

# BETONARME TAŞIYICI SİSTEMLERDE KAPASİTE TASARIMI

Zekai Celep  
Prof.Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi  
celep@itu.edu.tr  
<http://www.ins.itu.edu.tr/zcelep/zc.htm>

İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi  
Bakırköy, Kadıköy, Harbiye  
Mesleki Eğitim Semineri  
Ekim 2008

## 1. Giriş

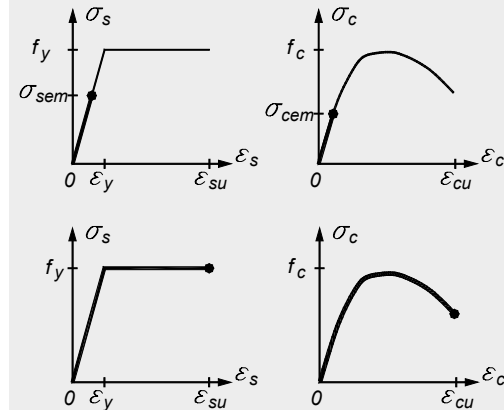
- Betonarme yapıların kapasite tasarımı ilkesinin kullanılması belirgin şekilde Deprem Yönetmeliği (2007) nde ortaya çıktı.
- Kapasite ilkesinin kullanılabilmesi için gerekli olan kavramlar:
  - Kesit ve taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan, davranışı,
    - Eğilme etkisi (kiriş)
    - Eğilme ve normal kuvvet etkisi (kolon ve perde)
    - Kesme kuvveti etkisi (kiriş, kolon ve perde)
  - Süneklik,
  - Plastik mafsallı kabulü,
  - Statik itme çözümü

1. Giriş
2. Kesitin doğrusal olmayan davranışı
3. Süneklik
4. Plastik mafsallı kabulü
5. Kapasite tasarım ilkeleri
6. Statik itme çözümü
7. Sonuçlar

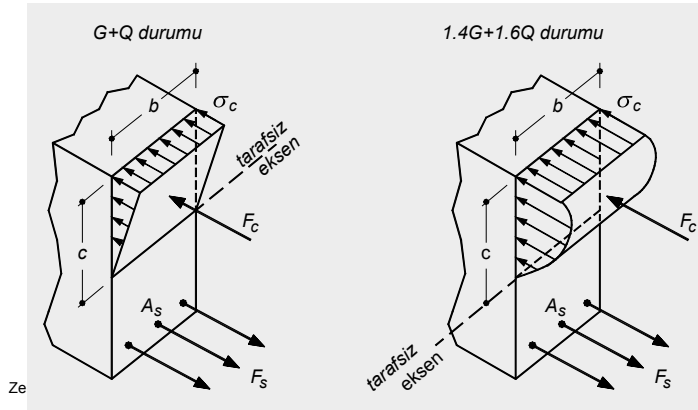
## 2. Kesitin doğrusal olmayan davranışı

Beton ve çeliğin davranışı

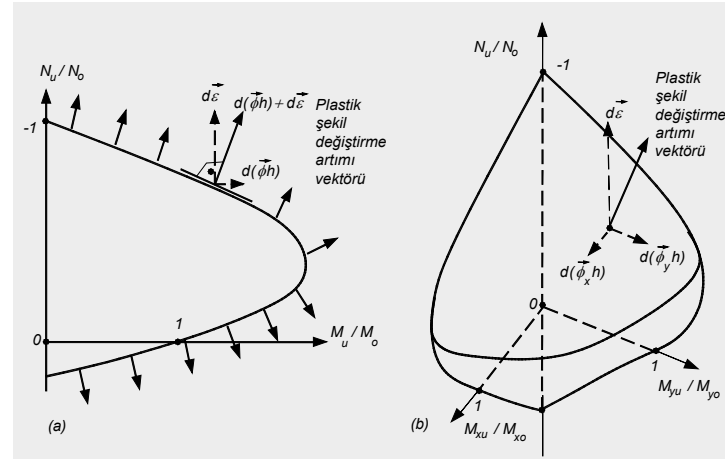
Eğilme etkisi



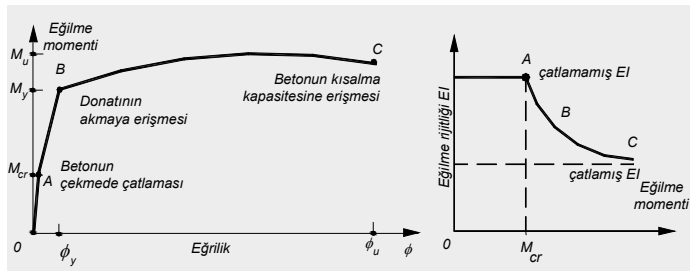
Eğilme etkisindeki kesitte doğrusal olmayan davranış



Akma eğrisi, akma yüzeyi ve şekil değiştirme

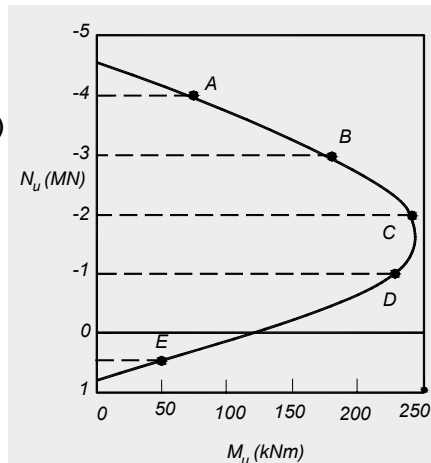
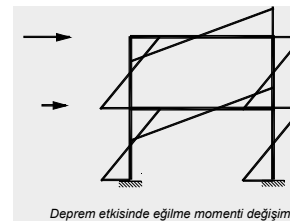


Betonarme kesitte eğilme etkisi, eğilme rijitliği ve şekil değiştirme

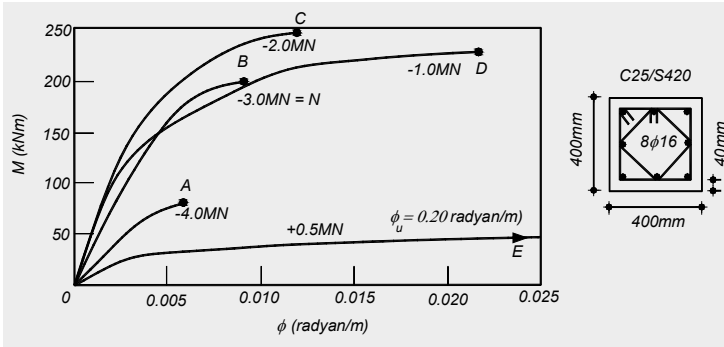


Eğilme rijitliği yükleme bağı

- Eğilme momenti ve normal kuvvet etkisi
- Karşılıklı etki diyagramı
- Akma eğrisi (süneklik varsa)



Eğilme rijitliği normal kuvvete bağlı



Zekai Celep

9

Kesit atalet momenti hesabında brüt ve çatlamış kesit

Dış etkiler altındaki taşıyıcı sistemde, kesit atalet momentinin değeri ve eksen boyunca değişiminde,

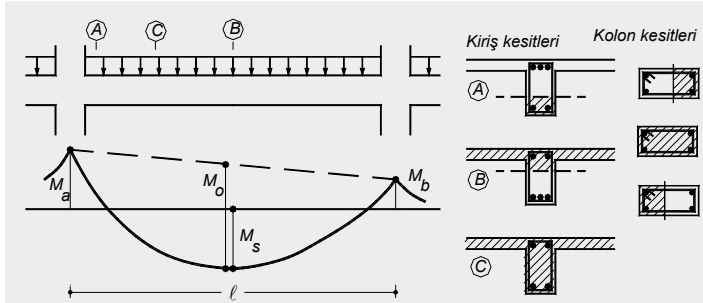
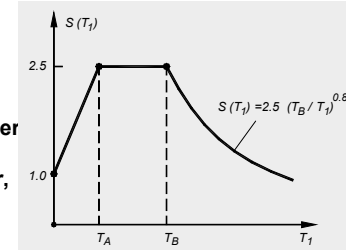
- Eğilme momentinin eleman boyunca değişimi,
- Şekil değiştirmelerin, dolayısıyla düşey ve yatay yerdeğiştirmelerin değeri

etkili olur.

Yükler arttıkça;

- Kesitlerde çatlama ilerler,
- Şekil değiştirmeler ve yerdeğiştirmeler artar,
- Atalet momenti azalır ve periyot artar,
- Deprem kuvveti azalır.

Zekai Celep



Eğilme rijitliğinin kiriş boyunca değişimi

Zekai Celep

10

- Düşey yükler altında, kirişlerde eğilme momenti ve kolonlarda normal kuvvet ile eğilme momenti beraberce etkili olur.
- Deprem yüklemesinde kirişlerde eğilme momenti artarken, kolonlarda eğilme momenti normal kuvvetin yanında etkili olmaya başlar.
- Çatlama; kirişlerde daha fazla etkili olurken, kolonlardaki etkisi mevcut normal kuvvetten dolayı daha sınırlı olur.

$$I_{\text{kolon çatlamış}} < I_{\text{kolon brüt}}$$

$$I_{\text{kiriş çatlamış}} \ll I_{\text{kiriş brüt}}$$

Zekai Celep

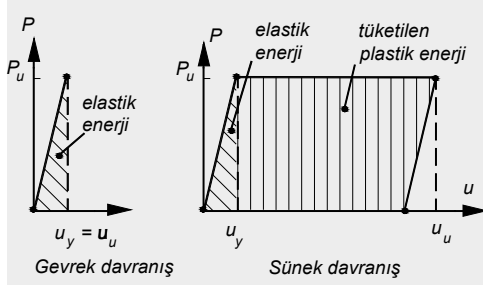
12

### 3. Süneklik

Sünek davranışta, yük kapasitesine erişildiğinde ek olarak önemli bir şekil değiştirme / yerdeğiştirme kapasitesi ortaya çıkar.

#### Gevrek davranış

#### Sünek davranış



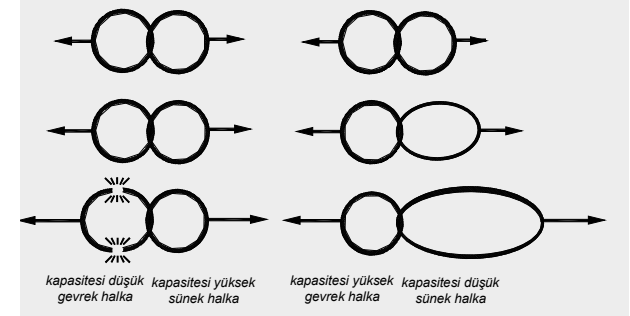
Zekai Celep

13

### İki halkalı zincirde gevrek ve sünek davranış

#### Gevrek davranış

#### Sünek davranış

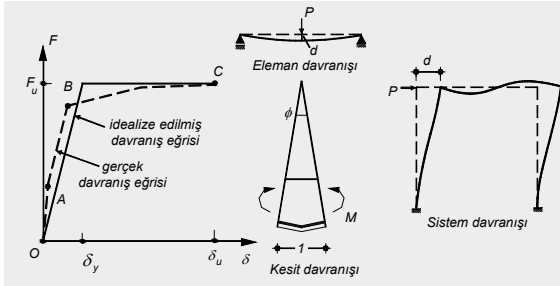


Zekai Celep

15

### Süneklik türleri:

$$\mu = \delta_u / \delta_y$$



- Sünekliğin kullanılması doğrusal olmayan davranışın beklendiğinde karşı gelir.
- Sünekliğin faturası, doğrusal olmayan şekil ve yer değiştirmeleri kabul edilmesidir.
- Düşey yüklerde doğrusal olmayan davranış sınırlı kullanılırken, deprem etkisinde çok daha geniş ve yaygın olarak kullanılır.

Zekai Celep

14

- **Elemanda sünek güç tükenmesinin sağlanması:**
- **Kat mekanizması güç tükenmesinin önlenmesi,**
- **Kiriş-kolon birleşim bölgesinde yetersiz kesme kuvveti dayanımından veya yetersiz donatı kenetlenme boyundan oluşabilecek güç tükenmesinin önlenmesi,**
- **Kiriş, perde ve kolonlarda yetersiz kesme kuvveti dayanımından oluşabilecek güç tükenmesinin önlenmesi,**
- **Kolonlarda aksenal taşıma kapasitesinin yetersizliğinden oluşabilecek güç tükenmesinin önlenmesi,**
- **Prefabrike elemanların birleşim bölgeleri dayanımlarının yetersizliğinden oluşabilecek güç tükenmesinin önlenmesi,**

Zekai Celep

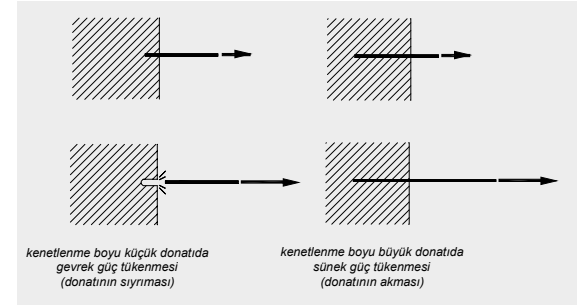
16

**Sünek güç tükenmesinin sağlanarak gevrek güç tükenmesinin önlenmesi:**

- Güç tükenme mekanizmasının sünek ve gevrek ortaya çıkma durumunda gevrek güç tükenme durumunu sünekten daha kuvvetli tutarak, öngörülen yükler üzerinde yükleme durumunda güç tükenmenin sünek olmasını sağlamak,
- Bunun için yönetmeliklerde öngörülen kurallar:

**TS500 de sünek davranışın öne çıkarılması:**

**Gevrek davranış Sünek davranış**

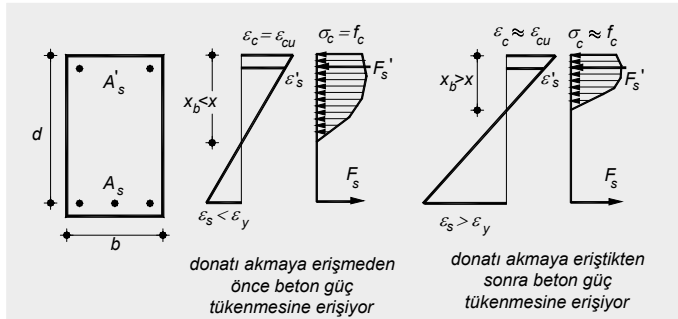


**Donatı kenetlenme boyuna bir alt sınır öngörülmesi**

$$\ell_b = \max \left[ 0.12 \frac{f_{yd}}{f_{ctd}} \phi; 20\phi \right]$$

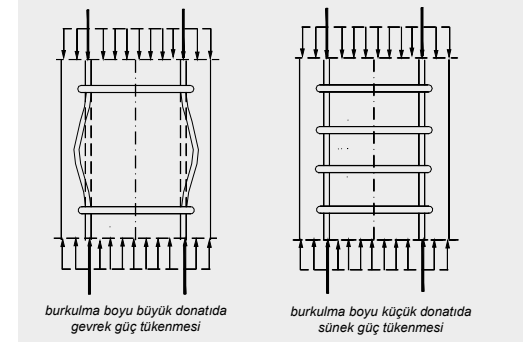
**TS500 de sünek davranışın öne çıkarılması:**

**Gevrek davranış Sünek davranış**



**Eğilme donatısına üst sınır öngörülmesi**  $\rho - \rho' \leq \rho_{\max} = 0.85 \rho_b$

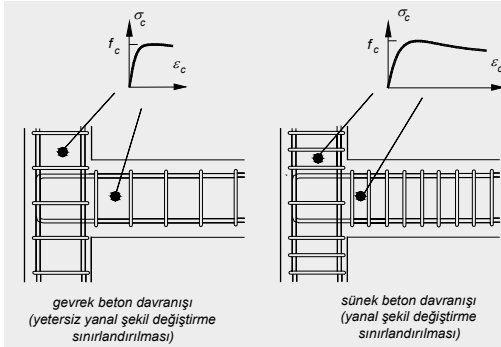
**TS500 ve Deprem Yönetmeliği'nde sünek davranışın öne çıkarılması:**



**Etriye aralığına bir üst sınır öngörülmesi**

Deprem Yönetmeliği'nde sünek davranışın öne çıkarılması:

Sarıma bölgesinde sargı donatısının öngörülmesi



gevrek beton davranışı  
(yetersiz yanal şekil değiştirme sınırlandırılması)

sünek beton davranışı  
(yanal şekil değiştirme sınırlandırılması)

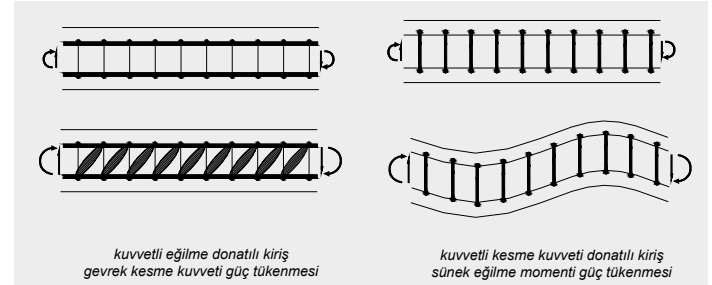
- Kirişlerin sarılma bölgelerinde:**  $s_c \leq \min[0.25 h; 8 \phi_\ell; 150mm]$   
**Kirişlerin orta bölgelerinde:**  $s_c \leq \min[0.5 d; 300mm]$   
**Kolonların sarılma bölgelerinde:**  $s_c \leq \min[h/3; b/3; 100mm]$   
**Kolonların orta bölgelerinde:**  $s_o \leq \min[0.5 h; 0.5 b; 12 \phi_\ell; 200mm]$

Zekai Celik

Deprem Yönetmeliği'nde sünek davranışın öne çıkarılması:

Gevrek davranış

Sünek davranış



kuvvetli eğilme donatılı kiriş  
gevrek kesme kuvveti güç tükenmesi

kuvvetli kesme kuvveti donatılı kiriş  
sünek eğilme momenti güç tükenmesi

Eğilme kapasitesinin zayıf, kesme kuvveti kapasitesinin güçlü halka olarak düzenlenmesi

$$V_e = \frac{M_{ii} + M_a}{\ell_n} = 1.4 \frac{M_{ri} + M_{ra}}{\ell_n}$$

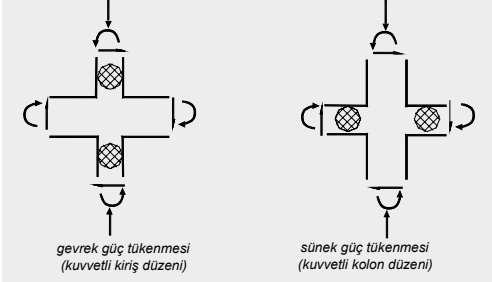
Zekai Celik

23

Deprem Yönetmeliği'nde sünek davranışın öne çıkarılması:

Gevrek davranış

Sünek davranış



gevrek güç tükenmesi  
(kuvvetli kiriş düzeni)

sünek güç tükenmesi  
(kuvvetli kolon düzeni)

Kiriş kapasitesinin zayıf, kolon kapasitesinin güçlü halka olarak düzenlenmesi

$$(M_{ra} + M_{rü}) \geq 1.2 (M_{ri} + M_{rj})$$

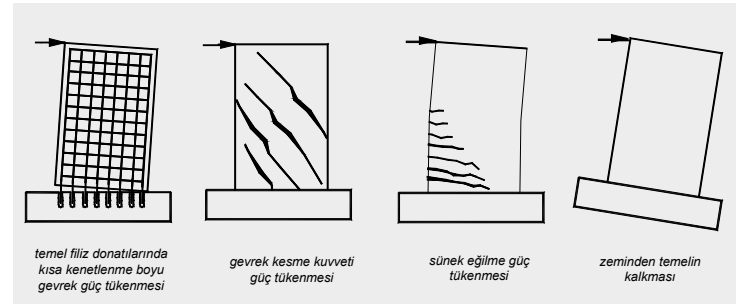
Zekai Celik

22

Deprem Yönetmeliği'nde sünek davranışın öne çıkarılması:

Gevrek davranış

Sünek davranış



temel filiz donatılarında  
kısa kenetlenme boyu  
gevrek güç tükenmesi

gevrek kesme kuvveti  
güç tükenmesi

sünek eğilme güç  
tükenmesi

zeminden temelin  
kalkması

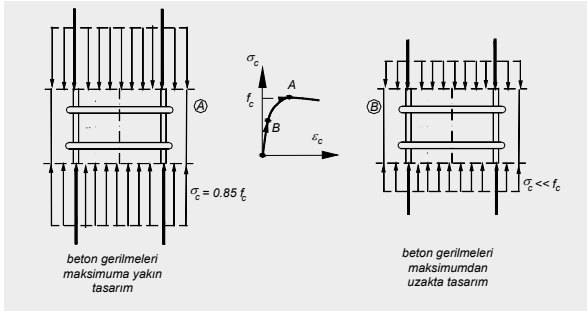
Eğilme kapasitesinin zayıf, kesme kuvveti kapasitesinin ve filiz donatılarının kapasitesinin güçlü halka olarak düzenlenmesi

$$V_e = \beta_v \frac{(M_p)_t}{(M_d)_t} V_d$$

Zekai Celik

Deprem Yönetmeliği'nde sünek davranışın öne çıkarılması:

Gevrek davranış Sünek davranış

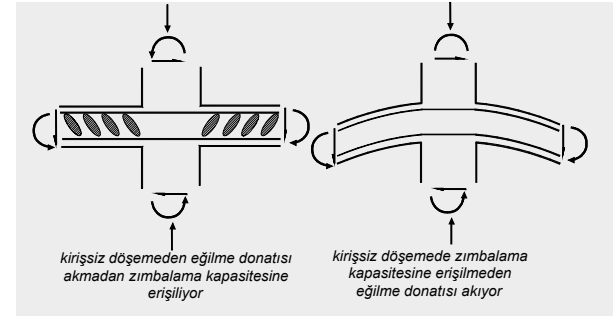


Kolonlarda ortalama gerilmenin sınırlandırılarak sınırlı sünekliliğin sağlanması

$$A_c \geq N_{G+Q+E} / (0.5 f_{ck})$$

TS500 de sünek davranışın öne çıkarılması:

Gevrek davranış Sünek davranış

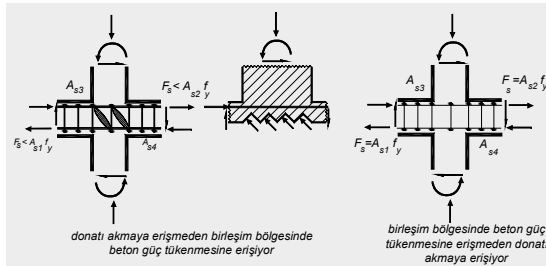


Kirişsiz döşemelerde kolon başlığında eğilme kapasitesinin zayıf, zımbalama kapasitesinin güçlü halka olarak düzenlenmesi

$$V_{pr} \geq V_{pd}$$

Deprem Yönetmeliği'nde sünek davranışın öne çıkarılması:

Gevrek davranış Sünek davranış



Kiriş-kolon birleşim bölgesinde donatı akması kapasitesinin zayıf, kesme kuvveti kapasitesinin güçlü halka olarak düzenlenmesi

$$V_e = 1.25 f_{yk} \max [A_{s1} + A_{s2}; A_{s3} + A_{s4}] - V_{kol} \leq 0.60 f_{cd} b_j h_c$$

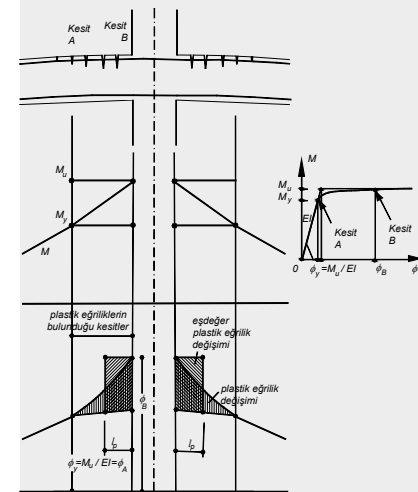
4. Plastik mafsal kabulü

Mesnette plastik mafsal:

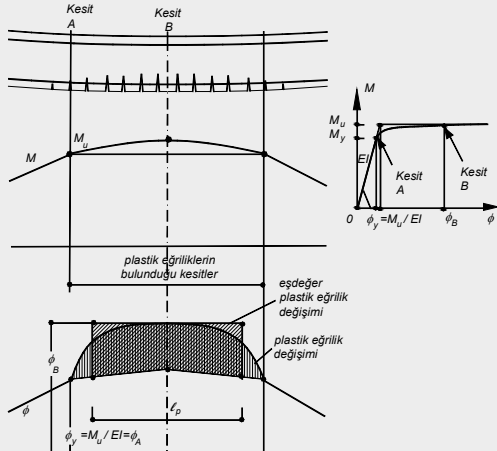
$$\phi = M / EI$$

Plastik mafsal bölgesinin boyu, eğrilik-moment değişimine, eleman boyunca eğilme momentinin değişimine, kesit yüksekliğine ve kesitteki normal kuvvete bağlıdır.

$$l_p = 0.5 h$$



**Açıklıkta plastik mafsalsız**



Zekai Celep

Deprem etkisindeki çerçeve sisteminin tasarımında doğrusal elastik ötesi davranışı gözönüne alınarak plastik mafsalsız kabulünün tasarımda kullanımı:

- Taşıyıcı sisteme uygun sünek ve kat mekanizmasına izin vermeyen bir mekanizma durumu kabul edilir.
- Plastik mafsalsız dışındaki bölgelerin doğrusal elastik davrandığı kabul edilir.
- Bu etkiler altında sünekliğin sağlandığı, plastik mafsalsız kesitlerinin yeterli dönme kapasitesine sahip olduğu kabul edilir.

Zekai Celep

31

**Plastik mafsalsız kabulü:**

- Kesitte eğilme momentinin küçük değerlerinde elastik ve büyük değerlerinde elastik ve plastik şekil değiştirmeler meydana gelir.
- Kiriş ve kolon eksenli boyunca dağılı olan plastik şekil değiştirmelerin belirli kesitte toplandığının kabul edilmesi *Plastik Mafsalsız* kabulünü oluşturur.
- Plastik mafsalsız taşıyıcı sistem hesaplarında bir kesitte kabul edilirken, betonarme kesit hesaplarında plastik mafsalsız boyunun kabulüne ihtiyaç vardır. Bu boy eleman boyunca moment dağılımına ve kesit yüksekliğine bağlıdır.
- Plastik mafsalsızlar, çerçeve sistemlerde deprem etkisinde en çok zorlanan kolon ve kirişlerin uçlarında meydana gelir.

Zekai Celep

30

**5. Kapasite tasarımı ilkeleri**

**Deprem Yönetmeliği'nin öngörüsü:**

- 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem kuvvetlerinin karşılanması (öngörülen kuvvetlerin karşılanacak şekilde, kesit boyutlarının belirlenmesi ve gerekli donatının sağlanması),
- Taşıyıcı olmayan elemanlardaki hasarın ve ikinci derece etkilerin sınırlandırılması için, yatay yerdeğiştirmelerin sınırlandırılması,
- *Öngörülenden daha büyük deprem meydana geldiğinde güç tüketmesi mekanizmasının kontrolü (sünek güç tüketmesinin gevrekten önce ortaya çıkmasının sağlanması / Kapasite Tasarımı),*

**Neden sünek güç tüketmesi:**

- Güç tüketme durumunun büyük yerdeğiştirmelerle meydana gelerek) haberli olması,
- Deprem yükünün karşılanmasında elemanlar arası yardımlaşmanın sağlanması,
- Güç tüketmesinin büyük enerji tüketimi ile ortaya çıkması,

Zekai Celep

32



### Kapasite tasarımı ilkeleri

- Kabul edilen yükler altında sistemde kritik kesitler incelenerek sünek güç tükenmesi güç tükenme durumunun seçimi,
- Kat mekanizması oluşturan güç tükenme durumu ortaya çıkmaması sağlanması,
- Gevrek güç tükenme durumunu sünekten daha kuvvetli tutarak, öngörülen yükler üzerinde yükleme durumunda güç tükenmesinin sünek olmasını sağlanması,
- Bu kritik kesitlerin hepsinin kapasiteye erişecek şekilde boyutlandırılması,
- Kritik kesitlerde elastik ötesi şekil değiştirmeler ortaya çıkacağı için, bu kesitlerde elastik ötesi şekil değiştirme kapasitesinin (gerekli sünekliğin) sağlanması,

### Kapasite tasarımı:

- Büyük deprem etkisindeki yapılarda sünek yapılarda kullanılır.
- Tasarımda taşıyıcı sistemin bazı elemanları büyük şekil değiştirmelerle enerji tüketecek ve elastik ötesi şekil değiştirme yapacak şekilde tasarlanır. Bu kritik kesitlere plastik mafsallara denir.
- Bunun dışındaki kesitler daha büyük mukavemette yapılarak güç tükenmesi önlenir. Bunun gibi sünek güç tükenmesinin mukavemeti daha büyük yapılarak önlenir.
- Elastik ötesi davranıştan dolayı, elastik deprem etkileri ortaya çıkmaz ( $R_a$  = Deprem yükü azaltma katsayısı).

### *Betonarmede sünek güç tükenmesinin sağlanarak gevrek güç tükenmesinin önlenmesi:*

- **Kesitte sünek güç tükenmesinin sağlanması:**
- Eğilme momenti altında sünek güç tükenmesinin sağlanması (donatının öngörülen maksimumun altında olması durumunda, güç tükenmesi donatının akmaya erişip uzaması ile ortaya çıkacaktır),
- Eğilme momentinin etkili olduğu normal kuvvet etkisinin sınırlandırılarak sünek güç tükenmesinin sağlanması,
- Elemanda kesme kuvveti için gerekli talebi karşılayacak tasarımın yapılması (gerekli donatının sağlanması),
- Elemanda normal kuvvet için gerekli talebi karşılayacak tasarımın yapılması,
- Donatının kenetlenme boyunun kısa olması sebebiyle sıyrılması sonucu güç tükenmesinin gerekli boy sağlanarak önlenmesi,
- Zımbalama etkisinde güç tükenmesinin (kirişsiz döşemelerde, radye temellerde) gerekli tasarımı yapılarak önlenmesi,

### *Kapasite tasarımının adımları:*

- Büyük depremde oluşacak mekanizma durumu seçilir.
- Plastik mafsaldaki minimum elastik ötesi dönme ile gerekli yerdeğiştirme sünekliğinin elde edilmesi amaçlanır.
- Plastik mafsalları tanımlanır. Bu kesitlerde süneklik sağlanır. Donatı kenetlenmesi ve dönme kapasitesi sağlanır. Bunun için en uygun yöntem sık ve kenetlenmesi tam sargı donatısı uygulamasıdır.
- Donatı düzeni plastik mafsallarda ve diğer bölgelerde farklı olarak düzenlenir.

- Plastik mafsallı içeren elemanlarda istenmeyen elastik ötesi şekil değiştirme biçimleri bunların dayanımları yüksek tutularak önlenir.
- Gevrek elemanların veya enerji tükenmeyen elemanların dayanımları, plastik mafsallı kapasitelerin talebinden yüksek tutulur. Bunlar elastik kalacak şekilde tasarlanırlar.
- Deprem kuvvetleri ne kadar hassas olarak hesaplanırsa hesaplanırsa, büyük belirsizlikler içerir.
- Kapasite tasarımında, taşıyıcı sistemin davranışı tasarımcı tarafından belirlenir. Taşıyıcı sistemin istenen mekanizma durumu sağlanırken, istenmeyen mekanizma durumu önlenir.

#### 6. Statik itme çözümü:

- Taşıyıcı sistem elastik ötesi davranış da gözönüne alınarak kadar adım adım yüklenir.
- Son itme adımında deprem etkisinin iç kuvvet dağılımı, şekil değiştirme ve yerdeğiştirme talebi hesaplanır.
- Bulunan bu talebin ortaya çıkması için gerekli kesit kuvvet, eğilme momenti ve şekil değiştirme kapasiteleri sağlanır.
- Tüm sistem incelenerek elemanların güç tükenme durumları belirlenir.
- Plastik mafsallı kabulünün kullanıldığı çözümde elastik ötesi davranışın sünek elemanlarda oluşması ve gevrek elemanların elastik kalması sağlanır.

- Kolon ve kirişte kesme kuvveti dayanımı, plastik mafsallı talebinden yüksek tutulur.
- Kiriş-kolon birleşim bölgesi enerji tüketimi bakımından zayıf bir bölgedir. Kesme kuvvetinden oluşabilecek elastik ötesi şekil değiştirme ve donatı aderans çözülmesi önlenmelidir. Dayanımı plastik mafsallı talebinden daha büyük tutulmalıdır.
- Kapasite tasarımından kesit kapasiteleri hesaplandıktan sonra basit denge denklemleri ile diğer kesitlerde talep edilen dayanım kolayca hesap edilir.
- Gevrek elemanlar kuvvete esaslı tasarlanırlar.
- Sünek kesitlerde ortaya çıkan dayanımın hesap dayanımı değil, gerçek dayanımdır:  
 $f_{cd} / f_{ck}$  ve  $f_{yd} / f_{yk} / f_{su}$  aralarındaki farkı,

#### Statik itme çözümü:

- *Sünek güç tükenmesi (Plastik şekil değiştirme talepleri hesap edilerek, şekil değiştirme kapasiteleri karşılaştırılır.)*

Kesitten talep edilen beton ve donatı için birim uzama/kısalma değerleri ilgili sınır kapasite değerleriyle karşılaştırılarak, kesit hasar bölgeleri belirlenir. Bunların sağlanabilir olduğu ve kabul edilebilir olduğu incelenir.

- *Sünek olmayan güç tükenmesi (İç kuvvet talepleri hesap edilerek, iç kuvvet kapasiteleri ile karşılaştırılır.)*

Sünek olmayan elemanların elastik kalması sağlanır.

**Statik itme çözümü:**

- Taşıyıcı sistemin elastik ötesi yatay yük kapasitesinin belirlenmesi için yapılan çözümdür.
- Taşıyıcı sistemin elastik ötesi kapasitesi hesaba katılır.
- Yatay yük etkisinde kesitlerde oluşan plastik şekil değiştirmeler plastik mafsallık kabulü ile gözönüne alınır.
- Taşıyıcı sistemin hiperstatiklik derecesinin yüksekliği, plastik mafsalların sayısının çokluğu ve moment kapasitesi yüksekliği oranında sistemin elastik ötesi yatay yük kapasitesi, elastik kapasiteden daha büyük olur.

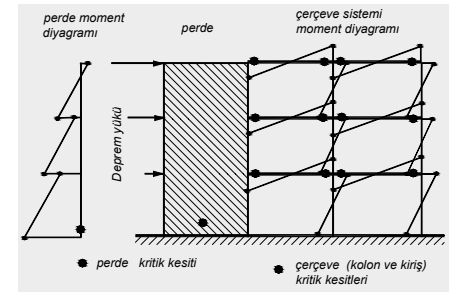
**Statik itme çözümü için Deprem Yönetmeliği'ndeki kabuller:**

- Plastik şekil değiştirmelerin belirli kesitlerde toplandığının kabul edilmesi ve plastik mafsallık kabulünün kullanılması
- Plastik mafsallık boyu kabulü:  $L_p = 0.5 h$
- Plastik mafsalların, deprem etkisinde en çok zorlanan kolon ve kirişlerin uçlarına, perdelerde ise her katta kat seviyesinde yerleştirilmesi
- Plastik mafsallık kesitlerinin güç tükenmesi çizgilerinin (yüzeylerinin) tanımlanması ve bunların doğrusallaştırılması
- Betonarme tablalı kesitlerde tabladaki beton ve donatının hesaba katılması
- Betonarme elemanlarda çatlamış kesit eğilme rijitliklerinin hesaba katılması

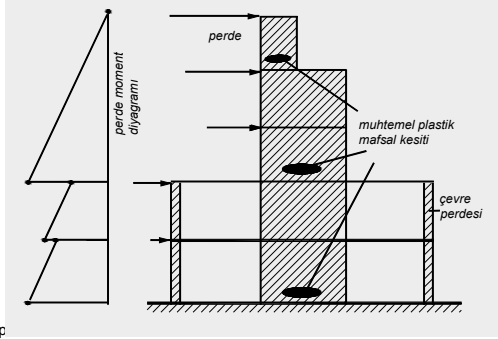
**Statik itme yükü arttıkça;**

- Plastik şekil değiştirmeler gözönüne alındığı için yatay yük kapasitesi artar. Buna karşılık plastik mafsallık kesitlerde elastik ötesi şekil değiştirmeler meydana gelir ve yatay yerdeğiştirmeler artar.
- Plastik şekil değiştirme, donatının akması ve betonda büyük şekil değiştirmelerin oluşması olarak ortaya çıkar ve sınırlı hasar durumuna karşı gelir.
- Elastik ötesi kapasiteden faydalandığı için, kesit plastik şekil değiştirmelerinin ve yatay yerdeğiştirmelerin kabul edilebilir seviyede kaldığının kontrolü gerekir.

**Plastik şekil değiştirme bölgesi (plastik mafsallar) kesit etkisinin büyük olduğu ve sünek güç tükenmesi oluşacak şekilde seçilir.**



Plastik şekil değiştirme bölgesi (plastik mafsallar) kesit etkisinin büyük olduğu ve sünek güç tükenmesi oluşacak şekilde seçilir.



Örnek 1:

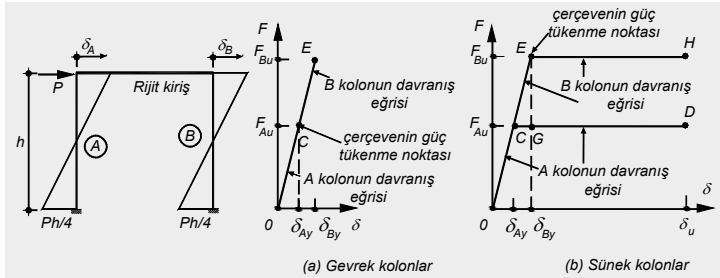
B kolon kapasitesi = 2 X A kolon kapasitesi

A kolonu sünek değil:

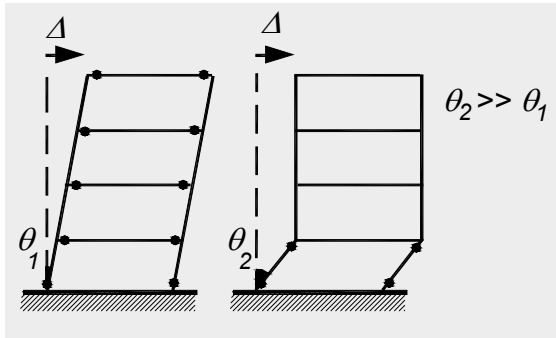
$$P_u = 2 F_{Au}$$

A kolonu sünek:

$$P_u = F_{Au} + F_{Bu} = 3 F_{Au}$$



Plastik şekil değiştirme bölgesi (plastik mafsallar) küçük şekil değiştirme ile büyük yerdeğiştirme sünekliliği oluşturacak şekilde ve toplam güçlemeye sebep olmayacak şekilde seçilir.



Örnek 2:

İkinci mertebe etkilerle statik itme eğrisi

C25 / S420

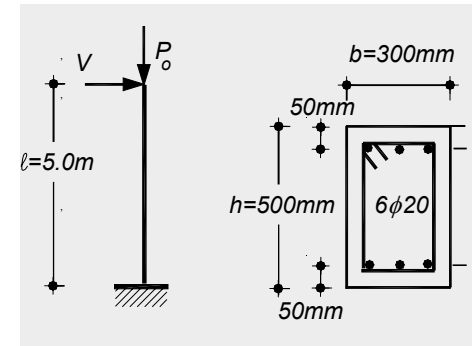
$$\varepsilon_{cu} = 0.004 \quad \varepsilon_y = 0.0021$$

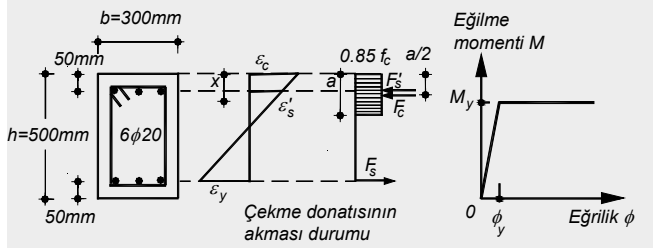
$$f_c = 25MPa$$

$$f_y = 420MPa$$

$$E_s = 200GPa$$

$$P_o = 1500kN$$





**Kesitte akma durumu (A noktası):**

$$\varepsilon_s = \varepsilon_y$$

$$P_o = 0.85 f_c b a = 1500 \times 10^3 \quad F_s = F_s' \quad x = 277 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_y \frac{x - d'}{d - x} = 0.00276 > \varepsilon_y = 0.0021 \quad \varepsilon_c = \varepsilon_y \frac{x}{d - x} = 0.00336$$

**Kesitte plastik şekil değiştirme durumu ( B noktası):**

$$\phi_p = 24.28 \times 10^{-3} \text{ rad / m} \quad \ell_p = h / 2 \quad (\text{kabul edildi})$$

$$\delta_p = \theta_p \ell = \phi_p \ell_p \ell = 0.5 \phi_p h \ell$$

$$\delta = \delta_y + \delta_p = \delta_y + 0.5 \phi_p h \ell = 0.132 \text{ m}$$

$$V = (M_y - \delta P_o) / \ell = 31.82 \text{ kN} \quad \text{İkinci merteye etki ile}$$

$$\varepsilon_c = 0.01008 \quad \varepsilon_s = 0.00630 \quad \varepsilon_s' = 0.00828$$

$$M_y = A_s f_y (d - d') + P_o (0.5 h - a / 2)$$

$$M_y = 357.01 \text{ kNm}$$

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_y}{d - x} = 12.14 \times 10^{-3} \text{ rad / m} \quad \delta_y = \frac{P \ell^2}{EI} \frac{1}{3} = \phi_y \frac{\ell^2}{3} = 0.102 \text{ m}$$

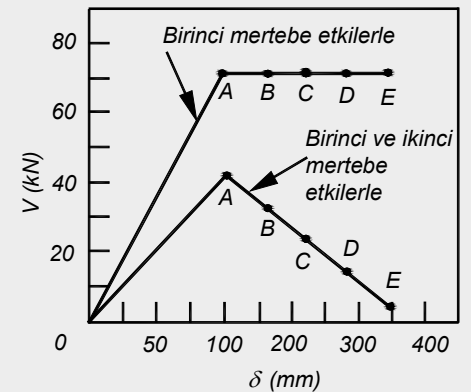
$$V_y = \frac{M_y}{\ell} = 71.40 \text{ kN}$$

**Birinci merteye etki ile**

$$V_y = \frac{M_y - \delta_y P_o}{\ell} = 40.97 \text{ kN}$$

**İkinci merteye etki ile**

Benzer şekilde C, D ve E noktaları plastik şekil değiştirme kabul edilerek, hesaplanarak karşı gelen yükler hesaplanabilir.



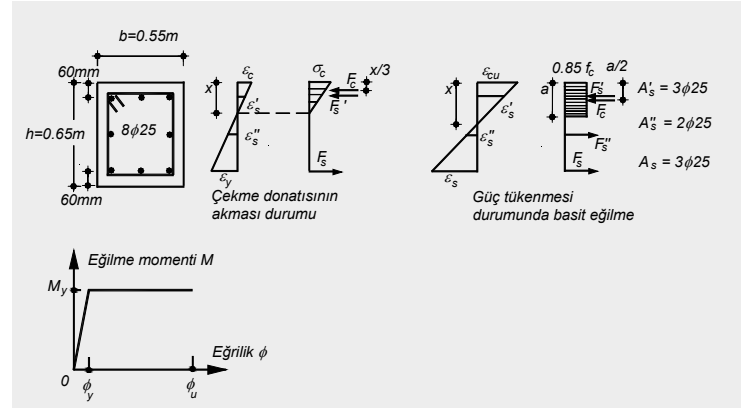
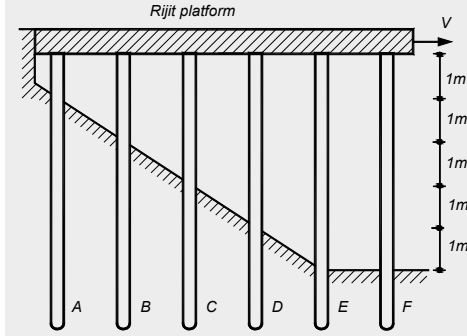
**Örnek 3:**  
Farklı kazık boyları olan iskelede statik itme eğrisi

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 \quad \varepsilon_y = 0.0021$$

$$f_c = 25MPa$$

$$f_y = 420MPa$$

$$E_s = 200GPa$$



$$A_s = A_s' = 3\phi 25 = 3 \times 491mm^2 \quad A_s'' = 2\phi 25 = 2 \times 491mm^2$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 \quad \varepsilon_y = 0.0021 \quad f_c = 25MPa$$

$$f_y = 420MPa \quad E_s = 200GPa \quad E_c = 30GPa$$

**Kesitin akma durumu:**

$$F_c + F_s' = F_s + F_s''$$

$$\frac{1}{2} \varepsilon_y \frac{x}{d-x} E_c b x + \varepsilon_y \frac{x-d'}{d-x} E_s A_s' = A_s f_y + \varepsilon_y \frac{0.5 h-x}{d-x} E_s A_s''$$

$$x = 135mm$$

$$\sigma_c = \varepsilon_y \frac{x}{d-x} E_c = 19MPa < f_c = 25MPa$$

$$\sigma_s' = \varepsilon_y \frac{x-d'}{d-x} E_s = 69MPa \quad \sigma_s'' = \varepsilon_y \frac{0.5 h-x}{d-x} E_s = 176MPa$$

Betonarme yapılarda kapasite tasarımı ilkesi

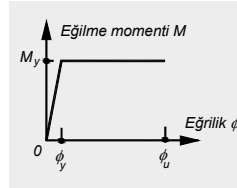
$$F_c = 0.5 \sigma_c b x = 689.7kN \quad F_s = A_s f_y = 618.7kN$$

$$F_s' = A_s' \sigma_s' = 101.4kN \quad F_s'' = A_s'' \sigma_s'' = 172.4kN$$

$$M_y = F_c (0.5h - x/3) + (F_s + F_s')(0.5h - d')$$

$$M_y = 383.03kNm$$

$$\phi_y = \varepsilon_y / (d - x) = 4.69 \times 10^{-3} \text{ radyan} / m$$



Betonarme yapılarda kapasite tasarımı ilkesi

**A kazığında mafsallaşma:**

$$V_{A1} = 2 M_y / \ell_A = 2 \times 415 / 1 = 830.0kN$$

$$V_{B1} = V_{A1} \ell_A^3 / \ell_B^3 = 830.0 / 2^3 = 103.7kN$$

$$V_{C1} = V_{A1} \ell_A^3 / \ell_C^3 = 830.0 / 3^3 = 30.7kN$$

$$V_{D1} = V_{A1} \ell_A^3 / \ell_D^3 = 830.0 / 4^3 = 12.3kN$$

$$V_{E1} = V_{F1} = V_A \ell_A^3 / \ell_E^3 = 830.0 / 5^3 = 6.6kN$$

$$V_1 = V_{A1} + V_{B1} + V_{C1} + V_{D1} + V_{E1} + V_{F1} = 990.0kN$$

$$\delta_1 = \frac{V_{A1}}{12 EI / \ell_A^3} = \frac{830.0}{12 \times 151 \times 10^3 / 1^3} = 0.46 \times 10^{-3} m$$

Betonarme yapılarda kapasite tasarımı ilkesi

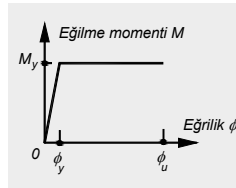
**Kesitin güç tükenmesi durumu:**

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 \quad x = 87mm$$

$$M_u = 448kNm$$

$$\phi_u = \varepsilon_{cu} / x = 45.45 \times 10^{-3} \text{ radyan} / m$$

$$0 \leq M_y = M_u = 415kNm$$



$$E_c I = 0.40 \times 30 \times 10^3 \times 550 \times 650^3 / 12 = 151 \times 10^3 kNm^2$$

Betonarme yapılarda kapasite tasarımı ilkesi

**B kazığında mafsallaşma:**

$$V_{B2} = 2 M_y / \ell_B = 2 \times 415 / 2 = 415.0kNm$$

$$\Delta V_{B1} = 415.0 - 103.7 = 311.3kN$$

$$\Delta V_{C1} = \Delta V_{B1} \ell_B^3 / \ell_C^3 = 311.3 \times 2^3 / 3^3 = 92.2kN$$

$$\Delta V_{D1} = \Delta V_{B1} \ell_B^3 / \ell_D^3 = 38.9kN$$

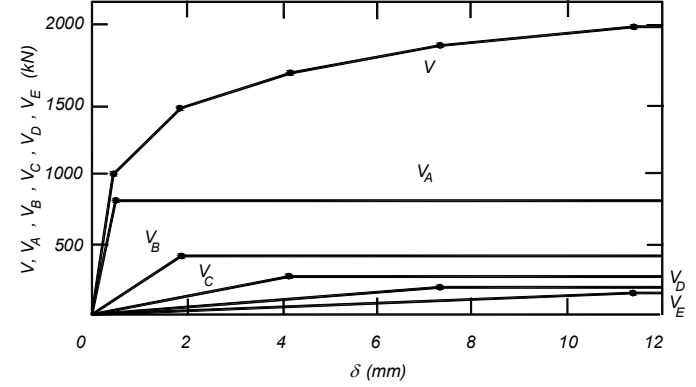
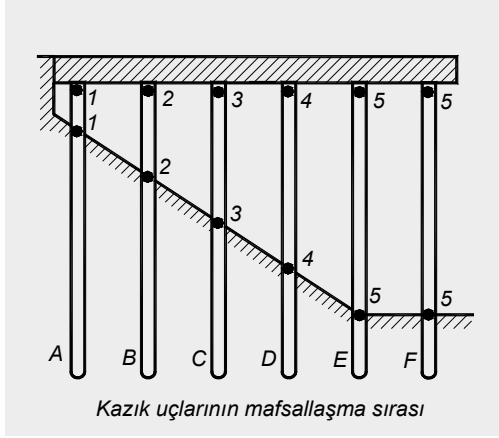
$$\Delta V_{E1} = \Delta V_{F1} = \Delta V_{B1} \ell_B^3 / \ell_E^3 = 311.3 \times 2^3 / 5^3 = 19.9kN$$

$$\Delta V_1 = \Delta V_{B1} + \Delta V_{C1} + \Delta V_{D1} + \Delta V_{E1} + \Delta V_{F1} = 482.3kN$$

$$V_2 = V_1 + \Delta V_1 = 990.0 + 482.3 = 1472.3kN$$

$$\Delta \delta_1 = \frac{\Delta V_{B1}}{12 EI / \ell_B^3} = \frac{311.3}{12 \times 151 \times 10^3 / 2^3} = 1.37 \times 10^{-3} m$$

**Kazık uçlarında plastik mafsall oluşumu:**



**Tüm sistemde ve kazıklarda statik itme eğrisi:**

**C kazığında mafsallaşma:**

$$\Delta\theta_{Ap1} = \Delta\delta_1 / \ell_A = 1.37 \times 10^{-3} / 1 = 1.37 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

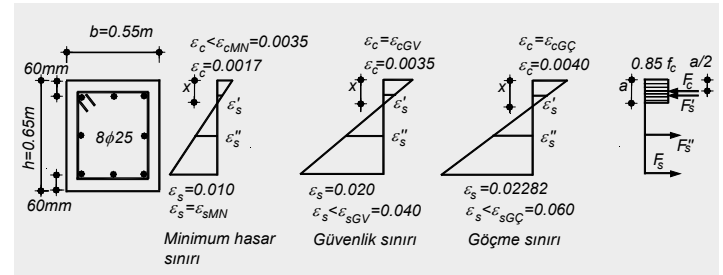
$$V_{C2} = V_{C1} + \Delta V_{C1} = 30.7 + 92.2 = 123.0 \text{ kN}$$

$$V_{D2} = V_{D1} + \Delta V_{D1} = 12.3 + 38.9 = 51.2 \text{ kN}$$

$$V_{E2} = V_{F2} = V_{E1} + \Delta V_{E1} = 6.6 + 19.9 = 26.6 \text{ kN}$$

$$\delta_2 = \delta_1 + \Delta\delta_1 = (0.46 + 1.37) 10^{-3} = 1.83 \times 10^{-3} \text{ m}$$

**Kesitte hasar durumları:**





Betonarme yapılarda kapasite tasarımı ilkesi

Minimum hasar sınırı (MN):

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{sMN} = 0.010 \quad \varepsilon_c = 0.0017 < \varepsilon_{cMN} = 0.0035$$

$$x = d \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s} = 86mm \quad \varepsilon_s' = \varepsilon_c \frac{x - d'}{x} = 0.51 \times 10^{-3} < \varepsilon_y$$

$$\varepsilon_s'' = \varepsilon_c \frac{0.5h - x}{x} = 4.72 \times 10^{-3} > \varepsilon_y$$

$$F_c = 0.85 f_c b a = 854.35kN \quad F_s' = A_s' \sigma_s = 151.72kN$$

$$F_s'' = A_s'' \sigma_s = 412.44kN \quad F_s = A_s \sigma_s = 618.66kN$$

Betonarme yapılarda kapasite tasarımı ilkesi

Göçme hasar sınırı (GÇ):

$$\varepsilon_c = 0.0040 = \varepsilon_{cGÇ} \quad x = 88mm \quad \varepsilon_s = 0.02282 < \varepsilon_{sGÇ} = 0.060$$

$$\phi_{GÇ} = 45.45 \times 10^{-3} rad / m$$

$$\phi_{GÇp} = \phi_{GÇ} - \phi_y = (45.45 - 4.69) \times 10^{-3} = 40.76 \times 10^{-3} rad / m$$

$$\theta_{GÇp} = 0.5 h \phi_{GÇp} = 0.325 \times 40.76 \times 10^{-3} = 13.25 \times 10^{-3} = rad$$

Betonarme yapılarda kapasite tasarımı ilkesi

$$N = -F_c - F_s' + F_s'' + F_s = 25.03kN$$

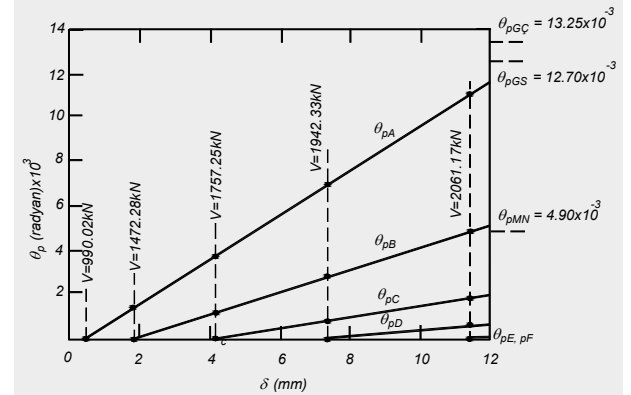
$$M_{MN} = F_c(0.5h - 0.5a) + (F_s' + F_s'')(0.5h - d') = 450.59kNm$$

$$\phi_{MN} = \varepsilon_c / x = 9.77 \times 10^{-3} rad / m$$

$$\phi_{MNp} = \phi_{MN} - \phi_y = 15.08 \times 10^{-3} rad / m$$

$$\theta_{MNp} = 0.5 h \phi_{MNp} = 4.90 \times 10^{-3} = rad$$

Betonarme yapılarda kapasite tasarımı ilkesi



Kazık kesitlerinde yatay öteleme – plastik mafsallı dönme ilişkisi

**Örnek 4:**  
**Elastik mesnetli perde de statik itme eğrisi**

$$f_c = 25MPa \quad A_s = A_s' = 6\phi 20 = 1885mm^2$$

$$f_y = 420MPa$$

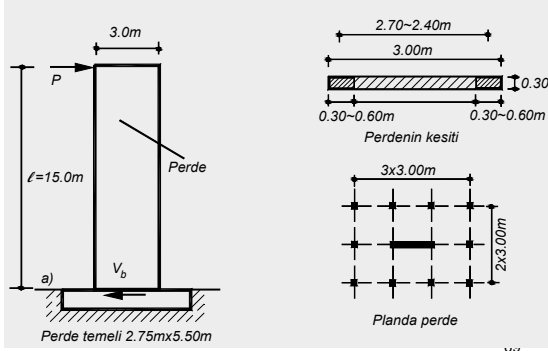
$$E_s = 200GPa$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.004$$

$$\varepsilon_y = 0.0021$$

$$E_c = 30GPa$$

Zekai Celep



**Perde mesnet kesitinde:**

$$N_o = 1418kN$$

$$F_{sy} = F_{su} = A_s f_y = 1885 \times 0.420 \approx 792kN$$

**Kesitte güç tükenmesi durumu:**

$$N_o = F_c - F_{su}$$

$$N_o = 0.85 f_c b a - F_{su}$$

$$a = 347mm \quad x = 408mm \quad z = d - 0.5 a = 2.53m \approx 2.55m$$

$$\phi_u = \varepsilon_{cu} / x = 9.80 \times 10^{-3} rad / m$$

Zekai Celep

71

**Kesitte akma durumu:**  $N_o = 1418kN$

$$N_o + F_{sy} = 0.5 \sigma_c b x \quad x = 669mm$$

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c = E_c \varepsilon_s \frac{x}{d-x} = 21MPa$$

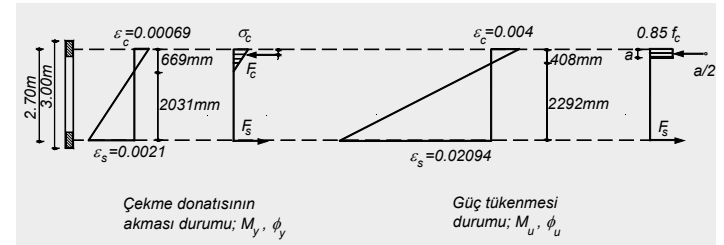
$$z \approx 0.85 h = 0.85 \times 3.00 = 2.55m$$

$$M_y = M_u = (2 F_{su} + N_o) z / 2 = 3828kNm$$

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\sigma_c / E_c}{x} = 1.10 \times 10^{-3} rad / m$$

Zekai Celep

70



Zekai Celep

72

Betonarme yapılarda kapasite tasarımı ilkesi

$$\delta_y = P \ell^3 / (3EI) = \phi_y \ell^2 / 3 = 82.6 \times 10^{-3} m$$

$$\phi_p = \phi_u - \phi_y = (9.80 - 1.10) 10^{-3} = 8.70 \times 10^{-3} rad / m$$

$$\theta_p = \phi_p \ell_p = \phi_p 0.5 h = 8.70 \times 10^{-3} \times 0.5 \times 3.00 = 13.1 \times 10^{-3} rad$$

$$\delta_u = \delta_y + \theta_p \ell = 82.6 \times 10^{-3} + 13.1 \times 10^{-3} \times 15.0 = 279.1 \times 10^{-3} m$$

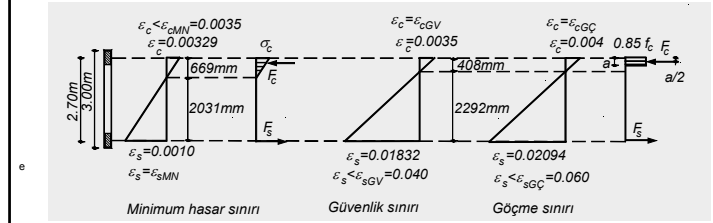
$$P_y \approx P_u = M_y / \ell \approx M_u / \ell = 3828 / 15.0 = 255 kN$$

Perdenin yerdeğiştirme sünekliği:

$$\mu_w = \frac{\delta_u}{\delta_y} = \frac{\delta_y + \delta_p}{\delta_y} = \frac{279.1}{82.6} = 3.37$$

Betonarme yapılarda kapasite tasarımı ilkesi

Kesit hasar sınırları:



Minimum hasar sınırı (MN):  $\epsilon_c \leq 0.0035$   $\epsilon_s \leq 0.010$

$$\phi_{MN} = \min [0.0035 / 0.669; 0.010 / 2.031] = \min [5.23; 4.92] \times 10^{-3} = 4.92 \times 10^{-3} rad / m$$

Betonarme yapılarda kapasite tasarımı ilkesi

Elastik mesnetli perde:

Temel boyutları ve yatak katsayısı, temel dönme rijitliği:

$$5.50m \times 2.75m \quad k_v = 10MN / m^3$$

$$k_\theta = k_v I_{temel} = 10 \times 2.75 \times 5.50^3 / 12 = 381 MNm / rad$$

Temel dönmesi ve bunun sonucu perde uç yerdeğiştirmesi ve süneklik:

$$\theta_f = M_y / k_\theta = 3828 / 381 \times 10^3 = 10.18 \times 10^{-3} rad$$

$$\delta_f = \theta_f \ell = 10.18 \times 10^{-3} \times 15.0 = 152.7 \times 10^{-3} m$$

$$\mu_{wf} = \frac{\delta_u + \delta_f}{\delta_y + \delta_f} = \frac{\delta_y + \delta_p + \delta_f}{\delta_y + \delta_f} = \frac{279.1 + 152.7}{82.6 + 152.7} = 1.78$$

Betonarme yapılarda kapasite tasarımı ilkesi

Güvenlik sınırı (GV):  $\epsilon_c \leq 0.0035$   $\epsilon_s \leq 0.040$

$$\phi_{GV} = \min [0.0035 / 0.408; 0.040 / 2.292] = \min [8.58; 17.45] \times 10^{-3} = 8.58 \times 10^{-3} rad / m$$

Göçme sınırı (GÇ):  $\epsilon_c \leq 0.004$   $\epsilon_s \leq 0.060$

$$\phi_{GÇ} = \min [0.004 / 0.408; 0.060 / 2.292] = \min [9.80; 26.18] \times 10^{-3} = 9.80 \times 10^{-3} rad / m$$

**Rijit zemin durumunda uç yerdeğiştirmesi:**

$$\delta_{MN} = \delta_y + \phi_{MNp} \ell h/2 = 82.6 + (4.92 - 1.10) \times 10^{-3} \times 15.0 \times 3.0/2 = 168.6 \times 10^{-3} m$$

$$\delta_{GV} = \delta_y + \phi_{GVp} \ell h/2 = 82.6 + (8.58 - 1.10) \times 10^{-3} \times 15.0 \times 3.0/2 = 250.9 \times 10^{-3} m$$

$$\delta_{GC} = \delta_y + \phi_{GCp} \ell h/2 = 82.6 + (9.80 - 1.10) \times 10^{-3} \times 15.0 \times 3.0/2 = 278.4 \times 10^{-3} m$$

**Elastik zemin durumunda uç yerdeğiştirmesi:**

$$\delta_{MN} = \delta_y + \delta_f + \phi_{MNp} \ell h/2 = [82.6 + 152.7 + (4.92 - 1.10) \times 15 \times 3/2] \times 10^{-3} = 321.3 \times 10^{-3} m$$

$$\delta_{GV} = \delta_y + \delta_f + \phi_{GVp} \ell h/2 = [82.6 + 152.7 + (8.58 - 1.10) \times 15 \times 3/2] \times 10^{-3} = 403.6 \times 10^{-3} m$$

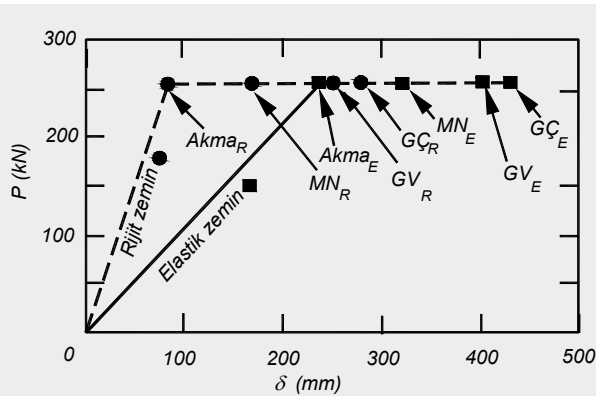
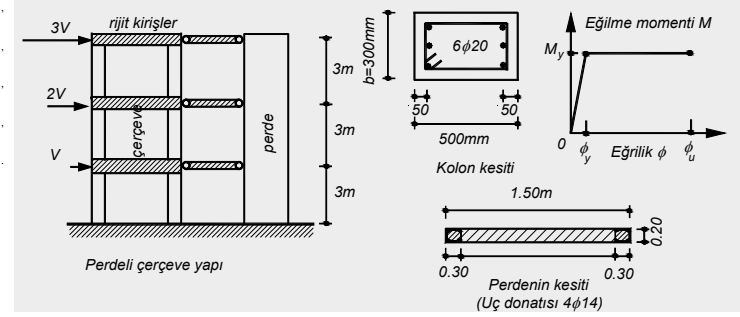
$$\delta_{GC} = \delta_y + \delta_f + \phi_{GCp} \ell h/2 = [82.6 + 152.7 + (8.80 - 1.10) \times 15 \times 3/2] \times 10^{-3} = 431.1 \times 10^{-3} m$$

**Örnek 5:**

**Perdeli çerçeve sistemde statik itme eğrisi**

$$f_c = 25MPa \quad f_y = 420MPa \quad \epsilon_{cu} = 0.004 \quad \epsilon_y = 0.0021$$

$$E_s = 200GPa \quad E_c = 30GPa$$



Statik itme eğrisi

**Kolon kesiti için:**

$$M_y = M_u = 166kNm \quad \phi_y = 6.16 \text{radyan} / mm$$

$$\phi_u = 71.43 \text{radyan} / mm$$

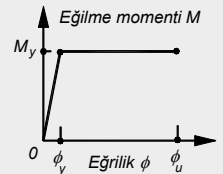
$$(E_c I)_{kolon} = 0.4 \times 30 \times 10^3 \times 0.30 \times 0.50^3 / 12 = 37.50 \times 10^3 kNm^2$$

**Perde kesiti için:**

$$\phi_y = \frac{\epsilon_y}{d-x} = 1.85 \times 10^{-3} \text{radyan} / m$$

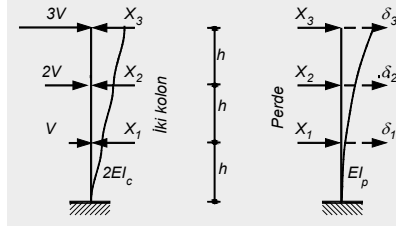
$$M_y = M_u = F_s \cdot jd = 258.30 \times 1.20 = 309.96 Nmm$$

$$\phi_u = \frac{\epsilon_{cu}}{x} = \frac{0.004}{0.072} = 55.56 \times 10^{-3} \text{radyan} / m$$



Betonarme taşıyıcı sistemlerde kapasite tasarımı ilkesi

$X_i$  Etkileşim kuvvetlerinin hesabı:



$$\delta_1 = \frac{6V - (X_1 + X_2 + X_3)}{2 \times 12 EI_c / h^3}$$

$$\delta_2 = \delta_1 + \frac{5V - (X_2 + X_3)}{2 \times 12 EI_c / h^3}$$

$$\delta_3 = \delta_1 + \delta_2 + \frac{3V - X_3}{2 \times 12 EI_c / h^3}$$

$$\delta_1 = \frac{X_1 h^3}{3 EI_p} + \frac{5 X_2 h^3}{6 EI_p} + \frac{8 X_3 h^3}{6 EI_p}$$

$$\delta_2 = \frac{5 X_1 h^3}{6 EI_p} + \frac{8 X_2 h^3}{3 EI_p} + \frac{28 X_3 h^3}{6 EI_p}$$

$$\delta_3 = \frac{8 X_1 h^3}{6 EI_p} + \frac{28 X_2 h^3}{6 EI_p} + \frac{27 X_3 h^3}{3 EI_p}$$

Betonarme taşıyıcı sistemlerde kapasite tasarımı ilkesi

İkinci kat kolon kesitinin mafsallaşması:

$$1.880 \times 1.5 V = 166 kNm$$

$$V = 58.85 kN$$

Perde mesnet kesitinin mafsallaşması:

$$4.557 \times 3.0 V = 310 kNm$$

$$V = 22.68 kN$$

Kat yerdeğiştirmeleri:

$$\delta_1 = \frac{V_{kolon} h^3}{12 EI_c} = \frac{1.096 \times 22.68 \times 3^3}{12 \times 37.50 \times 10^3} = 1.49 \times 10^{-3} m$$

$$\delta_2 = \delta_1 + \frac{V_{kolon} h^3}{12 EI_c} = 1.49 \times 10^{-3} + \frac{1.880 \times 22.68 \times 3^3}{12 \times 37.50 \times 10^3} = 4.05 \times 10^{-3} m$$

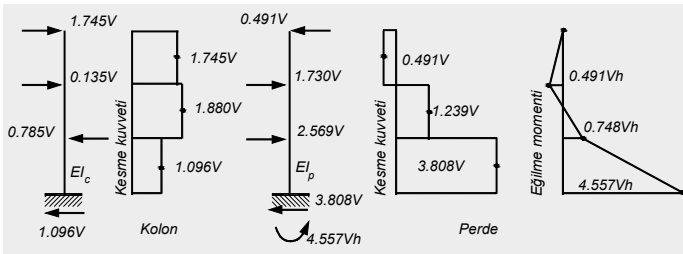
$$\delta_3 = \delta_2 + \frac{V_{kolon} h^3}{12 EI_c} = 4.05 \times 10^{-3} + \frac{1.745 \times 22.68 \times 3^3}{12 \times 37.50 \times 10^3} = 6.42 \times 10^{-3} m$$

$$V_{taban} = (2 \times 1.096 + 3.808) V = 2 \times 24.85 + 86.36 = 136.06 kN$$

83

Betonarme taşıyıcı sistemlerde kapasite tasarımı ilkesi

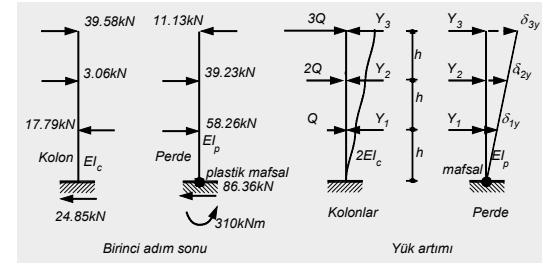
Kolonlarda ve perdede dış kuvvetler ve kesit etkileri



Zekai Celep

82

Betonarme taşıyıcı sistemlerde kapasite tasarımı ilkesi



$Y_i$  etkileşim kuvvetlerinin hesabı:

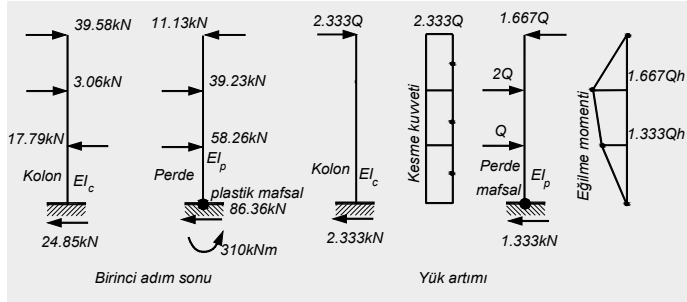
$$\delta_{1y} = \frac{(6Q - Y_1 - Y_2 - Y_3) h^3}{2 \times 12 EI_c}$$

$$\delta_{2y} = \delta_{1y} + \frac{(5Q - Y_2 - Y_3) h^3}{2 \times 12 EI_c} = 2\delta_{1y}$$

$$\delta_{3y} = \delta_{1y} + \delta_{2y} + \frac{(3Q - Y_3) h^3}{2 \times 12 EI_c} = 2\delta_{3y}$$

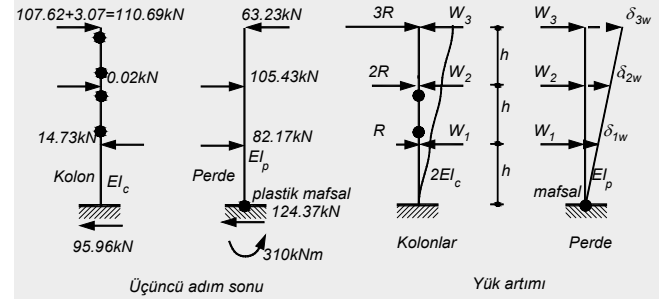
$$3 Y_3 + 2 Y_2 + Y_1 = 0$$

**Kolonlarda ve perdede dış kuvvetler ve kesit etkileri**



**Statik itme eğrisi**

**Wi etkileşim kuvvetlerinin hesabı:**



**İkinci kat kolonunun iki ucunda plastik mafsallı oluşturan yük değeri:**

$$(1.880 \times 22.667 + 2.333 Q) 1.5 = 166 kNm \quad Q = 29.162 kN$$

**Kat yerdeğiştirmeleri:**

$$\delta_1 = 1.49 \times 10^{-3} m + \frac{2.333 Q h^3}{12 EI_c} = 1.49 \times 10^{-3} m + \frac{2.333 \times 29.162 \times 3^3}{12 \times 37.50 \times 10^3} = (1.49 + 4.08) \times 10^{-3} m$$

$$\delta_2 = 4.05 \times 10^{-3} + 2 \times 4.08 \times 10^{-3} = 12.21 \times 10^{-3} m$$

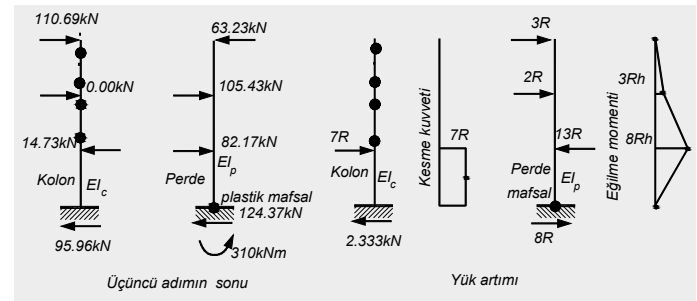
$$\delta_3 = 6.42 \times 10^{-3} + 3 \times 4.08 \times 10^{-3} = 18.67 \times 10^{-3} m$$

**Perde mesnetinde plastik mafsallı dönmeleri ve toplam kesme kuvveti:**

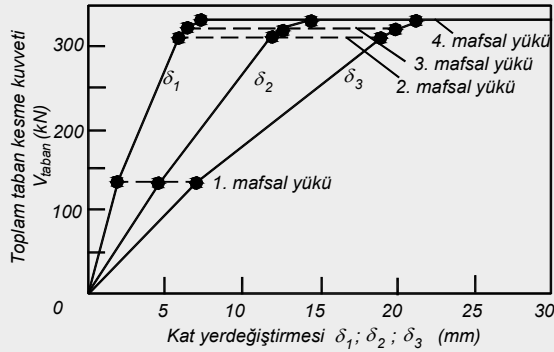
$$\theta_{perde p} = 4.08 / 3000 = 1.36 \times 10^{-3} \text{ radyan}$$

$$V_{taban} = 2 \times 92.89 + 125.25 = 311.04 kN$$

**Kolonlarda ve perdede dış kuvvetler ve kesit etkileri**



### Betonarme taşıyıcı sistemlerde kapasite tasarımı ilkesi



Kapasitenin ortaya çıkabilmesi için sünek olmayan (kesme kuvveti, donatı sınırlaması, birleşim bölgesi gibi) güç tükenmesi önlenmeli, sünek mafsal dönmeli sağlanmalı ve bu elastik ötesi şekil değiştirmeler kabul edilebilir olmalıdır.

89

### Betonarme yapılarda kapasite tasarımı ilkesi

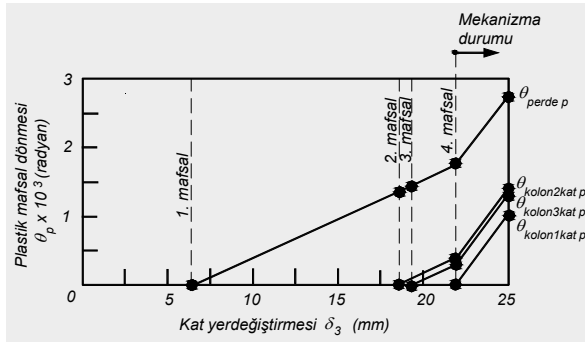
#### 5. Sonuçlar:

- Betonarme taşıyıcı sistemlerin kapasite tasarımı uzun zamandır yönetmeliklerde değişik seviyelerde bulunmaktadır.
- Doğrusal olmayan davranışın göz önüne alınması daha gerçekçi davranış ve kapasite hesabını mümkün kılar ve taşıyıcı sistemin kuvvetli ve zayıf taraflarını belirlemek mümkün olur.
- Kapasite tasarımı taşıyıcı sistemin büyük deprem etkilerindeki gözönüne alır.
- Kapasitenin ortaya çıkabilmesi için sünek olmayan (kesme kuvveti, donatı sınırlaması, birleşim bölgesi gibi) güç tükenmesi önlenmeli, sünek mafsal dönmeli sağlanmalı ve bu elastik ötesi şekil değiştirmeler kabul edilebilir olmalıdır.

Zekai Celep

91

### Betonarme taşıyıcı sistemlerde kapasite tasarımı ilkesi



#### Statik itme eğrisi

Zekai Celep

90

### Betonarme yapılarda kapasite tasarımı ilkesi

#### Kaynaklar

- N. Aydınoğlu, Z. Celep, E. Özer, H. Sucuođlu H (2007) Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik – Örnekler Kitabı, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı.
- Z. Celep (2008) Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal olmayan Davranış ve Çözümleme, Beta Yayıncılık, İstanbul.
- E. Özer (2007) Kapasite tasarımı ilkesi ve Türk Deprem Yönetmeliği, 6. Ulusal Deprem Mühendisliđi Konferansı, 257-266, Ekim 2007, İstanbul.
- T. Paulay, MNJ Priesley (1970) Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings, John Wiley & Sons, New York.
- MNJ. Priesley, GM. Calvi, MJ. Kowalsky (2007) Displacement-based seismic design of structures, IUSS Press, Pavia.
- MNJ. Priesley, F. Seible, M. Calvi (1996) Seismic Design and Retrofit of Bridges, Wiley Interscience, New York.
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007) Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.

Zekai Celep

92