

## YAPILARIN DEPREM ETKİSİ ALTINDA PERFORMANSA DAYALI TASARIMI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

İMO Mesleki Eğitim Semineri  
Kasım 2011

Göktürk ÖNEM

### Neden Yerdeğiştirmeye (Deformasyona) Göre Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımına İhtiyacımız Var?

Northridge (1994), Kobe (1995) ve Kocaeli (1999) gibi metropollerini etkileyen büyük depremler değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi gereken önemli miktarda yapı stoğu ortaya çıkarmıştır. Diğer yandan mevcut yapıların deprem performansının değerlendirilmesi ve güçlendirilmesinde yönetmeliklerde benimsenen geleneksel *dayanma göre tasarım yöntemi* yetersiz kalmaktadır ve yeni bir değerlendirme yaklaşımı ihtiyacı doğmuştur. Bu açıdan mevcut yapıların depreme karşı güçlendirilmesi mühendislik camiasının ve kamu yöneticilerinin öncelikli sorunu haline gelmiştir.

### Neden Yerdeğiştirmeye (Deformasyona) Göre Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımına İhtiyacımız Var?

*Dayanma göre tasarım* yönteminde yapıların sahip olması gereken dayanım seviyesi elastik deprem yükünün dayanım azaltma katsayısına ( $R$ ) bölünmesi ile hesaplanmaktadır.  $R$  katsayısı yapısal sistemin tipine ve malzeme özelliklerine bağlı olarak süneklik kapasitesine uygun olarak belirlenir ve tüm yapısal sistem için tanımlanır. Bu yük altında yapılan doğrusal (elastik) analize göre kapasite tasarım ilkeleri kullanılarak yapısal elemanların sahip olması gereken minimum dayanımları belirlenir. Bu yaklaşımda yapısal elemanların inelastik deformasyon kapasitelerinin depremin talep ettiği inelastik deformasyon istemlerine kıyasla yeterli olduğu **varsayılmaktadır**. Bu sebeple depremin yapı üzerinde oluşturduğu inelastik deformasyon talepleri **kalitatif** (nitel) olarak tarif edilmektedir ve açık değildir.

Mevcut yapıların deprem performansının değerlendirilmesinde *dayanma göre tasarım* yaklaşımının eksiklikleri ;

- Mevcut yapıların dayanım seviyesi ve süneklik kapasiteleri bizim tanımladığımız  $R$  katsayısı ile belirlenemez
- Hangi yapısal elemanların hasar göreceği ve elastik ötesi davranışları (inelastik deformasyon kapasiteleri) ve yeterlilikleri sayısal olarak belirlenememektedir
- Yapısal elemanlarda oluşan inelastik (elastik ötesi) davranışlar sebebi ile sistemde yük dağılımı ve yerdeğiştirme dağılımı değişebilir ve bu lineer analiz ile tahmin edilememektedir
- Aşırı deofrmasyon istemleri sebebiyle oluşabilecek kat mekanizması gibi lokal göçmeler belirlenemez.

### Neden Yerdeğiştirmeye (Deformasyona) Göre Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımına İhtiyacımız Var?

- Son 20 yılda araştırmacılar ve mühendisler yapı tasarımında hasarların *sayısal olarak* belirlenebildiği ve tasarım kriterlerinin yerdeğiştirme ve deformasyon limitleri ile tanımlandığı daha açık bir tasarım yönteminin kullanılması konusunda görüş birliğine varmışlardır ve bu konuda pek çok araştırma yapılmıştır. Bugün mevcut deprem şartnameleri dayanıma göre tasarım yerine **şekil değiştirmeye göre değerlendirme/tasarım** yöntemini içeren değişiklikler ile revize edilmektedir. Yönetmeliklerimize yeni giren *performansa göre tasarım* şekildedğiştirmeye göre tasarımı/değerlendirme yöntemini içeren bir değerlendirme/tasarım prosedürü sunmaktadır.

- Vision 2000 Committee, 1995, *Performance Based Seismic Engineering of Buildings*.
- ATC 40, 1996, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*
- FEMA 273, 1997, *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*
- FEMA-356, 2000, *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*

Kılavuz ve Ön yönetmelikler

- ASCE/SEI 41-06, 2007, *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*
- DBYBHY, 2007, *Deprem Bölgelerinde yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*

Yönetmelikler

## Performansa Göre Değerlendirme Kavramı

- Performansa göre değerlendirme yönteminde ilk adım *performans hedefinin* (ingilizcede *Seismic Performance Objective*) tarif edilmesidir.
- Performans hedefi bir veya birden çok deprem risk düzeyi ve bunlara karşı gelen yapı performans düzeylerinin tanımlanmasıdır.

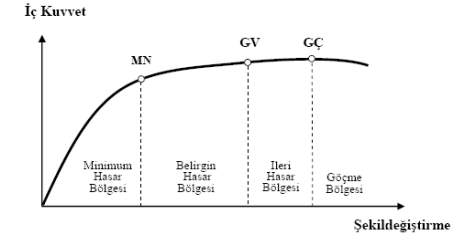
TABLO 7.7 – FARKLI DEPREM DÜZEYLERİNDE BİNALAR İÇİN ÖNGÖRÜLEN MİNİMUM PERFORMANS HEDEFLERİ

Binanın Kullanım Amacı ve Türü	Deprem Aşılma Olasılığı		
	50 yılda %50	50 yılda %10	50 yılda %2
<b>Deprem Sonrası Kullanımı Gereken Binalar:</b> Hastaneler, sağlık tesisleri, irtifaye binaları, haberleşme ve enerji tesisleri, ulaşım istasyonları, vilayet, layanlık ve belediye yönetim binaları, afet yönetim merkezleri, vb.	-	HK	CG
<b>İnsanların Uzun Süreli ve Yoğun Olarak Bulunduğu Binalar:</b> Okullar, yatakhaneler, yurtlar, pansiyonlar, askeri kışlalar, cezaevleri, müzeler, vb.	-	HK	CG
<b>İnsanların Kısa Süreli ve Yoğun Olarak Bulunduğu Binalar:</b> Sinema, tiyatro, konser salonları, kültür merkezleri, spor tesisleri	HK	CG	-
<b>Tehlikeli Madde İçeren Binalar:</b> Toksik, parlayıcı ve patlayıcı özellikleri olan maddelerin bulunduğu ve depolandığı binalar	-	HK	GÖ
<b>Diğer Binalar:</b> Yukarıdaki tanımlara girmeyen diğer binalar (konutlar, işyerleri, oteller, turistik tesisler, endüstri yapıları, vb.)	-	CG	-

HK: Hemen Kullanım, CG: Can Güvenliği, GÖ: Göçme Öncesi (Bkz. 7.7)

## Performansa Göre Değerlendirme Kavramı

- Yapı performans düzeyleri için yapısal elemanlara ait performans sınırları ve performans bölgeleri tanımlanmaktadır. Bu limitler *deformasyona göre değerlendirme* yöntemi kullanıldığı için *deformasyona göre değerlendirme* (deformasyona) dayalı (malzeme birim şekil değiştirme limitleri ya da plastik dönme) olarak tanımlanmıştır.



- Yönetmeliğimizde yapısal elemanlar için şekil değiştirme bazlı performans limitleri tanımlanmıştır.

## Performansa Dayalı Değerlendirme Yönteminde Önemli Tanımlar

Performansa dayalı değerlendirme yöntemi ile yönetmeliklerimize giren yeni tanımlar bulunmaktadır. Bu tanımlar mühendislik sismolojisi, yapı dinamiği, betonarme elemanların nonlineer davranışı gibi alt disiplinlere ait tanımlardır.

Sunumun sonraki bölümlerinde anlatılacak olan kavramlar ;

- Deprem risk düzeyi tanımı
- Doğrusal (elastik) tek serbestik dereceli sistem davranışı ve davranış spektrumu kavramı
- Doğrusal (elastik) çok serbestik dereceli sistem davranışı ve modların superpozisyonu yöntemi
- Betonarme elemanların doğrusal olmayan ( nonlineer) davranışı
- Inelastik tek serbestik dereceli sistem davranışı
- Inelastik çok serbestik dereceli sistem davranışı (itme analizi-pushover)
- Nonlineer analiz yöntemleri
  - Tek modlu itme analizi (pushover)
  - Çok modlu itme analizi (IRSA)

## Deprem Risk Düzeyi Tanımı

Deprem risk düzeyi tasarım depreminin büyüklüğünü tarif eden deprem parametresinin (örn: en büyük yer ivmesi) *olasılıksal* (probabilistic) ya da *kesinsel* (deterministic) metodlar ile tahmin edilmesidir.

**Olasılıksal** metod: Belirli bir zaman diliminde yapının bulunduğu bölgeyi tehdit eden aktif faylar, tarihsel geçmişleri dikkate alınarak tasarım depremini tarif eden deprem parametresinin belirli bir büyüklüğe ulaşması olasılığı olarak tarif edilir.

**Kesinsel** metod: Yapının bulunduğu bölgeyi etkileyen en büyük senaryo depreminin tanımlanmasıdır.

*Olasılıksal ve Kesinsel* metodlarda *azalım ilişkileri* kullanılarak ilgili bölgede deprem düzeyini tarifleyen deprem parametresinin büyüklüğü hesaplanır.



## Deprem Risk Düzeyi Tanımı

Yönetmeliğimizde deprem düzeyleri Mevcut binaların deprem performansını belirlenmesi için maksimum yer ivmesine bağlı olarak ve zemin sınıflarını dikkate alarak tanımlanan davranış spektrumları şeklinde tanımlanmaktadır.

Üç farklı deprem risk düzeyi (davranış spektrumu) tanımlanmıştır. Deprem risk düzeyleri olasılıksal olarak ifade edilmektedir.

### 50 yılda aşılma olasılığı %50 olan depremler :

Bu depremler bina ömrü boyunca sık rastlanabilen küçük ölçekli depremleri temsil etmektedir. Tekrarlanma periyotları 75 yıldır.

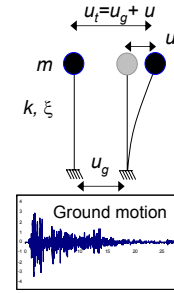
### 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan depremler :

Bu depremler şiddetli deprem yer hareketlerini temsil etmektedirler. Önemli yapısal hasarlara sebep olabilirler. Tekrarlanma periyotları 475 yıldır.

### 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan depremler :

Bu depremler binanın bulunduğu coğrafyada görebileceği en şiddetli yer hareketini temsil etmektedir. Tekrarlanma periyotları 2475 yıldır.

## Doğrusal (Elastik) Tek Serbestlik Dereceli Sistem Davranışı ve Davranış Spektrumu Kavramı



Hareket denklemi

$$m (\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t)) + c \dot{u}(t) + ku(t) = 0$$

$$m \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + ku(t) = -m \ddot{u}_g(t)$$

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega \dot{u}(t) + \omega^2 u(t) = -\ddot{u}_g(t)$$

$m$  :kütle,  $k$ = rijitlik,  $c$ = sönüm katsayısı

$\xi$  : sönüm oranı

$u_g(t)$  : yer hareketi ;  $\ddot{u}_g(t)$  : yer ivmesi

$u(t)$  : sistemin görel (yere göre) yerdeğiştirilmesi

$u_t(t) = u_g(t) + u(t)$ : toplam yerdeğiştirme

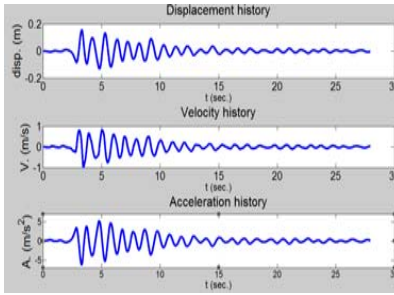
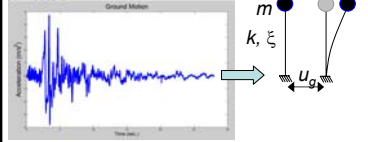
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} ; \omega = 2\pi / T \Rightarrow \omega^2 = k / m$$

$$\xi = c / c_{cr} ; c_{cr} = 2m\omega$$

Yukarıda tek serbestlik dereceli sistemin hareket denklemini tanımlayan diferansiyel denklemin çözümü ile görel yerdeğiştirme-zaman ilişkisini elde ederiz,  $u(t)$ .

## Doğrusal (Linear) Tek Serbestlik Dereceli Sistem Davranışı ve Davranış Spektrumu Kavramı

Erzincan ivme kaydı  
PGA = 0.48g  
T=1 s,  $\xi=0.05$



$$f(t) = ku(t) = m \frac{k}{m} u(t) = m\omega^2 u(t) = mA(t) \rightarrow \text{ivme}$$

$$\omega^2 u(t) = A(t)$$

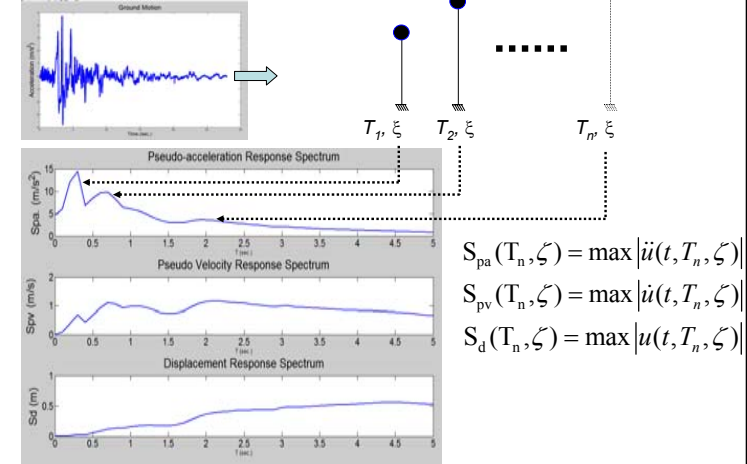
$$S_{ac}(T, \xi) = \max |\ddot{u}(t, T, \xi)|$$

$$S_{dc}(T, \xi) = \max |u(t, T, \xi)|$$

$$\omega^2 S_{dc} = S_{ac}$$

## Doğrusal (Linear) Tek Serbestlik Dereceli Sistem Davranışı ve Davranış Spektrumu Kavramı

PGA = 0.48g

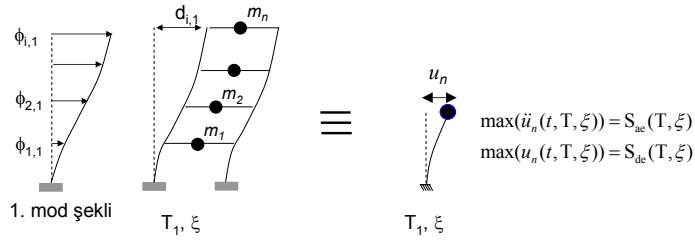


$$S_{pa}(T_n, \xi) = \max |\ddot{u}(t, T_n, \xi)|$$

$$S_{pv}(T_n, \xi) = \max |\dot{u}(t, T_n, \xi)|$$

$$S_d(T_n, \xi) = \max |u(t, T_n, \xi)|$$

## Doğrusal (Lineer) Çok Serbestlik Dereceli Sistem Davranışı



1. mod şekli

$$\Gamma_{x,1} = \frac{\sum_i m_{xi} \phi_{x1i}}{\sum_i m_{xi} \phi_{x1i}^2}$$

$$d_{x1i, \max} = \phi_{x1i} \Gamma_{x1} S_{de}(T_1, \xi)$$

$$f_{x1i, \max} = m_{x1i} \phi_{x1i} \Gamma_{x1} S_{ae}(T_1, \xi)$$

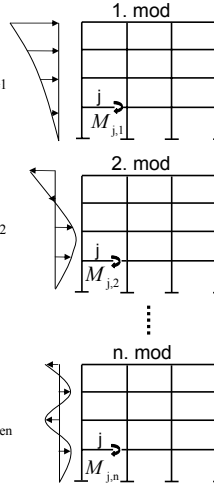
## Modların Süperpozisyonu Yöntemi

Modal kat kuvvetleri

$$f_{x1} = M_x \Phi_{x1} \Gamma_{x1} S_{ae1}$$

$$f_{x2} = M_x \Phi_{x2} \Gamma_{x2} S_{ae2}$$

$$f_{xn} = M_x \Phi_{xn} \Gamma_{xn} S_{aen}$$



Modal büyüklüklerin istatistiksel olarak kombinasyonu (CQC)

$$M_j = \sqrt{\sum_{n=1}^{N_s} \sum_{m=1}^{N_s} M_{j,m} \rho_{mn} M_{j,n}}$$

## Betonarme Elemanların Doğrusal Olmayan (İnelastik) Davranışı

Nonlineer kesit analizi (moment - eğrilik ilişkisi):

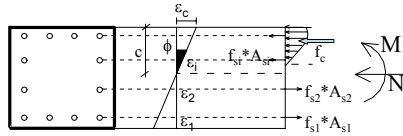
Betonarme elemanların beton ve çeliğe ait gerilme-şekildeğiştirme özellikleri dikkate alınarak yapılan kesit analizlerinde kesitin moment kapasitesi ve inelastik deformasyon kapasitesi hesaplanabilir. Bu şekilde kesite ait hasar seviyeleri sayısal olarak tanımlanmaktadır.

Kesit analizinde hesap prensipleri ve kabuller:

- Düzlem kesit eğilmeden sonra düzlem kalır kabulü ile herhangi bir eğrilik değerine karşı malzeme şekildeğiştirmeleri hesaplanmaktadır.
- Betonun çekme mukavemetinin olmadığı kabul edilir.
- Analizde her adımda kuvvet dengesi sağlanmalıdır

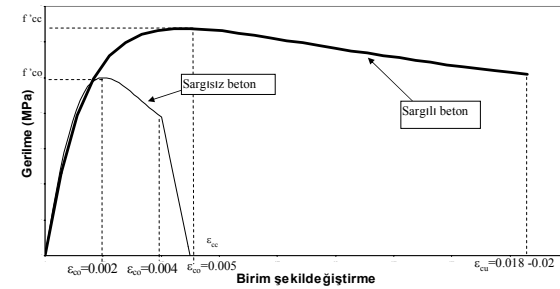
$$\phi = \epsilon_c / C$$

$$N = f_c + \sum f_{si} A_{si}$$



## Betonarme Elemanların Doğrusal Olmayan (İnelastik) Davranışı

•Sargılı ve sargısız betona ait gerilme – birim şekildeğiştirme modeli yönetmeliğimizde enine donatı detayına ve beton basınç mukavemetine bağlı olarak açık bir şekilde tarif edilmiştir.

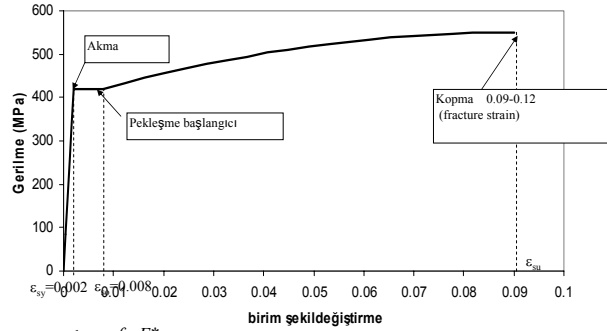


$f'_{cc}$ : Sargılı betona ait maksimum gerilme

$f'_{co}$ : Sargısız betona ait maksimum gerilme

## Betonarme Elemanların Doğrusal Olmayan ( İnelastik) Davranışı

- Betonarme çeliğine ait gerilme – birim şekildeğiştirme modeli



$$\varepsilon < \varepsilon_y \quad f_s = E * \varepsilon$$

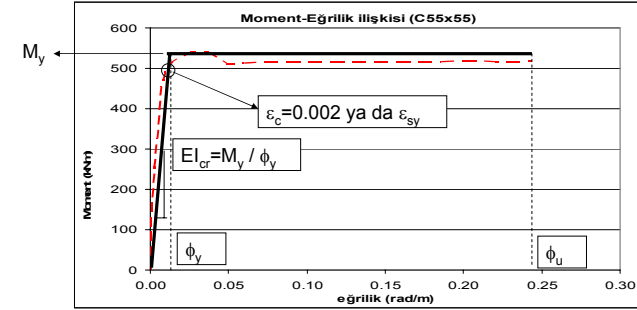
$$\varepsilon < \varepsilon_{sh} \quad f_s = f_y$$

$$\varepsilon < \varepsilon_{su} \quad f_s = f_u - (f_u - f_y) \left( \frac{\varepsilon_{su} - \varepsilon}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}} \right)^2$$

## Betonarme Elemanların Doğrusal Olmayan ( İnelastik) Davranışı

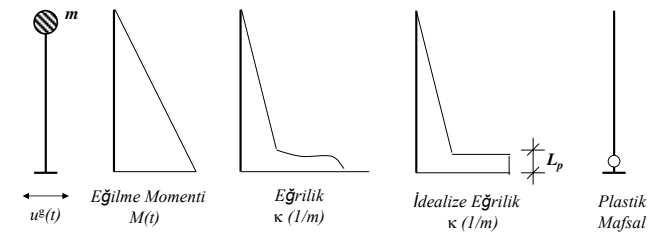
- Moment-eğrilik ilişkisinin idealleştirilmesi

Moment eğrilik ilişkisi kesitin akma momentini, akma eğriliğini, efektif kesit eğilme rijitliğini ve kesit süneklik kapasitesini belirlemek amacı ile iki doğru ile idealleştirilir.



## Betonarme Elemanların Doğrusal Olmayan ( inelastik) Davranışı

- Plastik Mafsalsal Hipotezi



$$u = u_y + u_p$$

$$u_y = \frac{\kappa_y H^2}{3}$$

$$u_p = \theta_p H$$

## Betonarme Elemanların Doğrusal Olmayan ( inelastik) Davranışı

- Betonarme elemanlarda süneklik kavramı

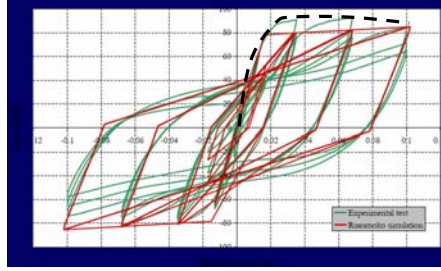
Süneklik kavramı maksimum deformasyonun akma deformasyonuna oranı olarak tarif edilir. Betonarme kesit için yapılan moment-eğrilik analizi sonucunda kesitin süneklik kapasitesi sayısal olarak hesaplanabilir. Betonarme kesitler için süneklik, kesitin dayanımını (moment dayanımı) kaybetmeden yapabileceği inelastik deformasyon kapasitesi olarak tanımlanmalıdır. Bir önceki sayfada moment-eğrilik ilişkisi sunulan betonarme kesitin süneklik kapasitesi aşağıda ifade edilmiştir.

$$\text{Kesit süneklik kapasitesi} : \mu_\phi = \phi_u / \phi_y$$

Betonarme elemanlar için sünek davranışın diğer şartı eğilme altındaki kesitin kesme kuvveti altında geçmemesidir.

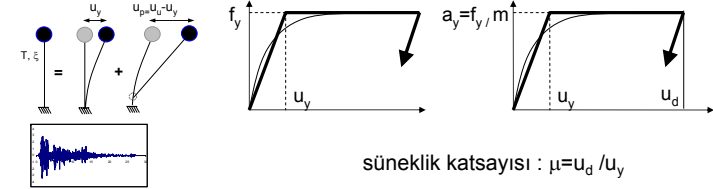
## İnelastik Tek Serbestlik Dereceli Sistem Davranışı

Aşağıda betonarme kolonun tekrarlı yatay yükler altında yapılan test sonucunda elde edilen dayanımı-yerdeğiştirme histeresis eğrileri sunulmaktadır. her çevrimde eldedilen histeresis eğrilerinin tepe noktaları birleştirildiğinde elde edilen eğri **iskelet eğrisi** olarak tanımlanmaktadır (kesikli çizgi).



## İnelastik Tek Serbestlik Dereceli Sistem Davranışı

İskelet eğrisi iki doğru ile idealleştirildiğinde tek serbestlik dereceli sisteme ait yatay yük dayanımı ve buna karşı gelen akma yerdeğiştirmesi tanımlanabilir.



Yatay yük dayanımı ( $a_y$ ) bilinen bu sistemde herhangi bir yer hareketi etkisi altında araştırılması gereken büyüklük depremin ne kadar yerdeğiştirme talep edeceğidir ( $u_d$ ), çünkü yapısal hasar (plastik deformasyon) plastik yerdeğiştirmeye ( $u_d - u_y$ ) diğer bir deyişle süneklik isemine bağlıdır. Süneklik istemi inelastik tek serbestlik dereceli sistem için aşağıda genelleştirilmiş hareket denkleminin çözümü ile herhangi bir kayıt için bulunabilir.

## İnelastik Tek Serbestlik Dereceli Sistem Davranışı

$$m \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + f(t, u, \dot{u}) = -m \ddot{u}_g(t)$$

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega \dot{u}(t) + a(t, u, \dot{u}) = -\ddot{u}_g(t)$$

Bu denklemde  $f$  terimi için en büyük değer bir önceki sayfada gösterilen yatay yük dayanımı olacaktır. İnelastik sistemin elastik davrandığını varsaydığımızda sistemin sahip olması gereken elastik dayanımı  $f_e$  olarak tanımlarsak dayanım azaltma katsayısı aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$R_y = f_e / f_y$$

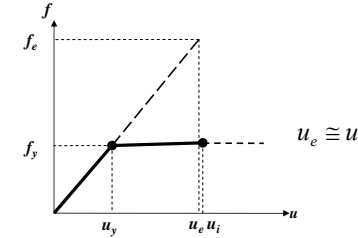
Mevcut sistem için  $f_e$  ve  $f_y$  bilinen parametreler olduğuna göre  $R_y$  katsayısını dayanımı temsil eden ya da diğer bir deyişle sunumu temsil eden bir parametre olarak değerlendirebiliriz.

Araştırmacıların farklı özelliklerde (büyüklük, zemin koşullar, fay mekanizması gibi) kaydedilmiş bir çok yer hareketi altında inelastik tek serbestlik dereceli sisteme ait dayanım azaltma katsayısı (sunum),  $R_y$  ile süneklik istemi ( $\mu$ ) arasında bir ilişki kurmuşlardır. Bu ilişki **eşit yerdeğiştirme kuralı** olarak tanımlanmaktadır.

## İnelastik Tek Serbestlik Dereceli Sistem Davranışı

### Eşit Yerdeğiştirme Kuralı :

Eşit yerdeğiştirme kuralına göre depremin inelastik tek serbestlik dereceli sistemden talep ettiği yerdeğiştirme elastik sistemden talep ettiği yerdeğiştirmeye yaklaşık olarak eşittir. Bu kural belirli bir doğal titreşim periyodundan daha uzun periyoda sahip tek serbestlik dereceli sistemler için geçerlidir. Bu sınır periyod depremin karakteristik periyodu olarak tanımlanır. Yönetmeliğimizde karakteristik periyod tasarım spektrumu tanımında belirtilen  $T_B$  periyodudur.



### İnelastik Çok Serbestlik Dereceli Sistem Davranışı (İtme Analizi- Pushover)

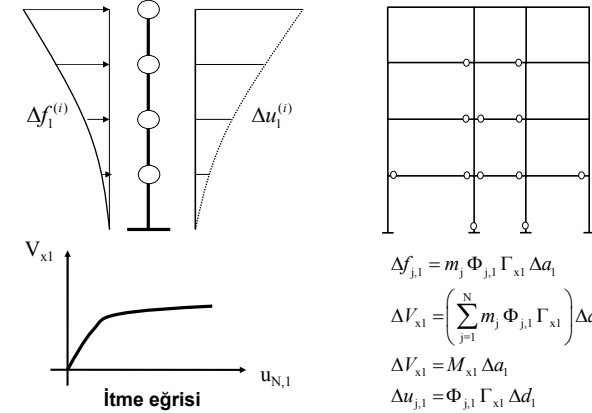
Çok serbestlik dereceli sistemlerde yatay yükler altında hasarlar (plastik dönmeler) kesit tesirlerinin yapısal elemanlarda en büyük değere ulaştığı yerlerde diğer bir değişle eleman uçlarında oluşacaktır. Yatay yük şiddeti arttıkça hasar nedeniyle sistem rijitlik ve dayanım kaybına uğrar. Çok serbestlik dereceli sistemlerin doğrusal olmayan kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi **itme analizi** (pushover) yardımı ile tanımlanabilir.

İtme analizi tanım olarak, yapısal sistemin birinci elastik doğal titreşim modu ile uyumlu sabit yatay yük dağılımı altında adım adım ittirilmesidir. Her itme adımında oluşan hasarlar (plastik mafsallar) nedeniyle yapısal sistemin azalan rijitliği ve dayanımı belirlenebilir. İtme analizi sonunda her adımda hesaplanan taban kesmesi-tepe yerdeğiştirme değerleri ile itme eğrisi oluşturulur. İtme eğrisi çok serbestlik dereceli sistemin yatay yük altında dayanımını ve süneklik kapasitesini tanımlar.

İtme analizi plastik mafsalların oluşumu sebebi ile sistemin değişen dinamik özelliklerini dikkate alarak değişken tek modlu itme analizi şeklinde de yapılabilir.

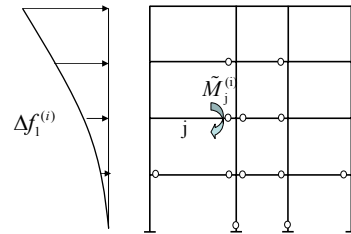
### İnelastik Çok Serbestlik Dereceli Sistem Davranışı (İtme Analizi- Pushover)

Sabit Tek Modlu İtme Analizi - Artımsal Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi



### İnelastik Çok Serbestlik Dereceli Sistem Davranışı (İtme Analizi- Pushover)

Sabit Tek Modlu İtme Analizinin *i*. adımında mafsal oluşumunun belirlenmesi



*j* no'lu kirişte mafsal oluşması için gereken ivme artımı

$$M_{j,cap}^{(i)} = M_j^{(i-1)} + \tilde{M}_j^{(i)} \Delta a_1^{(i)}$$

$$\Delta a_1^{(i)} = \frac{M_{j,cap}^{(i)} - M_j^{(i-1)}}{\tilde{M}_j^{(i)}}$$

$\tilde{M}_j^{(i)}$  değeri  $\Delta a_1^{(i)} = 1$  için hesaplanan modal yük dağılımı altında hesaplanır

$$\Delta f_{j,1} = m_j \Phi_{j,1} \Gamma_{x1} \Delta a_1$$

$$\Delta V_{x1} = \left( \sum_{j=1}^N m_j \Phi_{j,1} \Gamma_{x1} \right) \Delta a_1$$

$$\Delta V_{x1} = M_{x1} \Delta a_1$$

$$\Delta u_{j,1} = \Phi_{j,1} \Gamma_{x1} \Delta d_1$$

$\Delta a_1^{(i)}$  *i*. adımda tüm yapısal elemanlar için hesaplanır. En küçük değere sahip eleman *i*. adımda oluşacak mafsal yerini ve  $\Delta a_1^{(i)}$  büyüklüğünü tanımlar

### İnelastik Çok Serbestlik Dereceli Sistem Davranışı (İtme Analizi- Pushover)

Araştırmacıların yaptığı nümerik ve test çalışmalarına göre inelastik çok serbestlik dereceli sistemlerin deprem altındaki davranışı ile inelastik tek serbestlik dereceli sistemlerin davranışı arasında benzerlik kurulabildiği gözlenmiştir. Bu ilişki için öncelikli şartlar;

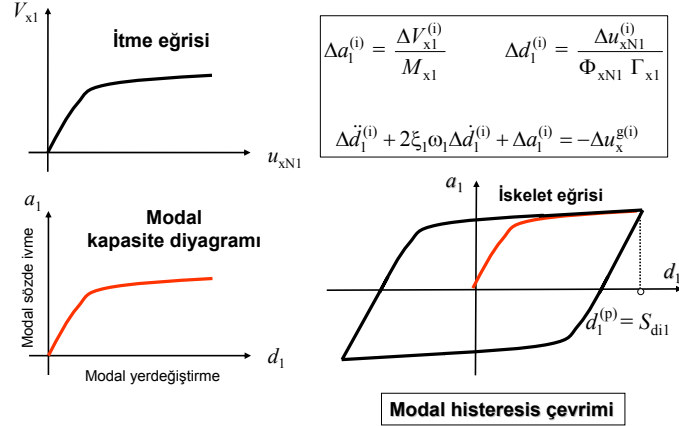
- > inelastik çok serbestlik dereceli sistemin yapısal davranışında tek modun hakim olması
- > Yapısal elemanlarının tekrarlı yükler altında kuvvet-deformasyon karakteristiklerinin (histeresis) eşdeğer tek serbestlik dereceli sisteminkine benzer olmasıdır.

Yukarıdaki kabuldene yola çıkarak çok serbestlik dereceli sistem için elde ettiğimiz itme eğrisini eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemin ivme-yerdeğiştirme eğrisine dönüştürebiliriz. Bu yeni diyagrama **modal kapasite diyagramı** diyoruz.

Daha sonraki adımda **modal kapasite eğrisini** ve **eşit yerdeğiştirme kuralını** kullanarak depremin yapıdan talep ettiği inelastik yerdeğiştirme değerini (performans noktası) tahmin edebiliriz.

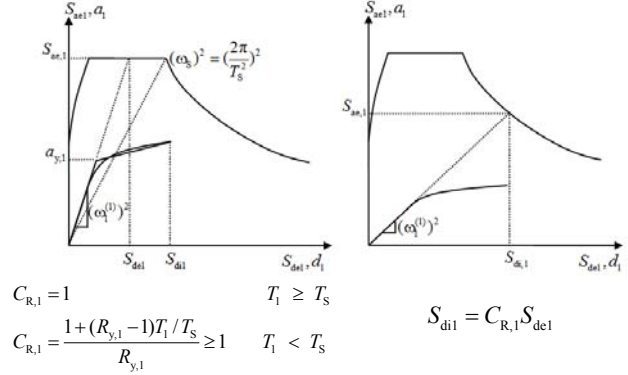
## İnelastik Çok Serbestlik Dereceli Sistem Davranışı (İtme Analizi- Pushover)

İtme eğrisinin kapasite diyagramına dönüştürülmesi



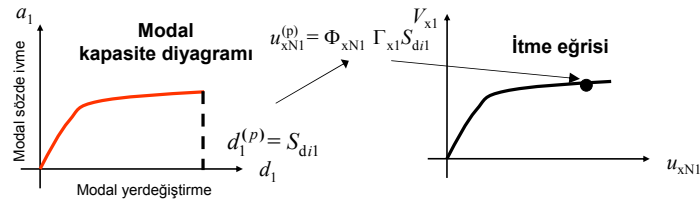
## İnelastik Çok Serbestlik Dereceli Sistem Davranışı (İtme Analizi- Pushover)

Modal kapasite diyagramının başlangıç periyoduna bağlı olarak  $C_{R,1}$  katsayısı (inelastik yerdeğiştirmenin elastik yerdeğiştirmeye oranı) ile hesaplanır. Aşağıdaki formülde  $T_s$  davranış spektrumu köşe periyoduna eşit kabul edilmektedir



## İnelastik Çok Serbestlik Dereceli Sistem Davranışı (İtme Analizi- Pushover)

İnelastik spektral yerdeğiştirmenin hesaplanmasından sonra modal kapasite diyagramından itme eğrisine geri dönüşüm yapılarak yapısal performans noktasına karşı gelen çok serbestlik dereceli sistemin yerdeğiştirme değeri hesaplanır. İtme analizinde tepe yerdeğiştirmesi bu değer eşitken oluşan plastik dönmeler ve hasar düzeyleri hesaplanarak hedef performans limitleri ile karşılaştırılır.



## Çok Modlu İtme Analizi: Artımsal Spektrum Analizi (ARSA)

( Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi ( DBYBHY,2007 ) )

(n)'inci mod için (i)' inci lineer itme adımındaki yerdeğiştirme artımı.

$$\Delta u_n^{(i)} = \Phi_n^{(i)} \Gamma_{xn}^{(i)} \Delta d_n^{(i)}$$

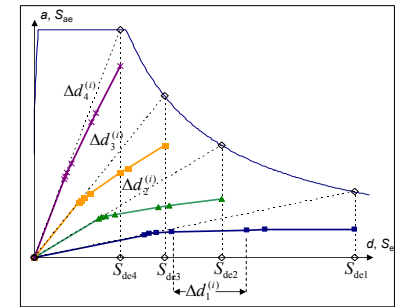
“Eşit yerdeğiştirme kuralı” gereğince:

$$S_{din}^{(i)} = S_{den}^{(1)}$$

Modal ölçeklendirme :

$$\Delta d_n^{(i)} = \Delta \tilde{F}^{(i)} S_{den}^{(1)}$$

$$d_n^{(i)} = \tilde{F}^{(i)} S_{den}^{(1)}$$





## Çok Modlu İtme Analizi:

### Artımsal Spektrum Analizi (ARSA)

( Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi ( DBYBHY,2007 ) )

#### Modal Ölçeklendirme

##### ❖ Lineer spektrum analizi (LİSA):

$$d_n^{(1)} = \tilde{F}^{(1)} S_{den}$$

$$\tilde{F}^{(1)} = 1$$

##### ❖ Artımsal spektrum analizi (ARSA):

$$\Delta d_n^{(i)} = \Delta \tilde{F}^{(i)} S_{den}$$

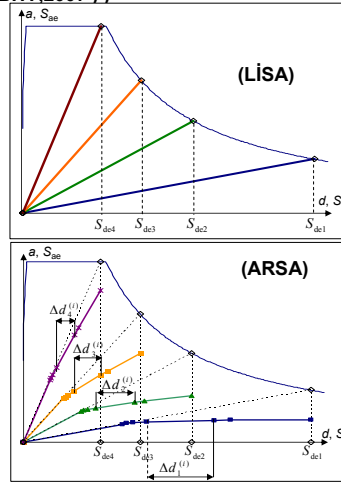
Artımsal ölçek katsayısı :

$\Delta \tilde{F}^{(i)}$  (i)'inci itme adımında gözönüne alınan bütün modlar için sabit kabul edilmiştir.

**Birikimli (kümülatif) ölçek katsayısı :**

$$\tilde{F}^{(i)} = \tilde{F}^{(i-1)} + \Delta \tilde{F}^{(i)} \leq 1$$

$$d_n^{(i)} = \tilde{F}^{(i)} S_{den}^{(1)}$$



## Çok Modlu İtme Analizi:

### Artımsal Spektrum Analizi (ARSA)

( Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi ( DBYBHY,2007 ) )

$$\Delta r^{(i)} = \tilde{r}^{(i)} \Delta \tilde{F}^{(i)}$$

(j) no'lu plastik kesit için özelleştirilirse, örneğin kiriş ucundaki bir plastik mafsal için:

$$\Delta M_{j,n}^{(i)} = \tilde{M}_{j,n}^{(i)} \Delta \tilde{F}^{(i)}$$

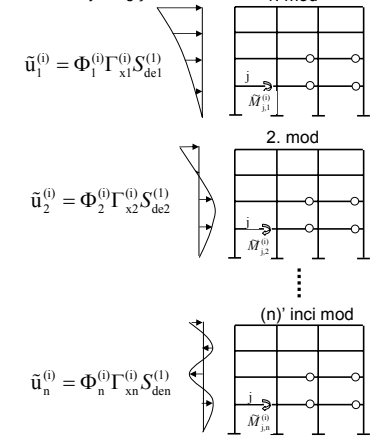
$$\tilde{M}_j^{(i)} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N_s} \sum_{m=1}^{N_s} \tilde{M}_{j,m}^{(i)} \rho_{mn} \tilde{M}_{j,n}^{(i)}}$$

$$\Delta M_j^{(i)} = \tilde{M}_j^{(i)} \Delta \tilde{F}^{(i)}$$

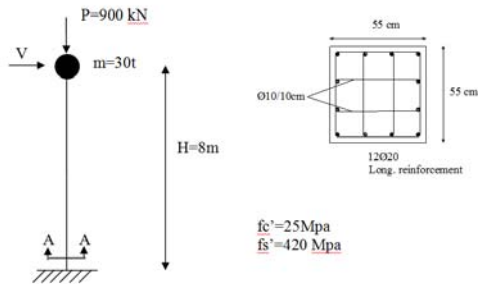
$$M_{j,cap}^{(i)} = M_j^{(i-1)} + \underbrace{\tilde{M}_j^{(i)} \Delta \tilde{F}^{(i)}}_{\Delta M_j^{(i)}}$$

$$\Delta F^{(i)} = \frac{M_{j,cap}^{(i)} - M_j^{(i-1)}}{\tilde{M}_j^{(i)}}$$

$\Delta \tilde{F}^{(i)} = 1$  için (i)'inci lineer adımdaki yer değiştirme vektörü



## ÖRNEK: Betonarme düşey konsolun performans göre değerlendirilmesi



Yukarıda tanımlı düşey konsolun DBYBHY,2007 Bölüm 7 'ye göre deprem performansı değerlendirilecektir

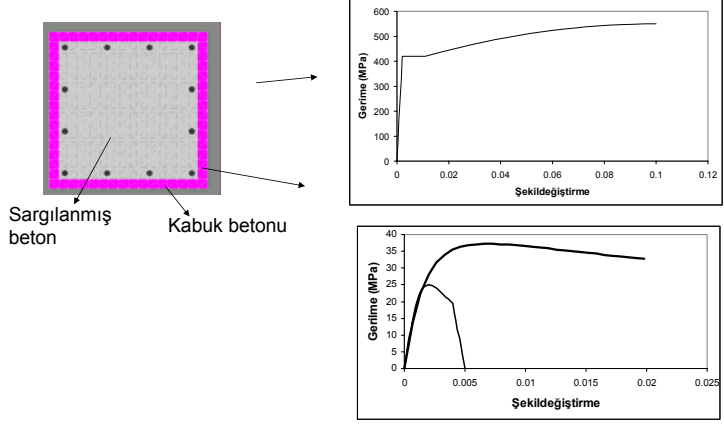
## Yapı performans hedefinin tanımlanması

TABLO 7.7 - FARKLI DEPREM DÜZEYLERİNDE BİNALAR İÇİN ÖNGÖRÜLEN MİNİMUM PERFORMANS HEDEFLERİ

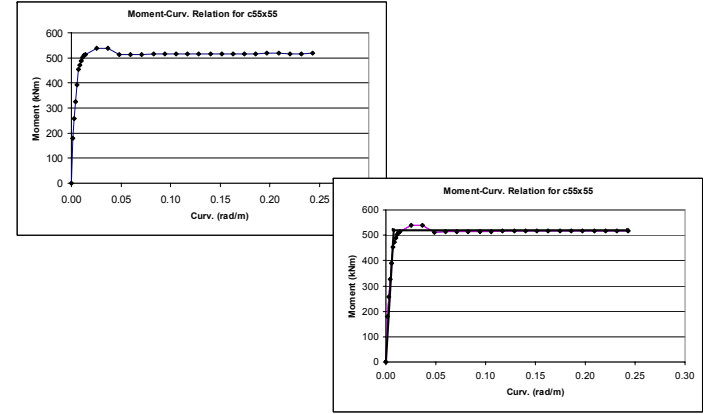
Binanın Kullanım Amacı ve Türü	Deprem Aşılma Olasılığı		
	50 yılda %50	50 yılda %10	50 yılda %2
<b>Deprem Sonrası Kullanımı Gereken Binalar:</b> Hastaneler, sağlık tesisleri, itfaiye binaları, haberleşme ve enerji tesisleri, ulaşım istasyonları, vilayet, kaymakamlık ve belediye yönetim binaları, afet yönetim merkezleri, vb.	-	<b>HK</b>	<b>CG</b>
<b>İnsanların Uzun Süreli ve Yoğun Olarak Bulunduğu Binalar:</b> Okullar, yatakhaneler, yurtlar, pansiyonlar, askeri kışlalar, cezaevleri, müzeler, vb.	-	<b>HK</b>	<b>CG</b>
<b>İnsanların Kısa Süreli ve Yoğun Olarak Bulunduğu Binalar:</b> Sinema, tiyatro, konser salonları, kültür merkezleri, spor tesisleri	<b>HK</b>	<b>CG</b>	-
<b>Tehlikeli Madde İçeren Binalar:</b> Toksik, parlayıcı ve patlayıcı özellikleri olan maddelerin bulunduğu ve depolanan binalar	-	<b>HK</b>	<b>GÖ</b>
<b>Diğer Binalar:</b> Yukarıdaki tanımlara girmeyen diğer binalar (konutlar, işyerleri, oteller, turistik tesisler, endüstri yapıları, vb.)	-	<b>CG</b>	-

**HK** Hemen Kullanım, **CG** Can Güvenliği, **GÖ** Göçme Öncesi (Bkz. 7.7)

### Betonarme kesit analizi



### Moment eğrilik ilişkisi ve idealleştirilmesi

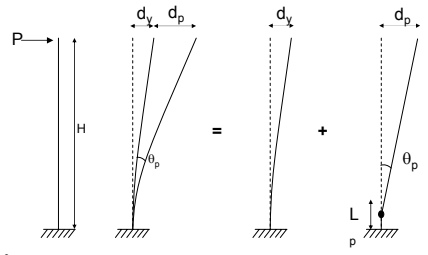


$$M_y = 520 \text{ kNm}$$

$$M_u = 520 \text{ kNm}$$

$$\phi_y = 0.0079 \text{ rad/m}$$

$$\phi_u = 0.2433 \text{ rad/m}$$



$$d_y = \frac{\phi_y * H^2}{3} = \frac{0.007921 * 8^2}{3} = 0.169m$$

$$l_p = 0.08L + 0.022 * f_{ye} * d_{bl} = 0.08 * 8000 + 0.022 * 420 * 20 = 824.8mm = .82m$$

Plastic eğrilik plastic mafsal boyu boyunca sabit kabul edilmiştir.

$$\Theta_{cp} = \phi_{cp} * l_p = (\phi_u - \phi_y) * l_p = (0.2443 - 0.007921) * 0.82 = 0.1938rad$$

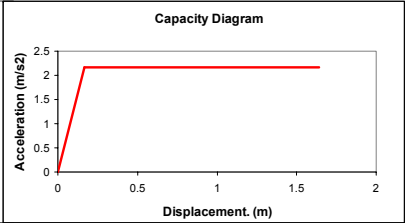
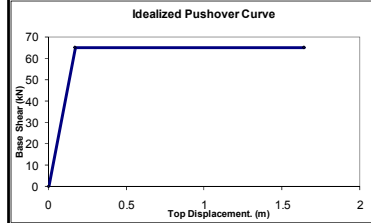
$$d_p = (H - l_p / 2) * \Theta_p$$

$$d_u = d_y + d_p = 0.169 + 1.471 = 1.64m$$

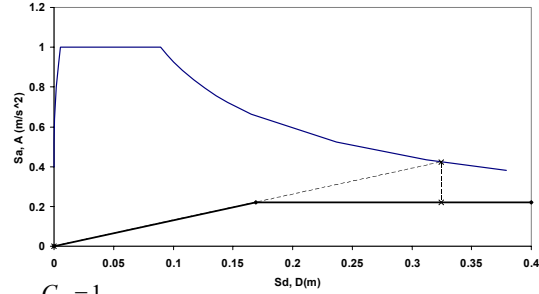
$$f_y = \frac{M_y}{H} = \frac{520}{8} = 65kN$$

### İtme eğrisinin modal kapasite eğrisine dönüştürülmesi

$$a_y = \frac{V_{x1}}{M_x} = \frac{65}{30} = 2.167 \text{ m/s}^2 \quad d_y = u_y = 0.169m$$



## Inelastic spectral yerdeğiştirme değerinin hesaplanması



$$C_R = 1$$

$$S_{di1} = S_{de1} = d^{(p)} = 0.324m$$

## Plastik dönme ve malzeme birim şekildeğiştirme değerlerinin hesabı

$$d^{(p)} = 0.324m$$

$$d_p = d^{(p)} - d_y = 0.324 - 0.169 = 0.155m$$

$$d_p = (H - l_p / 2) * \theta_p$$

$$0.155 = (8 - 0.81 / 2) * \theta_p$$

$$\theta_p = .0204rad$$

$$\theta_p = \phi_p * l_p$$

$$\phi_p = \theta_p / l_p = .0204 / 8.2 = 0.0249rad / m$$

$$\epsilon_{cu} = 0.0038 < 0.0135$$

$$\epsilon_{cc} = 0.0026 < 0.0035$$

$$\epsilon_s = 0.0122 < 0.04$$

**Kesit hasar düzeyi MN ile GV hasar sınırları arasında hesaplanmıştır.**

$$MN \quad \epsilon_{cu} = 0.0035, \quad \epsilon_s = 0.01 \quad (\text{extreme fiber at cover conc.})$$

$$GV \quad \epsilon_{cc} = 0.0035 + 0.01 * (\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.0135, \quad \epsilon_s = 0.04 \quad (\text{extreme fiber at core conc.})$$

$$GC \quad \epsilon_{cc} = 0.004 + 0.014 * (\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.018, \quad \epsilon_s = 0.06 \quad (\text{extreme fiber at core conc.})$$

## Kesit hasar düzeyleri

(a) Kesit *Minimum Hasar Sınırı (MN)* için kesitin en dış lifindeki beton basınç birim şekildeğiştirmesi ile donatı çeliği birim şekildeğiştirmesi üst sınırları:

$$(\epsilon_{cu})_{MN} = 0.0035 \quad ; \quad (\epsilon_s)_{MN} = 0.010 \quad (7.8)$$

(b) Kesit *Güvenlik Sınırı (GV)* için etriye içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekildeğiştirmesi ile donatı çeliği birim şekildeğiştirmesi üst sınırları:

$$(\epsilon_{cc})_{GV} = 0.0035 + 0.01 * (\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.0135 \quad ; \quad (\epsilon_s)_{GV} = 0.040 \quad (7.9)$$

(c) Kesit *Göçme Sınırı (GC)* için etriye içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekildeğiştirmesi ile donatı çeliği birim şekildeğiştirmesi üst sınırları:

$$(\epsilon_{cc})_{GC} = 0.004 + 0.014 * (\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.018 \quad ; \quad (\epsilon_s)_{GC} = 0.060 \quad (7.10)$$

TEŐEKKÜRLER