Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 21, Sayı 2, 2016 ARAŞTIRMA

DOI: 10.17482/uumfd.285488

DBYBHY-2007'DE TANIMLANAN HASAR KRİTERLERİNİN BETONARME KOLON ELEMANLAR İÇİN İNCELENMESİ

Umut HASGÜL [*]
Altuğ YAVAŞ [*]
Kaan TÜRKER [*]
Mehmet TERZİ [**]
Tamer BİROL [*]

Alınma: 03.06.2016; kabul: 30.12.2016

Öz: Bu çalışmada, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'te (DBYBHY) betonarme elemanlar için öngörülen şekildeğiştirme esaslı hasar sınırları deneysel olarak incelenmiştir. Bunun için, düşük beton dayanımına sahip ve sargı donatısı yetersizliği bulunan dört adet betonarme konsol kolon eleman test edilmiştir. Testlerde kolonlara sabit düşey yük ve tersinir artan yatay yük protokolü uygulanmıştır. Çalışmada öncelikle DBYBHY'de verilen hasar sınırlarını tanımlayan birim şekildeğiştirme değerleri kolon tepe yatay yerdeğiştirmesine dönüştürülmüştür. Bunun için DBYBHY'de verilen prosedür ve yapı mekaniğinin temel ilkelerinden yararlanılmıştır. Daha sonra ilgili yerdeğiştirme taleplerine karşılık gelen kolon hasarları gözlenmiş ve hasar sınırları değerlendirilmiştir. Testler sonucunda incelenen tüm elemanlarda, yönetmelikteki minimum hasar sınırına (MN) karşılık gelen performans düzeyinde kalıcı hasarların olmadığı gözlenmiştir. Güvenlik ve göçme hasar sınırlarında (GV ve GÇ) benzer şekilde kalıcı hasarların oluştuğu, ancak yük taşıma kapasitelerinde önemli azalmaların meydana gelmediği görülmüştür. İncelenen elemanlarda, kabuk betonu dökülmeleri vb. büyük hasarlar ve taşıma kapasitesindeki önemli dayanım azalmalarının göçme hasar sınırından sonra başladığı gözlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığı altında, DBYBHY'deki değerlendirme yönteminin düşük beton dayanımına sahip ve sargı yetersizliği bulunan kolon elemanlar için hasar sınırlarını belirlemede güvenilir sonuçlar verdiği söylenebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme kolon, şekil değiştirme esaslı hasar sınırı, deneysel hasar inceleme, performans esaslı değerlendirme

Investigation of Limit States Specified for Reinforced Concrete Column Members in TEC–2007

Abstract: In this study, the deformation based limit states stipulated for reinforced concrete members in the Turkish Earthquake Code (TEC) were experimentally investigated. Thus four RC cantilever columns which have low concrete compressive strengths and have not adequate confinement, were subjected to constant axial load and cyclic lateral load history. In the study, firstly, the strain values representing the damage limits were converted to top of the column lateral displacements by using fundamentals of structural mechanics. Subsequently the column damages corresponding to the displacement demands were observed, hence limit states were evaluated. After conducting all column tests, it was noted that no column damage was observed for the immediate occupancy (IO) performance level defined in the code. For the life safety (LS) and collapse prevention (CP) performance levels, though somewhat residual

[*] Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çağış Yerleşkesi, 10145, Balıkesir.
[**] Dr İnşaat Mühendisi, Balıkesir.
İletişim Yazarı: Umut HASGÜL (hasgul@balikesir.edu.tr)

deformations occurred on the critical regions, the column members can pretty much sustain their lateral load capacities. It was also observed for all columns that significant damages and strength losses occurred beyond the collapse prevention level. The results of experimental study indicate that the evaluation procedure in the TEC are still in good relationship with the limit states even if the columns have not adequate compressive strength and confinement.

Keywords: Reinforced concrete column, deformation based limit state, experimental damage investigation, performance based assessment

1. GİRİŞ

2007 yılında yürürlüğe giren Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) ile birlikte, mevcut betonarme binaların deprem güvenliklerinin belirlenmesinde performans esaslı yeni yaklaşımların kullanımı zorunlu hale gelmiş ve bunların kullanımı bugün oldukça yaygınlaşmıştır. DBYBHY'de binaların deprem performansının değerlendirilmesi için, diğer birçok çağdaş ülke yönetmeliğinde olduğu gibi kuvvet esaslı ve şekildeğiştirme esaslı yöntemler yer almaktadır. Yönetmelikte yapısal deprem performansının belirlenmesinde kullanılan kuvvet esaslı yöntemler *Doğrusal Elastik Yöntemler*, şekildeğiştirme esaslı yöntemler ise *Doğrusal Elastik Olmayan Yöntemler* olarak adlandırılmaktadır (DBYBHY, 2007). Bu analiz yöntemleri ile binaların sünek davranışına ilişkin plastik şekildeğiştirme talepleri (istemleri) ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet talepleri yerdeğiştirme kontrollü olarak hesaplanabilmektedir.

Performans esaslı yaklaşımlarda en önemli aşamalardan birisi yapısal elemanlardaki hasar düzeylerinin belirlenmesidir. Bu nedenle hasarla doğrudan ilişkili olan şekildeğiştirmeleri esas alan yöntemler, kuvvet esaslı olanlara göre çok daha güvenilir yönde sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte, hasarı belirlemek için esas alınan şekildeğiştirme parametresi de büyük önem arz etmektedir. Günümüzde performans esaslı yöntemlerin yer aldığı çeşitli yönetmeliklerde farklı şekildeğiştirme parametreleri kullanılmaktadır. Örneğin Eurocode–8 (CEN, 2005) yönetmeliğinde eleman uçlarının elastik ve plastik dönmelerini içeren *teğet–kiriş dönmesi* (chord rotation) adı verilen bir büyüklük kullanılırken, mevcut binaların performans esaslı tasarımı ve değerlendirilmesinde güncel çalışmaları içeren ASCE 41–06 (2007) yönetmeliğinde bazı elemanlar için *teğet–kiriş dönmesi*, bazı elemanlarda ise *uç plastik dönmesi* büyüklükleri kullanılmaktadır. Geleneksel kuvvet esaslı tasarım felsefesinin sismik tasarımdaki eksikliklerini gidermek amacıyla ilk olarak Priestley (1993) ve Priestley ve Calvi (1997)'de ortaya konulan *Doğrudan Yerdeğiştirme Esaslı Tasarımı* yaklaşımında, hasar düzeyleri beton basınç bölgesindeki ve boyuna donatıdaki birim şekildeğiştirmeler ile ifade edilmektedir. Bu tasarım yaklaşımı, farklı yapı sistemlerini de içerecek şekilde zaman içerisinde geliştirilmiş ve günümüzde kullanımı yaygın hale gelmiştir (Priestley ve diğ., 1996; Priestley ve Kowalsky, 2000; Priestley ve diğ., 2007). Benzer yaklaşım DBYBHY'de de benimsenmiş ve bunun sonucunda *doğrusal elastik olmayan yöntem* ile elemanlardaki hasar düzeylerinin belirlenmesinde birim şekildeğiştirme talepleri esas alınmıştır.

DBYBHY'de, beton ve donatı çeliği için verilen sınır birim şekildeğiştirme değerlerinin, deprem etkileri altında elemanlarda oluşan birim şekildeğiştirme talepleri ile karşılaştırılması suretiyle her tür elemanda (kiriş, kolon, perde) hasar düzeyinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca güçlendirilmiş yapısal elemanlar için de söz konusu yaklaşım kullanılmaktadır.

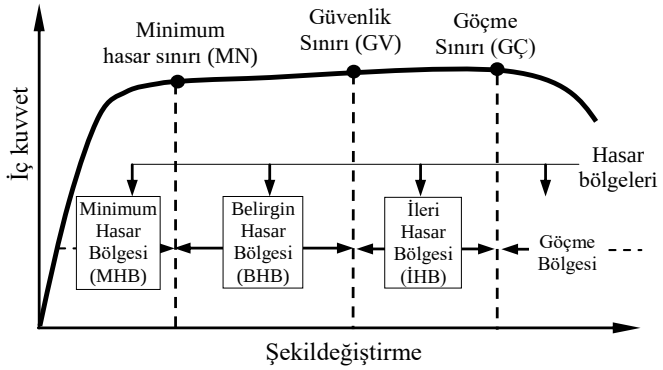
Son dönemde kolon ve perde elemanlar üzerinde yapılan çalışmalarda DBYBHY'de yer alan değerlendirme yöntemi, deneysel ve analitik olarak incelenmekte ve diğer ülke yönetmeliklerinde yer alan yöntemlerle karşılaştırılarak değerlendirilmektedir (Özal, 2008; Ekici, 2011; Solmaz, 2010; Acun ve Sucuoğlu, 2011; Kazaz ve diğ., 2012). Malzeme kalitesi, donatı detayları, maruz olduğu kesit tesirleri, yapısal kusurlar vb. sebeplerle davranış çeşitliliği gösteren yapı elemanları için DBYBHY'de öngörülen birim şekildeğiştirme esaslı yaklaşımın geçerliliğinin özellikle deneysel çalışmalarla araştırılması ihtiyacı bulunmaktadır.

Bu çalışmada düşük beton dayanımına sahip, iki farklı düzeyde sargı donatısı yetersizliği bulunan ve iki farklı boyuna donatı yerleşimine sahip toplam dört adet betonarme konsol kolon

eleman üzerinde, yönetmelikteki hasar düzeyi tanımlamalarının deneysel gözlemler ile değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. DBYBHY'DEKİ HASAR SINIRLARININ VE BÖLGELERİNİN BELİRLENMESİ

Yönetmelikte, kesme kırılması ve yüksek eksenel yük nedeniyle oluşan gevrek kırılmalar dışında tüm elastik ötesi davranışlar için üç hasar sınırı ve dört hasar bölgesi tanımlanmıştır (Şekil 1) (DBYBHY, 2007). *Doğrusal Elastik Olmayan Yöntemler*'de bu hasar sınırlarını tanımlayan beton birim şekildeğiştirme değerleri hacimsel sargı donatısı oranına bağlı olarak belirlenmektedir. Boyuna donatıdaki sınır değerler ise kesit özelliklerinden bağımsız olarak her bir hasar düzeyi için sabit değerler almaktadır (Tablo 1). Ayrıca, elemanlardaki sargı donatısının gözönüne alınabilmesi için DBYBHY'deki özel şartların (kanca vb.) sağlanması gerekmektedir.



Şekil 1:
DBYBHY'de yer alan kesit hasar düzeyi/bölgesi tanımları (DBYBHY, 2007)

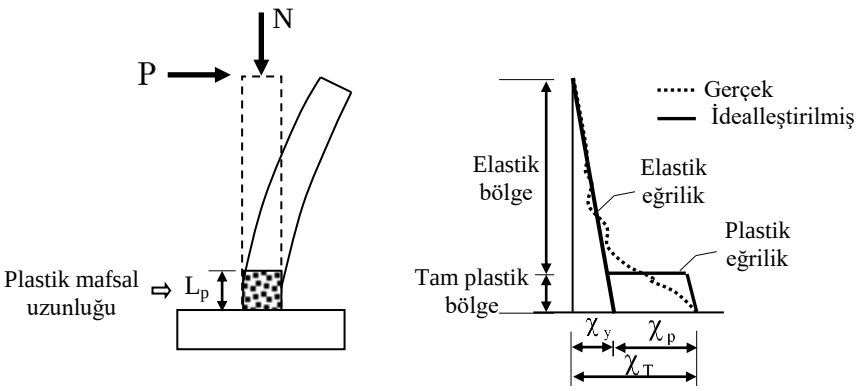
Tablo 1. DBYBHY'de öngörülen şekildeğiştirme esaslı hasar sınırları (DBYBHY, 2007)

Şekildeğiştirme	Minimum Hasar Sınırı (MN)	Güvenlik Sınırı (GV)	Göçme Sınırı (GÇ)
Kabuk betonu birim şekildeğiştirmesi (ε_{ck})	0.0035	---	---
Çekirdek betonu birim şekildeğiştirmesi (ε_{cg})	---	$0.0035 + 0.01\ (\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.0135$	$0.004 + 0.014\ (\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.018$
Çelik donatı birim şekildeğiştirmesi (ε_s)	0.01	0.04	0.06
ρ_s : Kesitte mevcut bulunan enine donatının hacimsel oranı ρ_{sm} : Kesitte bulunması gereken enine donatının hacimsel oranı			

Elemanlardaki birim şekildeğiştirme taleplerini belirlemek için öncelikle sistemin doğrusal elastik olmayan teoriye göre statik veya dinamik esaslı analizi yapılarak kritik kesitlerdeki plastik dönme talepleri elde edilmektedir. Bunun için plastik şekildeğiştirmelerin belirli bölgelerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerin doğrusal elastik davrandığı kabulüne dayanan plastik mafsal (yığılı plastisite) yaklaşımı kullanılmaktadır (Şekil 2). Böylece, kritik kesitlerdeki plastik eğrilik talebi (χ_p) (1) bağıntısı ile kolaylıkla belirlenebilmektedir.

$$\chi_p = \theta_p / L_p \tag{1}$$

Burada, θ_p plastik dönme ve L_p plastik mafsal uzunluğudur. DBYBHY'e göre plastik mafsal uzunluğu olarak eğilmeye çalışan kesit yüksekliğinin yarısı ($0.5h$) esas alınmaktadır.

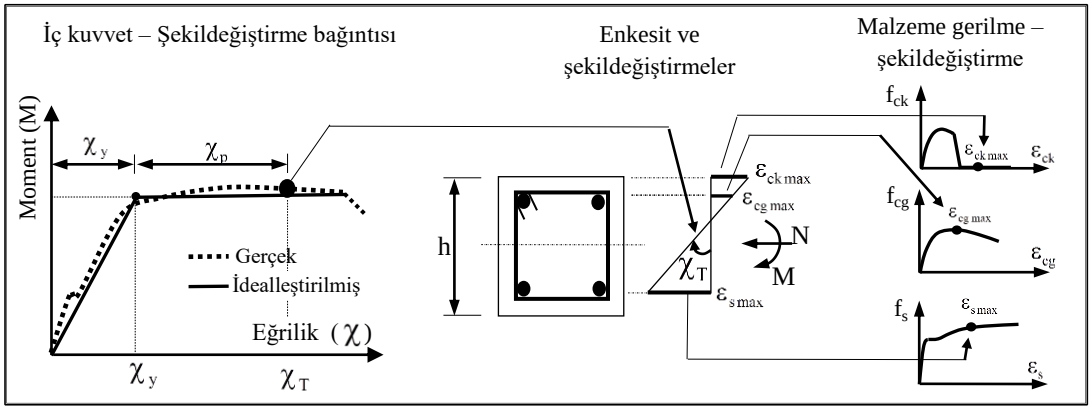


Şekil 2:
Plastik mafsal kabulü yapılan bir kolon elemanda davranışın idealleştirilmesi

Daha sonra, ilgili kesite ait *moment–eğrilik* analizi ile χ_y akma eğriliği elde edilerek, (2) bağıntısı ile kesitin toplam eğrilik (birim dönme) talebi χ_T elde edilmektedir. Akma eğriliği olarak donatının akmasına karşılık gelen eğrilik yerine, iki doğru parçası ile idealleştirilmiş *moment–eğrilik* bağıntısının eşdeğer akma eğriliği de kullanılabilmektedir (Şekil 3).

$$\chi_T = \chi_y + \chi_p \tag{2}$$

Böylece toplam eğrilik talebine karşılık gelen maksimum beton ve çelik birim şekildeğiştirme talepleri, DBYBHY'de verilen sınır değerler ile karşılaştırılarak kesit hasar düzeyleri (veya bölgeleri) belirlenebilmektedir (Şekil 3).



Şekil 3:
Kesit eğrilik talebinden malzeme birim şekildeğiştirme taleplerinin belirlenmesi

3. KOLON HASAR SINIRLARI ÜZERİNDE DENEYSEL İNCELEME

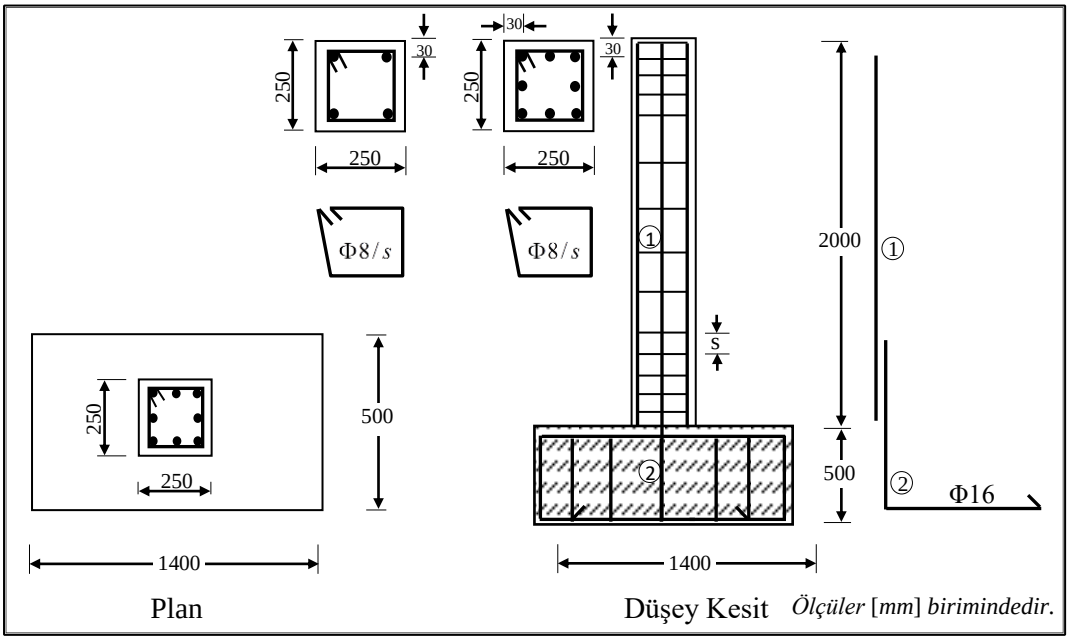
3.1. Deney elemanlarının özellikleri

Çalışmada incelenmek üzere, kolon ve rijit temelden oluşan dört adet test elemanı üretilmiştir. İlk olarak test elemanlarının temel dökümleri gerçekleştirilmiş, daha sonra temelden çıkan filizlere kolon boyuna donatıları bağlanarak kolon dökümleri yapılmıştır. Böylece uygulamada çoğunlukla karşılaşılan soğuk derzin hasar sınırlarına olan etkisinin gözönüne alınması sağlanmıştır. Test numunelerinin donatı özellikleri ve beton basınç dayanımları Tablo 2'de, boyutları ve donatı detayları Şekil 4'de verilmiştir. Temeller deney esnasında yeterli rijitliği ve kapasiteyi sağlayacak şekilde boyutlandırılmıştır.

İncelenen kolonlar 250/250 mm boyutlarında olup boyuna donatıları Kolon 1–2'de 4Φ16 ve Kolon 3–4'de 8Φ16'dır. Kolonların enine donatı özellikleri Şekil 4 ve Tablo 2'de verilmiştir. Etriyelerin kanca detayları DBYBHY'e uygun olarak hazırlanmış ancak enine donatı oranları DBYBHY'deki sargı şartlarına göre yetersiz durumdadır. Kolon 1–3'de enine donatı aralığı s=20 cm, Kolon 2–4'de ise s=10 cm olarak uygulanmıştır. Böylece iki farklı düzeyde sargı yetersizliği durumu incelenmiştir.

Tablo 2. Numunelerin Donatı ve Beton özellikleri

Kolon no	Boyuna donatı				Enine donatı			Beton basınç dayanımı (MPa)
	Miktarı	Oranı (%)	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Aralığı (s) (mm)	A_{sh}^{mevcut} / $A_{sh}^{gerekli}$	Akma dayanımı (MPa)	
1	4Φ16	1.3	440	525	200	0.38	452	14.2
2	4Φ16	1.3	455	545	100	0.77		14.5
3	8Φ16	2.6	465	565	200	0.38		13.8
4	8Φ16	2.6	445	525	100	0.77		14.2
A_{sh}: s enine donatı aralığı için her bir doğrultudaki enine donatı alanı (DBYBHY, 2007)								

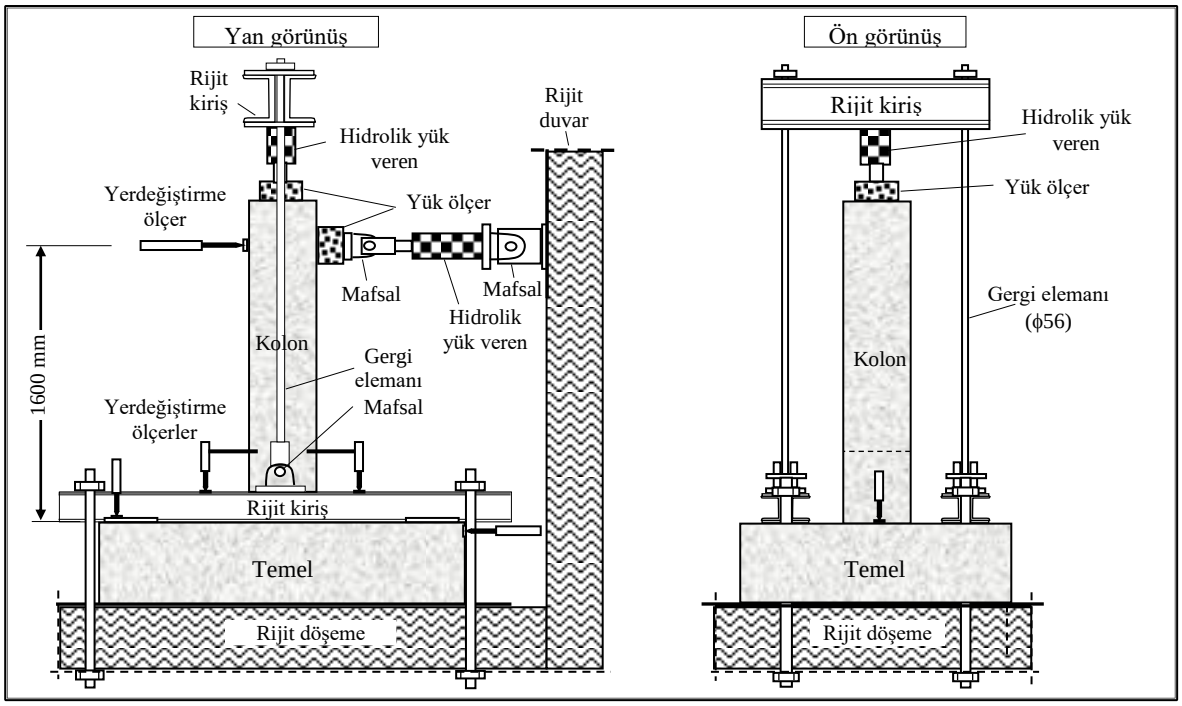


Şekil 4:
Kolon elemanların boyutları ve donatı detayları

3.2. Deney Düzeneği ve Yükleme Özellikleri

Sabit eksenel yük altındaki kolonların tersinir yatay yükler altındaki davranışını incelemek amacıyla Balıkesir Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda kurulan deney düzeneği Şekil 5–6'da gösterilmiştir. Kolon temeli çelik kuşaklar ve dört adet bulon aracılığı ile rijit reaksiyon döşemesine bağlanmıştır. Yatay yük, iki ucu mafsallı ve 300 kN kapasiteli bir hidrolik yük veren (actuator) aracılığı ile rijit düşey reaksiyon duvarından uygulanmıştır. Sabit düşey yük ise, rijit bir kirişe yerleştirilen 1000 kN kapasiteli bir hidrolik yük veren ve iki gergi elemanı aracılığı ile uygulanmıştır (Şekil 5–6).

Deney düzeneğinde yatay ve düşey yük vermek üzere iki adet hidrolik yük veren ve bunların bulunduğu noktalarda yük ölçerler (load cells) bulunmaktadır. Kolon elemanların yatay yerdeğiştirmelerini ölçmek amacıyla yatay yükün uygulandığı seviyede potansiyometrik cetvel yerleştirilmiştir (Şekil 5–6). Yatay yükün uygulandığı doğrultudaki kolon eğriliğini belirlemek amacıyla temel yüzünden itibaren 10–12.5 cm yüksekliğinde ve her iki yüzde birer adet potansiyometrik cetvel yerleştirilmiştir (Şekil 5–6). Deney süresince temel hareketlerini kontrol etmek amacıyla temelin farklı noktalarındaki yerdeğiştirmeler de izlenmiştir. Deney düzeneğinin görünümü Şekil 6'da verilmiştir. Testler süresince kolon elemanlardaki yük ve yerdeğiştirmeler 24 kanallı veri toplama cihazı ile kaydedilmiştir.

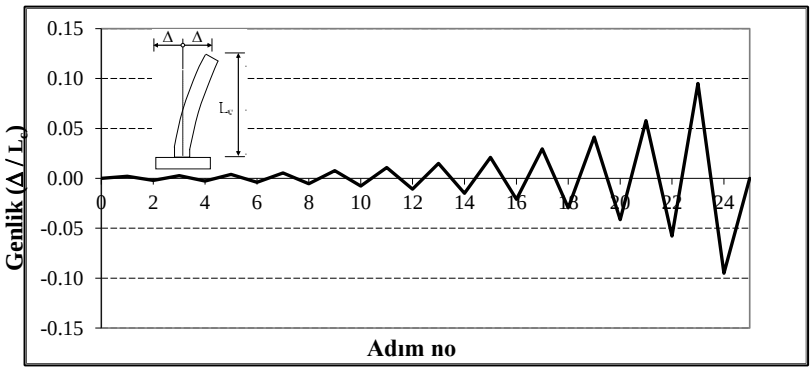


Şekil 5:
Şematik deney düzeneği

Deneyde kolonlara sabit düşey yük altında, tersinir olarak artan statik yatay yük uygulanmıştır. Kolon elemanlara $N/A_c.f_{ck}=0.25$ olacak şekilde 219 kN'luk sabit düşey yük, tersinir artan yatay yükleme için ise Şekil 7'de verilen yerdeğiştirme protokolü uygulanmıştır. Buna göre her bir genlik için iki yönde birer yükleme yapılmıştır. Minimum genlikte 0.003'lük göreli öteleme oranı (Δ/L_c), maksimum genlikte ise 0.062'lik göreli öteleme oranı uygulanmıştır.



Şekil 6:
Deney düzeneğine ait görüntüler

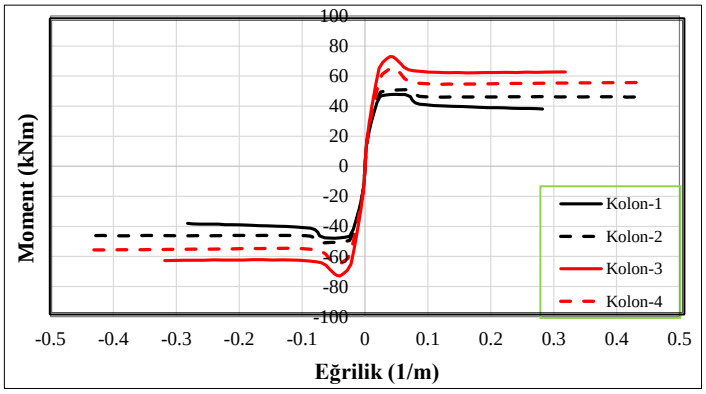


Şekil 7:
Kolon elemanlar için uygulanan yükleme protokolü

3.3. Kolon Hasar Sınırlarının Hesabı

Kolon hasar sınırlarını belirlemek amacıyla öncelikle kolonların kesit analizi yapılarak *moment–eğrilik* bağıntıları belirlenmiştir (Şekil 8). Kesit analizlerinde malzeme testlerinden elde edilen karakteristik değerler esas alınmıştır (Tablo 2). İncelenen kolon elemanlara ait teorik *moment–eğrilik* bağıntıları *CUMBIA* bilgisayar programı (Montejo ve Kowalsky, 2007) yardımıyla belirlenmiştir. Betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışlarının belirlenmesi amacıyla Matlab kodunda hazırlanmış olan *CUMBIA* programı, sargılı ve sargısız beton için Mander ve diğ. (1988a,1998b)'de önerilen beton modelini, beton çeliği için ise King ve diğ. (1986)'da önerilen modeli esas almaktadır.

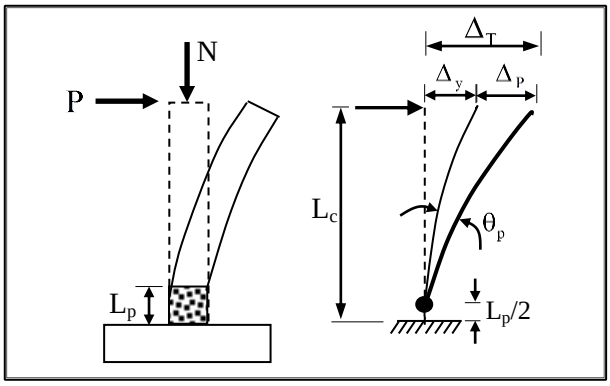
DBYBHY'de beton ve çelik için verilen sınır birim şekildeğiştirme değerleri (ε_{ck}, ε_{cg}, ε_s) gözönüne alınarak, hasar sınırlarına karşılık gelen kesit *toplam eğrilik* değerleri (χ_T) elde edilmiştir (Tablo 3). Hasar sınırının belirlenmesinde etkili olan birim şekildeğiştirme değerleri Tablo 3'de koyu olarak gösterilmiştir. (1) ve (2) bağıntıları kullanılarak sırasıyla hasar sınırlarına karşılık gelen *plastik eğrilik* (χ_p) ve *plastik dönme* (θ_p) değerleri belirlenmiştir (Tablo 3). Daha sonra her bir hasar sınırı için (3) bağıntısı ile kolon üst ucunun toplam yatay yerdeğiştirmesi (Δ_T) elde edilmiştir (Paulay ve Priestley, 1992) (Tablo 3).



Şekil 8:
Kolon elemanlara ait teorik moment–eğrilik bağıntıları

$$\Delta_T = \Delta_y + \Delta_p = \frac{\chi_y L_c^2}{3} + \chi_p L_p L_c \qquad (3)$$

Burada, Δ_y kesitte akmanın oluştuğu andaki (veya eşdeğer akma eğriliğindeki) tepe yerdeğiştirmesini (elastik yatay yerdeğiştirmesi), Δ_p plastik yatay yerdeğiştirmeyi, L_c kolon yüksekliğini göstermektedir (Şekil 9). Bu bağıntıya göre plastik mafsal oluşumundan sonra kolonun doğrusal olduğu kabul edilmekte, ayrıca uzama ve kayma şekildeğiştirmelerinin elastik ve plastik uç yerdeğiştirmesi üzerindeki etkileri ihmal edilmektedir.



Şekil 9:
Konsol kolonda elastik ve plastik yatay uç yerdeğiştirmeleri

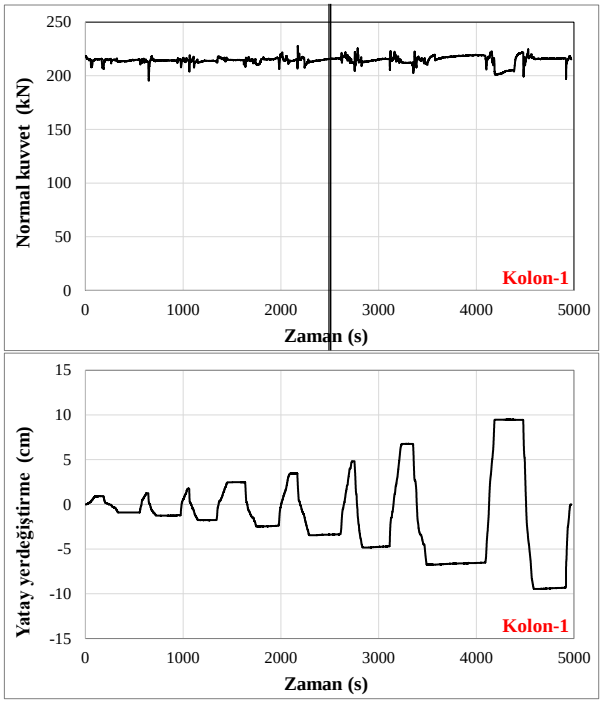
Tablo 3. Hasar sınırlarına karşılık gelen şekildeğiştirme ve yerdeğiştirme değerleri

Kolon No	Hasar sınırı	ξ	ε_{ck}	ε_{cg}	χ_T (rad/m)	χ_p (rad/m)	θ_p (rad)	Δ_p (cm)	Δ_y (cm)	Δ_T (cm)
1	MN	0.0047	**-0.0035**	-0.0022	0.0398	0.0210	0.0026	0.43	1.66	2.09
	GV	0.0100	---	**-0.0077**	0.1027	0.0840	0.0105	1.71		3.37
	GÇ	0.0116	---	**-0.0098**	0.1243	0.1056	0.0132	2.15		3.81
2	MN	0.0052	**-0.0035**	-0.0024	0.0412	0.0224	0.0028	0.46	1.66	2.12
	GV	0.0180	---	**-0.0118**	0.1636	0.1448	0.0181	2.95		4.61
	GÇ	0.0220	---	**-0.0156**	0.2068	0.1880	0.0235	3.83		5.49
3	MN	0.0038	**-0.0035**	-0.0026	0.0345	0.0168	0.0021	0.34	1.57	1.91
	GV	0.0080	---	**-0.0077**	0.0842	0.0665	0.0083	1.35		2.93
	GÇ	0.0096	---	**-0.0098**	0.1044	0.0867	0.0108	1.77		3.34
4	MN	0.0033	**-0.0035**	-0.0023	0.0334	0.0157	0.0020	0.32	1.57	1.89
	GV	0.0114	---	**-0.0118**	0.1395	0.1218	0.0152	2.48		4.05
	GÇ	0.0145	---	**-0.0156**	0.1813	0.1636	0.0204	3.33		4.90

3.4. Kolon Hasar Sınırlarında Gözlenen Hasarlar

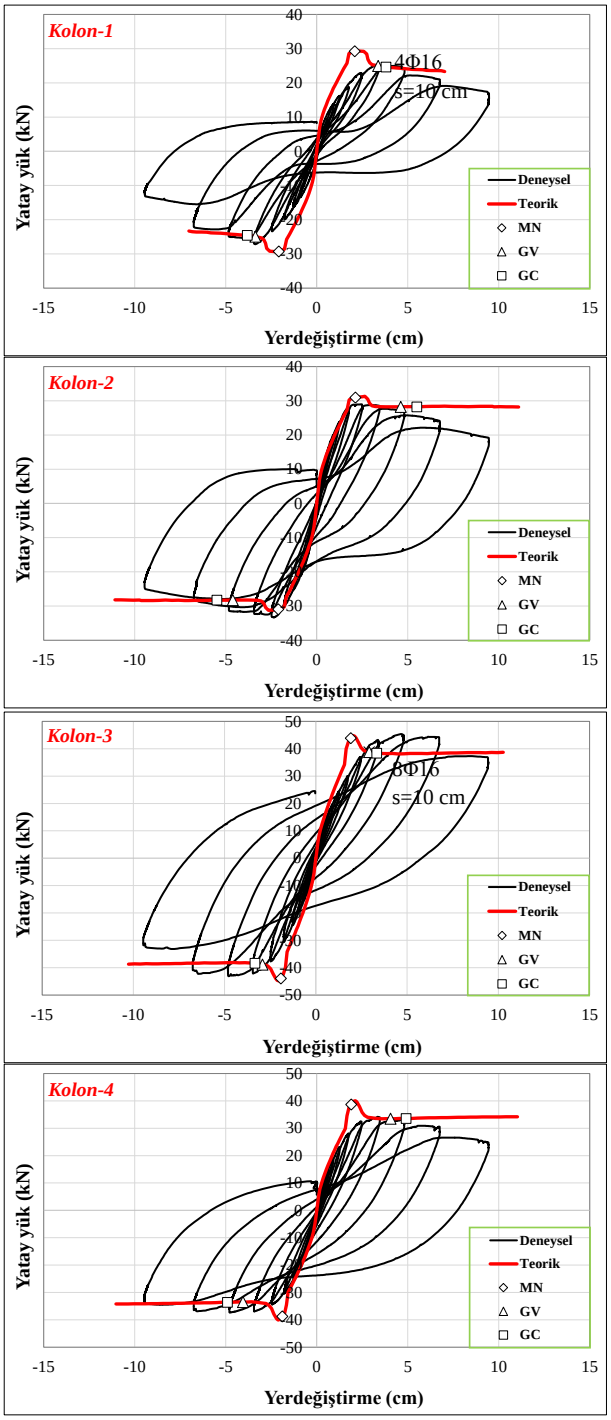
Çalışmada, farklı boyuna donatı ve sargı donatısı yerleşimine sahip betonarme kolonlara (Kolon 1–4) öngörülen yerdeğiştirme protokolü uygulanmış ve tersinir artan yatay yükler altındaki davranışları belirlenmiştir. Deneyler sırasında uygulanan sabit düşey yükün ve artan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi örnek olarak Kolon 1 için Şekil 10'da verilmiştir. Yük ölçerden okunan yatay yük değerleri, düşey yükün yatay bileşeninin etkisine bağlı olarak azaltılmıştır.

Tersinir yatay yükler altında deneylerden elde edilen *yatay yük–yerdeğiştirme* histeresis grafikleri ve *CUMBIA* (Montejo ve Kowalsky, 2007) bilgisayar programı yardımıyla belirlenen teorik *yatay yük–yerdeğiştirme* bağıntıları Şekil 11'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kolon–temel birleşiminden itibaren 10–12.5 cm'lik bölgede belirlenen ortalama eğriliklerin moment ile değişimleri ve teorik olarak belirlenen *moment–eğrilik* bağıntıları incelenen kolon elemanlar için Şekil 12'de verilmiştir. Bu grafikler üzerinde, hasar sınır değerlerine (MN, GV, GÇ) karşılık gelen yatay yerdeğiştirme ve eğrilik değerleri de işaretlenmiştir (Şekil 11–12).



Şekil 10:
Kolon 1 için deney süresince düşey yük ve yatay yerdeğiştirmenin değişimi

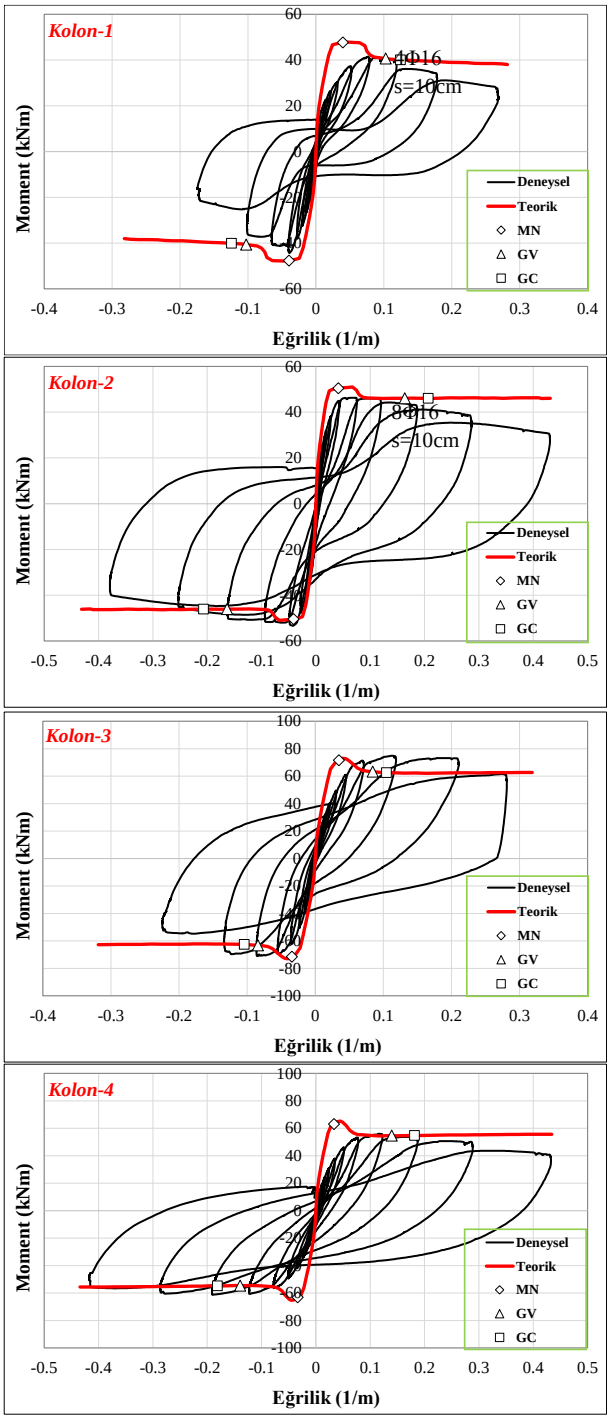
4Φ16
s=20 cm



8Φ16
s=20 cm

Şekil 11:
İncelenen kolon elemanlara ait yatay yük–yerdeğiştirme bağıntıları ve hasar sınırları

4Φ16
s=20cm



8Φ16
s=20cm

Şekil 12:
İncelenen kolon elemanlara ait moment–eğrilik bağıntıları ve hasar sınırları

Şekil 11–12'den görüleceği üzere, teorik olarak öngörülen *yatay yük–yerdeğiştirme* ve *moment–eğrilik* davranışları genel olarak deney sonuçları ile uyumlu elde edilmiştir. Kolon–temel birleşiminde oluşan soğuk derzdeki ayrılmalar nedeniyle deneyden elde edilen plastikleşme (akma) öncesi rijitlikler, teorik rijitliklere göre daha düşük elde edilmiştir. Buna bağlı olarak, kabuk betonu dökülmesi nedeniyle oluşan dayanım azalmalarının oluştuğu bölgeler, tekrarlı yüklerin de etkisiyle teorik sonuçlardan farklı elde edilmiştir. Birleşim

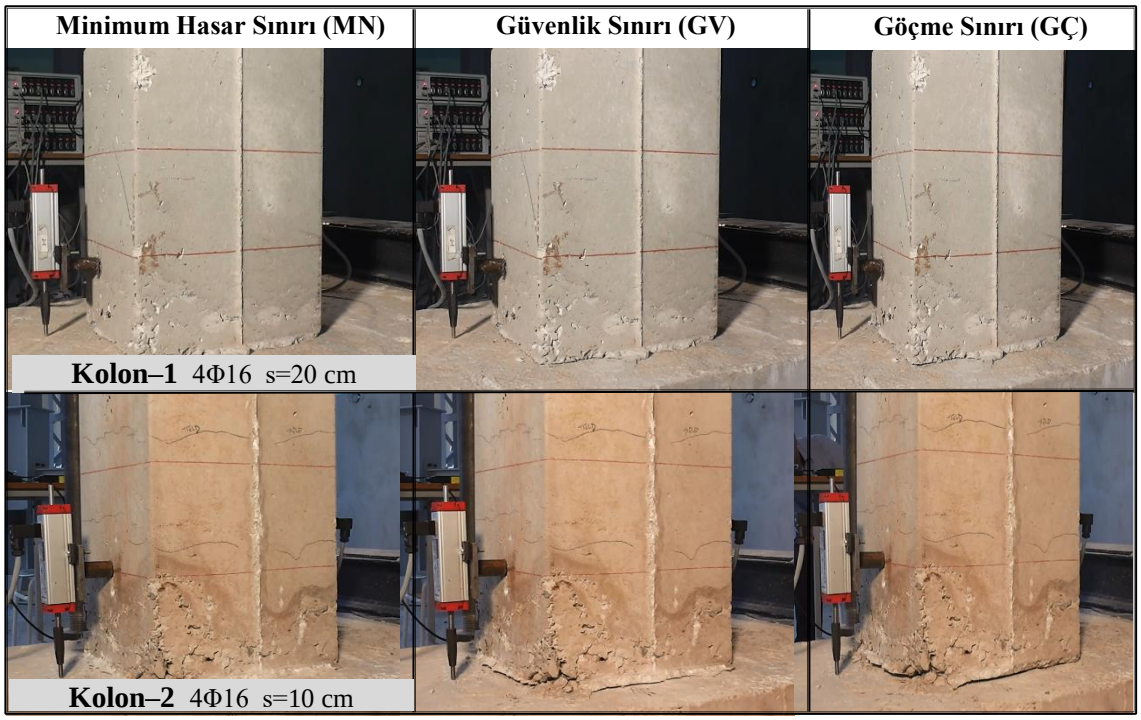
bölgesindeki hasarların yayıldığı bölgenin uzunluğunu gözleyebilmek amacıyla temel yüzeyinden itibaren 12.5 cm ve 25 cm'lik yüksekliklere birer çizgi çizilmiştir.

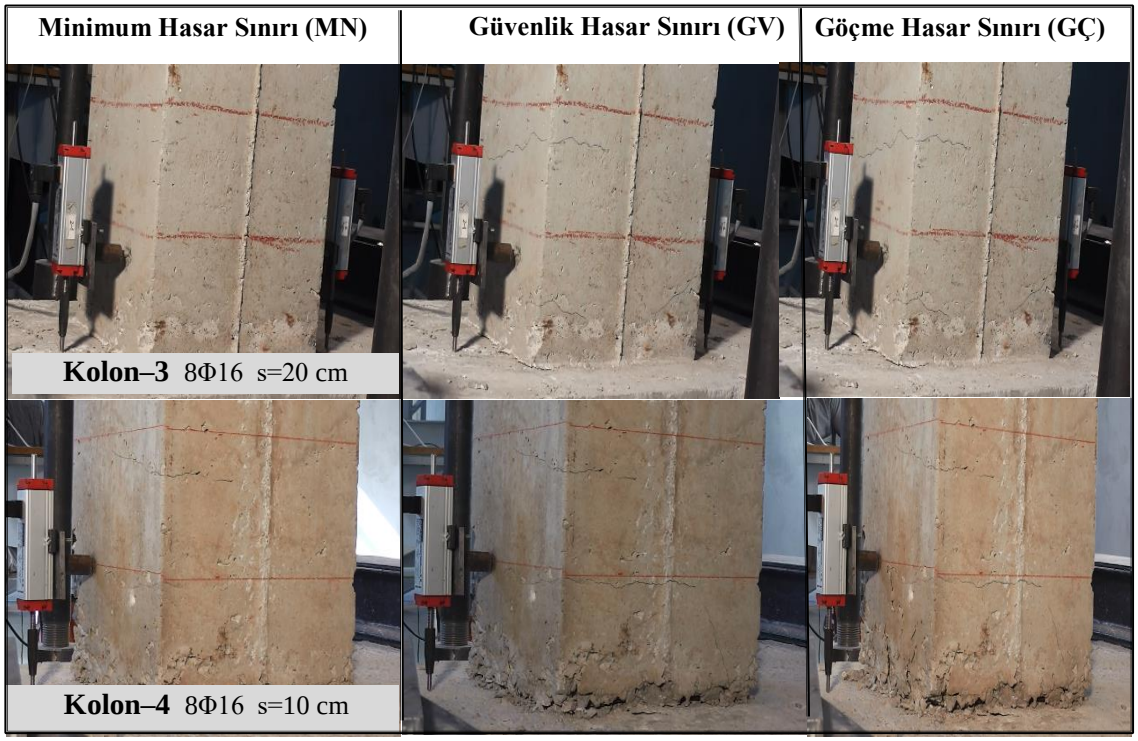
DBYBHY'de tanımlanan *minimum hasar sınırına* ulaşıldığında; incelenen kolonlarda hasar düzeyi bakımından herhangi bir farklılık gözlenmemiştir. Genel olarak, temel yüzeyinden itibaren 30 cm'ye kadar yayılabilen kılcal çatlakların oluştuğu ve kolon–temel birleşimindeki soğuk derzde kalınlığı yaklaşık 0.5 mm'ye ulaşan ayrılmalar meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 13). Buna karşılık betonda gözle görülür herhangi bir ezilme gerçekleşmemiştir (Şekil 13). Tüm kolonlarda yaklaşık %1.2'lik kolon göreli öteleme oranında bu hasar sınırına ulaşılmıştır. Bu hasar düzeyine, Kolon 1 ve Kolon 3'de moment / yatay yük taşıma kapasitesinin altındaki değerlerde ulaşılmış, Kolon 2 ve Kolon 4'de ise yaklaşık moment / yatay yük taşıma kapasitesinde ulaşılmıştır (Şekil 11–12).

Güvenlik hasar sınırına ulaşıldığında; minimum hasar sınırında gözlenen çatlakların kalınlaştığı ve derinleştiği gözlenmiştir. Kolon–temel birleşiminde oluşan ayrılmaların Kolon 1 ve Kolon 2'de 1.0–2.0 mm değerlerine ulaştığı, Kolon 3 ve Kolon 4'de ise 0.5–1.0 mm değerlerine ulaştığı gözlenmiştir. Kabuk betonunda hafif ezilmelerin başladığı görülmüş ancak önemli bir dökülme gerçekleşmemiştir (Şekil 13). Sargı yetersizliği fazla olan Kolon 1 ve Kolon 3'de sırasıyla %2.1 ve %1.8'lik kolon göreli öteleme oranlarında bu hasar sınırına ulaşılırken, sargı yetersizliği daha az olan Kolon 2 ve Kolon 4'de sırasıyla %2.9 ve %2.5'luk kolon göreli öteleme oranlarında bu hasar sınırına ulaşılmıştır. *Güvenlik hasar sınırında*, Kolon 1 ve Kolon 2'de %5'i aşmayan dayanım (yatay yük kapasitesi) azalmaları gözlenmiş, diğer elemanların yatay yük kapasitelerinde herhangi bir azalma gözlenmemiştir (Şekil 11–12).

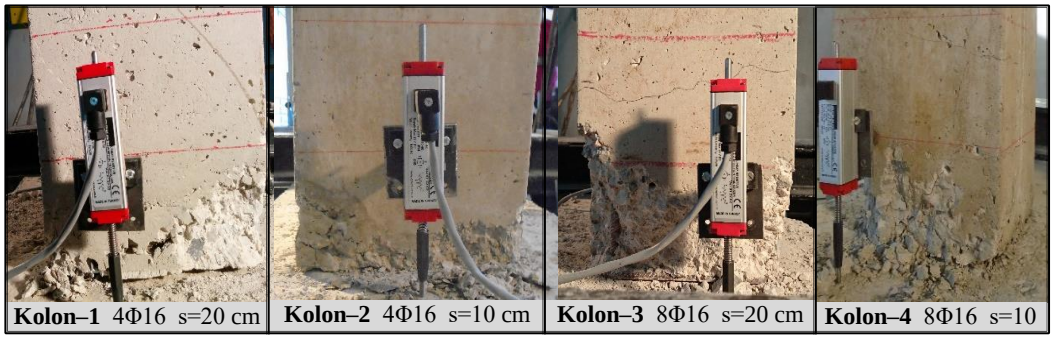
Göçme hasar sınırına ulaşıldığında; elemanlarda gözlenen hasar düzeyinde önemli bir değişiklik olmamıştır. Bunun sebebi güvenlik ve göçme sınırlarına karşılık gelen tepe yerdeğiştirmelerinin birbirine yakın olmasıdır. Özellikle sargı yetersizliği fazla olan elemanlarda bu iki hasar sınır değeri çok yakın değerler almaktadır. Tüm elemanlarda kabuk betonundaki ezilmeler bir miktar artmış ancak önemli bir dökülme ve donatıda burkulma gerçekleşmemiştir (Şekil 13). Bu hasar sınırında, Kolon 1 ve Kolon 2'de %10'a yaklaşan oranda dayanım (yatay yük kapasitesi) azalmaları gözlenmiş, diğer elemanların yatay yük kapasitelerinde herhangi bir azalma gözlenmemiştir (Şekil 11–12). *Göçme hasar sınırında* en düşük kolon göreli ötelemesi oranı Kolon 3'de %2.1, en büyük ise Kolon 2'de %3.4 olarak elde edilmiştir.

Tüm kolon elemanlarda çekme hasarları genel olarak soğuk derzin bulunduğu kesitte yoğunlaşmış ve gözle görünür çatlaklar yaklaşık 30 cm'lik bölgede oluşmuştur. Basınç etkisindeki ezilme hasarları ise temel yüzünden itibaren yaklaşık 15 cm'lik bir bölgede yoğunlaşmıştır (Şekil 13). İncelenen elemanlarda, kabuk betonu dökülmeleri vb. büyük hasarlar ve taşıma kapasitesindeki önemli dayanım azalmaları *göçme sınırından* sonra (yaklaşık %4.2'lik kolon göreli öteleme oranı) başlamıştır (Şekil 14). Bu nedenle sargı donatılarının ve boyuna donatının sargılama ve boyuna donatı burkulmaları üzerindeki etkileri bu öteleme değerinden sonra başlamıştır. Buna bağlı olarak, sargı yetersizliği fazla olan elemanlarda %4.2'lik öteleme değerinden sonra daha büyük dayanım azalmaları gözlenirken, beklenildiği gibi, sargı donatısı fazla olan elemanlarda daha düşük dayanım azalmaları gözlenmiştir (Şekil 11).





Şekil 13:
DBYBHY'de öngörülen hasar sınırlarına karşı gelen kolon hasar durumları



Şekil 14:
İncelenen kolonlarda % 5.0 göreli öteleme değerine karşılık gelen hasar durumları

4. SONUÇLAR

Çalışmada, Türkiye Deprem Yönetmeliğinde öngörülen şekildeğiştirme esaslı hasar sınırları kolon elemanlar üzerinde deneysel olarak incelenmiştir. Bunun için düşük beton kalitesine sahip, iki farklı düzeyde sargı donatısı yetersizliği bulunan ve iki farklı boyuna donatı oranına sahip dört adet konsol kolon elemanı test edilmiştir. Kolonlar uygulamada çoğunlukla yapıldığı gibi birleşim bölgesinde soğuk derz oluşmasına sebep olan iki ayrı döküm ile imal edilmiştir. Böylece soğuk derzin de hasar sınırlarına olan etkisi çalışmada gözönüne alınmıştır. Kolonlara sabit eksenel yük altında, tersinir artan yatay yükler uygulanmıştır. DBYBHY'deki hasar sınırlarını tanımlayan birim şekildeğiştirme değerlerine karşılık gelen kolon tepe yerdeğiştirmeleri teorik olarak belirlenmiş ve deneysel sonuçlardan bu yerdeğiştirme değerlerindeki hasar düzeyleri değerlendirilmiştir.

Testler sonucunda, incelenen elemanlarda, yönetmelikteki *minimum hasar sınırına* karşılık gelen hasarların genel olarak kalıcı hasarlar olmadığı ve yönetmelik öngörülen kullanıma devam şartını sağlayacak mertebede olduğu görülmüştür. Elemanlardaki sargı donatısı ve boyuna donatı farkları bu hasar düzeyinde herhangi bir farklılık yaratmamıştır.

Yönetmelikteki *güvenlik sınırına* karşılık gelen hasarların kalıcı hasarlar olduğu, ancak bunların önemli bir dayanım azalmasına yol açmayacak düzeyde kaldığı belirlenmiştir. Elemanlardaki sargı donatısı ve boyuna donatı farkları, gözlenen hasarlar bakımından önemli bir etki oluşturmamıştır. Ancak boyuna donatı oranı düşük olan kolonlarda %5'i geçmeyen hafif dayanım azalmaları gözlenmiştir.

Yönetmelikteki *göçme sınırına* karşılık gelen hasarların, genel olarak, *güvenlik sınırındaki* hasarlara benzer olduğu gözlenmiştir. Bu durum hasar sınırını belirleyen beton şekildeğiştirmesi değerlerinin birbirine yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Bu hasar sınırında boyuna donatı oranı düşük olan kolonlardaki dayanım azalması %10 mertebesine ulaşmıştır. Diğer elemanlarda ise herhangi bir dayanım azalması gözlenmemiştir. Yüksek boyuna donatı oranının yük taşıma kapasitesine, sünekliğe ve beton sargılanmasına olan katkısı bu davranışta etkili olmaktadır. Bu hasar düzeyinde de sargı donatısı oranının etkisi net olarak gözlenmemiştir.

İncelenen elemanlarda, kabuk betonu dökülmeleri vb. büyük hasarlar ve taşıma kapasitesindeki önemli dayanım azalmaları göçme sınırından sonra başlamıştır. Bu nedenle sargı donatılarının ve boyuna donatının sargılama ve boyuna donatı burkulmalarına olan etkileri göçme sınırından sonra gözlenmiştir.

Tüm kolon elemanlarında çekme hasarları genel olarak soğuk derzin bulunduğu kesitte yoğunlaşmış ve gözle görünür çatlaklar yaklaşık 30 cm'lik bölgede oluşmuştur. Basınç etkisindeki ezilme hasarları ise temel yüzünden itibaren yaklaşık 15 cm'lik bir bölgede yoğunlaşmıştır.

Sonuç olarak, Türkiye Deprem Yönetmeliğinde verilen şekildeğiştirme esaslı hasar sınırlarının ve bunları belirlemede kullanılan hesap prosedürünün, çalışmada incelenen düşük

beton dayanımına sahip, sargı yetersizliği ve birleşim bölgesinde soğuk derzi bulunan kolon elemanlar için güvenilir sonuçlar verdiği söylenebilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Acun, B. ve Sucuoğlu, H. (2011). Betonarme kolonların şekildeğiştirme performans sınırlarının deneysel gözlemlerle değerlendirilmesi, *İMO Teknik Dergi,* 5523-5541.

2. ASCE/SEI 41-06, (2007). Seismic rehabilitation of existing buildings, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, Virginia.

3. CEN Eurocode–8, (2005). Design of structures for earthquake resistance–Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, Comité Européen de Normalisation, Bruxelles.

4. DBYBHY, (2007). Deprem bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.

5. Ekici, E. (2011). Comparison of observed structural damage and code given structural performance limits, *Master of Science Thesis*, İstanbul Technical University Institute of Science and Technology, İstanbul.

6. Kazaz, I., Gülkan, P. and Yakut, A. (2012). Performance limits for structural walls: An analytical perspective, *Engineering Structures*, 43 105–119. doi:10.1016/j.engstruct. 2012.05.011

7. King, D.J., Priestley, M.J.N. and Park, R. (1986). Computer programs for concrete column design, *Research Report 86/12*, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand.

8. Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. (1988a). Theoretical stress-strain model for confined concrete, *ASCE Journal of the Structural Division*, 114(8), 1827-1849.

9. Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. (1988b). Observed stress-strain behavior of confined concrete, *ASCE Journal of the Structural Division*, 114(8), 1804-1826.

10. Montejo, L.A. and Kowalsky, M.J. (2007). CUMBIA-Set of codes for the analysis of reinforced concrete members, *Technical Report No: IS-07-01*, CFL, North Carolina State University, Raleigh, NC.

11. Paulay, T. and Priestley, M.J.N. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley and Sons, New York.

12. Priestley, M.J.N. (1993). Myths and fallacies in earthquake engineering – conflicts between design and reality, *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 26(3), 329-341.

13. Priestley, M.J.N., Seible, F. and Calvi, G.M. (1996). *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley and Sons, New York.

14. Priestley, M.J.N. and Calvi, G.M. (1997). Concepts and procedures for direct displacement-based design and assessment, *Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes: Proceedings of International Conference at Bled*, Slovenia. A.A. Balkema, Rotterdam/Brookfield.

15. Priestley, M.J.N. and Kowalsky, M.J. (2000). Direct displacement-based seismic design of concrete buildings, *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 33(4), 421-444.

16. Priestley, M.J.N., Calvi, G.M. and Kowalsky, M.J. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structures*, IUSS Press, Pavia, Italy.

17. Özal, A.K. (2008). Evaluation of deformation capacity criteria of Eurocode 8, *Master of Science Thesis*, The Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, İstanbul.

18. Solmaz, T. (2010). Evaluation of performance based displacement limits for reinforced concrete columns under flexure, *Master of Science Thesis*, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara.