

Düşük Dayanımlı Betonla Üretilen Kolonlarda Kesit Hasar Sınırlarının TBDY 2018'e göre Deneysel Olarak İncelenmesi

Hasan ELÇİ*

**Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balıkesir
(ORCID: [0000-0002-7439-3404](https://orcid.org/0000-0002-7439-3404))*

Öz

Türkiye'de riskli yapı olarak değerlendirilebilecek eski betonarme binaların beton dayanımları çok düşüktür. Çalışmada, bu tür binalarda bulunan betonarme kolonlar için TBDY 2018'de (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018) öngörülen hasar sınırları deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, düşük dayanımlı beton kullanılarak dört adet betonarme konsol kolon hazırlanmıştır. Kolonlar yüksek sabit eksenel yük ve artan tekrarlı tersinir yatay yükler altında %5 yer değiştirmeye kadar test edilmiştir. Deneysel sonuçlarından, kolonların yatay yük-yer değiştirme ve moment-eğrilik diyagramları elde edilmiştir. TBDY 2018'de belirtilen; plastik dönme kapasitesine, beton ve çelik şekil değiştirmesine bağlı olarak hasar sınırları tespit edilmiştir. Bu hasar sınırlarına karşılık gelen kolon hasarları gözlenmiş ve değerlendirilmiştir. Sınırlı Hasar (SH) sınırına ulaşıldığında, hasarlar genellikle kılcal eğilme çatlakları şeklinde oluşmuş ve sınırlı miktarda elastik ötesi davranış gözlenmiştir. Kontrollü Hasar (KH) sınırında kolon kabuk betonlarında ezilme başlamış ancak, bir kolon hariç, dayanım kaybı olmamıştır. Göçme Öncesi Hasar (GÖ) sınırında, kalıcı hasarlar meydana gelmiş ve kabuk betonunu dökülen iki kolonda %10'a kadar dayanım kaybı gözlenmiştir. GÖ hasar sınırından sonra büyük hasarlar ve taşıma kapasitesindeki önemli azalmalar meydana gelmiştir. Hasarlar TBDY 2018'de plastik mafsallık olarak tanımlanan $L_p=0.5h$ uzunluğunda bir bölgede yoğunlaşmıştır. Bu karşılaştırmalara göre, TBDY 2018'deki değerlendirme yönteminin yüksek eksenel yük etkisindeki düşük beton dayanımına sahip kolon elemanların hasar sınırlarını belirlemede güvenilir sonuçlar verdiği söylenebilir.

Anahtar kelimeler: Betonarme kolon, Hasar sınırları, Doğrusal olmayan analiz, Moment-eğrilik, Plastik dönme.

Experimental Investigation of Section Damage Limits for Reinforced Columns with Low Strength Concrete According to TBSC 2018

Abstract

The concrete compression strength of old-type reinforced concrete (RC) buildings, which can be evaluated as vulnerable structures in Turkey, is considerably low. In the study, the damage limits according to TBSC 2018 (Turkish Building Seismic Code 2018) for RC columns in such buildings were investigated experimentally. For this purpose, four RC cantilever column specimens were casted with low strength concrete. Test columns were tested up to 5% drift ratio under relatively high constant axial load and cyclic lateral loads. The experimental lateral load-displacement and moment-curvature curves of the columns were obtained. According to TBSC 2018; damage limits were determined depending on a calculated plastic rotation capacity and material strains of concrete and reinforcing steel. Observed damages on columns corresponding to calculated damage limits were evaluated. When the Limited Damage (LD) state was reached, the damages generally formed as hairline flexural cracks and a limited inelastic behavior was observed. At the Controlled Damage (CD) state, the cover concrete crushing onset, but lateral strength was not decreased except for one of the test column. Residual damage has occurred at the Collapse Prevention (CP) limit and approximately 10% strength loss has been observed in two of test columns due to the spalling of cover concrete. Beyond the CP damage limit, major damage and significant strength loss occurred. The damage accumulated in the length of $L_p=0.5h$ defined as the plastic hinge length in TBSC 2018. According to experimental and analytical comparisons, it can be said that the damage limits of TBSC 2018 provides reliable predictions for RC columns with low concrete strength under the effect of high axial load.

Keywords: Reinforced concrete column, Damage limits, Nonlinear analysis, Moment-curvature, Plastic rotation.

*Sorumlu yazar: helci@balikesir.edu.tr

Geliş Tarihi: 14.06.2021, Kabul Tarihi: 12.08.2021

1. Giriş

Özellikle aktif deprem kuşakları üzerinde bulunan ülkelerde depremsel etkiler çok sık yaşanmaktadır. Bu etkiler nedeniyle oluşabilecek can ve mal kayıplarının en aza indirilebilmesi için, yapıların yönetmeliklerde belirtilen kurallara göre tasarlanması ve imalatlarının bu tasarıma göre yapılması gerekmektedir.

DBYBHY 2007'nin (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007) yürürlüğe girmesiyle, mevcut betonarme binaların deprem güvenliklerinin belirlenmesinde performans dayalı değerlendirme yöntemi kullanılmaya başlanmıştır. TBDY 2018 ile bu değerlendirme yönteminin yeni yapılacak binaların tasarımında da uygulanması zorunlu hale gelmiştir [1, 2]. TBDY 2018'de; yeni yapılacak veya mevcut binalar için performans hedefleri ve uygulanacak değerlendirme/tasarım yaklaşımları verilmiştir. Buna göre, bina türü yapıların deprem performanslarının değerlendirilmesi için dayanım esaslı veya şekil değiştirme esaslı yöntemler kullanılabilir [2].

Malzemenin elastik ötesi davranışını hesaba katmaya olanak sağladığından, şekil değiştirme esaslı tasarım ve değerlendirme yöntemi, dayanım esaslı tasarım yöntemine göre daha avantajlıdır. Şekil değiştirme esaslı tasarım ve değerlendirme yönteminde, sünek davranışa ilişkin şekil değiştirme talepleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet talepleri hesaplanır. Böylece, deprem etkisiyle oluşabilecek yapısal hasarlar gerçeğe yakın ve ayrıntılı olarak öngörülebilir [3-8].

Deprem kuvvetlerinin taşınması ve temele aktarılmasında hayati öneme sahip olan kolonların davranışı yapı davranışını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, deprem etkileri altındaki kolonlarının davranışının bilinmesi ve bunun için de kolon hasar sınırlarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Performansın belirlenmesinde kullanılan hasar sınırları, kesitlerdeki plastik dönme miktarına göre hesaplanmaktadır. Plastik dönme miktarları ise yapıyı oluşturan malzemelerin şekil değiştirme sınırlarına göre belirlenmektedir. Bu konu ile ilgili olarak çok sayıda çalışma yapılmıştır. Deneysel ve analitik olarak yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar yönetmeliklerde verilen değerlerle karşılaştırılmıştır. [9-15].

Bazı araştırmacılar; malzeme modeli, eksenel yük oranı, boyuna donatı oranı, enine donatı oranı ve aralığı gibi değişkenlerin betonarme kolonların davranışına etkisini incelemiş; bu değişkenlere bağlı olarak elde edilen sonuçları karşılaştırmıştır [16-21].

Aksoy vd, farklı sayıda katlara sahip betonarme çerçeve tipi yapıların 3 farklı deprem yönetmeliğine göre, ETABS yazılımı ile analizini yapmıştır. Çalışmada, doğrusal olmayan performans analizi yapılarak yönetmeliklerin talep spektrumlarına göre performans puanları belirlenmiştir. Buna göre, ASCE 7-16'nın talep yer değiştirme değerleri her durumda Türk yönetmeliklerinden daha düşüktür. TBDY 2018, yüksek binalarda DBYBHY 2007'den daha az yer değiştirme talebini ortaya koymaktadır [22].

Dok vd, betonarme dikdörtgen ve dairesel kolonların moment-eğrilik ilişkisini sayısal olarak araştırmıştır. Moment-eğrilik ilişkisini etkileyen karşılaştırma parametreleri olarak betonun basınç dayanımı, uygulanan eksenel yük, boyuna ve enine donatı oranı seçilmiştir. Bu parametrelere göre, betonarme dikdörtgen ve dairesel kesitlerin eğrilik sünekliği ve etkin eğilme rijitliği belirlenmiştir [23].

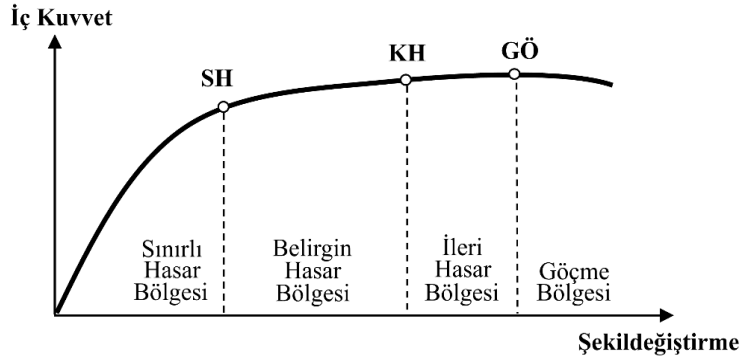
Foroughi vd, yapısal elemanların deprem performansının belirlenmesi için TBDY 2018'de betonarme elemanlar için öngörülen şekil değiştirme esaslı hasar sınırlarını analitik olarak incelemiştir. Farklı kesit ve donatı parametreleri kullanarak ve gerçek malzeme davranışları esas alınarak elde edilen moment-eğrilik ilişkilerinden kolon kesitlerinin elastik ötesi davranışları incelenmiştir. Betonarme kolonlarda, TBDY 2018'de verilen üç farklı hasar sınırına karşı gelen birim şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır [24, 25].

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'deki mevcut betonarme yapı stokunun önemli bir kısmını oluşturan düşük dayanımlı betonlarla yapılmış olan binalardaki kolonların hasar sınırlarının deneysel olarak değerlendirilmesidir. Bunun için, TBDY 2018'de betonarme elemanlar için öngörülen şekil değiştirme esaslı hasar sınırları deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla; düşük dayanımlı betonla üretilen, enine ve boyuna donatıları farklı dört adet konsol kolon hazırlanmıştır. Beton ve çeliğin şekil değiştirmeleri ve kesit dönmelerine bağlı olarak teorik çözümden elde edilen hasar seviyeleri kesit düzeyinde gözlenen hasarlarla karşılaştırılmıştır. Böylece TBDY 2018'de verilen hesap ve değerlendirme yönteminin yüksek eksenel yük etkisindeki düşük beton dayanımına sahip kolon elemanların hasar sınırlarını belirlemede güvenilirliği deneysel olarak belirlenmeye çalışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Hasar Bölgelerinin Belirlenmesi

TBDY 2018’de, gevrek hasar gören elemanlar hariç, elastik ötesi davranış için üç hasar sınırı verilmiştir. Bu hasar sınırları beton ve donatı şekildeğiştirmelerine ve kesit dönmelerine bağlı olarak belirlenmektedir. Sınırlı Hasar (SH), kesitteki elastik ötesi davranışın sınırlı miktarda kaldığı durumdur. Kontrollü Hasar (KH), elastik ötesi davranışın kesit tarafından güvenle karşılanabildiği durumdur. Kesitte ileri düzeyde elastik ötesi davranışı belirleyen sınır ise Göçme Öncesi Hasar (GÖ) sınırı olarak tanımlanmaktadır. Bu hasar sınırları arasında kalan bölgelere hasar bölgesi denir. Hasar bölgeleri, Sınırlı Hasar Bölgesi, Belirgin Hasar Bölgesi ve İleri Hasar Bölgesi olarak adlandırılır. Hasar sınırı GÖ’yü aşan kesitler göçmüş sayılır (Şekil 1) [2].



Şekil 1. Kesit hasar bölgeleri [2]

TBDY 2018’de elastik ötesi davranışın modellenmesi için iki farklı yöntem önerilmektedir. Bunlar, yayılı plastik davranış modeli ve yığılı plastik davranış modelidir. Bu çalışmada, pratik olması nedeniyle çoğunlukla tercih edilen Yığılı Plastik Davranış Modellemesi kullanılmıştır.

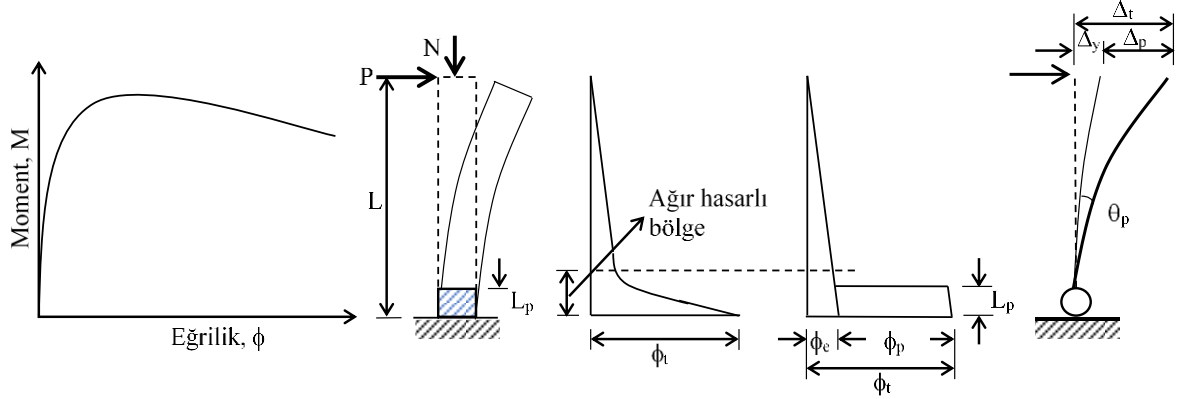
Yığılı plastik davranış (Plastik Mafsallı) modelinde iç kuvvetlerin plastik kapasitelerine eriştiği sonlu uzunluktaki bölgeler boyunca, plastik şekildeğiştirmelerin düzgün yayılı biçimde oluştuğu varsayılmaktadır. Plastik mafsal boyu olarak adlandırılan plastik şekildeğiştirme bölgesinin uzunluğu (L_p), çalışan doğrultudaki kesit boyutu h ’nin yarısına eşit ($L_p = 0.5h$) alınmaktadır. Dikdörtgen kesitli betonarme sünek kesitlerde, hasar sınırları için izin verilen şekildeğiştirme ve kesit dönmeleri Tablo 1’de verilmiştir [2].

Tablo 1. Farklı performans düzeylerine göre plastik dönme ve şekildeğiştirmeler [2]

	Göçmenim Önlenmesi (GÖ)	Kontrollü Hasar (KH)	Sınırlı Hasar (SH)
Plastik Dönme	$\theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3} \left[(\phi_u - \phi_y) L_p \left(1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s} \right) + 4.5 \phi_u d_b \right]$	$\theta_p^{(KH)} = 0.75 \theta_p^{(GÖ)}$	$\theta_p^{(SH)} = 0$
İzin verilen sargılı beton birim kısalması	$\varepsilon_c^{(GÖ)} = 0.0035 + 0.04 \sqrt{\omega_{we}} \leq 0.18$	$\varepsilon_c^{(KH)} = 0.75 \varepsilon_c^{(GÖ)}$	$\varepsilon_c^{(SH)} = 0.0025$
İzin verilen donatı birim şekildeğiştirmesi	$\varepsilon_s^{(GÖ)} = 0.4 \varepsilon_{su}$	$\varepsilon_s^{(KH)} = 0.75 \varepsilon_s^{(GÖ)}$	$\varepsilon_s^{(SH)} = 0.0075$

Tablo 1’de; ϕ_u , göçme öncesi toplam eğriliktir. TBDY 2018’de verilen malzeme modelleri kullanılarak ve kesitteki aksenal yük dikkate alınarak yapılan analizden elde edilir. ϕ_y akma eğriliği olup plastik deformasyonların başladığı sınırı göstermektedir. L_p plastik şekildeğiştirmelerin meydana geldiği bölgenin uzunluğu, L_s kesme açıklığı, d_b çekmede ortalama boyuna donatı çapı, ω_{we} etkin sargı donatısının mekanik donatı oranıdır. Etkin kesit rijitlikleri kullanılarak yapılan hesapta SH performans düzeyi için taşıyıcı sistemde plastik mafsal oluşumuna izin verilmez [2].

Yığılı plastik davranış modelinde, plastik mafsalsal bölgesi dışında doğrusal elastik davranışın geçerli olduğu kabul edilir. Bu nedenle, plastik mafsalsal bölgesinde eğriliğin aniden arttığı kabul edilir (Şekil 2).



Şekil 2. Eğrilik diyagramı ve yer değiştirmeler

Şekil 2’de gösterilen idealleştirme yapıldığında plastik mafsaldaki dönme; eğrilik ile plastik mafsalsal uzunluğunun çarpımına eşit olarak Denklem 1 ile hesaplanır. ϕ eğriliği için toplam yatay yer değiştirme ise Denklem 2 ile hesaplanır [26]. Denklem 2, TBDY 2018’de verilen yöntem (yığılı plastisite, kesit moment-eğrilik analizi, plastik mafsalsal uzunluğu kabulü vb.) ve yapı mekaniğinin temel ilkeleri kullanılarak elde edilmiştir.

$$\theta_p = \phi_p L_p \quad (1)$$

$$\Delta_t = \Delta_y + \Delta_p = \frac{\phi_y L^2}{3} + (\phi - \phi_y) L_p (L - 0.5 L_p) \quad (2)$$

Denklem 2’de Δ_y , Δ_p ve Δ_t sırasıyla elastik, plastik ve toplam yer değiştirmeyi göstermektedir. Denklem 2’ye göre; plastik mafsalsal oluşuktan sonra kolonun doğrusal davrandığı kabul edilmektedir. Uzama ve kayma deformasyonlarının uç yer değiştirmesi üzerindeki etkileri ihmal edilmektedir.

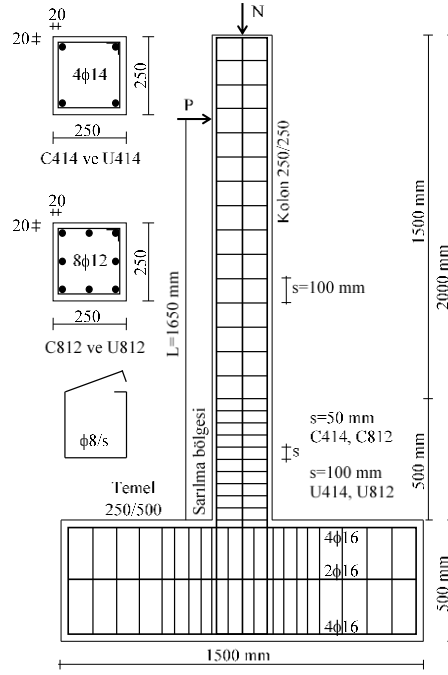
2.2. Deney Elemanlarının Özellikleri

Çalışmada kullanılan, düşük dayanımlı betonlarla üretilen dört kolonun kesit özellikleri Tablo 2’de, donatı detayları ve kolon boyutları Şekil 3’te verilmiştir. Kolon-temel birleşim bölgesinde soğuk derz oluşumunu engellemek için, deney elemanlarının kalıpları yatay konumda hazırlanmış ve donatılar yerleştirildikten sonra beton dökülmüştür. Kolon sarılma bölgesinde oluşacak çatlakların temele doğru ilerlemesini engellemek için temel üzerindeki ilk etriye kolonu başladığı noktaya yerleştirilmiştir.

Tablo 2’de numune adları, kolonların enine ve boyuna donatılarını tanımlayacak şekilde belirlenmiştir. Buna göre, C; 50 mm enine donatı aralığını, U; 100 mm enine donatı aralığını ifade etmektedir. C veya U harfinden sonraki ilk rakam boyuna donatı sayısını, son iki rakam ise boyuna donatı çapını göstermektedir.

Tablo 2. Numunelerin kesit özellikleri

Numune Adı	Boyutlar (mm)	Boyuna Donatı (Adet ϕ Çap)	Boyuna Donatı Oranı	Enine Donatı (ϕ Çap/Aralık)	Beton Basınç Dayanımı (MPa)
C414	250×250	4 ϕ 14	%0.99	ϕ 8/50	9.2
U414	250×250	4 ϕ 14	%0.99	ϕ 8/100	9.2
C812	250×250	8 ϕ 12	%1.45	ϕ 8/50	9.2
U812	250×250	8 ϕ 12	%1.45	ϕ 8/100	9.2



Şekil 3. Donatı detayları ve kolon boyutları [3]

Tablo 2’de görüldüğü gibi, iki farklı boyuna donatı düzenlemesi (4φ14 ve 8φ12) yapılmıştır. Seçilen kolon boyutları, 1998’den önceki deprem yönetmeliklerinde verilen minimum kolon boyutlarıdır. Kolonlarda en yaygın kullanılan boyuna donatı oranı ise %1-%2 aralığındadır. Çalışmada kullanılan kolonların etriye aralıkları 50 mm ve 100 mm olarak seçilmiştir. Bu şekilde sık veya normal aralıklı etriyenin kolon kesitlerinin hasar sınırları üzerine etkisinin görülmesi amaçlanmıştır. Kolon kesitlerinin Göçme Öncesi (GÖ) hasar sınırına ulaşmadan boyuna donatılarının burkulmaması için etriyeler çok seyrek aralıklarla yerleştirilmemiştir.

Türkiye’de mevcut betonarme binaların önemli bir kısmının beton kalitesi, yönetmelik ve standartlarda tanımlanan sınır değerlere dahi yaklaşmamaktadır. Türkiye’de riskli yapı olarak değerlendirilebilecek betonarme binaların beton dayanımları 5-15 MPa arasında değişmektedir [27, 28]. Bu nedenle kolonların hazırlanmasında da düşük dayanımlı beton kullanılmıştır. Kullanılan betonun basınç dayanımı, standart numuneler üzerinde yapılan tek eksenli basınç deneyleri ile elde edilmiş olup, $f_c=9.2$ MPa’dır. Bu dayanım, deprem riski altındaki eski betonarme yapıların ortalama basınç dayanımını yaklaşık olarak temsil etmektedir. Kullanılan donatıların mekanik özellikleri çekme deneyleri ile belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen ortalama değerler Tablo 3’te verilmiştir.

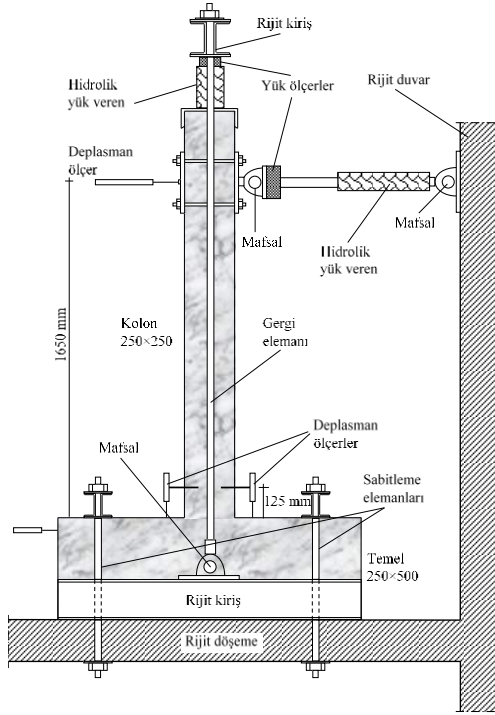
Tablo 3. Donatı çekme deneyi sonuçları

Donatı (mm)	E (GPa)	f_{sy} (MPa)	ϵ_{sy}	ϵ_{sh}	f_{su} (MPa)	ϵ_{su}
φ8	205	404	0.00197	0.011	631	0.139
φ12	200	444	0.00222	0.025	563	0.135
φ14	227	470	0.00207	0.017	647	0.123

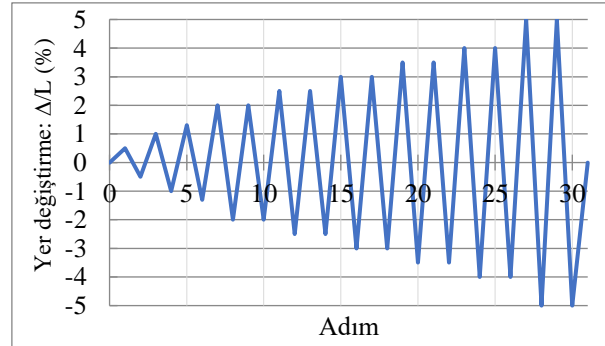
2.3. Deney Düzenegi ve Yükler

Kullanılan deney düzenegi Şekil 4’te verilmiştir. Yatay yük ve eksenel yük için 2 adet yük hücresi kullanılmıştır. Yük değerlerini ölçmek için hücrelerinin bulunduğu noktalara yük ölçerler yerleştirilmiştir. Deney düzeneginde toplam 4 adet potansiyometrik cetvel kullanılmıştır. Bunlarda bir tanesi yatay yükün uygulandığı noktadaki kolon yer değiştirmesini ölçmek için, iki tanesi kolon plastik mafsallık bölgesindeki eğriliği belirlemek, bir tanesi de temelde meydana gelebilecek yer değiştirmeleri kontrol etmek içindir. Deneyler süresince toplanan veriler veri toplama cihazı yardımıyla kaydedilmiştir.

Tekrarlı tersinir yatay yükler altında yapılan deneylerde sabit eksenel yük, $N_d=0.40A_c f_c=230$ kN olarak uygulanmıştır. Bu değer, TBDY 2018’de kolonlar için izin verilen maksimum düşey yüküdür [2]. Bütün deneylerde tekrarlı tersinir yatay yük olarak Şekil 5’te verilen yer değiştirme esaslı yükleme profili uygulanmıştır. Şekil 5’te, Δ yatay yükün uygulandığı noktadaki yer değiştirmeyi, L ise kesme açıklığını göstermektedir. Deney sırasında ilk olarak kolonlara eksenel yük uygulanmış daha sonra yükleme profiline uygun olarak yer değiştirme döngülerine başlanmıştır [29].



Şekil 4. Deney düzeneği [3]



Şekil 5. Yer değiştirme esaslı yükleme profili [29]

2.4. Kolonlarda Hasar Sınırlarının Belirlenmesi

Kolonlardaki hasar sınırlarını belirlemek için, XTRACT betonarme kesit analizi programı yardımıyla, moment-eğrilik diyagramları elde edilmiştir [30]. Analizlerde, deneylerden elde edilmiş olan gerçek malzeme dayanımları kullanılmıştır. XTRACT programında; sargılı ve sargısız beton için Mander vd. tarafından önerilen beton modeli [31,32], donatı için TBDY 2018’de verilen donatı modeli kullanılmıştır [2]. TBDY 2018’de verilen malzeme şekil değiştirmesine ve plastik dönme kapasitesine bağlı olarak hasar sınırları belirlenmiştir. Hasar sınırlarının belirlenmesinde esas olan birim şekil değiştirme değerleri Tablo 4’te koyu olarak gösterilmiştir [33].

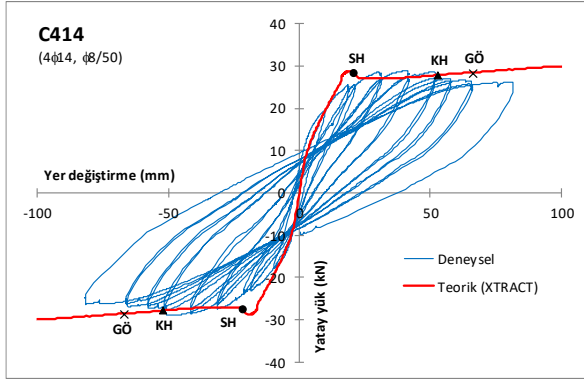
Tablo 4. Hasar sınırları, dönme, şekildeğiştirme ve yer değıştirmeler

Kolon Adı	Hasar Sınırı	ε_s (%)	ε_c (%)	$\phi_u(10^{-3})$ (rd/m)	$\phi_y(10^{-3})$ (rd/m)	$\theta_p(10^{-3})$ (rd)	Δ_y (mm)	Δ_p (mm)	Δ_t (mm)	Δ_t/L (%)
C414	GÖ	3.19	-1.80	262.7	20.05	30.49	18.2	48.4	66.6	4.03
	KH	2.39	-1.32	195.1		21.88		34.7	52.9	3.21
	SH	0.37	-0.25	32.5		1.56		2.5	20.7	1.25
U414	GÖ	1.60	-1.32	153.5	18.21	17.29	16.5	27.5	44.0	2.67
	KH	1.11	-0.99	110.2		11.50		18.3	34.8	2.11
	SH	0.29	-0.25	28.6		1.30		2.1	18.6	1.13
C812	GÖ	2.40	-1.80	219.2	21.78	23.72	19.8	37.6	57.4	3.48
	KH	1.66	-1.32	155.9		16.77		26.6	46.4	2.81
	SH	0.33	-0.25	30.5		1.09		1.7	21.5	1.30
U812	GÖ	1.57	-1.55	163.1	19.64	17.37	17.8	27.6	45.4	2.75
	KH	1.17	1.12	119.9		12.53		19.9	37.7	2.28
	SH	0.29	-0.25	28.1		1.06		1.7	19.5	1.18

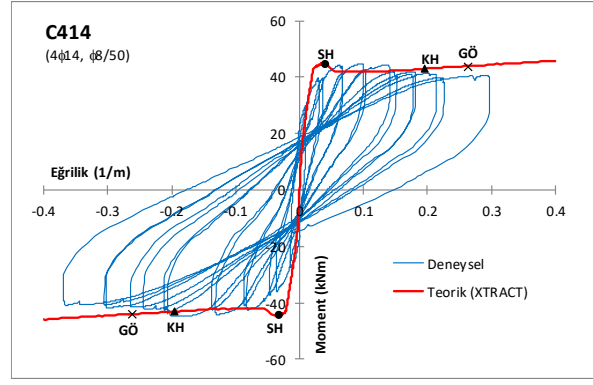
Tablo 4'te yer alan değerler, TBDY 2018 Bölüm 5.8.1'de verilen formüller ve Denklem 2 yardımıyla hesaplanmıştır. İlk olarak kesit ve malzeme bilgileri XTRACT kesit analizi programına girilerek 300 adımda moment-eğrilik ($M - \phi$) diyagramı elde edilmiştir. Elde edilen ($M - \phi$) diyagramı iki doğru olarak idealize edilmiş Eşdeğer akma eğriliği $\phi_y = 20.05 \times 10^{-3} \text{ rd/m}$ olarak program tarafından hesaplanmıştır. Çözümün her adımında, kolon kesitinin her noktasındaki gerilme ve şekildeğiştirme değerleri hesaplanmıştır. Kolon kesitinde, yönetmelikte verilen kesit hasar düzeylerine karşılık gelen şekildeğiştirme sınır değerleri için eğrilikler programdan alınmıştır. Buna göre kolon kesiti; $\phi_u = 0.2627 \text{ rd/m}$ eğriliği için GÖ hasar sınırına, $\phi = 0.1951 \text{ rd/m}$ eğriliği için KH hasar sınırına, $\phi = 3.25 \times 10^{-2} \text{ rd/m}$ eğriliği için SH hasar sınırına ulaşmıştır. Bu eğrilik değerleri ve Denklem 2 yardımıyla plastik mafsaldaki kesit dönmeleri ve kolon tepe noktasının yer değiştirmeleri hesaplanarak Tablo 4 oluşturulmuştur.

3. Bulgular ve Tartışma

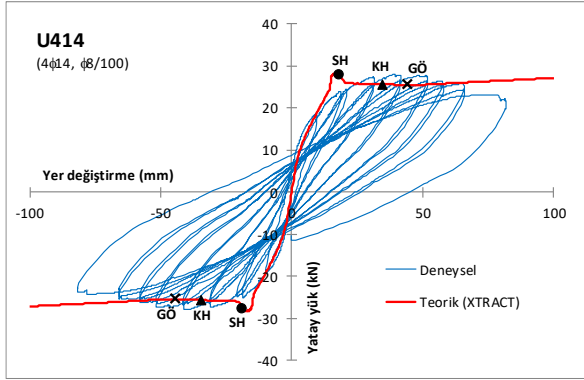
Çalışmada, aynı kesit ve beton dayanımına sahip ancak enine ve boyuna donatıları farklı 4 kolonun, Şekil 5'te verilen yükleme protokolü uygulanarak, sabit aksenal yük ve artan tersinir yatay yükler altındaki davranışı araştırılmıştır. Deneylerden ve XTRACT kesit analizi programından elde edilen yatay yük-yer değiştirme ve moment-eğrilik diyagramları karşılaştırmalı olarak Şekil 6'da verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi, teorik çözümlerden elde edilen sonuçlar ile deneylerden elde edilen sonuçlar genel olarak uyumludur. Sadece deneylerden elde edilen akma öncesi rijitlikler, eğilme momentinin en büyük değerini aldığı kolon-temel birleşim bölgesindeki ayrılmalar nedeniyle, teorik rijitliklere göre daha düşük çıkmıştır. Plastik mafsallarda şekildeğiştirme ve dönmelerden faydalanarak XTRACT programı yardımıyla elde edilen, hasar sınırları da (GÖ, KH, SH) Şekil 6 üzerinde işaretlenmiştir. Kolon plastik mafsallarda yerleştirilen potansiyometrik cetvellerin kolona bağlandığı bölgelerde betonun hasar görmesi nedeniyle moment-eğrilik diyagramları, yatay yük-yer değiştirme diyagramları kadar düzgün elde edilememiştir.



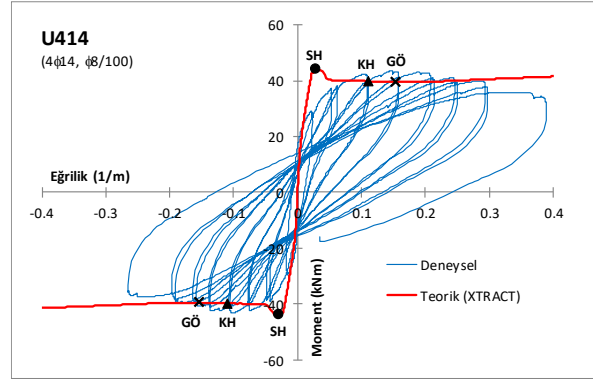
a.) C414 Kolonu P-Δ diyagramı



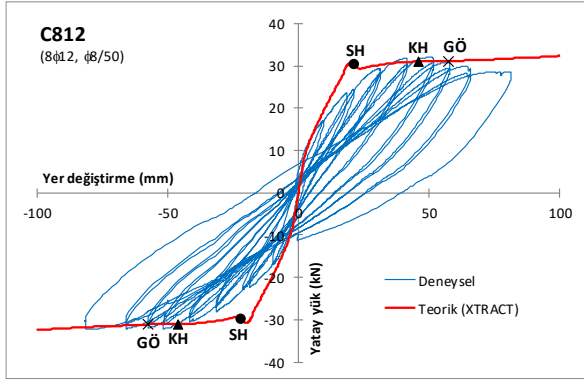
b.) C414 Kolonu M-φ diyagramı



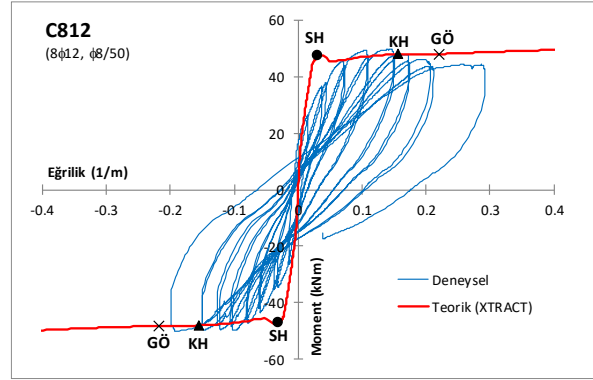
c.) U414 Kolonu P-Δ diyagramı



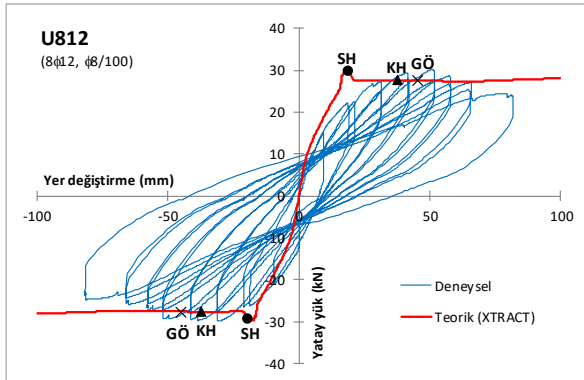
ç.) U414 Kolonu M-φ diyagramı



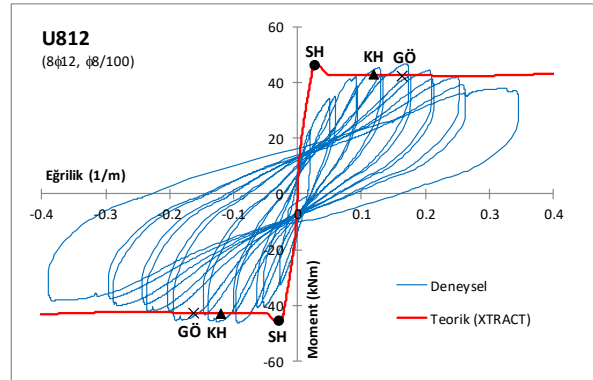
d.) C812 Kolonu P-Δ diyagramı



e.) C812 Kolonu M-φ diyagramı



f.) U812 Kolonu P-Δ diyagramı



g.) U812 Kolonu M-φ diyagramı

şekil 6. Kolonlara ait yatay yük-yer değiştirme ve moment-eğrilik diyagramları

Deneyler sırasında oluşan hasarların yerinin ve yayıldığı bölgenin daha iyi gözlemlenebilmesi için, kolon tabanından itibaren 125 mm ve 250 mm mesafede kolonlar üzerine yatay çizgiler çizilmiştir. TBDY 2018'de tanımlanan hasar sınırlarına ulaşıldığında elemanlarda oluşan hasarlar Şekil 7'de gösterilmiştir.

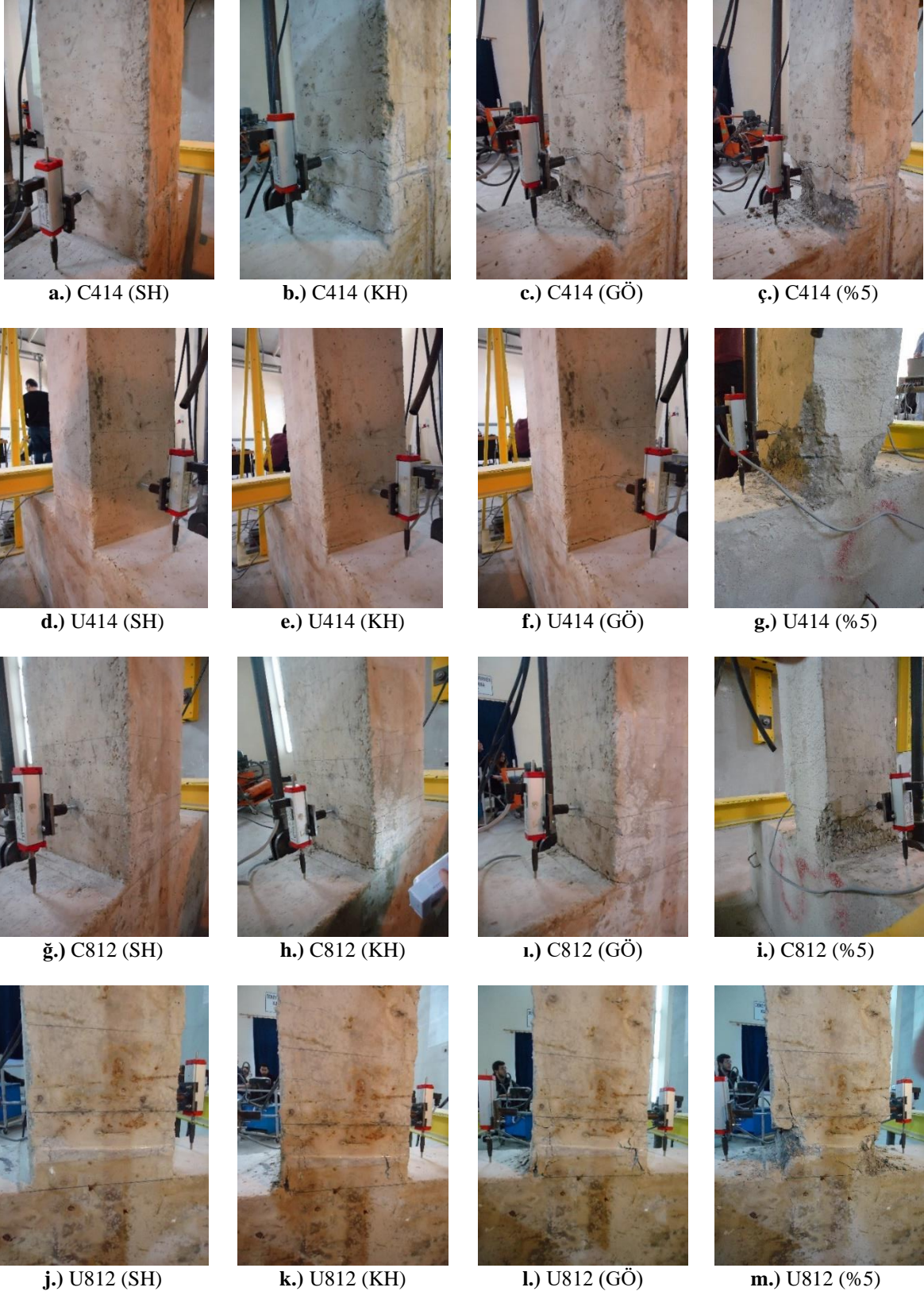
Sınırlı Hasar (SH) sınırına ulaşıldığında bütün kolonlar benzer şekilde ve düzeyde hasar görmüşlerdir. Hasarlar, genel olarak, kılcal çatlaklar şeklinde oluşmuş ve kolon tabanından itibaren 0-300 mm aralığında bir bölgede yoğunlaşmıştır. Oluşan çatlakların kolon tabanından itibaren yerleri yaklaşık olarak; C414 için 0, 130, 220, 300 mm (Şekil 7.a), U414 için 0, 130, 250 mm (Şekil 7.d), C812 için 0, 130 mm (Şekil 7.ğ), U812 için ise 0, 130 ve 200 mm (Şekil 7.j) olarak ölçülmüştür. En büyük çatlak, momentin maksimum olduğu kolon-temel birleşim bölgesinde oluşmuştur ve bu bölgedeki maksimum çatlak genişliği 0.5 mm'dir (Şekil 7). Bütün kolonlarda, bu hasar seviyesine kolonun yatay yük taşıma kapasitesinden daha düşük değerlerde ulaşılmıştır (Şekil 6). Bu hasar düzeyi için görel kolon yer değiştirmeleri %1.13-%1.30 aralığındadır (Tablo 4).

Kontrollü Hasar (KH) sınırına ulaşıldığında, kolonlardaki mevcut çatlakların genişlediği, bazı kolonlarda yeni çatlakların oluştuğu gözlenmiştir. C414 kolonunda mevcut çatlaklara ek olarak, plastik mafsallık bölgesinde (kolon tabanından itibaren 60 mm mesafede) 1 mm genişliğinde yeni bir çatlak oluşmuştur. 0 ve 130 mm mesafedeki mevcut çatlakların genişliği 2 mm'ye çıkmıştır. Kolon kabuk betonunda dökülmeler başlamıştır (Şekil 7.b). U414 kolonunda mevcut çatlak genişlikleri artarak yaklaşık 1 mm'ye ulaşmıştır (Şekil 7.e). C812 kolonunda 100 ve 250 mm mesafede yeni çatlaklar oluşmuştur. Kolon-temel birleşim bölgesindeki çatlak genişliği 2 mm'ye ulaşmıştır. Kabuk betonunda ezilme başlangıcı gözlenmiştir (Şekil 7.h). U812 kolonunda mevcut çatlaklara ek olarak 100 mm mesafede 0.5 mm kalınlığında yeni bir çatlak oluşmuş, kolon-temel birleşim bölgesindeki çatlak genişliği ise 2 mm'ye ulaşmıştır. Kabuk betonunda ezilmelerin başladığı gözlenmiştir (Şekil 7.k). Kabuk betonunda dökülmelerin başladığı C414 kolonunun yatay yük taşıma kapasitesinde %2.6'lık bir azalma olmuştur (Şekil 6.a). Bu hasar düzeyi için görel kolon yer değiştirmeleri %2.11-%3.21 aralığındadır (Tablo 4).

Göçme Öncesi Hasar (GÖ) sınırına ulaşıldığında, plastik mafsallık olarak tanımlanabilecek, kolon tabanından itibaren 130 mm'ye kadar olan bölgede bulunan çatlakların genişliklerinin sınırlı miktarda arttığı, diğer çatlakların genişliklerinin değişmediği gözlenmiştir. Bunun nedeni KH ve GÖ sınırlarına karşılık gelen kolon tepe yer değiştirmelerinin birbirlerine yakın olması ve artan plastik şekilde değiştirmelerdir. Bütün kolonlarda, betondaki ezilmeler daha görünür hale gelmiş, C414 ve U812 kolonlarının plastik mafsallık bölgesinde betonları kısmen dökülmüştür (Şekil 7.c, 7.i). Bu hasar sınırı için C414 kolonunun yatay yük taşıma kapasitesindeki azalma (dayanım kaybı) %10.0'a çıkmış (Şekil 6.a), C812 kolonunda ise %3.2 oranında bir dayanım kaybı gözlenmiştir (Şekil 6.d). Bu hasar düzeyi için görel kolon yer değiştirmeleri, sık etriyeli C414 ve C812 kolonları için sırasıyla %4.03 ve %3.48, normal etriyeli U414 ve U812 kolonları için sırasıyla %2.67 ve %2.75'tir (Tablo 4).

Görel kolon yer değiştirmeleri %5 oluncaya kadar deneye devam edilmiştir. %5 yer değiştirme oranına ulaşıldığında bütün kolonlarda, plastik mafsallık bölgesinde bulunan kabuk betonu dökülmüştür. Plastik mafsallık bölgesi dışında, genel olarak, bir yapısal hasar oluşmamıştır. Hiçbir kolonda boyuna donatı burkulması gözlenmemiştir (Şekil 7). Bu hasar sınırı için sık etriyeli C414 ve C812 kolonları için dayanım kaybı sırasıyla %10.3 ve %13.1 (Şekil 6.a, 6.d), normal etriyeli U414 ve U812 kolonları için dayanım kaybı sırasıyla ise %21.0 ve %25.7 olarak gözlenmiştir (Şekil 6.c, 6.f). Görüldüğü gibi sık etriyeli kolonlar daha sünek davrandığı için bu kolonlardaki dayanım kaybı daha azdır.

C414, U414, C812 ve U812 kolonlarının maksimum yatay yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 28.91, 27.86, 32.09 ve 30.28 kN olarak tespit edilmiştir. Artan boyuna donatı oranı yatay yük taşıma kapasitesine olumlu yönde katkı yapmıştır. Enine donatı aralığı ve boyuna donatı oranındaki değişimin kolonların yatay yük taşıma kapasitelerindeki değişime etkisinin sınırlı olmasının nedeni uygulanan eksenel yükün ($N_d=0.4A_c f_c$) şiddetidir.



Şekil 7. TBDY 2018’de verilen hasar sınırlarına göre kolon hasar durumları

4. Sonuç ve Öneriler

Normal dayanımlı betonlar için DBYBHY 2007 ve TBDY 2018’de verilen şekildeğiştirme esaslı hasar sınırları birbirine yakındır ve TBDY 2018, özellikle yüksek katlı yapılarda daha güvenli tarafta kalan deformasyon limitleri vermektedir [3, 22]. Ancak Türkiye’de mevcut betonarme binaların önemli bir kısmının beton dayanımı çok düşüktür. Bu çalışmada, beton dayanımları çok düşük olan betonarme kolonların hasar sınırları TBDY 2018’de verilen şekildeğiştirme esaslı sınırlarına göre deneysel olarak araştırılmıştır. Bunun için beton kalitesi çok düşük ($f_c=9.2$ MPa) olan, enine ve boyuna donatıları farklı 4 kolon üzerinde, sabit aksenal yük ve artan tekrarlı tersinir yatay yükler altında deneyler yapılmıştır. TBDY 2018’deki hasar sınırlarını tanımlayan birim şekildeğiştirme ve plastik dönme değerlerine karşılık gelen kolon tepe yer değiştirmeleri XTRACT programı yardımıyla teorik olarak belirlenmiş ve deneysel sonuçlardan bu yer değiştirme değerlerindeki hasar düzeyleri değerlendirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, SH sınırına ulaşıldığında, hasarlar genellikle kılcal çatlaklar şeklinde oluşmuş ve kolon tabanından itibaren 0-300 mm aralığında bir bölgede yoğunlaşmıştır. Kolonlarda sınırlı miktarda elastik ötesi davranış gözlenmiştir. Bütün kolonlarda, bu hasar seviyesine kolonun yatay yük taşıma kapasitesinden daha düşük değerlerde ulaşılmıştır. Boyuna ve enine donatı miktarının hasar düzeyinde bir etkisi gözlenmemiştir.

KH sınırına ulaşıldığında, özellikle plastik mafsallık bölgesindeki çatlakların genişliğinin arttığı ve kalıcı hasarların meydana geldiği görülmüştür. C812 ve U812 kolonlarında kabuk betonunda ezilme başlangıcı gözlenmiştir. Kabuk betonunda dökülme başlayan C414 kolonunda %2.6’lık bir dayanım kaybı görülmüştür. Diğer kolonlarda bir dayanım kaybı olmamıştır.

GÖ sınırına ulaşıldığında, plastik mafsallık olarak tanımlanabilecek, kolon tabanından itibaren 130 mm’ye kadar olan bölgede bulunan çatlakların genişliklerinin sınırlı miktarda arttığı gözlenmiştir. Bütün kolonlarda betondaki ezilmeler daha görünür hale gelmiş, C414 ve U812 kolonlarının plastik mafsallık bölgesinde betonları kısmen dökülmüştür. Bu hasar sınırı için, sık etriyeli kolonlar olan C414 kolonundaki dayanım kaybı %10.0’a çıkmış, C812 kolonunda ise %3.2’lik bir dayanım kaybı gözlenmiştir. Diğer kolonlarda ise bir dayanım kaybı gözlenmemiştir. İyi sargılanmış kolonlardaki dayanım kaybının nedeni; bu kolonların diğer kolonlara göre GÖ sınırına ulaşmak için yaklaşık 1.4 kat fazla yer değiştirme yapmış olmasıdır.

Sargılamanın etkinliğini ve aşırı yer değiştirmeler altındaki kolon davranışını görebilmek için görel kolon yer değiştirmeleri %5 oluncaya kadar deneye devam edilmiştir. Bu yer değiştirme oranı için bütün kolonlarda, plastik mafsallık bölgesinde bulunan kabuk betonu dökülmüştür. Plastik mafsallık bölgesi dışında, genel olarak, bir yapısal hasar oluşmamıştır. Hiçbir kolonda boyuna donatı burkulması gözlenmemiştir. Bu hasar sınırı için sık etriyeli kolonların dayanım kaybı ortalama %11.7, normal etriyeli kolonların dayanım kaybı ise ortalama %23.4 olmuştur. Görüldüğü gibi, sık etriyeli kolonlar aynı yer değiştirme oranı için daha az dayanım kaybına uğramış ve daha sünek davranış göstermiştir.

Boyuna donatı oranı %0.99 olan kolonların ortalama yatay yük taşıma kapasitesi 28.39 kN iken boyuna donatı oranı %1.45 olan kolonlardaki bu kapasite ortalama 31.19 kN olmuştur. Artan boyuna donatı oranı yatay yük taşıma kapasitesini artırmış, artan sargı donatısı ise kolonun daha sünek davranış göstermesini sağlamıştır.

Deney sonuçlarından görüldüğü gibi, geniş çatlaklar, kabuk betonu dökülmeleri gibi büyük hasarlar ve dayanım azalmaları GÖ sınırından sonra olmuştur. Bunun bir sonucu olarak, boyuna ve enine donatılarının etkileri de ancak bu sınırdan sonra daha net olarak görülebilmıştır. GÖ hasar sınırında ve özellikle %5 görel kolon yer değiştirmeleri için hasarlar TBDY 2018’de plastik mafsallık olarak tanımlanan $L_p = 0.5h$ uzunluğunda bir bölgede yoğunlaşmıştır.

Yapılan deneysel çalışma sonunda TBDY 2018’de verilen şekildeğiştirme esaslı hasar sınırlarının ve bu sınırların belirlenmesinde kullanılan hesap yönteminin beton dayanımı çok düşük olan kolonlar için de güvenilir sonuçlar verdiği söylenebilir.

Teşekkür

Bu çalışmada, Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenen 2016/135 numaralı projeden elde edilen verilerden yararlanılmıştır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- [1] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. 2007. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı. Ankara, 1-159.
- [2] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. 2019. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 1-395.
- [3] Elçi H., Göker K.A. 2018. Comparison of earthquake codes (TEC 2007 and TBEC 2018) in terms of seismic performance of RC columns. *International Journal of Scientific and Technological Research*, 4 (6): 9-21.
- [4] Aydemir C., Kırçıl M.S., Hancıoğlu B., Zorbozan M. 2011. Betonarme kolonların hasar sınır eğriliklerinin belirlenmesi. *İMO Teknik Dergi*, 22 (109): 5613-5641.
- [5] Aydemir C., Aydemir M.E. 2017. Betonarme kirişlerin hasar sınırlarının deneysel gözlemlerle irdelenmesi. *İMO Teknik Dergi*, 28 (4): 8023-8049.
- [6] Sucuoğlu H. 2006. 2007 Deprem yönetmeliği performans esaslı hesap yöntemlerinin karşılıklı değerlendirmesi. *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*, 444-445: 24-36.
- [7] İlki A., Celep Z. 2011. Betonarme Yapıların Deprem Güvenliği. 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-14 Ekim, ODTÜ, Ankara, 1-20.
- [8] Yüksel S.B., Foroughi S., Jamal R. 2020. Betonarme kirişlerin şekil değiştirme esaslı hasar sınırlarının araştırılması. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (2): 211-222
- [9] Işıltan Ö. 2010. Betonarme Kolonlar için TDY 2007, EUROCODE 8 ve FEMA 356 ile Yapılan Performans Değerlendirmelerinin Deney Sonuçlarıyla Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-159.
- [10] Acun B., Sucuoğlu H. 2011. Betonarme kolonların şekil değiştirme performans sınırlarının deneysel gözlemlerle değerlendirilmesi. *İMO Teknik Dergi*, 22 (108): 5523-5541.
- [11] Yavaş A., Türker K. 2012. Experimental investigation of strain based damage limits in turkish earthquake code for RC columns. *SDU International Technological Sciences*, 4 (2): 102-114.
- [12] Hasgül U., Yavaş A. Türker K., Terzi M., Birol T. 2016. DBYBHY-2007’de tanımlanan hasar kriterlerinin betonarme kolon elemanlar için incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21 (2), 499-514.
- [13] Ulutaş H. 2019. DBYBHY (2007) ve TBDY (2018) Deprem yönetmeliklerinin kesit hasar sınırları açısından kıyaslanması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, No. 17: 351-359.
- [14] Kazaz İ., Gülkan P. 2012. Süneklik düzeyi yüksek betonarme perdelerdeki hasar sınırları. *İMO Teknik Dergi*, 23 (114): 6113-6140.
- [15] Türker K. 2014. Türkiye deprem yönetmeliğindeki performans esaslı statik yöntemlerin düşey rijitlik düzensizliği bulunan çerçeveler üzerinde karşılaştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20 (3): 70-77.
- [16] Kolgu S., Peker K. 2003. Betonarme Kesit Davranışında Eksenel Yük, Malzeme Modeli ve Sargı Donatısı Oranının Etkisi. Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 26-30 Mayıs, İstanbul, 1-7.
- [17] Foroughi S., Yüksel S.B. 2020. Investigation of the moment–curvature relationship for reinforced concrete square columns. *Turkish Journal of Engineering (TUJE)*, 4 (1): 36-46.
- [18] Foroughi S., Yüksel S.B. 2018. Moment Curvature Relationship of Square Columns. *International Congress on Engineering and Architecture (ENAR)*, 14-16 Kasım, Alanya, 681-688.
- [19] Çolakoğlu H.E. 2020. Betonarme kolonların deprem performansında enine donatı aralığı etkisinin sayısal olarak incelenmesi, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12 (2020) 1-13.
- [20] Göker K.A. 2017. Betonarme Kolonların Deprem Performansını Etkileyen Parametrelerin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 1-144.

- [21] Ulutaş H., Tekeli H., Demir D. 2015. Kesit Hasar Sınırlarının Belirlenmesinde Sargılama Durumunun Etkisi. Uluslararası Burdur Deprem ve Çevre Sempozyumu, 7-9 Mayıs, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Burdur, 252-259.
- [22] Aksoylu C., Mobark A., Arslan H.A., Erkan İ.H. 2020. A comparative study on ASCE 7-16, TBEC-2018 and TEC-2007 for reinforced concrete buildings. *Revista de la Construcción*, 19 (2): 282-305.
- [23] Dok G., Öztürk, H. Demir A. 2017. Determining Moment-Curvature Relationship of Reinforced Concrete Columns. *ICONTE2017: International Conference on Technology, Engineering and Science. The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM)*, 26-29 October, Antalya, 1, 52-58.
- [24] Foroughi S., Yüksel S.B. 2019. Betonarme kolonların şekil değiştirme esaslı hasar sınırlarının araştırılması. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 11 (2): 584-601.
- [25] Foroughi S., Jamal R., Yüksel S.B. 2020. Şekil değiştirme esaslı hasar sınırlarının belirlenmesinde sargı donatısının ve eksenel yükün etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8 (4): 1042-1052.
- [26] Park R., Priestly M.J.N., Gill W.D. 1982. Ductility of square-confined concrete columns. *Journal of Structural Division*, 108 (4): 929-950.
- [27] Özcan O., Binici B., Özcebe G. 2008. Improving seismic performance of deficient reinforced concrete columns using carbon fiber-reinforced polymers. *Engineering Structures*, 30 (6): 1632-1646.
- [28] Özcan O., Binici B., Özcebe G. 2010. Seismic strengthening of rectangular reinforced concrete columns using fiber reinforced polymers. *Engineering Structures*, 32 (4): 964-973.
- [29] Özcan O., Binici B., Canbay E., Özcebe G. 2010. Repair and strengthening of reinforced concrete columns with CFRPs. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29 (22): 3411-3424.
- [30] XTRACT, v.3.0.9. Cross-sectional X Structural Analysis of Components. Imbsen Software Systems. 9912 Business Park Drive, Suite 130 Sacramento, CA 95827.
- [31] Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. 1988. Observed stress-strain behavior of confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114 (8), 1827-1849.
- [32] Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. 1988. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Division*, 114 (8), 1804-1826.
- [33] Halis B. 2019. İkinci Kez Güçlendirilmiş Betonarme Kolonların Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 1-132.