



Nonlinear modeling and damage limits of reinforced concrete shear walls based on lumped plasticity behavior

Zeynep Tuna Değer*^{ID}, Çağrı Başdoğan^{ID}

Istanbul Technical University, Earthquake Engineering and Disaster Management Institute, 34396, Istanbul, Turkey

Highlights:

- Reinforced concrete shear wall database
- Backbone curves for nonlinear modeling RC shear walls
- Improvements on damage limits defined for RC shear walls

Keywords:

- nonlinear modeling
- reinforced concrete shear walls
- lumped plasticity behavior model,
- backbone curve
- damage limits

Article Info:

Research Article
Received: 14.04.2020
Accepted: 30.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.719923

Acknowledgement:

The authors acknowledge TUBITAK for supporting this project (No: 114M264) and Professor Polat Gulkan for his valuable contributions to this study. Opinions, findings, and conclusions in this paper are those of the authors and do not necessarily represent those of the funding agency.

Correspondence:

Author: Zeynep Tuna Deger
e-mail: tunaz@itu.edu.tr
phone: +90 212 285 6532

Graphical Abstract

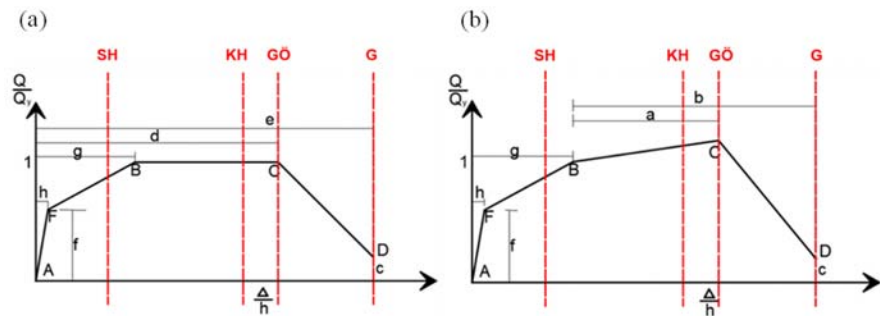


Figure A. Damage limits for (a) shear-controlled and (b) shear-flexure walls and flexure-controlled walls

Purpose: The majority of shear wall buildings constructed prior to the introduction of modern seismic codes include poor material quality and inadequate reinforcement/detailing. For such buildings nonlinear modeling (use of backbone curves) needs special care. This study aims to assemble a database consisting of conventional reinforced concrete shear walls with different failure modes, to review nonlinear modeling techniques of shear walls, and to develop/expand lumped plasticity modeling parameters (backbone curves) and damage limits based on experimental data.

Theory and Methods:

A detailed database consisting of 172 conventional reinforced concrete shear wall specimens was assembled and divided into three bins based on reported failure modes (35 shear-controlled, 73 shear-flexure, 64 flexure-controlled walls). Backbone curves were obtained using cyclic load-deformation responses. Based on statistical analyses, backbone curve coordinates and damage limits were developed for different failure modes.

Results:

Modeling parameters to be used in plastic hinges for lumped plasticity models were developed based on experimental data. Damage limits in various seismic codes were reviewed and expanded by proposing new damage limits in accordance with the reported test results and Turkish Building Code (2018).

Conclusions:

This study provides multiple contributions to the literature as backbone curves were proposed for three different failure modes, whereas dispersion of results were presented in addition to the mean values. The new findings will allow better modeling capability and improved (closer to accurate) damage/failure assessment of shear wall buildings.



Betonarme perdelerin yığılı plastik davranış ile doğrusal olmayan modellenmesi ve hasar sınırları

Zeynep Tuna Değer*^{ID}, Çağrı Başdoğan^{ID}

İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, 34396 İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Betonarme perde duvar deney veri tabanı
- Betonarme perdelerin doğrusal olmayan modellenmesinde kullanılan zarf eğrileri
- Betonarme perdeler için tanımlanan hasar sınırlarının geliştirilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 14.04.2020

Kabul: 30.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.719923

Anahtar Kelimeler:

Doğrusal olmayan
modelleme,
perde duvarlar,
yığılı plastik davranış
modeli,
zarf eğrisi,
hasar sınırları

ÖZET

Betonarme perde duvarlar yüksek depremselliğe sahip bölgelerde yatay yük taşıyıcı sistem olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Perdelerin baskın davranışı ve göçme şekli tipik olarak bodur perdelerde kesme kontrollü, narin perdelerde ise eğilme kontrollü olarak görülmektedir. Mevcut binaların deprem performansı değerlendirmesinin doğru bir şekilde yapılabilmesi için perdelerin doğrusal olmayan davranışının analitik olarak gerçeğe yakın şekilde modellenmesi önemlidir. Bu çalışmada, doğrusal olmayan davranış modelleme teknikleri (örn: yığılı plastisite, yayılı plastisite) incelenmiş, farklı göçme tiplerine sahip konvansiyonel betonarme perdeleri içeren bir veri tabanı oluşturulmuş ve analitik modelleme parametreleri deneysel verilere dayanarak geliştirilmiştir. Bununla birlikte, deprem yönetmeliklerindeki hasar sınırları incelenmiş ve raporlanan deney sonuçları ile Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e uygun olarak farklı hasar sınırlarına ait ötelenme oranı değerleri sunulmuştur. Bu çalışmada elde edilen bulguların betonarme perde duvar davranışının daha gerçekçi modellenmesine ve göçme/hasar değerlendirmelerinin daha doğru tespit edilmesine olanak sağlayacağı düşünülmektedir.

Nonlinear modeling and damage limits of reinforced concrete shear walls based on lumped plasticity behavior

H I G H L I G H T S

- Reinforced concrete shear wall database
- Backbone curves for nonlinear modeling RC shear walls
- Improvements on damage limits defined for RC shear walls

Article Info

Research Article

Received: 14.04.2020

Accepted: 30.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.719923

Keywords:

Nonlinear modeling,
reinforced concrete shear
walls,
lumped plasticity behavior
model,
backbone curve,
damage limits

ABSTRACT

Reinforced concrete shear (structural) walls are commonly used as lateral-load resisting systems in high seismicity zones. Typical dominant behavior and failure mode of shear walls are dominated by shear for squat walls and by flexure for slender walls. It is essential to analytically model nonlinear behavior of shear walls as accurate as possible to achieve effective seismic performance evaluation of existing buildings. This research includes a review of nonlinear modeling approaches (e.g., lumped plasticity, distributed plasticity), assembly of a database consisting of conventional reinforced concrete walls with different failure modes, and development of modeling parameters based on experimental data. Also, damage limits in various seismic codes were reviewed and expanded by proposing new damage limits in accordance with the reported test results and Turkish Building Code (2018). The new findings will allow better modeling capability and improved (closer to accurate) damage/failure assessment of shear wall buildings.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Betonarme perdeler deprem ve rüzgar yüklerine karşı yüksek dayanım ve rijitlik sağladıkları için ülkemiz gibi yüksek riskli deprem bölgelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda meydana gelen depremler sonrası yapılan incelemelerde modern deprem yönetmelikleri yürürlüğe girmeden önce inşa edilmiş olan ve yapı stoğunun büyük bölümünü oluşturan betonarme perdeli binaların donatı ve detaylandırmasında yetersizlik saptanmıştır. Yapılan keşif ve incelemeler bu binaların şiddetli hasar ve/veya göçmeye yatkın olduklarını ortaya koymuştur. Yeni deprem yönetmeliklerinde performansa dayalı tasarım yaklaşımının dahil edilmesi, kentsel dönüşüm gibi sebeplerle mevcut binaların deprem performansının değerlendirilmesinin artması ve hasar görme potansiyeli yüksek perdeli binaları gelecek depremlerde meydana gelebilecek etkilere karşı korumak ve hasar riskini azaltmak için binaların değerlendirme ve iyileştirme (veya rehabilitasyonu) çalışmaları oldukça önem kazanmıştır. Değerlendirme ve rehabilitasyonun doğruluğunu ve ekonomik verimliliğini sağlamak için betonarme perde duvarların deprem yükleri altındaki davranışının çok iyi kavranması ve beklenen davranışın bilgisayar ortamında gerçeğe en yakın şekilde modellenebilmesi gerekmektedir.

Perde duvarların tasarımı, uygulanabilirlik ve ekonomik nedenlerle yüksek şiddetli depremler altında elastik ötesi davranış gösterecek şekilde yapıldığından, doğrusal olmayan duvar davranışının iyi anlaşılması ve analitik modellenmesinin gerçek davranışı yansıtacak şekilde yapılması önemli ve gereklidir. Betonarme perde duvarların deprem etkileri altında doğrusal olmayan davranışının modellenmesi için kabul gören çok sayıda modelleme yaklaşımı bulunmaktadır. Literatürde bu yaklaşımlar, mikro-modeller ve makro-modeller şeklinde sınıflandırılmıştır. Mikro-modeller (sonlu eleman yöntemleri) yapısal davranışın, yüklem ve sınır koşullarının bünye denklemleri kullanılarak detaylı şekilde hesaplanabildiği yaklaşımlar olup [1]; modelin oluşturulması, analiz süreleri ve sonuçların elde edilmesi bakımından en zahmetli ve zaman alan yaklaşımlardır. Makro-modeller ise işlem kolaylığı ve zamandan tasarruf sağladığından bilhassa uygulamada çalışan mühendisler tarafından daha çok tercih edilmektedir.

Makro-modellerin en az mikro-modeller kadar doğru hesaplama yapabilmesi için son yıllarda pek çok araştırma çalışması yapılmıştır. Makro-modellerin içerisinde dünya yönetmeliklerine ve piyasada kullanılan analiz programlarına [2, 3] girerek en yaygın şekilde kullanılan yaklaşımlar yayılı plastik (fiber/lifli) davranış modeli ve yığılı plastik (plastik mafsallı) davranış modelidir (TBDY 2018 [4], PEER/ATC 72 [5], ASCE 41-17 [6]). Yayılı plastik davranış modellerinde, sonlu uzunluktaki uç bölgelerinde veya elemanın tüm uzunluğu boyunca doğrusal olmayan şekilde değişimler sürekli (yayılı) biçimde göz önüne alınırken; yığılı plastik davranış modellerinde eğilme

davranışı kuvvet-deplasman (veya gerilme-birim şekildeğiştirme) ilişkileriyle tanımlanır. Literatürde, perdelerin yığılı plastisite ile doğrusal olmayan modellenmesi konusunda kesme kontrollü perdeler için zarf eğrileri ve eğilme kontrollü perdeler için tek boyutlu çizgi-eleman (line-element) modelleri önerilmiş [7, 8]; plastik mafsallı boylarıyla ilgili çalışmalar Bohl ve Adebar [9] ve Kazaz ve Gülkan [10] gibi araştırmacılar tarafından çalışılmıştır. Ayrıca, Kazaz ve Gülkan çalışmalarında 2007 Deprem Yönetmeliği'ni [11] irdelemiş; perdelerde minimum hasar, güvenlik ve göçme sınır durumları için eğrilik, plastik mafsallı dönme açısı ve birim şekil değiştirme kapasitelerini hesaplamıştır. Inel ve Ozmen [12] ise plastik mafsallı özelliklerinin doğrusal olmayan davranış üzerindeki önemi ve etkisini sistem bazında analitik olarak çalışmıştır.

Yukarıda bahsi geçen makro-model yaklaşımlarında eğilme-kesme etkileşimi ihmal edilmiş olup, kesme davranışı için genellikle elastik ya da elastoplastik bir yay davranışı benimsenmiştir. Bununla birlikte, literatürde kesme-eğilme davranışının perdelerde belirgin şekilde görüldüğü ve ihmal edilmemesi gerektiğini gösteren deneyler mevcuttur [13, 14]. Eğilme-kesme etkileşimini hesaba katan modellere ait çalışmalar 1980li yıllara dayanmakta olup [15]; çubuk analogisi (strut and tie) yöntemi [16] ve çoklu dikey çubuk eleman modeli (multiple vertical line element model veya MVLEM) gibi yaklaşımlarla son yıllarda pek çok araştırmacı tarafından [17-19] çalışılmıştır. Çoklu dikey çubuk eleman modellerinin kullanımı OpenSees, [19] gibi araştırmaya yönelik yaygın olarak kullanılan analiz programlarına aktarılmıştır. Literatürde yer alan modelleme tekniklerinin içerisinde kullanımı en kolay ve pratik olan yöntem yığılı plastisite modelidir. Eşdeğer çubuk ve plastik mafsallı yaklaşımın içeren bu perde modeli için yönetmeliklerde etkin rijitlik katsayıları verilmiş olup, bazı yönetmeliklerde tanımlı mafsallı özelliklerine de yer verilmiştir [6]. Türkiye'de deprem performansı değerlendirmede yaygın olarak kullanılan mevcut yapı analizi programları [2, 3] ASCE 41-17'yi referans almaktadırlar. Ancak, Türkiye gibi mevcut binaların çoğunluğunun yeterli donatı ve detaylandırmaya sahip olmadığı ülkelerde doğrudan, programlarda varsayılan mafsallı bilgilerini kullanmak yerine yapı stoğunu temsil eden perdeler için özel olarak çalışılmış değerlerin kullanılmasının daha doğru olacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte, literatürde mevcut perdelerin deprem performansının belirlenmesinde kullanılacak hasar sınır değerlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar perdeler için sınırlı olup, bu konu betonarme kolon ve kirişler için daha detaylı çalışılmıştır [21-23]. Bu çalışmada, literatürdeki bu eksikliği gidermek hedeflenerek, mevcut yapı stoğundaki perdeler benzer nitelikteki deney numunelerini içeren bir veri tabanı hazırlanmış, deneysel veriler ışığında proje mühendisleri tarafından yaygın olarak kullanılan analiz programlarında yığılı plastisite modelleri için kullanılmaya uygun zarf eğrisi tanımları geliştirilmiş ve perde hasar sınırları genişletilmiş ve güncellenmiştir.

2. MEVCUT BETONARME BİNALARIN DEPREM PERFORMANSININ TBDY 2018'E GÖRE BELİRLENMESİ

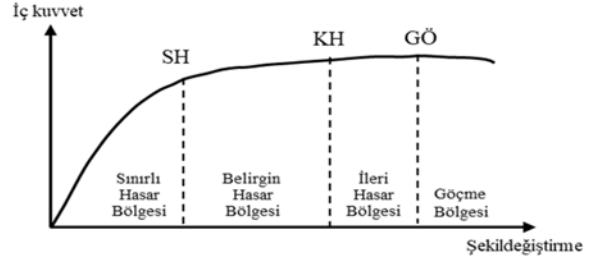
(SEISMIC PERFORMANCE ASSESSMENT OF EXISTING REINFORCED CONCRETE BUILDINGS BASED ON TURKISH SEISMIC CODE-2018)

Mevcut veya güçlendirilmiş binaların deprem performansının belirlenmesi için her ülkede ilgili yönetmeliğe uygun kabuller uygulanmaktadır. Türkiye'de performans değerlendirmesi TBDY-2018 - Bölüm 15 esaslarına göre yapılmakta olup, değerlendirme şekil değiştirmeye göre doğrusal ya da doğrusal olmayan hesap yöntemleriyle ve yapısal eleman düzeyinde yapılmaktadır. Yönetmelik, öngörülen deprem seviyesinde sünek davranışa ait plastik şekil değiştirme istemleri ile gevrek davranışa ait iç kuvvet istemlerinin hesaplanmasını ve ilgili hasar sınırlarıyla karşılaştırılarak kesit hasarlarının belirlenmesini; elemanın en fazla hasar gören kesiti esas alınarak eleman hasarının ve performans hedefi kabullerine göre yapısal hasarın tespit edilmesini esas almaktadır. Değerlendirmede uygulanacak performans hedeflerinin seçimi, bina yükseklik sınıfına (BYS) ve binanın konumu ve kullanım sınıfına göre belirlenen deprem tasarım sınıfına (DTS) bağlı olarak yapılmaktadır.

TBDY 2018'de mevcut binaların doğrusal olmayan davranış olarak modellenmesi ve deprem performansının belirlenmesi için yapı elemanlardaki hasar sınırları ve hasar bölgeleri kesit düzeyinde ele alınmaktadır. Sünek kesit hasar sınırlarına ilişkin üç sınır durumu belirlenmiştir: Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçme Öncesi (GÖ). Sınırlı hasar ilgili kesitte elastik ötesi davranışın başlangıcını, kontrollü hasar kesit dayanımının güvenli olarak sağlayabileceği elastik ötesi davranışı, göçme öncesi hasar durumu ise kesitte ileri seviyede elastik ötesi davranışı tanımlamaktadır. Bu göçme sınırlarına göre, kritik kesitlerinin hasarı SH seviyesine ulaşmayan elemanlar Sınırlı Hasar Bölgesi'nde, SH ile KH sınırları arasında kalan elemanlar Belirgin Hasar Bölgesi'nde, KH ve GÖ sınırları arasında kalan elemanlar İleri Hasar Bölgesi'nde, GÖ sınırını aşan elemanlar ise Göçme Bölgesi'nde değerlendirilmektedir. Yapı elemanlarının kesit hasar sınırları ve kesit hasar bölgeleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Doğrusal veya doğrusal olmayan yöntemler kullanılarak hesaplanan iç kuvvet ve şekil değiştirmelerin kesit hasar sınırları ile karşılaştırılması ile kesitlerin hangi hasar bölgelerinde olduğuna karar verileceği belirtilmiştir.

Bu çalışma doğrusal olmayan hesap yöntemleri ile yapılan değerlendirmeye yönelik betonarme perde duvarlar için modelleme önerileri getirmeyi hedeflemektedir. TBDY 2018'e göre mevcut veya güçlendirilmiş binaların değerlendirilmesinde kullanılan doğrusal olmayan hesap yöntemleri Tek Modlu İtme Yöntemleri, Çok Modlu İtme Yöntemleri ve Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemi'dir. Bu yöntemlerde izlenecek hesap adımları yönetmelikte detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Analiz modeli oluşturulup bu yöntemlerden uygun olanıyla analizler tamamlandıktan sonra, deprem yükleri altında

plastik mafsallarda oluşan plastik dönme istemlerinin öngörülen performans hedefi için tanımlanan dönme kapasiteleri ile karşılaştırılması yoluyla sünek davranışa ilişkin kesit düzeyinde performans değerlendirilmesi yapılmaktadır. Performans değerlendirmesi ile her bir elemanın hasar bölgesi belirlendikten sonra, bina boyutunda, hasar bölgelerinin dağılımları ile ilişkili olarak bina performans düzeyleri belirlenmektedir. Buna göre TBDY 2018'de dört farklı bina deprem performans düzeyi belirlenmiştir (Tablo 1).



Şekil 1. Kesit hasar sınırları ve kesit hasar bölgeleri [4] (Section damage limits and damage regions)

Tablo 1. TBDY 2018'e göre performans düzeyleri (Performance levels based on TSC 2018)

Performans Düzeyi	Beklenen Davranış	Hasar Seviyesi
Kesintisiz Kullanım	Doğrusal elastik	Sfır/ ihmal edilebilir
Sınırlı Hasar	Doğrusal + kısıtlı doğrusal olmayan	Az, onarılabılır
Kontrollü Hasar	Doğrusal olmayan	Orta, onarılabılır (can güvenliği seviyesi)
Göçmenin Önlenmesi	Doğrusal olmayan	İleri düzeyde

3. PERDELERİN YIĞILI PLASTİSİTE DAVRANIŞ MODELİ (LUMPED PLASTICITY MODELS FOR SHEAR WALLS)

Literatürde özetlendiği gibi, betonarme perde duvarların deprem etkileri altında doğrusal olmayan modellenmesi için kabul gören çeşitli modelleme yaklaşımları vardır. Bu çalışmada, analiz programlarına adapte edilerek yaygın olarak kullanılan ve yönetmeliklere girmiş olan yığılı plastisite modeli yaklaşımına odaklanılmıştır. Yığılı plastik davranış modelinde eğilme davranışı iç kuvvetlerin plastik kapasitelerine eriştiği kabul edilen ve hasarın meydana geleceği öngörülen sonlu uzunluktaki bölgelerde (plastik mafsal) plastik şekil değiştirmelerin yığılı biçimde olduğu varsayılarak tanımlanır. Doğrusal olmayan eğilme davranışı moment-plastik dönme bağıntıları kullanılarak idealleştirilir. Yığılı plastik şekil değiştirmeyi gösteren plastik kesit, plastik şekil değiştirme bölgesinin tam ortasına yerleştirilmekte ya da perde kesiminin alt ucuna (veya alt ve üst uçlarına) konmaktadır. Plastik mafsallar arasında kalan uzunluk boyunca perdeler etkin (çatlamış) kesit rijitlikleri ile doğrusal elastik modellenir. Bununla birlikte, perdelerin düzlem içi kesme ve düzlem dışı davranışları da genellikle doğrusal elastik davranış kabulü ile modellenmektedir.

Şekil 2’de örnek modelleme şeması gösterilmektedir.

TBDY 2018 esaslarına göre perdeler enkesit şekli dikdörtgen, I, T, L, U veya C olan perdeler, plandaki en büyük perde kolu uzunluğunun toplam perde yüksekliğine oranının 1/2’yi aşmadığı durumlarda, eksenli enkesit ağırlık merkezinden geçen eşdeğer çubuk sonlu eleman olarak modellenenirler. Etkin kesitlik rijitlikleri (i) TBDY 2018’de Eş. 1’de gösterildiği şekilde; (ii) ASCE 41-17’ye göre Tablo 2’ye göre; ya da (iii) doğrudan test sonuçlarından belirlenebilmektedir.

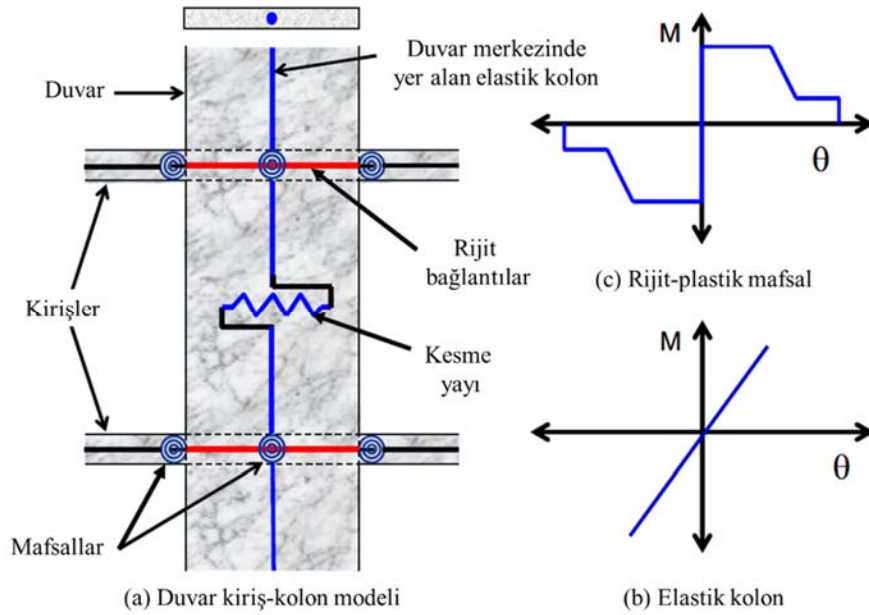
$$(EI)_e = \frac{M_y L_s}{\theta_y} \quad (1)$$

$$\theta_y = \frac{\varphi_y L_s}{3} + 0,0015\eta \left(1 + 1,5 \frac{h}{L_s}\right) + \frac{\varphi_y d_b f_{ye}}{8\sqrt{f_{ce}}} \quad (2)$$

Eş. 1’de L_s kesme açıklığı (kesitteki moment/kesme kuvveti oranı), M_y ve θ_y ise plastik mafsalların etkin akma momentleri ile akma dönmelerini göstermekte olup, θ_y Eş. 2’ye göre hesaplanmaktadır. Burada φ_y plastik mafsal kesitine ait etkin akma rijitliğini, h kesit yüksekliğini, d_b perde uç bölgesindeki boyuna donatı çapı, f_{ce} ve f_{ce} ise sırasıyla ortalama (gerçek) beton basınç dayanımı ile ortalama (gerçek) donatı çeliği akma dayanımını ifade etmektedir.

Tablo 2. ASCE 41-17 etkin kesit rijitlikleri
(Effective stiffness values in ASCE 41-17)

Eleman	Eğilme Rijitliği	Kesme Rijitliği	Eksenel Rijitlik
Duvarlar (çatlamış kesit)	$0,35E_c A_g$	$0,4E_c A_g$	$0,4E_c A_g$ (basınç) $E_s A_s$ (çekme)

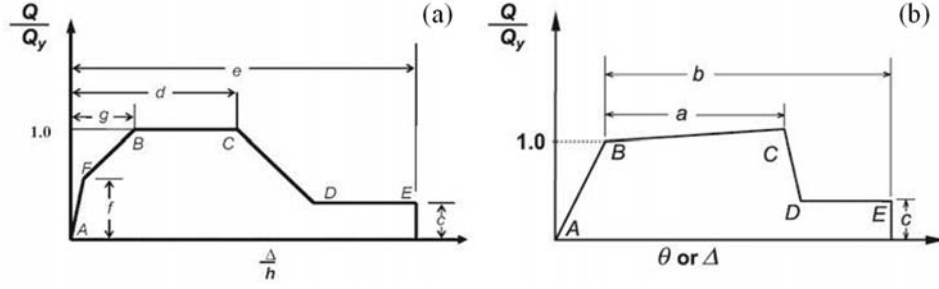


Şekil 2. Yığılı plastik davranış modeli örneği [5] (Lumped plasticity model)

Plastik mafsal modeliyle idealleştirilen doğrusal olmayan perde davranışı için literatürde yer alan ve genel kabul gören modeller arasında Türkiye’de ve dünyada yaygın olarak ASCE 41-17’de önerilen moment - plastik dönme eğrilerinden yararlanılmaktadır. ASCE 41-17’de perdelerin analitik modellenmesi ve perdelerle ait hasar sınırlarının tespiti iki dominant davranışa ait doğrusal ve doğrusal olmayan modeller için olmak üzere dört ana grupta incelenmektedir. ASCE 41-17’de baskın perde davranışları perdelerin yükseklik/uzunluk oranlarına kesme kontrollü ($h_w/l_w < 1,5$) ve eğilme kontrollü ($h_w/l_w > 3,0$) olarak ele alınmış, yükseklik/uzunluk oranı 1,5 ile 3,0 arasında kalan karma (eğilme-kesme etkileşimli) perdeler için plastik mafsal modellerine yer verilmemiştir.

Kesme kontrollü perdelerin doğrusal olmayan modellerinde kullanılmak üzere ASCE 41-17’de verilen zarf eğrisi modeli Şekil 3a’da gösterilmiştir. Bu grafikte yatay eksen plastik mafsal dönmelerini ifade ederken dikey eksen normalize edilmiş yatay yükü göstermektedir. Burada normalize edilmiş yük, kesite etkiyen yükün (Q) kesitin akma dayanımına (Q_y) oranı ile hesaplanmaktadır. Grafikteki A noktası başlangıç noktasını, F ilk çatlamamanın olduğu noktayı, B akma noktasını, C maksimum dayanıma ulaşılan noktayı, D maksimum dayanıma ulaşıldıktan sonra yaşanan dayanım kaybı ile gelinen noktayı, E ise kesitin dayanım kaybindan sonra yapmaya devam ettiği yerdeğiştirmenin tamamlandığı noktayı göstermektedir. Bu noktalar için farklı eksenel yük seviyelerine göre belirlenen değerler ilgili hasar sınırlarıyla birlikte Tablo 3’de verilmiştir.

ASCE 41-17’de (Tablo 3) kesme kontrollü duvarlar için zarf eğrisi koordinatları $[(A_s - A_s')f_y + P] / t_w l_w f'_c$ oranı 0,05’ten küçük olan ve büyük olan perdeler için ayrı ayrı gösterilmektedir. Burada A_s çekme donatısının alanını, A_s' basınç donatısının alanını, f_y donatı akma dayanımını, P



Şekil 3. (a) Kesme kontrollü ve (b) eğilme kontrollü perdeler için zarf eğrileri
(Backbone curves for (a) shear-controlled and (b) flexure-controlled walls)

Tablo 3. ASCE 41-17'ye göre kesme kontrollü duvarların doğrusal olmayan modellerinde kullanılan parametreler ve hasar sınırları
(Nonlinear modeling parameters and damage limits for shear-controlled walls based on ASCE 41-17)

Perde duvarlar	Ötelenme oranı (%)			Dayanım oranı		Kabul edilebilir ötelenme oranı (%)		
	d	e	g	c	f	Hasar sınırları		
						IO	LS	CP
$\frac{(A_s - A_s')f_y + P}{t_w l_w f_c'} \leq 0,05$	1,0	2,0	0,4	0,2	0,6	0,4	1,5	2,0
$\frac{(A_s - A_s')f_y + P}{t_w l_w f_c'} > 0,05$	0,75	1,0	0,4	0,0	0,6	0,4	0,75	1,0

eksenel yükü, t_w perde kalınlığını, l_w perde uzunluğunu, f_c' betonun karakteristik basınç dayanımını göstermektedir. Tablo 3'de verilen hasar sınırları özetlenecek olursa, IO (Immediate Occupancy) hemen kullanım, LS (Life Safety) can güvenliği, CP (Collapse Prevention) ise göçmenin önlenmesi sınır koşullarını belirtmektedir.

ASCE 41-17'ye göre eğilme kontrollü perdelerin doğrusal olmayan modellenmesinde ise Şekil 3b'de verilen zarf eğrisi kullanılmaktadır. A noktası başlangıç noktasını, B akma noktasını, C maksimum dayanıma ulaşılan noktayı, D maksimum dayanıma ulaşıldıktan sonra yaşanan dayanım kaybı ile gelinen noktayı, E ise kesitin dayanım kaybından sonra yapmaya devam ettiği yerdeğiştirmenin tamamlandığı noktayı göstermektedir. Bu noktalar için farklı aksenal yük ve kesme seviyelerine göre belirlenen değerler ilgili hasar sınırlarıyla birlikte Tablo 4'te verilmiştir. Burada kesme kontrollü perdeler için kullanılan $[(A_s - A_s')f_y + P] / t_w l_w f_c'$ oranı ile birlikte $V/t_w l_w f_c'$ oranı ve sargılı bir uç bölgesinin bulunup bulunmaması, oluşturulacak modelin zarf eğrisi koordinatlarını ve hasar sınırlarını etkilemektedir. ASCE 41-17'te verilen Şekil 4 ve Tablo 4'e göre eğilme kontrollü perdelerin zarf eğrisi modelleri $[(A_s - A_s')f_y + P] / t_w l_w f_c'$ oranının 0,1'den düşük veya 0,25'ten yüksek olması, $V/t_w l_w f_c'$ oranının 0,33'ten küçük veya 0,5'ten büyük olması ve perdede sargılı bir uç bölgesinin olup olmamasına göre farklılık göstermektedir. Burada V , tasarım kesme kuvvetini ifade etmekte olup, Tablo 4 ASCE 41-17'deki orijinal tablonun SI birimleri esas alınmış halini yansıtmaktadır.

Perdelerin doğrusal olmayan modelleme teknikleri kıyaslandığında yığılı plastik davranış modelinin (i) kesitteki tarafsız eksenin yüklenme-boşaltma süresince yaptığı

yerdeğiştirmelerin, (ii) kiriş ve döşeme gibi perdeye dik olarak saplanan yapı elemanlarının davranışa katkısının ve (iii) aksenal yükteki değişimin perde dayanımı ve rijitliği üzerindeki etkisinin hesaba katılmaması gibi dezavantajları bulunmaktadır. Öte yandan, yığılı plastik davranış modeli uygulamada pratikliğiyle ve hesaplamadaki hız verimliliğiyle ön plana çıkmaktadır. Mevcut yönetmeliklerde perdeler için hasar sınırları tanımlanmıştır; ancak doğrusal olmayan modelleme ile ilgili bölüm eksik kalmaktadır. Bu çalışma ile bu eksikliğin giderilmesi ve veri tabanındaki zarf eğrileri kullanılarak, analitik modellerde kullanılacak zarf eğrilerinin oluşturulmasında farklı parametrelerin kullanılması ve bu yöntemlerin literatüre kazandırılması amaçlanmaktadır. Literatürde betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışının yayılı plastik davranış modeliyle daha doğru bir şekilde belirlenebildiğini göstermiş olsa da [24, 25]; doğru yığılı plastik davranış modelleri ile gerçeğe daha yakın sonuçların elde edilmesi bu çalışmanın hedeflerindedir. Bunu gerçekleştirmek için geleneksel betonarme perde duvarların bugüne kadar dünya çapında gerçekleştirilmiş deneylerini içeren bir veri tabanı oluşturulmuş, perde deneylerinin sonuçları kullanılarak plastik mafsal davranışının modellenmesi hususunda öneriler getirilmiştir.

4. PERDE DENEYLERİ VERİ TABANI (SHEAR WALL TEST DATABASE)

Literatürde farklı araştırmacılar tarafından, farklı çalışma hedefleri ile oluşturulmuş betonarme duvar verileri içeren bir çok veritabanı bulunmaktadır. Farvashany v.d. [26] ve Gupta ve Rangan [27], sırası ile 76 ve 69 numune içeren ve yüksek beton basınç dayanımına sahip perdeleri içeren veri tabanları

Tablo 4. Eğilme kontrollü duvarların doğrusal olmayan modellerinde kullanılacak parametreler ve hasar sınırları
(Nonlinear modeling parameters and damage limits for flexure-controlled walls based on ASCE 41-17)

	Plastik mafsalsal dönmesi (radyan)	Kahıcı dayanım oranı	Kabul edilebilir plastik mafsalsal dönmesi (radyan)					
			IO	LS	CP			
	a	b	c					
$\frac{(A_s - A_s')f_y + P}{t_w l_w f_c} \frac{V}{t_w l_w \sqrt{f_c}}$ Sargılı Uç Bölgesi								
$\leq 0,1$	$\leq 0,33$	Var	0,015	0,020	0,75	0,005	0,015	0,020
$\leq 0,1$	$\geq 0,5$	Var	0,010	0,015	0,40	0,004	0,010	0,015
$\geq 0,25$	$\leq 0,33$	Var	0,009	0,012	0,60	0,003	0,009	0,012
$\geq 0,25$	$\geq 0,5$	Var	0,005	0,010	0,30	0,0015	0,005	0,010
$\leq 0,1$	$\leq 0,33$	Yok	0,008	0,015	0,60	0,002	0,008	0,015
$\leq 0,1$	$\geq 0,5$	Yok	0,006	0,010	0,30	0,002	0,006	0,010
$\geq 0,25$	$\leq 0,33$	Yok	0,003	0,005	0,25	0,001	0,003	0,005
$\geq 0,25$	$\geq 0,5$	Yok	0,002	0,004	0,20	0,001	0,002	0,004

Not: SI birimleri kullanılmıştır.

oluşturmuşlardır. Orakcal v.d. [28] tarafından hazırlanmış olan 49 numunelik bir veritabanı ile yetersiz miktarda donatı içeren, etriye-çiroz detayları uygun olmayan perdeler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Gulec vd. [29], bodur perdelerin kesme dayanımlarının belirlenmesi amacıyla yaptıkları çalışmaları 148 numuneden oluşan bir veri tabanı kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sengupta ve Li [30] ise, 100 numuneden oluşan bir veri tabanı ile tekrarlı yüklemeye altındaki perdelerin kesme kuvveti - yerdeğiştirme diyagramlarının analitik olarak modellenmesi üzerinde çalışmalar yürütmüşlerdir. Grammatikou vd. [31] tarafından hazırlanan veri tabanı hariç, literatürde karşılaşılan veri tabanları çoğunlukla belirli özelliklerde (örn: sadece bodur perdeler) numunelerin derlendiği veri tabanlarıdır. Bu çalışmada ise, mevcut yapı stoğunu yansıtabilecek özelliklere sahip 172 adet betonarme perde içeren kapsamlı bir veri tabanı kullanılmıştır. Deger vd. [32] tarafından hazırlanan bu veri tabanında konvansiyonel (geleneksel) perdeler kullanılmış ve aşağıdaki özelliklere sahip olan perdeler veri tabanına dahil edilmemiştir:

- boşluklu perdeler ile zayıflatılmış bölge içeren perdeler veya sargılama için donatı harici çelik profil içeren veya çapraz gövde donatısı yer alan perdeler,
- beton veya donatı çeliği olarak yüksek dayanımlı malzeme içeren perdeler,
- enine ve/veya boyuna gövde donatısı bulunmayan perdeler,
- onarım veya güçlendirme yapılmış perdeler.

Ayrıca, bu çalışmada betonarme perdelerin deprem etkileri altındaki süneklik davranışının incelenmesi amaçlandığı için tek yönlü yüklemeye maruz perdeler ile tersinir tekrarlı yüklemeye ait yük - deplasman çevrimsel grafikleri bulunmayan numuneler veri tabanına dahil edilmemiştir.

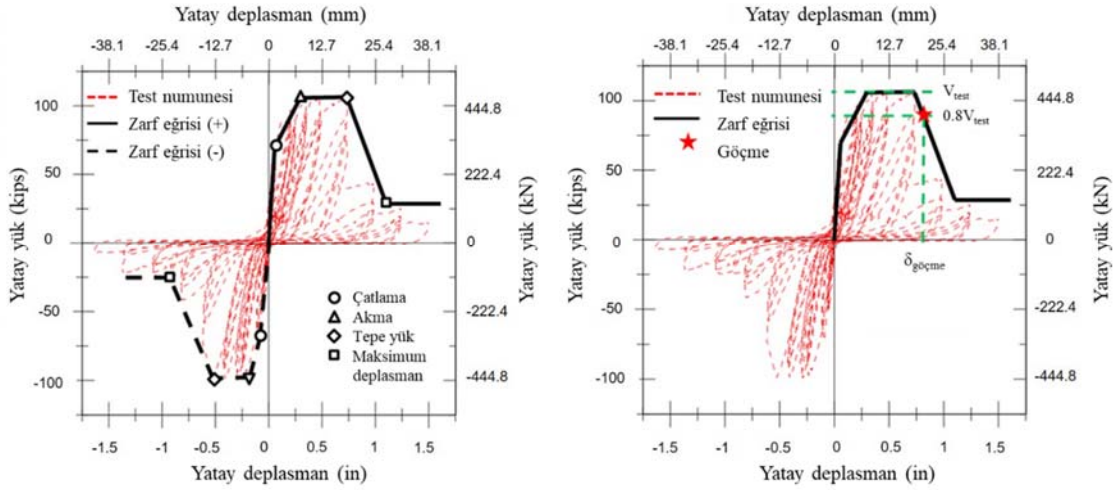
Perdelere ait geometrik özellikler (yükseklik, uzunluk ve perde kalınlığı), malzeme mekanik özellikleri, uç bölgesi ve gövde bölgesinde yer alan donatılara ait bilgiler ile eksenel yük oranı, moment-kesme oranı gibi ek bilgiler veri tabanında yer almaktadır. Bu bilgilere ek olarak, bir takım

sınıflandırmalarda kullanılmak üzere perde en kesit tipi (dikdögen (140/172), halter tipi-başlıklı (32/172) olarak), eğrilik tipi (tek eğrilikli (147/172) ve çift eğrilikli (25/172) olarak) ve deney sonucu gözlenen hasarlara (uç bölgesi beton örtüsünün dökülmesi, donatı burkulması, çapraz çatlakların oluşması vb. hasarlar) bağlı olarak göçme tipi bilgileri veri tabanında verilmiştir. Veri tabanı üzerinde istatistiksel çalışmalar yapılırken perdeler göçme tiplerine göre üç gruba ayrılmıştır: (i) kesme kontrollü (35 numune), (ii) karma (73 numune), ve (iii) eğilme kontrollü (64 numune). Perde uç bölgelerinde yer alan boyuna donatıda eğilmeye bağlı akma meydana gelmeden önce yatay yük kapasitelerine ulaşan perdeler kesme kontrollü perdeler olarak isimlendirilmiştir. Kesme kontrollü perdelerin çoğunlukla çapraz çekme çatlakları ya da gövde çatlakları gibi hasarlara maruz kaldığı görülmüştür. Yatay yük kapasitesine ulaşmadan önce eğilmeye bağlı akma ve göçme gözlemlenen numuneler ise eğilme kontrollü perdeler olarak değerlendirilmiştir. Bu perdelerde perde uç bölgelerinde beton örtüsünün dökülmesi, donatı burkulması gibi hasarlar gözlemlenmiştir. Eğilmeye bağlı akmanın ardından kayma kırılması ile göçmenin gerçekleştiği numuneler ise karma perdeler olarak isimlendirilmiştir. Veritabanında yer alan perde tasarım parametreleri ve değer aralıkları özet halinde Tablo 5'te verilmektedir.

Numunelerin deformasyon kapasitesi hesabında kullanılacak zarf eğrileri, numunelere ait yatay yük - deplasman çevrimsel diyagramlarının hem negatif hem pozitif bölgelerinde çizdirilmiş, karakteristik noktalar ise pozitif ve negatif bölgelerde bulunan noktaların koordinatlarının ortalamaları alınarak belirlenmiştir. Şekil 4'te tipik bir betonarme perdeye ait yük - yatay deplasman davranışı gösterilmektedir. İnce kesikli çizgiler ile gösterilen deney sonuçlarına göre, elastik olmayan bölgede belirli sayıda yüklemeye çevriminin tamamlanmasının ardından ani bir dayanım kaybı yaşanmakta, bu dayanım kaybını takiben artık dayanım olarak isimlendirilen bölgede birkaç yüklemeye çevrimi daha gerçekleşmekte ve perde eksenel yük dayanım kapasitesinin kaybı ile göçmektedir. Zarf eğrileri dört-doğrulu idealleştirme yaklaşımı ile oluşturulmuştur. Bu

Tablo 5. Veritabanındaki tasarım parametreleri ve değer aralıkları (Ranges of wall design parameters in the database)

	Kesme kontrollü (35 numune)				Karma (73 numune)				Eğilme kontrollü (64 numune)			
	Dikdörtgen		Halter tipi-Başlıklı		Dikdörtgen		Halter tipi-Başlıklı		Dikdörtgen		Halter tipi-Başlıklı	
	Min	Maks	Min	Maks	Min	Maks	Min	Maks	Min	Maks	Min	Maks
h_w , (cm)	69	200	95,3	215	75	1200	47,6	457,2	120	640	300	1200
l_w , (cm)	58,5	300	150	218	45	304,8	120	238,8	40	230	100	162,5
t_w , (cm)	6	15,2	8	10,2	4,5	20	8,5	10,2	5	20	6	12,7
M/Vl_w	0,35	2	0,5	1,43	0,91	2,89	0,25	2,39	1,5	4,1	2,75	7,38
$P/A_g f_c$	0	0,3	0	0,04	0	0,35	0	0,24	0	0,5	0,08	0,2
f_c , (MPa)	15,7	51	21,2	58,3	17,2	57,5	21,9	65	15,4	57	15,4	49
f_{ysh} , (MPa)	380	551,6	321	496,4	348	610	440	571,8	289	583,6	433	620
ρ_{sh} (%)	0	1,13	0,13	0,99	0	2,09	0,16	1,36	0	1,4	0,14	2,04
f_{ybl} , (MPa)	314	533,1	389	528,9	353	702	410,3	539,2	276	601	365	540
ρ_{bl} (%)	0	12,73	2,29	7,8	0	12,56	1,09	4,07	0,45	9,42	0,65	4,71
f_{yt} , (MPa)	314	607,8	321	496,4	305	610	461,3	571,8	216	608,4	433	562
ρ_t (%)	0,13	1,67	0,5	1,98	0,19	1,1	0,27	1,37	0,25	1,11	0,26	0,44
f_{yt} , (MPa)	314	607,8	321	527,5	305	610	461,3	571,8	216	583,7	433	562
ρ_t (%)	0,13	3,29	0,25	1,98	0,19	2,39	0,21	0,82	0,27	2,47	0,27	0,42

**Şekil 4.** Betonarme bir duvar örneğine ait yatay yük-şekildeğiştirme davranışı (Load-displacement behavior of a wall)

yaklaşıkda ASCE 41-17'de de önerildiği üzere çatlama öncesi ve sonrasına ait bölgeler için iki ayrı eğime sahip doğru parçaları, yük - yerdeğiştirme eğrisi üzerinde belirlenmiştir. Maksimum yatay yük noktasından itibaren gerçekleşen düşüş eğimi ise yaklaşık olarak test sonuçlarına uyacak şekilde belirlenmiştir.

5. ÖNERİLEN ZARF EĞRİLERİ VE HASAR SINIRLARI (PROPOSED BACKBONE CURVES AND DAMAGE LIMITS)

Literatürde mevcut yönetmelik ve kılavuzlarda yer alan perdelerin modelleme ve hasar tespit yöntemleri için verilen yöntemler ve parametreler özetlenmiştir. Buna göre modelleme, hasar sınırları ve performans düzeylerinin belirlenmesi kesit bazında malzeme birim şekil değiştirmelerden yararlanılarak [4] veya eleman bazında

plastik mafsalları tanımlanarak [6] yapılabilir. Bu çalışmada, modelleme kriterleri perdelerin ötelenme oranı veya plastik mafsalları dönme cinsinden eleman bazında değerlendirilmiş ve uygun hasar sınırları belirlenmiştir.

ASCE 41-17'de perdeler yükseklik/uzunluk oranlarına göre ikiye ayrılmış; kesme kontrollü ve eğilme kontrollü perdeler olarak ele alınmıştır. Perdelerin analitik modellerinde kullanılmak üzere ASCE 41-17 yönetmeliğinde verilen normalize edilmiş yük - dönme zarf eğrilerinin koordinatları ve hasar sınır tabloları Tablo 3 ve Tablo 4'te sırasıyla kesme kontrollü perdeler ve eğilme kontrollü perdeler için verilmiştir. Bu çalışmada ise, istatistiksel analizler göçme tiplerine göre kesme kontrollü, karma ve eğilme kontrollü perdeler olarak üç grupta incelendiği için modelleme parametreleri ve hasar limit değerleri bu göçme tiplerindeki perdeler için ayrı ayrı incelenmiştir.

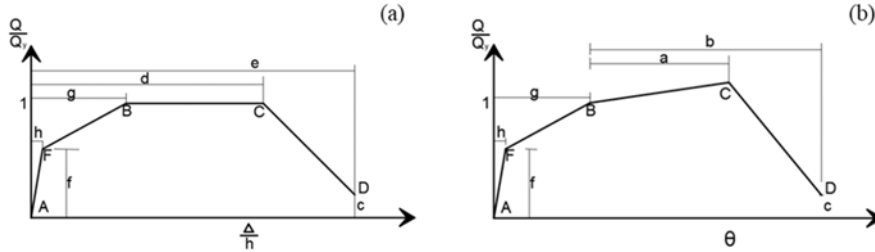
5.1 Zarf Eğrileri (Backbone Curves)

Kesme kontrollü perdelerin doğrusal olmayan modellerinde kullanılmak üzere önerilen zarf eğrisi formatı Şekil 5a'da gösterilmiş, zarf eğrisi tanımı ASCE 41-17'de olduğu gibi ötelenme oranı cinsinden yapılmıştır. Karma ve eğilme kontrollü perdelerin modellerinde kullanılmak üzere önerilen zarf eğrileri ise plastik mafsalsal dönme oranı cinsinden çalışılmış ve zarf eğrisi şablonu Şekil 5b'de gösterilmiştir. Veri tabanındaki perdelerin deneysel plastik mafsalsal dönme değerleri, numunelerin eğrilik değerlerinin [33] plastik mafsalsal boyuyla çarpımı yoluyla elde edilmiş, plastik mafsalsal boyunun perde yüksekliğini geçmemek üzere perde uzunluğunun yarısına ($l_w/2$) eşit olduğu kabulü [6] yapılmıştır.

Kesme kontrollü duvarlar için ASCE 41-17 parametrelerine ilave olarak çatlamanın gerçekleştiği F noktasındaki ötelenme oranı olan "h" değeri de dikkate alınmıştır. Kesme kontrollü duvarlarda kayma şekil değiştirmelerinin eğilme şekil değiştirmelerinin yanında ihmal edilemeyecek kadar etkili olduğu bilinmektedir; ancak bu çalışmada önerilen zarf eğrisi modeli için verilen ötelenme oranlarının ASCE 41-17'de olduğu gibi kayma, eğilme ve donatı sıyrılması bileşenlerine ayrılmaksızın toplam deformasyonu yansıttığına dikkat edilmelidir [34, 35]. Eğilme kontrollü ve

karma perdelerin zarf eğrileri için ASCE 41-17'de yer alan parametrelere ilave olarak, çatlamının olduğu F noktası ve kesitin akma dayanımına ulaştığı B noktasındaki plastil mafsalsal dönme değerleri de dikkate alınmıştır. Bu çalışmada, veri tabanında yer alan bazı perdelerin deneylerinde kesit dayanım kaybı sonrası oluşan ötelenme gözlenemediği için ASCE 41-17'de D ve E noktaları arasında kalıcı dayanımdaki şekil değiştirmeler çalışılmamıştır.

Zarf eğrilerine ait koordinatların ortalama ve standart sapma değerleri (parantez içerisinde) kesme kontrollü, karma ve eğilme kontrollü perdeler için sırasıyla Tablo 6'da, Tablo 7'de ve Tablo 8'de özetlenmiştir. Kesme kontrollü perdeler için zarf eğrilerinin perdeye uygulanan aksel yük oranına ($P/A_g f_c$) bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Karma ve eğilme kontrollü perdeler için ise modellemeye değişken olarak perdeye uygulanan aksel yük oranı ile birlikte kesme kuvveti oranı ($V/t_w l_w f_c$) da dikkate alınmıştır. Karma ve eğilme kontrollü perdeler için aksel yük oranının 0,09'dan ve $V/t_w l_w f_c$ oranının 0,42'den büyük ve küçük olduğu durumlar için değerlendirilerek zarf eğrisi koordinatları belirlenmiştir. Bu sınırların belirlenmesi için bazı ön istatistiksel çalışmalar yapılmış olup, her grupta maksimum sayıda numune bulunması istatistiksel çalışmaların verimliliği açısından önem göstermektedir. Numune sayısının görece düşük olduğu gruplarda "Eksik veri"



Şekil 5. (a) Kesme kontrollü (b) Karma ve eğilme kontrollü perdeler için önerilen zarf eğrisi modelleri (Backbone curves for (a) shear-controlled and (b) shear-flexure walls and flexure-controlled walls)

Tablo 6. Kesme kontrollü perdeler için önerilen zarf eğrisi modeli koordinatları
(Proposed backbone curve model coordinates for shear-controlled walls)

Eksel Yükl Oranı	Ötelenme Oranı (%)				Dayanım oranı	
	d	e	g	h	c	f
$N/A_g f_c \leq 0,04$	0,88 (0,48)	1,79 (1,48)	0,45 (0,26)	0,12 (0,09)	0,53 (0,22)	0,59 (0,12)
$N/A_g f_c > 0,04$	0,69 (0,18)	1,16 (0,20)	0,32 (0,07)	0,07 (0,04)	0,30 (0,23)	0,28 (0,06)

Tablo 7. Karma perdeler için önerilen zarf eğrisi modeli koordinatları
(Proposed backbone curve model coordinates for shear-flexure walls)

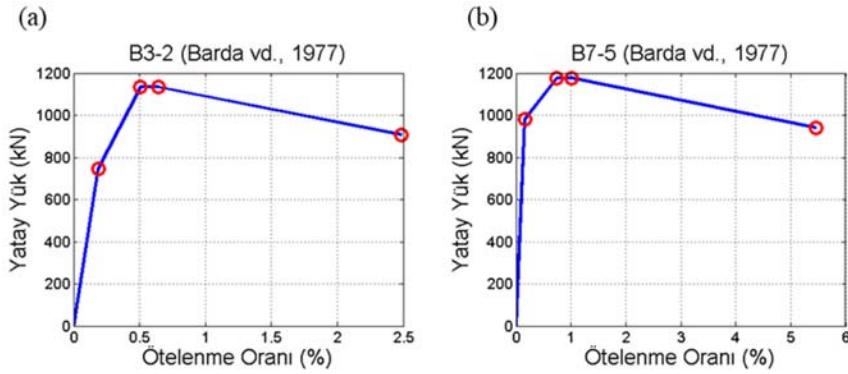
Eksel Yükl Oranı	Kesme Kuvveti Oranı	Plastik mafsalsal dönmesi (radyan)				Dayanım oranı	
		a	b	g	h	c	f
$N/A_g f_c \leq 0,09$	$V/t_w l_w \sqrt{f_c} \leq 0,42$	0,008 (0,008)	0,012 (0,007)	0,004 (0,001)	0,0015 (0,0005)	0,63 (0,19)	0,59 (0,11)
$N/A_g f_c \leq 0,09$	$V/t_w l_w \sqrt{f_c} > 0,42$	0,012 (0,008)	0,023 (0,009)	0,005 (0,009)	0,0021 (0,002)	0,43 (0,23)	0,62 (0,08)
$N/A_g f_c > 0,09$	$V/t_w l_w \sqrt{f_c} \leq 0,42$	0,007 (0,003)	0,010 (0,003)	0,003 (0,001)	0,0008 (0,0002)	Eksik veri	0,51 (0,08)
$N/A_g f_c > 0,09$	$V/t_w l_w \sqrt{f_c} > 0,42$	0,007 (0,005)	0,010 (0,006)	0,004 (0,002)	0,0014 (0,0010)	0,62 (0,12)	0,57 (0,06)

Not: SI birimleri kullanılmıştır.

Tablo 8. Eğilme kontrollü perdeler için önerilen zarf eğrisi modeli koordinatları
(Proposed backbone curve model coordinates for flexure-controlled walls)

Eksenel Yük Oranı	Kesme Kuvveti Oranı	Plastik mafsalsal dönmesi (radyan)				Dayanım oranı	
		a	b	g	h	c	f
$N/A_g f_c \leq 0,09$	$V/t_w l_w \sqrt{f_c} \leq 0,42$	0,014 (0,005)	0,017 (0,005)	0,005 (0,002)	0,0014 (0,0009)	0,69 (0,05)	0,59 (0,11)
$N/A_g f_c \leq 0,09$	$V/t_w l_w \sqrt{f_c} > 0,42$	0,011 (0,007)	0,017 (0,006)	0,008 (0,001)	0,0028 (0,0008)	Eksik veri	0,57 (0,08)
$N/A_g f_c > 0,09$	$V/t_w l_w \sqrt{f_c} \leq 0,42$	0,008 (0,006)	0,009 (0,007)	0,005 (0,001)	0,0014 (0,0003)	0,61 (0,21)	0,56 (0,11)
$N/A_g f_c > 0,09$	$V/t_w l_w \sqrt{f_c} > 0,42$	0,010 (0,003)	0,014 (0,003)	0,007 (0,001)	0,0019 (0,0004)	Eksik veri	0,59 (0,05)

Not: SI birimleri kullanılmıştır.

**Şekil 6.** (a) B3-2 ve (b) B7-5 numunelerine ait zarf eğrileri (Barda vd. [32]) (Backbone curves of (a) B3-2 ve (b) B7-5 specimens)

problemleri sebebiyle modellerde kullanılması önerilen zarf eğrisi koordinatlarından artık yatay yük seviyesini temsil eden "c" değerinin bulunamadığı gözlemlenmiştir.

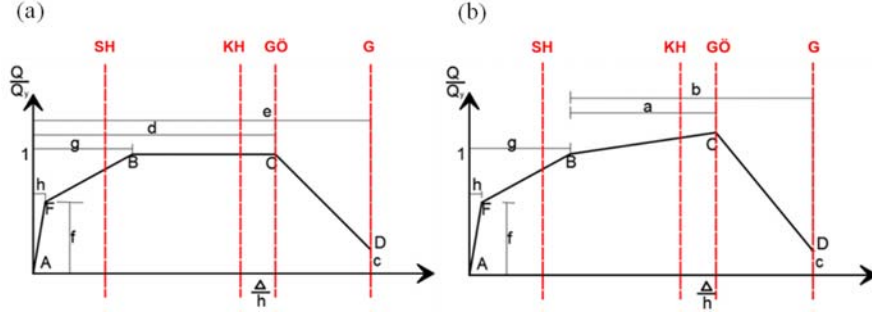
Tablo 7'de düşük eksenel yük oranı ile yüksek yatay yük oranına sahip olan perdelerde, beklenen aksine, akma noktasından maksimum yerdeğiştirme noktasına kadar yapılan yatay ötelenme oranını ifade eden "b" değerinin çok yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, tabloda ilgili satır için kullanılan numuneden B3-2 ve B7-5 numunelerinin [36] beklenen davranış şeklini bozan yatay yük - tepe yerdeğiştirme eğrileridir. B3-2 ve B7-5 numunelerine ait yatay yük - ötelenme oranı zarf eğrileri sırası ile Şekil 6a ve Şekil 6b'de verilmiştir. Bu numunelere ait yatay yük - tepe yerdeğiştirme eğrisi üzerine çizdirilen zarf eğrilerinde kalıcı dayanımı ifade eden "c" değeri gözlemlenemediği için, akma noktasından maksimum yerdeğiştirme anına kadar olan yatay ötelenme oranı oldukça yüksek hesaplanmaktadır. Bu değer iki numune için genel ortalamasının aksine çok yüksek değerler vermesi Tablo 7'de düşük eksenel yük oranı - yüksek kesme oranı için verilen "b" değerinin de ortalama ve standart sapmasını arttırmaktadır. B3-2 ve B7-5 numuneleri dahil edilmeden diğer numunelerin davranışına bakıldığında ise "b" değerinin ortalaması 0,013 değerini almaktadır.

5.2. Hasar Sınırları (Damage Limits)

Kesme kontrollü perdelerin hasar sınır durumlarının tespiti için sınırlı hasar (SH), kontrollü hasar (KH), göçme öncesi (GÖ) durumlarıyla birlikte göçme (G) hasar sınır durumu da incelenmiştir. Bu hasar sınırlarından göçme öncesi hasar

sınırı perdenin yatay yük taşıma kapasitesinin azalmaya başladığı anı ifade ederken, göçme hasar sınırı ise perdenin yatay yerdeğiştirme kapasitesine ulaşarak göçtüğü noktayı göstermektedir. İncelenen hasar sınırlarının zarf eğrileri üzerindeki gösterimi farklı göçme şekilleri için Şekil 7'de verilmiştir. Burada, göçme (G) hasar sınırının ASCE'de tanımlanan göçmenin önlenmesi (collapse prevention, CP) seviyesine karşılık geldiği ve TBDY'de doğrudan bir karşılığı olmadığına dikkat edilmelidir. TBDY'de göçme öncesi (GÖ) hasar sınırı; daha konservatif bir yaklaşımla yatay yük taşıma kapasitesinin azalmaya başladığı seviyede tanımlanmıştır. Hasar sınırlarının ortalama ve standart sapma değerleri (parantez içerisinde) kesme kontrollü, karma ve eğilme kontrollü perdeler için sırası ile Tablo 9, Tablo 10 ve Tablo 11'de verilmiştir. Tablo 7'de olduğu gibi, Tablo 10'da da düşük eksenel yük - yüksek kesme oranı sınıfına ait karma perdelerde göçme hasar sınır değerinin ve standart sapmasının B3-2 ve B7-5 numunelerinin [33] zarf eğrisi özelliklerinden kaynaklı olarak yüksek olduğu görülmektedir. Bu numuneler gruba dahil edilmeden göçme hasar sınırı incelendiğinde ise düşük eksenel yük - yüksek kesme oranına sahip perdelerin göçme hasar sınırının ortalama değeri 0,014 olarak hesaplanmıştır.

Veri tabanında yer alan numunelerin arasında sargılı uç bölgesi bulunmayan numunelerin sayısının azlığı sebebi ile sargılı donatısı bulunmayan perdeleri kapsayacak verimli bir istatistiksel çalışma yapılamamıştır. Bu sebeple, perdelerin modellenmesinde kullanılacak zarf eğrisi bilgileri ve hasar sınır durumları yalnızca sargılı uç bölgesi içeren perdeler için verilmiştir. Literatür taramasında incelenen çalışmaların



Şekil 7. (a) Kesme kontrollü (b) karma ve eğilme kontrollü perdeler için hasar sınırları
(Damage limits for (a) shear-controlled and (b) shear-flexure walls and flexure-controlled walls)

Tablo 9. Kesme kontrollü perdeler için önerilen hasar sınırları (Damage limits for shear-controlled walls)

Eksenel Yük Oranı	Ötelenme Oranı (%)			
	Sınırlı Hasar	Kontrollü Hasar	Göçme Öncesi	Göçme
$N/A_g f_c \leq 0,04$	0,38 (0,22)	0,81 (0,43)	0,88 (0,48)	1,79 (1,48)
$N/A_g f_c > 0,04$	0,28 (0,06)	0,60 (0,12)	0,69 (0,18)	1,16 (0,20)

Tablo 10. Karma perdeler için önerilen hasar sınırlarının değerleri (Damage limits for shear-flexure walls)

Eksenel Yük Oranı	Kesme Kuvveti Oranı	Plastik Mafsalsal Dönmesi (radyan)			
		Sınırlı Hasar	Kontrollü Hasar	Göçme Öncesi	Göçme
$N/A_g f_c \leq 0,09$	$V/t_w I_w \sqrt{f_c} \leq 0,42$	0,0038 (0,001)	0,0107 (0,003)	0,017 (0,004)	0,013 (0,008)
$N/A_g f_c \leq 0,09$	$V/t_w I_w \sqrt{f_c} > 0,42$	0,0044 (0,001)	0,021 (0,004)	0,021 (0,005)	0,018 (0,008)
$N/A_g f_c > 0,09$	$V/t_w I_w \sqrt{f_c} \leq 0,42$	0,0023 (0,001)	0,088 (0,003)	0,013 (0,004)	0,011 (0,003)
$N/A_g f_c > 0,09$	$V/t_w I_w \sqrt{f_c} > 0,42$	0,0035 (0,002)	0,0091 (0,003)	0,014 (0,006)	0,011 (0,006)

Tablo 11. Eğilme kontrollü perdeler için önerilen hasar sınırları (Damage limits for flexure-controlled walls)

Eksenel Yük Oranı	Kesme Kuvveti Oranı	Plastik Mafsalsal Dönmesi (radyan)			
		Sınırlı Hasar	Kontrollü Hasar	Göçme Öncesi	Göçme
$N/A_g f_c \leq 0,09$	$V/t_w I_w \sqrt{f_c} \leq 0,42$	0,0044 (0,001)	0,0154 (0,005)	0,022 (0,01)	0,019 (0,004)
$N/A_g f_c \leq 0,09$	$V/t_w I_w \sqrt{f_c} > 0,42$	0,007 (0,001)	0,0168 (0,004)	0,026 (0,009)	0,020 (0,006)
$N/A_g f_c > 0,09$	$V/t_w I_w \sqrt{f_c} \leq 0,42$	0,004 (0,001)	0,01 (0,004)	0,014 (0,006)	0,012 (0,006)
$N/A_g f_c > 0,09$	$V/t_w I_w \sqrt{f_c} > 0,42$	0,0057 (0,001)	0,0145 (0,004)	0,02 (0,004)	0,017 (0,003)

bir kısmında betonda ilk çatlakın oluştuğu hasar sınır durumu, beton dökülmesinin meydana geldiği hasar sınır durumu, global burkulma'nın meydana geldiği hasar sınır durumu gibi ek hasarlara ilişkin yatay yük ve ötelenme oranı gibi verilere yer verilmiştir. Ancak, özellikle eski tarihli raporlarda ve çalışmalarda bu tip bilgiler yer almadığı için zarf eğrileri üzerinde daha fazla hasar sınır durumunun tanımlanması istatistiksel olarak mümkün olmamıştır. Bununla birlikte, daha farklı bir amaç ve kapsamla yapılacak bir literatür taraması ile farklı perde tiplerindeki daha farklı hasar sınır durumları için istatistiksel değerlerin belirlenebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Betonarme perdeli binaların yapı stoğunun büyük bölümünü oluşturduğu deprem ülkelerinde; tasarımın ve performans

değerlendirmesinin en verimli şekilde yapılabilmesi için perdelerin doğrusal olmayan davranışının en gerçeğe yakın şekilde modellenmesi ve hasar tanımlarının doğru yapılması önemlidir. Bu çalışmada mevcut yönetmeliklerde ve kılavuz dökümanlarda yer alan modelleme kriterleri ve hasar sınır değerleri incelenmiş, eleman bazında doğrusal olmayan perde modellenmesi için plastik mafsalsal tanımları ve zarf eğrileri irdelenmiştir. Yönetmeliklerde yer alan mevcut zarf eğrileri ve hasar sınır durumları 172 numune içeren detaylı bir perde duvar veritabanı kullanılarak genişletilmiştir. Bu çalışma; modellemeye yönelik önerilen yeni değerler, zarf eğrilerinin perdelerde gözlemlenen üç farklı göçme tipi için (kesme kontrollü, eğilme kontrolü, kesme-eğilme etkileşimli) verilmesi, zarf eğrilerinde çatlama değerlerinin da hesaba katılması ve yalnızca ortalama değerlerin değil istatistiksel dağılımın da verilmesi gibi unsurlarla literature çok yönlü katkı sağlamıştır. Ayrıca eleman bazında yapılacak

hasar tespiti için mevcut hasar sınırlarına üç göçme tipi için de yeni değerler eklenmiş ve göçme ile göçme öncesi durum ayrılmıştır. Bu çalışma sonucunda elde edilen bulguların mühendislere perdeli binaların doğrusal olmayan hesaplamalarında gerçekçi sonuçlara ulaşmaları konusunda yardımcı olacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmayı 114M264 numaralı proje kapsamında destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) ve değerli katkılarından dolayı Prof.Dr.Polat Gülkan'a teşekkür ederiz. Bu çalışmada bahsi geçen görüşler sadece yazarlara aittir ve başka hiçbir organizasyon ve kişiyi temsil etmemektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Kolozvari K., Biscombe L., Dashti F., Dhakal R.P., Gogus A., Gullu M.F., Henry R.S., Massone L.M., Orakcal K., Rojas F., Shegay A., Wallace J.W., State-of-the-art in nonlinear finite element modeling of isolated planar reinforced concrete walls, *Eng. Struct.*, 194, 46-65, 2019.
- ETABS [Bilgisayar Yazılımı], Computers & Structures, Inc., Berkeley, CA.
- Perform 3D [Bilgisayar Yazılımı], Computers & Structures, Inc., Berkeley, CA.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018), Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye, 2018.
- Pacific Earthquake Engineering Research Center, Guidelines for performance-based seismic design of tall buildings, Report PEER/ATC-72-1, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley CA, USA, 2010.
- ASCE/SEI 41-17, Seismic evaluation and retrofit of existing buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA, 2017.
- Epachachi S., Sharma N., Whittaker A., Hamburger R.O., Hortacsu A., A cyclic backbone curve for shear-critical reinforced concrete walls. *J. Struct. Eng.*, 145 (4), 04019006, 2019.
- Pugh J.S., Lowes L.N., Lehman D.E., Nonlinear line-element modeling of flexural reinforced concrete walls, *Eng. Struct.*, 104, 174-192, 2015.
- Bohl A., Adebar P., Plastic hinge lengths in high-rise concrete shear walls, *ACI Struct. J.*, 108 (2), 148-157, 2011.
- Kazaz İ., Gülkan P., Süneklik düzeyi yüksek betonarme perdelerdeki hasar sınırları, *Teknik Dergi*, 23 (114), 6113-6140, 2012.
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, T. C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, 2007.
- İnel M., Özmen H.B., Effect of plastic hinge properties in nonlinear analysis of reinforced concrete buildings, *Eng. Struct.*, 28, 1494-1502, 2006.
- Massone L.M., RC wall shear-flexure interaction: Analytical and experimental responses Doktora Tezi, University of California, Los Angeles, CA, USA, 2006.
- Tran T.A., Wallace J.W., Cyclic testing of moderate-aspect-ratio reinforced concrete structural walls, *ACI Struct. J.*, 112 (6), 653-665, 2015.
- Vulcano A., Bertero V.V., Colotti V., Analytical modeling of RC structural walls, 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Kyoto, Japan, 41-46, 1988.
- Panagiotou M., Restrepo J.I., Schoettler M., Geonwoo K., Nonlinear cyclic truss model for reinforced concrete walls, *ACI Struct. J.*, 109 (2), 205-214, 2012.
- Fishinger M., Rejec K., Isakovic T., Modeling inelastic shear response of RC walls, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 2012.
- Gullu M.F., Horoz B., Orakcal K., Betonarme perde duvarlarda bileşik eğilme ve kesme davranışının modellenmesi, Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Türkiye, 11-15 Mayıs, 2015.
- Kolozvari K., Orakcal K., Wallace J.W., Modeling of cyclic shear-flexure interaction in reinforced concrete structural walls. Part I: Theory, *J. Struct. Eng.*, 141 (5), 04014135, 2015.
- McKenna F., Fenves G., The OpenSees command language manual, Pacific Earthquake Engineering Center, University of California, Berkeley, CA, USA, 2000.
- Aydemir C., Kırçıl M., Hancıoğlu B., Zorbozan M., Betonarme kolonların hasar sınır eğriliklerinin belirlenmesi, *Teknik Dergi*, 22, 5613-5624, 2011.
- Foroughi S., Yuksel S., Betonarme kolonların şekil değiştirme esaslı hasar sınırlarının araştırılması, *International Journal of Engineering Research and Development*, 11 (2), 584-601, 2019.
- Aydemir C., Eser Aydemir M., Betonarme kirişlerin hasar sınırlarının deneysel gözlemlerle irdelenmesi, *Teknik Dergi*, 28 (4), 8023-8049, 2017.
- Taucer F.F., Spacone E., Filippou F.C., A fiber beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures, Report No: UCB/EERC-91/17, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, USA, 1991.
- Mwafy A.M., Elnashai A.S., Static pushover versus dynamic collapse analysis of RC buildings, *Eng. Struct.*, 23 (5), 407-424, 2001.
- Farvashany F.E., Foster S.J., Rangan B.V., Strength and deformations of high-strength concrete shear walls, *ACI Struct. J.*, 105 (1), 21-29, 2008.
- Gupta A., Rangan B.V., High-strength concrete (HSC) structural walls, *ACI Struct. J.*, 95 (2), 194-205, 1998.
- Orakcal K., Massone L.M., Wallace J.W., Shear strength of lightly reinforced wall piers and spandrels, *ACI Struct. J.*, 106 (4), 455-465, 2009.
- Gulec C.K., Whittaker A.S., Stojadinovic B., Shear strength of squat rectangular reinforced concrete walls, *ACI Struct. J.*, 105 (4), 488-497, 2008.
- Sengupta P., Li B., Hysteresis behavior of reinforced concrete walls, *J. Struct. Eng.*, 140 (7), 04014030, 2014.

31. Grammatikou S., Biskinis D., Fardis M.N., Strength, deformation capacity and failure modes of RC walls under cyclic loading, *Bull. Earthquake Eng.*, 13 (11), 3277-3300, 2015.
32. Deger Z.T., Basdogan C., Inceoglu C., Perdeli betonarme binalarda deprem rehabilitasyonunun geliştirilmesi, Proje No:114M264, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Ankara, Türkiye, 2017.
33. Deger Z.T., Basdogan C., Empirical Expressions for Deformation Capacity of Reinforced Concrete Structural Walls, *ACI Structural Journal*, Nov 1, 116 (6), 53-61, 2019.
34. Elwood K.J., Matamoros A.B., Wallace J.W., Lehman D.E., Heintz J.A., Mitchell A.D., Moore M.A., Valley M.T., Lowes L.N., Comartin C.D., Moehle J.P. Update to ASCE/SEI 41 concrete provisions. *Earthquake Spectra*. Aug, 23 (3):493-523, 2007.
35. Massone L.M. "RC Wall Shear - Flexure Interaction: Analytical and Experimental Responses," PhD Dissertation, University of California, Department of Civil & Environmental Engineering, Los Angeles, California, 2006.
36. Barda F., Hanson J.M., Corley W.G., Shear strength of low-rise walls with boundary elements, SP 53-8, *Reinforced Concrete Structures in Seismic Zones*, ACI, Detroit, MI, USA, 1977.

