

Betonarme Kolonların Şekildeğiştirme Performans Sınırlarının Deneysel Gözlemlerle Değerlendirilmesi

Bora ACUN*
Halûk SUCUOĞLU**

ÖZ

Bu çalışmada eğilme davranışı için tasarlanan oniki adet betonarme kolon tekrarlı ve yüksek genlikli öteleme çevrimleri altında test edilmiştir. Deneysel elemanlarının üretiminde deprem yönetmelikleri ile uyumlu ve uyumsuz iki tip tasarım uygulanmıştır. Deneysel elemanlarına uygulanan öteleme genlikleri ve genliklerin dizini temel değışkindir. Yapılan değıerlendirme sonucunda Eurocode 8, ASCE/SEI 41 ve Türkiye Deprem Yönetmeliğı (TDY-2007) tarafından önerilen şekildeğiştirme esaslı performans sınırlarının yönetmeliklerle uyumsuz kolonlar için yapılan deneyler ışığında tutucu kaldığı görülmüştür. Bu sonuçların mevcut betonarme binaların deprem risklerinin değıerlendirilmesinde yanılıcı sonuçlar verebileceğı düşünölmektedir. Diğer yandan yönetmeliklerle uyumlu kolonlar için yapılan deneylerin sonuçlarına göre, Eurocode 8 ve TDY 2007 tarafından önerilen performans sınırlarının makul düzeylerde olduğu gözlenmiştir. Özellikle orta düzeyde eksenel yük altındaki kolonlardaki plastik mafsalların deneysel performanslarının tahmininde ASCE/SEI 41 tarafından önerilen sınırların ise bir miktar tutucu kaldığı görölmektedir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme kolonlar, plastik mafsal, performans sınırları, Deprem Yönetmelikleri

ABSTRACT

Evaluation of the Performance Limit States of Reinforced Concrete Columns in View of Experimental Observations

In this study, twelve full-scale column specimens designed for pure flexure were tested under repetitive displacement cycles with high amplitude. Two typical column designs were employed in the production of samples representing sub-standard and code-conforming columns, respectively. The main variable in the experiments was the histories of the imposed displacement amplitudes. The deformation-based performance limits proposed by Eurocode 8, ASCE/SEI 41 and Turkish Seismic Code (TDY-2007) for sub-standard columns were found conservative in view of the test results, which may lead to misleading results in seismic risk assessment of existing concrete structures. On the other hand, according to the test results of code-conforming columns, the performance limits

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 26.10.2009 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2011 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliğı Bölümü, Kocaeli - boraacun@gmail.com

** Orta Doğıu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliğı Bölümü, Ankara- sucuoglu@ce.metu.edu.tr

predicted by Eurocode and TDY 2007 are found to be reasonable. However, ASCE/SEI 41 performance limits appear to be somewhat conservative especially in predicting the experimental performance of column plastic hinges under moderate axial load levels.

Keywords: Concrete columns, flexure, plastic hinges, performance limits, seismic codes

1. GİRİŞ

Kolonlar, çerçevesel yapı sistemlerinin deprem davranışını belirleyen temel yapı elemanlarıdır. Geçmişte meydana gelen bina göçmelerinin pek çoğuna yetersiz kolon davranışı neden olmuştur. Binalardaki kolon göçmelerinin başlıca nedenleri yetersiz kesme dayanımı (kesme kırılması) veya yetersiz şekildeğiştirme kapasitesidir (eğilme-kesme ve eğilme kırılmaları). Yeni nesil performans esaslı deprem yönetmelikleri kolonların eğilme performansını plastik mafsallık bölgelerinin toplam dönme kapasitesi veya plastik dönme kapasitesi ile ifade etmektedir. Bu kritik bölgelerde kesme veya eğilme-kesme kırılması kesinlikle önlenmektedir [1-4].

Kolonlarda eğilme-kesme kırılması eğilme çatlakları ile başlar, ancak deprem tasarımı yetersiz, yani deprem yönetmeliklerinde betonarme elemanlar için öngörülen minimum yatay donatıya sahip olmayan elemanlarda eğilme çatlakları diyagonal kesme çatlaklarına dönüşür. Zira artan zorlamalar altında betondaki kesme gerilmeleri kesme dayanımını aşar. Bu tür kolonların sınırlı şekildeğiştirme kapasiteleri deneysel araştırmalarda gözlenmiş [5-8] ve performans esaslı deprem yönetmeliklerinde dikkate alınmıştır. Diğer yandan salt eğilme davranışı gösteren kolonların şekildeğiştirme kapasitesi donatı detaylarına olduğu kadar maruz kaldığı ötelenme değişimine de bağlıdır. Tekrarlanan çok sayıda yüksek genlikli öteleme çevrimleri eğilme dayanımı ve eğilme rijitliğinin azalmasına, buna bağlı olarak enerji tüketme kapasitesinin de azalmasına ve dolayısıyla şekildeğiştirme kapasitesinin yitirilmesine neden olurlar. Boyuna ve enine donatının kolonların şekildeğiştirme kapasitesi üzerindeki etkisi standart, artan genlikli öteleme çevrimleri altında oldukça iyi anlaşılmıştır. Aynı durum sabit genlikli tekrarlı öteleme çevrimleri altında pek geçerli değildir, zira bu alandaki çalışmalar sınırlıdır. Iwasaki ve diğerleri [9] köprü ayakları üzerinde bu tür deneyler yapmış, Pujol ve diğerleri [10] küçük ölçekli kolonları sabit genlikli tekrarlı öteleme çevrimleri altında test ederek çevrim sayısının kolon şekildeğiştirme kapasitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Verderame ve diğerleri [11] düz yüzeyli donatılı ve yönetmelik koşullarını sağlamayan, ancak salt eğilme davranışı ile kırılan kolonları test etmiş, monotonik ve tersinir tekrarlanırlar olarak uygulanan ötelemelerin kolonların şekildeğiştirme kapasitesini nasıl etkilediğini gözlemiştir.

Bu çalışmada eğilme davranışı için tasarlanan oniki adet tam ölçekli betonarme kolon yüksek genlikli tekrarlı öteleme çevrimleri altında test edilmiştir. Deney elemanlarına iki farklı tip tasarım uygulanmıştır. Birinci tip kolonlar yönetmelik uyumsuz kolonları, ikinci tip kolonlar ise modern betonarme yönetmeliklerinin [4, 12] malzeme ve detaylandırma koşullarını sağlayan kolonları temsil etmektedir. Yönetmelikle uyumsuz kolonlar deprem yönetmeliklerinde zorunlu olan en düşük beton dayanımı ile minimum sargılama donatısı oranını ve donatı detaylarını sağlamayan kolonları ifade etmektedir. Deney elemanlarına biri hariç aynı aksel yük uygulanmıştır.

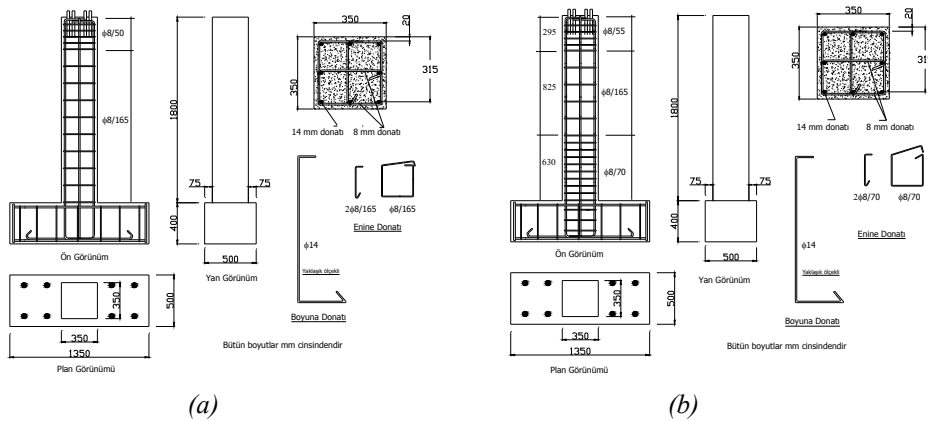
Deneylerde başlıca değişken çevrimsel olarak uygulanan öteleme genliklerinin dizinidir. Dokuz deney elemanına ilk başta beş adet sabit genlikli öteleme çevrimi uygulanmış,

sonraki çevrimlerde öteleme genliği arttırılmıştır. Ancak ilk baştaki beş adet sabit genlikli çevrimlerin genlik büyüklüğü her elemenda farklıdır. Üç deney elemanı ise değişken öteleme genlikli çevrimler altında test edilmiştir. Deneylerde ölçülen plastik mafsalsal dönmeleri ASCE 41, Eurocode 8 ve TDY 2007 tarafından önerilen sınır değerler ışığında karşılıklı olarak değerlendirilmiştir. Sunulan çalışmadan elde edilen sonuçların betonarme kolonların deprem performansının daha gerçekçi olarak değerlendirilmesine katkıda bulunması hedeflenmektedir.

Yönetmelikle uyumsuz kolonlarda beton kalitesinin önemli bir değişken olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada bu tür kolonlar için beton kalitesi sabit tutulmuştur. Beton kalitesinin yönetmelikle uyumsuz kolonlardaki etkisinin araştırılması için benzer çalışmaların farklı beton kaliteleri için yapılması gerekir.

2. DENEY ELEMANLARI

İki tip deney elemanı eğilme davranışı için tasarlanmış, bu tasarımlar her tip için altışar deney elemanına uygulanmıştır. Birinci tip elemanlar (Tip 1) düşük dayanımlı beton (13 MPa) ve düz yüzeyle donatı ile imal edilmiştir. Etriyeler kolon yüksekliği boyunca $d/2$ aralığı ile yerleştirilmiş, 90 derece kanca ile kapatılmıştır. Yatay donatı alanı sarılma bölgesindeki minimum toplam enine donatı alanını (TDY 2007, Madde 3.3.4.1) karşılamakla birlikte deprem yönetmeliklerinin öngördüğü maksimum etriye aralığını (100 mm) sağlamamaktadır. Tip 1 elemanlar gerekli etriye sıklaştırılması yapılmadığı ve etriyeler 135 derece kanca ile kapatılmadığı için deprem yönetmeliklerinin koşullarını sağlamamaktadır. İkinci tip kolon elemanları (Tip 2) modern deprem ve betonarme yönetmeliklerinin minimum koşullarını sağlamaktadır. Kolonlar nervürlü donatı, 25 MPa dayanımlı beton ve 135 derece kancalı etriyelerle imal edilmiş, sarılma veya plastik mafsalsal bölgede ayrıca etriye sıklaştırılması yapılmıştır. Tüm oniki deney elemanında beton düşey olarak yerleştirilmiştir. Tip 1 ve Tip 2 elemanların donatı detayları ve boyutları Şekil 1’de gösterilmekte, malzeme özellikleri Tablo 1’de verilmektedir. Tip 1 ve Tip 2 elemanlarında V_p/V_n oranı sırasıyla 0.32 ve 0.20’dir. Bu değerler her iki tip elemanlarda da kesme ve eğilme-kesme kırılmasının kesinlikle önlendiğini ve eğilme kırılmasının sağlandığını göstermektedir.



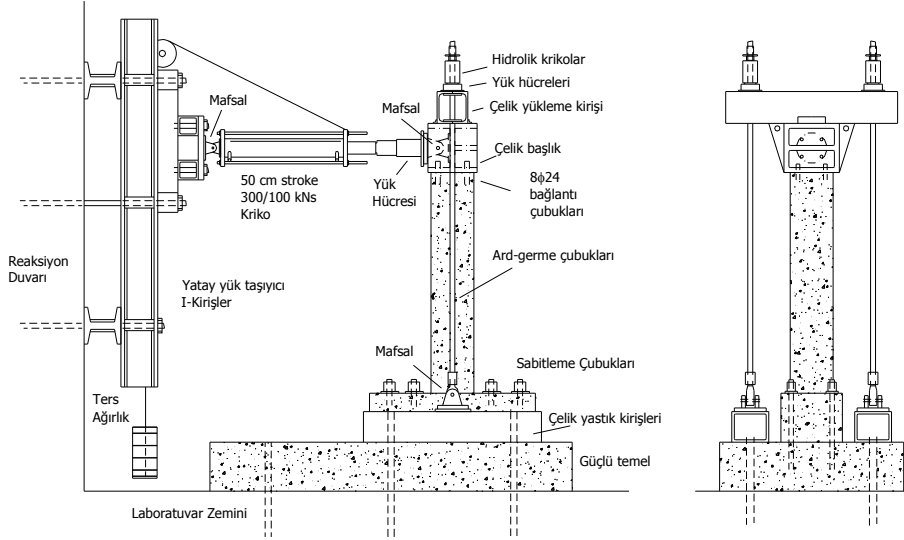
Şekil 1- (a) Tip-1 ve (b) Tip-2 kolon elemanlarının boyutları ve donatı detayları

Tablo 1. Deney elemanlarının malzeme özellikleri ve donatı oranları

Eleman Tipi	Beton	Boyuna Donatı			Enine Donatı		
	Basınç Dayanımı f'_c	Akma Dayanımı f_y	Kopma Dayanımı f_u	Donatı Oranı ρ_t	Akma Dayanımı f_{yw}	Kopma Dayanımı f_{uw}	Donatı Oranı ρ_t
	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	($A_s / b_w \cdot h$)	(Mpa)	(Mpa)	($A_{sw} / b_w \cdot s$)
Tip 1	13	315	448	0.01	368	487	0.0026
Tip 2	25	454	604	0.01	469	685	0.0061

3. DENEY DÜZENEGİ VE OKUMA CİHAZLARI

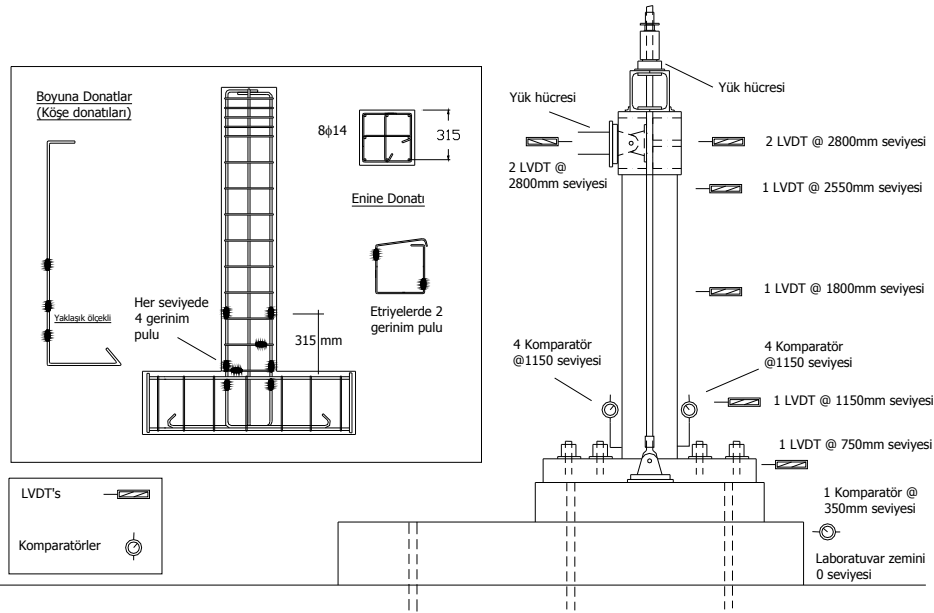
Deney elemanları laboratuvarın güçlü döşemesine art germeli çubuklarla sabitlenen bir radye temel üzerinde test edilmiştir. Kolonların tepesine bir çelik kafa takılmış ve yatay yük çelik kafa hizasından iki ucu mafsallı bir piston ile uygulanmıştır. Elemanların yüklemeye düzlemi dışına kaçmasını önlemek için elemanların iki yanına yüklemeye yönüne paralel iki çelik kiriş yerleştirilmiş ve bu kirişler bir mafsal düzeneği ile kolonların üst kısmına bağlanmıştır.



Şekil 2. Deney düzeneği

Eksenel yük, çelik kafaya yükleme yönüne dik olarak bağlanan yatay bir çelik kiriş ile uygulanmıştır. Radye temele ve çelik kirişe mafsallarla bağlanan iki adet yüksek dayanımlı çelik çubuk gerilerek eksenel yük uygulaması gerçekleştirilmiştir. Deneylerde eksenel yük seviyesi sabit tutulmuştur. Deney düzeneğinin genel görünümü Şekil 2’de verilmektedir.

Yatay ve düşey yönde uygulanan yükler kalibre edilmiş yük hücreleri ile ölçülmüştür. Elemanların çeşitli seviyelerdeki yatay ötelenmeleri ise LVDT’ler vasıtasıyla kaydedilmiştir. Ayrıca plastik mafsal bölgesindeki dönmeleri ölçmek amacıyla deney elemanlarının her iki yüzüne temel seviyesinin 350 mm üstünde dörder adet okuma saati (komparatör) düşey olarak yerleştirilmiştir. Düşey ve yatay donatılara toplam 16 adet birim şekil değiştirme ölçer (gerinim pulu) yapıştırılmıştır. Tüm ölçüm cihazlarının nominal yerleşimi Şekil 3’te gösterilmektedir.



Şekil 3. Ölçüm cihazlarının yerleşimi

4. DENEY PROGRAMI

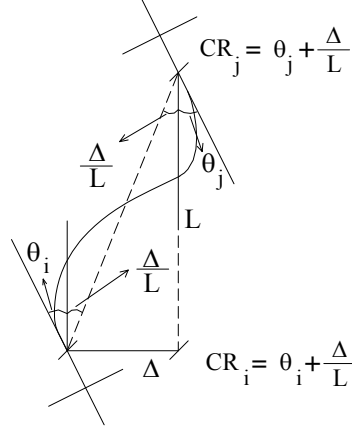
Kolon elemanlarına uygulanan ötelenme genliklerinin dizini Tablo 2’de verilmektedir. Tablodaki 35, 50, 70 ve 105 mm tepe ötelenmeleri sırasıyla %1.75, %2.5, %3.5 ve %5.25 ötelenme oranlarına karşılık gelmektedir. Eleman etiketlerindeki ilk sayı her tip içindeki eleman sırasını, P ve D sırasıyla düz yüzeyli ve nervürlü donatıyı, son sayı ise ilk grup sabit genlikli çevrimlerin ötelenme oranını belirtmektedir. Üç adet elemana uygulanan değişken ötelenme genliği dizinini V harfi ifade etmektedir. Oniki elemanın onbirine uygulanan sabit eksenel yük seviyesi $0.2f_c A_g$, sadece 3P3 elemanına uygulanan eksenel yük seviyesi ise $0.4f_c A_g$ ’dir.

Tablo 2. Deney elemanlarına uygulanan ötelenme genliklerinin dizini

Çevrim Sayısı	ELEMANLAR											
	Tip 1						Tip 2					
	1P2	2P3	3P3_N0.4	4P4	5P5	6PV1	1D2	2D3	3D4	4D5	5DV1	6DV2
1	35	50	50	70	105	10	35	50	70	105	10	17.5
2	35	50	50	70	105	10	35	50	70	105	10	17.5
3	35	50	50	70	105	10	35	50	70	105	10	17.5
4	35	50	50	70	105	50	35	50	70	105	50	35
5	35	50	50	70	105	50	35	50	70	105	50	35
6	35	70	70	105	70	50	35	50	105	70	50	35
7	35	70	70	105	70	35	35	50	105	70	35	50
8	70	70	70	105	70	35	70	70	105	70	35	50
9	70	70	70	105	70	35	70	70		70	35	50
10	70	70	70	105	70	70	70	70		70	70	70
11	70	105				70	70	70			70	70
12	70	105				70	70	70			70	70
13	105	105				35	105	105			35	105
14						35	105	105			35	105
15						35	105	105			35	105
16						105					105	
17						105					105	
18						105					105	

5. DEPREM YÖNETMELİKLERİ TARAFINDAN ÖNERİLEN ŞEKİLDEĞİŞTİRME ESASLI PERFORMANS SINIRLARI

Minimum hasar, can güvenliği ve göçme sınır durumları için ASCE 41, Eurocode 8 ve TDY 2007 tarafından önerilen kord dönmesi sınır değerleri her eleman tipi için hesaplanmıştır. Çerçeve elemanlarında kord dönmesi Şekil 4'de tanımlanmaktadır.



Şekil 4. Çerçeve elemanlarının i ve j uçlarında kord dönmesi tanımı

5.1 ASCE 41 [1, 2]

ASCE 41, Tip-1 kolon elemanlarını V_p/V_n oranlarının düşüklüğüne, yani eğilme kırılmasının kesin olarak sağlanmış olmasına karşın bu elemanları sünek davranış göstermeyen kolon olarak sınıflandırmaktadır (Condition ii / Koşul ii). Bunun nedeni etriyelerin 135 değil 90 derece kancalı olması ve etriye aralığının kesit derinliğine oranının 0.5'den fazla olmasıdır (bu oran Tip-1 elemanlar için 0.52'dir). Betonarme kolonlar için üç performans düzeyine ait sınır değerleri verilen bir tablodan (ASCE/SEI 41-Update Tablo 6-8) doğrudan alınmaktadır. Tablodaki sınır değerler eksenel yük oranına, yatay donatı oranına ve kesme kuvveti oranına göre değişmektedir.

5.2 Eurocode 8 (Bölüm 3) [3]

Eurocode 8 şekil değiştirme performans sınır değerlerinin hesaplanmasında düz yüzeyli boyuna donatı ve etriyede 90 derece kanca olmasını olumsuzluk olarak değerlendirmekte ve etkisini sayısal olarak göz önüne almaktadır. Sınır değerlerin hesaplanmasında etriye aralığının kesit derinliğine oranı da değişken olarak hesaba katılmaktadır. Göçme öncesine karşılık gelen kord dönmesi sınır değeri Eurocode 8 tarafından Denklem (1) ile tanımlanmıştır.

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} \cdot 0.016 \cdot (0.3^v) \left[\frac{\max(0.01; \omega')}{\max(0.01; \omega)} f_c \right]^{0.225} \left(\frac{L_v}{h} \right)^{0.35} 25^{\left(\alpha_{ps} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1.25^{100 \rho_d}) \quad (1)$$

Burada $\gamma_{el} = 1.0$ olarak alınmaktadır. Düz yüzeyli boyuna donatı ve 90 derece kancalı etriyelerin kolonların dönme kapasitesine olumsuz etkisini dikkate almak için Denklem (1)'den hesaplanan dönme değeri 0.575 ile çarpılarak azaltılır. Can güvenliği (belirgin hasar) sınır durumuna karşılık gelen kord dönmesi, Denklem (1) ile hesaplanan göçme öncesi dönmesinin $\frac{3}{4}$ 'üdür. Toplam kord dönmesi içindeki akma kord dönmesi ise donatı

sıyırılması ve kesme gerilmelerini göz önüne alan ampirik bir denklem ile hesaplanmaktadır.

5.3 Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007 [4]

TDY 2007, betonarme elemanların şekildeğiştirme performans sınırlarını kesitteki beton ve donatıda hesaplanan maksimum birim şekildeğiştirmeler cinsinden tanımlamaktadır.

$$(\epsilon_{cu})_{MN} = 0.0035 \quad ; \quad (\epsilon_s)_{MN} = 0.010 \quad (2)$$

$$(\epsilon_{cg})_{GV} = 0.0035 + 0.01 (\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.0135 \quad ; \quad (\epsilon_s)_{GV} = 0.040 \quad (3)$$

$$(\epsilon_{cg})_{GC} = 0.004 + 0.014 (\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.018 \quad ; \quad (\epsilon_s)_{GC} = 0.060 \quad (4)$$

Birim şekildeğiştirme cinsinden verilen sınır değerler önce kesit için hesaplanan moment-eğrilik ilişkilerinden yararlanarak plastik eğrilik cinsinden ifade edilmiştir. Burada verilen sınır değerlere beton veya çelik lifinden hangisi tarafından önce ulaşıyorsa o değere karşılık gelen plastik eğrilik değeri bulunmakta, daha sonra plastik eğrilik değeri TDY-2007'de verilen plastik mafsal boyu ($L_p=0.5h$) ile çarpılarak plastik dönme elde edilmektedir. Plastik dönme ile kesitin akma durumunda ulaştığı kord dönmesinin toplamı toplam kord dönmesine eşittir.

Minimum hasar, can güvenliği ve göçme sınır durumları için ASCE 41, Eurocode 8 ve TDY 2007 tarafından önerilen kord dönmesi sınır değerleri her eleman tipi için hesaplanmıştır. Hesaplanan sınır değerler Tablo 3'de verilmektedir. Tabloda verilen değerler eksenel yük oranı 0.20 olan elemanlar için geçerlidir. Tip-1 elemanlar için TDY 2007 değerlerinin hesaplanmasında sargılı beton modeli kullanılmış, Denklem (3) ve (4)'de ρ_{sm} olarak TDY 2007 Bölüm 3.3.4.1'e göre özel sarılma bölgesindeki minimum enine donatı alanı ve maksimum etriye aralığına karşılık gelen yatay donatı oranı kullanılmıştır.

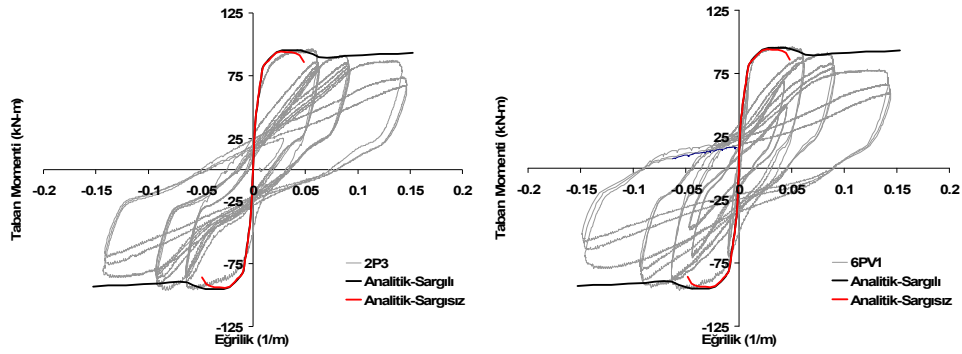
Tablo 3. Tip 1 ve Tip 2 kolonlar için Yönetmelikler tarafından önerilen kord dönmesi sınır değerleri

Yönetmelik	Tip-1			Tip-2		
	MN	CG	GÇ	MN	CG	GÇ
ASCE 41	0.0079	0.0167	0.0177	0.0100	0.0324	0.0398
Eurocode 8	0.0092	0.0178	0.0237	0.0122	0.0414	0.0552
TDY 2007	0.0104	0.0231	0.0281	0.0121	0.0378	0.0485

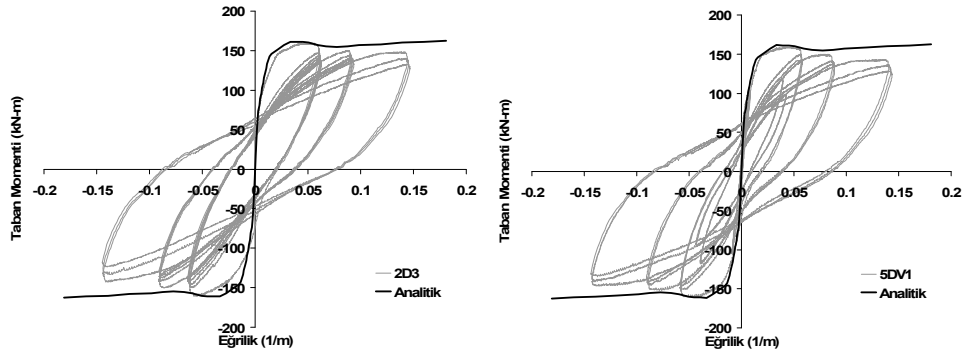
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1. Moment-Eğrilik Özellikleri

Deney elemanlarının moment-eğrilik ilişkileri kolonların taban kesitlerinde hem deneysel okumalardan, hem de analitik moment-eğrilik modellerinden elde edilmiştir. Deneysel eğrilikler tabandaki plastik mafsallarda okunan toplam dönmenin okuma boyuna bölünmesi ile hesaplanmıştır. Dolayısıyla kolonların alt 350 mm'lik kısmındaki ortalama eğrilikleri ifade etmektedir. Tip-1 ve Tip-2 kolon elemanlarından seçilen ikişer tanesinin moment-eğrilik ilişkileri Şekil 5 ve 6'da sırasıyla sunulmaktadır.



Şekil 5. İki adet Tip-1 elemanın taban kesitindeki moment-eğrilik ilişkileri



Şekil 6. İki adet Tip-2 elemanın taban kesitindeki moment-eğrilik ilişkileri

Tip-1 kolonlar için analitik moment-eğrilik ilişkisi hem sargılı, hem de sargısız beton modelleri kullanarak elde edilmiştir. Bu kolonlardaki yatay donatının deprem yönetmeliklerindeki maksimum etriye aralığı koşulunu karşılamıyor olmasına karşın iki farklı model sonuçlarının deney sonuçları ile kıyaslanması sonucunda Tip-1 kolonların sargılı beton modeli ile daha iyi ifade edildiği açıkça görülmektedir. Tip-2 kolonların analitik moment-eğrilik ilişkileri ise sadece sargılı beton modeli ile elde edilmiştir.

Gerek Tip-1, gerekse Tip-2 kolonların analitik olarak hesaplanan moment-eğrilik ilişkileri monotonik olarak artan zorlamaları temsil etmektedir. Deneysel sonuçlar ilk çevrimlerde analitik ilişkilerle uyum göstermekte, ancak sonraki çevrimlerde deneysel dayanımlar analitik değerlerin altında kalmaktadır. Bunun nedeni deneylerde uygulanan farklı öteleme genliği dizinlerinin etkisidir. Deneysel sonuçlar kolon kesitlerinin elastik ötesi eğilme davranışlarının yüklemeye protokolüne bağımlı olduğunu göstermektedir. Bu durum performans sınırlarının tespitinde göz önüne alınmalıdır. Ancak halen hiçbir yönetmelik bu özelliği doğrudan dikkate almamaktadır.

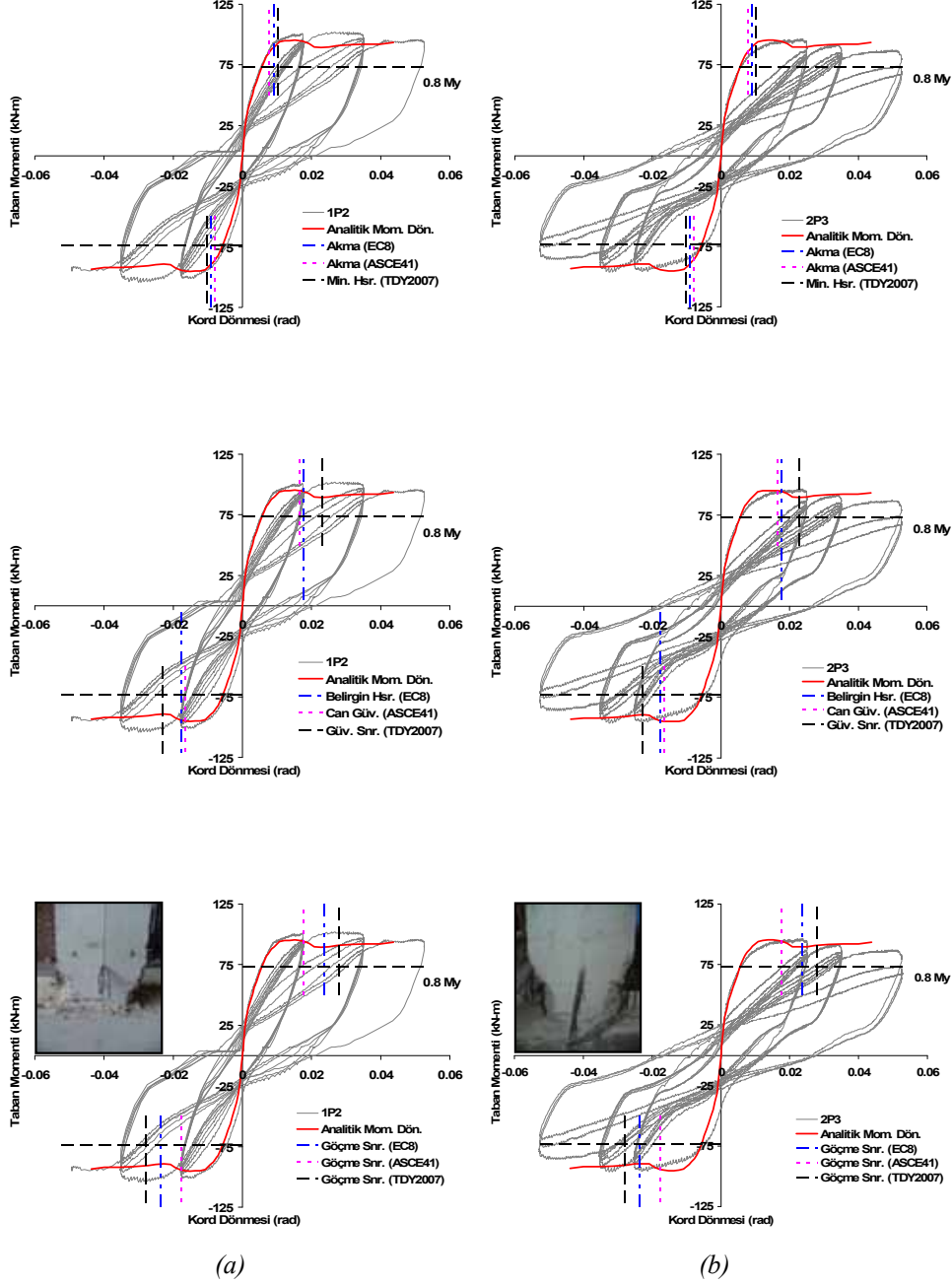
6.2. Moment-Kord Dönmesi İlişkileri

Deney sonuçları kolonların alt ucunda moment-kord dönmesi ilişkisi ile ifade edilmiştir. Deney elemanlarının alt ucunda dönme tutulduğu için buradaki kord dönmesi ötelenme oranına, veya tepe yerdeğiştirmesinin kesme açıklığına oranıdır. Kord dönmesi plastik mafsal bölgesinin toplam dönmesine eşittir ve toplam dönme akma dönmesi ile plastik dönmenin toplamından oluşur.

Deney sonuçları Tip-1 ve Tip-2 elemanlar için sırasıyla Şekil 7 ve 8'de sunulmaktadır. Şekillerin üzerine analitik olarak hesaplanan moment-kord dönmesi eğrileri de işlenmiştir. Bu monotonik eğriler önceki bölümde analitik olarak elde edilen moment-eğrilik ilişkilerinden türetilmiştir. Kolon alt ucundaki plastik mafsal bölgesinin analizinden hesaplanan plastik eğrilik plastik mafsal boyu [13] ile çarpılarak plastik dönmeye dönüştürülmüştür. Plastik mafsal bölgesinin deney sonundaki görünümünü her moment-kord dönmesi şeklinin içine yerleştirilmiştir.

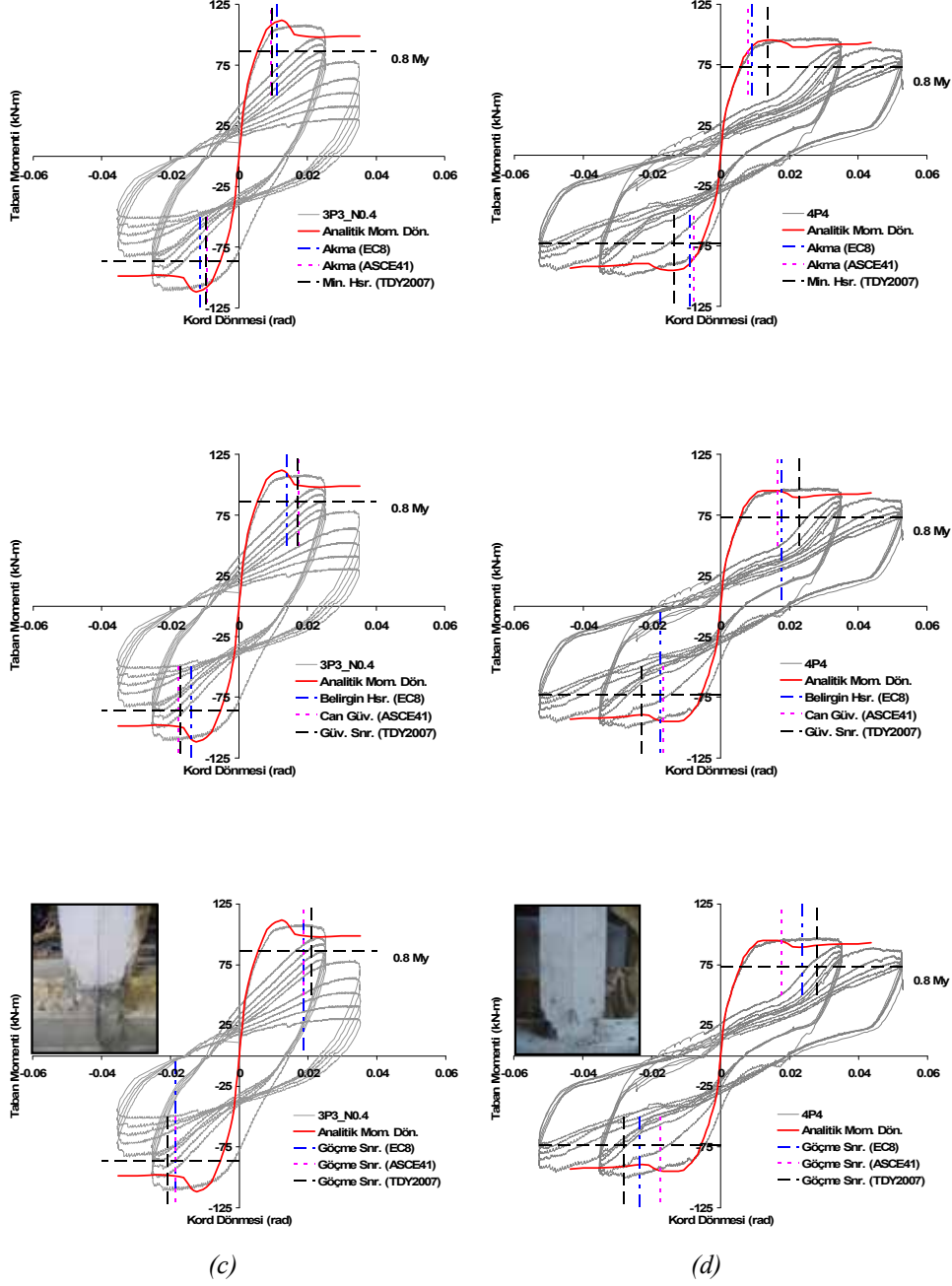
Önceki bölümde hesaplanan kord dönmesi sınır değerleri her elemanın deneysel moment-kord dönmesi ilişkileri üzerinde ayrı ayrı ve her iki yüklemeye yönünde gösterilmiştir. Ayrıca deney elemanlarının akma momentinin %80'i de ($0.8M_y$) her iki yönde düşey eksen üzerinde belirtilmiştir. Bir kolonun belirli bir şekildeğiştirme değerinde performansının yeterli olabilmesi için, taşıdığı maksimum eğilme momentinin akma kapasitesinin %80'inin altına düşmemesi istenir ($M > 0.8M_y$).

Şekil 7'de sunulan sonuçlar yönetmelikle uyumlu olmayan Tip-1 kolonlar için Eurocode 8 ve TDY 2007 tarafından önerilen sınırların ASCE 41'e göre daha toleranslı ve gerçekçi olduğunu göstermektedir. Ancak her üç yönetmelik de CG (can güvenliği, significant damage veya life safety) ve GÇ (göçme öncesi, near collapse veya collapse prevention) sınırlarını belirlemekte deney sonuçlarına göre oldukça tutucu kalmaktadır. Tip-1 kolonlar yüksek genlikli ve tekrarlı çevrimsel zorlamalar altında Eurocode 8 ve ASCE 41 kabul sınırlarının iki katına yakın kord dönmesi performansı sağlamakta ve bu performans değerlerinde eğilme dayanımları akma dayanımlarının %80'inin üstünde kalmaktadır. Eksenel yük oranı 0.4 olan 3P3_N0.4 elemanının deneysel performansı Eurocode 8 ve ASCE 41 performans sınırları ile daha iyi uyum göstermektedir. Bu durumda eksenel yük oranı 0.2'den az olan ve eğilme davranışı gösteren yönetmelik uyumsuz kolonların şekildeğiştirme kapasitelerinin Eurocode 8 ve ASCE 41 yönetmelikleri tarafından önerilen performans sınırlarını belirgin şekilde aştığını ifade etmek doğru olacaktır. Bu gözlem Verdaram ve diğerleri [11] tarafından da teyid edilmiştir.

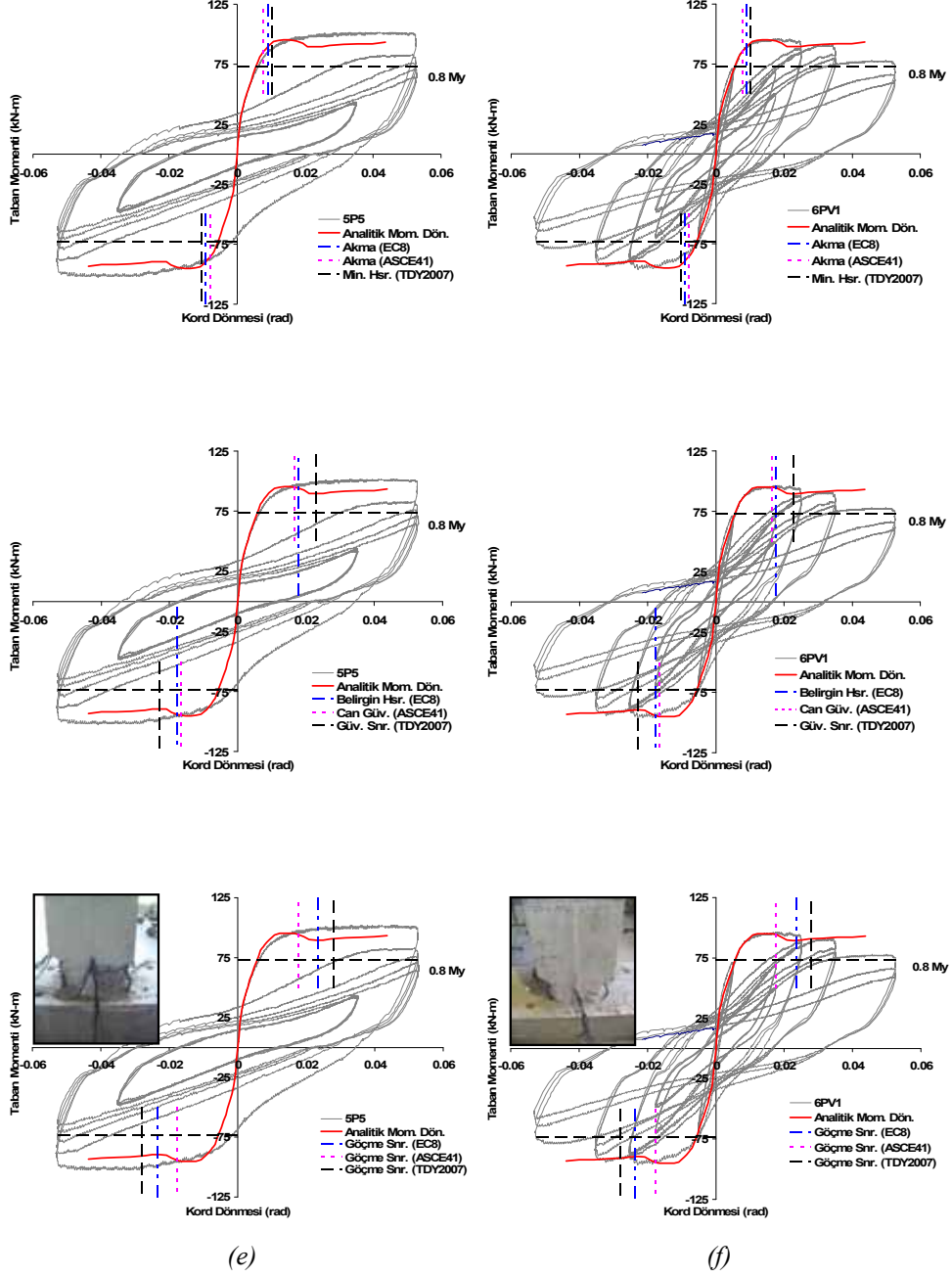


Şekil 7. Tip-1 elemanların moment-kord dönmesi ilişkileri ve performans sınırları.
(a) 1P2, (b) 2P3.

Betonarme Kolonların Şekilgeğiştirme Performans Sınırlarının Deneysel ...

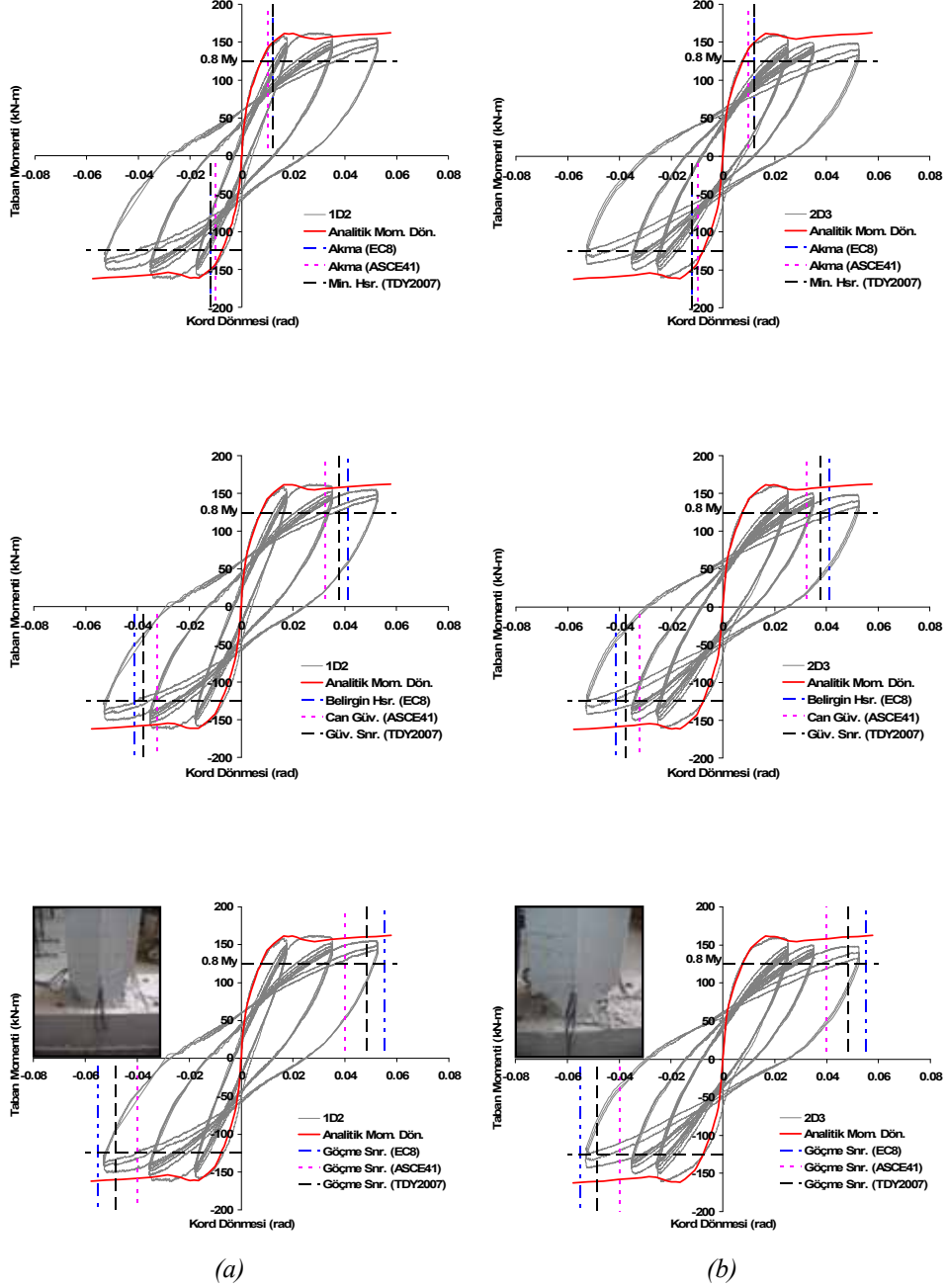


Şekil 7 (devam). (c) 3P3_N0.4, (d) 4P4.



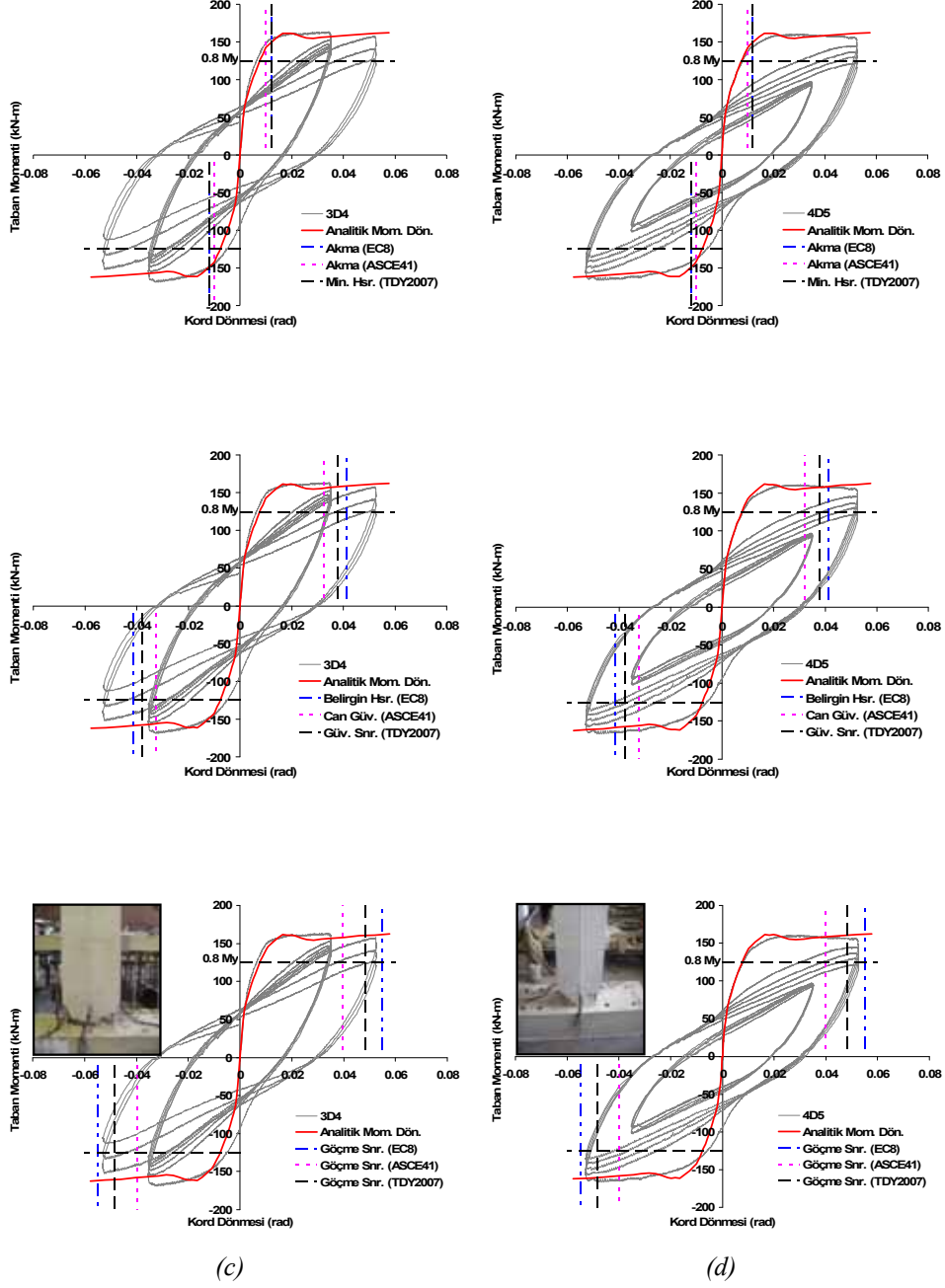
Şekil 7 (devam). (e) 5P5, (f) 6PV1.

Betonarme Kolonların Şekildeğiştirme Performans Sınırlarının Deneysel ...



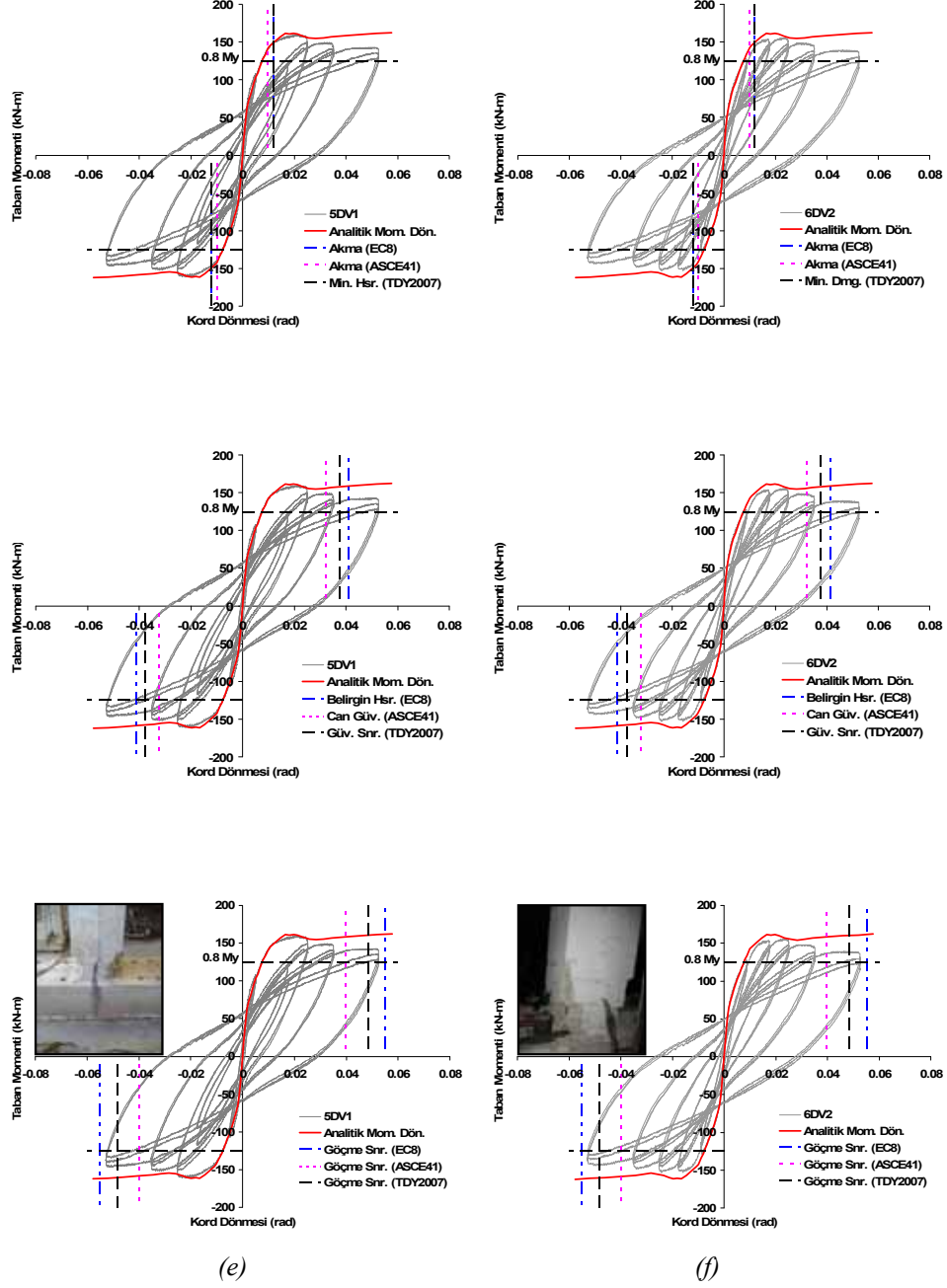
Şekil 8. Tip-2 elemanların moment-kord dönmesi ilişkileri ve performans sınırları.

(a) 1D2, (b) 2D3.



Şekil 8 (devam). (c) 3D4, (d) 4D5.

Betonarme Kolonların Şekildeğiştirme Performans Sınırlarının Deneysel ...



Şekil 8 (devam). (e) 5DV1, (f) 6DV2.

Diğer yandan TDY 2007 tarafından Tip-1 kolonlar için önerilen performans sınırları deneysel gözlemlerle daha iyi bir uyum göstermektedir. Ancak bu çalışmada deneysel davranışı sunulan Tip-1 kolonların ülkemiz pratiğindeki “yönetmelik uyumsuz” kolonları çok da iyi yansıtmadığını dikkate almak gerekir. Ülkemizdeki yönetmelik uyumsuz yapılara ait kolonlarda genelde daha düşük oranda yatay donatı bulunmaktadır. TDY 2007 performans sınırlarını bu tür kolonların deney sonuçları ile karşılaştırarak değerlendirmek daha gerçekçi olacaktır.

Tip-2 kolonlar ASCE 41 tarafından (Condition i / Koşul i) olarak, yani sünek eğilme davranışı gösteren betonarme eleman olarak sınıflandırılmışlardır. Eurocode 8 aynı şekilde nervürlü donatılı, etriye sıklaştırması uygulanmış, düşük eksenel yüklü ve düşük kesme kuvveti etkisi altındaki bu kolonların olumlu deprem davranışını performans sınırlarını belirlemede göz önüne almaktadır. Tip-1 elemanlar için kullanılan Denklem (1) Tip-2 elemanlar için de kullanılmakta, ancak hesaplanan kord dönmesi değerlerinde herhangi bir olumsuzluk azaltması yapılmamaktadır. TDY 2007 sınırlarının belirlenmesinde ise eksenel yük etkisi monotonik moment-eğrilik ilişkisinin hesaplanmasında dolaylı olarak, sargılama etkisi Denklem (3) ve (4)’de doğrudan hesaba katılmaktadır. TDY 2007’de kesme kuvveti oranı ve donatı türünün (düz yüzeyli veya nervürlü) kenetlenmeye etkisi dikkate alınmamaktadır.

Tablo 3 ve Şekil 8’den gözlemlendiği gibi ASCE 41, Eurocode 8 ve TDY 2007 tarafından yönetmelik uyumlu kolonlar için önerilen şekildeğiştirme performans sınırları MN (minimum hasar, immediate occupancy veya yield) sınır durumu için birbirlerine oldukça yakın, ancak GV ve GÇ sınır durumları için birbirlerinden farklıdır. Eurocode 8 tarafından önerilen sınır değerler ASCE 41 sınır değerlerine göre CG ve GÇ performans düzeyleri için sırasıyla %27 ve %39 daha yüksektir. Öte yandan TDY 2007 tarafından CG ve GÇ performans düzeyleri için önerilen sınır değerler ASCE sınır değerlerine göre sırasıyla %17 ve %22 daha yüksek, Eurocode 8 sınır değerlerine göre ise sırasıyla %10 ve %14 daha düşüktür. Şekil 8’de deneysel olarak elde edilen kolon davranışları ASCE 41 sınırlarının tutucu, Eurocode 8 ve TDY 2007 sınırlarının oldukça gerçekçi olduğunu göstermektedir.

Yukarıdaki yorumlar, yapılan deneyler ve ele alınan değişkenler için geçerlidir. Bunların daha kesin teyidi ileride yapılacak daha kapsamlı deneylerle sağlanmalıdır.

7. YORUM

Mevcut yapıların performans esaslı değerlendirmesini içeren üç farklı deprem yönetmeliğinin eğilme davranışı gösteren kolonlar için öngördüğü şekildeğiştirme esaslı performans sınırları deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar yönetmeliklerle tam uyumlu olmayan Tip-1 elemanları, ve yönetmeliklerle tam uyumlu Tip-2 elemanları kapsamaktadır. Deneylerde iki tipteki toplam oniki tam ölçekli kolon elemanına yüksek genlikli ve tekrarlı ötelenme çevrimleri uygulanmıştır. Uygulanan ötelenmeler çok güçlü deprem yer hareketi istemlerini temsil etmektedir.

Değerlendirmeye alınan yönetmeliklerden ASCE 41 yakın tarihlerde yeni deneysel veriler ışığında revize edilmesine [2] ve çok sayıda deneysel veriyi dikkate almasına rağmen her iki tipteki kolonların can güvenliği (CG) ve göçme öncesi (GÇ) performansı için önerdiği sınır değerler deneysel verilere göre oldukça düşük yönde kalmaktadır. Bu durum ASCE

41'in sınır değerlerin aşılma olasılığını düşük tutarak belirli bir güvenlik düzeyini sağlama amacından kaynaklanmaktadır. Ne var ki bunun sonucunda ASCE 41 mevcut veya güçlendirilmiş betonarme binaların performans değerlendirmesinde oldukça tutucu kalmaktadır.

Eurocode 8 (Bölüm 3) tarafından önerilen sınır değerler Tip-1 kolonlar için bir miktar tutucu, Tip-2 kolonlar için makul düzeydedir. Eurocode 8'in Tip-1 kolonlar için tutucu yönde kalması anlaşılabilir, zira eğilme davranışı gösterse de yönetmelik uyumsuz kolonların standart bir tanımı yoktur. Eurocode 8 bu değişkenliği dikkate alarak yönetmelik uyumsuz kolonların performans sınırlarını daha tutucu olarak belirlemiştir. Ancak bu değerler ASCE 41'e göre daha yüksektir. Eurocode 8'in yönetmelik uyumlu Tip-2 kolonlar için belirlediği performans sınırları deney sonuçları ile iyi bir uyum göstermektedir.

TDY 2007 (Bölüm 7) tarafından yönetmelik uyumsuz Tip-1 kolonlar için önerilen sınır değerler biraz tutucu olmakla birlikte deney sonuçları ile oldukça uyumludur. Yönetmelik uyumsuz kolonların çok geniş bir çeşitlilik gösterdiği göz önüne alındığında, TDY 2007 sınır değerlerinin özellikle sargılama donatısı oranı daha düşük ve kesme kuvveti oranı daha yüksek olan, fakat eğilme davranışı gösteren kolonların deneysel davranışı ile de doğrulanması yerinde olacaktır. Diğer yandan TDY 2007 bu çalışmada test edilen yönetmeliklerle tam uyumlu Tip-2 kolonların sınır değerlerini belirlemede başarılıdır. Benzer deneysel sınamaların kesme açıklığı daha kısa ve eksenel yük oranı daha yüksek kolonlar için de yapılması gereklidir.

Kaynaklar

- [1] ASCE/SEI 41, "Seismic Rehabilitation of Existing Buildings," American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2007.
- [2] Elwood, J. K.; Matamoros, A. B.; Wallace, J. W.; Lehman, D. E.; Heintz, J. A., Mitchell, A. D.; Moore, M. A.; Valley, M. T.; Lowes, M. T.; Comartin, C. D. and Moehle, J. P., "Update to ASCE/SEI 41 Concrete Provisions," *Earthquake Spectra*, V. 23, No. 3, 2007, pp. 493-523.
- [3] Comite Europeen de Normalisation, "European Standard EN 1998-3 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings," Brussels, 2005.
- [4] Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik", Ankara, 2007.
- [5] Lynn, A. C.; Moehle, J. P.; Mahin, S. A. and Holmes, W. T., "Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Columns," *Earthquake Spectra*, V. 21, No. 4, 1996, pp. 715-739.
- [6] Sezen, H. and Moehle, J. P., "Seismic Tests of Concrete Columns with Light Transverse Reinforcement," *ACI Structural Journal*, V.103, No. 6, 2006, pp. 842-849.
- [7] Yoshimura, M.; Takaine, Y. and Nakamura, T., "Axial Collapse of Reinforced Concrete Columns," *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, British Columbia, Canada, 2004.

- [8] Quasalem, H.; Kabeyasawa, T. and Tasai, A., "Evaluation of Axial Deformation Capacity at Axial Load Collapse of Reinforced Concrete Columns," *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, British Columbia, Canada, 2004.
- [9] Iwasaki, T.; Kawashima, K.; Hasegawa, K.; Koyama, T. and Yoshida, T., "Effect of Number of Loading Cycles and Loading Velocity of Reinforced Concrete Bridge Piers," 19th Joint Meeting of the US-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, UJNR, Tsukuba, 1987, pp. 225-238.
- [10] Pujol, S.; Sozen, M. A. and Ramirez, J. A., "Displacement History Effects on Drift Capacity of Reinforced Concrete Columns," *ACI Structural Journal*, V.103, No. 2, 2006, pp. 253-262.
- [11] Verderame, G. M.; Fabbrocino, G. and Manfredi, G., "Seismic Response of RC Columns with Smooth Reinforcement. Part II: Cyclic Tests," *Engineering Structures*, V.30, 2008, pp. 2289-2300.
- [12] ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (318R-05)," American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2005, 430 pp.
- [13] Priestley, M. J. N.; Calvi, G. M. and Kowalsky, M. J., "Displacement-Based Seismic Design of Structures," IUSS Press, Fondazione EUCENTRE, Pavia, 2007, 720 pp.