

# Çelik Yapı Elemanları

GKT/YDKT

Ders Notları

## 6-STABİLİTE TASARIMI

Prof.Dr. Zeki AY  
SDÜ İnş. Müh. Böl.  
Isparta 2019

[www.zekiay.com.tr](http://www.zekiay.com.tr)

## 6-STABİLİTE TASARIMI

### 6.1. GİRİŞ

### 6.2 YAPILARDA DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ

### 6.3 KOLON TEORİSİ

#### 6.3.1 Euler Burkulma Yüğü

#### 6.3.2 Efektif Burkulma Boyu

#### 6.3.3 Burkulma Boyu Katsayısı:

#### 6.3.4 Kritik Burkulma Yüğüleri

### 6.4 STABİLİTE TASARIMI YÖNTEMLERİ

#### 6.4.1 Genel Analiz(**Doğrudan**) Yöntemi İle Tasarım

#### 6.4.2 Burkulma Boyu Yöntemi İle Tasarım

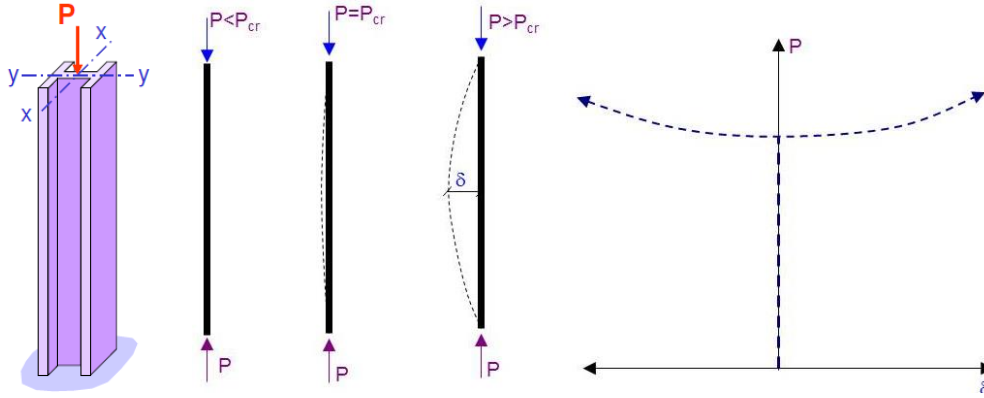
#### 6.4.3 Yaklaşık İkinci Mertebe Analizi

## 6-STABİLİTE TASARIMI

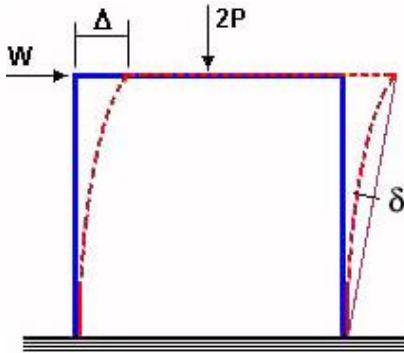
### 6.1. GİRİŞ

Basınç çubuklarında, çubuğa etkiyen basınç kuvveti belli bir değeri aştıktan sonra çubuk eksenini doğrusallığını kaybederek eğilmeye başlar. Bu olaya basınç çubuğunun **burkulması** denir. Burkulan bir çubukta, elastik sınır dayanımları aşılmaya bile, çubuk elemanı doğrusallığını kaybettiği için dayanımını kaybeder. Bu nedenle burkulma bir gerilme problemi değil, bir stabilite problemidir. **Stabilite**, bir kuvvet yada etki sonucu deplasman yapmış bir elemanın yada sistemin, kuvvetin kaldırılması ile başlangıç konumuna gelebilme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır (şekil 6.1). Taşıyıcı sistem veya eleman burkulması,  $P-\Delta$  ve  $P-\delta$  etkileri (şekil 6.2), mesnet çökmesi, kiriş – kolon birleşimi panel bölgesi şekil değiştirmeleri, geometrik ön kusurlar, doğrusal olmayan şekil değiştirmeler ile dayanım ve rijitliklerdeki belirsizlikler yapılarda stabilite bozukluklarına sebep olmaktadır. ( $P-\delta$ ) etkisi, düğüm noktaları arasında bir elemanın deplasman yapmış şekli üzerine etkiyen yüklerin etkisidir. ( $P-\Delta$ ) etkisi ise, yapıda düğüm noktalarının deplasman yapmış kısımlarına etkiyen yüklerin etkisidir.

Yapı sistemlerinin stabilite tasarımı, eleman bazındaki ve sistem genelindeki geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisini göz önüne alan *ikinci merteye teorisi*'ne göre analiz yapılmasını ve hesaplanan iç kuvvet büyüklüklerinin elemanların *mevcut dayanımları* ile karşılaştırılmasını öngörmektedir. İkinci merteye teorisi doğrusal olmadığından **süperpozisyon prensibi** geçerli değildir. Bu nedenle işletme (servis) yüklerinin ilgili yük birleşimleri için kendilerine ait yük katsayıları ile çarpımından oluşan toplam yükler altında, sistem ikinci merteye teorisine göre hesaplanır.



Şekil 6.1 Basınç çubuğu ve stabilite kavramı



Şekil 6.2 Basınç çubuğunun davranışı,  $P-\delta$  ve  $P-\Delta$  etkileri

## 6.2 YAPILARDA DOGRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ

Yapı elemanlarının analizi ve boyutlandırılmasında, lineer elastik analizin yetersiz kalmasından dolayı, doğrusal olmayan analizin getirdiği olanaklardan faydalanmak için yeni yöntemler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Çünkü lineer elastik analiz, yapının gerçek davranışını göstermemekte ve bu nedenle de yapının elastik sınır dayanımının üstündeki dayanımdan faydalanılamamaktadır. Yapının elastik sınır dayanımının üstündeki dayanımdan faydalanabilmek için yapıların doğrusal olmayan davranışlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, modern standartlar, tam veya yaklaşık çözümleme tekniklerini ya da ikinci merteye veya doğrusal olmayan etkileri göz önüne alarak yapı mühendisleri için önerilerde bulunmaktadır. Yapıların tasarımında beklenmeyen yükler altında yapının davranışı belirleyebilmek için, yapının doğrusal olmayan çözümünün gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. **Doğrusal olmayan çözümleme iki sınıfa ayrılmaktadır.** Birincisi, gerilme şekil değiştirme grafiğinin bir eğri olduğu **malzeme yönünden doğrusal olmayan** durumudur. Malzeme bakımından doğrusal olmama durumunu içeren problemlerin çözümünde esas problem, önceden şekil değiştirme özellikleri bilinmeyen malzeme kullanılarak yapının denge denklemlerinin yazılmasıdır. İkinci tür doğrusal olmama durumu ise, **geometri bakımından doğrusal olmama** durumudur. Bunun anlamı, uygulanan yükler altında yapı rijitliğindeki değişime bağlı sonlu deformasyonlardan meydana gelen ikinci merteye etkilerinin göz önüne alınması durumudur. Geometri bakımından doğrusal olmama durumunda yük-yerdeğiştirme grafiği bir eğridir. Pek çok inşaat mühendisliği yapısı servis yükleri altında lineer elastik davranış sergilerken, asma sistemler, kemerler, yüksek binalar çoğu zaman lineer elastik davranış sergilemezler. Bunlar çoğu zaman doğrusal olmayan davranış sergilerler ve bu nedenle dayanım limitlerinin incelenmesi gerekir.

### Doğrusal Olmama Durumlarının Nedenleri:

Doğrusal elastik çözümlemede malzemenin akmadığı ve özelliklerinin değişmediği kabul edilir ve denge denklemleri deforme olmamış yapının geometrisine dayanılarak formüle edilir. Kısmen şekil değiştiren yapı durumlarında da başlangıç referans eksenine dikkate alınır. Daha sonraki deformasyonlar küçük kabul edilir, sistem davranış modu ve denge durumuna olan etkisi önemsenmez. Geometri bakımından doğrusal olmama durumunda denge denklemlerinin formülasyonunda sonlu yer değiştirmeler ve deformasyonların etkisi dikkate alınır fakat malzeme elastik kalır. Eğer sadece malzeme bakımından doğrusal olmama durumunu göz önüne alacak olursak, eleman malzeme özelliklerindeki değişimin etkilerini de göz önüne almak gerekir. Ayrıca hem malzeme hem de geometrik doğrusal olmama durumunun bir arada dikkate alınması da söz konusu olur. Aşağıda doğrusal olmama durumlarına sebep olan etkiler verilmiştir.

### Geometrik Etkiler:

- Üretim hatalarından dolayı düzlemi dışında davranış sergilemesi yani başlangıçta kusurlu olması
- $P-\Delta$  etkisi; yapının yatay yer değiştirmelerden dolayı elemanın eksenindeki bozulma nedeniyle düşey etkilerin sebep olduğu etkiler.
- $P-\delta$  etkisi; eksenel kuvvetin etkisinden dolayı elemanın etkisindeki bozulma nedeniyle dış etkilerin sebep olduğu etkiler.

### Malzeme Etkileri:

- Çelik yapıların plastik deformasyonları
- Betonarme yapıların sünme ve çatlaması
- Eksenel kuvvet, eğilme, kesme ve burulma arasındaki elastik olmayan etkileşim

### Birleştirilmiş Etkiler:

- Plastik deformasyon,  $P-\Delta$  ve/veya  $P-\delta$  etkileri
- Birleşimlerdeki deformasyonlar
- Panelzon deformasyonları
- Yapının dayanımı ve rijitliğini olumsuz yönde etkileyen sebepler

### Geometri Bakımından Doğrusal Olmama Durumu:

Sistemlerde geometri bakımından doğrusal olmama durumu esas olarak büyük şekil değişikliği ve büyük gerilmelerde ortaya çıkar. Basit bir örnek ile ifade etmek gerekirse, eksenel yüklü bir çubuk da dışmerkezlik meydana gelmesi, geometri bakımından doğrusal olmama durumunun varlığını gösterir. Pratikte karşılaştığımız birçok çelik yapıda geometri bakımından doğrusal olmama durumu ortaya çıkar.

### Doğrusal olmayan davranış ile lineer davranış arasındaki büyük farklar şunlardır.

- Şekil değiştirme - yerdeğiştirme ilişkisi lineer değildir.
- Gerilme - şekil değiştirme ilişkisi lineer değildir.
- Doğrusal olmayan analizde yer değiştirmelerin dağılımının veya büyüklüğünün değişmesine yükler sebep olur.
- Doğrusal olmayan analizde çözüme ulaşmak için iterasyon tekniğinin uygulanması gerekmektedir. Lineer analizde olduğu gibi direk olarak çözüme ulaşamaz.
- Doğrusal olmayan yapı davranışı genellikle doğrusal olmayan malzeme özelliklerinden ve/veya büyük yer değiştirmelerden ortaya çıkar.

### Nonlinear Yük-Sehim Eğrisi İçin Çözüm Prosedürleri:

Taşıyıcı sistemin veya elemanın burkulması  $P - \delta$  ve  $P - \Delta$  etkileri, düğüm noktalarının hareketi ve mesnet çökmeleri, yapılarda stabilite bozukluklarına sebep olduğu daha önce belirtilmişti. Yapıda nonlinear davranış ise geometrideki değişimleri veya mesnet çökmesinin, yüklerin yönünde değişiklik meydana getirmesine sebep olmaktadır. Yük-deplasman yolunun bir eğri olması, ve bu eğri üzerinde snap-back noktaları ve limit noktalar gibi kritik noktaların oluşması halinde yapının davranışı, geometri yönünden nonlinear davranış olarak tanımlanır. Nonlinear problemlerin çözümünde kullanılan yöntemler artımsal, iteratif ve iteratif/artımsal yöntemlerdir.

**Lineer Artımsal Yöntemler:** Nonlinear yük – sehim eğrisi lineer prosedür adımlarıyla teşkil edilir. Yük, küçük artımlar olarak uygulanır ve bu artımların her biri için deformasyondaki değişimler lineer analiz kullanılarak belirlenir. Daha sonra, artımda, her yükün sebep olduğu deplasman değişimleri hesaplanır. Lineer artımsal metod, deplasmanların elde edilmesinde yük adımlarının başlangıcında mevcut deformasyonları ve iç kuvvetlere dayalı TANGENT RİJİTLİK matrisini kullanır. Verilen yük adımlarında, rijitlik matrisinin terimleri sabit kaldığı için, bunun bir defa hesabı yeterlidir.

**Nonlinear Artımsal Yöntemler:** Hem yük adımı boyunca oluşan deplasmanlar ve iç kuvvetlerin fonksiyonu hem de yük adımları başındaki mevcut deplasmanların fonksiyonu olan, artımsal rijitlik matrisi kullanılır. Her bir yük artımı içindeki iterasyonlar boyunca, rijitlik matrisi yeniden belirlenir. Bu iterasyonlar artımsal yük ihmal edilecek düzeye gelinceye kadar devam eder ve sonraki yük artımı için tekrar başa dönlür. Böylece artımsal deformasyonları en iyi yaklaşımla hesaplamamız mümkün olmaktadır.

**Direkt Yöntemler:** Yük sehim eğrisi boyunca, herhangi bir yüke karşı gelen deformasyon, tek adımda tam yük uygulanarak elde edilir. Bu metod toplam yükler ve toplam deformasyonlar

esasına dayanırken, artımsal metotlar, artımsal yükler, artımsal deformasyonlar esasına dayanır. Direkt metot, yükün tek değerine karşı gelen deformasyonu bulmak için uygun bir yöntemdir. Kullanılan matris  $[K]$  SEKANT RİJİTLİK matrisi olarak anılır. Bu matris mevcut deformasyonlar ve iç kuvvetlere bağlıdır. Toplam yük etkidiği zaman, hesabın başında bu yükler bilinmediği için  $[K]$  matrisindeki terimler iterasyonla belirlenmektedir.

#### Katlı Kritik Noktalara Sahip Problemler İçin Nonlineer Çözüm Yöntemleri:

Yapıların başlangıç ve ileri kritik burkulma davranışını incelemek için yapının nonlineer yük sehim eğrisinin eldesindeki yaklaşımlar önem kazanmaktadır. Yapıların nonlineer analizinde oldukça geniş bir uygulama alanına sahip Newton-Raphson ve Modified Newton-Raphson yöntemleri gibi değişik Newton-Raphson yaklaşımları tek başlarına, yapıların nonlineer davranışında burkulma yükünün hesabında limit nokta civarındaki noktalarda çözümün sağlanmasında başarısız kalmaktadır. Bu durum iki yönden dezavantajdır. Birincisinde, göçme yükü gerçek yük taşıma kapasitesinden küçük belirlenmiştir. İkincisinde ise, yapının ileri burkulma davranışı tanımlanmamaktadır. İşte bu sorunları ortadan kaldırmak için son yıllar içinde geliştirilen bazı yeni yöntemler şunlardır.

Arc-Lenght yöntemi(küresel ve silindirik)

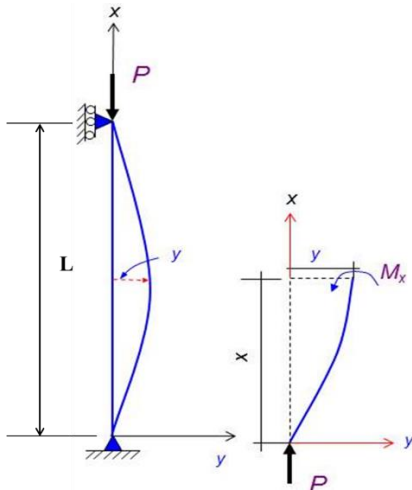
Deplasman Kontrol Yöntemi

İş Kontrol Yöntemi

### 6.3 KOLON TEORİSİ

#### 6.3.1 Euler Burkulma Yükü

Malzemesi Hook kanununa uyan, iki ucu mafsallı (Şekil 6.3) prizmatik basınç çubuğuna Euler kolonu denir.



Şekil 6.3 Euler kolonu

□  
□  
□

Basınç çubuğunu mesnette  $x$  uzaklıktaki bir noktadan şekildeki gibi keselim ve gerekli iç kuvvet ve reaksiyonu bu kesilen parça üzerinde gösterelim. Kesim noktasına göre moment alarak sıfıra eşitlersek;

$$M - P y = 0$$

Moment eğrilik ilişkisinden;

$$M = E I \chi$$

$\chi$  = eğrilik, E= elastisite modülü, I= atalet momenti

Eğrilik elastik eğri ilişkisinden;

$$\chi = -y''$$

$$y'' = \frac{d^2 y}{dx^2}$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI}$$

$$y'' + \frac{P}{EI} y = 0$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{P}{EI} y = 0$$

$$k^2 = \frac{P}{EI}$$

$$y'' + k^2 y = 0$$

Bu denklem ikinci mertebe, lineer homojen diferansiyel denklemdir. Denklemin genel çözümü;

$$y = A \sin kx + B \cos kx = 0$$

Burada A ve B integrasyon sabitleridir ve başlangıç koşullarından bulunur. A ve B integrasyon sabitlerinin bulunabilmesi için öncelikle sınır şartlarını şekil 8.6'dan hareketle yazılır.

$$(1) x = 0 \quad y = 0$$

$$(2) x = L \quad y = 0$$

Sınır şart (1)' den;

$$0 = A \sin(k \cdot 0) + B \cos(k \cdot 0)$$

B=0 Sınır şartı (2) ve B=0 dan;

$$0 = A \sin kL + 0 \cos kL$$

$$0 = A \sin kL$$

$0 = A \sin kL$  olması için ya  $A=0$  olmalı ya da  $0 = \sin kL$  olmalıdır.  $A=0$  çözümü aşıkâr çözümdür ve ihmal edilir. Bu durumda dikkate alınması gereken çözüm;

$$0 = \sin kL$$

$\sin kL = 0$  olması için:

$$kL = n\pi$$

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$  olur

$$k^2 = \frac{n^2 \pi^2}{L^2}, \quad k^2 = \frac{P}{EI}$$

$$\frac{P}{EI} = \frac{n^2 \pi^2}{L^2}$$

$$P_{cr} = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2}$$

$n=1$  için burkulma yükü

$$P_{cr} = P_e = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad \text{atalet yarıçapı}$$

Euler burkulma gerilmesi;

$$F_e = \frac{P_e}{A} = \frac{\pi^2 EI}{L^2 A} = \frac{\pi^2 EI}{AL^2}$$

$$I = \int y^2 dA = Ai^2, \quad i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

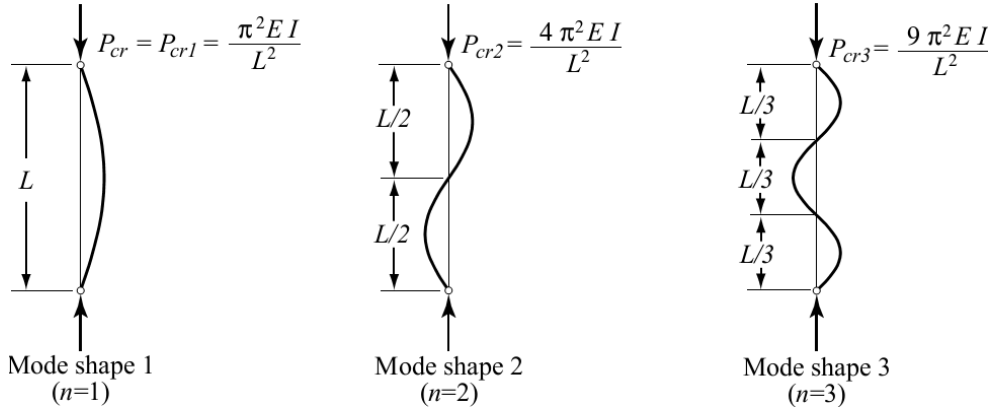
Euler kolonu için kritik burkulma gerilmesi:

$$F_e = F_{cr} = \frac{\pi^2 Ei^2}{L^2} = \frac{\pi^2 E}{(L/i)^2}$$

$\lambda = L/i$  narinlik

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$



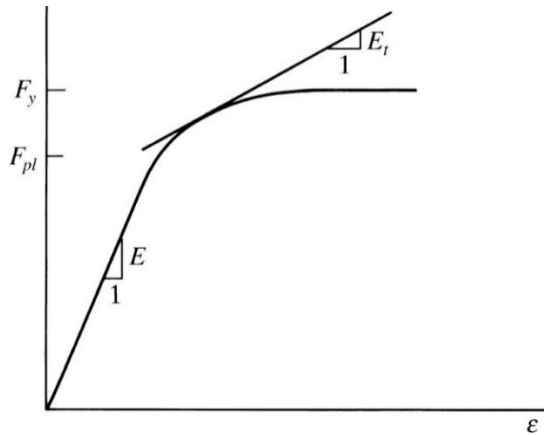


Şekil 6.4 n=1, 2, 3 için burkulma mod şekilleri.

Elastisite modülünün değişik değerleri için kritik gerilme, hesaplanan kritik burkulma yüküne bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_t I}{L^2}$$

$$F_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 E_t}{(L/i)^2}$$



Şekil 6.5 Gerilme –şekil değiştirme eğrisi

### 6.3.2 Efektif Burkulma Boyu

Yapıların stabilite tasarımında, **Genel (doğrudan) Analiz Yöntemi ve Burkulma Boyu (Etkin Uzunluk) Yöntemi** yapısal stabiliteyi etkileyen faktörleri gözönüne alan yöntemlerdir. Burkulma Boyu (Etkin Uzunluk) Yöntemi uygulama sınırları şöyledir: Yöntem düşey yüklerin düşey çerçeveler, kolonlar ve perdeler tarafından tanındığı yapı sistemlerine uygulanabilir. Tüm katlarda, YDKT yük birleşimlerinin veya GKT yük birleşimlerinin 1.6 katına eşit yüklemelerden ikinci merteye göreli kat ötelemelerinin birinci merteye göreli kat ötelemelerine oranı olan "B<sub>2</sub>" katsayısı 1.5 değerine eşit veya daha küçük olmalıdır. **Burkulma Boyu Yöntemi ile Tasarımda**, öncelikle basınç çubuğunun burkulma boyunun belirlenmesi, gerekli hallerde (çerçeve kolonlarda olduğu gibi) hesaplanmalıdır. Aşağıda değişik mesnet koşullarına sahip basınç çubukları için kritik burkulma yükleri ve burkulma boyu katsayıları (K) nasıl hesaplandığı anlatılmıştır.

### 6.3.3 Burkulma Boyu Katsayısı:

$$K = \sqrt{\frac{P_e}{P_{cr}}}$$

Burada  $P_e$ =Euler burkulma yükü,  $P_{cr}$ =herhangi bir basınç çubuğuna ait burkulma yükü

İki ucu mafsallı (euler kolonu):

$$K = \sqrt{\frac{\frac{\pi^2 EI}{L^2}}{\frac{\pi^2 EI}{L^2}}} = 1$$

İki Ucu Ankastre Basınç Çubuğu:

$$K = \sqrt{\frac{\frac{\pi^2 EI}{L^2}}{\frac{4\pi^2 EI}{L^2}}} = 0.5$$

Bir Ucu Mafsallı Diğer Ucu Ankastre Basınç Çubuğu:

$$K = \sqrt{\frac{\frac{\pi^2 EI}{L^2}}{\frac{20EI}{L^2}}} = 0.7$$

Bir ucu Ankastre Diğer Ucu Serbest Basınç Çubuğu:

$$K = \sqrt{\frac{\frac{\pi^2 EI}{L^2}}{\frac{\pi^2 EI}{4L^2}}} = 2$$

### 6.3.4 Kritik Burkulma Yükleri

İki ucu mafsallı (euler kolonu) basınç çubuğu

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EA}{\left(\frac{L}{i}\right)^2} = \frac{\pi^2 EI}{(L)^2}$$

Bir ucu ankastre diğer ucu serbest basınç çubuğu

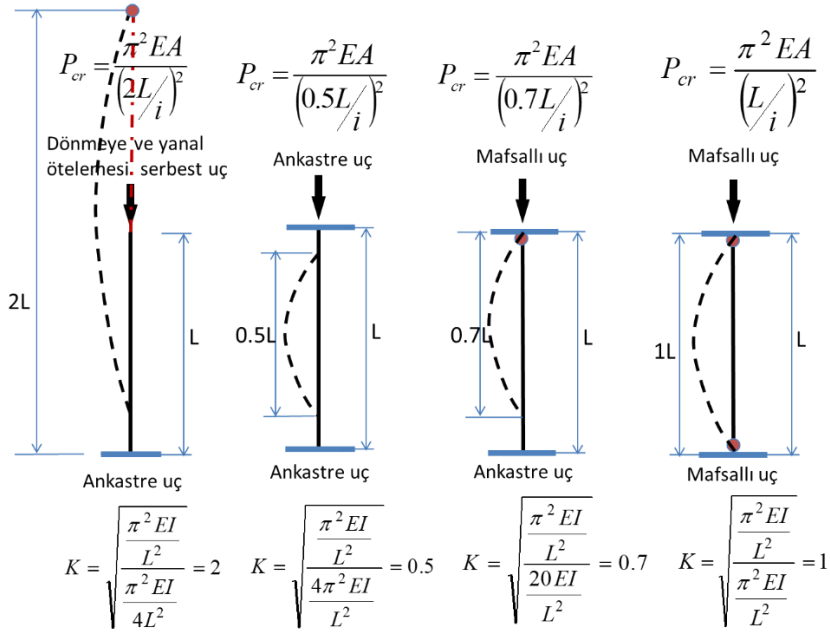
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EA}{\left(\frac{2L}{i}\right)^2} = \frac{\pi^2 EI}{(2.0L)^2}$$

İki ucu ankastre basınç çubuğu

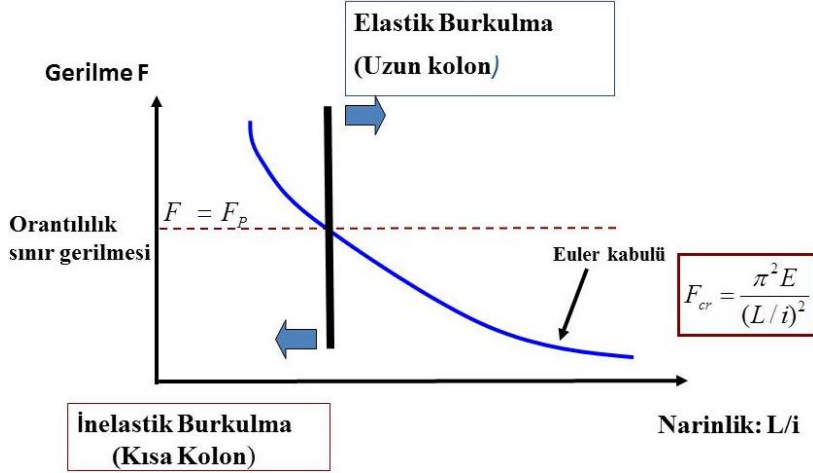
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EA}{\left(\frac{0.5L}{i}\right)^2} = \frac{\pi^2 EI}{(0.5L)^2}$$

Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı basınç çubuğu

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EA}{\left(\frac{0.7L}{i}\right)^2} = \frac{\pi^2 EI}{(0.7L)^2}$$



Şekil 6.6 "K" Burkulma boyu katsayıları ve kritik gerilme değerleri



Şekil 6.7 Elastik ve inelastik burkulma

## 6.4 STABİLİTE TASARIMI YÖNTEMLERİ

Yapıların stabilite tasarımında, yapısal stabiliteyi etkileyen yukarıdaki faktörleri gözönüne alan genel (doğrudan) analiz yöntemi ve burkulma boyu (etkin uzunluk) yöntemleri ve ikinci mertebeli etkilerin yaklaşık olarak hesaba katıldığı yaklaşık yöntem kullanılmaktadır. "**Genel (Doğrudan) Analiz Yöntemi**" ve "**Burkulma Boyu (Etkin Uzunluk) Yöntemi**" ve ayrıca ikinci mertebeli etkilerin yaklaşık olarak hesaba katıldığı "**Yaklaşık İkinci Mertebeli Analiz Yöntemi**" aşağıda verilmiştir.

### 6.4.1 Genel Analiz(Doğrudan) Yöntemi İle Tasarım

Genel analiz yöntemi, sınırlama olmaksızın, tüm çelik yapı sistemlerinin stabilite tasarımına uygulanabilmektedir. Bu yöntem ile gerekli dayanımın hesabı, ikinci mertebeli hesaplanarak elde edilir. Sistem hesabında, geometrik ön kusurları temsil eden fiktif yükler, doğrusal olmayan şekil değiştirmeleri temsil eden rijitlik azaltılması hesaba katılmalıdır. Geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkilerinin genel analiz yöntemi ile hesaba katıldığı yapı

sistemlerinin eleman ve birleşimlerinin stabilite kontrollerinde, şartnamenin(ÇTYT-2016) öngördüğü kurallar uygulanır. Elemanların burkulma boyu katsayıları, daha küçük bir değer kullanılması geçerli bir yaklaşımla kanıtlanmadığı sürece,  $K=1.0$  olarak alınacaktır. Elemanların burkulma boylarını küçültmek amacıyla oluşturulan stabilite bağlantıları, destekledikleri tüm elemanlar için uygulandıkları noktaların hareketlerini önleyecek düzeyde, **ÇYTY-2016'da** verilen kurallara göre belirlenen yeterli dayanım ve rijitliğe sahip olmalıdır.

#### 6.4.2 Burkulma Boyu Yöntemi İle Tasarım

**Yöntem ÇYTY-2016'da verilen** genel esaslar çerçevesinde ve aşağıdaki sınırlar içinde, burkulma boyu (etkin uzunluk) yöntemi, genel (doğrudan) analiz yönteminin yerine kullanılabilir. Yöntem, düşey yüklerin düşey çerçeveler, kolonlar ve perdeler tarafından taşındığı yapı sistemlerine uygulanabilir. Tüm katlarda, YDKT yük birleşimlerinden veya GKT yük birleşimlerinin 1.6 katına eşit yüklemelerden oluşan ikinci merteye görel kat ötelemelerinin birinci merteye görel kat ötelemelerine oranı olan  $B_2$  katsayısı 1.5 değerine eşit veya daha küçük olmalıdır. Bu yöntem ile gerekli dayanımın hesabı, rijitlik azaltılması gözönüne alınmaksızın, ikinci merteye hesabı uygulanarak elde edilir. Sistem hesabında geometrik ön kusurların fiktif yüklerle temsil edilmesi halinde, bu yüklerin hesabında sadece düşey yükleri içeren yük birleşimlerinde hesaba katılacaktır.

Geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkilerinin burkulma boyu yöntemi ile hesaba katıldığı yapı sistemlerinin eleman ve birleşimlerinin stabilite kontrolleri ÇYTY-2016'da verilen ilgili kurallara göre yapılır. Basınç etkisindeki elemanların stabilite kontrollerinde burkulma boyu katsayısı,  $K$ , şöyle belirlenir. Çaprazlı çerçeve sistemler, perdeli sistemler ve yatay yüklerin taşınmasının kolonların eğilme rijitliklerinden bağımsız olduğu benzeri sistemlerde burkulma boyu katsayısı, daha küçük bir değer kullanılması geçerli bir yaklaşımla kanıtlanmadığı sürece,  $K=1.0$  olarak alınır. Stabilite bağlantıları **ÇYTY'de** verilen kurallara göre belirlenen yeterli dayanım ve rijitliğe sahip olmalıdır. Kolonların eğilme rijitliklerinin sistemin yatay yük taşıma kapasitesine ve yanal stabilitesine katkı sağladığı moment aktaran çerçeveler ve benzeri sistemlerde burkulma boyu katsayısı,  $K$ , aşağıdaki denklemlerden veya nomogramlardan yararlanarak hesaplanabilir. Bu denklem ve nomogramlardaki  $G_A$  ve  $G_B$  büyüklükleri, sırasıyla söz konusu kolonun üst ve alt uçlarında birleşen kolonların ve kirişlerin eğilme rijitlikleri toplamının oranına bağlı olarak (ÇYTY D-6.4) ile hesaplanırlar.

#### Çerçeve Sistemlerde Burkulma Boyu Katsayısı Hesabı:

$$G = \frac{\sum (EI / L)_{kolon}}{\sum (EI / L)_{kiriş}} = \frac{\sum (E_c I_c / L_c)}{\sum (E_g I_g / L_g)} \quad (\text{ÇYTY D-6.4})$$

$E_c I_c$ : Kolon en kesiti eğilme rijitliği ,  $E_g I_g$ : Kiriş en kesiti eğilme rijitliği,  $L_c$ : Kolon boyu,  $L_g$ : Kiriş boyu.

Yukarıdaki denklemde çerçevenin elastik olduğu kabul edilmiştir. Eğer kolon inelastik bir şekilde burkulursa ( $\lambda_c \leq 1.5$ ), efektif uzunluk faktörü burkulma boyu ile ilgili nomogram kullanılarak yeniden hesaplanmalıdır. Bir yaklaşım olarak aşağıdaki denklemden faydalanarak  $G_{inelastik}$  hesaplanabilir.

$$G_{inelastik} = \frac{\sum (E_t I / L)_{kolon}}{\sum (EI / L)_{kiriş}} = G_{elastik} [\tau_a]$$

$$\tau_a = \frac{E_t}{E} = \frac{F_{cr,inelastik}}{F_{cr,elastik}}$$

$$\text{Elastik; } F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{i}\right)^2}$$

$$\text{İnelastik; } F_{cr} = \frac{\pi^2 E_t}{\left(\frac{KL}{i}\right)^2}$$

$$G_{inelastik} = \frac{\sum E_t I_c / L_c}{\sum E I_g / L_g} = \frac{E_t}{E} G_{elastik}$$

$$G_{inelastik} = \tau_a \times G_{elastik}$$

Rijitlik indirgeme faktörü

$$\tau_a = \frac{F_{cr(inelastic)}}{F_{cr(elastic)}} = \frac{E_t}{E}$$

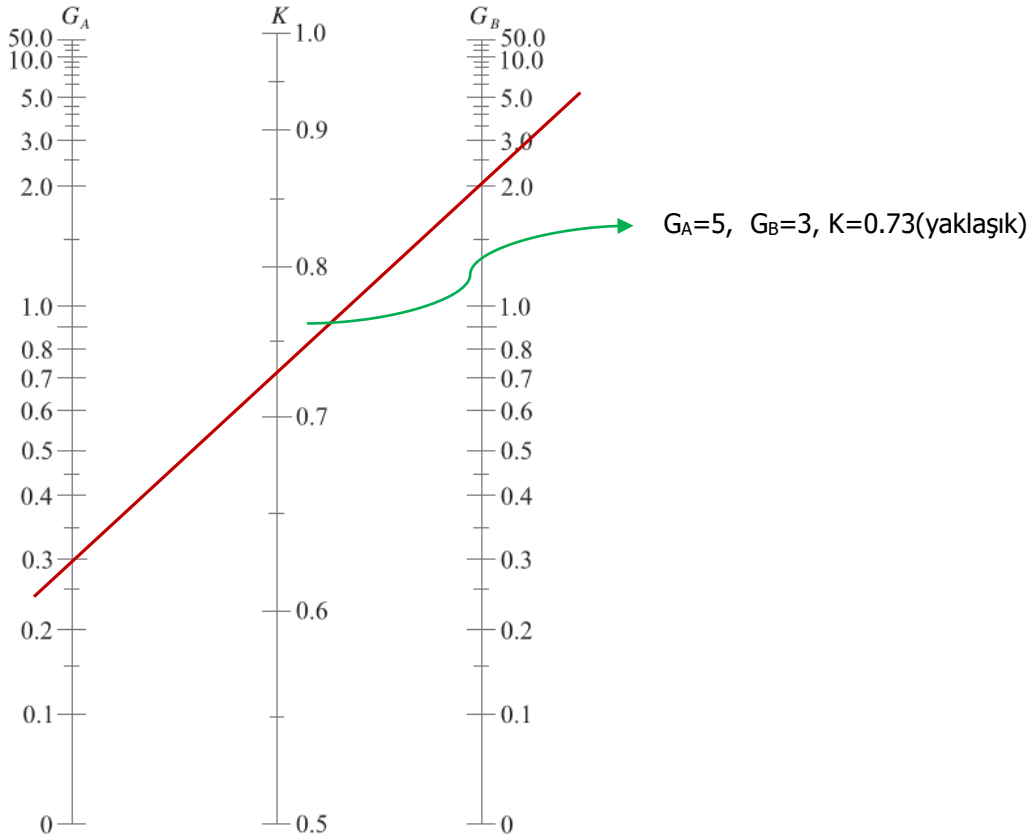
**a) Yanal yerdeğiştirmesi önlenmiş** (düğüm noktaları sabit) moment aktaran çerçevesel ve benzeri sistemlerde burkulma boyu katsayısı, K, kolonun üst ve alt uçlarında Denk. (6.1) ile belirlenen  $G_A$  ve  $G_B$  büyüklüklerine bağılı olarak, (ÇYTY D-6.5) ile veya Şekil 6.8(ÇYTY Ş-6.1) de verilen nomogramdan yararlanarak hesaplanır.

$$K = \frac{3G_A G_B + 1.4(G_A + G_B) + 0.64}{3G_A G_B + 2.0(G_A + G_B) + 1.28} \quad (\text{ÇYTY D-6.5})$$

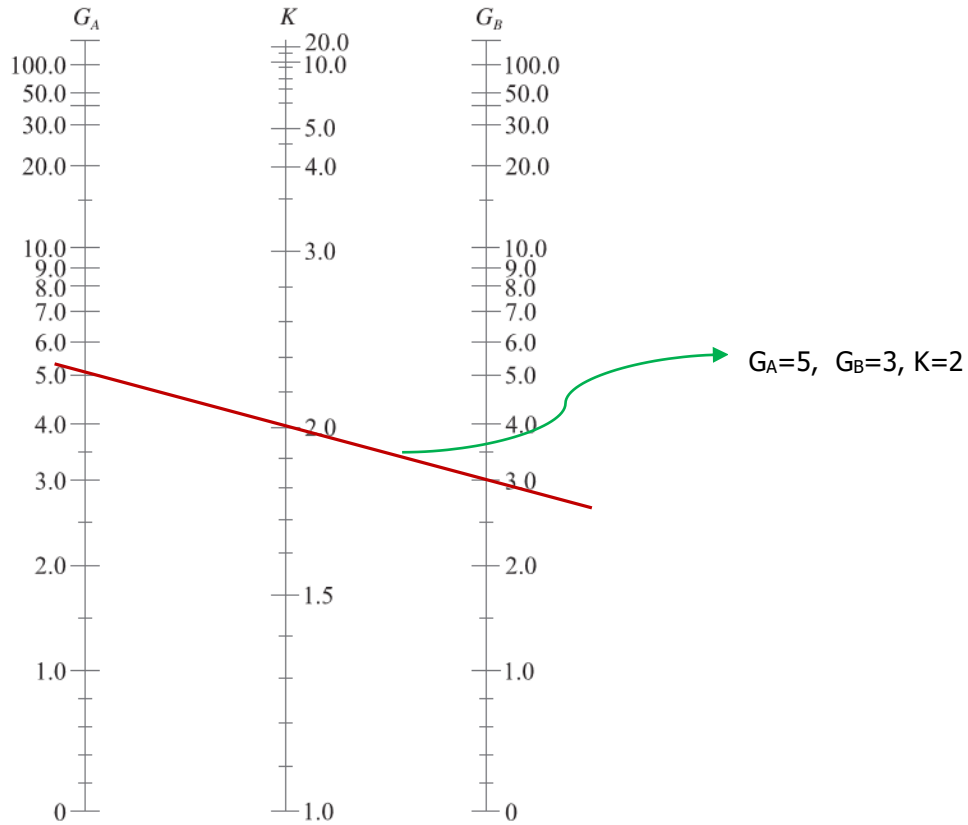
**b) Yanal yerdeğiştirmesi önlenmemiş** (düğüm noktaları hareketli) moment aktaran çerçevesel ve benzeri sistemlerde burkulma boyu katsayısı, K, kolonun üst ve alt uçlarında **Denk. (6.4)** ile belirlenen  $G_A$  ve  $G_B$  büyüklüklerine bağılı olarak, (ÇYTY D-6.6) ile veya Şekil 6.9(ÇYTY Ş-6.2) de verilen nomogramdan yararlanarak hesaplanabilir.

$$K = \sqrt{\frac{G_A(1.6G_B + 4.0) + (4G_B + 7.5)}{G_A + G_B + 7.5}} \quad (\text{ÇYTY D-6.6})$$

Ayrıca kolon, temele mafsallı bağılıysa  $G = 10$ , ankastre bağılı ise  $G = 1$  alınır. Yanal yer değıştirmesi önlenmiş çerçeve kirişlerde diğeri ucu rijit ise  $E_g I_g / L_g$  ifadesi 2 ile mafsallı ise 1.5 ile çarpılarak alınır. Yanal yer değıştirmesi önlenmemiş çerçevesel  $E_g I_g / L_g$  diğeri uç ankastre ise 2/3 katsayısıyla, diğeri ucu mafsallı ise 0.5 katsayısı ile çarpılarak azaltılır.



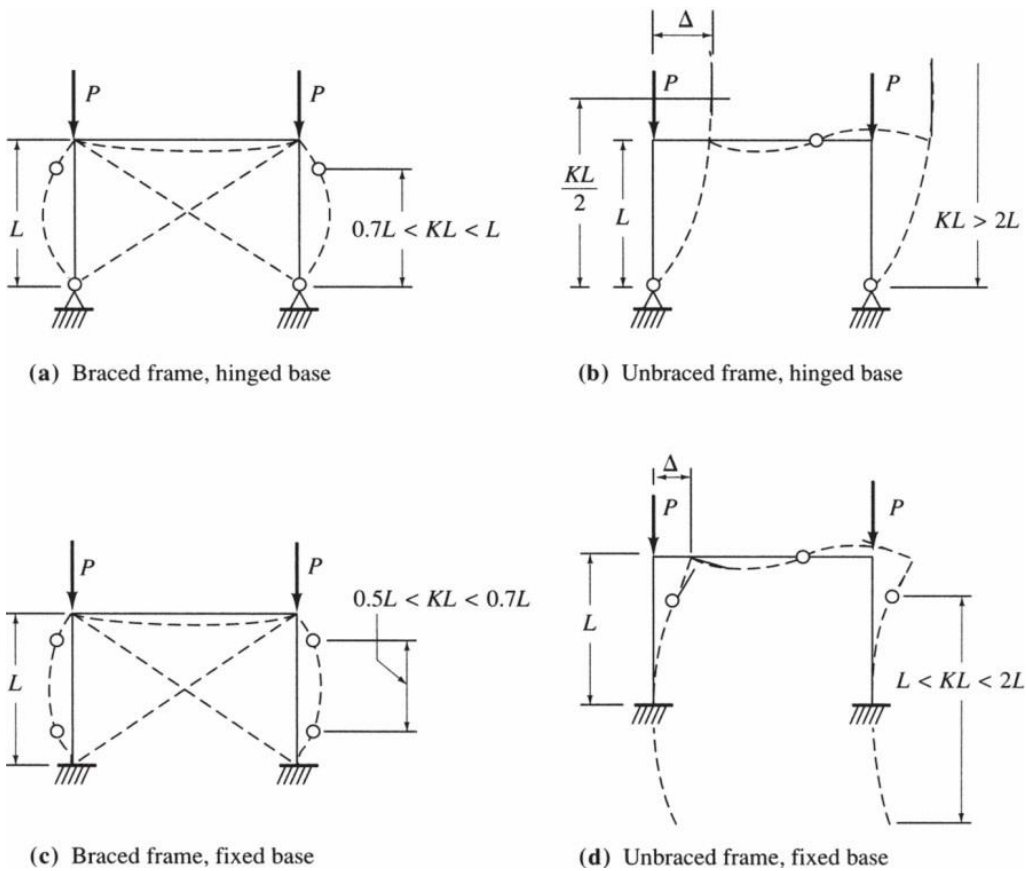
Şekil 6.8 (ÇYTY Ş-6.1) Yanal yerdeğiştirmesi önlenmiş sistemlerde burkulma boyu katsayısı, K



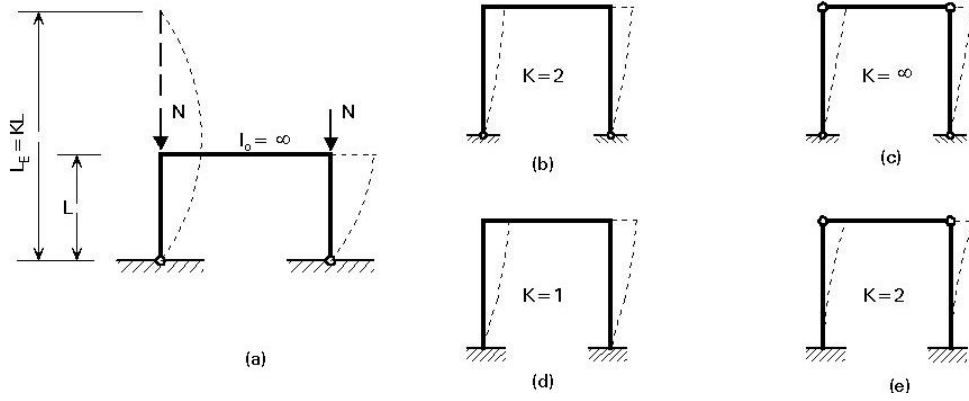
Şekil 6.9 (ÇYTY Ş-6.2) Yanal yer değiştirmesi önlenmemiş sistemlerde burkulma boyu katsayısı K

Buckled shape of column is shown by dashed line	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	
	Theoretical $K$ value	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
	Recommended design value when ideal conditions are approximated	0.65	0.80	1.2	1.0	2.1	2.0
End condition code							

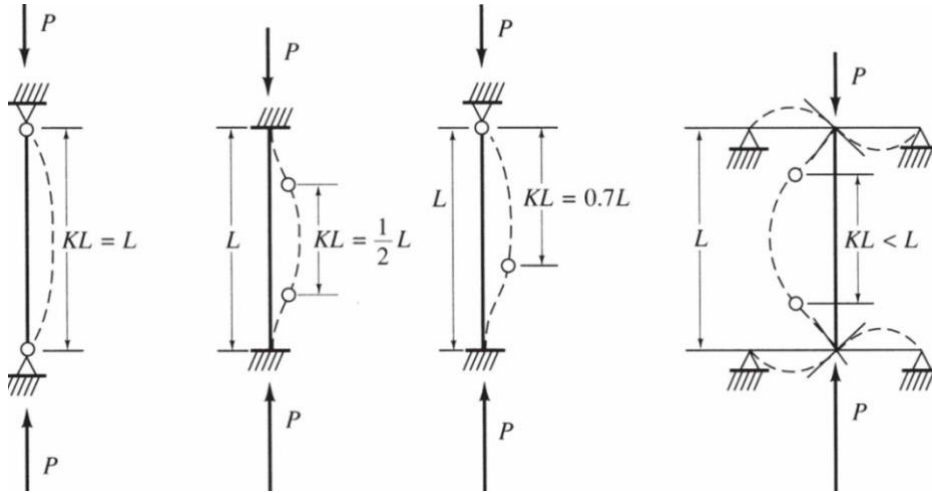
Şekil 6.10 Burkulma Boyu Katsayısı



Şekil 6.11 Burkulma Boyu Katsayısı

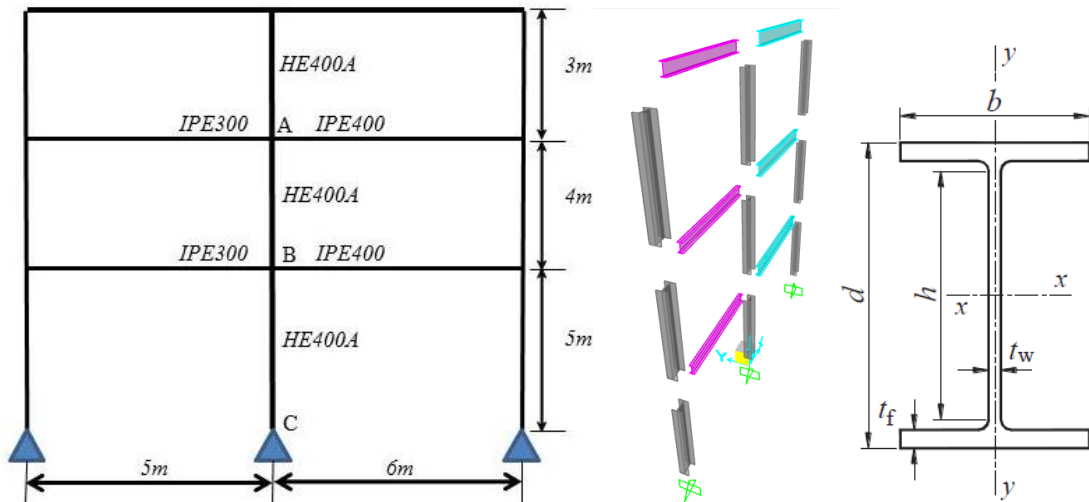


Şekil 6.12 Yanal hareketi serbest çerçevede kolonun burkulması



Şekil 6.13 Burkulma boyları

## ÖRNEK 6.1



Yukarıdaki şekli verilen çerçevenin A-B elemanı için  $K_{A-B}$  burkulma boyu katsayısını hesaplayınız. Eleman enkesitinin eğilme düzlemindeki atalet momenti HEA ve IPE profillerin (yukarıda şekilde gösterildiği gibi) "x" eksenine göre belirlenecektir.

$$G_A = \frac{\sum I_c / L_c}{\sum I_g / L_g} = \frac{I_{HE400A} / 300 + I_{HE400A} / 400}{I_{IPE300} / 500 + I_{IPE400} / 600}$$



$$G_B = \frac{\sum I_c / L_c}{\sum I_g / L_g} = \frac{I_{HE400A} / 400 + I_{HE400A} / 500}{I_{IPE300} / 500 + I_{IPE400} / 600}$$

$$G_A = \frac{45070 / 300 + 45070 / 400}{8356 / 500 + 23130 / 600} = 4.75 ,$$

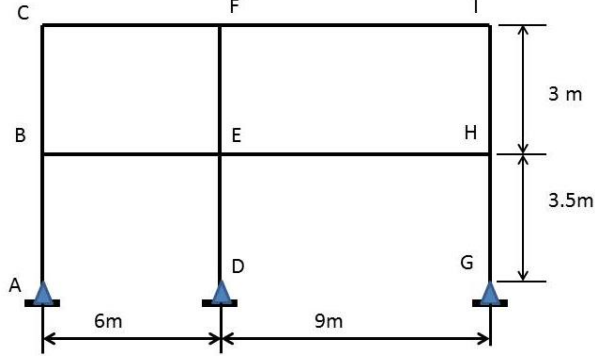
$$G_B = \frac{45070 / 400 + 45070 / 500}{8356 / 500 + 23130 / 600} = 3.67$$

Yanal yerdeğiştirmesi önlenmemiş (düğüm noktaları hareketli) sistem için ÇYTY-2016 denklem 6.6 kullanılacaktır.

$$K_{AB} = \sqrt{\frac{G_A(1.6 * G_B + 4) + (4 * G_B + 7.5)}{G_A + G_B + 7.5}} = \sqrt{\frac{4.75(1.6 * 3.67 + 4) + (4 * 3.67 + 7.5)}{4.75 + 3.67 + 7.5}} = 2.08$$

### ÖRNEK 6.2

Aşağıda şekli verilen çerçevenin kolonlarının burkulma boyu katsayılarını belirleyiniz.



		$I_x(cm^4)$	$L(cm)$	$I_x/L$
AB	W200x30.6	2690	350	7.686
BC	W200x30.6	2690	300	8.967
DE	W200x56.2	4980	350	14.23
EF	W200x56.2	4980	300	16.60
GH	W200x30.6	2690	350	7.686
HI	W200x30.6	2690	300	8.967
BE	W450x76.0	33500	600	55.83
CF	W400x56.6	20000	600	33.33
EH	W450x124	56100	900	62.33
FI	W400x94.3	33700	900	37.44

Düğüm noktası	$\Sigma(Ic/Lc)/\Sigma(Ib/Lb)$	G
A	Sabit mesnet	10.0
B	$(7.686+8.967)/55.83$	0.298
C	$8.967/33.33$	0.269
D	Sabit mesnet	10.0
E	$(14.23+16.60)/(55.83+62.33)$	0.261
F	$16.60/(33.33+37.44)$	0.235
G	Sabit mesnet	10.0
H	$(7.686+8.967)/62.33$	0.267
I	$8.967/37.44$	0.240

Burkulma boyu katsayıları

KOLON	GA	GB	K
AB	10.0	0.298	0.77
BC	0.298	0.269	0.63
DE	10.0	0.261	0.77
EF	0.261	0.235	0.61
GH	10.0	0.267	0.77
HI	0.267	0.240	0.61

### 6.4.3 Yaklaşık İkinci Mertebe Analizi

Bu yöntem, ikinci mertebe etkilerin doğrudan doğruya hesaba katılması yerine birinci mertebe analiz yöntemi kullanılarak elde edilecek iç kuvvetlerin (P ve M) belirli katsayılarla artırılması prensibine dayanmaktadır. Bu yaklaşım, düşey yüklerin düşey çerçeveler, kolonlar ve perdeler tarafından taşındığı yapı sistemleri için uygulanabilir. Sistem elemanlarının ikinci mertebe etkilerini içeren gerekli eğilme momenti dayanımı,  $M_r$ , ve gerekli eksenel kuvvet dayanımı,  $P_r$ , sırasıyla (ÇYTY D-6.7)ve (ÇYTY D-6.8) ile hesaplanmaktadır.

$$M_r = B_1 M_{nt} + B_2 M_{1t} \quad (\text{ÇYTY D-6.7})$$

$$P_r = P_{nt} + B_2 P_{1t} \quad (\text{ÇYTY D-6.8})$$

Buradaki terimler aşağıda tanımlanmıştır.

$B_1$ : Yatay ötelenmesi önlenmiş sistemin elemanlarındaki (P- $\delta$ ) etkilerini gözönüne alan bir artırma katsayısıdır. Bu katsayı, eğilme ve basınç etkisindeki elemanlar için, elemanın her iki eğilme doğrultusunda denk. (ÇYTY D-6.9) ile hesaplanır. Basınç etkisinde olmayan elemanlarda  $B_1$  katsayısı 1.0 olarak alınır.

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \frac{\alpha P_r}{P_{e1}}} \geq 1 \quad (\text{ÇYTY D-6.9})$$

$B_2$ : Yatay ötelenmesi önlenmemiş sistem genelindeki (P- $\Delta$ ) etkilerini gözönüne alan bir arttırma katsayısıdır. Bu katsayı, yapı sisteminin her katı için, her iki yatay yerdeğiştirme doğrultusunda denk. (ÇYTY D-6.12) ile hesaplanır

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{\alpha P_{kat}}{P_{e,kat}}} \geq 1$$

(ÇYTY D-6.12)

$M_r$ : YDKT veya GKT yük birleşimleri altında hesaplanan ikinci mertebe etkileri içeren gerekli eğilme momenti dayanımı.

$P_r$ : YDKT veya GKT yük birleşimleri altında hesaplanan ikinci mertebe etkileri içeren gerekli aksenal kuvvet dayanımı.

$M_{nt}$ : Yatay ötelenmesi önlenmiş sistemde, YDKT veya GKT yük birleşimleri altında hesaplanan birinci mertebe eğilme momenti.

$P_{nt}$ : Yatay ötelenmesi önlenmiş sistemde, YDKT veya GKT yük birleşimleri altında hesaplanan birinci mertebe aksenal kuvvet.

$M_{1t}$ : Yapı sisteminin sadece yanal ötelenmesi sonucu, YDKT veya GKT yük birleşimleri altında ilgili elemanda oluşan birinci mertebe eğilme momenti.

$P_{1t}$ : Yapı sisteminin yatay yer değiştirmelerinden dolayı, YDKT veya GKT yük birleşimleri altında hesaplanan birinci mertebe aksenal kuvvet.

Burada;

$$\alpha = 1.0 \text{ (YDKT) veya } \alpha = 1.6 \text{ (GKT)}$$

$C_m$ : Eşdeğer sabit moment yayılışına dönüştürme katsayısıdır. Bu katsayı yanal doğrultuda yerdeğiştirme yapmadığı varsayılan sistemlerin elemanlarında aşağıdaki şekilde hesaplanır.

(a) Eğilme düzleminde mesnetler arasında yanal yüklerin etkmediği elemanlarda:

$$C_m = 0.6 - 0.4(M_1/M_2)$$

(ÇYTY D-6.10)

Burada  $M_1$  ve  $M_2$ , elemanın uçlarında birinci mertebe analizi ile hesaplanan, sırasıyla küçük ve büyük eğilme momentlerini göstermektedir.  $M_1/M_2$  büyüklüğü çift eğrilikli eğilmede pozitif, tek eğrilikli eğilmede ise negatif olarak alınacaktır.

(b) Eğilme düzleminde mesnetler arasında yanal yüklerin etkmediği elemanlarda, güvenli yönde kalmak üzere,  $C_m=1.0$  değeri kullanılabilir.

$P_{el}$ : Elemanın uç noktalarının yanal yerdeğiştirme yapmadığı varsayımı altında, eğilme düzlemindeki elastik burkulma yüküdür ve (ÇYTY D-6.11) ile hesaplanır.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(K_1 L)^2}$$

(ÇYTY D-6.11)

$$C_m = 0.6 - 0.4 \left[ \frac{M_1}{M_2} \right]$$

(ÇYTY D-6.10)

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

EI\* : Genel analiz yöntemi ile tasarımda azaltılmış rijitlik. Burkulma boyu yöntemi ile tasarımda ise EI\* = EI olarak alınacaktır.

E: Yapısal çelik elastisite modülü (200000 MPa).

I: Eleman enkesitinin eğilme düzlemindeki atalet momenti.

L: Eleman boyu.

K<sub>1</sub>: Elemanın uç noktalarının yanal yerdeğiştirme yapmadığı varsayımı altında, eğilme düzlemindeki burkulma boyu katsayısı. Daha küçük bir değer aldığı geçerli bir yaklaşımla kanıtlanmadığı sürece K<sub>1</sub>=1.0 olarak alınacaktır.

(ÇYTY D-6.9)'da ki P<sub>r</sub> büyüklüğü için, birinci mertebe yaklaşımına ait P<sub>r</sub> = P<sub>nt</sub> + P<sub>1t</sub> ifadesinin kullanılmasına izin verilebilir.

α = 1.0 (YDKT) veya α = 1.6 (GKT)

P<sub>kat</sub>: YDKT veya GKT yük birleşimleri için, söz konusu katın tüm düşey taşıyıcı elemanlarına (yatay yük taşıyıcı sistemin dışında olan elemanlar da dahil) etkileyen toplam düşey yük.

P<sub>e, kat</sub>: Gözönüne alınan yanal yerdeğiştirme doğrultusunda, söz konusu kata ait elastik burkulma yükü. Bu büyüklük burkulma analizi ile veya (ÇYTY D-6.13) ile hesaplanacaktır.

$$P_{e, kat} = R_M \frac{HL}{\Delta_H}$$

(ÇYTY D-6.13)

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

$$R_M = 1 - 0.15(P_{mf} / P_{kat})$$

(ÇYTY D-6.14)

R<sub>M</sub>: P-Δ'nın P-δ üzerindeki etkisini gözönüne alan katsayı.

L: Kat yüksekliği.

P<sub>mf</sub>: Gözönüne alınan doğrultuda moment aktaran çerçeveler bulunması halinde, bu çerçevelerin kat kolonlarına etkileyen toplam düşey yük, (çaprazlı çerçevelerde sıfır alınacaktır).

Δ<sub>H</sub>: Gözönüne alınan doğrultuda, seçilen yatay yükler altında, sistem rijitliği kullanılarak hesaplanan birinci mertebe görel kat ötelemesi.

H: Gözönüne alınan doğrultuda, Δ<sub>H</sub> görel kat ötelemesini hesaplamak için kullanılan yatay yüklerden oluşan kat kesme kuvveti.