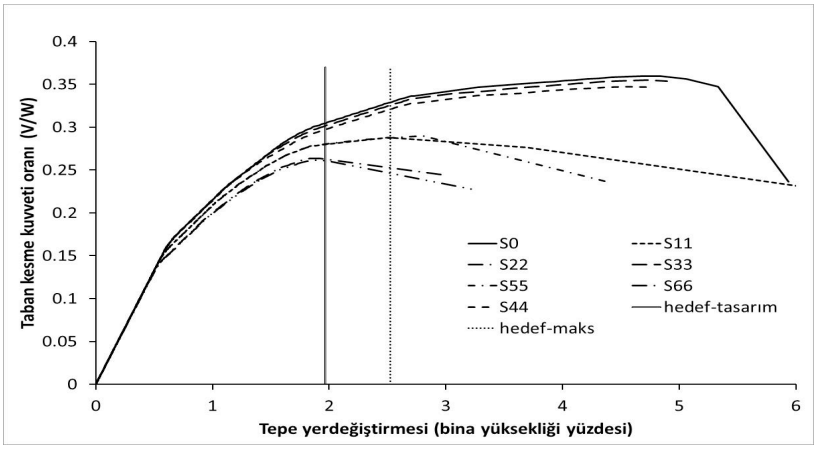
Parametre	S0 için seçilen değer	i_{corr}=1 için seçilen değer	i_{corr}=4 için seçilen değer	Tipik değer ve karşılığı
Rijitlik kaybı (α)	15 (Az)	10 (Orta)	8 (Orta-çok)	4-Çok; 10-Orta 15-Az; 200-Yok
Süneklik esaslı dayanım kaybı (β_1)	0.15 (Az)	0.30 (Orta)	0.45 (Orta-çok)	0.60-Çok; 0.30-Orta 0.15-Az; 0.01-yok
Histeretik enerji esaslı dayanım kaybı (β_2)	0.08 (Az)	0.30 (Orta)	0.45 (Orta-çok)	0.60-Çok; 0.30-Orta 0.08-Az; 0.01-Yok
Sıyrılma (γ)	0.40 (Az)	0.25 (Orta)	0.15 (Orta-çok)	0.05-Çok; 0.25-Orta 0.40-Az; 1.00-yok

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. Hedef Yerdeğiştirme ve Kapasite Eğrileri

İtme analizi sonucu elde edilen kapasite eğrisi önce modal kapasite eğrisine dönüştürülmüştür. Z3 sınıfı zemin ve birinci derece deprem bölgesi tasarım depremi esas alınarak DBYBHY-2007'nin 7. Bölümünde gösterilen esaslarla referans sistemin hedef yerdeğiştirmesi tasarım depremi için 236 mm (yapı yüksekliğinin %1.967'si) ve maksimum deprem için 303 mm (yapı yüksekliğinin %2.525'i) olarak hesaplanmıştır. Hedef yerdeğiştirme durumuna ait iç kuvvetler ve deformasyonlar statik itme analizi hedef yerdeğiştirme değeri son adım olacak şekilde tekrarlanarak elde edilmiştir. Senaryolar için hedef yerdeğiştirme değerleri referans sistemle aynıdır. Tasarım ve maksimum depremler için; sistem maksimum taban kesme kuvvetine eriştiğinde hedef tepe yerdeğiştirmesinin aşılıp aşılmadığı kontrol edilmiştir. Buna göre; tasarım depremi için sadece S1 ve S2 senaryolarında hedef yerdeğiştirme değerine ulaşılmadan önce sistem maksimum taban kesme kuvvetine erişmiş görünmektedir. Maksimum deprem durumunda ise S1, S2 ve S6 senaryoları için sistemde hedef yerdeğiştirme değerine ulaşılmadan önce maksimum taban kesme kuvvetine erişilmektedir. Bu da gösteriyor ki, mevcut senaryolar içinde taşıyıcı sistem için en olumsuz sonuçları sistemin tümüne yayılı korozyon durumu vermektedir. Esasen bu durum beklenen bir sonuçtur. Ancak, sadece zemin kat kolonlarında korozyon olması hali de bu olumsuz senaryoya çok yakın sonuçlar vermektedir. Zemin kat kolonlarındaki korozyonun bu katta sistemi yumuşatarak hasarın çoğunluğunun bu katta toplanmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla bu durum önemli bir davranış değişikliği yaratmaktadır. Tüm senaryolara ait kapasite eğrileri Şekil 2'de gösterilmiştir. Korozyon nedeniyle değişik düzeylerde kapasite kaybı olduğundan doğal olarak en yüksek taban kesme kuvveti kapasitesi S0'a aittir. Şekil 2'de üç grup eğri oluşumu göze çarpmaktadır. Birinci grup A aksında korozyona karşı gelen S2 ve S3 senaryolarından oluşmaktadır. Taban kesme kuvveti ve tepe yer değiştirmesinde önemsiz sayılabilecek düşüşler görülmektedir. İkinci grup, sistemin tamamında veya sadece zemin katta düşük hızda seyreden korozyona karşı gelen S11 ve S55 senaryolarından oluşmaktadır. Ancak taban kesme kuvveti kapasitesinde %10-15 düzeyinde azalma, en büyük taban kesme kuvvetine karşı gelen tepe yerdeğiştirmesinde ise %40 gibi büyük değerlere ulaşan azalmalar görülmektedir. Şekil 2'de tasarım depremi ve maksimum deprem etkileri için hesaplanan hedef yer değiştirmeler de görülmektedir. Buna göre, S22 ve S66 tasarım depremi hedef yer değiştirmesine ulaşamadan maksimum taban kesme kuvvetine erişmektedir. S22'de ve S66'da sistem gerek taban kesme kuvveti kapasitesinde (%33) ve gerekse tepe yerdeğiştirmesinde (%60) çok önemli kayıplar

göstererek erken göçmeye gitmektedir. S11 ve S55 senaryolarında da benzer sonuçlar görülmekle birlikte, hızın düşük olması toplam hasarın daha az olmasına neden olmaktadır. Düşük hızda seyreden korozyonun yayılma süresi uzadıkça hasar oranının da büyük olması beklenmektedir.



Şekil 2. Referans ve korozyon senaryolarına ait kapasite eğrileri ile tasarım ve maksimum deprem etkileri için hesaplanan hedef yer değiştirmeler

4.2. Plastik Mafsal Kesitlerinde Moment–Eğrilik Değişimleri

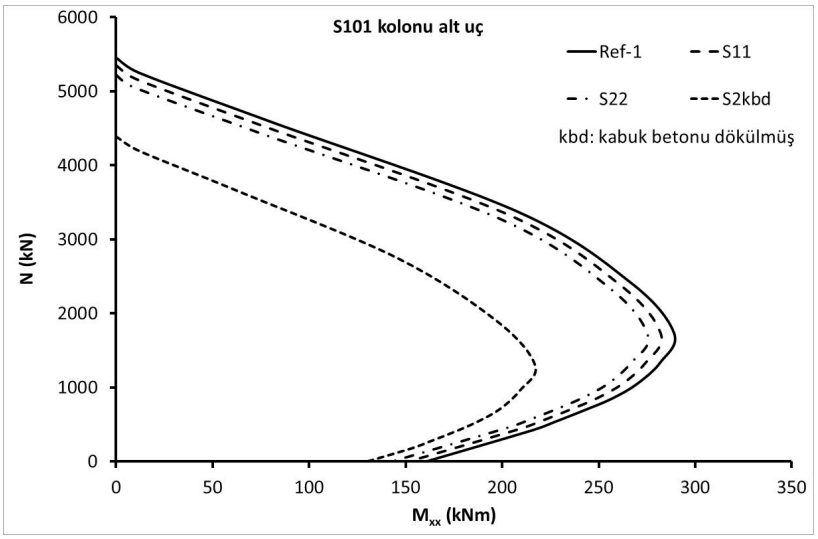
Tasarım depremi için alt katta S101 ve S102 kolonları alt ucunda plastik mafsal kesitlerindeki eğrilik değişimleri incelenmiştir. Hedef tepe yerdeğiştirmesine ulaşıldığı andaki eğrilik değerinin sistemin göçme anındaki eğrilik değerine oranı Tablo 3'te gösterilmiştir. Buna göre, sistem hedef tepe yerdeğiştirmesine ulaştığı anda S11, S22 ve S66 senaryolarında söz konusu plastik mafsal kesitlerinde eğrilik kapasitesinin tamamı kullanılmıştır. Oysa referans senaryoda aynı an için eğriliğin henüz 40'ı kullanılmıştır. Korozyonun yalnız bir cepheyi etkilemesi durumunda bu oran %50 civarındadır. Ayrıca Tablo 3'ten görülüyor ki, korozyon etkisiyle aynı kesitte göçme durumu için eğrilik kapasiteleri korozyon senaryosuna göre değişmektedir. Yaygın ve hızlı korozyon veya yalnız zemin katta hızlı korozyon durumları için göçme halindeki eğrilik yarıya düşmektedir.

Tablo 3. Hedef tepe yerdeğiştirmesi eğrilik değerinin göçme eğriliklerine oranları

	S101 kolonu alt ucu			S102 kolonu alt ucu		
Senaryo	Hedef. dep. eğ. (1/m) (A)	Göçme eğ. (1/m) (B)	A/B (%)	Hedef. dep. eğ. (1/m) (C)	Göçme eğ. (1/m) (D)	C/D (%)
S0	0.02481	0.0616696	40	0.022616	0.0574609	39
S11	0.029655	0.0296550	100	0.035503	0.0355031	100
S22	0.030571	0.0305707	100	0.036695	0.0366953	100
S33	0.024455	0.0477329	51	0.022594	0.0434079	52
S44	0.024272	0.0539620	45	0.022516	0.0497016	45
S55	0.029383	0.0465772	63	0.035088	0.0521574	67
S66	0.029724	0.0297240	100	0.035551	0.035551	100

4.3. Moment-Normal Kuvvet (M-N) Etkileşimleri

S101 kolonunda farklı korozyon senaryoları için M-N etkileşim diyagramı Şekil 3'te gösterilmiştir.

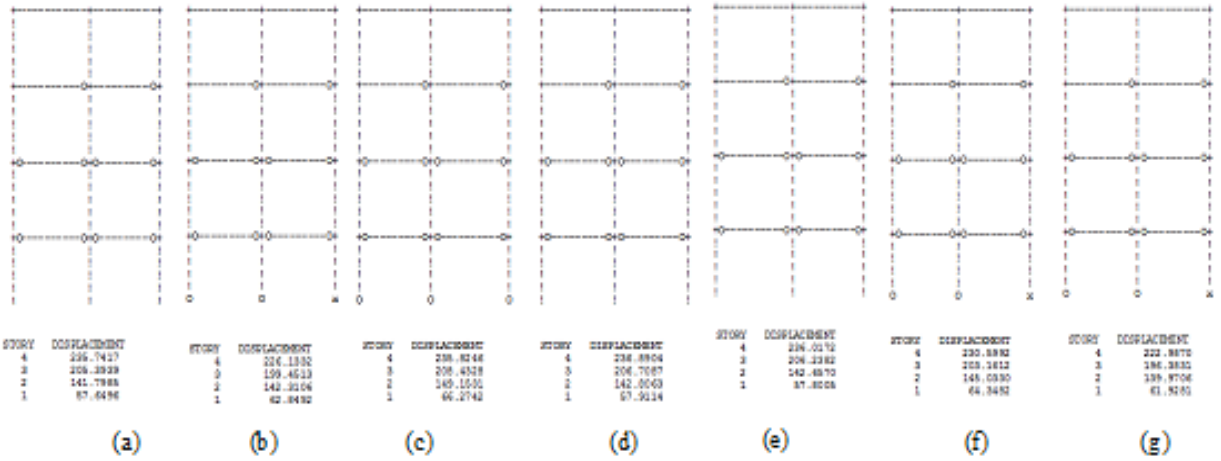


Şekil 3. S101 kolonunda M-N etkileşim diyagramı

Korozyon nedeniyle donatıda enkesit kaybı, mekanik özelliklerde bozulma nedeniyle kesit M-N diyagramında az sayılabilecek kayıplar söz konusudur. Ancak korozyon yayılma hızının yüksek olduğu ve etkime süresinin 10 yıl olduğu S2 senaryosu için kabuk betonun dökülmesi halinde M-N diyagramında kayda değer değişim olmaktadır. Korozyonun şiddetli ve uzun süreli olması halinde korozyon ürünlerinin neden olacağı çekme gerilmeleri betonu çatlatıp dökülmesine neden olur. Dolayısıyla gerçek durum aslında kabuk betonun tamamen döküldüğü durum ile kabuk betonun hiç zarar görmediği durum arasında olacaktır. Bu nedenle Şekil 3'te görülen "S22" ve "S2kbd" eğrileri sınır durumları göstermektedir. Korozyonun üniform korozyon türünde olması halinde donatı enkesit kaybı nedeniyle M-N etkileşiminde oluşan değişim önemli değildir. Buna karşın, üniform korozyonun elemanın tamamında neden olacağı çatlaklar ve buna bağlı kabuk beton dökülmeleri daha önemli olacaktır. Örneğin S101 kolonunda "S22" senaryosuna göre "S2kbd" senaryosunda normal kuvvet taşıma gücünde %24, eğilme momenti taşıma gücünde %21 azalma olmuştur. "S22" ile referans durum karşılaştırıldığında ise eğilme momenti taşıma gücünde %5, normal kuvvet taşıma gücünde %1 azalma olmuştur.

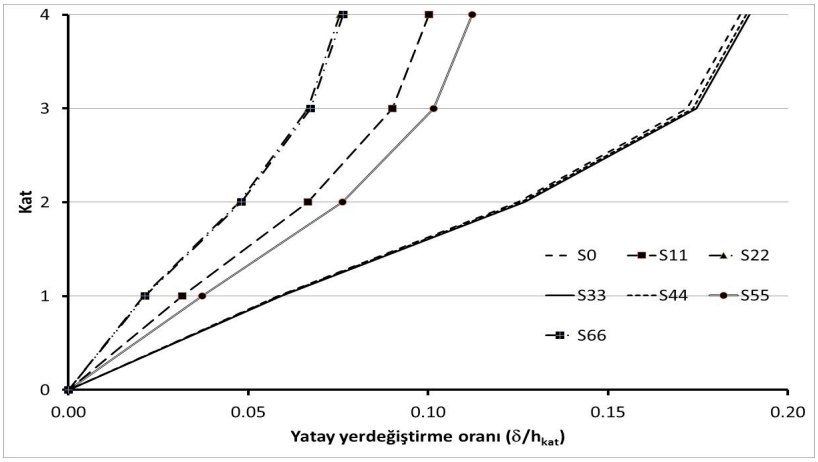
4.4. Hasar Durumu ve Göçme Mekanizması

Şekil 4'te hedef yerdeğiştirme anında sistemdeki plastik mafsal dağılımı topluca gösterilmiştir. Plastik mafsalların sistem üzerindeki dağılımları iki grup oluşturmaktadır. Birinci grup içinde referans (S0), korozyonun yalnız bir düşey aks üzerinde olduğu S3 ve S4 senaryoları yer almaktadır. Bu grupta plastik mafsallar katlarda kiriş uçlarında yer almaktadır. Tasarım depremi için hedef yerdeğiştirmeye ulaşıldığında henüz hiçbir kolonda plastik mafsal oluşmamıştır. Enerji tüketimi ve hasar ağırlıkla kiriş mafsallarında ortaya çıkmıştır. İkinci grupta yaygın korozyon senaryoları (S1 ve S2) ile yalnız zemin katta korozyon olmasına ait senaryolar (S5 ve S6) yer almaktadır. Burada birinci gruptan farklı olarak zemin kat kolon alt uçlarında plastik mafsallaşma görülmektedir. Hedef yerdeğiştirme anında birinci gruba kıyasla sistem mekanizma durumuna daha yakın görünmektedir. Şekil 4(b), 4(f) ve 4(g)'de aslında sistem hedef yerdeğiştirmeye ulaşamamış olduğundan görülen plastik mafsal dağılımı göçmeden bir önceki adıma ait olup şekilde görülen tepe yerdeğiştirmeleri de 236 mm'den küçüktür.



Şekil 4. Hedef yerdeğiştirme anında sistemde plastik mafsalların dağılımı, (a) S0, (b)S11 (c)S22, (d)S33, (e)S44, (f)S55, (g)S66

Kat yatay ötelenmesinin kat yüksekliğine bölünmesiyle kat yatay yerdeğiştirme oranları elde edilmiş ve senaryolara göre Şekil 5'te gösterilmiştir.



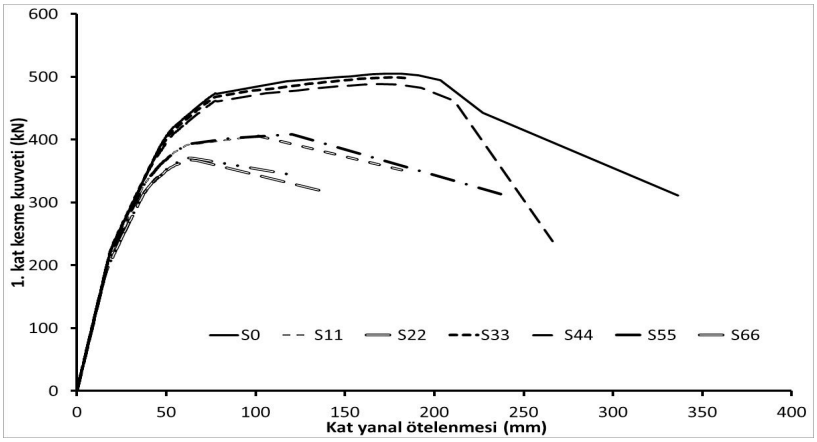
Şekil 5. Katların yatay yerdeğiştirme oranları

Burada da üç değişik davranış kalıbı görülmektedir. Birinci grupta S0, S33 ve S44 yer almaktadır. İkinci grupta S11 ve S55; üçüncü grupta ise S22 ve S66 yer almaktadır. Hedef tepe yerdeğiştirme değeri olan 236 mm sınır alınırsa üçüncü grubun bu sınıra ulaşamadan mekanizma durumuna geldiği görülmektedir. Oysa S0 hedef tepe yerdeğiştirmesinde mekanizma durumundan çok uzaktadır. İkinci grup ise hedef tepe yerdeğiştirmesine ulaşabilmekte fakat mekanizma durumuna da çok yaklaşmış pozisyondadır. Göreli kat ötelenmeleri yönünden bakıldığında S22 ve S66 senaryolarında mekanizma durumuna gelmeden önce göreli kat ötelenmesinin düşük olması daha az hasar olacağı şeklinde yorumlanabilir. Ancak göçme olayı az hasar ve daha erken gerçekleştiği için bu istenen bir davranış biçimi değildir. Öte yandan referans sistem veya düşük hızda korozyonun olduğu senaryolarda yatay yerdeğiştirme oranı büyüktür. Sistem göçmeden önce daha çok hasar görmekte, daha çok yatay yerdeğiştirme yapabilmekte ve ancak bundan sonra mekanizma durumuna geçmektedir.

Böylece korozyonun sistemin genel davranışını sünekten gevreğe doğru değiştirdiği söylenebilir. Korozyonun sistem üzerindeki yaygınlığı, yeri, hızı gibi değişkenler bu geçişin mertebesini kontrol etmektedir.

4.5. Kat Kesme Kuvveti Değişimleri

Şekil 6'da farklı senaryolar için birinci kat için kesme kuvveti-yatay yerdeğiştirme değişimi gösterilmiştir. Korozyon senaryolarına göre kat kesme kuvveti ve yanal ötelenme değerleri değişmektedir. Korozyonun tüm yapıya yaygın ve hızlı seyrettiği en kötü senaryo S22 için referansa göre kat kesme kuvvetindeki azalma %27; kat yanal ötelenmesindeki azalma ise %67 olmuştur. Senaryo S66 için de buna çok yakın değerler söz konudur.



Şekil 6**.** Birinci kat kesme kuvveti-kat yerdeğiştirmesi değişimi

KAYNAKLAR

Allam, I.M., Maslehuddin, M., Saricimen, H., Al-Mana, A.I., (1994), Influence of Atmospheric Corrosion On The Mechanical Properties Of Reinforcing Steel, *Construction and Building Materials*, **8:1**, 35-41.

Almusallam, A.A., (2001), Effect Of Degree Of Corrosion On The Properties Of Reinforcing Steel Bars, *Construction and Building Materials,* **15:8**, 361-368.

Almusallam, A.A., Al-Gahtani, A.S., Aziz, A.R., Dakhil, F.H., Rasheeduzzafar., (1996), Effect Of Reinforcement Corrosion On Flexural Behaviour Of Concrete Slabs, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **8:3**, 123–127.

Apostolopoulos, C.A., Papadakis, V.G., (2008), Consequences Of Steel Corrosion On The Ductility Properties of Reinforcement Bar, *Construction and Building Materials*, **22:12**, 2316–2324.

Auyeung, Y.B., Balaguru, P., Chung, L., (2000), Bond Behavior Of Corroded Reinforcement Bars, *ACI Mater Journal*, **97:2**, 214–220.

Chung, L., Kim, J.J., Seong, Y., (2008), Bond Strength Prediction For Reinforced Concrete Members With Highly Corroded Reinforcing Bars, *Cement & Concrete Composites*, **30:7**, 603–611.

Coronelli, D., Gambarova, P., (2004), Structural Assessment Of Corroded Reinforced Concrete Beams: Modeling Guidelines, *Journal of Structural Engineering*, **130:8**, 1214–1224.

CSI. (2000), "SAP2000 V-14 Integrated software for structural analysis&design", Berkeley, CA.

Ghandehari, M., Zulli, M., and Shah, S.P. (2000). Influence of Corrosion on Bond Degradation in Reinforced Concrete, Proceedings of the ASCE Engineering Mechanics Conference, Austin, TX.

Imbsen Software System, (2001), XTRACT-Cross Sectional analysis of components, Sacramento.

Mangat, P., Elgarf, M., (1999), Flexural Strength Of Concrete Beams With Corroding Reinforcement, *ACI Structural Journal*, **97:1**, 149–159.

Mohammed, T.U., Hamada, H., Yamaji, T., (2004), Concrete After 30 Years Of Exposure –Part II: Chloride Ingress And Corrosion Of Steel Bars, *ACI Structural Journal*, **101:1**, 13–18.

Palsson, R., Mirza, M.S., (2002), Mechanical Response Of Corroded Steel Reinforcement Of Abandoned Concrete Bridge, *ACI Structural Journal*, **99:2**, 157–162.

Revathy, J., Suguna, K., Raghunath, P.N., (2009), Effect Of Corrosion Damage On The Ductility Performance Of Concrete Columns, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, **2:2**, 324-327.

Rodriguez, J., Ortega, L.M., Casal, J., (1997), Load Carrying Capacity Of Concrete Structures With Corroded Reinforcement, *Construction and Building Materials*, **11:4**, 239–248.

Saetta, A., (2005), Deterioration of Reinforced Concrete Structures Due To Chemical–Physical Phenomena: Model-Based Simulation, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **17:3**, 313–319.
Wang, X., Liu, X., (2004), Modeling Bond Strength Of Corroded Reinforcement Without Stirrups, Cement and Concrete Resources, **34:8**, 1331–1339.

Wu, H., (2012), Bond Degradation and Residual Flexural Capacity of Corroded RC Beams, Master thesis, Ryerson University, Toronto, Canada.

Ying, M., Yi, C., Jinxin, G., (2012), Behavior Of Corrosion Damaged Circular Reinforced Concrete Columns Under Cyclic Loading, *Construction and Building Materials*, **29:1**, 548–556.

Lee, H.S., Cho, Y.S., (2009), 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*, **157:.1-2**, 81-88.

Lundgren, K. (2007), Effect of corrosion on the bond between steel and concrete:an overview, Bond between ribbed bars and concrete. Part 1: Modified model, Magazine of Concrete Research, **59:6**, 447–461.

Fang, C. (2006). Bond strength of corroded reinforcement under cyclic loading. *Magazine of Concrete Research,* **58:7**, 437-446.

Fang, C., K. Gylltoft, et al. (2006). Effect of corrosion on bond in reinforced concrete under cyclic loading. *Cement and Concrete Research* **36:3**, 548-555.

Saito, Y., E. M. Oyado, et al. (2007). Structural Performance of Corroded RC Column under Seismic Load. Protect 2007. Whistler, Canada.

O'Flaherty, F. J., P. S. Mangat, et al. (2010). Influence of steel reinforcement corrosion on the stiffness of simply supported concrete beams. IABMAS10: Proceedings of the fifth international IABMAS conference, Philadelphia, USA.

Ou, Y.-C., L.-L. Tsai, and Chen, H. H., (2012), Cyclic performance of large-scale corroded reinforced concrete beams, *Earthquake Engng Struct. Dyn.* **41:4**, 593–604.

Kivell, A., A. Palermo, et al. (2011a). Effects of Bond Deterioration Due to Corrosion in Reinforced Concrete. Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand.

Kivell, A., A. Palermo, et al. (2011b). Monotonic and Cyclic Bond Testing of Heavily Corroded Reinforcing High Strength Concrete. 9th International Symposium on High Performance Concrete Rotorua, New Zealand.