

## Comparison of Earthquake Codes (TEC 2007 and TBEC 2018) In Terms of Seismic Performance of RC Columns

Hasan Elci (Corresponding author)  
Civil Engineering Department, Balikesir University, 10145, Balikesir, Turkey  
helci@balikesir.edu.tr

Kansu Akca Goker  
Department of City Planning and Urban Development, Metropolitan Municipality  
20010, Denizli, Turkey  
kansuakca89@gmail.com

### Abstract

Turkey Earthquake Codes (TEC 2007: Turkish Earthquake Code-2007, TBEC 2018: Turkish Building Earthquake Code-2018) were compared in terms of the evaluation of the seismic performance of reinforced concrete columns. A theoretical and experimental study has been carried out. For this purpose, four column specimens were constructed. Firstly, these specimens were analyzed by the XTRACT reinforced concrete section analysis program and displacement-based loading path were generated. In accordance with the displacement loading path, these specimens were subjected to constant axial load and increasing reversed cyclic lateral loads. Lateral force-displacement and moment-curvature curves of the specimens were obtained from the test results. As stated in Seismic Codes; damage limits and damage states have been determined depending on the plastic rotating capacity, concrete and steel strains. The results obtained from theoretical and experimental studies were found to be generally compatible. Accordingly, TBEC 2018 gives conservative deformation limits rather than TEC 2007.

**Keywords:** Reinforced Concrete Column, Nonlinear Analysis, Damage States, Damage Limits, Performance.

## Deprem Yönetmeliklerinin (DBYBHY 2007 ve TBDY 2018) Betonarme Kolonların Deprem Performansı Açısından Karşılaştırılması

### Özet

Türkiye Deprem Yönetmelikleri (TDY 2007: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik-2007, TBDY 2018: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018) betonarme kolonların deprem performansının değerlendirilmesi açısından karşılaştırılmıştır. Bunun için deneysel ve teorik bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla dört adet kolon numune hazırlanmıştır. Bu numuneler ilk olarak XTRACT betonarme kesit analiz programı ile çözülmüş ve deplasman esaslı yükleme profili oluşturulmuştur. Elde edilen deplasman profiline uygun olarak, bu numuneler sabit eksenel yükler ve artan tersinir tekrarlı yatay yükler altında deneye tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarından numunelerin, yatay kuvvet-deplasman ve moment-eğrilik grafikleri elde edilmiştir. Yönetmeliklerde belirtilen; plastik dönme kapasitesine, beton ve çelik şekil değiştirmesine bağlı olarak hasar sınırları ve hasar bölgeleri tespit edilmiştir. Teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların genel olarak uyumlu olduğu görülmüştür. Buna göre TBDY 2018, TDY 2007'den daha güvenli tarafta kalan deformasyon limitleri vermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme kolon, doğrusal olmayan analiz, hasar bölgeleri, hasar sınırları, performans.

### 1. Giriş

Depremde hasar gören yapılar üzerinde gerçekleştirilen incelemelerde, yapıların depremde hasar görme

nedenlerinin; malzeme kalitesinin yetersiz olması, yapıların yönetmeliklere uygun boyutlandırılmaması, uygulamada proje ve hesaplara uyulmaması olduğu sonucuna varılmıştır. Mevcut yapı sistemlerinin deprem güvenliklerinin belirlenmesinde, performans analizini öngören yöntemlere başvurulması uygun olacaktır. Çünkü doğrusal olmayan teoriyi esas alan bu yöntemlerden yararlanarak; yapı sistemlerinin dış yükler ve deprem etkileri altındaki davranışları öngörülebilme; yer değiştirme ve şekil değiştirmelere bağlı deprem performansları daha gerçekçi olarak belirlenebilmektedir [1].

Kolonlar, çerçeve yapı sistemlerinin deprem davranışını belirleyen en önemli yapı elemanlarıdır. Geçmişte meydana gelen bina göçmelerinin pek çoğuna yetersiz kolon davranışı neden olmuştur. Binalardaki kolon göçmelerinin başlıca nedenleri kesme kırılması ve yetersiz süneklik kapasitesidir. Mevcut yapıların değerlendirme yöntemlerinde, yönetmelikler genel olarak yapı elemanlarının plastik dönme kapasiteleri üzerinden eleman performanslarını belirlemektedir [2, 3]. Yönetmeliklerde ise, performansı belirleyen hasar sınırları, malzeme şekil değiştirme sınırları göz önüne alınarak hesaplanan plastik dönmeler dikkate alınarak hesaplanmaktadır [4, 5, 6]. Bu konu hakkında birçok deneysel ve analitik çalışma yapılarak yönetmelik şartlarıyla karşılaştırılmıştır [7, 8].

Acun ve Sucuoğlu tarafından yapılan deneysel çalışmada; eğilme davranışı için tasarlanan 12 adet betonarme kolon tekrarlı ve yüksek genlikli öteleme çevrimleri altında test edilmiştir. Deney elemanlarının üretiminde deprem yönetmeliklerine uygun ve yetersiz olmak üzere iki tip tasarım uygulanmıştır. Deney elemanlarına uygulanan öteleme genlikleri ve genliklerin dizini temel değişkendir. Yapılan değerlendirme sonucunda Eurocode 8, ASCE/SEI 41 ve TDY 2007 tarafından önerilen şekil değiştirme esaslı performans sınırlarının yönetmeliklere göre yetersiz kolonlar için yapılan deneyler ışığında aşırı güvenli tarafta kaldığı görülmüştür. Bu sonuçların mevcut betonarme binaların deprem risklerinin değerlendirilmesinde yanıltıcı sonuçlar verebileceği düşünülmektedir. 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 daha güvenli tarafta kaldığı görülmektedir [9].

Işıltan'ın yaptığı çalışmada; mevcut yapı ve yapı elemanlarının deprem performansının belirlenmesi ve deprem güvenliği hususlarında; TDY 2007, Eurocode 8, FEMA 356 yönetmeliklerinde kullanılan hesap yöntemleri, yapılan kabuller, performans sınırları karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. PEER veri tabanında [10] bulunan, farklı araştırmacılar tarafından yapılmış betonarme kolon deneyleri incelenerek performans sınırları belirlenmiştir. Çalışma kapsamında incelenen üç farklı yönetmeliğin farklı özelliklere sahip kolonlar için tanımladığı performans sınırları birbirleri ile karşılaştırılmış, yönetmeliklerin verdiği sınırların birbirinden çok farklı olabileceği görülmüştür. Bunun sonucu olarak yönetmeliklerce öngörülen performans sınırlarının, yapılmış olan deneylerden elde edilen sonuçlar ile önemli oranda uyumsuz olabileceği görülmüştür [8].

Yavaş ve Türker tarafından yapılan deneysel çalışmada; TDY 2007'de öngörülen şekil değiştirme esaslı hasar sınırları sargı donatısı yetersizliği bulunan kolon elemanlar üzerinde deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda, TDY 2007'de verilen şekil değiştirme esaslı hasar sınırları ile deney sonucunda kolon elemanlarda oluşan hasar sınırlarının uyumlu olduğu gözlenmiştir [11].

Koğlu ve Peker'in yaptığı çalışmada; betonarme kesitlerin davranışına eksenel yük, malzeme modeli, sargı donatısı etkisi incelenmiş olup, kesit davranışı, moment-eğrilik ilişkisi, plastik dönme kapasitesi ve eğrilik sünekliği karşılaştırılmıştır [12].

Bu çalışmada, TDY 2007 ve TBDY 2018 yönetmelikleri betonarme kolonların deprem performansını açısından, teorik ve deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Bu amaçla farklı özelliklere sahip dört adet kolon numune hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde yapılan deneylerde, yönetmeliklerdeki hasar düzeyi tanımlamaları deneysel gözlemlerle değerlendirilmiştir. Aynı numunelerin teorik çözümleri de yapılmış ve elde edilen sonuçların genel olarak uyumlu olduğu görülmüştür. Buna göre TBDY 2018'in, TDY 2007'den daha güvenli tarafta kalan deformasyon limitleri verdiği görülmüştür.

## 2. Kesit Hasar Sınırları ve Hasar Bölgeleri

Yönetmeliklerde binaların deprem performansının değerlendirilmesi için, kuvvet esaslı ve şekil değiştirme esaslı yöntemlere yer verilmiştir. Kuvvet esaslı yöntemler Doğrusal Elastik Yöntemler, şekil değiştirme esaslı yöntemler ise Doğrusal Elastik Olmayan Yöntemler olarak adlandırılmaktadır.

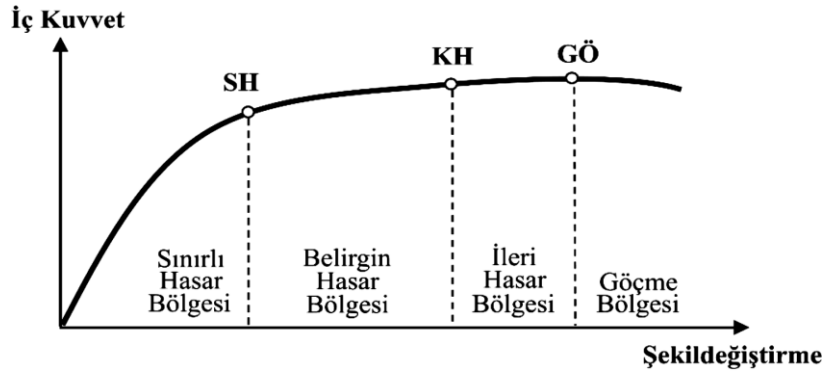
Şekil değiştirme esaslı tasarım ve değerlendirme yöntemleri, malzemenin elastik ötesi davranışını hesaba katmaya olanak sağlamaktadır. Bu nedenle kuvvete dayalı tasarım yöntemlerine göre, yer hareketi etkisiyle ortaya çıkması muhtemel yapısal hasar öngörülerek yapının deprem davranışı hakkında gerçeğe daha yakın ve ayrıntılı bilgi sağlamaktadır. Deprem etkisi altında mevcut binaların yapısal performanslarının belirlenmesi ve güçlendirme analizleri için kullanılacak Doğrusal Elastik Olmayan

Hesap Yöntemlerinin amacı, öngörülen bir deprem tehlike seviyesi için sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme istemleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet istemlerinin hesaplanmasıdır [5, 6]. Bu çalışmada; yönetmeliklerde verilen şekil değiştirme esaslı hasar sınırları kolon elemanlar üzerinde çalışılmıştır. Beton ve donatı çeliğinin birim şekil değiştirmeleri ve kesit dönmeleri cinsinden elde edilen hasar seviyeleri, birim şekil değiştirme kapasiteleri ile karşılaştırılarak, kesit düzeyinde performans seviyeleri belirlenmiştir.

## 2.1 TBDY 2018'e göre Kesit Hasar Sınırları ve Hasar Bölgeleri

TBDY 2018'de, sünek elemanlar için kesit düzeyinde üç hasar durumu ve hasar sınırı tanımlanmıştır. Bunlar Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçme Öncesi Hasar (GÖ) durumları ve bunların sınır değerleridir. Sınırlı hasar ilgili kesitte sınırlı miktarda elastik ötesi davranışı, kontrollü hasar kesit dayanımının güvenli olarak sağlanabileceği elastik ötesi davranışı, göçme öncesi hasar durumu ise kesitte ileri düzeyde elastik ötesi davranışı tanımlamaktadır. Gevrek olarak hasar gören elemanlarda bu sınıflandırma geçerli değildir.

Kritik kesitlerinin hasarı SH'ya ulaşmayan elemanlar Sınırlı Hasar Bölgesi'nde, SH ile KH arasında kalan elemanlar Belirgin Hasar Bölgesi'nde, KH ile GÖ arasında kalan elemanlar İleri Hasar Bölgesi'nde, GÖ'yü aşan elemanlar ise Göçme Bölgesi'nde yer alırlar (Şekil 1).



Şekil 1. Kesit hasar düzeyi/bölgesi tanımları [6].

### 2.1.1 TBDY 2018'e göre Betonarme Elemanlar için Performans Düzeyleri

Plastik şekil değiştirmelerin meydana geldiği betonarme sünek taşıyıcı sistem elemanlarında, çeşitli performans düzeyleri için izin verilen sınır değerler aşağıda özetlenmiştir. TBDY 2018'de yayılı ve yığılı plastik davranış modelleri öngörülmektedir. Bu çalışmada pratik özellikleri nedeniyle, uygulamadaki mühendislerin çoğunlukla tercih edeceği yığılı plastik davranış modellemesi kullanılmıştır [6].

**Göçmenin Önlenmesi (GÖ) Performans Düzeyi:** Yığılı plastik davranış modeline göre hesaplanan plastik dönmeler için izin verilen sınır, kesite etkiyen eksenel kuvvet, TBDY 2018'de verilen beton ve donatı çeliği modelleri dikkate alınarak, yapılacak eğrilik analizi sonucunda (1) eşitliği ile hesaplanacaktır.

$$\theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3} \left[ (\phi_u - \phi_y) L_p \left( 1 - 0,5 \frac{L_p}{L_s} \right) + 4,5 \phi_u d_b \right] \quad (1)$$

Burada  $\phi_u$ , beton ve donatı çeliği şekil değiştirmeleri ile TBDY 2018'de verilen beton ve donatı çeliği modellerinden yararlanılarak ve kesite etkiyen eksenel normal kuvvet dikkate alınarak yapılan analizden elde edilen göçme öncesi toplam eğriliği göstermektedir.  $\phi_y$  ise akma eğriliğidir.  $L_p$  plastik şekil değiştirme bölgesinin uzunluğu,  $L_s$  kesme açıklığı,  $d_b$  ise m olarak çekmede ortalama boyuna donatı çapıdır.

(1) eşitliğindeki  $\phi_u$  ifadesinin belirlenmesinde kullanılacak, göçmenin önlenmesi performans düzeyi için beton birim kısalması,

$$\varepsilon_c^{(GÖ)} = 0,0035 + 0,04 \sqrt{\omega_{we}} \leq 0,018 \quad (2)$$

eşitliği ile hesaplanacaktır. Bu eşitlikteki ilk terim sargısız betonun (kabuk betonu) birim kılmasına karşılık gelmektedir.  $\omega_{we}$  etkin sargı donatısının mekanik donatı oranını göstermektedir.

$$\omega_{we} = \alpha_{se} \rho_{sh,min} \frac{f_{ywe}}{f_{ce}} \quad (3)$$

(3) eşitliğinde yer alan  $\alpha_{se}$  sargı donatısı etkinlik katsayısını,  $\rho_{sh,min}$  dikdörtgen kesitte iki yatay doğrultuda hacimsel enine donatı oranının küçük olanını,  $f_{ywe}$  enine donatının ortalama (beklenen) akma dayanımını,  $f_{ce}$  betonun ortalama (beklenen) basınç dayanımını göstermektedir.

$$\rho_{sh} = \frac{A_{sh}}{b_k s} \quad (4)$$

$$\alpha_{se} = \left( 1 - \frac{\sum a_i^2}{6b_o h_o} \right) \left( 1 - \frac{s}{2b_o} \right) \left( 1 - \frac{s}{2h_o} \right) \quad (5)$$

(4) ve (5) eşitliklerinde,  $A_{sh}$  ve  $\rho_{sh}$  göz önüne alınan doğrultuda enine donatının alanını ve hacimsel oranını,  $b_k$  dik doğrultudaki çekirdek boyutunu (en dıştaki enine donatı eksenleri arasındaki uzaklık),  $s$  enine donatı aralığını göstermektedir.  $b_o$  ve  $h_o$  sargı donatısı eksenlerinden ölçülen sargılı beton boyutlarını,  $a_i$  bir etriye kolu veya çiroz tarafından mesnetlenen boyuna donatıların eksenleri arasındaki uzaklığı göstermektedir.

Göçmenin önlenmesi performans düzeyi için donatı çeliği birim şekil değiştirmesi,

$$\varepsilon_s^{(GÖ)} = 0,4\varepsilon_{su} \quad (6)$$

olarak alınacaktır. Burada  $\varepsilon_{su}$  çekme dayanımına karşı gelen birim uzamayı göstermektedir.

**Kontrollü Hasar (KH) Performans Düzeyi:** Beton ve donatı çeliği için izin verilen toplam birim şekil değiştirmeler ile plastik dönme sınırları, Göçmenin Önlenmesi performans düzeyi için tanımlanan değerlere bağlı olarak (7) eşitliği ile hesaplanır.

$$\varepsilon_c^{(KH)} = 0,75\varepsilon_c^{(GÖ)} \quad \varepsilon_s^{(KH)} = 0,75\varepsilon_s^{(GÖ)} \quad \theta_p^{(KH)} = 0,75\theta_p^{(GÖ)} \quad (7)$$

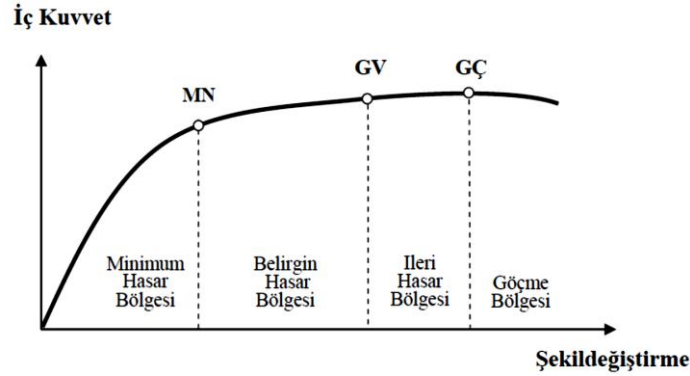
**Sınırlı Hasar (SH) Performans Düzeyi:** Beton ve donatı çeliği için izin verilen toplam birim şekil değiştirmeler (8) eşitliğinde tanımlanmıştır.

$$\varepsilon_c^{(SH)} = 0,0025 \quad \varepsilon_s^{(SH)} = 0,0075 \quad (8)$$

## 2.2 TDY 2007'ye göre Kesit Hasar Sınırları ve Hasar Bölgeleri

TDY 2007'de, sünek elemanlar için kesit düzeyinde üç sınır durumu tanımlanmıştır. Bunlar Minimum Hasar Sınırı (MN), Güvenlik Sınırı (GV) ve Göçme Sınırı (GÇ)'dir. Minimum hasar sınırı ilgili kesitte elastik ötesi davranışın başlangıcını, güvenlik sınırı kesitin dayanımını güvenli olarak sağlayabileceği elastik ötesi davranışın sınırını, göçme sınırı ise kesitin göçme öncesi davranışının sınırını tanımlamaktadır. Gevrek olarak hasar gören elemanlarda bu sınıflandırma geçerli değildir.

Kritik kesitlerinin hasarı MN'ye ulaşmayan elemanlar Minimum Hasar Bölgesi'nde, MN ile GV arasında kalan elemanlar Belirgin Hasar Bölgesi'nde, GV ve GÇ arasında kalan elemanlar İleri Hasar Bölgesi'nde, GÇ'yi aşan elemanlar ise Göçme Bölgesi'nde yer alırlar (Şekil 2).



Şekil 2. Kesit hasar düzeyi/bölgesi tanımları [5].

### 2.2.1 TDY 2007’de Betonarme Elemanların Kesit Birim Şekil Değiştirme Kapasiteleri

TDY 2007’de, plastik şekil değiştirmelerin meydana geldiği betonarme sünek taşıyıcı sistem elemanlarında, çeşitli kesit hasar sınırlarına göre izin verilen şekil değiştirme üst sınırları (kapasiteleri) aşağıda tanımlanmıştır:

Kesit Minimum Hasar Sınırı (MN) için kesitin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirmesi ile donatı çeliği birim şekil değiştirmesi üst sınırları:

$$(\varepsilon_{cu})_{MN} = 0,0035 \quad (\varepsilon_s)_{MN} = 0,010 \quad (9)$$

Kesit Güvenlik Sınırı (GV) için etriye içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirmesi ile donatı çeliği birim şekil değiştirmesi üst sınırları:

$$(\varepsilon_{cg})_{GV} = 0,0035 + 0,01 (\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0,0135 \quad (\varepsilon_s)_{GV} = 0,040 \quad (10)$$

Kesit Göçme Sınırı (GÇ) için etriye içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirmesi ile donatı çeliği birim şekil değiştirmesi üst sınırları:

$$(\varepsilon_{cg})_{GC} = 0,004 + 0,014 (\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0,018 \quad (\varepsilon_s)_{GC} = 0,060 \quad (11)$$

## 3. Deneysel Çalışma

### 3.1 Deneysel Elemanların Özellikleri

Çalışmada; C812, U812, C414, U414 olarak isimlendirilen 4 adet kolon numune üretilmiştir. Kolon numunelerinin donatı özellikleri ve beton basınç dayanımları Tablo 1’de verilmiştir. Kolonlara ait diğer bilgiler Şekil 3’te gösterilmiştir. Eksenel normal kuvvet  $0,25A_c f_{ck}$  olarak alınmıştır.  $A_c$  brüt beton enkesit alanı,  $f_{ck}$  betonun karakteristik basınç mukavemetidir. Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde birleşimi etriyesiz, ancak kolonları etriye sayısı ve aralığı açısından göreceli olarak iyi olan elemanlarda eleman hasarlarının büyük bir kısmı birleşim bölgesinde oluşmaktadır [13]. Bunun olmaması için, temel boyuna donatıları sık etriyelerle sarılmış, temel üzerindeki ilk etriye kolonun başladığı noktaya konmuştur. Donatılardan alınan numuneler üzerinde yapılan çekme deneyi sonucunda donatıların elastiklik sınırı, pekleşme bölgesi, çekme dayanımı ve kopma uzaması belirlenmiştir. Çekme deneylerinden elde edilen ortalama değerler Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kolon numune bilgileri

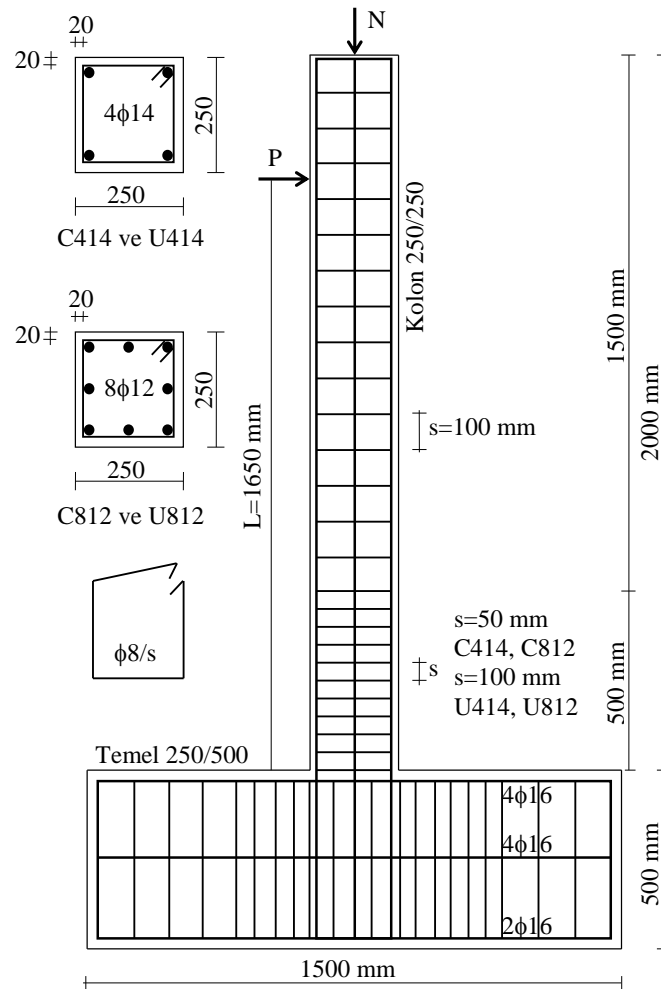
Numune Adı	Boyutları (mm)	Boyuna Donatı	Enine Donatı	Beton dayanımı $f_{ck}$ (MPa)	Eksenel kuvvet (kN)
C414	250/250	4φ14	φ8/50	36,7	573,438
C812	250/250	8φ12	φ8/50	30,0	468,750
U414	250/250	4φ14	φ8/100	36,7	573,438
U812	250/250	8φ12	φ8/100	40,6	634,375

Tablo 2. Çelik çekme deneyi sonuçları

Donatı Çapı	$f_{sy}$ (MPa)	$\epsilon_{sy}$ (%)	$\epsilon_{sh}$ (%)	$f_{su}$ (MPa)	$\epsilon_{su}$ (%)
$\phi 8$	472	0,23	2,30	574	11,31
$\phi 12$	472	0,24	1,89	568	11,68
$\phi 14$	455	0,23	1,59	568	12,88

### 3.2 Deney Düzenegi

Balıkesir Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda kurulan deney düzenegi Şekil 4'te gösterilmiştir. Deney düzeneginde yatay ve düşey yük uygulamak üzere iki adet yük veren ve bunların bulunduğu noktalarda yük ölçerler (load cells) bulunmaktadır. Kolon elemanların yatay deplasmanlarının ölçmek amacıyla yatay yükün uygulandığı seviyede potansiyometrik cetvel yerleştirilmiştir. Yatay yükün uygulandığı doğrultudaki kolon eğriliğini belirlemek amacıyla temel yüzünden itibaren 125 mm yükseklikte ve her iki yüzde birer adet olmak üzere potansiyometrik cetvel yerleştirilmiştir. Deney süresince temel hareketlerini kontrol etmek amacıyla temeldeki deplasmanlar da yerleştirilen sensörler vasıtasıyla izlenmiştir. Deneyler süresince kolon elemanlardan elde edilen deneysel veriler 24 kanallı veri toplama cihazı ile kaydedilmiştir.



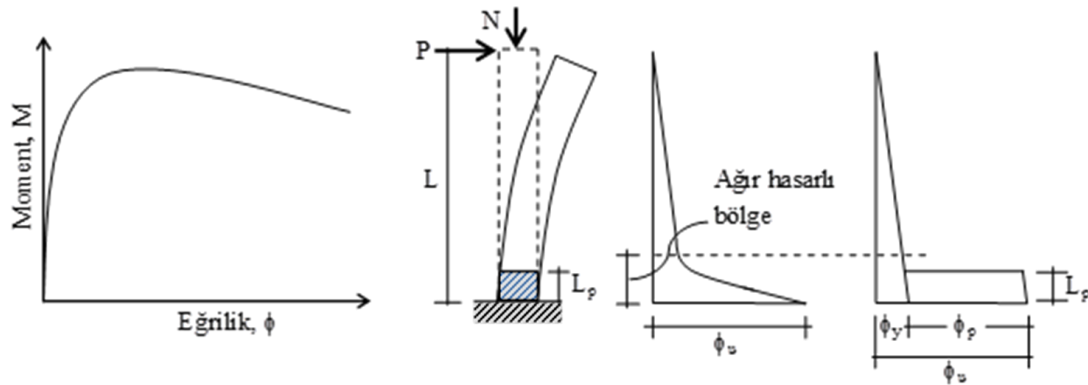
Şekil 3. Kolon boyutları ve donatı detayları



Şekil 4. Deney düzeneği

### 3.3 Kolon Hasar Sınırlarının Belirlenmesi

Kolon hasar sınırları TBDY 2018’de tanımlanan yığılı plastik davranış modeline göre yapılmıştır. Bu modelde doğrusal elastik olmayan şekil değiştirmeler belirli bir bölgede yoğunlaşmıştır. Bu bölgeler dışında doğrusal elastik davranış geçerlidir. Eğriliklerin idealleştirilmesinde de aynı kabulden yararlanarak, Şekil 5’te görüldüğü gibi, eğriliğin plastik mafsallarda aniden artış gösterdiği kabul edilmiştir.



Şekil 5. Eğrilik diyagramının idealleştirilmesi [14].

Şekil 5’teki gibi eğriliğin idealleştirilmesi neticesinde; dönme miktarı, eğrilik ile plastik mafsallık boyunun çarpımına eşit olmaktadır. Burada;  $\theta$  dönme,  $\phi$  eğrilik;  $L_p$  plastik mafsallık uzunluğudur. Dönme ( $\theta$ ), (12) eşitliğinde gösterilmiştir.

$$\theta = \phi L_p \quad (12)$$

Bazı araştırmacılar, aksenal yük seviyesi yüksek kolon numuneler ile yaptıkları deneylerde, plastik mafsallık uzunluğunu yaklaşık  $1,0h$  olarak ölçmüşlerdir. Burada  $h$ , kolon kesitinin eğilme doğrultusundaki boyutudur [15, 16, 17].

Paulay ve Priestley, yaptıkları çalışmalar sonucu plastik mafsallık uzunluğu için;

$$L_p = 0,08L + 0,022d_b f_{sy} \quad (13)$$

eşitliğini önermişlerdir. Bu eşitlik betonarme kolonlar için yaklaşık  $L_p=0,5h$  olarak alınabilir [7]. Genellikle plastik mafsallık boyu olarak bu değer kullanılmaktadır. TBDY 2018 de plastik mafsallık uzunluğunun  $L_p=0,5h$  alınmasını önermektedir [6].

Park ve Paulay plastik mafsallık kullanarak eğrilik dağılımını kolon uzunluğu boyunca basitleştirmişler ve kolon uç ötelenmesini hesaplamışlardır [18].

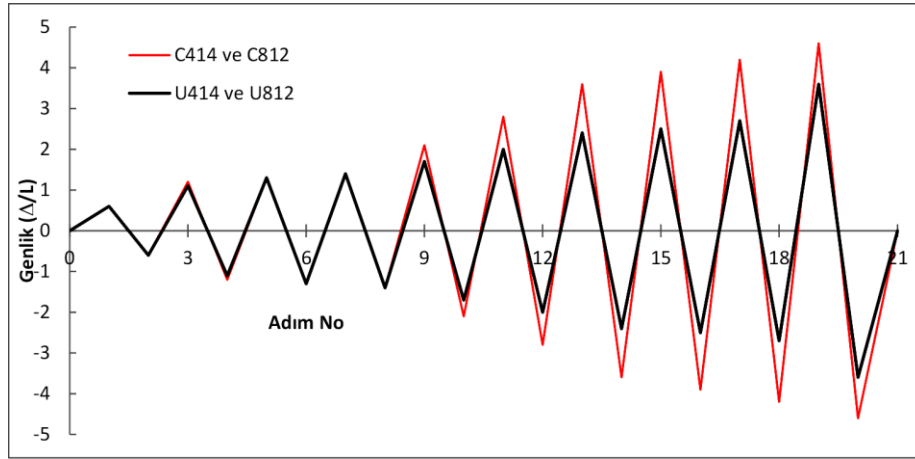


Park, Priestly ve Gill 550×550 mm boyutlarındaki dört adet kolona  $0,2A_c f_{ck} - 0,6A_c f_{ck}$  aralığında aksel yükler uygulayarak deneyler yapmışlardır. Yatay deplasmanın hesabı için (14) eşitliğini kullanmışlardır [19]. 14 eşitliğinde  $\Delta_y$  elastik,  $\Delta_p$  plastik ve  $\Delta$  toplam yatay yer değiştirmeyi göstermektedir. Yapılan araştırmalar sonucu plastik mafsal boyunun  $0,4h$  ortalama değerini aldığını ve aksel yüklemenin plastik mafsal boyunu nispeten etkilemediğini ortaya koymuşlardır.

$$\Delta = \Delta_y + \Delta_p = \frac{\phi_y L^2}{3} + (\phi - \phi_y) L_p (L - 0,5L_p) \quad (14)$$

Mander ve arkadaşları sargısız ve sargılı beton için kullanılabilen bir beton modeli geliştirilmiştir [20, 21]. Yönetmelikler de Mander gerilme-şekil değiştirme bağıntılarının kullanılmasını önermektedir [5,6]. Farklı dayanıma sahip donatılar için uygulanabilecek bir çelik gerilme-şekil değiştirme modeli Mander tarafından önerilmiştir [22]. Yapılan çalışmada, Yönetmelikler tarafından da önerilen bu model kullanılmıştır [5, 6].

Yukarıda açıklanan kabullere göre, XTRACT [23] betonarme kesit analiz programı kullanılarak ve sargılı betonda maksimum şekil değiştirme %2 olacak şekilde, her bir kolon için 10 döngüden oluşan deplasman esaslı yükleme profili oluşturulmuştur (Şekil 6). Deneyler bu deplasman profiline uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6. Deplasman esaslı yükleme profili

Deney sonuçlarından numunelerin, yatay kuvvet-deplasman ve moment-eğrilik grafikleri elde edilmiştir [24]. Numunelerin XTRACT betonarme kesit analiz programı ile sayısal çözümü yapılmıştır. Yönetmeliklerde belirtilen; plastik dönme kapasitesine, beton ve çelik şekil değiştirmesine bağlı olarak hasar sınırları ve bunlara karşılık gelen yatay deplasmanlar hesaplanmıştır. Akma eğriliği olarak donatının akmasına karşılık gelen eğrilik yerine, iki doğru parçası ile idealleştirilmiş moment-eğrilik bağıntısının eşdeğer akma eğriliği kullanılmıştır.

Hasar sınırının belirlenmesinde etkili olan birim şekil değiştirme ve dönme değerleri Tablo 3'te koyu olarak gösterilmiştir. Parantez için de verilen değerler TDY 2007'ye göre, diğer değerler TBDY 2018'e göre hesaplanan değerlerdir. Tablo 3'te verilen  $\epsilon_c$  değeri sargılı beton birim kışalmasını ifade etmektedir.  $\epsilon_c$ , sadece TDY 2007'ye göre yapılan hesapta MN hasar sınırının belirlenmesinde, kesitin en dış lifindeki (sargısız beton) beton birim kışalmasını ifade etmektedir.

Tablo 3'te görüldüğü gibi, TBDY 2018, TDY 2007'ye göre daha güvenli tarafta kalan deformasyon limitleri vermektedir. Sadece etriye aralığı daha fazla (100 mm) olan U414 ve U812 numuneleri için, Göçme durumunda hesaplanan toplam yatay deplasmanlar TDY 2007'den daha fazla çıkmıştır.

Tablo 3. Hasar sınırlarına karşılık gelen şekil değiştirme ve deplasman değerleri



Kolon Adı	Hasar Sınırı	$\varepsilon_s$ (%)	$\varepsilon_c$ (%)	$\phi_u(10^{-3})$ (rd/m)	$\phi_y(10^{-3})$ (rd/m)	$\theta_p(10^{-3})$ (rd)	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_p$ (mm)	$\Delta_u$ (mm)
C414	GÖ (GÇ)	3,41 (3,41)	-1,80 (-1,80)	271,7 (274,4)	19,80	31,60 (31,83)	18,0	50,2 (50,5)	68,2 (68,5)
	KH (GV)	2,56 (2,86)	-- (-1,35)	199,3 (222,1)		22,44 (25,29)		35,6 (40,1)	53,6 (58,1)
	SH (MN)	-- (0,55)	-0,25 (-0,35)	39,04 (42,31)		2,41 (2,81)		3,8 (4,5)	21,8 (22,5)
C812	GÖ (GÇ)	3,46 (3,47)	-1,80 (-1,80)	273,9 (275,7)	21,04	30,10 (31,83)	19,1	47,8 (50,5)	66,9 (69,6)
	KH (GV)	-- (2,70)	-- (-1,35)	201,8 (212,3)		22,60 (23,91)		35,9 (38,0)	55,0 (57,1)
	SH (MN)	-- (0,49)	-0,25 (-0,35)	36,04 (39,0)		1,88 (2,24)		3,0 (3,6)	22,1 (22,7)
U414	GÖ (GÇ)	1,85 (1,80)	-1,24 (-1,11)	161,8 (153,2)	20,72	18,11 (16,56)	18,8	28,7 (26,3)	47,5 (45,1)
	KH (GV)	1,38 (1,48)	-- (-0,86)	112,9 (122,3)		11,52 (12,70)		18,3 (20,2)	37,1 (39,0)
	SH (MN)	-- (0,58)	-0,25 (-0,35)	39,6 (44,1)		2,36 (2,92)		3,8 (4,6)	22,6 (23,4)
U812	GÖ (GÇ)	1,57 (1,39)	-1,21 (-1,04)	144,9 (126,6)	21,20	15,13 (13,18)	19,2	24,0 (20,9)	43,2 (40,1)
	KH (GV)	1,17 (1,18)	-- (-0,81)	104,3 (104,4)		10,40 (10,40)		16,5 (16,5)	35,7 (35,7)
	SH (MN)	-- (0,47)	-0,25 (-0,35)	35,3 (38,1)		1,76 (2,11)		2,8 (3,3)	22,0 (22,5)

### 3.4 Deneilerin Yapılması ve Sonuçların Değerlendirilmesi

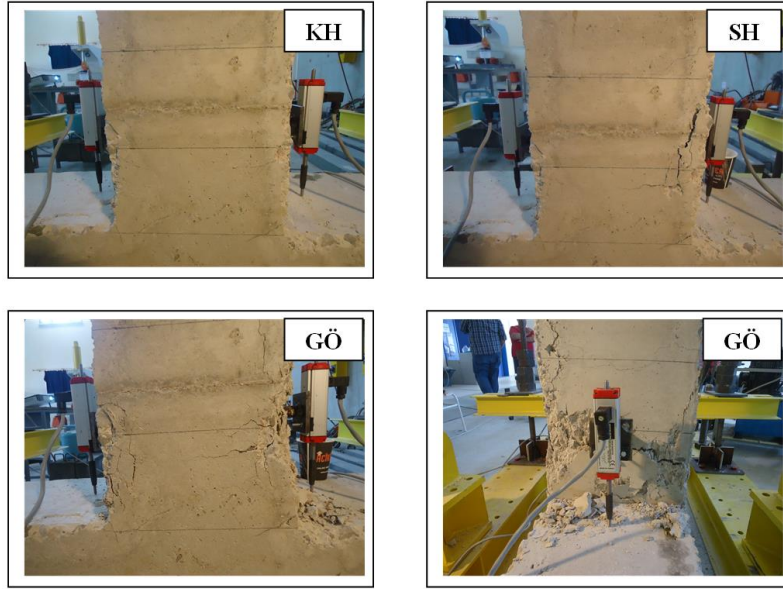
Çalışmada; beton mukavemetleri, enine ve boyuna donatıları farklı 4 adet kolon numuneye Şekil 6'da verilen deplasman esaslı yükleme profili uygulanmıştır. Aşağıdaki örnek olarak C414 numunesinde TBDY 2018'e göre gözlenen hasarlar ayrıntılı olarak verilmiştir.

Yüklememenin 2. döngüsünde, boyuna donatıların akması nedeniyle, kolonda kılcal çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Kontrollü Hasar sınırında çatlak sayısının ve çatlak genişliklerinin arttığı gözlenmiştir. Maksimum çatlak genişlikleri 0,2-0,3 mm mertebesindedir. Sınırlı Hasar sınırında, artan çatlak sayısı ve çatlak genişliğine ek olarak, kabuk betonunda dökülmeler başlamıştır. Göçme Öncesi Hasar sınırında, plastik mafsallık bölgesinde kabuk betonu büyük oranda dökülmüştür. Çatlak genişliği 6 mm'ye kadar çıkmıştır. Teorik çözümden elde edilen, çekirdek betonundaki %2 şekil değiştirmeye karşılık gelen yer değiştirme değerlerinde deneyler sonlandırılmıştır (Şekil 7).

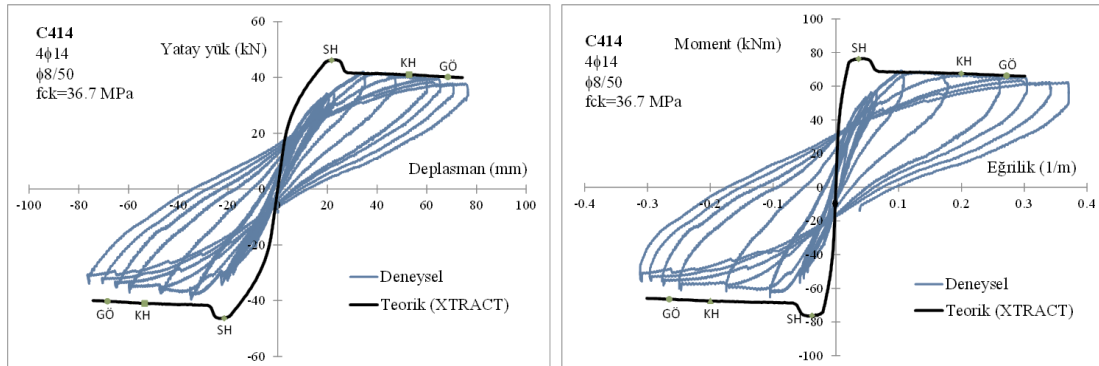
Düşey yük ve tersinir yatay yükler altında deneyden elde edilen yatay yük-deplasman ve moment-eğrilik grafikleri ile XTRACT programından elde edilen teorik davranış eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 8'de verilmiştir. Deneyleri yapılan diğer 3 kolon numunesi için de aynı hesaplar yapılmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 9).

Tablo 3'te görüldüğü gibi, iki ayrı deprem yönetmeliğine göre yapılan çözümlerden elde edilen eğrilik ve yatay yer değiştirme sınır değerleri birbirine çok yakındır. Bu nedenle Şekil 8 ve Şekil 9'da sadece TBDY 2018 için hesaplanan değerler gösterilmiştir.

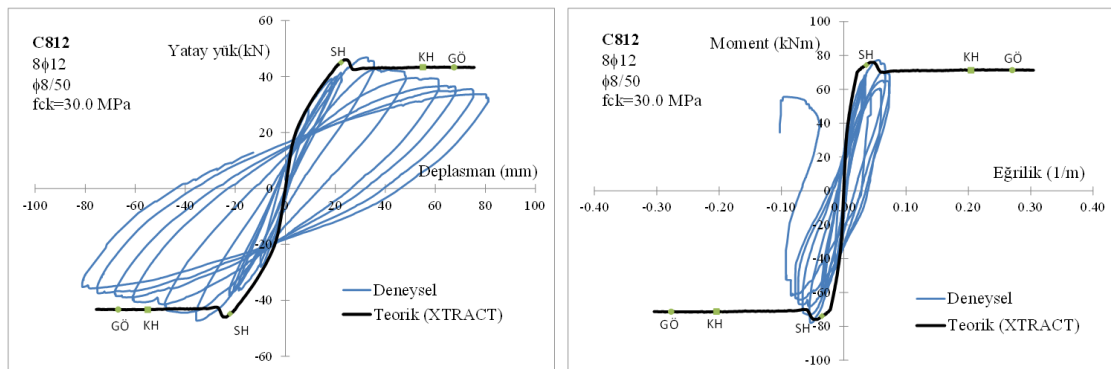
Deneyi yapılan dört numune için, deneylerden elde edilen sonuçlar ile XTRACT kesit analizi programı ile yapılan çözümlerden elde edilen davranış eğrilerinin genel olarak uyumlu olduğu görülmüştür.

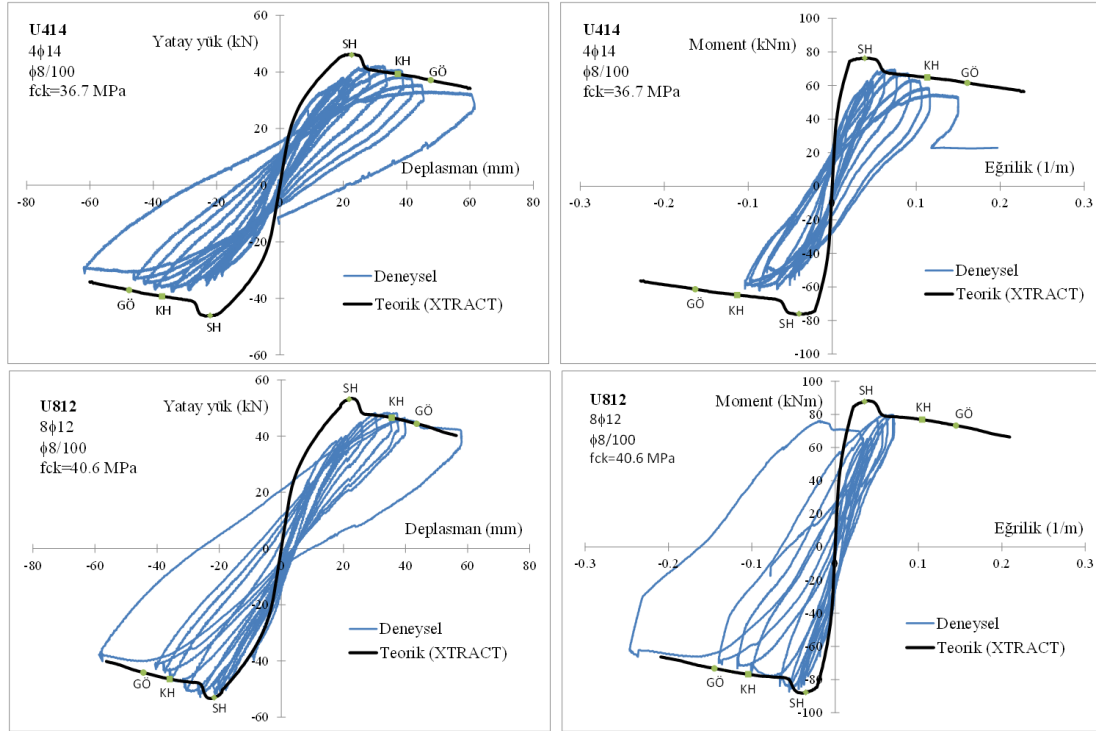


Şekil 7. TBDY 2018'e göre hasar sınırlarına karşılık gelen hasar durumları



Şekil 8. C414 kolonu Yatay Yük-Deplasman (P-Δ) ve Moment-Eğrilik (M-φ) diyagramları





Şekil 9. Kolonlara ait P-Δ ve M-φ diyagramları

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, özellikleri farklı 4 adet kolon numune üzerinde, sabit aksenal yük ve tekrarlı tersinir yatay yükler altında deneysel çalışma yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar ile aynı kesitlerin XTRACT programı ile çözümlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçların genel olarak uyumlu olduğu görülmüştür [24].

Tablo 3'te görüldüğü gibi, her iki yönetmelikten elde edilen hasar sınır değerleri birbirine yakındır. Genel olarak TBDY 2018, TDY 2007'ye göre daha güvenli tarafta kalan deformasyon limitleri vermektedir. Bunun sonucu olarak yatay deplasmanlar ve hasarlar sınırlandırılmakta ve daha güvenli çözümler elde edilmektedir.

TDY 2007'ye göre, süneklik düzeyi yüksek kolonlar için kolonun brüt enkesit alanı,  $N_{dm}$  düşey yük ve depremin ortak etkisi altında hesaplanan aksenal basınç kuvvetlerinin en büyüğü olmak üzere,  $A_c \geq N_{dm} / (0,50 f_{ck})$  koşulunu sağlayacaktır [5]. TBDY 2018'de 0,50 katsayısı 0,40 olarak değiştirilmiştir [6]. Yapılan bu değişiklik, aksenal normal kuvvet azaltılmış ve kolonların daha sünek davranış göstermeleri sağlanmıştır.

Sonuç olarak 01.01.2019 tarihinde yürürlüğe girecek Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nin (TBDY 2018) daha güvenli ve sünek çözümler önerdiği görülmektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, 2013/52 numaralı Balıkesir Üniversitesi BAP Lisansüstü Tez Projesi kapsamında desteklenmiştir. Proje, BAP biriminin 28.12.2017 gün ve 17/06-061sayılı toplantısında kabul edilmiştir.

#### Kaynaklar

- [1] Kaya, M.P., Mevcut Betonarme Binaların Deprem Performanslarının Belirlenmesinde Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Yöntemlerin Karşılaştırılması Üzerine Sayısal Bir İnceleme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [2] ASCE 41-17, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2017.
- [3] Eurocode 8, prEN 1998-1:2003, Design of Structures for Earthquake Resistance, Comité Européen Normalisation, Brussels, 2003.

- [4] Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Nedir?, <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/Personel/comoglu/depremnedir/>, (28 Nisan 2016). Erişim tarihi: 2017.
- [5] T.C Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Ankara, 2007.
- [6] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Resmi Gazete, Sayı: 30364 (Mükerrer), 18 Mart 2018.
- [7] Paulay, T., Priestley, M.J.N., Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, New York, 1992.
- [8] Işıltan, Ö., 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, 2010.
- [9] Acun, B., Sucuoğlu, H., Evaluation of the Performance Limit States of Reinforced Concrete Columns in View of Experimental Observations, İMO Teknik Dergi, 22 (3), 5523-5541, 2011.
- [10] Pacific Earthquake Engineering Research Center, The Structural Performance Database Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2003, < <http://nisee.berkeley.edu/spd/>>, Erişim tarihi: 2017.
- [11] Yavaş, A., Türker, K., Experimental Investigation of Strain Based Damage Limits in Turkish Earthquake Code for RC Columns, SDU International Journal of Technological Sciences, 4 (2), 102-114, 2012.
- [12] Kolgu, S., Peker, K., Effect of Axial Load, Material Model and Confinement on Behavior of RC Sections, Fifth National Conference on Earthquake Engineering, İstanbul, Turkey, 26-30, 2003,
- [13] Bakırcı Er, Ş., Aykaç, S., Can, H., Behaviour of Reinforced Concrete Weak Column-Beam Connections, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (3), 537-547, 2014.
- [14] Celep, Z., Kumbasar, N., Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Dağıtım, İstanbul, 2004.
- [15] Sheikh, S.A., Khoury, S.S., Confined Concrete Columns with Stubs, ACI Structural Journal, 90 (4), 414-431, 1993.
- [16] Sheikh, S.A., Shah, D.V., Khoury, S.S., Confinement of High - Strength Concrete Columns, ACI Structural Journal, 91 (1), 100-111, 1994.
- [17] Bayrak, O., Sheikh, S.A., Confinement Reinforcement Design Considerations for Ductile HSC Columns, Journal of Structural Engineering, 124 (9), 999-1010, 1998.
- [18] Park, R., Paulay, T., Reinforced Concrete Structure, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1975.
- [19] Park, R., Priestly, M.J.N., Gill, W.D., Ductility of Square-Confined Concrete Columns, Journal of Structural Division, 108, (4), 929-950, 1982.
- [20] Mander, J.B., Priestley, M.J.N. Park, R., Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, 114, (8), 1827-1849, 1988.
- [21] Mander, J.B., Priestley, M.J.N. Park, R., Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Division, 114, (8), 1804-1826, 1988.

- [22] Mander, J.B., Seismic Design of Bridge Piers, PhD Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1984.
- [23] XTRACT, v.3.0.9. Cross-sectional X Structural Analysis of Components, Imbsen Software Systems, 9912 Business Park Drive, Suite 130 Sacramento, CA 95827.
- [24] Akça Göker, K., Betonarme Kolonların Deprem Performansını Etkileyen Parametrelerin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, 2017.