

YAPILARIN DEPREM ETKİSİNDE ŞEKİL DEĞİŞTİRMEYE DAYALI DEĞERLENDİRİLMESİ

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

İMO İstanbul Şubesi Mesleki Eğitim Semineri
Ocak ve Şubat 2009

Yapıların deprem etkisinde şekil değiştirmeğe dayalı değerlendirilmesi

1. Giriş
2. Deprem yükü azaltma katsayısı
3. Eğilme momenti etkisi
4. Eğilme momenti ve normal kuvvet etkisi
5. Plastik mafsallı kabulü
6. Zaman tanım alanında doğrusal elastik çözüm
7. Zaman tanım alanında doğrusal elastik olmayan çözüm
8. Statik itme çözümü
9. Mevcut binaların deprem güvenliğinin belirlenmesi
10. Örnekler
11. Sonuçlar
12. İlgili yayınlar

Zekai Celep

2

Yapıların deprem etkisinde şekil değiştirmeğe dayalı değerlendirilmesi

1. Giriş

Değerlendirme yöntemleri:

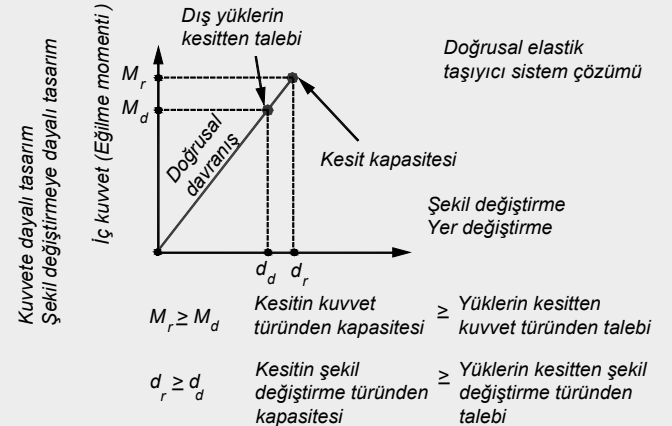
- Normal kuvvet, eğilme momenti, kesme kuvveti gibi büyüklükleri esas alan *Kuvvet Kavramına Dayalı Değerlendirme*
- Betonun birim kısalması, donatının birim uzama ve kısalması, kesit dönmesi, kat ve bina yatay yerdeğiştirmesi gibi büyüklükleri esas alan *Şekil Değiştirme Kavramına Dayalı Değerlendirme*

Zekai Celep

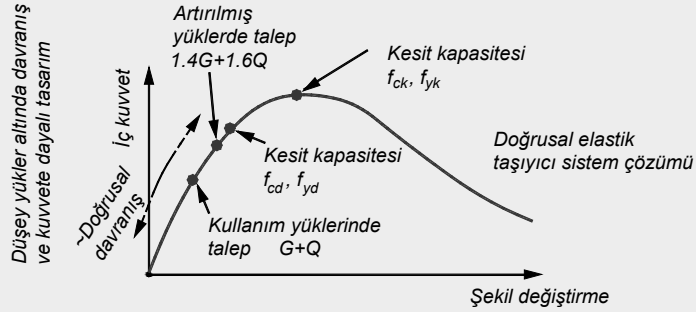
3

Yapıların deprem etkisinde şekil değiştirmeğe dayalı değerlendirilmesi

Doğrusal elastik taşıyıcı sistemde değerlendirme (~ tasarım)

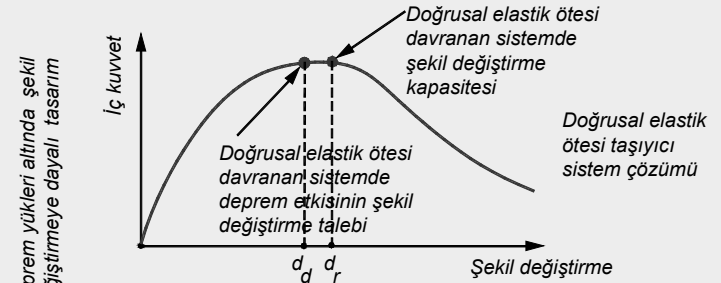


Düşey yükler altında betonarme taşıyıcı sistemde değerlendirme (~tasarım)



$$M_r \geq M_d \quad \text{Kesitin kuvvet türünden kapasitesi} \geq \text{Yüklerin kesitten kuvvet türünden talebi}$$

Deprem yükleri altında betonarme taşıyıcı sistemde değerlendirme



$$d_r \geq d_d \quad \text{Kesitin şekil değiştirme türünden kapasitesi} \geq \text{Yüklerin kesitten şekil değiştirme türünden talebi}$$

Şekil değiştirmeye dayalı değerlendirmede unutulmaması gerekli hususlar:

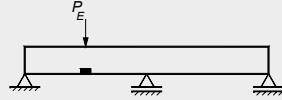
- Doğrusal elastik ötesi bir davranışta daha fazla malzeme bilgisine ihtiyaç vardır.
- Hesap sonuçları, yapılan kabuller çerçevesinde geçerlidir.
- Grafik ortamın çekiciliğe kapılıp, sonucun mümkün olmayan bir hassasiyetle bulunduğu sanılmaması gerekir.
- Özellikle mevcut yapılarda malzeme kalitesi, donatının durumu konusunda belirsizlikler konusunda çok önemli belirsizlikler varsa, ayrıntılı model hesap sonuçları anlamsız olabilir. Bu tür durumlarda mevcut belirsizlere uygun daha basit hesap yönteminin seçilmesi uygundur.

2. Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı:

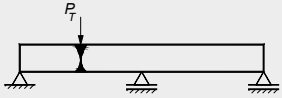
- Eğer taşıyıcı sistem izostatik (statik bakımından belirli, sadece denge denklemleri ile çözülebilir) ise, taşıyıcı sistemde bir kesitin güç tükenmesine gelmesi, sistemin güç tükenmesine gelmesine karşı gelir. Yatay yük etkisi altındaki konsol kolon örneği (kritik kesit altta).
- İzostatik sistemde doğrusal ötesi bir kapasite artışı çok sınırlıdır. Artış malzeme değerlerinde kullanılan güvenlik değerlerinden ileri gelir ($f_{cd}=f_{ck}/1.5$, $f_{yd}=f_{yk}/1.15$).

- Hiperstatiklik derecesi arttıkça, ilk kesitin kapasiteye erişmesi ile sistemin kapasiteye erişmesi yük değerlerinin arasında açılır.
- Bu sebepten deprem etkileri altında yapıların tasarımında doğrusal elastik ötesi davranışı gözönüne almak için “Deprem Yükü Azaltma Katsayısı” kullanılır.

a) Elastisite teorisi çözümü
Malzeme güç tükenmesi



b) Taşıma gücü çözümü
Kesit güç tükenmesi



c) Plastisite teorisi çözümü
Sistem güç tükenmesi

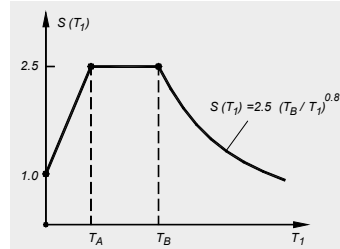


Zekai

9

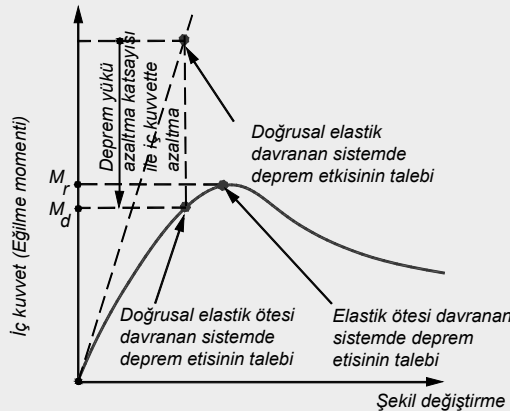
Deprem Yükü Azaltma Katsayısı:

- Yapı deprem etkisi ilerledikçe hasar görerek, daha kolay şekil değiştirebilir duruma gelir.
- Deprem yükü arttıkça;
 - Kesitlerde çatlamlar ilerler,
 - Şekil değiştirmeler ve yer değiştirmeler artar,
 - Hasarsız durumda hesaplanan elastik periyot büyür.
- Daha kolay şekil değiştiren sistemin üzerinde meydana gelen deprem etkisi azalır.
- Bu sebepten de deprem etkileri altında yapıların tasarımında elastik ötesi davranışı gözönüne almak için “Deprem Yükü Azaltma Katsayısı” kullanılır.



Zekai Celep

Deprem yükleri altında betonarme yapılarda Deprem Yükü Azaltma Katsayısı'nın kullanımı



$$M_r \geq M_d$$

Kesitin kuvvet türünden kapasitesi \geq Yüklerin kesitten kuvvet türünden talebi

Zekai Celep

Deprem Yükü Azaltma Katsayısı:

Yeni projelendirilen yapılarda “Deprem Yükü Azaltma Katsayısı” kullanılır. Deprem Yönetmeliği'nde verilen bu katsayının özellikleri:

- Taşıyıcı sistemin hasar beklenen kesitlerindeki şekil değiştirme yeteneğine bağlıdır (Normal ve yüksek süneklilikteki çerçeve yapılarda $R_a = 4$ ve $R_a = 8$ gibi farklı katsayılarının kullanılması).
- Taşıyıcı sistemin hiperstatiklik derecesine bağlıdır.
- Hasar görmesi (Doğrusal ötesi şekil değiştirme yapması) muhtemel olan kesit sayısına bağlıdır (Yüksek süneklilikteki prefabrik yapılar için verilen $R_a = 5$ katsayısı, yerinde dökme yapılar için verilen $R_a = 8$ den daha küçüktür).

Zekai Celep

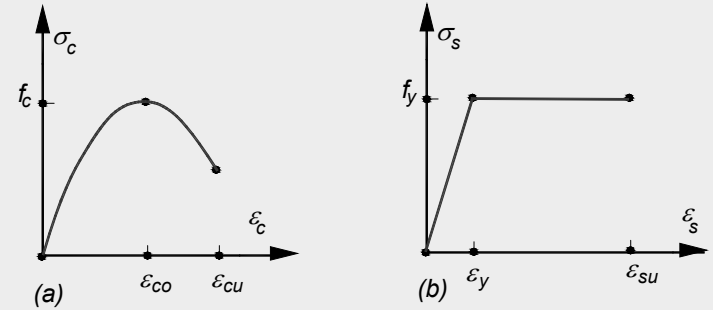
12

Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı:

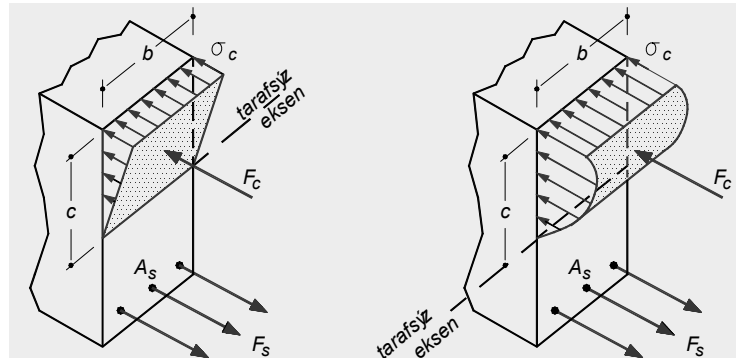
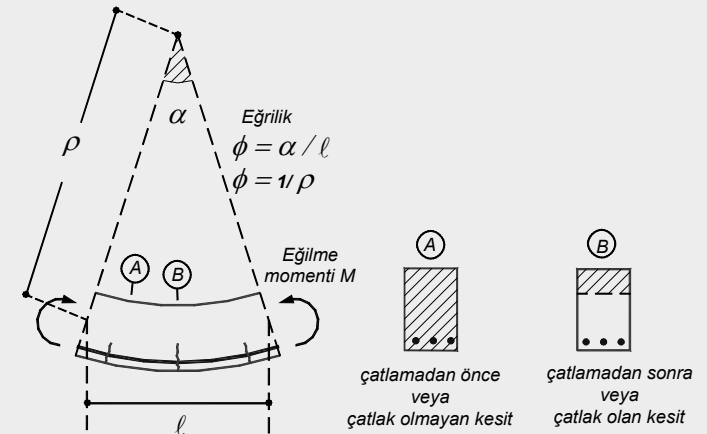
- Bu katsayı kabul edilecek hasara bağılıdır. Deprem sonu kabul edilecek hasar seviyesi arttıkça daha küçük değerin kullanılması gerekir. Örneğin çok sınırlı bir hasar isteniyorsa $R_a = 1.5$ gibi küçük bir değer uygun olabilir.
- Doğrusal ötesi davranışla ilgili bu katsayı kesit ve elemanın davranışı ile ilgilidir. Yeni yapılarda kesitlerdeki davranışın birbirinden çok farklı olmayacağı kabul edilerek tüm yapı için tek bir katsayı kullanılır.
- Deprem Yönetmeliği'nde mevcut yapıların değerlendirilmesinde verilen Doğrusal Elastik Değerlendirme Yöntemi'nde Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı'na karşı getirilebilecek r katsayısı daha ayrıntılı tanımlanmıştır.

3. Eğilme momenti etkisi**Beton ve çeliğin davranışı:**

Betonda basınç ve çeliğin basınç ve çekme gerilmeleri altında davranışı

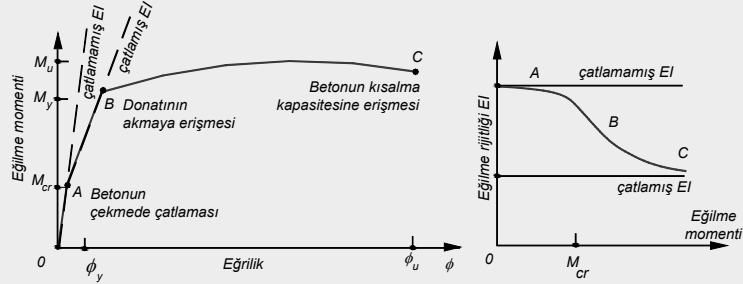


Eğilme momenti etkisinde önemli eşikler:
Çekme bölgesindeki betonun çatlaması,
Donatının akması,
Betonun ezilmesi,
Donatının kopması,

**Eğilme momenti ve eğrilik:**

Betonarme kesitte eğilme etkisi, eğilme rijitliği ve şekil değiştirme:

Eğilme momenti-eğrilik bağıntısı:



Eğilme rijitliği yükleme bağı

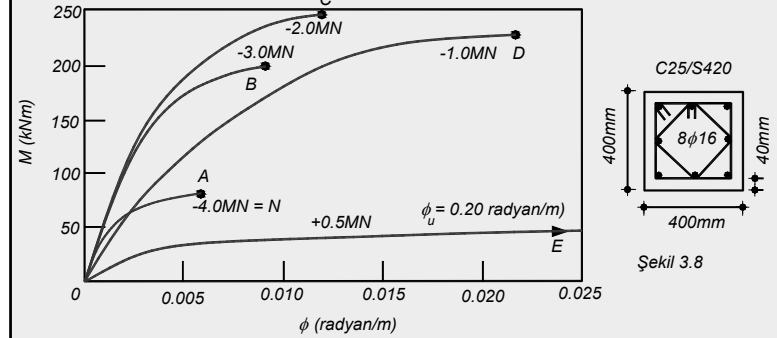
Zekai Celep

17

4. Eğilme momenti ve normal kuvvet etkisi

Eğilme rijitliği normal kuvvete bağlı

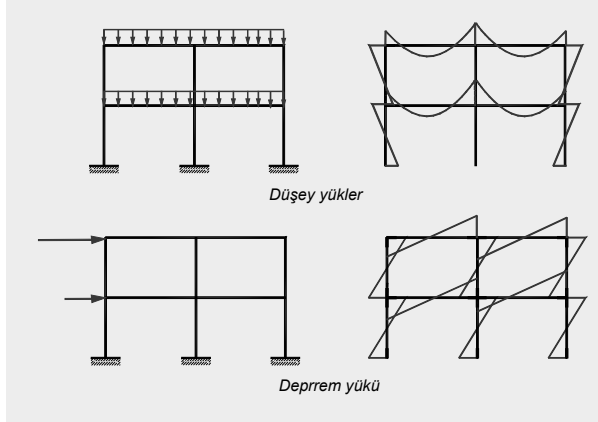
Eğilme momenti-eğrilik bağıntısı:



Şekil 3.8

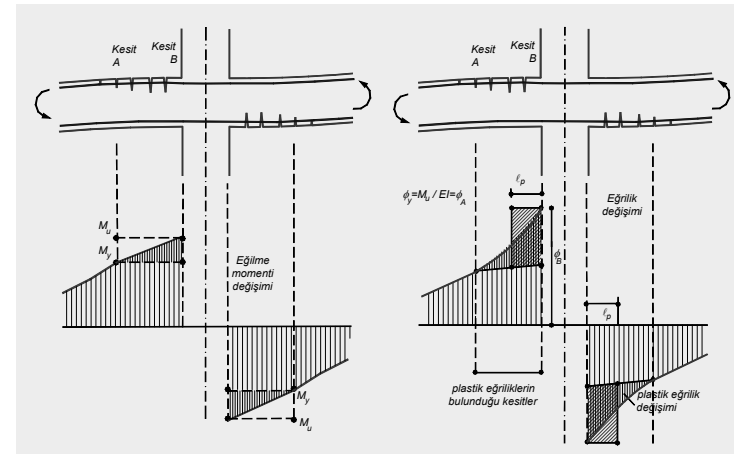
5. Plastik mafsal kabulü

En çok zorlanan kiriş ve kolon bölgeleri



Zekai Celep

Deprem yükü etkisi altında mesnette plastik şekil değiştirmeler ve plastikleşme bölgesi:



Plastik mafsals kabulü:

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

Plastik mafsals parametreleri:

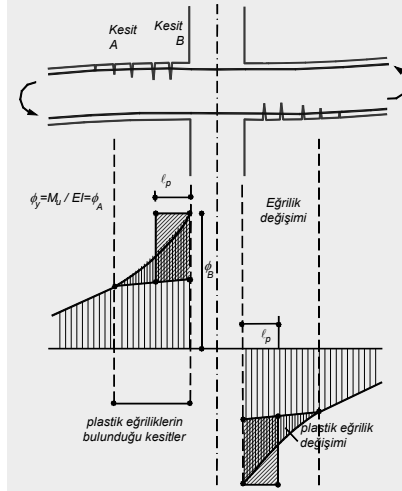
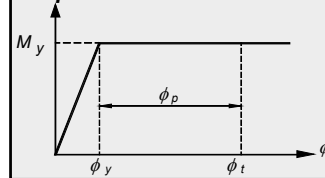
ℓ_p : plastik mafsals boyu

ϕ_t : toplam eğrilik

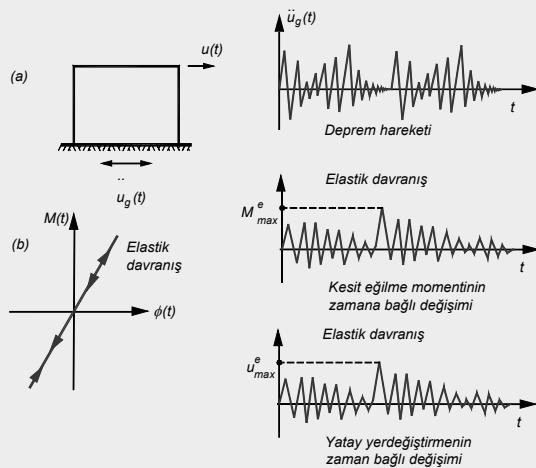
ϕ_p : plastik eğrilik

ϕ_y : akma eğriliği

θ_p : plastik dönme

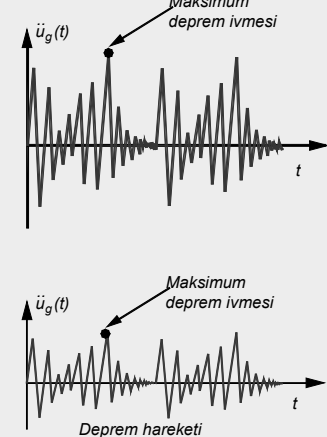


6. Zaman tanım alanında doğrusal elastik çözüm



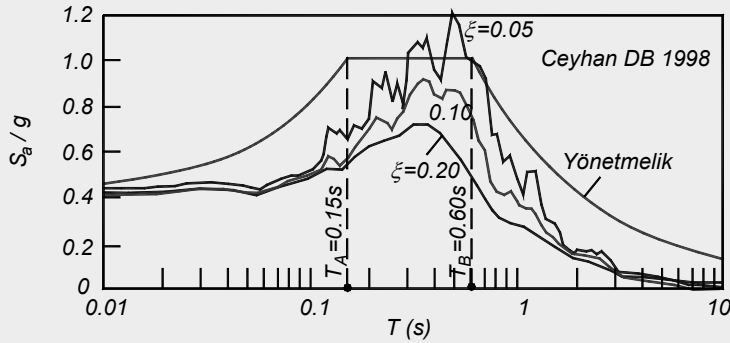
Zaman tanım alanında doğrusal elastik çözüm

- Taşıyıcı sistem elastik kabul edilir.
- Seçilen deprem kaydı sisteme uygulanır.
- Çözüm uzun zaman alır.
- Bütün parametreler (yerdeğiştirmeler, kesit eğilme momenti, mesnet reaksiyonları) zaman bağılı olarak elde edilir.
- Elde edilenlerden çok sınırlı olan bilgi kullanılabilir.
- Basitleştirilmiş şekli "Mod Birleştirme Yöntemi" dir.
- Deprem ivmesi değişimi aynı kalarak ivmeler doğrusal olarak büyütülebilir.



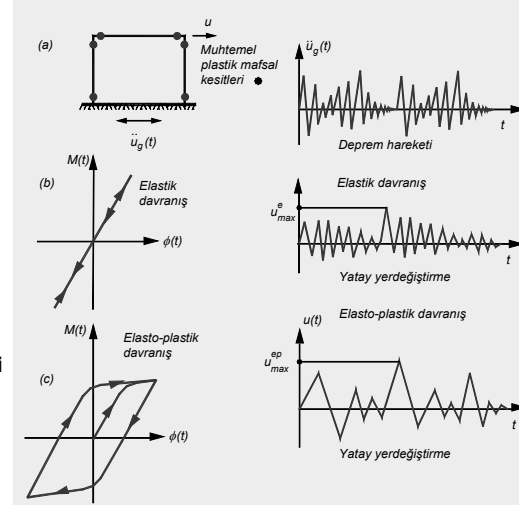
Zaman tanım alanında doğrusal elastik çözüm

- Deprem ivmesi değişiminin spektrumu yönetmelikte verilen spektruma uygun olarak değiştirilebilir.



7. Zaman tanım alanında doğrusal elastik olmayan çözüm

- Potansiyel plastik mafsallık kesitleri belirler.
- Kapasitesine erişen kesitin plastikleştiği kabul edilir.
- Ayrıntılı ve uzun bir çözümdür.
- Basitleştirilmiş şekli "Statik İtme Çözümü" dür.

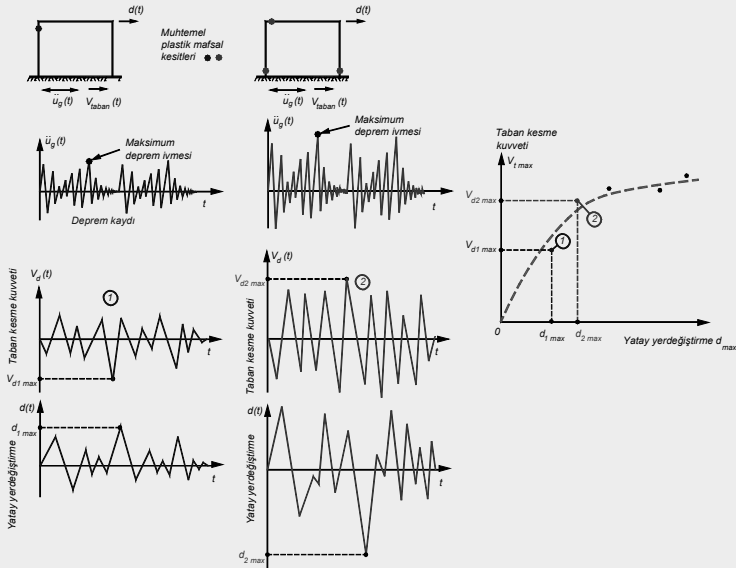


Zekai Celep

Zaman tanım alanında doğrusal olan ve doğrusal olmayan çözüm farkı:

- Zaman tanım alanında doğrusal çözüm yerine daha basit yaklaşım olan Mod Birleştirme Yöntemi kullanılabilir. Süperpozisyon içeren bu yöntem doğrusal olmayanda kullanılamaz.
- Doğrusal çözümde bütün elemanlar elastik olduğu için elemanların sadece EI ve EA gibi elastik parametrelerine ihtiyaç duyulur. Doğrusal olmayan çözümde bazı elemanlar akmağa erişeceği için, elastik ötesi parametrelere ihtiyaç duyulur. Bunların belirlenmesi elastiklerden daha çok belirsizlikler içerir.
- Doğrusal olmayan çözümde, akma ve akma ötesi davranış, rijitlikteki değişiklik, çevrimsel davranışın tarifi ek kabullere ihtiyaç vardır.

Zekai Celep



Zaman tanım alanında doğrusal olan ve doğrusal olmayan çözüm farkı:

- Doğrusal olmayan çözüm modeli daha karmaşık olup, doğrusala göre daha fazla mühendislik tecrübe ister.
- Doğrusal çözümde eleman kesitlerinde kuvvetler (etkiler) hesap edilir ve bunlar kesit kapasiteleri ile karşılaştırılır. Doğrusal olmayan çözümde elastik ötesi şekil değiştirmeler de hesap edilir. Sünek elemanlarda şekil değiştirme kontrolü yapılır ve sünek olmayan elemanda kesit etkisi kontrolü yapılır.
- Kesitlerin kuvvet (normal kuvvet, eğilme momenti gibi) kapasiteleri kolayca belirlenebildiği halde, şekil değiştirme kapasiteleri hesabı daha çok belirsizlikler içerir.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan çözüm adımları:

Taşıyıcı sistem düğüm noktaları ve elemanlar olarak tanımlanır.

- Taşıyıcı sistem elemanlarının elastik özellikleri tanımlanır (Alışılmış ve kolay işlem).
- Taşıyıcı sistem elemanlarının elastik ötesi parametreleri tarif edilir (Belirsizlikleri çok bir işlem).
- Potansiyel plastik mafsalları kesitleri belirlenir.
- Uygun bir deprem kaydı seçilir (Belirsizlikleri çok bir işlem).
- Düşey yük altında doğrusal elastik çözüm yapılır (Alışılmış ve kolay işlem).
- Deprem kaydı altında doğrusal olmayan çözüm yapılır (Uzun zaman alan bir işlem).
- Elastik kalan eleman kesitlerinde kuvvet (Normal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti gibi) talep/kapasite kontrolü yapılır (Alışılmış ve kolay işlem).
- Elastik ötesi şekil değiştirme yapan eleman kesitlerinde şekil değiştirme (birim uzamama/kısalma ve plastik mafsalları dönmesi) talep/kapasite kontrolü yapılır (Belirsizlikleri olan işlem).
- Kabul edilmediği durumda değişiklik yapılarak çözüm tekrarlanır.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan çözüm:

- Elastik ötesi davranışa ait bilgi verir.
- Özellikle tasarımdan daha çok mevcut binaların değerlendirilmesinde kullanılır.
- Beklenen deprem hasarının belirlenmesinde ve binanın zayıf noktasının tespit edilmesinde uygun bir yöntem olarak kabul edilir.
- Yeni tasarımda doğrusal elastik çözüm (~ Mode Birleştirme Yöntemi) yeterli kabul edilir.
- Bu yöntemle Kapasite Yöntemi'nin kullanımı, belirsizlikleri sınırlamak ve basitleştirme için önerilir (Plastikleşmeyen bölgelerin plastikleşenlerin kapasitesi esas alınarak değerlendirilmesi).

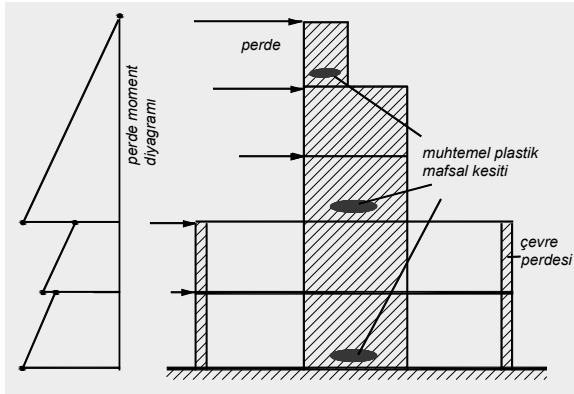
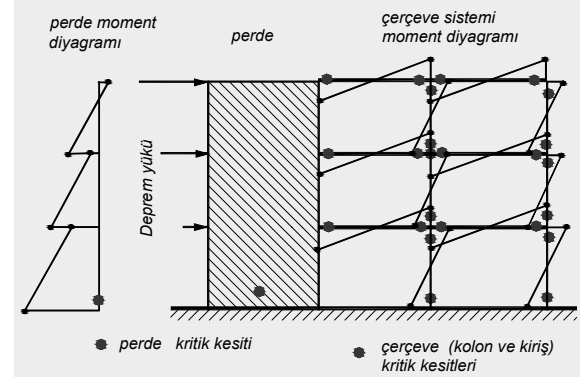
Zaman tanım alanında doğrusal olmayan çözüm:

- Doğrusal olmayan çözüm sonuçları yapılan kabullerden çok etkilenir.
- Farklı deprem kayıtlarından farklı sonuçlar elde edilir.
- Verilerdeki küçük değişiklikler sonuçlarda büyük farklılıklar oluşturabilir.
- Doğrusal çözümde kesit kapasitesi yetersiz elemanın kapasitesi (çoğu zaman rijitliği de) artırılarak çözüm tekrarlanır. Çözüm hemen yakınsar.
- Doğrusal olmayan çözümde şekil değiştirme kapasitesi yetersiz kesitte artırma yapılır ve tekrar çözüm yapılır. Ancak beklenen yakınsama her zaman ortaya çıkmayabilir.
- Buna rağmen doğrusal olmayan çözüm daha bilgi verici kabul edilir. Doğrusal çözümün matematiksel çözümü çekici ve kolay olabilir. Ancak, Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı kullanımı ile büyük belirsizlik hesaba dahil edilir.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan çözüm:

- Doğrusal olmayan çözümün basitleştirilmiş Statik İtme Çözümü'dür. Deprem etkisi olarak deprem kaydı değil, spektrum esas alınır. Çözüm kısa zaman gerektirir.
- Statik İtme Çözümü, statik bir çözümdür. Birinci titreşim modunun etkili olduğu durum için yaklaşımı kabul edilebilir. İleri modların etkili olduğu yüksek binalarda yaklaşımı yetersizdir.
- Buna rağmen kısa zaman gerektiği için her zaman yapılması önerilir.
- Doğrusal olmayan çözümde taşıyıcı sistem değil, model çözüldüğü unutulmamalıdır.
- Taşıyıcı sistemin “kesin” çözümü hedeflenmez, değerlendirme ve tasarım için bilgilerin elde edilmesi hedeflenir.

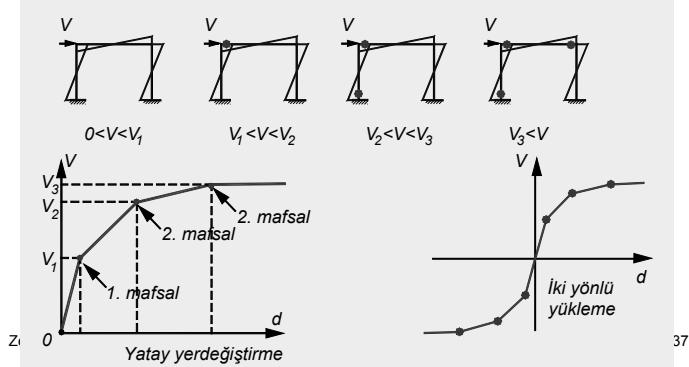
Plastik şekil değiştirme bölgeleri (plastik mafsallar) kesit etkisinin büyük olduğu sünek güç tükenmesinin oluşabileceği bölgeler olarak seçilir.



8. Statik itme çözümü:

- Taşıyıcı sistemin elastik ötesi davranış ve yatay yük kapasitesinin belirlenmesi için yapılan çözümdür.
- Yatay yük etkisinde kesitlerde oluşan plastik şekil değiştirmeler plastik mafsall kabulü ile gözönüne alınır.
- Taşıyıcı sistem elastik ötesi davranış da gözönüne alınarak adım adım yüklenir.
- Son itme adımında iç kuvvet dağılımı, plastik şekil değiştirme ve yerdeğiştirme talebi hesaplanır.
- Kesitten talep edilen beton ve donatı için birim uzama/kısalma değerlerinin sağlanabilir ve kabul edilebilir olup olmadığı incelenir.
- Bulunan bu kapasitenin ortaya çıkması için gerekli kesit kuvvet, eğilme momenti ve şekil değiştirme kapasitelerinin sağlanması gerekir.

- Sistem yükleme ile yumuşar (daha kolay şekil değiştirme / yer değiştirme yapar).
- En sonunda sistem yük taşıyamaz duruma gelir.



Statik itme çözümü:

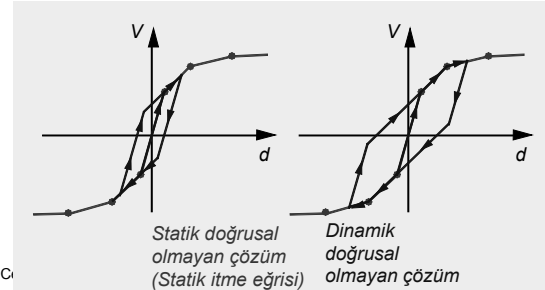
- Elastik ötesi davranış beklenen kesitlerin sünek olması sağlanır.
- Kolon ve kirişte kesme kuvveti dayanımı, plastik mafsalsın talebinden yüksek tutulur.
- Kiriş-kolon birleşim bölgesi enerji tüketimi bakımından zayıf bir bölgedir. Kesme kuvvetinden oluşabilecek elastik ötesi şekil değiştirme ve donatı aderans çözülmesi önlenmelidir.
- Sünek kesitlerde ortaya çıkması beklenen dayanım hesap dayanımı değil, gerçek dayanımdır (fcd / fck ve fyd / fyk / fsu aralarındaki fark).
- Sünek olmayan gevrek elemanların elastik kalması sağlanır. Bu elemanlarda iç kuvvet talepleri hesap edilerek, iç kuvvet kapasiteleri büyük tutulur.

Statik itme çözümü:

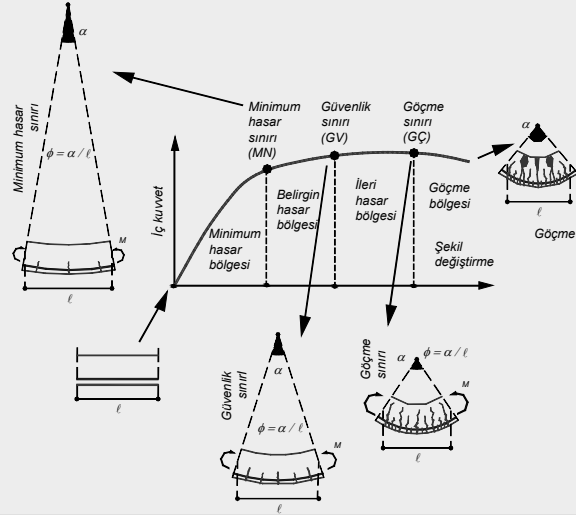
- Taşıyıcı sistemin hiperstatiklik derecesinin yüksekliği, plastik mafsalsların sayısının çokluğu ve moment kapasitesi yüksekliği oranında sistemin elastik ötesi yatay yük kapasitesi, elastik kapasiteden daha büyük olur.
- Plastik mafsals boyu - Betonarme elemanlarda çatlamış kesit eğilme rijitliklerinin hesaba katılır.
- 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.

Statik itme eğrisinin özellikleri:

- Tekrarlanan deprem yüklemesi altında yerdeğiştirme-kuvvet değişimi, statik itme eğrisini içine alarak çevrimsel biçimde oluşur.
- Bu çevrimsel davranış, statik itme eğrisi ve çevrimsel davranıştan oluşan sönüm olarak basitleştirilebilir.
- Sönüm, ilerleyen yükleme durumlarda daha fazla plastik şekil değiştirmeler oluştuğu için artar (değişken sönüm).

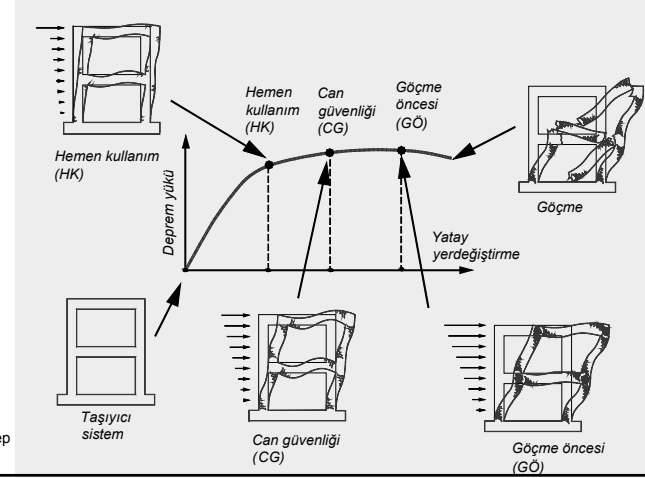


Statik itme eğrinin oluşumunda taşıyıcı sistem eleman kesitlerinin davranışı:



Zekai Celep

Statik itme eğrinin oluşumunda taşıyıcı sistemin davranışı:



Zekai Celep

9. Mevcut binaların deprem güvenliğinin belirlenmesinde statik itme

Mevcut binaların deprem güvenliğini değerlendirme yöntemleri

a. Doğrusal elastik yöntem uygulamaları:

- Eşdeğer deprem yükü yöntemi
- Mod birleştirme yöntemi

b. Doğrusal elastik olmayan yöntem uygulamaları:

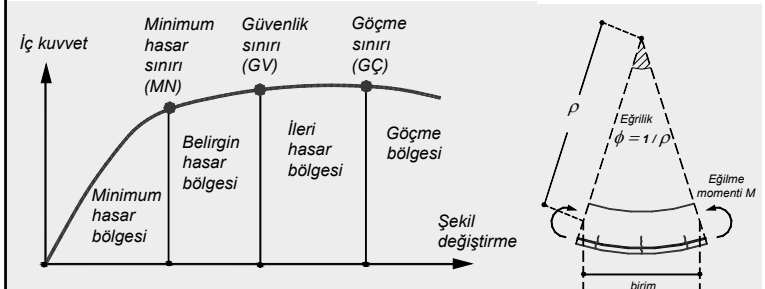
- Artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi
- Artımsal mod birleştirme yöntemi
- Zaman tanım alanında hesap yöntemi

Zekai Celep

43

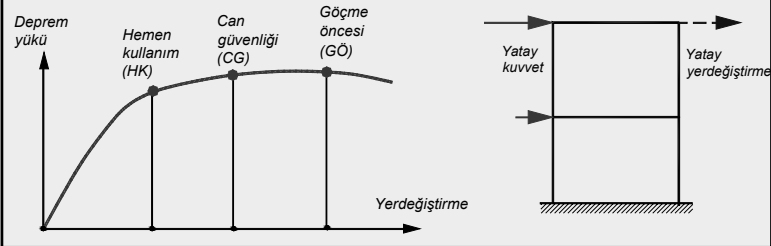
Kesit hasar sınırları ve bölgeleri

- **Minimum hasar sınırı (MN)**
Kesitte elastik ötesi davranışın başlangıcına karşı gelir.
- **Güvenlik sınırı (GV)**
Kesitte dayanımın güvenli olarak sağlanabileceği durumda, elastik ötesi davranışın üst sınırına karşı gelir.
- **Göçme sınırı (GÇ)**
Kesitin göçme öncesi davranışının üst sınırına karşı gelir.



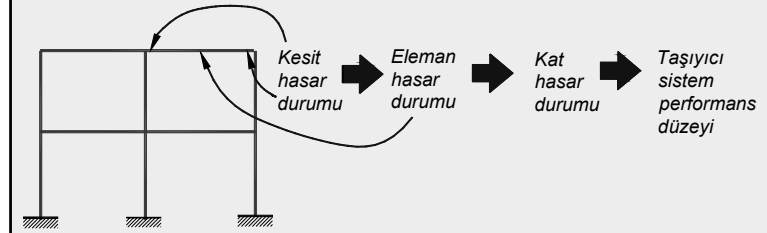
Bina performans düzeyleri

- **Hemen kullanım performans düzeyi (HK)**
- **Can güvenliği performans düzeyi (CG)**
- **Göçmenin önlenmesi performans düzeyi (GÖ)**



Bina performans düzeyinin oluşması:

- **Kesit hasar durumu,**
(Kolon ve kirişlerin uç kesitlerindeki hasar durumu),
- **Eleman hasar durumu,**
- **Kat hasar durumu,**
- **Taşıyıcı sistem performans düzeyi,**



9.2. Depremde bina performansının “Doğrusal Elastik Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi” ile belirlenmesi

- Bu yöntemde “dayanım” esas alınır.
- Güç tükenmesi türleri
 - Sünek olan (eğilme momentinin kritik olduğu elemanlar)
 - Sünek olmayan / Gevrek olan (kesme kuvvetinin ve basınç kuvvetinin kritik olduğu elemanlar)

Kiriş, kolon ve perdelerin kritik kesitlerinde eğilme momenti ile uyumlu hesaplanan kesme kuvvetinin, kesme kuvveti kapasitesini geçmemesi gerekir.

Depremde bina performansının doğrusal elastik Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi ile belirlenmesi

$r = \text{Etki} / \text{Kapasite oranı} = \text{Deprem etkisi} / \text{Artık kapasite}$

- M_E : Deprem etkisi ile oluşan eğilme momenti
- $M_D = M_{G+Q}$: Düşey yüklerden oluşan eğilme momenti
- $M_K = M_r$: Eğilme momenti kapasitesi
- $M_K - M_D$: Artık moment kapasitesi

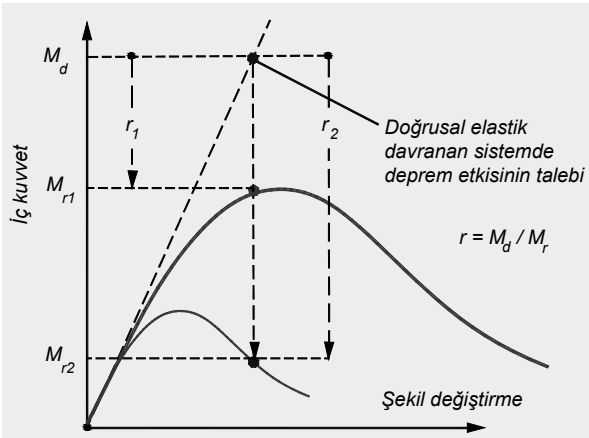
Güç tükenmesi sünek olan elemanların kesitlerinin eğilme Etki/Artık kapasite oranı r , sadece azaltılmamış ($R_a = 1$) deprem etkisindeki kesit momentinin kesit artık moment kapasitesine oranıdır. Bu değer ilgili sınır değerlerle karşılaştırılması ile, kesit hasar bölgeleri belirlenir.

Yeni yapılar için:

$$M_{G+Q} + \frac{M_E}{R_a} \leq M_r$$

Mevcut yapılar için:

$$\frac{M_E}{M_r - M_{G+Q}} = \frac{M_E}{M_K - M_D} = r \leq r_{\sin ir} \quad 8$$



Betonarme kirişler ve kolonlarda hasar sınırlarını tanımlayan Etki/Kapasite oranı (r) nin sınır değerlerinin bağlı olduğu parametreler:

- Kirişlerde çekme donatısının dengeli donatının üzerinde bulunması, sünek güç tükenmesinin ortaya çıkmasında olumsuz yönde etkili olacağı için, r nin sınır değeri azalır.
- Kirişlerde basınç donatısının bulunması, sünek güç tükenmesi ortaya çıkmasında olumlu yönde etkili olacağı için, r nin sınır değeri arttırır.
- Kiriş ve kolonlarda etkilerin büyük olduğu bölgelerin sargılı olması, güç tükenmesinin sünek olmasını sağlayacağı için, r nin sınır değerini arttırır.

Betonarme kirişler ve kolonlarda hasar sınırlarını tanımlayan Etki/Kapasite oranı (r) nin sınır değerlerinin bağlı olduğu parametreler:

- Kiriş ve kolonlarda kesme kuvvetinin artması, sünek güç tükenmesinin ortaya çıkmasında olumsuz yönde etkili olacağı için, r nin sınır değerini azalır.
- Kolonlarda normal kuvvetin artması, sünek güç tükenmesinin ortaya çıkmasında olumsuz yönde etkili olacağı için, r nin sınır değerini azalır.

Betonarme kirişlerde hasar sınırlarını tanımlayan Etki/Kapasite oranları ($r_{sınır}$)

| Sünek Kirişler | | | Hasar Sınırı | | |
|-------------------------------|-----------|-----------------------------|--------------|-----|----|
| $\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$ | Sargılama | $\frac{V_e}{b_w d f_{ctm}}$ | MN | GV | GÇ |
| ≤ 0.0 | Var | ≤ 0.65 | 3 | 7 | 10 |
| ≤ 0.0 | Var | ≥ 1.30 | 2.5 | 5 | 8 |
| ≥ 0.5 | Var | ≤ 0.65 | 3 | 5 | 7 |
| ≥ 0.5 | Var | ≥ 1.30 | 2.5 | 4 | 5 |
| ≤ 0.0 | Yok | ≤ 0.65 | 2.5 | 4 | 6 |
| ≤ 0.0 | Yok | ≥ 1.30 | 2 | 3 | 5 |
| ≥ 0.5 | Yok | ≤ 0.65 | 2 | 3 | 5 |
| ≥ 0.5 | Yok | ≥ 1.30 | 1.5 | 2.5 | 4 |

9.2. Depremde bina performansının doğrusal elastik olmayan yöntemler ile belirlenmesi

Bu yöntemde “*şekil değiştirme*” esas alınır.

- Artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi
 - Artımsal mod birleştirme yöntemi
 - Zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi
- Doğrusal ötesi davranış, plastik mafsallarda elastik ötesi şekil değiştirmelerle gözönüne alınıyor.

Depremde bina performansının “Doğrusal Elastik Olmayan Artımsal Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi” ile belirlenmesi

Bu doğrusal olmayan yöntemde şekil ve yerdeğiştirmeler esas alınır.

- Depremın talep ettiği yatay yüke kadar taşıyıcı sistem elastik ötesi davranış da gözönüne alınarak kadar adım adım yüklenir (*Statik İtme Analizi*). Son itme adımında deprem etkisinin iç kuvvet dağılımı, şekil değiştirme ve yerdeğiştirme talebi hesaplanır.
- Bulunan iç kuvvetler kullanılarak elemanların güç tükenme durumları belirlenir:
 - Sünek olan (eğilme momentinin kritik olduğu elemanlar)
 - Sünek olmayan / Gevrek olan (kesme kuvvetinin ve basınç kuvvetinin kritik olduğu elemanlar)

Artımsal Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi

- Sünek güç tükenmesi [Toplam (elastik ve plastik) şekil değiştirme talepleri hesap edilerek, şekil değiştirme kapasiteleri karşılaştırılır.]*

Deprem etkisinin talep ettiği beton ve donatı birim uzama/kısalma değerleri ilgili sınır kapasite değeriyle karşılaştırılarak, kesit hasar bölgeleri belirlenir. Bulunan sonuçlardan bina için performans değerlendirilmesi yapılır.

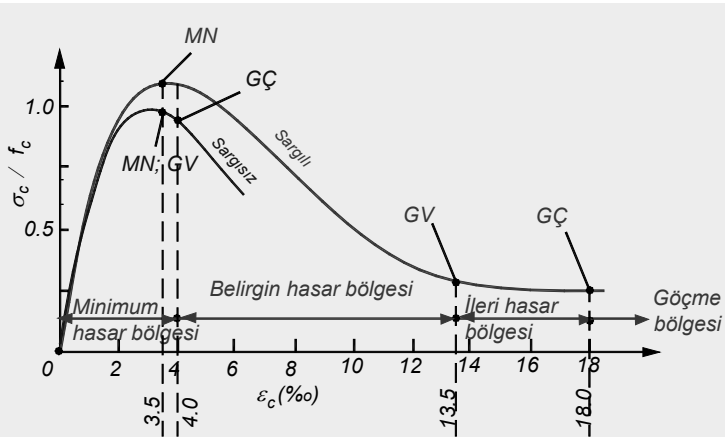
- Sünek olmayan güç tükenmesi (İç kuvvet talepleri hesap edilerek, iç kuvvet kapasiteleri ile karşılaştırılır.)*

Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi

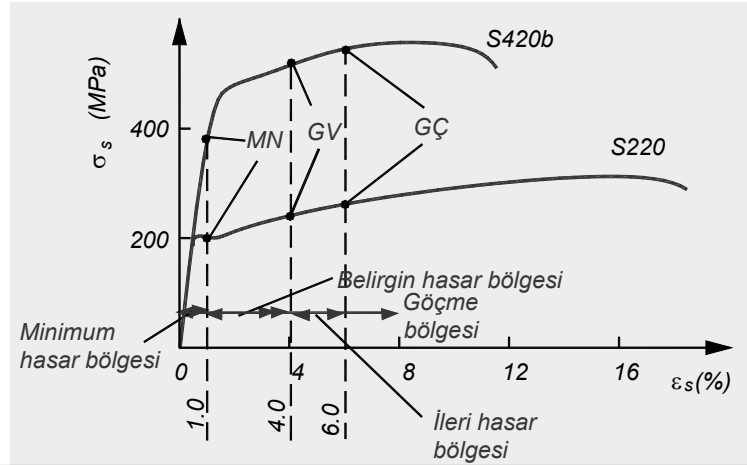
Kesit hasar sınırlarına karşı gelen beton ve donatı birim uzama / kısalma değerleri

| Kesit hasar sınırları | Beton birim kısalması | | Çelik birim uzama / kısalması |
|---------------------------|-----------------------|---------|-------------------------------|
| | Sargısız | Sargılı | |
| Minimum hasar sınırı (MN) | 0.0035 | 0.0035 | 0.010 |
| Güvenlik sınırı (GV) | 0.0035 | 0.0135 | 0.040 |
| Göçme sınırı (GÇ) | 0.0040 | 0.0180 | 0.060 |

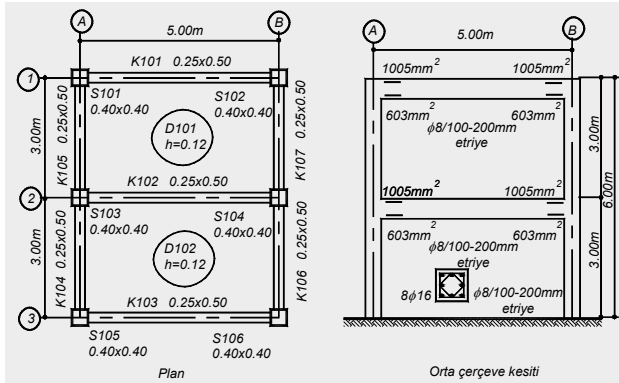
Kesit hasar sınırlarına karşı gelen beton birim kısalma değerleri



Kesit hasar sınırlarına karşı gelen donatı birim uzama/kısalma değerleri



Örnek 1:



Taşıyıcı sistem bilgileri:

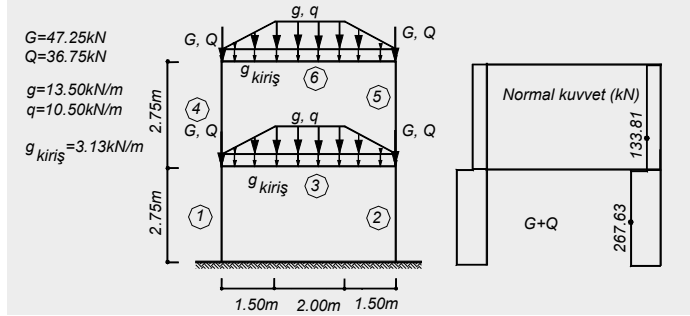
| | | |
|----------------|-----------------------------|--------------------------|
| Kolonlar | : 0.40m×0.40m | d' = 0.04m |
| Kiriş | : 0.25m/0.50m | d' = 0.04m |
| Döşeme | : 0.12m | |
| Kaplama | : 1.5kN/m² | |
| Hareketli yük | : 3.5kN/m² | |
| Malzeme | : C20 / S220 | |
| Deprem bölgesi | : A _o = 0.4 | |
| | : f _{cm} = 20MPa | f _{ym} = 220MPa |
| | : f _{ctm} = 1.6MPa | E _c = 28GPa |
| Zemin sınıf B | : T _A = 0.15s | T _B = 0.60s |



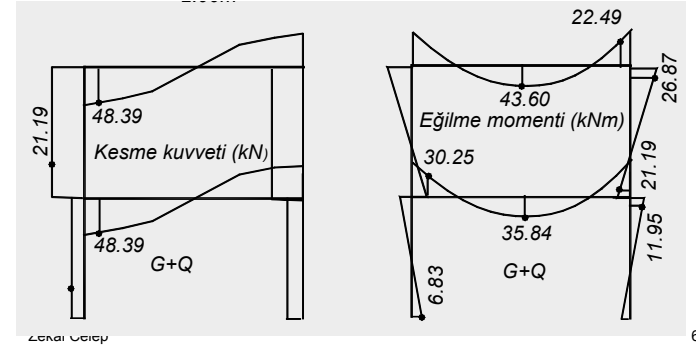
Kat ağırlıkları:
 $g = 4.5\text{kN/m}^2 \times 3\text{m} = 13.5\text{kN/m}$
 $q = 3.5\text{kN/m}^2 \times 3\text{m} = 10.5\text{kN/m}$

$G_1 = G_2 = 157.38\text{kN}$
 $Q_1 = Q_2 = 110.25 = 36.75\text{kN}$
 $W_1 = W_2 = G_1 + nQ_1 = 157.38 + 0.3 \times 110.25 = 190.45\text{kN}$
 $W = W_1 + W_2 = 380.90\text{kN}$

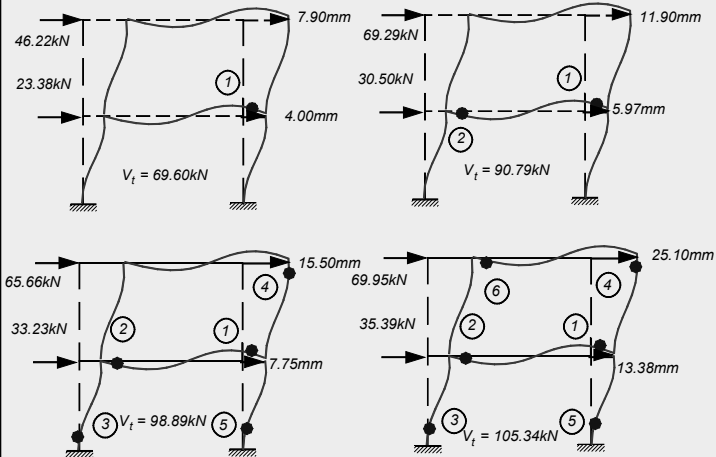
Düşey yükler altında çözüm: yükleme ve normal kuvvet değişimi:



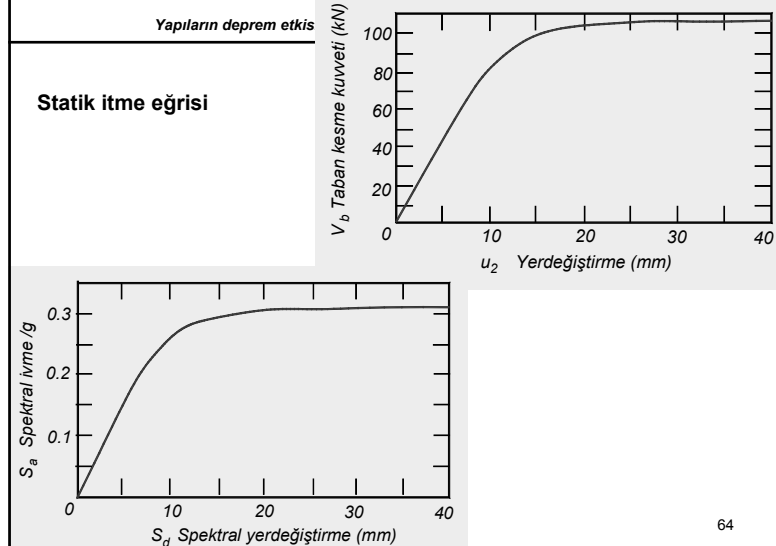
Düşey yükler altında çözüm: Kesme kuvveti ve eğilme momenti değişimi:



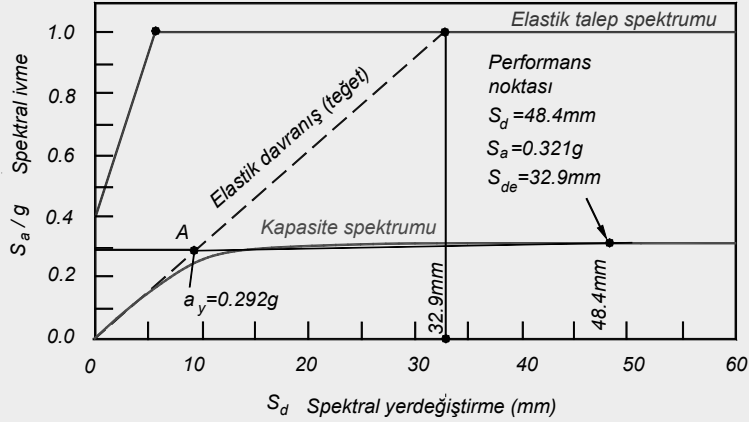
Birinci moda uygun statik itme adımları:



Statik itme eğrisi



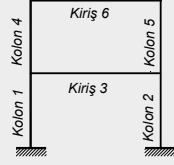
Yapıların deprem etkisinde şekil değiştirme dayalı değerlendirilmesi



Yapıların deprem etkisinde şekil değiştirme dayalı değerler

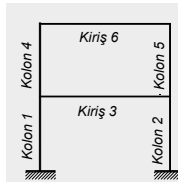
Plastik mafsal dönmeleri:

| Eleman | Uç | Mafsal no | Normal kuvvet (kN) | Moment (kNm) | Plastik dönme $\times 10^3$ (radyan) |
|---------|-----|-----------|--------------------|--------------|--------------------------------------|
| Kiriş 3 | Sol | 2 | 0 | +60.44 | 8.750 |
| Kiriş 3 | Sağ | 1 | 0 | -96.34 | 10.103 |
| Kiriş 6 | Sol | 6 | 0 | +60.76 | 6.106 |
| Kiriş 6 | Sağ | | 0 | -82.29 | - |
| Kolon 1 | Üst | | -130.49 | -41.71 | - |
| Kolon 1 | Alt | 3 | -130.49 | +85.98 | 8.222 |
| Kolon 2 | Üst | | -250.42 | -60.28 | - |
| Kolon 2 | Alt | 5 | -250.42 | +109.97 | 7.648 |
| Kolon 4 | Üst | | -66.62 | -60.76 | - |
| Kolon 4 | Alt | | -66.62 | +18.73 | - |
| Kolon 5 | Üst | 4 | -123.83 | -82.29 | 7.864 |
| Kolon 5 | Alt | | -123.83 | +36.06 | - |



Yapıların deprem etkisinde şekil değiştirme dayalı değerlendirilmesi

Toplam eğrilik:

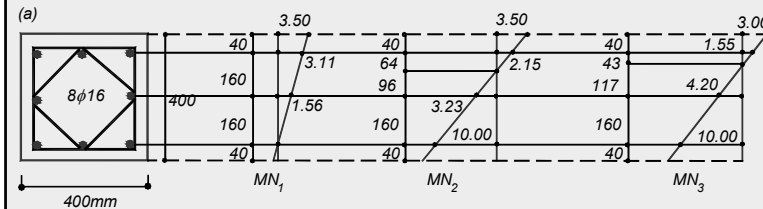


| Eleman | Uç | Plastik dönme (radyan) $\theta_p \times 10^3$ | Plastik eğrilik (1/m) $\phi_p \times 10^3$ | Akma eğriliği (1/m) $\phi_y \times 10^3$ | Toplam eğrilik (1/m) $\phi_t \times 10^3$ |
|---------|-----|---|--|--|---|
| Kiriş 3 | Sol | 8.750 | 35.00 | 3.02 | 38.02 |
| Kiriş 3 | Sağ | 10.103 | 40.41 | 3.30 | 43.71 |
| Kiriş 6 | Sol | 6.106 | 24.42 | 3.02 | 27.44 |
| Kolon 1 | Alt | 8.222 | 32.89 | 4.64 | 37.53 |
| Kolon 2 | Alt | 7.648 | 30.59 | 4.91 | 35.50 |
| Kolon 5 | Üst | 7.864 | 31.56 | 3.96 | 35.52 |

Yapıların deprem etkisinde şekil değiştirme dayalı değerlendirilmesi

Minimum hasar sınıra ait şekil değiştirme durumları:

Minimum Hasar Sınırı (MN) $\epsilon_{cu} = 0.0035$ $\epsilon_{su} = 0.010$



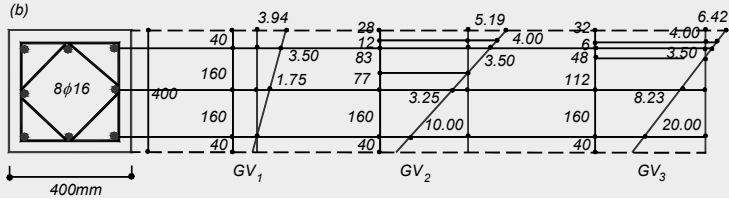
MN_1 şekil değiştirme durumu:

$$N_r = -0.85^2 \times 20 \times 400 \times 360 - 1005 \times 220 = -2301.1 \times 10^3 \text{ N}$$

$$\rho_r = 0.0035 / 0.36 = 9.72 \times 10^{-3} \text{ rad / m}$$

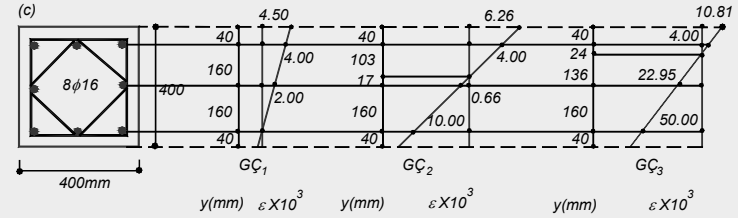
Güvenli hasar sınıra ait şekil değiştirme durumları:

Güvenlik Sınırı (GV) $\epsilon_{cg} = 0.0035$ $\epsilon_{su} = 0.040$

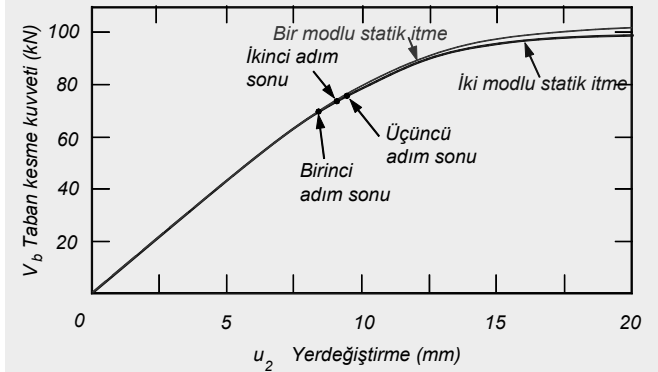
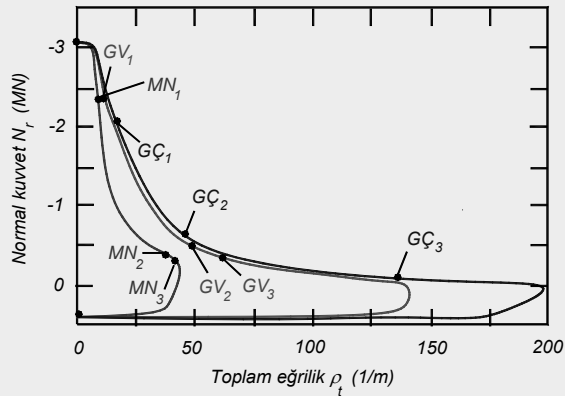


Göçme hasar sınıra ait şekil değiştirme durumları:

Göçme Sınırı (GÇ) $\epsilon_{cg} = 0.0040$ $\epsilon_{su} = 0.060$



Hasar sınır bölgeleri:



$$\bar{M}_1 / (\bar{M}_1 + \bar{M}_2) = 35.08 / (35.08 + 3.74) = 0.90$$

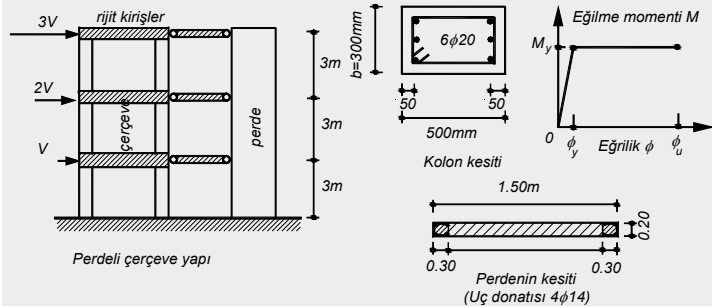
$$\bar{M}_2 / (\bar{M}_1 + \bar{M}_2) = 0.10$$

Örnek 2:

Perdeli çerçeve sistemde statik itme eğrisi

$$f_c = 25MPa \quad f_y = 420MPa \quad \varepsilon_{cu} = 0.004 \quad \varepsilon_y = 0.0021$$

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



Kolon kesiti için:

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

$$\phi_u = 71.43radyan / mm$$

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

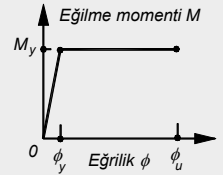
Perde kesiti için:

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

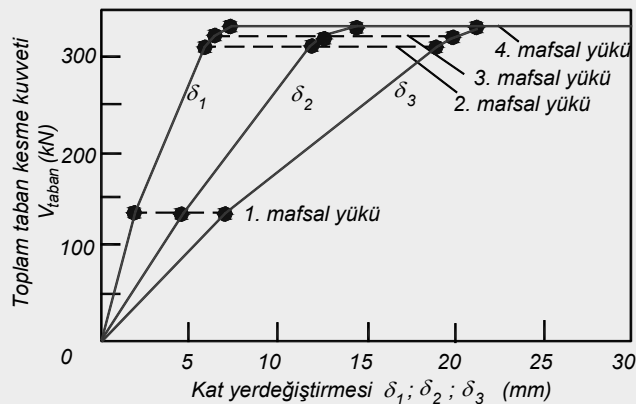
$$M_y = M_u = F_s j d = 258.30 \times 1.20 = 309.96Nmm$$

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

Zekai Celep



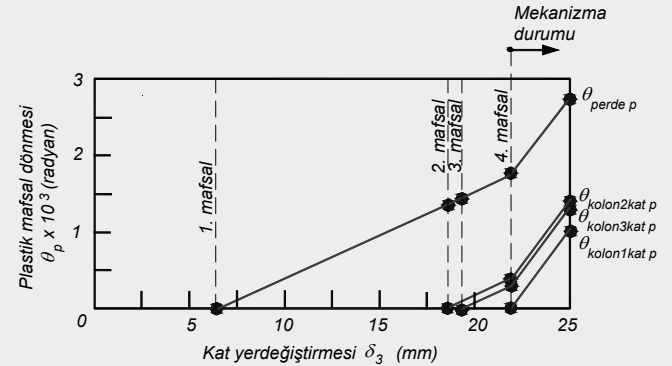
74



Zekai Celep

Statik itme eğrisi

75

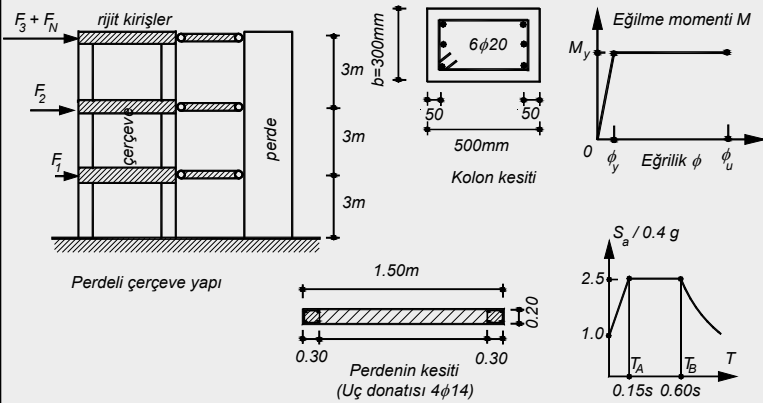


Kapasitenin ortaya çıkabilmesi için sünek olmayan (kesme kuvveti, donatı sıyırılması, birleşim bölgesi gibi) güç tükenmesi önlenmeli, sünek mafsal dönmeli sağlanmalı ve bu elastik ötesi şekil değiştirmeler kabul edilebilir olmalıdır.

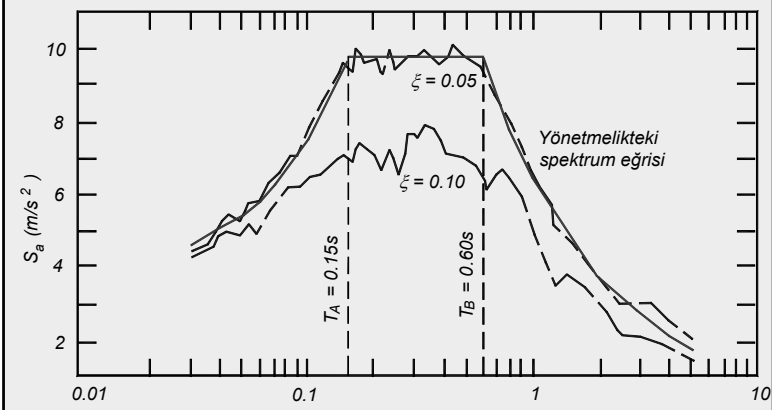
Zekai Celep

76

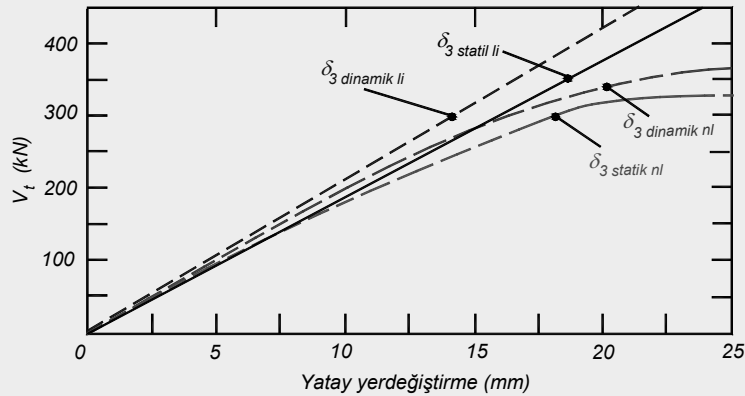
Örnek 3:
Perdeli çerçeve sistemde staik ve dinamik çözümler



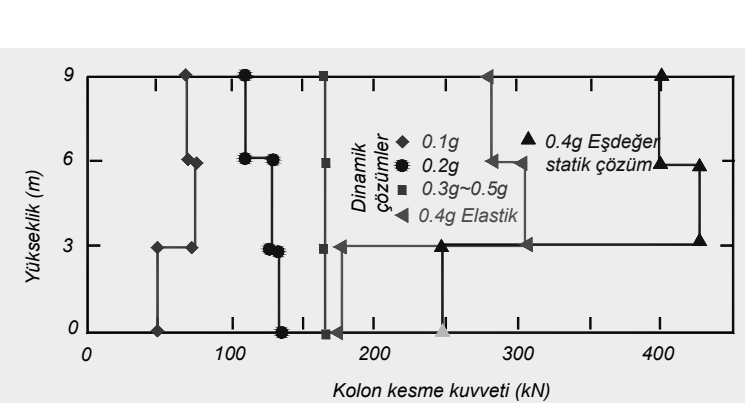
Yönetmeliğe uygun spektrum eğrisi:



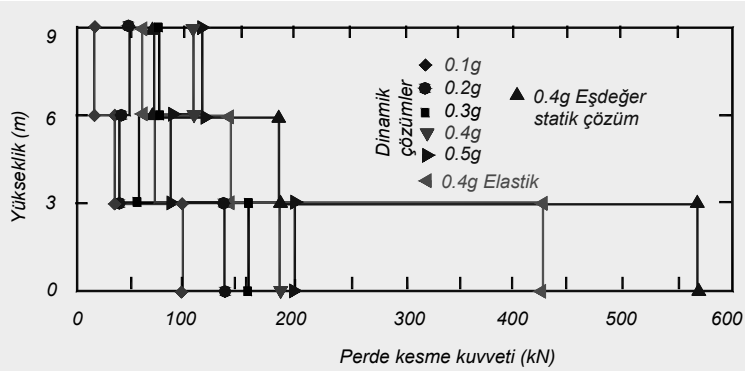
Yatay kuvvet ve yatay yerdeğiştirme ilişkisi:



Kolon kesme kuvvetinin yükseklikle değişmesi:



Perde kesme kuvvetinin yükseklikle değişmesi:



11. Sonuçlar

- Doğrusal elastik ötesi davranış beklenen deprem etkisinde şekil değiştirmeye dayalı değerlendirme kuvvete dayalıdan daha gerçekçidir.
- Şekil değiştirmeğe dayalı hesapta gerçekçi malzeme davranış eğrilerinin daha gerçekçi bilinmesi önemlidir.
- Doğrusal olmayan hesap günümüzde ancak belirli yazılımlarla yapılabilmektedir. Bu sebepten uygulayıcıların bu hesap yöntemlerine ait ayrıntılı kabullerden çok ana kabulleri bilmeleri önemlidir.
- Mevcut kabuller ve yazılımlar günümüzde düzenli yapılar için daha anlamlı sonuçlar vermektedir.
- Doğrusal olmayan davranışın göz önüne alınması deprem yükleri altında daha gerçekçi davranış ve kapasite hesabını mümkün kılar ve taşıyıcı sistemin kuvvetli ve zayıf taraflarını belirlemek mümkün olur.
- Şekil değiştirmeğe dayalı incelemenin mümkün olması için, sünek olmayan (kesme kuvveti, donatı sınırlaması, birleşim bölgesi gibi) güç tüketmesi önlenmeli, sünek mafsallı dönmeli sağlanmalı ve oluşan elastik ötesi şekil değiştirmeler kabul edilebilir olmalıdır.

12. İlgili yayınlar

- N. Aydınöğlü, Z. Celep, E. Özer, H. Sucuoğlu; *Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik – Örnekler Kitabı*, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara 2007.
- Z. Celep; *Betonarme taşıyıcı sistemlerde doğrusal olmayan davranış ve çözümleme*, (Deprem Yönetmeliği/2007 kavramları), Beta Yayıncılık, İstanbul 2008.
- Z. Celep, N. Kumbasar; *Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı* (Bölüm 11: Performans kavramına dayalı tasarım), Beta Yayıncılık, İstanbul 2004.
- F. Naeim; *The seismic design handbook*, Kluwer Academic Publishers, Boston 2001.
- GH. Powell; *Performance based design, Seminar notes*, Computers & Structures, Inc., 2007.
- T. Paulay, MNJ. Priesley, *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*, John Wiley & Sons, New York 1970.

- MNJ. Priesley, GM. Calvi, MJ. Kowalsky; *Displacement-based seismic design of structures*, IUSS Press, Pavia 2007.
- MNJ. Priesley, F. Seible, M. Calvi; *Seismic design and retrofit of bridges*, Wiley Interscience, New York 1996.
- *Deprem bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmelik*, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara 2007.
- FEMA-273: *NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington 1997.
- FEMA-274: *NEHRP Commentary on the seismic rehabilitation of buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington 1997.
- FEMA-356: *Prestandard and commentary for seismic rehabilitation of buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington 1997.
- ATC-40; *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*, Applied Technology Council, California 1996.