

## Ötelemesi Önlenmiş Çok Katlı Yapılarda Kolon Burkulma Boyları

Konuralp GİRGİN\*  
Günay ÖZMEN\*\*

### ÖZ

Yapı tasarımı ile ilgili çeşitli yönetmeliklerde, çerçeve kolonlarının burkulma boylarının hesabı için, basitleştirilmiş formül, abak veya nomogramlar verilmiştir. Bu basitleştirilmiş yaklaşımların bazı durumlarda oldukça hatalı sonuçlar verebildikleri gözlenmektedir. Bu hatalar yönetmelik yaklaşımlarının sadece yerel rijitlik dağılımlarını göz önüne almalarından ve çerçeve genel davranışını ihmal etmelerinden kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada, ötelemesi önlenmiş çok katlı yapılarda çerçeve kolonlarının burkulma boylarını yaklaşık olarak tayin etmek amacıyla basitleştirilmiş bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde yönetmeliklerden elde edilen katsayılar kullanılmakta ve basit bir ortalama hesabı ile, % 10'dan az yani pratik amaçlar için yeterli sayılabilecek oranda hatalı sonuçlar elde edilmektedir. Önerilen yöntem çeşitli sayısal örneklere uygulanmış ve tüm hataların kabul edilebilir oldukları gösterilmiştir.

### ABSTRACT

#### Effective Lengths of Columns in Braced Multi-Storey Frames

In several design codes and specifications, simplified formulae, diagrams or nomographs are given for determining the effective lengths of frame columns. It is shown that these simplified approaches may yield rather erroneous results in most of the cases. This is due to the fact that, the code formulae utilise only local stiffness distributions, thus ignoring the general behaviour of the system. In this paper, a simplified procedure for determining approximate values for the effective lengths of braced multi-storey frame columns is developed. The procedure utilises a simple average calculation and yields errors less than 10 %, which may be considered satisfactory for practical purposes. The proposed procedure is applied to several numerical examples and it is shown that in all cases errors are in the acceptable range.

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 30.10.2006 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2008 gününe kadar tartışmaya açıktır.

\* İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul - kgirgin@ins.itu.edu.tr

\*\* Bilsar A.Ş., İstanbul - gunayozmen@hotmail.com

## 1. GİRİŞ

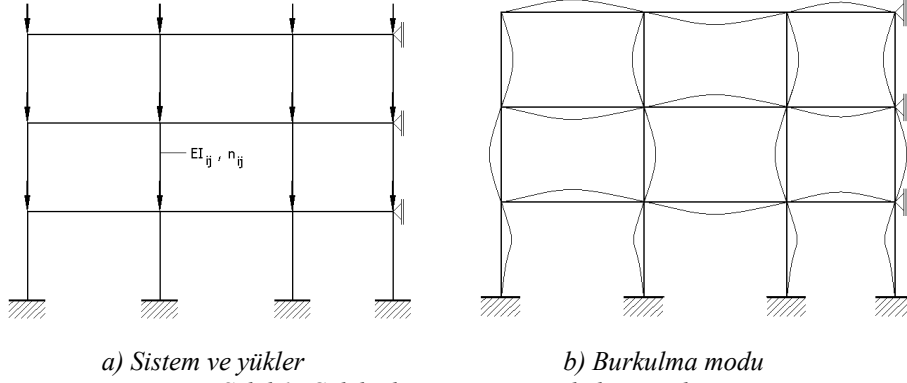
Kolonların burkulma (etkili) boylarının tayini, çerçeve tasarımının önemli aşamalarından biridir. Kuramsal olarak, boyutlandırmada kullanılacak olan burkulma boyları, tüm sistemin burkulma yükü elde edildikten sonra bu değere bağlı olarak hesaplanmalıdır. Tüm sistemin burkulma yükünün hesabı, uzun ve yorucu hesapları veya özel olarak geliştirilmiş yazılımların kullanılmasını gerektirdiğinden, tasarım yönetmeliklerinin çoğunda basitleştirilmiş formül, abak veya nomogramlar verilmiştir. Yurdumuzda kullanılmakta olan TS 648'deki nomogramlar AISC (1988) yönetmeliğinden, TS 500'deki formüller de ACI (1989) yönetmeliğinden alınmış bulunmaktadır, [1], [2], [3], [4]. Bu formül ve nomogramlar orijinal olarak Galambos tarafından geliştirilmiş olan ve "Bağımsız Alt Sistem Yaklaşımı" olarak adlandırılan formülasyona dayanmaktadır. Bu formülasyonda çerçeve kolonları bağımsız olarak ele alınmakta ve burkulma boyu sadece alt ve üst uçlarındaki rijitlik dağılımına bağlı olarak hesaplanmaktadır, [5]. Yaygın olarak kullanılmakta olan diğer bazı yönetmeliklerde de benzer kabullere dayanan formül ve diyagramlar verilmektedir, [6], [7]. Bağımsız alt sistem yaklaşımının önemli kusuru, kolonun burkulma boyunun hesabında iki uçlarındaki çubukların dışındaki çubukların etkileşiminin hiç hesaba katılmamasıdır. Helleland ve Bjorhovde bu yaklaşımın bazı durumlarda önemli oranda hatalara neden olabileceğini göstermişlerdir, [8]. Alt sistem yaklaşımının verdiği sonuçları düzeltmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmış bulunmaktadır, [9] ~ [21]. Bunların büyük çoğunluğu öteleme önlenmemiş çerçeveler için geliştirilmiş bulunmaktadır. Öteleme önlenmiş çerçeveler için yapılmış olan kısıtlı sayıdaki araştırmalarda da yönetmelik sonuçlarını düzeltmeye yönelik yöntemler geliştirilmiş bulunmaktadır. Aristizabal-Ochoa ve Cheong-Siat-Moy genel formülasyonlar geliştirerek, öteleme önlenmiş ve önlenmemiş çerçevelerle birlikte, öteleme "kısmen önlenmiş" çerçeveler için de çözümler üretmişlerdir, [16], [17]. Bir başka ilginç yaklaşım da Helleland ve Bjorhovde tarafından geliştirilen ve burkulma boylarının ağırlıklı ortalamalar kullanılarak düzeltilmesini öngören bir yöntemdir, [20]. Bu yaklaşım da genel olarak az hatalı fakat güvensiz yönde sonuçlar vermekte ve daha geniş kapsamlı modeller üzerinde sayısal uygulamalar yapılarak geçerliliğinin kanıtlanması gerektiği belirtilmektedir. Mahini ve Seyyedian tarafından geliştirilmiş olan yöntemde ise, kritik elemanların saptanmasına dayanan bir ardışık yaklaşım düzeni kullanılmaktadır, [22].

Yönetmeliklerdeki son gelişmelerde ise, "Bağımsız Alt Sistem Yaklaşımı"ndan vazgeçilmesi eğilimi ağırlık kazanmaktadır. Nitekim AISC (1999) yönetmeliğinde, bu yaklaşım terk edilmiş ve burkulma boylarının "yapısal analiz" yardımı ile tayin edilmesi gerektiği belirtilmiştir, [23]. Ancak, hala yaygın olarak kullanılmakta olan bazı yönetmeliklerde bağımsız alt sistem yaklaşımının benimsenmesine devam edildiği gözlenmektedir, [1], [7], [24].

Bu çalışmada, ötelenmesi önlenmiş çok katlı çerçeveler için, geniş kapsamlı uygulama olanakları içeren ve hata oranı kabul edilebilir mertebede olan pratik bir yöntem geliştirilmiş bulunmaktadır. Bu yöntem, yönetmeliklerden elde edilen sonuçlar kullanılarak tüm sistemin burkulma yükünü basit bir ortalama yardımı ile hesaplama esasına dayanmaktadır.

## 2. ÖTELENMESİ ÖNLENMİŞ ÇOK KATLI YAPILARIN BURKULMA YÜKLERİ

Lineer elastik malzemeden yapılmış kolon ve kirişlerden oluşan ve düşey yüklerin etkisi altında bulunan ötelenmesi önlenmiş çok katlı bir çerçeve Şekil 1a'da gösterilmiştir.



Şekil 1: Çok katlı çerçeve ve Burkulma modu

Şekilde gösterilen düşey yükler altında, sistem “Kararlı Denge” konumundadır ve uzama şekil değiştirmeleri ihmal edilirse, tüm şekil değiştirmeler ve yerdeğiştirmeler sıfırdır. Kolon aksenal kuvvetleri dışındaki tüm iç kuvvetler de sıfır olmaktadır. Kolon aksenal kuvvetleri

$$N_{ij} = n_{ij}P \quad (1)$$

olarak ifade edilebilir. Burada P gelişigüzel seçilebilen bir yük parametresini,  $n_{ij}$  de boyutsuz bir katsayıyı göstermektedir. Yük parametresi belirli bir  $P_k$  kritik değerine eriştiğinde bir başka “Kararsız Denge” konumu oluşur. Bu yeni konumda ortaya çıkan ve Şekil 1b’de şematik olarak gösterilen yerdeğiştirme diyagramına “Burkulma Modu” adı verilmektedir.  $P_k$  burkulma yükü parametresi hesaplandıktan sonra herhangi bir kolonun  $h_{k,ij}$  burkulma boyu

$$h_{k,ij} = \pi \sqrt{\frac{EI_{ij}}{n_{ij}P_k}} \quad (2)$$

bağıntısı ile bulunabilir, [25], [26]. Burada  $EI_{ij}$  kolonun eğilme rijitliğini göstermektedir.

Az sayıda çubuğu ve düğüm noktası olan bazı sistemlere ait burkulma yükü parametresi, “Stabilite fonksiyonları”nı veya “İkinci mertebe birim deplasman sabitleri”ni kullanarak hesaplanabilir, [25], [26], [27]. Daha genel (çok çubuklu) sistemler için özel olarak hazırlanmış yazılımları kullanma zorunluluğu vardır, [28]. SAP2000 gibi genel amaçlı yazılımların kullanılması halinde de, burkulma yüklerinin gerçeğe yakın değerlerini elde etmek için, kolonları parçalara bölmek gerekmektedir, [29].

### Ötelenmesi Önlenmiş Çok Katlı Yapılarda Kolon Burkulma Boyları

Bu çalışmada burkulma yüklerinin yaklaşık olarak tayini için geliştirilmiş olan pratik bir yöntemin ana hatları açıklanacak sayısal örnekler üzerinde uygulaması yapılacaktır. Bu yöntem, yönetmeliklerden bulunan burkulma boylarını kullanarak sistemin yaklaşık burkulma yükünün basit bir ortalama ile elde edilmesine dayanmaktadır.

### 3. YÖNETMELİKLERE GÖRE BURKULMA BOYLARI

Birçok yönetmelikte çerçeve kolonlarının burkulma boylarının hesabı için, basitleştirilmiş formül, abak veya nomogramlar verilmiştir. Böylece tasarımcıların gerçek burkulma boylarının hesabı için gereken uzun ve yorucu hesaplardan (veya özel yazılımlara başvurmadan) kurtarılması amaçlanmaktadır. Bu bölümde yurdumuzda geçerli olan TS 648 “Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları”ndaki hesap esasları özetlenecektir.

Bu yönetmeliğin “3.2 – Merkezi Basınca Çalışan Çubuklar” bölümünde belirtildiğine göre önce, kolonların her iki ucunda “Dağıtma katsayıları” adı verilen

$$G = \frac{\sum \frac{I_c}{h_c}}{\sum \frac{I_g}{L_g}} \quad (3)$$

katsayıları hesaplanmaktadır. Burada

- $I_c$  : Kolon atalet momentini,
- $h_c$  : Kolon boyunu,
- $I_g$  : Kiriş atalet momentini,
- $L_g$  : Kiriş açıklığını

göstermektedir. Kolonun her iki ucundaki  $G_A$  ve  $G_B$  değerleri (3) formülüne göre hesaplandıktan sonra

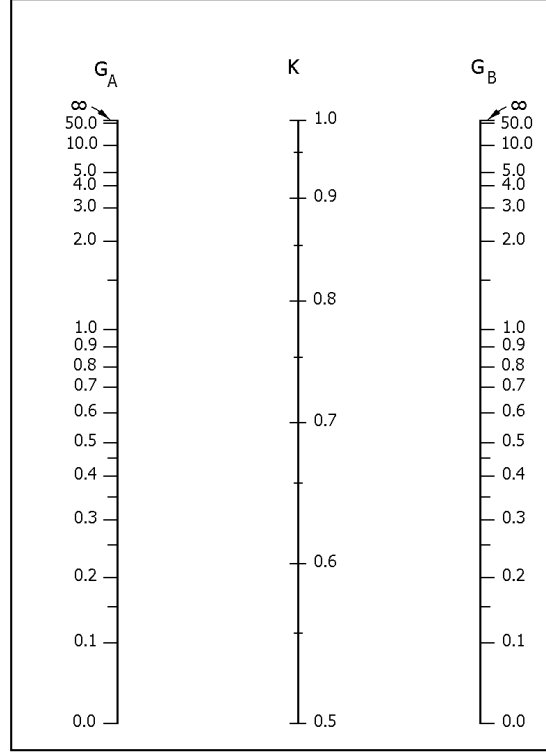
$$f(x) = \frac{G_A G_B}{4} x^2 + \frac{G_A + G_B}{2} \left( 1 - \frac{x}{\tan x} \right) + \frac{\tan x}{x} = 0 \quad (4)$$

Galambos denklemini sağlayan  $x$  değişkeninin hesaplanması gerekmektedir, [5]. Daha sonra

$$K = \frac{\pi}{x} \quad (5)$$

$$h_k = K h_c \quad (6)$$

formülleri ile  $h_k$  kolon burkulma boyu hesaplanır. TS 648’de, (4) denkleminin çözülmesi işleminden kurtulmak amacı ile, ötelenmesi önlenmiş ve önlenmemiş çerçeveler için nomogramlar verilmiştir. Ötelenmesi önlenmemiş çerçeve kolonları bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır. Ötelenmesi önlenmiş çerçeveler için verilmiş olan nomogram Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2: Ötelemesi önlenmiş çerçeveler için nomogram

Böylece  $K$  değerleri, trigonometrik denklem çözmeye gerek kalmadan,  $G_A$  ve  $G_B$  değerlerine bağlı olarak bu nomogramdan alınabilmektedir.

Önceleri TS 500'de de kullanılmakta olan bu nomogram, sonradan kaldırılmış ve yaklaşık  $K$  değerlerinin hesabı için aşağıdaki formüller verilmiştir.

$$K=0.7+0.05(G_A+G_B) \leq 0.85+0.05G_{\min} \leq 1.0 \quad (7)$$

Betonarme sistemlerde atalet momentlerinin hesabı, çatlama kesitler kullanılarak yapılmaktadır.

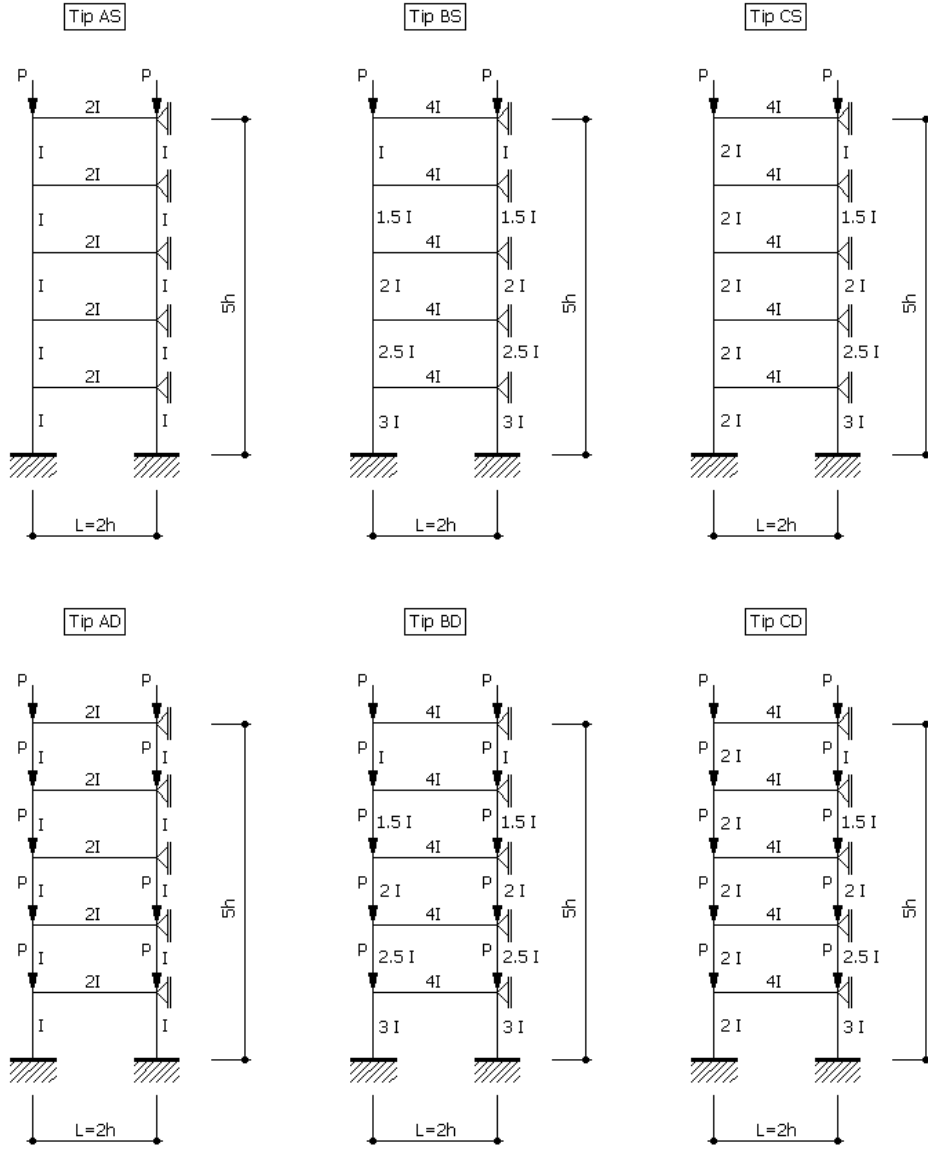
Eurocode 3 (DIN 18800)'de dağıtma katsayıları biraz değişik bir biçimde hesaplanmakta ve  $K$  katsayılarının tayini için abaklar verilmiş bulunmaktadır. Burada bu yönetmelikteki ayrıntılar gösterilmemiştir.

Burada göz önüne alınan tüm yönetmeliklerde,  $K$  değerleri 0.5 ~ 1.0 arasında değişmektedir. Ancak, Bridge ve Fraser bazı durumlarda  $K$  değerinin 1.0'den büyük olabileceğini göstermişlerdir, [11]. Aşağıda nomogramlar (veya formüller veya abaklar) ile elde edilen  $K$  değerlerinin ne kadar hatalı sonuçlar verebildiği, sayısal örnekler üzerinde gösterilecektir.

## Ötelenmesi Önlenmiş Çok Katlı Yapılarda Kolon Burkulma Boyları

### 3.1 Tipik Örnekler

Yönetmeliklerde verilen abak, formül ve nomogramları sistematik olarak sınamak amacı ile, Şekil 3'te gösterilen altı adet tipik örnek seçilmiştir.



Şekil 3: Tipik örneklerin şematik kesitleri ve yüklemeleri

Tüm tipik örneklerin kesin burkulma yükleri özel bir yazılım kullanılarak elde edilmiştir. Bu yazılımda aksel kuvvetlerin katkıları göz önünde tutularak sistem çubuklarının II. Mertebe rijitlik matrisleri hesaplanmakta ve determinant kriteri kullanılıp bir ardışık yaklaşım düzeni uygulanmaktadır, [28]. Buna göre göz önüne alınan sistemlerin kesin burkulma yükü değerleri

$$P_k = C_k \frac{EI}{h^2} \quad (8)$$

olarak ifade edilebilmektedir. Tipik örnekler için elde edilmiş olan  $C_k$  katsayıları Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1: Tipik örnekler için kesin burkulma yükü katsayıları

Tip	$C_k$
AS	14.39
AD	4.22
BS	21.34
BD	9.92
CS	23.64
CD	8.98

Bu değerler kullanılarak K burkulma boyu katsayılarının kesin değerleri, (2) formülü ile hesaplanabilir. Aşağıdaki karşılaştırmalarda kesin K katsayıları bu biçimde hesaplanmıştır.

### 3.2 Yönetmeliklere Göre Tipik Örnek Kolonlarının Burkulma Boyları

Bu bölümde tipik örnekler için kolonların burkulma boyları çeşitli yönetmeliklere göre hesaplanacak ve kesin değerlerle karşılaştırılarak hata oranları saptanacaktır. İlk olarak Şekil 3'te gösterilen Tip AS çerçevesi ele alınmış ve TS648'de verilen nomogram kullanılarak, her kat için K burkulma boyu katsayıları hesaplanmış ve Çizelge 2'nin 3. kolonunda gösterilmiştir. Bu örnek için kesin K katsayıları ile görel hata oranları da aynı çizelgenin diğer kolonlarında gösterilmiş bulunmaktadır.

Çizelge 2: Tip AS için burkulma boyu katsayıları

Kat	n	K (TS 648)	K (Kesin)	Görel Hata (%)
5	1.00	0.813	0.828	-1.8
4	1.00	0.855	0.828	3.3
3	1.00	0.855	0.828	3.3
2	1.00	0.855	0.828	3.3
1	1.00	0.656	0.828	-20.8

### Ötelenmesi Önlenmiş Çok Katlı Yapılarda Kolon Burkulma Boyları

Seçilebilecek en düzenli örnek olarak nitelendirilebilen bu örnek için hata oranlarının pek yüksek olmadığı görülmektedir. Ancak bu örnekte bile en alt kat için, önemli oranda ve güvensiz yönde hatalı sonuç elde edilmiş olması ilgi çekicidir.

Tüm tipik örnekler aynı biçimde çözülmüş ve kesin sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, tüm tipik örnekler, TS 500’de verilen formüller ve Eurocode 3 (DIN 18800)’de verilen abaklar yardımı ile de çözülmüştür. Tüm yönetmelikler için tipik örnek kolonlarında elde edilen görelî hatalar Çizelge 3’te özetlenmiştir.

Çizelge 3: Burkulma boyu çarpanları için görelî hata sınırları (%)

Tip	Yönetmelik		
	TS 648 (AISC)	TS 500 (ACI)	Eurocode 3 (DIN 18800)
AS	-20.8 ~ 3.3	-3.4 ~ 2.6	-29.6 ~ -11.0
AD	-35.0 ~ 36.7	-32.1 ~ 43.8	-51.8 ~ -3.6
BS	-43.5 ~ 9.0	-28.9 ~ 15.8	-48.6 ~ -1.2
BD	-25.7 ~ 4.9	-21.0 ~ 20.5	-32.6 ~ -2.6
CS	-40.5 ~ 14.7	-25.2 ~ 21.9	-45.9 ~ 5.6
CD	-45.1 ~ 36.7	-42.7 ~ 21.4	-51.4 ~ 0.3
Sınırlar	-45.1 ~ 36.7	-42.7 ~ 43.8	-51.8 ~ 5.6

Göz önüne alınan tüm yönetmeliklerin belirli kolonları için benzer mertebede hatalı sonuçlar elde edildiği açıkça görülmektedir. Bunun nedeni bu yönetmeliklerin tümündeki formülasyonun, sadece yerel rijitlik dağılımını göz önüne alan bağımsız alt sistem yaklaşımına dayanmasıdır. Oysa çeşitli sayısal örnekler üzerinde yapılan incelemeler, burkulma boylarının yerel rijitlik dağılımı ile birlikte

- Eksenel kuvvet dağılımı,
- Kat kolon ve kirişlerinin rijitlik dağılımı,
- Göz önüne alınan kolonun çerçeve içindeki konumu

gibi çeşitli faktörlere de bağlı olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, burkulma boylarının tayini için sadece yerel rijitlik dağılımının değil, çerçevenin tümüne ait karakteristiklerin göz önüne alınmasının gerekli olduğu söylenebilir. Aşağıda, yaklaşık da olsa, bu karakteristiklerin tümünü göz önüne alan bir yöntemin ana hatları ve uygulaması açıklanacaktır.

#### 4. BASİT BİR DÜZELTME YÖNTEMİ

(2) denklemini yardımı ile, herhangi bir kolon için yaklaşık burkulma yükü

$$P_k \cong \frac{\pi^2 EI}{h_k^2 n} \quad (9)$$



biçiminde ifade edilebilir. Burada basitliği sağlamak amacı ile,  $ij$  indisleri gösterilmemiştir.  $h_k$  yerine (6) denklemindeki ifadesi konursa, yaklaşık burkulma yükü değeri için

$$P_k \cong \frac{\pi^2 EI}{K^2 h_c^2 n} \quad (10)$$

formülü elde edilir. Yönetmeliklere göre yapılan hesaplarda  $K$  değerleri hatalı olduğundan, (10) formülü ile elde edilen yaklaşık burkulma yükü değerleri, hem her kolon için birbirinden farklı, hem de oldukça yüksek oranda hatalı sonuçlar vermektedir. Ancak, çeşitli örnekler üzerinde yapılan incelemeler, kolonlar için ayrı ayrı hesaplanan  $P_k$  değerlerinin ortalamasının gerçeğe oldukça yakın olduğunu göstermiştir. Ortalama hesabı yapılırken kolonlara ait  $n$  parametrelerinin ağırlık olarak kullanılması sonuçları daha da iyileştirmektedir. Yani tüm çerçeveye ait yaklaşık burkulma yükünün

$$P_k \cong \pi^2 E \frac{\sum_{\text{Kolonlar}} \frac{I}{K^2 h_c^2}}{\sum_{\text{Kolonlar}} n} \quad (11)$$

formülü ile hesaplanması uygun olmaktadır. (11) formülü ile yaklaşık  $P_k$  değeri hesaplandıktan sonra, düzeltilmiş  $K$  katsayıları, (2) ve (6) formülleri yardımı ile elde edilen

$$K = \frac{\pi}{h_c} \sqrt{\frac{EI}{nP_k}} \quad (12)$$

formülü kullanılarak hesaplanabilir. Bu yöntemin uygulanması ile, hem  $K$  değerleri bir miktar düzeltilmiş olmakta, hem de  $K$  katsayılarındaki hata oranları tüm çerçeve kolonları için aynı değeri almaktadır. Aşağıda, bu yöntem tipik örneklere uygulanarak elde edilen hata oranları irdelenecektir.

#### 4.1 Tipik Örnek Kolonlarının Düzeltilmiş Burkulma Boyları

Bu bölümde tipik örneklere ait kolonların çeşitli yönetmeliklere göre hesaplanmış olan burkulma boyları düzeltilecek ve kesin değerlerle karşılaştırılarak hata oranları saptanacaktır. İlk olarak Şekil 3'te gösterilen Tip AS çerçevesi ele alınmış ve Çizelge 2'nin 3. kolonundaki  $K$  katsayıları düzeltilmiştir. İlgili hesaplar Çizelge 4 üzerinde gösterilmiştir.

### Ötelenmesi Önlenmiş Çok Katlı Yapılarda Kolon Burkulma Boyları

Çizelge 4: Tip AS için burkulma boyu katsayılarının düzeltilmesi

Kat	K (TS 648)	$\frac{1}{K^2}$	K (Düzeltilmiş)	K (Kesin)	Görelî Hata (%)
5	0.813	1.512	0.794	0.828	-4.2
4	0.855	1.367	0.794	0.828	-4.2
3	0.855	1.367	0.794	0.828	-4.2
2	0.855	1.367	0.794	0.828	-4.2
1	0.656	2.327	0.794	0.828	-4.2
Toplam		7.940			

Bu örnek için, kolonlara ait tüm  $h_c$ , I ve n değerleri aynı olduğundan (11) formülünün uygulanmasında  $\frac{1}{K^2}$  değerlerinin basit ortalamasının alınması yeterlidir. Yani yaklaşık burkulma yükü

$$P_k \cong \pi^2 \frac{7.940}{5} \frac{EI}{h^2} = 15.67 \frac{EI}{h^2}$$

olarak hesaplanmaktadır. Buna göre (12) formülü ile hesaplanan düzeltilmiş K değerleri Çizelge 4'ün 4. kolonunda gösterilmiştir. Bu örnek için kesin K katsayıları ile görelî hata oranları da aynı çizelgenin diğer kolonlarında gösterilmiş bulunmaktadır. Yukarıda belirtildiği gibi, düzeltilmiş K değerlerindeki hatalar tüm kolonlar için aynı (-%4.2) olarak bulunmuştur.

Tüm tipik örneklerdeki K değerleri aynı biçimde düzeltilmiş ve kesin sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, tüm tipik örnekler için, TS 500'de verilen formüller ve Eurocode 3 (DIN 18800)'de verilen abaklar yardımı ile elde edilen K değerleri de düzeltilmiştir. Tüm yönetmelikler için tipik örnek kolonlarında elde edilen görelî hatalar Çizelge 5'te özetlenmiştir.

Çizelge 5: Düzeltilmiş K katsayıları için görelî hata sınırları (%)

Tip	Yönetmelik		
	TS 648 (AISC)	TS 500 (ACI)	Eurocode 3 (DIN 18800)
AS	-4.2	4.7	-15.9
AD	-10.1	-1.9	-21.1
BS	-19.8	-9.5	-28.6
BD	-5.3	6.9	-15.7
CS	-14.4	-4.9	-24.6
CD	-8.6	1.5	-19.5
Sınırlar	-19.8 ~ -4.2	-9.5 ~ 6.9	-28.6 ~ -15.7

Çizelge 5 ile Çizelge 3'teki hata oranlarının karşılaştırılmasından aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir:

- Önerilen düzeltme yöntemi ile K katsayılarındaki aşırı hatalar önemli ölçüde azalmıştır.
- Eurocode 3 için elde edilen hatalar (düzeltmeye karşın) hem oldukça yüksektir hem de tümü negatif (güvensiz) yöndedir.
- Düzeltmeden sonra en iyi sonuçlar TS 500 (ACI) formülleri için elde edilmiş bulunmaktadır. Uygulamada bu formüllerin kullanılması ve daha sonra önerilen biçimde düzeltme yapılması uygun görülmektedir.

#### 4.2 Burkulma Boylarının Düzeltmesinde Kullanılan Diğer Yöntemler

Yukarıda belirtildiği gibi, burkulma boylarının düzeltilmesi için, başka yöntemler de geliştirilmiş bulunmaktadır. Bunlardan en kullanışlı olarak nitelendirilebilecek yöntemler Hellesland-Bjorhovde, [20] ve Mahini-Seyyedean, [22] tarafından geliştirilmiş olanlardır. Tipik örnekler bu yöntemler ile de ayrı ayrı çözülmüş ve elde edilen hata oranları Çizelge 6'da özetlenmiştir.

Çizelge 6: Diğer yöntemler için göreceli hata sınırları (%)

Tip	Hellesland-Bjorhovde	Mahini-Seyyedean
AS	-2.1	9.8
AD	-10.4	7.4
BS	-11.3	15.4
BD	-4.8	2.1
CS	-8.9	21.5
CD	-8.4	10.8
Sınırlar	-11.3 ~ -2.1	2.1 ~ 21.5

Görüldüğü gibi, Hellesland-Bjorhovde yöntemi için hata oranlarının tümü negatif (güvensiz), Mahini-Seyyedean yöntemi için ise, tümü pozitif (güvenli) yöndedir. Bu hata oranları Çizelge 5'tekilerle karşılaştırılırsa, özellikle TS500 katsayıları için elde edilmiş olan hata oranlarının daha düşük olduğu anlaşılır. Üstelik burada önerilen yöntem için toplam hesap hacmi diğerlerine göre daha düşüktür.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada ötelenmesi önlenmiş çok katlı yapı kolonlarının burkulma boylarının hesabı için geliştirilmiş olan basit bir yöntemin ana hatları açıklanmış ve sayısal örnekler üzerinde uygulaması yapılmıştır. Çalışmada elde edilmiş olan başlıca sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Çeşitli yönetmeliklerde çerçeve kolonlarının burkulma boylarının hesabı için verilmiş olan basitleştirilmiş formül, abak ve nomogramların, bazı düzenli yapılar için bile, aşırı hatalı sonuçlar verebildikleri gösterilmiştir. Bunun başlıca nedeni, yönetmeliklerin bağımsız alt sistem yaklaşımını benimsemiş olmaları ve sistemin tümünün davranışını göz önüne almamalarıdır.
2. Yönetmeliklerden elde edilen burkulma boylarının önemli bir bölümü  $-50\%$ 'ye varan oranlarda negatif hata vermektedir. Yani burkulma boyları gerçek boylardan küçük (güvensiz) olarak elde edilmektedir. Bu durumun pratik uygulamalar bakımından çok sakıncalı olduğu açıktır.
3. Burkulma boylarının düzeltilmesi için geliştirilmiş olan basit bir yöntemin ana hatları açıklanmıştır. Yaklaşık burkulma elde edildikten sonra, kolon burkulma boyları kolayca hesaplanabilmektedir.
4. Yönetmeliklerden elde edilen burkulma boyu katsayılarını kullanıp basit bir ağırlıklı ortalama hesaplanarak uygulanan yöntem, özellikle TS500 (ACI) katsayıları için  $\% 10$ 'un altında hatalı sonuçlar vermektedir. Bu hata oranlarının pratik uygulamalar bakımından yeterli olduğu kabul edilebilir.

## Kaynaklar

- [1] TS 648, "Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1980.
- [2] AISC, "Specification for Structural Steel Buildings", American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, 1988.
- [3] TS 500, "Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- [4] ACI 318-89, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete with Design Applications", Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 1989.
- [5] Galambos, T.V., "Structural Members and Frames", Prentice-Hall, Inc., New York, 1968.
- [6] Eurocode 3, "Design of Steel Structures", CEN, Brussels, Belgium, 1992.
- [7] DIN 18800, Part2: "Analysis of Safety Against Buckling of Linear Members and Frames", Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1990.
- [8] Hellesland, J. and Bjorhovde, R., "Restraint demand factors and effective lengths of braced columns", *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 122(10), 1216-1224, 1996.

- [9] Duan, L. and Chen, W.F., “Effective length factors for columns in braced frames”, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 114(10), 2357-2370, 1988.
- [10] Duan, L. and Chen, W.F., “Effective length factors for columns in unbraced frames”, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 115(1), 149-165, 1989.
- [11] Bridge, R.Q. and Fraser, D.J., “Improved G-factor method for evaluating effective lengths of columns”, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 113(6), 1341-1356, 1987.
- [12] Yura, J.A., “Effective length of columns in unbraced frames”, *Engrg. J.*, AISC, 8(2), 37-42, 1971.
- [13] LeMessurier, W.J., “A practical method of second-order analysis, 2: Rigid frames”, *Engrg. J.*, AISC, 14(2), 49-67, 1977.
- [14] White, D.W. and Hajjar, J.F., “Buckling models and stability design of steel frames: A unified approach”, *J. Construct. Steel Res.*, 42(3), 171-207, 1997.
- [15] Lui, E. M., “A novel approach for K factor determination”; *Engrg. J.*, AISC, 29(4), 50-159, 1992.
- [16] Aristizabal-Ochoa, J. D., “Braced, partially braced and unbraced frames: Classical Approach”, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 123(6), 799-807, 1997.
- [17] Cheong-Siat-Moy, F., “An improved K-factor formula”, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 125(2), 169-174, 1999.
- [18] Aristizabal-Ochoa, J. D., “Classic Buckling of three-dimensional multi-column systems under gravity loads”, *J. Engrg. Mechs.*, ASCE, 128(6), 613-624, 2002.
- [19] Aristizabal-Ochoa, J. D., “Elastic stability and second-order analysis of three-dimensional frames: Effects of column orientation”, *J. Engrg. Mechs.*, ASCE, 129(11), 1254-1267, 2003.
- [20] Hellesland, J. and Bjorhovde, R., “Improved frame stability analysis with effective lengths”, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 122(11), 1275-1283, 1997.
- [21] Özmen, G. ve Girgin, K., “Ötelemesi önlenmemiş çok katlı yapılarda kolon burkulma boyları”, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi*, Cilt 16, Sayı 4, Ekim 2005.
- [22] Mahini, M.R. and Seyyedean, H., “Effective length factor for columns in braced frames considering axial forces on restraining members”, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 22, No. 6, 685-700, 2006.
- [23] AISC, “Load and resistance factor design specification for structural steel buildings”, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, 1999.
- [24] Eurocode 3, “Design of steel structures”, Final Draft, CEN, Brussels, Belgium, 2002.
- [25] Horne, M.R., and Merchant, W., “The stability of frames”, Pergamon Press, London, 1965.

*Ötelenmesi Önlenmiş Çok Katlı Yapılarda Kolon Burkulma Boyları*

- [26] Çakıroğlu, A., “Hiperstatik sistemlerin hesap metotları”, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 1984.
- [27] Çakıroğlu, A., Özden, E., Özmen, G., “Yapı sistemlerinin hesabı için matris metotları ve elektronik hesap makinası programları”, Cilt II, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, 1974.
- [28] Girgin, K., “Betonarme yapı sistemlerinde ikinci mertebe limit yükün ve göçme güvenliğinin belirlenmesi için bir yük artımı yöntemi”, (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1996.
- [29] SAP2000, Structural analysis program, CSI, Berkeley, USA (Version 8.2.3).