İMO Teknik Dergi, 2009 4545-4565, Yazı 301

Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kolonların M_p Moment Kapasitelerinin Belirlenmesi

Cem AYDEMİR*
Mustafa ZORBOZAN**
Sema NOYAN ALACALI***

ÖZ

Türk Deprem Yönetmeliği, kiriş ve kolonların enine donatı hesabında temel alınacak kesme kuvvetinin, kapasite tasarımı ilkesiyle belirlenmesini öngörmektedir. Bu durum, kolon uçlarında oluşabilecek en büyük eğilme momenti kapasitesi olan M_p ′nin mümkün olduğunca gerçeğe yakın belirlenmesini gerektirir. Yönetmelikte (1998 ve 2007) daha kesin hesap yapılmadığı durumlarda, kolonlar için eksenel yük düzeyinden bağımsız olarak verilen M_p/M_r oranının 1.4 alınabileceği önerisi, eksenel yük düzeyinin artması durumunda gerçek kapasiteyi belirlemekte yetersiz kalmaktadır.

Bu çalışmada, dikdörtgen kesitli betonarme kolonlarda M_p ′nin gerçeğe yakın ve pratik hesaplanmasına yönelik analitik bağıntılar türetilmiştir. Önerilen bağıntılar yardımıyla belirlenen eğilme momenti kapasiteleri, literatürdeki deney sonuçlarından elde edilmiş eğilme momenti kapasiteleri ile karşılaştırılmış ve gerçeğe oldukça yakın değerler verdiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kolon moment kapasitesi, M-N karşılıklı etkileşim diyagramları, pekleşme etkisi, sargılı beton.

ABSTRACT

Determination of Moment Capacity M_p for Rectangular Reinforced Concrete Columns

Turkish Seismic Code obligates the capacity design procedure for the calculation of the design shear force of RC beams and columns. Therefore, the plastic hinge moment capacity (M_p) at the ends of the column must be determined as realistic as possible. Turkish Seismic Design Code recommends an increase of 40% in ultimate moment capacity (M_r) to obtain the plastic hinge moment capacity (M_p), unless a detailed calculation is carried out.

Not: Bu yazı
- Yayın Kurulu'na 17.10.2005 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2009 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - caydemir@yildiz.edu.tr
** Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - zorbozan@yildiz.edu.tr
*** Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - noyan@yildiz.edu.tr

However, this recommendation remains insufficient to obtain plastic hinge moment capacity for high levels of axial load.

In this study, new analytical equations have been derived to obtain the plastic hinge moment capacity of rectangular RC columns in a realistic and practical way. Plastic hinge moment capacity of columns calculated with proposed equations is compared to the capacity extracted from experimental results. It is shown that proposed equations yield realistic results.

Keywords: Column moment capacity, M-N interaction diagrams, strain hardening, confined concrete

1. GİRİŞ

Türk Deprem Yönetmeliğindeki kapasite tasarımı gereği, kolonların enine donatı hesabında temel alınacak kesme kuvveti, elemanın uçlarındaki eğilme kapasiteleri temel alınarak belirlenmelidir. Olası en büyük kesme kuvvetinin belirlenmesinde, yapı elemanının uçlarında oluşabilecek en büyük eğilme momenti kapasiteleri dikkate alınır (Şekil 1). Bu uygulama, kolonların uçlarında oluşabilecek en büyük eğilme momenti kapasitesi olan M_p ′nin mümkün olduğunca gerçeğe yakın belirlenmesini gerektirir.

Basit yada bileşik eğilme etkisindeki betonarme bir kesitin moment kapasitesi, değişik varsayımlara göre hesaplanabilir. Aşağıda değişik amaçlarla kullanılan üç ayrı moment kapasitesi tanımı kısaca özetlenmiştir.

M_r, Taşıma Gücü Momenti (TS500) [1]

TS500 ′de verilmiş olan varsayımlar kullanılarak, malzeme hesap dayanımlarına ($f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$, $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$) göre belirlenir. Taşıma gücü hesabında yapılan varsayımlar şöyle sıralanabilir: kesitteki birim şekil değiştirme dağılımı doğrusaldır, betonun çekme dayanımı ihmal edilir, donatı elasto-plastik davranış gösteren bir malzemedir, basınç bölgesindeki beton basınç gerilmesi dağılımı eşdeğer basınç bloğuyla ifade edilir ve beton için ezilme birim şekil değiştirmesi 0.003 olarak alınır.

M_n, Karakteristik Taşıma Gücü Momenti (ACI-318) [2]

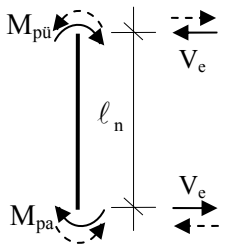
ACI 318 ′de tanımlanan karakteristik taşıma gücü momenti karakteristik dayanımların (f_{ck}, f_{yk}) dikkate alınmasıyla belirlenir. Tasarım aşamasında dikkate alınacak moment değeri karakteristik moment taşıma gücünün bir katsayı ile azaltılmasıyla elde edilir.

M_p, Eğilme Momenti Kapasitesi

Eğilme kırılmasıyla taşıma gücüne ulaşan bir betonarme yapı elemanının, yönetmeliklerde tanımlanan taşıma gücü yöntemine göre hesaplanan eğilme momenti taşıma gücü değerleri (M_r, M_n), donatı çeliğindeki pekleşme etkisinin, betonda sargı etkisiyle değişen gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin göz önüne alınmaması ve tasarımda kullanılan katsayılar gibi nedenlerle her zaman gerçek eğilme momenti kapasitesinden (M_p) küçük olmaktadır.

Kapasite tasarımı gereği belirlenmesi gereken ve betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının uçlarında oluşabilecek en büyük eğilme momenti kapasitesi olan M_p, betondaki sargı

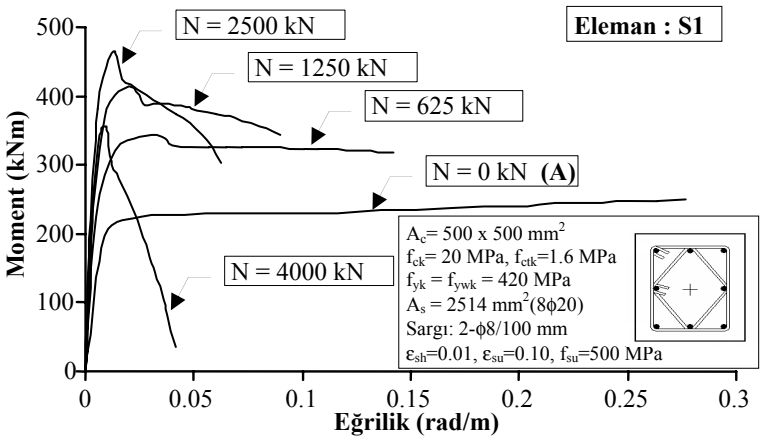
etkisiyle değişen gerilme-şekil değiştirme ilişkisini, betonun çekme dayanımını, kabuk betonundaki ezilmeyi, donatı çeliğindeki pekleşme gibi etkileri dikkate alacak bir çözümlemeden elde edilecek moment-eğrilik ilişkisindeki en büyük moment olarak tanımlanabilir. Ancak M_p'yi gerçekçi modellere dayanan bir moment-eğrilik yazılımından elde etmek her zaman pratik olmayabilir.



$$V_e = (M_{pü} + M_{pa}) / \ell_n$$

Şekil 1. Deprem yönetmeliğine göre kolonlarda kesme kuvveti V_e 'nin hesabında temel alınan eğilme momentleri [3, 4]

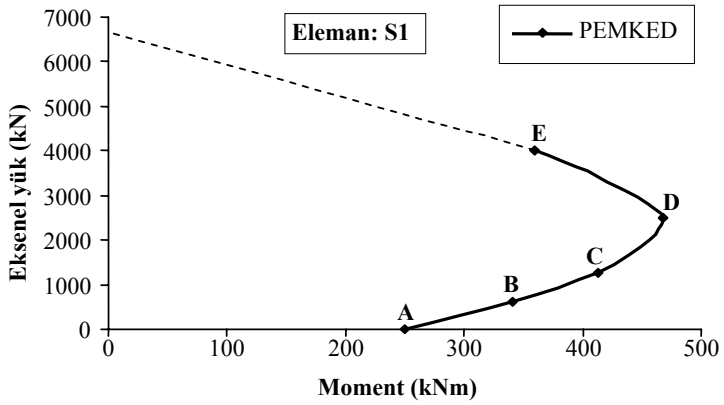
Şekil 2'de, kesit ve malzeme özellikleri verilmiş bir betonarme kolon kesitinde, değişik eksenel yük düzeyleri için M_p momenti kapasitesini belirleyebilmek amacıyla çizilmiş moment-eğrilik ilişkileri görülmektedir. Moment-eğrilik ilişkilerindeki maksimum moment ve ilgili eksenel yük değerleri yardımıyla Şekil 3 'de görülen pekleşmeli eğilme momenti karşılıklı etkileşim diyagramı elde edilmiştir (PEMKED) [5].



Şekil 2. Değişik eksenel yük düzeyleri için moment-eğrilik ilişkileri

Moment eğrilik ilişkileri belirlenirken, kesitin geometrik tanımlanması için (sargılı, sargısız) kesit ince şeritlere bölünmüş, sargılı ve sargısız betonun basınç etkisindeki

davranışı için Geliştirilmiş Kent-Park davranış modeli, donatı çeliği için pekleşme etkilerinin göz önüne alınabileceği bir model ve çekme etkisi altındaki beton davranışını göz önüne alan bir malzeme modeli kullanılmıştır. Sargısız betonda, maksimum gerilmenin $0.85 \cdot f_{ck}$, maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalmanın (ε_{co}) 0.002 ve etkili maksimum birim kısalmanın (ε_{cu}) 0.004 [6] olduğu varsayılmıştır.



Şekil 3. Pekleşmeli eğilme momenti karşılıklı etkileşim diyagramı (PEMKED) [5]

Deprem yönetmeliğinde, kolonlarda en büyük eğilme momenti kapasitesi M_p ′nin daha kesin hesap yapılamayan durumlarda TS500 ′e göre bulunan taşıma gücü momenti M_r ′nin 1.4 katı olarak alınabileceği belirtilmektedir [3, 4]. Yönetmelikte, kolon eksenel yük düzeyinden bağımsız olarak M_p/M_r oranının 1.4 olacağının varsayılmasına karşın, söz konusu oran, başta eksenel yük düzeyi olmak üzere bir çok tasarım değişkeninden etkilenmektir [5, 6]. Buna bağlı olarak eksenel yük düzeyinin artmasıyla $M_p/M_r \approx 1.4$ önerisinin gerçek kapasiteyi belirlemekte yetersiz kaldığı durumlarla karşılaşılmaktadır [5, 6].

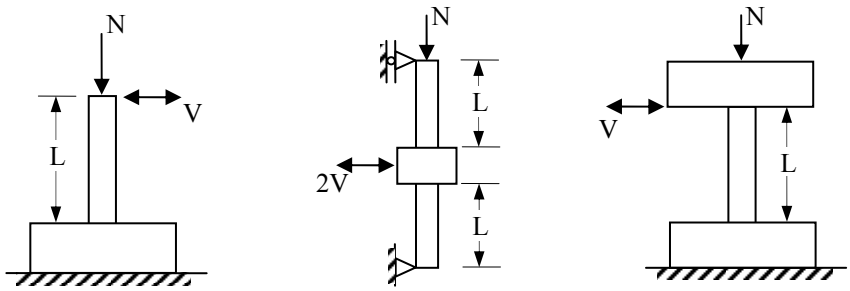
Kolonların M_p moment kapasitelerinin yaklaşık olarak belirlenmesinde Deprem Yönetmeliğinde önerilen $1.4M_r$ ′ye göre daha gerçekçi bir yaklaşım için Ersoy analitik incelemeler yapmıştır [6]. Bu incelemelerde Ersoy, kolon M_p moment kapasiteleri üzerinde donatı pekleşmesinin daha az, sargılı beton davranışının ise daha fazla etkili olması nedeniyle, M_p nin hesabında TS-500 tarafından verilen taşıma gücü yönteminin f_{yd} yerine f_{yk} ve f_{cd} yerine f_{cc} ($f_{cc}=1.15f_{ck}$ olmak üzere) alınması şartıyla aynen kullanılabileceğini göstermiştir. Söz konusu öneride, sabit bir kuşatma katsayısı kabul edilmesine karşın, eksenel yük düzeyinin artması ile gerçek kapasiteye yakın sonuçlar elde edilmekte, nispeten küçük eksenel yük seviyelerinde donatı pekleşmesinin moment kapasitesi üzerine etkisinin yansıtılamamasından dolayı gerçek kapasitenin altında değerler elde edilmektedir [5].

Bu çalışmada ise, kolon M_p moment kapasitesinin belirlenmesine yönelik daha gerçekçi öneriler, deneysel sonuçlarla da karşılaştırılarak, sunulacaktır.

2. DENEYSEL KARŞILAŞTIRMALAR

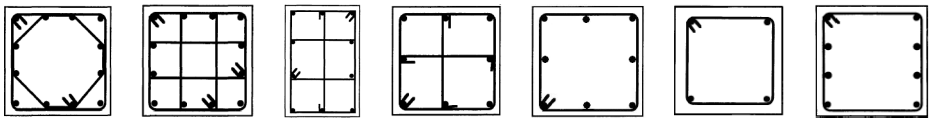
Çalışmanın bu bölümünde, çeşitli araştırmacılar tarafından, sabit eksenel yük ve çevrimsel kesme kuvveti altında deprem yüklerine benzeştirilerek test edilmiş ve taşıma güçlerine eğilme kırılmasıyla ulaşan kolon deney elemanlarının sonuçlarından yararlanılacaktır. Söz konusu deney elemanlarından elde edilen M_p moment kapasiteleri ($M_{p,deneysel}=V_{maks}L$), yukarıda verilmiş olan yaklaşık yöntemlerle karşılaştırmalı olarak irdelenecektir.

Karşılaştırmalarda kullanılan deney elemanlarının düzenekleri Şekil 4'de, tip kesitleri Çizelge 1'de, genel özellikleri ise Çizelge 2'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Kolon deney düzeneklerinin şematik gösterimi

Çizelge 1. Deney elemanlarının tip kesitleri

Tip kolon kesiti						
1	2	3	4	5	6	7
						

Çizelge 2. Deney elemanlarının genel özellikleri

No	**Referans/ Eleman ismi**	**Tip**	**b/h (mm/mm)**	**ρ_t**	**f_{ck} / f_{yk}/ f_{su} (MPa)**	**f_{ywk} (MPa)**	**Etriye Ø/s(mm)**	**n**
1	[7]/No1	1	550/550	0.0179	23.1/375/635.6	297	ϕ10/80	0.26
2	[7]/No2	1	550/550	0.0179	41.4/375/635.6	316	ϕ12/75	0.214
3	[7]/No3	2	550/550	0.0179	21.4/375/635.6	297	ϕ10/75	0.42
4	[7]/No4	2	550/550	0.0179	23.5/375/635.6	294	ϕ12/62	0.60
5	[8]/No3	2	400/400	0.0151	23.6/427/670	320	ϕ12/100	0.38

Çizelge 2. Deney elemanlarının genel özellikleri (Devamı)

No	Referans/ Eleman ismi	Tip	b/h (mm/mm)	ρ_t	f_{ck} / f_{yk}/ f_{su} (MPa)	f_{ywk} (MPa)	Etriye Ø/s(mm)	n
6	[8]/No4	2	400/400	0.0151	25/427/670	280	ϕ10/90	0.21
7	[9]/No1	1	400/400	0.0151	46.5/446/702	364	ϕ7/85	0.10
8	[9]/No2	1	400/400	0.0151	44/446/702	360	ϕ8/78	0.30
9	[9]/No3	1	400/400	0.0151	44/446/702	364	ϕ7/91	0.30
10	[9]/No4	1	400/400	0.0151	40/446/702	255	ϕ6/95	0.30
11	[10]/No9	3	400/600	0.0188	26.9/432/*	305	ϕ12/80	0.10
12	[11]/No2	4	400/400	0.0157	25.6/474/721	333	ϕ12/80	0.20
13	[11]/No4	4	400/400	0.0157	25.6/474/721	333	ϕ12/80	0.20
14	[11]/No5	2	550/550	0.0125	32/511/675	325	ϕ12/110	0.10
15	[11]/No6	2	550/550	0.0125	32/511/675	325	ϕ12/110	0.10
16	[12]/85STC-1	5	250/250	0.0162	27.9/374/494	506	ϕ5.5/50	0.106
17	[12]/85STC-2	5	250/250	0.0162	27.9/374/494	506	ϕ5.5/50	0.106
18	[12]/85STC-3	5	250/250	0.0162	27.9/374/494	506	ϕ5.5/50	0.106
19	[12]/85PDC-1	5	250/250	0.0162	24.8/374/494	352	ϕ5.5/50	0.106
20	[12]/85PDC-2	5	250/250	0.0162	27.9/374/494	506	ϕ5.5/50	0.106
21	[12]/85PDC-3	5	250/250	0.0162	27.9/374/494	506	ϕ5.5/50	0.106
22	[13]/No. 1S1	6	305/305	0.0163	29.1/367/578	363	ϕ9.5/76	0.099
23	[13]/No. 2S1	6	305/305	0.0163	30.7/367/578	363	ϕ9.5/127	0.093
24	[13]/No. 5S1	6	305/305	0.0163	29.4/429/657	392	ϕ9.5/76	0.195
25	[13]/No. 6S1	6	305/305	0.0163	31.8/429/657	392	ϕ9.5/127	0.181
26	[14]/U-1	5	350/350	0.0321	43.6/430/*	470	ϕ10/150	0.0
27	[14]/U-4	5	350/350	0.0321	32/438/*	470	ϕ10/50	0.153
28	[14]/U-6	4	350/350	0.0321	37.3/437/*	425	ϕ6.4/65	0.131
29	[14]/U-7	4	350/350	0.0321	39/437/*	425	ϕ6.4/65	0.126
30	[15]/C1-1	2	400/400	0.0214	24.9/497/592	459.5	ϕ6.3/50	0.113
31	[15]/C1-2	2	400/400	0.0214	26.7/497/592	459.5	ϕ6.3/50	0.158
32	[15]/C1-3	2	400/400	0.0214	26.1/497/592	459.5	ϕ6.3/50	0.216

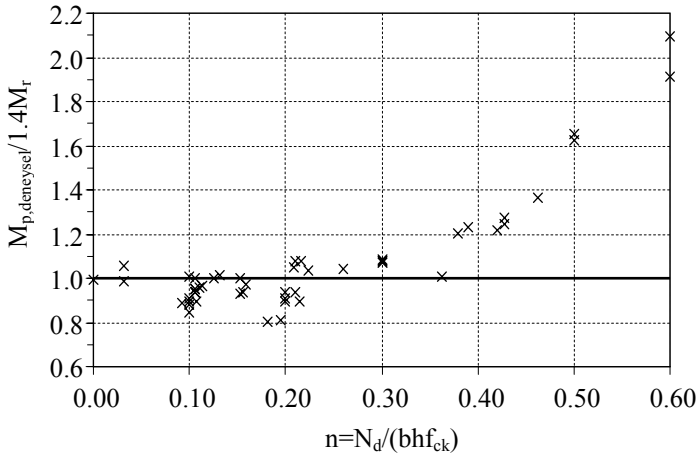
* *Donatı çeliği kopma dayanımı verilmemiştir.*

Çizelge 2. Deney elemanlarının genel özellikleri (Devamı)

No	Referans/ Eleman ismi	Tip	b/h (mm/mm)	ρ_t	f_{ck} / f_{yk}/ f_{su} (MPa)	f_{ywk} (MPa)	Etriye Ø/s(mm)	n
33	[15]/C2-1	2	400/400	0.0214	25.3/497/592	459.5	ϕ6.3/52	0.111
34	[15]/C2-2	2	400/400	0.0214	27.1/497/592	459.5	ϕ6.3/52	0.156
35	[15]/C2-3	2	400/400	0.0214	26.8/497/592	459.5	ϕ6.3/52	0.21
36	[15]/C3-1	2	400/400	0.0214	26.4/497/592	459.5	ϕ6.3/54	0.107
37	[15]/C3-2	2	400/400	0.0214	27.5/497/592	459.5	ϕ6.3/54	0.153
38	[15]/C3-3	2	400/400	0.0214	26.9/497/592	459.5	ϕ6.3/54	0.209
39	[16]/L1	7	400/400	0.0142	24.8/362/*	325	ϕ9/100	0.032
40	[16]/L2	7	400/400	0.0142	24.8/362/*	325	ϕ9/100	0.032
41	[17]/No7	2	400/400	0.0151	28.3/440/674	466	ϕ10/117	0.223
42	[17]/No8	2	400/400	0.0151	40.1/440/674	466	ϕ10/92	0.39
43	[18]/No-5	1	400/400	0.0151	41/474/633.3	372	ϕ8/81	0.50
44	[18]/No-6	1	400/400	0.0151	40/474/633.3	388	ϕ7/96	0.50
45	[19]/BG-1	4	350/350	0.0195	34/455.6/660	570	ϕ9.5/152	0.428
46	[19]/BG-2	4	350/350	0.0195	34/455.6/660	570	ϕ9.5/76	0.428
47	[19]/BG-3	4	350/350	0.0195	34/455.6/660	570	ϕ9.5/76	0.20
48	[19]/BG-4	2	350/350	0.0293	34/455.6/660	570	ϕ9.5/152	0.462
49	[20]/c5-40N	6	203/203	0.0193	38.1/572/729.1	513.7	ϕ9.5/76	0.362
50	[21]/D1N60	2	250/250	0.0243	37.6/461/634.3	485	ϕ4/40	0.60

* *Donatı çeliği kopma dayanımı verilmemiştir.*

Çizelge 2'de özellikleri verilmiş olan deney elemanlarının uç bölgelerinde oluşan en büyük kesme kuvveti (base shear) yardımı ile belirlenmiş M_p moment kapasitelerinin ($M_{p,deneysel}=V_{maks}L$), Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelikte (DBYBHY'07) verilmiş olan $1.4M_r$ yaklaşımıyla belirlenmiş olan moment kapasitelerine oranlarının kolon eksenel yük seviyelerine göre değişimleri Şekil 5'de gösterilmiştir.

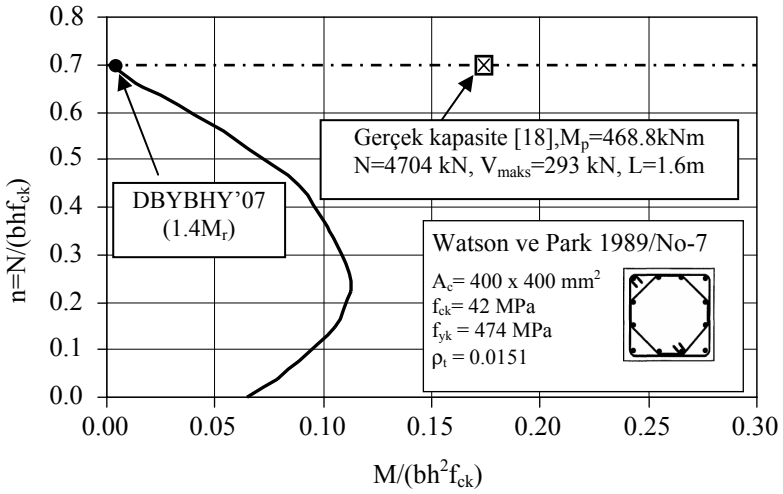


Şekil 5. $M_{p,deneysel}/1.4M_r$ oranlarının kolon eksenel yük seviyelerine göre değişimleri

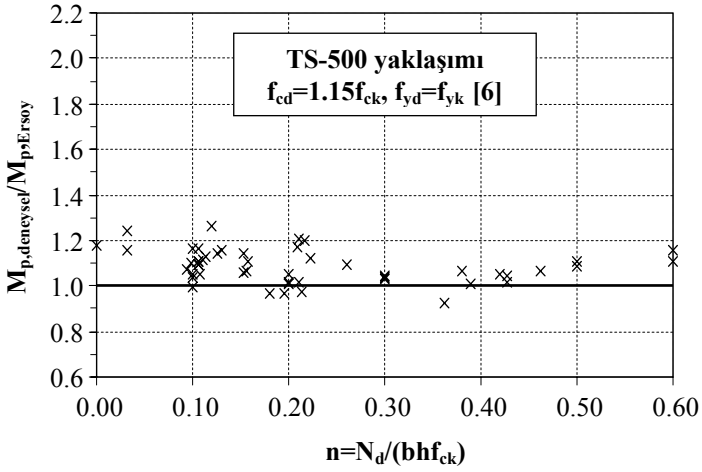
Şekil 5'de, $M_{p,deneysel}/1.4M_r$ oranlarının, bir başka ifadeyle eleman uçlarında oluşan maksimum kesme kuvveti ile $1.4M_r$ yaklaşımı ile belirlenmiş olan kesme kuvveti oranlarının (V_{maks}/V_e), 0.81~2.1 aralığında değiştiği ve boyutsuz eksenel yük seviyesi arttıkça $M_{p,deneysel}/1.4M_r$ oranlarının büyüdüğü ve hata miktarlarının arttığı görülmektedir. Boyutsuz eksenel yük seviyesi arttıkça taşıma gücü momentinin (M_r), gerçek kapasitenin altında olması ve daha küçük bir eksenel yük seviyesinden (dengeli eksenel yük) itibaren azalım eğilimine geçmesi nedeni ile bu tip bir eğilim doğaldır. Eksenel yük seviyesinin yukarıda incelenen en büyük değerin üzerine çıkması durumunda ise $M_{p,deneysel}/1.4M_r$ oranlarındaki artış miktarı, yukarıdaki artış miktarlarının oldukça üzerine çıkabilir. Şekil 6'da, söz konusu artışı daha iyi açıklayabilmek için ele alınmış bir kolonun, $1.4M_r$ yaklaşımı ile elde edilen karşılıklı etki diyagramı üzerine, n≈0.7 eksenel yük seviyesi için $M_{p,deneysel}$ moment kapasitesi (gerçek kapasite) işaretlenmiştir. Göz önüne alınan eksenel yük seviyesi (n≈0.7) için $M_{p,deneysel}/1.4M_r$ oranı yaklaşık 66 kat olarak gerçekleşmiştir. Ele alınan örnek pratikte pek karşılaşılmayacak olsa bile sonuç çarpıcıdır.

$M_{p,deneysel}/1.4M_r$ oranlarının karşılaştırıldığı Şekil 5'de, boyutsuz eksenel yük seviyesinin 0.3 ve altındaki değerleri için söz konusu oranlar 0.81~1.1 aralığında değişmektedir. Bu eksenel yük seviyelerinde ortalama oran 0.97'dir ve genelde hata oranı ±%10 mertebelerindedir.

Ersoy tarafından önerilen yöntem ($f_{cc}=1.15f_{ck}$) ile belirlenmiş olan moment kapasiteleriyle, deney elemanlarının uç bölgelerinde oluşan en büyük net kesme kuvveti (base shear) yardımı ile belirlenmiş M_p moment kapasitelerinin ($M_{p,deneysel}=V_{maks}L$) karşılaştırmaları ise Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Büyük eksenel yükler altında $M_{p,deneysel}/1.4M_r$ oranı



Şekil 7. $M_{p,deneysel}/M_{Ersoy}$ oranlarının kolon eksenel yük seviyelerine göre değişimleri

Şekil 7'de $M_{p,deneysel}/M_{p,Ersoy}$ oranlarının kolon eksenel yük seviyesine göre değişimleri incelendiğinde, söz konusu oranların 0.93~1.26 aralığında değiştiği ve boyutsuz eksenel yük seviyelerinin azalması ile hata oranlarının arttığı görülmektedir. Yazarlar bu artışın nedenlerinin irdelenmesinin yararlı olacağı kanaatindedirler. Ersoy, Deprem Yönetmeliği'nde öngörülen minimum sargı donatısına sahip kolonlarda, sargılı beton dayanımının $1.15f_{ck}$'dan daha küçük olmayacağını ve bu kabul ile hesaplanacak moment kapasitelerinin ise gerçek kapasitenin bir miktar altında olacağını belirtmektedir. Ayrıca

sargı donatısının minimum değerin üzerinde olması durumunda ise, sargılı beton dayanımının $1.15f_{ck}$ alınarak bulunacak moment kapasitesinin, gerçek kapasitenin oldukça altında kalabileceğini vurgulamaktadır [6]. Nitekim Şekil 7'deki karşılaştırmalarda, sargılı beton dayanımının $1.15f_{ck}$ değerinden büyük olduğu kolonlara da rastlanmaktadır. Tarafsız eksen derinliğinin küçülmesine neden olan etkenlerden, özellikle eksenel yük seviyesinin küçük değerleri için, beton dayanımında yapılacak bir artışın moment kapasitesi üzerine etkisi sınırlıdır. Bu duruma örnek olarak Çizelge 2'de 26, 27 ve 28 nolu elemanlar (U-1, U-4, U-6) verilebilir. Söz konusu elemanların deneysel moment kapasitelerinin, yukarıda değinilen TS-500 yaklaşımıyla belirlenebilmesi için beton dayanımlarının sırasıyla 6.2, 2.5 ve 3.6 kat arttırılması gerekmektedir. Bu artış miktarları, sargılı beton dayanımları için gerçekleşebilir bir artış miktarı değildir. Eksenel yük seviyesinin artan değerleri için ise beton dayanımındaki artış miktarları azalma eğilimine girerek, sargılı beton dayanımına yaklaşmaktadır. Bu bağlamda, Ersoy tarafından önerilen yöntemde donatıdaki pekleşme etkisiyle oluşan gerilme artışının dikkate alınmaması, küçük eksenel yük seviyelerinde moment kapasitesinin olduğundan küçük tahmin edilmesine neden olmaktadır. Boyutsuz eksenel yük seviyesinin 0.25 ve daha büyük değerleri için, Ersoy tarafından önerilen yöntemle bulunan kolon moment kapasiteleri, gerçek kapasiteye oldukça yakındır ve hata mertebeleri genelde %10 ve daha azdır.

3. KOLON M_p MOMENT KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ İÇİN ÖNERİLEN YÖNTEMLER

Bu bölümde, kolon M_p moment kapasitesinin belirlenmesine yönelik iki basit yöntem önerilecektir. Önerilecek birinci yöntemde kolon M_p moment kapasitesi taşıma gücü momenti yardımıyla, ikinci yöntemde ise arttırılmış beton ve çelik dayanımları yardımıyla belirlenecektir.

Çalışmanın 2. bölümünde yapılan irdelemelerin ışığında, $1.4M_r$ yaklaşımı ve Ersoy'un önerisinin, belirli eksenel yük seviyeleri aralığında genelde iyi sonuçlar verdiği görülmüştür (Şekil 5 ve 7). Ersoy'un önerisine göre hesaplanan moment kapasiteleri ile moment taşıma gücü arasında bir ilişki kurularak, eksenel yük seviyesine göre kolon moment kapasitesinin belirlenebileceği bir bağıntı türetilebilir.

Bu amaçla, Çakıroğlu ve Özer ′in bileşik eğilme etkisindeki simetrik donatılı dikdörtgen kesitli betonarme kolonlar için taşıma gücü esasına göre, kolon karşılıklı etkileşim diyagramlarındaki eğrileri, etkileşim diyagramlarındaki parametrelere bağlı bir fonksiyon haline getirerek önerdikleri aşağıdaki bağıntılar kullanılacaktır [22].

- **Malzeme katsayılarının dikkate alındığı durum için ($f_{cd}=f_{ck}/1.5$; $f_{yd}=f_{yk}/1.15$) ;**

$$n = \frac{N_d}{b \cdot h \cdot f_{ck}} \quad , \quad m = \frac{M_d}{b \cdot h^2 \cdot f_{ck}} \tag{1}$$

$$\omega_t = \frac{A_{st} \cdot f_{yk}}{k_1 \cdot k_2 \cdot b \cdot h \cdot f_{ck}} \tag{2}$$

olmak üzere, n < 0.2 durumunda;

$$\omega_t = 2.86 \cdot m + 2.92 \cdot n^2 - 1.48 \cdot n \tag{3a}$$

0.2 < n ≤ 0.3 durumunda;

$$\omega_t = 2.92 \cdot m - 0.192 \tag{3b}$$

n > 0.3 durumunda;

$$\omega_t = 2.92 \cdot m + 0.62 \cdot n^2 + 0.254 \cdot n - 0.32 \tag{3c}$$

- **Malzeme katsayılarının dışarıdan verildiği durum için;**

$$\bar{n} = \frac{N_d}{0.85 \cdot b \cdot h \cdot f_c} \quad , \quad \bar{m} = \frac{M_d}{0.85 \cdot b \cdot h^2 \cdot f_c} \tag{4}$$

$$\bar{\omega}_t = \frac{A_{st} \cdot f_y}{k_1 \cdot k_2 \cdot 0.85 \cdot b \cdot h \cdot f_c} \tag{5}$$

$\bar{n}$ < 0.35 durumunda;

$$\bar{\omega}_t = 2.49 \cdot \bar{m} + 1.44 \cdot \bar{n}^2 - 1.29 \cdot \bar{n} \tag{6a}$$

0.35 ≤ $\bar{n}$ ≤ 0.50 durumunda;

$$\bar{\omega}_t = 2.54 \cdot \bar{m} - 0.295 \tag{6b}$$

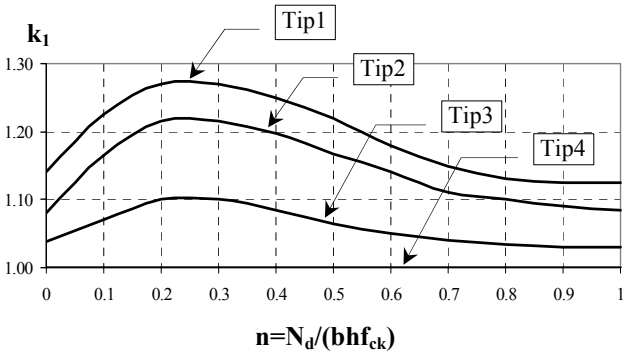
$\bar{n}$ > 0.50 durumunda;

$$\bar{\omega}_t = 2.54 \cdot \bar{m} + 0.305 \cdot \bar{n}^2 + 0.22 \cdot \bar{n} - 0.49 \tag{6c}$$

(1~6) bağıntılarında; A_{st} kesitteki toplam boyuna donatı miktarı, ω_t kesitteki toplam boyuna donatı indeksi, k_1 farklı boyuna donatı düzeninden kaynaklanacak değişiklikleri yansıtan katsayı (Şekil 8), k_2 z_s/h oranı farklılıklarını yansıtan katsayı (Şekil 9), f_c malzeme katsayılarının dışarıdan verildiği durum için hesapta kullanılacak beton basınç dayanımı, f_y malzeme katsayılarının dışarıdan verildiği durum için hesapta kullanılacak çelik dayanımını göstermektedir.

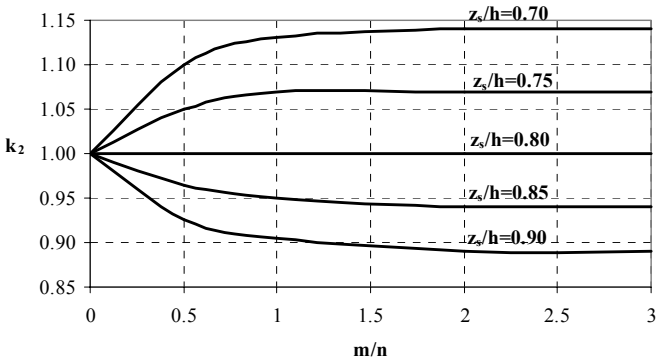
Tüm dikdörtgen kesitli betonarme kolonlar için geçerli olabilecek bir $M_{p,Ersoy}/M_r$ oranı belirleyebilmek için aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

Belirli bir eksenel yük seviyesinde kesitin taşıma gücü momentinin (M_r) belirlenmesinde malzeme katsayılarının dikkate alındığı durumda verilen bağıntılar, Ersoy tarafından önerilen yöntem ile kolon moment kapasitesinin belirlenmesinde ise malzeme katsayısının dışarıdan verildiği durumdaki bağıntılar kullanılmıştır. Malzeme katsayılarının dışarıdan verildiği durumda $f_c=1.15f_{ck}$ ve $f_y=f_{yk}$ kabulüne dayanan Ersoy ′un önerisi göz önüne alınmıştır [6].



Tip1		λ=0.50
Tip2		λ=0.25
Tip3		λ=0.125
Tip4		λ=0.0

Şekil 8. Farklı donatı yerleşim düzenleri için k_1 katsayıları [22]



Şekil 9. Farklı z_s/h durumları için k_2 katsayıları [22]

(2) ve (5) bağıntıları toplam boyuna donatı alanı A_{st} ′ye göre düzenlenip birbirine eşitlenerek ve gerekli sadeleştirmeler yapılarak aşağıdaki (7) bağıntısı elde edilir ((5) bağıntısında $f_c=1.15f_{ck}$, $f_y=f_{yk}$ alınmalıdır).

$$\omega_t = \overline{\omega_t} \cdot 0.85 \cdot 1.15 \tag{7}$$

(7) bağıntısındaki ω_t ve $\overline{\omega_t}$ terimleri için ilgili boyutsuz eksenel yük düzeylerine göre tanımlanmış olan fonksiyonlar ((3a, b, c) ve (6a, b, c) bağıntıları) yazılıp, $\overline{n} = 1.023 \cdot n$ dönüşümü yapılarak, aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$M_p = \overline{m} \cdot 0.85 \cdot b \cdot h^2 \cdot 1.15 \cdot f_{ck} \tag{8}$$

$$n = \frac{N_d}{b \cdot h \cdot f_{ck}} \quad , \quad m = \frac{M_r}{b \cdot h^2 \cdot f_{ck}} \tag{9}$$

olmak üzere,

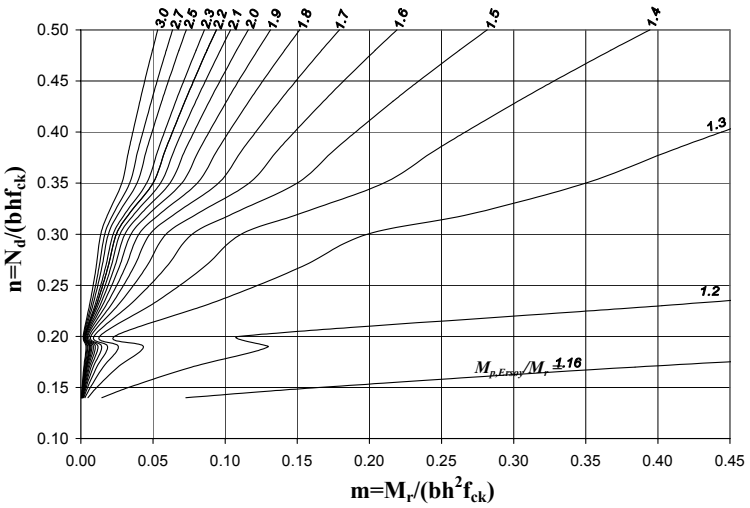
$$\frac{M_p}{M_r} = \beta_1 + \frac{\beta_2}{m} \tag{10}$$

(10) bağıntısında; β_1 ve β_2 eksenel yük seviyesine göre değişen katsayılar, M_r, kolon taşıma gücü momenti, m kolon boyutsuz taşıma gücü momentini göstermektedir. (10) bağıntısındaki β_1 ve β_2 katsayılarının eksenel yük seviyelerine göre değişimleri Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. β_1 ve β_2 katsayılarının eksenel yük seviyesine göre değişimleri

Koşul	β_1	β_2
$n<0.2$	1.15	$0.58n^2 - 0.076n$
$0.2 \le n \le 0.3$	1.173	$0.52n - 0.59n^2 - 0.08$
$0.3 < n < 0.34$	1.173	$0.62n - 0.34n^2 - 0.13$
$0.34 \le n \le 0.5$	1.16	$0.10n + 0.24n^2 - 0.013$

Şekil 10 ′da, kolon boyuna donatı düzeni ve z_s/h oranından bağımsız, tüm dikdörtgen kesitli simetrik donatılı betonarme kolonlarda eksenel yükün $0.15bhf_{ck}$ ~ $0.5bhf_{ck}$ aralığı için (10) bağıntıları yardımıyla hesaplanmış, boyutsuz eksenel yük ve boyutsuz taşıma gücü momentine göre değişen $M_{p,Ersoy}/M_r$ oranlarını gösteren dağılımlar görülmektedir.



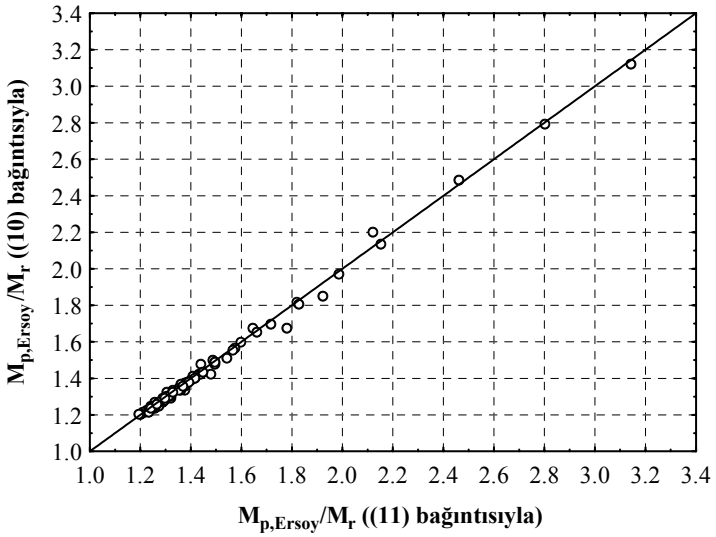
Şekil 10. Dikdörtgen kesitli kolonlarda, boyutsuz eksenel yük ve taşıma gücü momentine göre (10)bağıntısı ile belirlenmiş $M_{p,Ersoy}/M_r$ oranı dağılımları

Şekil 5'de verilmiş karşılaştırmalardan da görüleceği üzere, $1.4M_r$ yaklaşımı küçük eksenel yük düzeyleri için genelde iyi sonuçlar vermektedir. Eksenel yük seviyesinin artması durumlarında ise söz konusu yaklaşımla belirlenen kapasiteler, gerçek kapasitenin altında kalmaktadır. Bu bölgelerde, Ersoy tarafından önerilen yöntemle bulunan moment kapasiteleri, gerçek kapasiteye daha yakın sonuçlar vermektedir. Bu bağlamda, eksenel yük seviyesinin yaklaşık olarak 0.25'in altında olması durumunda $1.4M_r$ yaklaşımı, 0.25 ve üzerinde olması durumunda ise Ersoy'un önerisi esas alınabilir.

(10) bağıntısında kullanılan katsayılar, eksenel yük seviyesine göre değişim göstermektedir. Bununla birlikte, söz konusu katsayılar eksenel yük seviyesinin 0.25 ve üzerinde olması durumları için (10) bağıntısına benzer bir formda, tek bir bağıntı ile de ifade edilebilir. Bu amaçla Statistica programı [23] yardımı ile (11) bağıntısı elde edilmiştir.

$$\frac{M_p}{M_r} = 1.16 + \frac{0.34 \cdot n - 0.07}{m} \tag{11}$$

Boyutsuz eksenel yük düzeyinin 0.25 ve üzerinde olması durumunda (11) bağıntısı ile elde edilen $M_{p,Ersoy}/M_r$ oranları ile (10) bağıntısından elde edilen oranların karşılaştırmaları Şekil 11'de verilmiştir. (11) bağıntısının korelasyon katsayısı 0.998 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 11. n≥0.25 durumu için (10) ve (11) bağıntıları ile elde edilen $M_{p,Ersoy}/M_r$ oranlarının karşılaştırılması

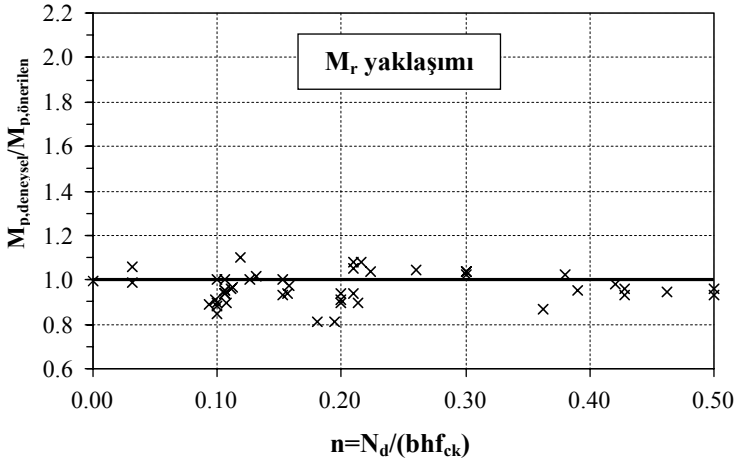
Bu noktadan hareketle, kolon moment kapasitesi, M_p (12) bağıntısı yardımıyla belirlenebilir. (12) bağıntısındaki β katsayısı için eksenel yük seviyesine göre alınması gereken değerler Çizelge 4'de verilmiştir.

$$\frac{M_p}{M_r} = 1.4 + \frac{\beta}{m} \tag{12}$$

Çizelge 4. β katsayısının eksenel yük seviyesine göre değişimi

Koşul	**β**
n<0.25	0
0.25 ≤ n ≤ 0.5	(0.34n - 0.24m - 0.07) ≥ 0

Çizelge 2'de özellikleri verilmiş olan deney elemanlarının, deney sonucu elde edilen maksimum kesme kuvveti (base shear) yardımıyla belirlenen moment kapasitelerinin ($M_{p,deneysel}=V_{maks}L$), (12) bağıntısı ile belirlenmiş olan moment kapasiteleri ile karşılaştırılmaları Şekil 12'de verilmiştir.

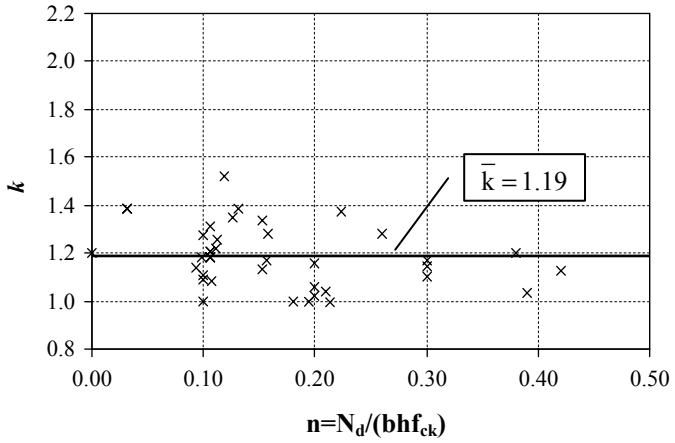


Şekil 12. Önerilen M_p moment kapasitelerinin (M_r yaklaşımı) deney sonuçlarıyla karşılaştırılması

Kolon moment kapasitesinin belirlenmesi için önerilecek ikinci yöntemde, Ersoy'un önerdiği yönteme benzer bir yaklaşım kullanılacaktır. Şekil 7'den de görüldüğü gibi, eksenel yük seviyesinin artan değerlerinde sargı etkisi nedeni ile artan beton basınç

dayanımının ve eksenel yük seviyesinin azalan değerlerinde pekleşme etkisi ile oluşabilecek dayanım artışının moment kapasitesi üzerindeki etkilerinin dikkate alınması gerektiği söylenebilir. Bu bağlamda, donatıdaki pekleşme etkisinin donatının akma dayanımının arttırılmasıyla dikkate alınması düşünülmüş, bunun için deneysel moment kapasitelerinden yararlanılmıştır. Hesaplarda kullanılacak sargılı beton dayanımı, Ersoy'un önerdiği gibi $1.15f_{ck}$ alınabilir. Donatı pekleşme etkisi ile oluşabilecek dayanım artışının belirlenmesinde ise yukarıda verilmiş olan deneysel moment kapasitelerinden yararlanılacaktır.

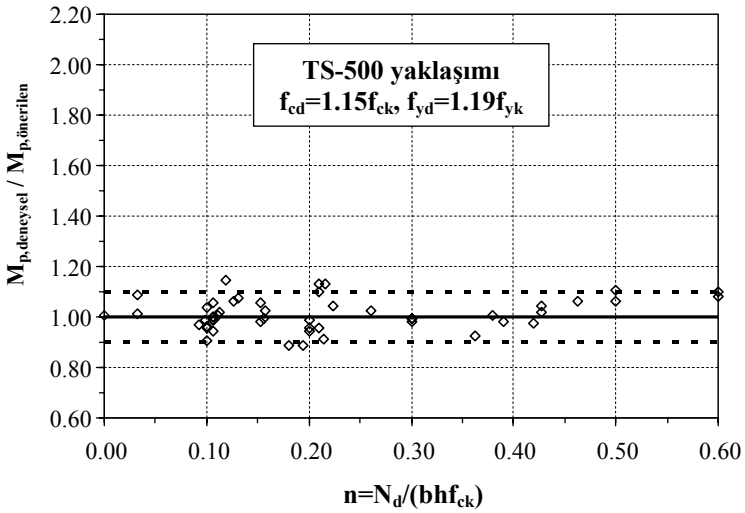
Şekil 13'de, Çizelge 2'de özellikleri verilmiş olan deney elemanlarının deneysel moment kapasiteleri, beton hesap dayanımı $1.15f_{ck}$, çelik hesap dananımı kf_{yk} alınarak hesaplanan taşıma gücü momentlerine eşitlenerek (TS-500 yaklaşımı) belirlenmiş olan k katsayıları görülmektedir. Çizelge 2'de özellikleri verilmiş olan deney elemanlarında, akma ve kopma dayanımları arasındaki oranların (f_{su}/f_{yk}) ortalaması 1.42 dir. Önerilen bu yaklaşık yöntemde donatı akma dayanımı artım miktarı (k), Şekil 13'de verilmiş olan değerlerin ortalaması olan 1.19'a eşit alınmıştır. Bilindiği üzere, kesit hesabında esas alınan tasarım değişkenlerinin tarafsız eksen derinliğini arttırıcı yönde değişimleri, donatı çeliğinde gerçekleşmesi durumunda- gerilme artışına neden olan pekleşme etkisinin azalıp ortadan kalkmasına neden olur. Betonarme kolonlarda sözü edilen tasarım değişkenlerinin en önemlisi eksenel yük düzeyidir. Benzer eğilim aşağıda verilmiş olan k katsayılarında da görülebilir. Şekil 13'den de görüleceği üzere, bazı deney elemanları için k katsayıları belirlenememektedir. Bu durum, eksenel yük seviyesinin artmasıyla donatı akma dayanımını arttırmanın moment kapasitesi üzerine etkisinin giderek azalarak, ortadan kalkmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 13. k katsayılarının kolon eksenel yük düzeyine göre değişimleri

Şekil 14'de, Çizelge 2'de özellikleri verilmiş olan deney elemanlarının moment kapasitelerinin ($M_{p,deneysel}=V_{maks}L$), TS-500'deki varsayımlara göre, $f_{cd}=1.15f_{ck}$ ve $f_{yd}=1.19f_{yk}$ alınarak hesaplanan moment kapasiteleri ile karşılaştırmaları %10 hata bandı ile

verilmiştir. Görüldüğü gibi söz konusu yaklaşım ile elde edilen sonuçlar, tüm eksenel yük seviyelerinde deneysel sonuçlara yakındır. Hata oranı genelde %10'un altındadır.



Şekil 14. Önerilen M_p moment kapasitelerinin ($1.15f_{ck}$ ve $1.19f_{yk}$ esas alınarak TS-500 yaklaşımı) deney sonuçlarıyla karşılaştırılması

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, dikdörtgen kesitli betonarme kolonlarda, değişik eksenel yük düzeylerine göre M_p eğilme momenti kapasitesinin gerçeğe yakın ve pratik hesaplanmasına ilişkin iki yöntem önerilmiştir. Önerilen birinci yöntemde kolon moment kapasitesi taşıma gücü momenti ve eksenel yük seviyesinin bir fonksiyonu olarak, ikinci yöntemde ise arttırılmış malzeme hesap dayanımları esas alınarak TS-500'de kabul edilen varsayımlara göre belirlenmiştir.

Kolon moment kapasitesinin belirlenmesine yönelik olarak, mevcut yöntemler ve bu çalışmada önerilen yöntemlerin, literatürdeki deney sonuçları ile karşılaştırılmasından aşağıdaki sonuçlara varılabilir.

- Eksenel yük seviyesinin 0 ~ $0.6bhf_{ck}$ aralığında olması durumunda $M_{p,deneysel}/M_r$ oranları 1.13 ~ 2.93 arasında değişmektedir. Eksenel yük seviyesinin yukarıda verilen aralığın üzerine çıkması durumunda ise, söz konusu oranlardaki artış miktarı oldukça büyümektedir. Bu bakış açısıyla, özellikle eksenel yük seviyesinin büyük olduğu kolonlarda, $1.4M_r$ yaklaşımıyla elde edilen uç kesme kuvveti değerleri, sünek olarak taşıma gücüne ulaşılması için esas alınması gereken kesme kuvveti değerinin oldukça altında kalmaktadır.
- Eksenel yük seviyesinin yukarıda verilmiş olan aralığı için $M_{p,deneysel}/M_{p,Ersoy}$ oranları 0.93 ~ 1.26 aralığında değişmektedir. Özellikle boyutsuz eksenel yük seviyesinin 0.25'in

altında olması durumlarında, anılan oranlardaki hata miktarlarının arttığı ve %26'ya varan oranlarda gerçek kapasitenin altında değerler verebildiği görülmüştür.

- Kolon M_p moment kapasitesi, arttırılmış hesap dayanımlarına göre, karşılıklı etkileşim diyagramlarının analitik ifadeleri yardımıyla, taşıma gücü momenti (M_r) ve eksenel yük seviyesinin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Söz konusu yaklaşımla türetilmiş (12) bağıntısı yardımıyla belirlenen moment kapasitelerinin, gerçek kapasitelere yakın değerler verdiği gözlenmiştir.
- Eğilme ve eksenel basınç altındaki kolonlarda, eksenel yük seviyesinin küçülmesi durumlarında, oluşabilecek pekleşme etkisiyle artan donatı dayanımının, moment kapasitesi üzerindeki etkisi dikkate alınmalıdır. Donatı dayanımındaki kabul edilen artış miktarının moment kapasitesi üzerindeki etkisi, eksenel yük seviyesinin artması ile gittikçe azalarak ortadan kalkmaktadır.
- Ayrıca kolon M_p moment kapasitesi, TS-500'de verilen taşıma gücü yönteminde malzeme hesap dayanımları yerine artırılmış dayanımlar ($f_{cd}=1.15f_{ck}$ ve $f_{yd}=1.19f_{yk}$) alınarak da hesaplanabilir. Bu tür bir yaklaşımla belirlenen kapasitelerin, göz önüne alınan tüm eksenel yük seviyeleri için gerçek kapasitelere oldukça yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir.
- Ülkemizde tersi durumlar yaygın olsa da, beton ve çelik dayanımları için esas alınan karakteristik malzeme dayanımları, altına düşülme olasılığı belirli bir düzeyde (genelde %10) olan dayanımları simgeler. Bir başka anlatımla, yerindeki malzeme dayanım değerlerinin, hesaplarda esas alınan karakteristik değerlerin üzerinde olma olasılığı %90'dır. Bu bakış açısıyla, kapasite tasarımı gereği belirlenmesi gereken tasarım kesme kuvvetinin hesabında, malzeme dayanımları ve kesit boyutlarının doğasından kaynaklanan belirsizliklerin göz önüne alınarak, aşılma olasılığı belirli bir düzeyde olan M_p moment kapasitesinin belirlenmesi için istatistiksel yaklaşımlar içeren çalışmalar yapılmalıdır.

Semboller

b : Kesitin eğilme doğrultusuna dik boyutu

f_c : Malzeme katsayılarının değişmesi durumunda hesapta kullanılacak beton dayanımı

f_{cc} : Sargılı beton basınç dayanımı

f_{cd} : Beton hesap basınç dayanımı

f_{ck} : Karakteristik beton basınç dayanımı

f_{ctk} : Karakteristik beton çekme dayanımı

f_{yd} : Boyuna donatının hesap akma dayanımı

f_{yk} : Boyuna donatının karakteristik akma dayanımı

f_{ywk} : Enine donatının karakteristik akma dayanımı

f_{su} : Donatı çeliği kopma dayanımı

h : Kesitin eğilme doğrultusundaki boyutu

k : Pekleşme etkisi ile artan boyuna donatı dayanımı ile akma dayanımı arasındaki oran

k_1 : Boyuna donatı düzenindeki farklılıkları yansıtan katsayı

k_2 : Paspayı farklılıklarını yansıtan katsayı

L : Kolon deney elemanlarının serbest yüksekliği

ℓ_n : Kolonun kirişler arasında kalan serbest yüksekliği

m : Boyutsuz taşıma gücü momenti

M : Eğilme momenti

M_n : Karakteristik taşıma gücü momenti

M_p : Eğilme momenti kapasitesi (Pekleşmeli eğilme momenti kapasitesi)

M_{pa} : Kolon alt ucu en büyük eğilme momenti kapasitesi

$M_{pü}$: Kolon üst ucu en büyük eğilme momenti kapasitesi

$M_{p,Ersoy}$: Malzeme hesap dayanımları $1.15f_{ck}$ ve f_{yk} alınarak TS-500'de verilen taşıma gücü yöntemine göre hesaplanan kolon moment kapasitesi

M_r : Taşıma gücü momenti

n : Boyutsuz eksenel yük seviyesi

N : Eksenel yük

N_d : Hesap eksenel yükü

s : Enine donatı aralığı

V_e : Kolon uç bölgelerinde enine donatı hesabında esas alınacak kesme kuvveti

V_{maks} : Kolon deney elemanlarının maksimum net kesme kuvveti (base shear)

ε_{cu} : Sargısız betonun maksimum birim kısalması

ε_{sh} : Donatı çeliği pekleşme başlangıç birim şekil değiştirmesi

ε_{su} : Donatı çeliği kopma birim şekil değiştirmesi

ϕ : Eğrilik

Ø : Donatı çapı

γ_c : Beton hesap basınç dayanımının belirlenmesinde kullanılan malzeme katsayısı

γ_s : Donatı çeliği hesap dayanımının belirlenmesinde kullanılan malzeme katsayısı

λ : Kesitteki ara donatı miktarının toplam donatı miktarına oranı

ρ_t : Toplam boyuna donatı yüzdesi

ω_t : Toplam boyuna donatı mekanik indeksi

Kaynaklar

[1] Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, TS-500, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.

[2] Building Codes Requirements for Reinforced Concrete, ACI-318-02, American Concrete Institute, Detroit, 2002.

[3] Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, Ağustos 1997.

[4] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, Mart 2007.

[5] Aydemir, C., Simetrik Donatılı Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kolonların Pekleşmeli Eğilme Momentlerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004

[6] Ersoy, U., Betonarme Kiriş ve Kolonların Moment Kapasitelerinin Saptanması, İMO Teknik Dergi, 1998, Cilt 9, Sayı 4, Sayfa 1781-1797.

[7] Gill, Wayne Douglas., Park, R., and Priestley, M.J.N., Ductility of Rectangular Reinforced Concrete Columns With Axial Load, Report 79-1, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand,February 1979.

[8] Ang Beng G., Priestley, M.J.N., and Park, R., Ductility of Reinforced Bridge Piers Under Seismic Loading, Report 81-3, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, February 1981.

[9] Soesianawati, M.T., Park, R., and Priestley, M.J.N., Limited Ductility Design of Reinforced Concrete Columns, Report 86-10, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, March 1986.

[10] Park, R., and Paulay, T., Use of Interlocking Spirals for Transverse Reinforcement in Bridge Columns. Strength and Ductility of Concrete Substructures of Bridges, RRU (Road Research Unit) Bulletin 84, Vol. 1, 1990, pp. 77-92.

[11] Tanaka H., and Park R., Effect of lateral confining reinforcement on the ductile behavior of reinforced concrete columns. Report 90-2, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, June 1990, 458 pages.

[12] Kanda M, Shirai N, Adachi H, and Sato T., Analytical study on elasto-plastic hysteretic behaviors of reinforced concrete members. Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol.10, 1988, pp. 257-264.

[13] Atalay MB, and Penzien J., The seismic behavior of critical regions of reinforced concrete components as ınfluenced by moment, shear and axial force. Report No. EERC 75-19, University of California, Berkeley, December 1975, 226 pages.

[14] Saatcioglu M, Özcebe G. Response of reinforced concrete columns to simulated seismic loading. American Concrete Institute, ACI Structural Journal, January - February, 1989, pp. 3-12.

[15] Mo, Y.L., and Wang, S.J., Seismic Behavior of RC Columns with Various Tie Configurations. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 126 No.10, October, 2000, pp. 1122-1130.

[16] Ohno, Tomonori, and Nishioka, Takashi, An Experimental Study on Energy Absorption Capacity of Columns in Reinforced Concrete Structures. Proceedings of the JSCE, Structural Engineering/Earthquake Engineering, Vol. 1, No 2., October 1984, pp. 137-147.

[17] Zahn FA, Park R, and Priestley MJN. Design of reinforced bridge columns for strength and ductility. Report 86-7, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, March 1986, 330 pages.

[18] Watson, S., and Park, R., Design of Reinforced Concrete Frames of Limited Ductility, Report 89-4, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, January 1989, 232 pages.

[19] Saatcioglu, M., and Grira, M., Confinement of Reinforced Concrete Columns with Welded Reinforcement Grids, American Concrete Institute, ACI Structural Journal, Vol. 96, No. 1, January-February 1999, pp. 29-39.

[20] Matamoros, A.B., Study of Drift Limits for High-Strength Concrete Columns, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, Oct 1999.

[21] Kono, Susumu, and Watanabe, Fumio, Damage Evaluation of Reinforced Concrete Columns Under Multiaxial Cyclic Loadings, The Second U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinfoced Concrete Building Structures, Sap, 2002.

[22] Çakıroğlu, A., ve Özer, E., Dikdörtgen ve Daire Betonarme Kesitlerde Taşıma Gücü Formülleri ve Yaklaşık Mertebeleri, İMO Teknik Dergi, 1990, Cilt 1 , Sayı 1, Sayfa 25-48.

[23] StatSoft Inc. STATISTICA V.6.0 for Windows. Tulsa, OK, USA;1995.