BETONARME KOLONLARDA DONATI SIYRILMASININ ANALİTİK MODELLENMESİ

K. Orakçal[1] ve S.R. Chowdhury[2]

[1] *Y. Doç. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul*
[2] *Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul*
Email: kutay.orakcal@boun.edu.tr

ÖZET:

Mevcut betonarme binaların deprem performansını kötü yönde etkileyen önemli özelliklerden biri kolon donatısındaki bindirmeli ek bölgelerinde eksik bindirme boyu ve yetersiz enine donatı kullanımı nedeniyle oluşan sıyrılma davranışıdır. Bindirme boyu yetersiz kolonlardaki aderans kaybı ve sıyrılma davranışının güvenilir bir şekilde modellenmesi, mevcut betonarme binaların statik ve dinamik hesap yöntemleriyle analizi ve performans değerlendirmesi için açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada yetersiz bindirme boyuna sahip betonarme kolonların deprem etkileri altında yük–şekildeğiştirme davranışını öngören bir analitik model sunulmuştur. Sunulan model, makro-lifli bir betonarme kolon modelinin formülasyonuna aderans gerilmelerinin sıyrılma deformasyonları ile değişimini temsil eden yayların eklenmesinden oluşmaktadır. Önerilen modelleme yöntemi ile bindirmeli ek bölgesinde oluşan sıyrılma deformasyonlarının kolonun tersinir tekrarlanır yükler altında yük–şekildeğiştirme davranışına etkisi etkin bir şekilde temsil edilebilmekte; çekip çıkma ya da yarılma mekanizmaları nedeniyle oluşacak sıyrılma deformasyonlarının ve aderans gerilmelerinin bindirme bölgesi boyunca dağılımı öngörülebilmektedir. Modelin esnek formülasyonu düz donatının aderans özellikleri ve enine donatı miktarının aderansa etkisini de gözönünde bulundurmaya olanak sağlamaktadır. Model sonuçları eksik bindirme boyuna ve farklı ankraj özelliklerine sahip çeşitli kolon numuneleri üzerinde yapılan deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış, modelin tutarlı bir şekilde doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Önerilen analitik modelleme yöntemi, donatıda sıyrılma etkilerinin betonarme yapıların deprem davranışa etkisinin daha iyi irdelenebilmesi için önemlidir.

ANAHTAR KELİMELER : Betonarme, kolon, bindirme, aderans, sıyrılma, analitik, model

1. GİRİŞ

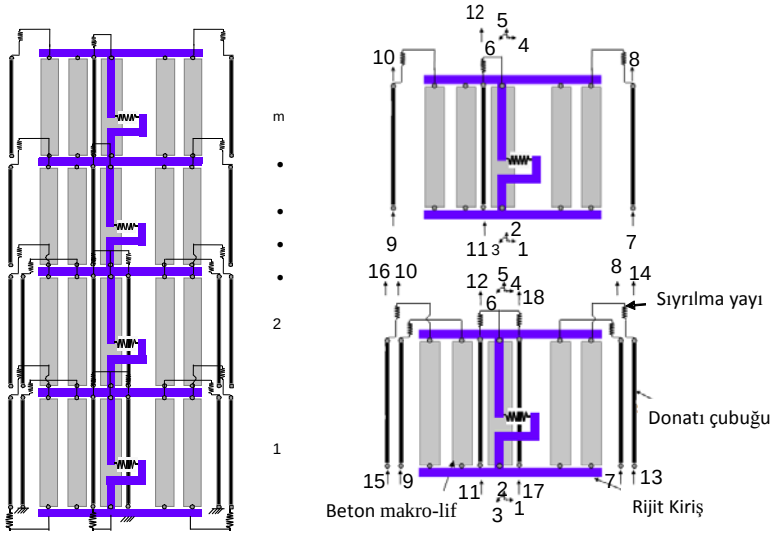
Betonarme bir bina sisteminin deprem etkileri altında sünek bir davranış gösterebilmesi için kirişlerdeki boyuna donatının akma davranışı göstermesi gerekir. Bindirmeli ek kullanılan kolonlarda ise boyuna donatının betondan sıyrılma durumu oluşmadan, kolonun moment taşıma gücüne ulaşması beklenir. Mevcut binalardaki kolonların bindirme eklerinde genellikle donatı yetersiz bindirme boyu kullanılmış ve bindirme bölgesinde ankraj özelliklerini geliştirici yönde etriye sıklaştırılması yapılmamıştır. Konstruktif kolaylık açısından kat döşeme seviyelerinin hemen üzerinde oluşturulmuş bu bindirmeli eklerde, deprem etkilerinden dolayı yüksek eğilme momentleri ve boyuna donatıda yüksek çekme istemleri oluşacak; bu istemler kolon moment taşıma gücüne ulaşmadan önce bindirme bölgelerinde sıyrılma davranışına yol açacaktır. Yetersiz bindirme boylu kolonlar içeren betonarme binalarda büyük depremler sonrasında sıkça görülen bu sıyrılma davranışının çok sayıda binada ileri hasar ve yıkılmaya yol açtığı gözlemlenmiştir. Bahsedilen sıyrılma davranışının kolonun moment taşıma gücüne ve süneklik özelliklerine etkisinin detaylarıyla anlaşılması ve doğru bir şekilde modellenebilmesi mevcut betonarme binaların deprem performansının güvenilir bir şekilde değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır. Betonarme kolonların bindirmeli ek bölgelerindeki sıyrılma davranışı üzerine çok sayıda deneysel

araştıma yürütülmüş karşın, görece az sayıda detaylı analitik modelleme çalışması yapılmıştır. Son olarak Cho ve Pincheira'nın (2006) geliştirdikleri analitik modelin eksik bindirme boylu kolonların tersinir tekrarlanır yükler altında yatay yük – öteleme davranışını gerçeğe yakın bir şekilde temsil ettiğini gösterilmiştir. Ancak bu model, daha önce geliştirilmiş modellere benzer olarak, sıyrılma davranışının tek bir kesitte oluştuğu varsayımını içermekte ve sıyrılma deformasyonlarını (sıyrılma dönmelerini) kolon tabanında uzunluğu olmayan bir sıyrılma mafsalında yoğunlaştırmaktadır. Tersinir tekrarlanır yükler altındaki davranış boyunca sıyrılma mafsalı, plastik mafsaldan bağımsız olarak çalışmakta, dolayısıyla kolon tabanında sıyrılma deformasyonları (sıyrılma dönmeleri) plastik mafsal bölgesinde beton ve donatıdaki birim şekildeğiştirmelerden bağımsız bir şekilde oluşmaktadır.

Öte yandan bu çalışma kapsamında geliştirilmiş olan analitik modelleme yönteminde uzunluğu olmayan bir sıyrılma mafsalı varsayımı kullanılmamış; donatı çubukları, aderans gerilmelerinin sıyrılma deformasyonları ile değişimini temsil eden yaylar kullanılarak betona bağlanmıştır. Modelin içeriğinde beton ve donatı için gerilme – birim şekildeğiştirme bağıntılarının yanında sıyrılma yayları için de tersinir tekrarlanır aderans gerilmesi – sıyrılma deformasyonu bağıntıları kullanılmış, eğilme davranışını gerçeğe yakın bir şekilde temsil eden halihazırdaki lifli model formülasyonu, sıyrılma deformasyonlarını da içerecek şekilde geliştirilmiştir. Geliştirilmiş olan model, hem sıyrılma deformasyonlarının beton ve donatı çeliğindeki birim şekildeğiştirmelerle etkileşimini, hem de sıyrılma deformasyonları ve aderans gerilmelerinin bindirme bölgesi boyunca dağılımını göz önünde bulundurmaktadır.

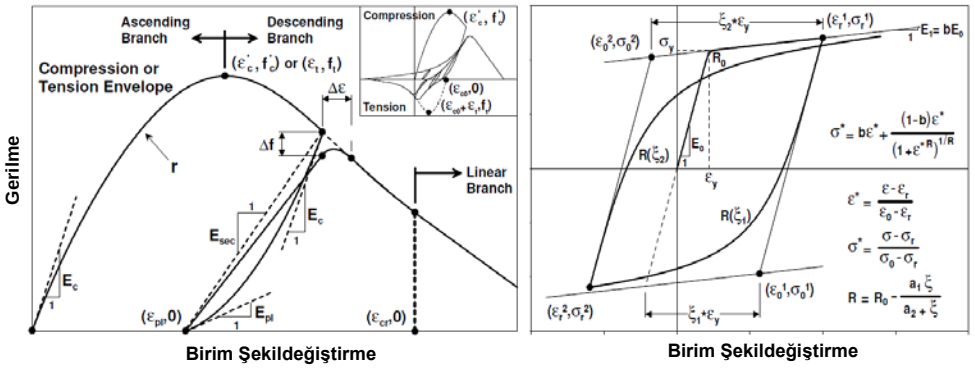
2. ANALİTİK MODEL

Önerilen analitik modelde, doğrusal elastik olmayan eğilme davranışını temsil eden makro-lifli bir betonarme eleman modeli formülasyonu (Multiple-Vertical-Line-Element Model, Orakçal v.d., 2004) temel alınmış, ancak liflerin sadece betonun gerilme – birim şekildeğiştirme davranışını temsil ettiği düşünülmüştür. Beton lifler betonun serbestlik derecelerinin tanımlandığı ve düzlem kesit koşulunun zorlandığı rijit kirişlere bağlanmış, rijit kirişler birbirine ayrıca basit kesme davranışını temsil eden yatay yaylarla her bir elemanın varsayılan dönme merkezinde birbirine tutturulmuştur. Donatı çubukları ise beton liflerin deformasyonunu temsil eden rijit kirişlerden bağımsız serbestlik dereceleriyle modellenmiş, ancak donatı çubukları rijit kirişlere donatının kesitte bulunduğu noktalarda sıyrılma yaylarıya bağlanmıştır. Modelin genel içeriği ve bindirme bölgesi içinde ve üstünde kullanılacak model elemanlarının serbestlik dereceleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



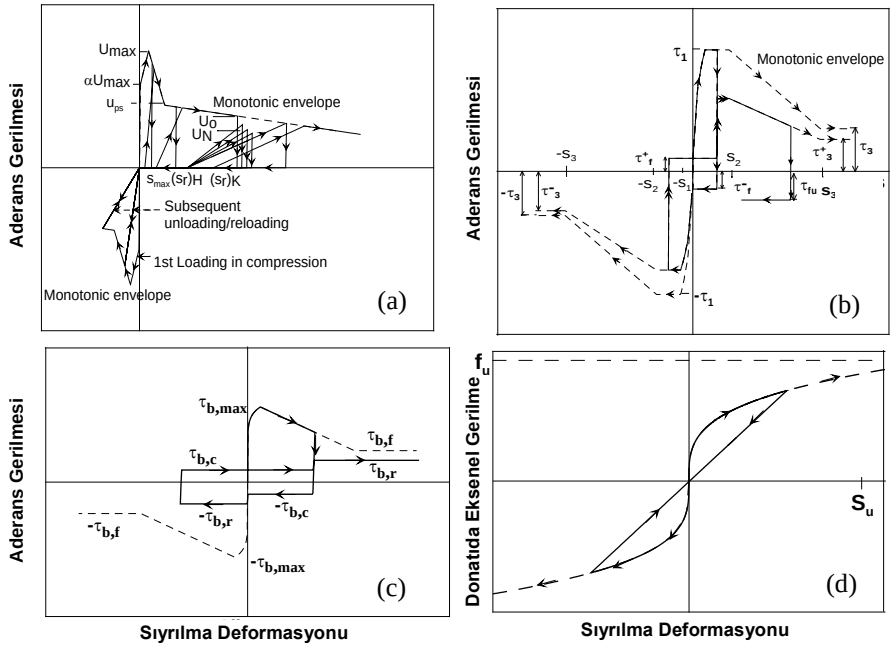
Şekil 1. Önerilen analitik modelin elemanları ve serbestlik dereceleri

Modelde beton ve donatı çeliği için kapsamlı gerilme – birim şekildeğiştirme bağıntıları kullanılmıştır (Şekil 2). Beton için kullanılmış olan Chang ve Mander (1994) modeli, tersinir tekrarlanır yükler altında betonun basınç – çekme davranışı sürekliliği, progresif çatlak kapanması ve çekme sertleşmesi gibi davranışsal özelliklerin analize dahil edilmesine olanak sağlamaktadır. Donatı çeliği için kullanılmış olan Menegotto ve Pinto (1973) modeli ise Bauschinger etkisi ve kinematik/izotropik pekleşme etkilerini göz önünde bulundurmaktadır.



Şekil 2. Beton ve donatı çeliği için kullanılan gerilme – birim şekildeğiştirme bağıntıları

Sıyrılma yaylarının tersinir tekrarlanır yükler altındaki davranışı için de sıyrılma davranışını gerçeğe en yakın biçimde temsil ettiği kapsamlı deneysel çalışmalarla doğrulanmış olan kapsamlı bağıntılar kullanılmıştır. Nervürlü dınatı için sargısız betonda ve yetersiz paspayı koşullarında oluşacak yarılma (splitting) sıyrılmasını temsil etmek üzere Harajli'nin (2009) aderans gerilmesi – sıyrılma deformasyonu bağıntısı, yeterli paspayı koşullarında ya da sargılı betonda (etriye bulunan bölgelerde) oluşacak çekip-çıkma (pullout) sıyrılmasını temsil etmek üzere de Eligehausen vd.'nin (1983) aderans gerilmesi – sıyrılma deformasyonu bağıntısı modele uygulanmıştır. Düz (nervürsüz) donatı için Verderame v.d.'nin (2009) aderans gerilmesi – sıyrılma deformasyonu bağıntısı kullanılmış, 180-derece için kancalar ise Fabbrocino v.d.'nin (2004) donatı eksenel gerilmesi – sıyrılma deformasyonu bağıntısı model formülasyonuna uygulanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Sıyrılmam yayları için kullanılan gerilme – sıyrılma deformasyonu bağıntıları (a) Nervürlü donatıda yarılma, (b) Nervürlü donatıda çekip-çıkma, (c) Düz donatıda çekip-çıkma, (d) 180-derece kancalar

3. DENEYSEL KARŞILAŞTIRMA

3.1. Literatürdeki Deneysel Çalışmalar

Analitik modelinin doğruluğunun değerlendirilmesi amacıyla analiz sonuçları, literatürden elde edilen çok sayıda kolon deneyi sonucu ile karşılaştırılmıştır. Modelin doğrulanması için toplamda 11 araştırma ekibinin yürütmüş olduğu 30 adet deneyin sonuçları kullanılmıştır. İncelenen deney numuneleri farklı geometri, malzeme dayanımı ve donatı detaylarına sahip olup; farklı eksenel yük sevileri altında test edilmişlerdir. Burada karşılaştırmaların sadece bir kısmı, temsili olarak verilmiştir. Karşılaştırmaların tümüne Chowdhury'nin (2011) doktora tezinde ulaşmak mümkündür. Kolonun ankraj bölgesinde (numune temelinde) oluşacak sıyrılma deformasyonlarının davranışa etkisini ("gerinim penetrasyonu" etkisi) incelemek üzere Low and Moehle (1987) tarafından sürekli boyuna donatı içeren bir numune için elde edilen deney sonuçları kullanılmıştır. Melek ve Wallace (2004), Aboutaha v.d. (1996), Harajli ve Dagher (2008), Elgawady v.d. (2010), ve Yıldız (2006) tarafından deneyleri yürütülmüş olan kolon numuneleri ise, öncelikli olarak farklı bindime boyu içermektedirler. Analitik modelin düz (nervürsüz) donatılı ve bindirme eklerinde 180-derece kanca içeren kolon davranışını ne derece temsil ettiğini incelemek için ise de Verderame v.d. (2008) tarafından yürütülmüş olan bir deneyin sonuçları kullanılmıştır. Karşılaştırmalarda kullanılan kolon numunelerinin belirgin özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur. Şekil 3'de ise kolon numunelerinden bazılarının donatı detayları temsili olarak gösterilmiştir.

Tablo 1. Kolon numunesi özellikleri

Araştırmacı	Numune	Boyutlar			Boyuna Donatı			Enine Donatı		Beton	Eksenel Yük (%)
		b, mm	h, mm	l, mm	Miktar	l_s, mm *	f_y, Mpa	Miktar	f_y, Mpa	f_c, Mpa	
Low-Moehle	Specimen 1	127	165	692	6-ϕ6 & 4-ϕ10	178 ($18d_b$) **	450	ϕ13 @ 129mm	-	36	5
Melek ve Wallace	2S20H	457	457	1676	8-ϕ25	508 (20db)	510	ϕ10 @ 305mm	481	35	20
Aboutaha	FC15	686	457	2743	8-ϕ25	609,6 ($24d_b$)	434	ϕ10 @ 407mm	400	28	0
Harajli ve Dagher	C20	400	200	1400	6-ϕ20	600 ($30d_b$)	617	ϕ8 @ 200mm	-	32	0
	C16	400	200	1400	8-ϕ16	480 ($30d_b$)	528	ϕ8 @ 200mm	-	40	0
Elgawady	AB1	381	254	1803	12-ϕ13	445 ($35d_b$)	331	ϕ6 @ 125mm	372	31	0
Yildiz	AF(C0G0)B1	240	180	850	4-ϕ12	180 ($15d_b$)	500	ϕ8 @ 120 mm	-	27	10
Verderame	C540A1	300	300	1570	6-ϕ12	480 ($40d_b$)	355	ϕ8 @ 100mm	430	25	24

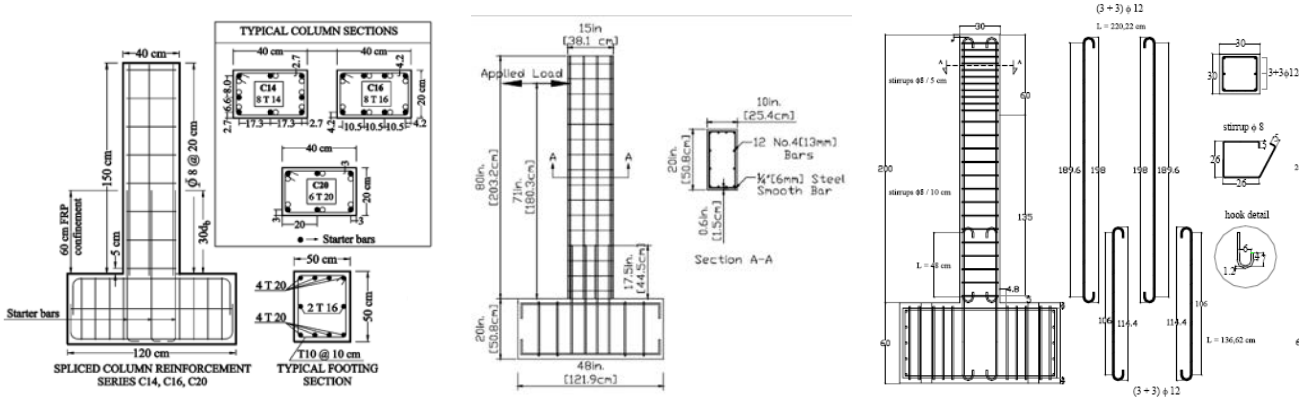
* Bindirme Boyu

** Temelde Ankraj Boyu

3.1. Analiz Sonuçlarının Deney Sonuçlarıyla Karşılaştırılması

Modelin formülasyonu, kullanılan malzeme ve sıyrılma bağıntıları ve iteratif bir numerik analiz yöntemi ile beraber, MATLAB yazılımı ortamında kodlanmış; analizler incelenen kolon numuneleri üzerine etkiyen düşey yük ve tersinir tekrarlanır yatay yüklerin bileşik etkisi altında gerçekleştirilmiştir. Modelde kullanılan malzeme parametreleri, deney numunelerinde kullanılan malzemelerin ölçülen mekanik özellikleri ile uyumlu olacak şekilde kalibre edilmiş, Sıyrılma yaylarının aderans gerilmesi – kayma deformasyonu ilişkisini temsil eden sıyrılma modellerinin monotonik ve tersinir tekrarlanır parametreleri ise doğrudan Harajli (2006) ve Eligehausen v.d. (1983) tarafından önerilmiş olan bağıntılarla kalibre edilmiştir. Analiz sonuçlarının deney sonuçlarıyla daha

iyi örtüşmesi amacıyla beton, çelik ve sıyrılma yayı modellerinin parametrelerinde herhangi bir ayarlama yapılmamıştır.



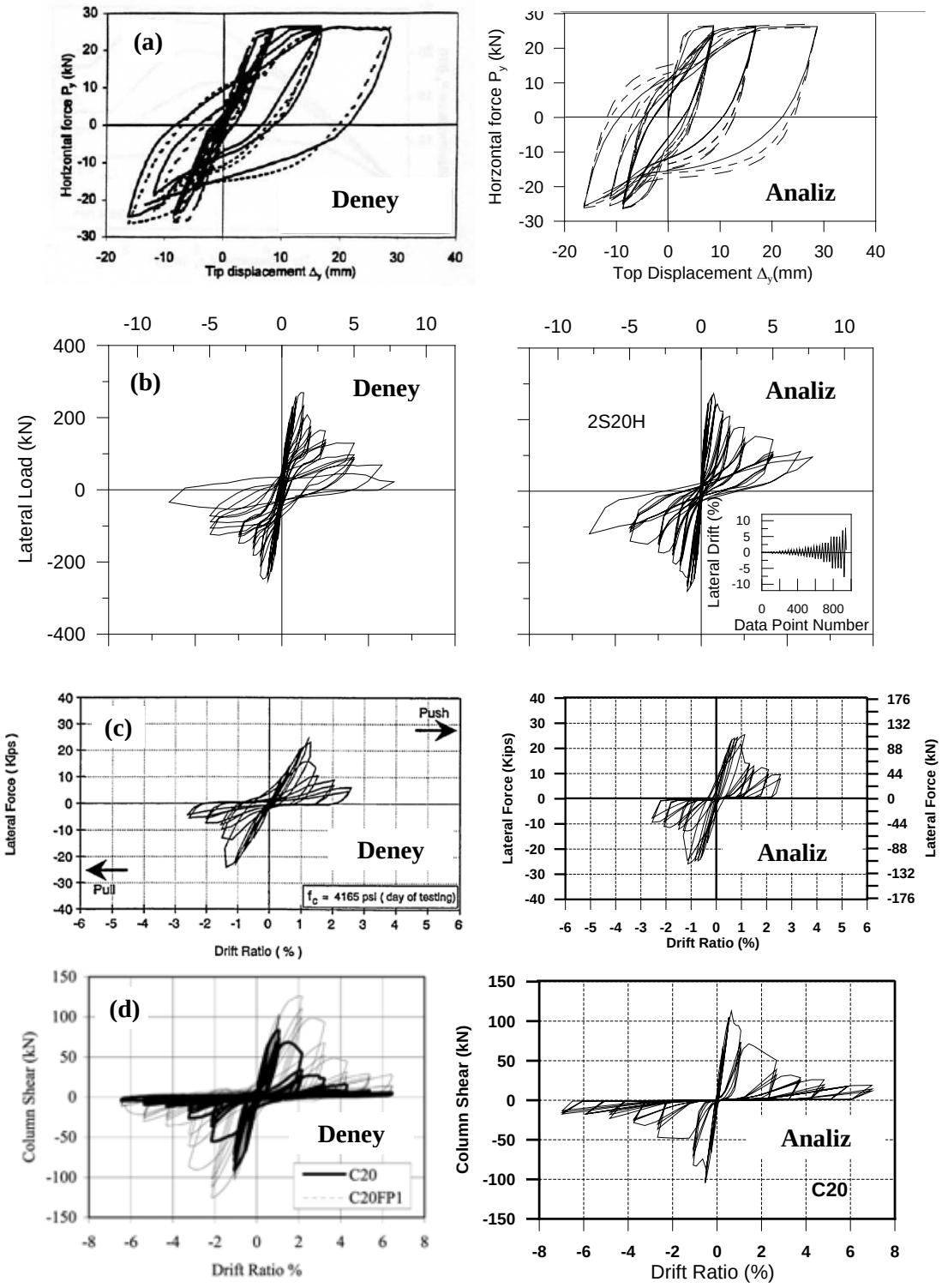
(a) (b) (c)

Şekil 4. Örnek kolon numunesi detayları (a) Aboutaha v.d. (1996), (b) Elgawady v.d. (2010), (c) Verderame v.d. (2008).

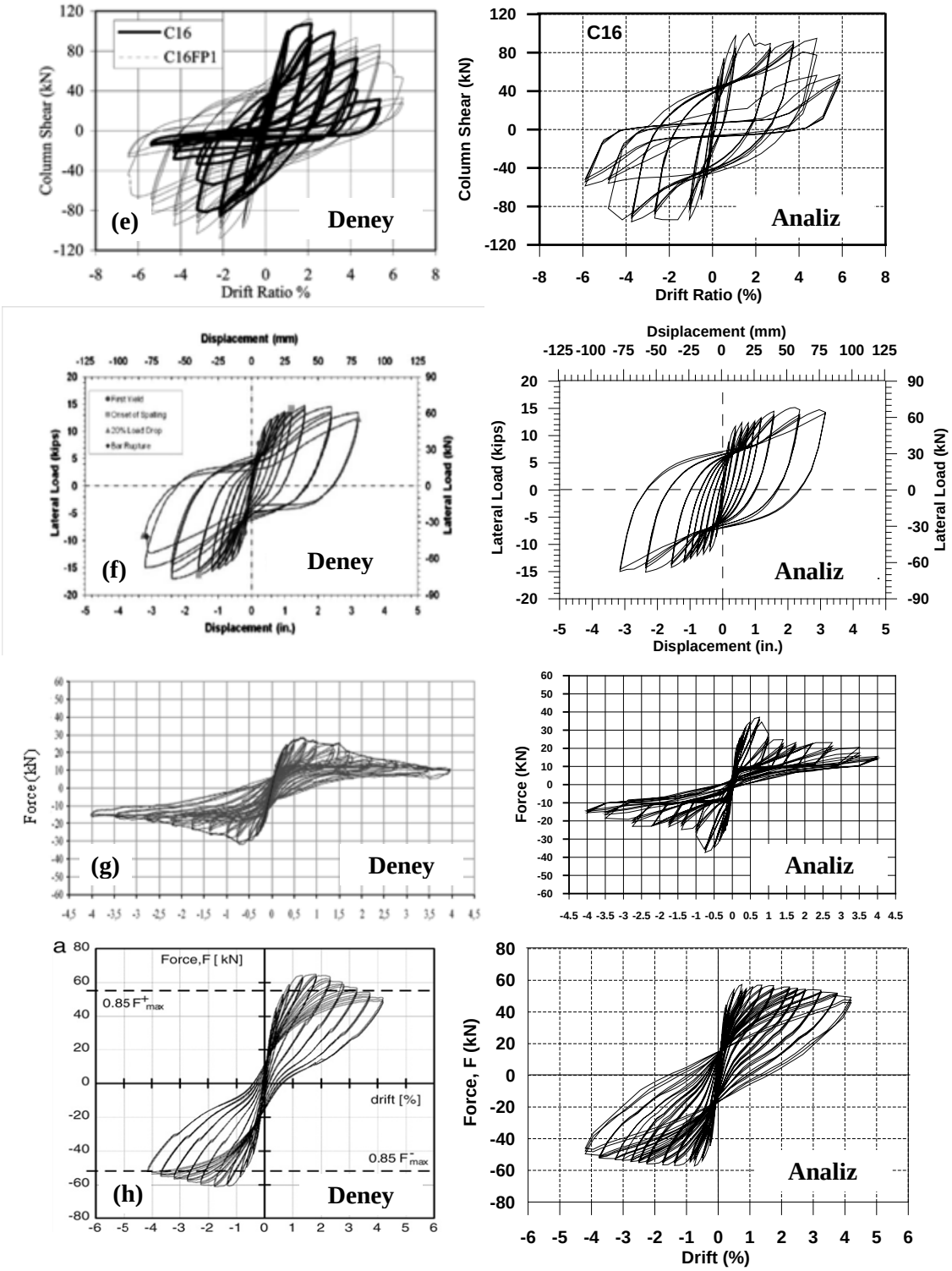
Deney ve analiz sonuçları, Şekil 5'te gösterildiği üzere, incelenen 8 kolon numunesi için, yatay yük – öteleme (veya öteleme oranı) davranışı kapsamında karşılaştırılmıştır. Numunelerden bazıları için kolon tabanında ve bindirme bölgesi tepesinde oluşan dönmeler, çelik ve betonda oluşan birim şekildeğiştirmeler, kesitteki tarafsız eksen derinliği ve bindirme bölgesinde oluşan aderans gerilmeleri gibi yerel şekildeğiştirme ve davranış unsurlarının karşılaştırılmasına Chowdhury'nin (2011) tezinde ulaşmak mümkündür. Şekil 5'te sunulan karşılaştırmalar, analitik modelin farklı bindirme boyuna ve ankraj özelliklerine sahip kolonların yatay yük – öteleme davranışının genel özelliklerini doğru bir şekilde temsil edebildiğini göstermektedir. Analitik model, incelenen kolonların yatay yük kapasitesi, , rijitlik, süneklik, ve histeretik enerji yutma kapasitesi bakımından deneysel ölçümlere yakın sonuçlar vermektedir. Ankraj bölgesinde oluşacak sıyrılma deformasyonlarının kolonun ve tersinir–tekrarlanır davranış özelliklerine etkisi (Şekil 5(a)), baskın sıyrılma etkileri altındaki davranış özellikleri (Şekil 5 (b),(c),(d),(g)), bileşik eğilme (donatı akması) ve sıyrılma etkileri altındaki davranış özellikleri (Şekil 5 (e),(f)) ve düz (nervürsüz) donatı içermesine karşın bindirme eklerinde 180-derece kanca bulunduran kolonların davranış özellikleri (Şekil 5(h)) bakımından analitik model ve deney sonuçları uyumluluk göstermektedir. Burada ve Chowdhury'nin (2011) tezinde sunulan karşılaştırmalar kapsamında, deneysel sonuçların analitik modelin öngördüğü davranışla genel olarak tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada yetersiz bindirme boyu veya ankraj özelliklerine sahip betonarme kolonların yanal yükler altında davranışını temsil etmek için geliştirilmiş olan bir analitik modelin deneysel olarak doğrulanması üzerine yapılan çalışmalardan örnekler sunulmuştur. Geliştirilmiş olan model, bindirmeli ek bölgesinde oluşan sıyrılma deformasyonlarının beton ve donatı çeliğindeki birim şekildeğiştirmelerle etkileşimini göz önünde bulundurmakta, dolayısıyla sıyrılma deformasyonlarının kolonun tersinir tekrarlanır yükler altındaki yük–şekildeğiştirme davranışına doğrudan etkisini öngörebilmektedir. Analitik model sonuçları çeşitli kolon numuneleri üzerinde yapılan yükleme deneyi sonuçlarıyla karşılaştırılmış; karşılaştırmalar sonucunda analitik modelin yanal yük–öteleme davranışı, rijitlik, süneklik ve tersinir–tekrarlanır davranış özellikleri bakımından deneysel ölçümlere yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Model sonuçlarının ülkemizdeki mevcut binalarda rastlanan özellikler barındıran kolonlar için doğrulanması yönünde çalışmalarımız devam etmektedir. Önerilen analitik modelleme yönteminin, donatı sıyrılması etkilerinin betonarme yapıların deprem davranışına etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için önemli olduğu düşünülmekte, mevcut betonarme binaların deprem performansının doğrusal olmayan hesap yöntemleriyle değerlendirilmesi kapsamında da faydalı olacağı öngörülmektedir.



Şekil 5. Yatay yük – öteleme davranışı için deneysel sonuçların analiz sonuşlarıyla karşılaştırılması.
(a) Specimen 1, Low ve Moehle (1987), (b) 2S20H, Melek ve Wallace (2004), (c) FC15, Aboutaha v.d. (1996), (d) C20, Harajli ve Dagher (2008).



Şekil 5 (dvm.). Yatay yük – öteleme davranışı için deneysel sonuçların analiz sonuşlarıyla karşılaştırılması (e) C16 Harajli ve Dagher (2008), (f) AB1, Elgawady v.d. (2010), (g) AF(C0F0)G1, Yıldız (2006), (h) C540A1, Verdarame v.d. (2008).

KAYNAKLAR

Chowdhury, S.R. (2011). Analytical Modeling of Reinforced Concrete Columns with Lap Splices. Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.

Elgawady, M., Endeshaw, M., McLean, D., ve Sack, R. (2010). Retrofitting of rectangular columns with deficient lap splices. *ASCE Journal of Composites for Construction* **14:1**, 22-35.

Harajli, M.H. (2009). Bond stress-slip model for steel bars in unconfined or steel, FRC, or FRP confined concrete under cyclic loading. *ASCE Journal of Structural Engineering* **135:5**, 509-518.

Verderame, G.M., Carlo, G.D., Ricci, P. ve Fabbrocino, G. (2009). Cyclic bond behavior of plain bars, Part II: analytical investigation. *Construction and Building Materials* **23**, 3512-3522.

Harajli, M.H., ve Dagher, F. (2008). Seismic strengthening of bond-critical regions in rectangular reinforced concrete columns using fiber-reinforced polymer wraps. *ACI Structural Journal* **105:1**, 68-77.

Verderame, G.M., Fabbrocino, G. ve Manfredi, G. (2008). Seismic response of RC columns with smooth reinforcement, Part II: cyclic tests. *Engineering Structures* **30**, 2289-2300.

Cho, J.Y. ve Pincheira, J.A. (2006). Inelastic analysis of reinforced concrete columns with short lap splices subjected to reversed cyclic loads. *ACI Structural Journal* **103:2**, 280-290.

Yildiz, H.A. (2006). Flexural Strengthening of Reinforced Columns Having Lap Splice Problem with Longitudinal FRP Composites, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.

Melek, M. ve Wallace, J.W. (2004). Cyclic behavior of columns with short lap splices. *ACI Structural Journal* **101:6**, 802-811.

Orakcal, K., Wallace, J.W. ve Conte, J.P. (2004). Nonlinear modeling and analysis of reinforced concrete structural walls. *ACI Structural Journal* **101:3**, 688-698.

Fabbrocino, G., Verderame, G.M., Manfredi, G. ve Cosenza, E. (2004). Structural models of critical regions in old-type RC frames with smooth rebars. *Engineering Structures* **26**, 2137-2148.

Aboutaha, R., Engelhardt, M.D., Jirsa, J.O. ve Kreger, M.E. (1996). Retrofit of concrete columns with inadequate lap Splices by the use of rectangular steel jackets. *Earthquake Spectra* **12:4**, 693-714.

Chang, G.A. ve Mander, J.B. (1994). Seismic Energy Based Fatigue Damage Analysis of Bridge columns: Part I – Evaluation of Seismic Capacity. NCEER Technical Report, State University of New York, Buffalo, NY.

Low, S.S. ve Moehle, J.P. (1987). Experimental Study of Reinforced Concrete Columns Subjected to Multi-Axial Cyclic Loading. EERC Report 87/14, Earthquake Engineering Research Center, University of Calirfornia, Berkeley, CA.

Eligehausen. R., Popov E.P. ve Bertero, V.V. (1983). Local Bond Stress-Slip Relationships of Deformed Bars under Generalized Excitations. EERC Report, University of California, Berkeley, CA.

Menegotto, M. ve Pinto, E. (1973). Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending. *Proceedings* of the IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-Defined Repeated Loads. Lisbon, Portugal.