

Narinlik Oranının Yanal Ötelenmeli Betonarme Çerçevelerin Göçme Davranışına Etkisinin Doğrusal Olmayan ve Enerji Esaslı Yöntemlerle Araştırılması

Taner UÇAR¹, Onur MERTER²

¹Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İzmir, Türkiye
taner.ucar@deu.edu.tr

²Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye
onur.merter@deu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Narinlik oranı,
artımsal itme analizi,
itme eğrisi, plastik
mafsal, histeretik
enerji

Özet

Zemin katları genellikle ticari amaçlı kullanılan konut türü binalarda zemin kat yüksekliğinin diğer kat yüksekliklerine göre fazla yapılması yaygın bir uygulamadır. Bunun sonucunda zemin kat kolonlarının narinlik oranı artmakta ve bu durum deprem etkileri altında kritik kat olarak kabul edilen zemin katın davranışının tekrar incelenmesini gerektirmektedir. Kimi durumlarda narinlik etkisi yumuşak kat oluşumu ile birlikte görülmektedir. Artan narinlik oranına bağlı olarak yanal ötelenmeli çerçevelerde ikinci merteye momentleri büyük değerler olarak kolon uç momentlerini arttırmakta ve plastikleşme potansiyeli yüksek bu kesitleri daha kritik hale getirmektedir. Çalışmada bu tip binaların deprem yükleri altındaki göçme davranışı artımsal itme analizi ve enerji esaslı yöntemlerle araştırılmıştır. Dikkate alınan çerçeveler için gerçekleştirilen artımsal itme analizlerinin sonuçları değerlendirilmiş ve elde edilen göçme mekanizmalarında oluşan plastik mafsallardaki dönme değerleri kullanılarak bu kesitlerde tüketilen histeretik enerji değerleri hesaplanmıştır. Yapı tarafından tüketilen toplam enerji ise göçme durumunda sistemin plastik mafsallarında tüketilen histeretik enerji değerlerinin toplamı olarak belirlenmiştir.

An Investigation of Effect of Slenderness Ratio on Failure Behaviour of Sidesway Existing Reinforced Concrete Frames by Nonlinear and Energy Based Methods

Keywords

Slenderness ratio,
pushover analysis,
pushover curve,
plastic hinge,
hysteretic energy

Abstract

It is a common practice to construct the ground storey higher than other stories in residential buildings, of which ground storeys are generally used for commercial purposes. Hence, the slenderness ratio of ground floor columns increases and it requires a reconsideration of the behaviour of ground floor that is assumed to be the most critical storey under earthquake effects. In some cases, the slenderness effect occurs together with soft storey. Depending on increasing slenderness ratio, second order moments increase column end moments in sidesway existing frames. Thus, these sections, which are potential plastic zones, become more critical. In this study, failure behaviour of such buildings under earthquake loads is investigated by pushover analysis and energy based methods. The results of pushover analyses performed for the considered frames are evaluated. The

hysteretic energy values dissipated in these sections are calculated by using the rotation values of the plastic hinges which occurred in the obtained failure mechanisms. The total energy dissipated by the structure is determined as the sum total of hysteretic energy values dissipated in the plastic hinges of the system at failure state.

1. Giriş

Ülkemizde kullanım amacı konut olarak belirtilen binaların zemin katlarının ticari amaçla kullanılması yaygın bir uygulamadır. Bu durumda binanın zemin kat yüksekliği diğer kat yüksekliklerine göre daha fazla yapılmaktadır. Bu uygulama sonucunda zemin kat kolonlarında narinlik etkisi ortaya çıkmakta veya var olan narinlik etkisi daha da artmaktadır. Narinlik etkisi, bir kolonda yerdeğiştirme nedeniyle ortaya çıkan ikinci mertebeli momentinin kolon tasarımında ve çözümlenmesinde göz önüne alınmasını gerektirecek düzeyde oluşmasına yol açan davranışa verilen addır [1]. Söz konusu uygulama, kimi durumlarda da deprem hesap yönteminin seçiminde etken olan ve Deprem Yönetmeliği-2007'de [2] düşey doğrultuda düzensizlik durumlarından birisi olarak açıklanan yumuşak kat oluşumuna neden olmaktadır. Her iki durum da deprem etkileri altında kritik kat olarak kabul edilen zemin katın durumunun yeniden sorgulanması ve buna bağlı olarak tüm binanın davranışının incelenmesi ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır.

Betonarme kolonlara kirişlerden farklı olarak eğilme momenti ile birlikte önemli miktarda aksel yük etkimektedir. Basit eğilme durumuna karşılık gelen boyutsuz dışmerkezliğin sonsuz olması durumunda ($e/h=\infty$) narinlik etkisi söz konusu değilken, aksel yüke bağlı olarak boyutsuz dış merkezliğin azalmasıyla birlikte narinlik etkisi ve ikinci mertebeli momentleri önem kazanmaktadır. Eğilme sonucu oluşan yerdeğiştirmeler aksel yük nedeniyle ikinci mertebeli momentlerine yol açmaktadır. Yeterli yanal rijitliğe sahip olmayan yapılarda, katlar arası yanal yerdeğiştirme ile oluşan ikinci mertebeli momentleri çok büyük olabilmektedir [3]. Bu durumda ikinci mertebeli momentleri kolon uç momentlerini arttırmakta [1,4] ve plastikleşme potansiyeli yüksek olan bu kesitleri daha kritik hale getirmektedir. Bazı durumlarda ikinci mertebeli etkiler mevcut eğilme momenti yanında önemli duruma geçmekte ve ikinci mertebeli etkilerinin büyük olduğu kolonların dayanımında azalmalar meydana gelmektedir [5].

Kolon etkili boyunun (L_k) atalet yarıçapına (i) oranı olarak hesaplanan narinlik oranı, kolonun narinliğini belirleyen önemli bir parametredir. Narinlik oranı kolon boyu, kolonun iki ucunun mesnetlenme durumu ve kesit boyutlarıyla ilgilidir [5]. Narinlik oranı arttıkça yerdeğiştirme nedeniyle ortaya çıkan ikinci mertebeli etkiler de artmaktadır.

İkinci mertebeli momentlerin hesabında izlenecek en doğru yol, doğrusal olmayan çözümlerdir [3]. Bu çalışmada, uygulamada sıkça karşılaşılan bir durum sonucu zemin kattaki kolonların narinlik oranı artırılmış olan çerçeve türü betonarme yapıların yatay yükler altındaki davranışları, yatay yerdeğiştirmeler nedeniyle oluşan ikinci mertebeli etkiler dikkate alınarak artımsal itme analizi yöntemi ile araştırılmıştır. TS 500 [6] ve Deprem Yönetmeliği-2007'ye [2] uygun olarak tasarlanan üç boyutlu bir binadan seçilen bir düzlem çerçevenin zemin kat kolonlarının narinlik oranları bu kolonların boyları artırılarak büyütülmüştür. Oluşturulan beş farklı çerçevenin dayanım katsayıları (V/W) ve yatay yerdeğiştirme oranları (Δ/H) sistemde ilk plastik kesitin olduğu durum, çerçevenin akma taban kesme kuvveti kapasitesine erişmesi durumu ve göçme durumu için artımsal itme analizinden elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Benzer karşılaştırma göçme durumu için hesaplanan göçme oranları cinsinden de yapılmıştır. Ayrıca göçme durumunda çerçevede plastik kesitlerin dağılımı, kiriş ve kolonlardaki sayıları ve bunlardaki en büyük plastik dönme değerleri incelenen tüm çerçeveler için çalışma kapsamında sunulmuştur.

Çalışmada ayrıca bu tip yapıların göçme davranışları enerji esaslı yöntemlerle de incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında yatay yüklerin etkisi altındaki betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının doğrusal elastik ötesi davranış sonucundaki enerji tüketiminin de doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin toplandığı kabul edilen plastik mafsallarda olduğu varsayılmıştır. Betonun gevrek bir yapı malzemesi olmasından dolayı, çevrimsel davranış sonucu tükettiği histeretik enerji miktarı çeliğe oranla oldukça daha azdır. Bu nedenle, tekrarlı yatay yükler altındaki betonarme bir eleman tarafından tüketilen enerji miktarının hesaplanmasında betonun katkısı ihmal edilebilir [7, 8, 9]. Bu çalışmada betonarme kesitler tarafından soğurulan enerji miktarının sadece çelik donatı tarafından tüketilen enerji miktarına bağlı olduğu kabul edilmiştir. Artımsal itme analizi sonucu elde edilen göçme mekanizmaları için kiriş ve kolon elemanlarda meydana gelen plastik mafsallara ait dönme değerleri kullanılarak bu bölgelerde doğrusal olmayan davranış sonucu tüketilen histeretik enerjiler hesaplanmıştır. Yapı tarafından tüketilen toplam enerji ise göçme durumunda sistemin plastik mafsallarında tüketilen histeretik enerji değerlerinin toplamı olarak belirlenmiştir.

Artımsal itme analizinden önce binaların dinamik özellikleri belirlenmiştir. Dinamik serbestlik derecesi olarak her katın kütle merkezinde bir yatay ötelenme dikkate alınmıştır ve kat kütleleri düşey yüklerle uyumlu olarak belirlenmiştir. Kat kütlelerinin hesabında dikkate düşey yükler, ölü yüklerin tamamı ile hareketli yüklerin %30'nun toplamından belirlenmiştir.

Kolon ve kiriş kesitlerinin etkin eğilme rijitlikleri için Deprem Yönetmeliği-2007'de verilen değerler dikkate alınmıştır [2]. Kirişlerin etkin eğilme rijitlikleri $(EI)_e = 0.40 (EI)_o$ olarak alınmıştır. Kolonların etkin eğilme rijitlikleri ise $N_D / (A_c f_{cm}) \leq 0.10$ olması durumunda $(EI)_e = 0.40 (EI)_o$ ve $N_D / (A_c f_{cm}) \geq 0.40$ olması durumunda $(EI)_e = 0.80 (EI)_o$ olarak alınmıştır. Burada A_c kolon veya

perdenin brüt kesit alanını, f_{cm} mevcut beton dayanımını göstermektedir. Çalışmada kullanılan tüm çerçeveler için kat kütlelerinin hesabında dikkate alınan düşey yüklerden dolayı kolonlarda hesaplanan eksenel basınç kuvvetleri (N_D değerleri) belirlenmiş ve N_D 'nin ara değerleri için doğrusal enterpolasyon yapılarak kolonların etkin eğilme rijitlikleri hesaplanmıştır. Çerçevelerin çatlamamış ve çatlamış kesite ait özellikler dikkate alınarak ilk üç modu için hesaplanan titreşim periyotları (T) ve aynı modlara ait etkin kütle oranları (U) Tablo 1.'de verilmiştir.

Kiriş ve kolon kesitlerinin doğrusal olmayan davranışlarının modellenmesinde sargılı ve sargısız beton için Mander [12] tarafından önerilen gerilme-birim şekildeğiştirme bağıntıları kullanılmıştır. Donatı çeliği

Tablo 1. Çerçevelerin dinamik özellikleri

Durum		Çatlamamış Kesitli Değerler			Çatlamış Kesitli Değerler		
		1. Mod	2. Mod	3. Mod	1. Mod	2. Mod	3. Mod
BÇ_1	T (sn)	0.501	0.153	0.080	0.776	0.238	0.124
	U (%)	82.84	10.68	4.13	82.65	10.65	4.19
BÇ_2	T (sn)	0.512	0.157	0.082	0.793	0.243	0.127
	U (%)	84.09	10.37	3.70	83.90	10.36	3.78
BÇ_3	T (sn)	0.530	0.162	0.084	0.820	0.251	0.131
	U (%)	85.91	9.75	3.06	85.72	9.76	3.15
BÇ_4	T (sn)	0.549	0.168	0.087	0.850	0.260	0.134
	U (%)	87.64	8.98	2.48	87.46	9.02	2.56
BÇ_5	T (sn)	0.563	0.171	0.088	0.871	0.265	0.136
	U (%)	88.72	8.42	2.14	88.55	8.46	2.21

için ise Deprem Yönetmeliği-2007'de verilen gerilme-birim şekil değiştirme bağıntıları dikkate alınmıştır [2].

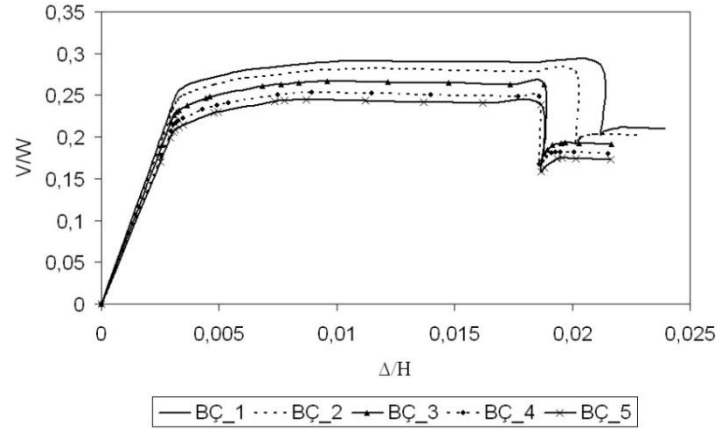
Plastik kesitlerin kolon ve kiriş uç bölgelerinde oluşacağı kabul edilmiş ve bu kesitlerin doğrusal olmayan davranışı mevcut enine ve boyuna donatıların konum ve aralıkları dikkate alınarak XTRACT [13] isimli kesit analiz programı ile belirlenmiştir. Pozitif ve negatif moment-eğrilik ilişkilerinin belirlenmesinde kirişlerde eksenel yükün değeri sıfır kabul edilmiştir. Kolonların eksenel yükü ise düşey yüklerden hesaplanmış ve kolonlar için oluşturulan N-M etkileşim diyagramları analiz yapıldığı bilgisayar programına girilmiştir. Malzeme bakımından doğrusal olmayan davranış yığılı plastik davranış modeli ile idealleştirilmiş ve plastik mafsalsal boyu (l_p) çalışan doğrultudaki kesit boyutunun (h) yarısı olarak alınmıştır. Plastik kesitlerin iç kuvvet-plastik şekil değiştirme bağıntıları, plastik dönme artışına bağlı olarak plastik momentin artışı (pekleşme etkisi) de dikkate alınarak belirlenmiştir.

Çerçevelerin artımsal itme analizinde doğal titreşim mod şekli genliği ile orantılı yatay yük dağılımı kullanılmıştır. Tüm çerçevelerin birinci doğal titreşim moduna ait etkin kütle oranı %70'in üzerindedir (Tablo 1.). Artımsal itme analizlerinde P- δ etkileri dikkate alınmıştır.

Artımsal itme analizi gerçekleştirilen beş adet çerçeve için bu analizin sonuç ürünü olan itme eğrileri Şekil 2.'de

verilmiştir. Burada Δ çerçevenin tepe noktasının yatay yer değiştirmesini, H çerçevenin toplam yüksekliğini, V taban kesme kuvvetini ve W toplam çerçeve ağırlığını göstermektedir.

Oluşturulan itme eğrileri FEMA 356'da [14] belirtildiği şekilde iki doğru parçası ile idealleştirilmiş ve idealleştirilmiş eğri üzerindeki tipik noktalara ait değerler Tablo 2.'de verilmiştir. Burada V_y çerçevenin akma taban kesme kuvveti kapasitesini, V_u göçme anındaki taban kesme kuvvetini göstermektedir. Δ_y iki doğru parçası ile idealleştirilen itme etrisinde, iki doğru parçasının kesiştiği noktadaki yatay yer değiştirme değeri, Δ_u ise çerçevenin nihai yatay yer değiştirme değeridir.



Şekil 2. Çerçevelerin itme eğrileri

Tablo 2. İtme eğrisindeki tipik noktalara ait değerler

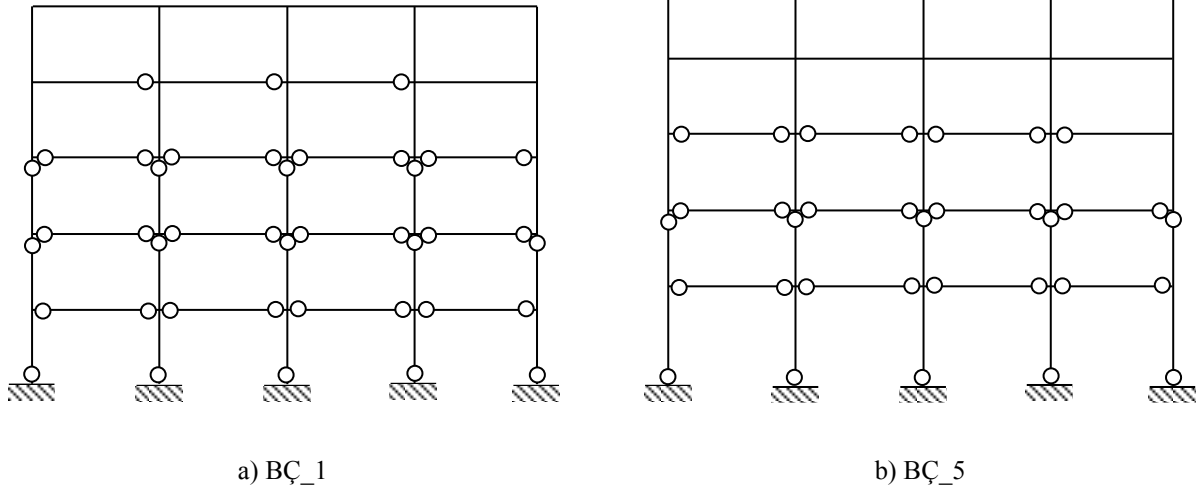
Durum	V_y/W	Δ_y/H	V_u/W	Δ_u/H
BÇ_1	0.28338	0.003543	0.28760	0.021200
BÇ_2	0.27253	0.003506	0.27748	0.020146
BÇ_3	0.26068	0.003496	0.26268	0.018800
BÇ_4	0.24414	0.003470	0.24815	0.018602
BÇ_5	0.23218	0.003463	0.23899	0.018672

Çalışmada analizi gerçekleştirilen tüm çerçevelerin göçme durumunda hesaplanan görelî kat ötelenmeleri Tablo 3.'de sunulmuştur. Bu tabloda, h_i ($i = 1, \dots, 5$) çerçevenin kat yüksekliğini, δ_i ($i = 1, \dots, 5$) değerleri ise farklı katlara ait yatay yerdeğiştirme değerleridir.

Çerçevelerin göçme durumunda oluşan plastik kesitlerin dağılımı ise zemin kat yükseklikleri arasındaki fark en fazla olan BÇ_1 ve BÇ_5 çerçeveleri için Şekil 3.'de verilmiştir.

Tablo 3. Göçme durumunda hesaplanan görelî kat ötelenmeleri

Durum	Görelî Kat Ötelenmeleri				
	$(\delta_5 - \delta_4)/h_5$	$(\delta_4 - \delta_3)/h_4$	$(\delta_3 - \delta_2)/h_3$	$(\delta_2 - \delta_1)/h_2$	δ_1/h_1
BÇ_1	0.00232	0.00572	0.02351	0.03634	0.03811
BÇ_2	0.00213	0.00522	0.01813	0.03559	0.03843
BÇ_3	0.00193	0.00457	0.01050	0.03468	0.03896
BÇ_4	0.00173	0.00389	0.00813	0.03426	0.03944
BÇ_5	0.00162	0.00350	0.00740	0.03404	0.03976



Şekil 3. Göçme durumunda çerçevelerde oluşan plastik kesitlerin dağılımı

Çalışmada kullanılan çerçevelerin göçme durumda oluşan plastik kesit sayıları kiriş ve kolon elemanlar için Tablo 4.'de verilmiştir. Aynı tabloda plastikleşen kiriş ve kolon kesitlerinde hesaplanan en büyük dönme değerleri de sunulmuştur.

Tablo 4. Göçme durumunda oluşan plastik kesitlerin sayıları ve en büyük plastik dönme değerleri

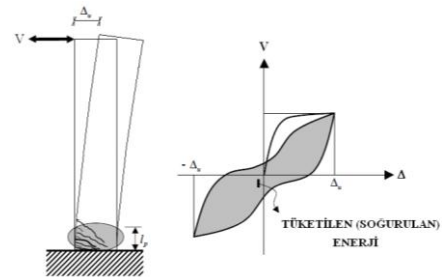
Durum	Plastikleşen Kesit Sayıları		Plastik Kesitlerdeki En Büyük Dönme Değerleri (rad)	
	Kiriş	Kolon	Kiriş	Kolon
BÇ_1	27	15	0.038024	0.034973
BÇ_2	27	15	0.038034	0.035184
BÇ_3	24	14	0.038245	0.035618
BÇ_4	24	14	0.038271	0.035994
BÇ_5	23	10	0.038253	0.036255

4. Betonarme Taşıyıcı Sistem Elemanlarının Doğrusal Olmayan Davranış Sonucu Plastikleşen Kesitlerinde Soğurulan Enerji

Yapı sistemlerinin doğrusal olmayan davranışları enerji esası olarak incelendiğinde, ilk olarak depremin yapıya uyguladığı enerji (depremlerle birlikte yapıya giren enerji) ele alınmalıdır [15, 16]. Giren deprem enerjisi; yapı kinetik enerjisi, viskoz sönüm enerjisi,

elastik şekil değiştirme enerjisi ve doğrusal olmayan davranış sonucu yapıda tüketilen enerjinin (histeretik enerji) toplamı olarak ifade edilebilir. Deprem enerjisinin bir kısmı yapının sönüm mekanizması sonucu sönümlenmektedir. Eğer yapı tarafından sönümle yutulan enerji, depremin yapıdan talep ettiği enerjiden büyükse, giren enerji sadece sönümle dengelenir. Sönüm enerjisinin, depremin uygulamış olduğu enerjiden küçük olması halinde ise, yapının sönüm enerjisi ile depremin uygulamış olduğu enerji arasındaki fark histeretik enerji ile dengelenmektedir [17]. Histeretik enerji, yapı taşıyıcı sistem elemanlarının doğrusal olmayan davranışı sonucu soğurulan ve yapısal hasarlarda rol oynayan en önemli enerji bileşenidir. Çalışma kapsamında, yatay yüklerin etkisi altındaki betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının doğrusal elastik ötesi davranışı sonucundaki enerji tüketiminin de doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin toplandığı kabul edilen plastik mafsallarda olduğu varsayılmıştır.

Tekrarlı yük etkisindeki betonarme bir elemanın yük-deformasyon grafiğinin alanı, betonarme elemanın enerji tüketme miktarının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Şekil 4.).



Şekil 4. Betonarme bir elemanın çevrimsel davranışı

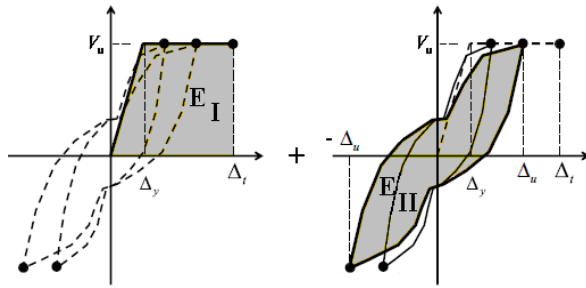
Betonarme bir kesit tarafından tüketilen enerji (E_T), beton ve çelik donatı tarafından tüketilen enerjilerin toplamına eşittir ve Denklem (1)'deki gibi yazılabilir.

$$E_T = E_{beton} + E_{çelik} \quad (1)$$

Yatay yüklerin etkisinde olan betonarme elemanlarda tüketilen enerji miktarının iki bileşeni mevcuttur [7, 8].

$$E_T = E_I + \sum E_{II} \quad (2)$$

Denklem (2)'deki enerji bileşenlerinden; E_I : çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrisinin maksimum noktalarını birleştiren, pozitif yükleme bölgesindeki eğrinin alanıdır. E_{II} enerjisi ise; tekrarlı bir yükleme (yükleme-boşaltma durumu) altında oluşan çevrimsel tekrarlı yük-yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan bütün alandır (Şekil 5.).



Şekil 5. E_I ve E_{II} Enerji Bileşenleri [7, 8]

Kesitlerin doğrusal olmayan davranışı sonucu tüketilen enerji (histeretik enerji) E_{II} enerjisi ile ilgilidir. Bu nedenle, betonarme kesitlerin E_{II} olarak adlandırılmış olan enerjilerinin hesaplanması önem taşımaktadır. Betonun gevrek bir yapı malzemesi

olmasından dolayı, çevrimsel davranış sonucu tükettiği histeretik enerji miktarı çeliğe oranla oldukça azdır ($E_{II,beton} \ll E_{II,çelik}$) [7, 8, 9]. Bu nedenle; tekrarlı yatay yükler altındaki betonarme bir eleman tarafından tüketilen enerji miktarının hesaplanmasında betonun katkısı ihmal edilebilir. Böylece, tekrarlı yatay yükleme altındaki betonarme kesit tarafından soğurulan enerji miktarı, sadece çelik donatı tarafından tüketilen enerji miktarına bağlı olmaktadır ve Denklem (3)'teki gibi hesaplanmaktadır [7, 8, 9].

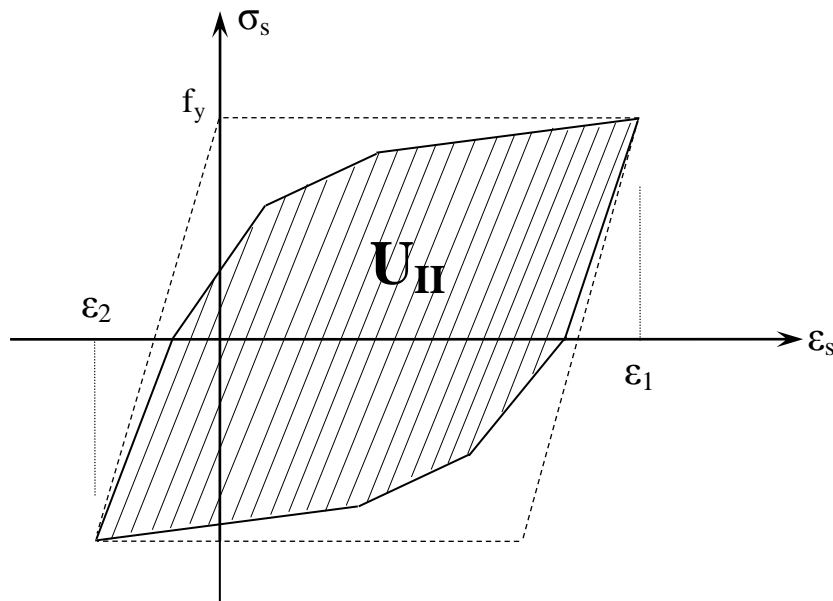
$$E_{II} \cong E_{II,çelik} \quad (3)$$

Deneysel ve teorik çalışmalardan, betonarme kesitlerin uç bölgelerindeki donatıların daha sünek davrandığı, daha çok enerji soğurma kapasitelerinin olduğu ve gövde bölgesindeki donatılara oranla daha büyük şekil değiştirmeler yaptığı görülmüştür. Bu nedenle betonarme elemanların uç bölgelerine konulacak donatı miktarı kritiktir ve elemanın enerji tüketme kapasitesini belirlemede daha etkilidir [7, 8, 9].

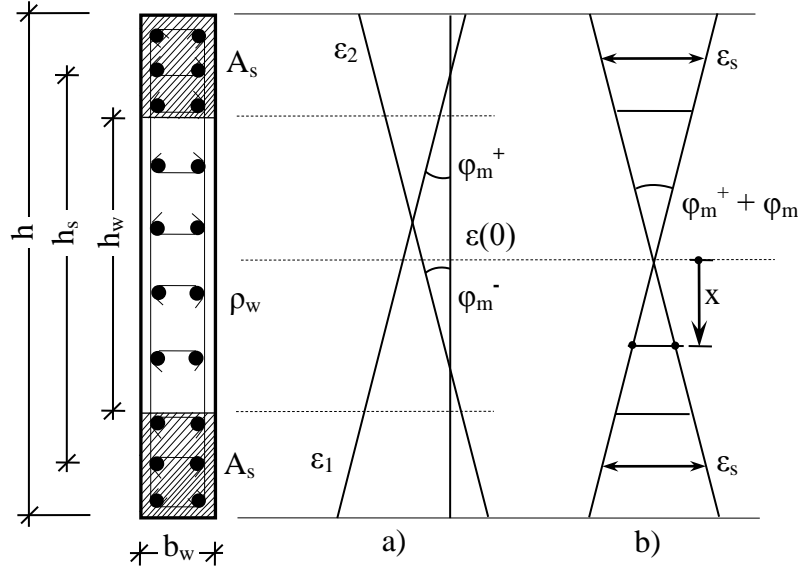
Betonarme kesitlerdeki donatı çubuğunun birim hacminde tüketilen enerji miktarı Şekil 6.'da verilen (σ - ϵ) diyagramının çevrelediği U_{II} alanından elde edilebilir [7]. U_{II} alanı Denklem (4)'deki gibi yazılabilir.

$$U_{II} = 2R_B f_y (\epsilon_1 - \epsilon_2 - 2\epsilon_y) \quad (4)$$

Burada; R_B : Bauschinger etkisinden dolayı hesaba katılan azaltma faktörü, f_y : donatı çeliğinin akma gerilmesi, ϵ_y : donatı çeliğinin akma birim şekil değiştirmesi, ϵ_1 ve ϵ_2 : tekrarlı yükleme altındaki donatı çeliğinin maksimum ve minimum birim şekil değiştirme değerleridir. Geçmişte yapılmış deneysel çalışmalarda R_B 'nin 0.75 alınması önerilmektedir[8].



Şekil 6. Tekrarlı yatay yüklemeye altındaki betonarme bir kesitteki donatı çeliğinin (□□□) diyagramı ve çevrelediği U_{II} alanı



Şekil 7. Simetrik donatılı betonarme kesitteki birim deformasyon ϵ - diyagramları (a) gerçek □□ diyagramı □□b) basitleştirilmiş □□ diyagramı [7]

Çalışmada tekrarlı tersinir yüklemeye sonucu betonarme kesitte oluşacak olan en büyük ve en küçük birim şekil değiştirmeler ϵ_1 ve ϵ_2 ile ifade edilmiştir (Şekil 7.). Aynı şekildeki simetrik donatı düzenine sahip betonarme kesitin birim deformasyon diyagramında pozitif ve negatif yüklemelere ait en büyük eğrilikler ϕ_m^+ ve ϕ_m^- olarak gösterilmiştir. $\epsilon(0)$; eğriliğin ve şekil değiştirmenin sıfır olduğu yüklemeye anını ifade etmektedir. A_s : uç bölgelerdeki donatı alanı, ρ_w : gövde bölgesi donatı oranı, h : kesit yüksekliği, h_s : uç bölge donatılarının geometrik merkezleri arasındaki mesafe, h_w : gövde bölgesinin yüksekliği ve b_w : enkesit genişliğidir. Şekil 7.'de birim deformasyon diyagramı basitleştirilmiş ve ortak bir eğrilikte ($\phi_m^+ + \phi_m^-$) gösterilmiştir. x : herhangi bir noktanın kesit tarafsız eksenine olan mesafesidir. ϵ_1 ve ϵ_2 değerlerini belirlemek için kesit analizi yapmak ve tarafsız eksen mesafesini hesaplamak gerekmektedir. Simetrik donatılı kesitlerde diferansiyel birim deformasyon miktarını (ϵ_1 - ϵ_2) kesit analizi yapmadan, basitleştirilmiş birim şekil değiştirme diyagramından yararlanarak Denklem (5) ile hesaplayabilmek mümkündür. Bu nedenle kesitin simetrik donatı düzeninde olması hesaplamalarda bir avantajdır [7, 8].

$$(\epsilon_1 - \epsilon_2) = \left| (\phi_m^+ + \phi_m^-) x \right| \quad (5)$$

Denklem (5)'in, betonarme kesitteki donatının bir birimlik hacmi tarafından soğurulan enerji değeri olan U_{II} ifadesinde (Denklem (4)'de) yerine yazılması ile enkesitin plastik kesitlerdeki birim enerji tüketme değeri hesaplanabilir (e_{II} enerjisi). Enkesitin birim boyunda tüketilen enerji miktarı e_{II} , U_{II} ifadesinin alana göre

integre edilmesi ile Denklem (6), (7) ve (8) kullanılarak bulunabilir.

$$e_{II} = \int_A U_{II} dA_{donatı} \quad (6)$$

$$e_{II} = 2 \left[2R_B f_y \left((\phi_m^+ + \phi_m^-) \frac{h_s}{2} - 2\epsilon_y \right) A_s + 2 \int_0^{h_w/2} 2R_B f_y \left((\phi_m^+ + \phi_m^-) x - 2\epsilon_y \right) \rho_w b_w dx \right] \quad (7)$$

$$e_{II} \cong 4R_B f_y \left[(\phi_m^+ + \phi_m^-) \frac{h_s}{2} - 2\epsilon_y \right] A_s + 4R_B f_y \left[(\phi_m^+ + \phi_m^-) \frac{h_w}{8} - \epsilon_y \right] (\rho_w b_w h_w) \quad (8)$$

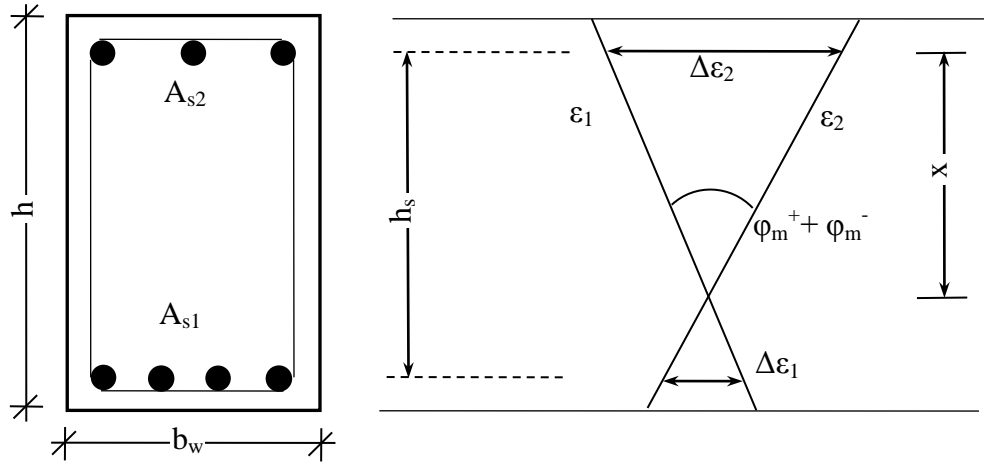
Plastik mafsallarda elastik ötesi davranış sonucu tüketilen toplam enerji değeri (E_{II}), enkesitin birim boyunda tüketilen e_{II} enerjisinin, plastik mafsallarda uzunluğu boyunca integre edilerek Denklem (9) ve (10) ile hesaplanır [7].

$$E_{II} = e_{II} l_p \quad (9)$$

$$E_{II} \cong 4R_B f_y \left[(\theta_m^+ + \theta_m^-) \frac{h_s}{2} - 2\epsilon_y l_p \right] A_s + 4R_B f_y \left[(\theta_m^+ + \theta_m^-) \frac{h_w}{8} - \epsilon_y l_p \right] (\rho_w b_w h_w) \quad (10)$$

Denklem (10), simetrik donatı düzeni olan betonarme kesitlerin l_p boyundaki plastik mafsalda tüketilen enerji miktarını vermektedir. Burada θ_m^+ ve θ_m^- pozitif ve negatif yükleme doğrultularındaki plastik mafsal dönmesi değerleridir. ε_y : donatı çeliğinin akma birim şekil değiştirmesi, R_B : Bauschinger etkisinden dolayı hesaba katılan azaltma faktörü ve f_y : donatı çeliğinin akma gerilmesidir.

Donatı düzeni simetrik olmayan betonarme kesitlerin plastik mafsal bölgelerinde soğurulan enerji miktarı da simetrik kesitlerdekine benzer bir şekilde hesaplanabilmektedir [7, 8].



Şekil 8. Asimetrik donatı düzeni olan betonarme enkesit ve birim deformasyon diyagramı

Şekil 8.'de donatı düzeni simetrik olmayan bir enkesit görülmektedir. Kesitin tekrarlı ve tersinir yatay yüklenmesi sonucunda oluşan maksimum ve minimum birim deformasyonlar ε_1 ve ε_2 doğruları ile gösterilmiştir. A_{s1} ve A_{s2} , sırasıyla büyük ve küçük enkesit alanlı donatıları göstermektedir. h : kesit yüksekliği, b_w : kesit genişliği ve h_s : uç bölge donatılarının ağırlık merkezleri arasında kalan mesafedir. Kesit birim deformasyon diyagramı ortak bir eğrilikte gösterilmiş olup $(\phi_m^+ + \phi_m^-)$, x : tarafsız eksenden $\Delta\varepsilon_2$ birim deformasyonuna olan mesafedir. $\Delta\varepsilon_1$ ve $\Delta\varepsilon_2$ büyük ve küçük donatı alanları seviyesindeki diferansiyel birim şekil değiştirmelerdir (Şekil 8.).

Şekil 8.'de görüldüğü gibi donatı düzeni simetrik olmayan betonarme kesitlerde enerji tüketimi küçük enkesit alanlı donatı çubuklarında tekrarlı yatay yükler altında $(\sigma \square \varepsilon)$ eğrisinin alanı, büyük donatılı bölgeye göre çok daha büyüktür ve bu bölgede elastik ötesi davranışta daha fazla enerji soğurması olmaktadır [7, 8]. Şekil 8.'deki gibi donatı düzenine sahip olan bir kesitte $A_{s2} < A_{s1}$ olduğu için diferansiyel birim deformasyon $\Delta\varepsilon_2$ 'ye eşit olmaktadır. Bauschinger etkisinden dolayı $\Delta\varepsilon_2$ değerini hesaplamak kolay değildir. Donatı çubuklarının ideal-elastoplastik davranış gösterdiği varsayılarak $\Delta\varepsilon_2$ Denklem (11) ile hesaplanabilir.

$$\Delta\varepsilon_2 = (\phi_m^+ + \phi_m^-)x = (\phi_m^+ + \phi_m^-)h_s - \Delta\varepsilon_1 \quad (11)$$

Denklem (11)'deki $\Delta\varepsilon_1$ diferansiyel birim deformasyon değeri Denklem (12)'deki gibi yazılabilir.

$$\Delta\varepsilon_1 = (1 + \frac{A_{s2}}{A_{s1}})\varepsilon_y \leq 2\varepsilon_y \quad (12)$$

\square_y : donatı akma birim şekil değiştirmesidir. Denklem (12)'nin Denklem (11)'de yerine yazılması ile A_{s1} alanlı donatı çubukları seviyesindeki diferansiyel birim deformasyon Denklem (13)'teki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_2 &= (\phi_m^+ + \phi_m^-)h_s - \Delta\varepsilon_1 \\ &= (\phi_m^+ + \phi_m^-)h_s - (1 + \frac{A_{s2}}{A_{s1}})\varepsilon_y \end{aligned} \quad (13)$$

Asimetrik donatılı bir betonarme enkesitin plastik mafsallarında tüketilen birim enerji miktarı (birim uzunlukta tüketilen enerji) A_{s2} donatısının diferansiyel birim deformasyonuna bağlı olarak Denklem (14) kullanılarak elde edilebilir.

$$\begin{aligned} e_{II} &= 2R_B f_y (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - 2\varepsilon_y) A_{s2} \\ &= 2R_B f_y (\Delta\varepsilon_2 - 2\varepsilon_y) \end{aligned} \quad (14)$$

Denklem (13)'teki $\Delta\varepsilon_2$ diferansiyel birim deformasyonu Denklem (14)'de yerine yazılarak Denklem (15) elde edilir.

Tablo 5. Çerçevelerin göçme durumunda plastikleşen kesitlerindeki tüketilen enerji (kNm)

	Kat	Kirişlerde	Kolonlarda	Tüm Çerçevede
BÇ_1	5	---	---	---
	4	0.00	---	0.00
	3	5.14	27.95	33.09
	2	61.84	11.03	72.87
	1	96.36	84.00	180.36
	Toplam	163.34	122.98	286.32
BÇ_2	5	---	---	---
	4	0.00	---	0.00
	3	3.34	14.43	17.77
	2	44.52	24.98	69.50
	1	96.30	84.61	180.91
	Toplam	144.16	124.02	268.18
BÇ_3	5	---	---	---
	4	0.00	---	0.00
	3	0.92	0.00	0.92
	2	19.80	45.20	65.00
	1	96.50	85.76	182.26
	Toplam	117.22	130.96	248.18
BÇ_4	5	---	---	---
	4	0.00	---	0.00
	3	0.00	0.00	0.00
	2	12.08	51.00	63.08
	1	96.50	86.74	183.24
	Toplam	108.58	137.74	246.32
BÇ_5	5	---	---	---
	4	0.00	---	0.00
	3	0.00	0.00	0.00
	2	9.70	52.38	62.08
	1	96.44	87.48	183.92
	Toplam	106.14	139.86	246.00

Çalışma kapsamında incelenen çerçevelerin göçme durumunda plastikleşen kesitlerinde tüketilen

enerjiler bu bölümde gösterilen denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir kattaki kiriş ve kolon elemanlar ile tüm çerçeveler için ayrı ayrı hesaplanan enerji değerleri Tablo 5.'de sunulmuştur. Plastik kesit oluşumu gözlenmeyen kiriş ve kolonların bulunduğu katlarda enerji değeri gösterilmemiştir.

5. Sonuçlar

Ülkemizde konut türü olarak tasarlanan binaların zemin katlarının ticari amaçla kullanılması yaygın bir uygulamadır. Bunun sonucu olarak zemin katın yüksekliği normal katlara göre daha fazla yapılmaktadır. Bu çalışmada bu tip yapıların yatay yükler altındaki davranışı artımsal itme analizi ile ayrıntılı olarak irdelenmiş ve yapıların göçme durumunda plastikleşen kesitlerde tüketilen enerji miktarı hem kolon ve kiriş elemanlar, hem de tüm yapı için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesiyle zemin kattaki kolonların boylarının diğer katlardaki kolonların boylarına göre daha fazla olan yapıların yatay yük-yerdeğiştirme kapasiteleri ve tükettikleri deprem enerjileri ile ilgili önemli bulgular elde edilmiştir.

Çerçevelerin yatay yükler altındaki davranışı adım adım incelendiğinde ilk plastik kesitler BÇ_1 için $\Delta/H = 0.003061$ değerine, BÇ_2 için $\Delta/H = 0.003014$ değerinde, BÇ_3 için $\Delta/H = 0.002966$ değerinde, BÇ_4 için $\Delta/H = 0.002940$ değerinde ve BÇ_5 için ise $\Delta/H = 0.002935$ değerinde oluşmaktadır. Bu değerler itme eğrisinin doğrusallıktan ilk ayrıldığı andaki yatay yerdeğiştirme oranlarıdır. Zemin kat yüksekliğinin artmasıyla birlikte elemanlarda ilk akmanın meydana geldiği yerdeğiştirme oranı azalmaktadır.

Elemanlarda ilk plastik kesitin olduğu anda hesaplanan V/W oranlarında, zemin kat yüksekliğinin artması durumunda önemli azalmalar görülmektedir. BÇ_1 için $V/W = 0.2429$ değerinde, BÇ_2 için $V/W = 0.2326$ değerinde, BÇ_3 için $V/W = 0.2189$ değerinde, BÇ_4 için $V/W = 0.2068$ değerinde ve BÇ_5 için $V/W = 0.1995$ değerinde kesitlerde ilk akma meydana gelmektedir. Bu durum yapının zemin kat yüksekliğinin daha fazla yapılması durumunda elemanlardaki plastik şekil değiştirmelerin yatay yükün daha küçük değerlerinde meydana geldiğini göstermektedir. Zemin kat yüksekliğinin 1 m artırılmasıyla hesaplanan dayanım katsayısı %17.9 oranında azalmaktadır.

Elemanlardaki ilk akma durumuyla ilgili yapılan değerlendirmelerin aynısı binanın akma taban kesme kuvveti kapasitesi ve bu duruma karşılık gelen yatay yerdeğiştirme oranları için de geçerlidir (Tablo 2.) ve zemin kat yüksekliğinin artırılmasıyla birlikte çerçevenin başlangıç

rijitliğinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca Tablo 2. incelendiğinde, yapının göçme anındaki taban kesme kuvveti kapasitesinin zemin kat yüksekliğinin fazla yapılması durumunda azaldığı görülmektedir. BÇ_1'in göçme durumu için hesaplanan taban kesme kuvveti BÇ_5'e oranla yaklaşık %20 daha fazladır. BÇ_5'in yatay yerdeğiştirme kapasitesi ise BÇ_1'e oranla %12 daha azdır.

İncelenen çerçevelerin göçme durumundaki görelî kat ötelenmeleri cinsinden bir kıyaslama yapıldığında, dikkate alınan tüm durumlar için zemin kat dışındaki tüm kat ötelenmelerinin zemin kat yüksekliğinin artırılmasıyla azaldığı görülmektedir. Aynı durumda zemin kat görelî ötelenmeleri ise artış halindedir. Bu durum göçme halinde en büyük görelî kat ötelenmesinin meydana geldiği zemin katı yüksekliğinin artırılmasıyla daha kritik hale getirmektedir.

Zemin kat yüksekliğinin artırılmasıyla birlikte plastik kesitler daha yoğun olarak alt katlarda toplanmaktadır. Bu durum Şekil 3.'deki plastik kesit dağılımları incelendiğinde açıkça görülmektedir. Zemin kat yüksekliğinin giderek artırılmasıyla birlikte plastikleşen kesit sayıları azalmasına rağmen plastik kesitler ilk iki katta yoğunlaşmakta ve bu kesitlerdeki (özellikle plastikleşen kolon kesitlerindeki) dönme değerleri daha büyük değerler almaktadır. Bu durum bu tip yapılarda deprem hasarının belirgin şekilde alt katta oluştuğunu göstermektedir.

Zemin kat yüksekliğinin artması ile birlikte (BÇ_1'den BÇ_5'e doğru) çerçevelerin girişlerinde tüketilen toplam enerjilerin azaldığı görülmektedir. Girişlerin plastik mafsallarındaki dönme değerleri bir miktar artmasına rağmen bu artış çok küçük miktarda olmuş ve bu nedenle enerjide artışa neden olmamıştır.

Çerçeve kolonlarında plastik mafsal dönmelerinin artmasına paralel olarak tüketilen toplam enerjilerin de arttığı görülmektedir. Kolonlardaki plastik kesit sayıları azalmasına rağmen, kesit dönmelerindeki büyük artış enerjide de artışa neden olmuştur.

Tüm çerçevede tüketilen enerjiler de zemin kat yüksekliğinin artması ile birlikte azalma göstermiştir. Zemin kat kolonlarının narinlik oranının artması ile çerçevelerdeki sünekliğin azaldığı ve daha az enerji tüketildiği görülmüştür.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, çeşitli nedenlerle zemin kat kolonlarının narinlik oranı artırılan yapıların deprem davranışlarının hem dayanım hem deformasyon bakımından olumsuz tarafta olduğu görülmektedir. Ülkemizde sıkça karşılaşılan bu tür

yapılarda, olası depremlerde hasar dağılımının çoğunlukla zemin katlarda oluşması beklenmelidir.

6. Kaynaklar

- [1] Orbay, A., (2005). Ayrıntılı Örnekleriyle Betonarme I. *Birsen Yayınevi*, İstanbul, Türkiye.
- [2] Bayındırlık ve İskan Bakanlığı,(2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY), *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi*, Yayın No:53, İzmir, Türkiye.
- [3] Ersoy, U., Özcebe, G., (2001). Betonarme: Temel İlkeler, TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap. *Evrin Yayınevi*, İstanbul, Türkiye.
- [4] Atımtay, E., (1998). Reinforced Concrete Fundamentals. *Bizim Büro Basımevi*, Ankara, Türkiye, 1998.
- [5] Celep, Z., Kumbasar, N., (2005). Betonarme Yapılar. *Beta Dağıtım*, İstanbul, Türkiye.
- [6] Türk Standartları Enstitüsü, (2000). TS 500-Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, *T.S.E. Kurumu*, Ankara, Türkiye.
- [7] Eom, T.-S., Park, H.-G. (2010). Evaluation of Energy Dissipation of Slender Reinforced Concrete Members and its Applications. *Engineering Structures*, 32, 2884-2893.
- [8] Park, H.-G., Eom T.-S., (2006). A Simplified Method for Estimating the Amount of Energy Dissipated by Flexure Dominated Reinforced Concrete Members for Moderate Cyclic Deformations. *Earthquake Spectra*, 22(3), 459-490.
- [9] Park, H.-G., Eom T.-S., (2004). Energy Dissipation Capacity of Flexure-Dominated Reinforced Concrete Members. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No: 3481, Canada.
- [10] Uçar T., (2005). Yapı sistemlerinin doğrusal olmayan analizinde çözüm yöntemleri. *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [11] Computers and Structures, Inc., (2003). SAP 2000 Nonlinear, Version 8.2.3, Structural Analysis Program, Berkeley, CA, USA.
- [12] Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Division (ASCE)*, 114(8), 1804-1826.

- [13] Imbsen Software Systems, (2006). XTRACT Educational, Version 3.0.7. Sacramento, USA.
- [14] Federal Emergency Management Association, (2000). Prestandart and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, Reston, Virginia, USA.
- [15] Fajfar, P., Vidic, T., (1994). Consistent Inelastic Design Spectra: Hysteretic and Input Energy. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.(23), 523-537.
- [16] Uang, C. M., Bertero, V. V., (1988). Use of energy as a design criterion in earthquake-resistant design. *Earthquake Engineering Research Center, Report No: UCB/EERC-88/18*, University of California, Berkeley, CA.
- [17] Ay, Z., Çelik, İ. D., Kıvıllı, N. A., (2010). Çaprazlı Çelik Çerçevelerin Sismik Performansı Üzerine Bazı Değerlendirmeler. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26(1).