# BETONARME YAPILARIN DEPREM GÜVENLİĞİ

**A. İlki[1] ve Z. Celep[1]**

[1] *Profesör, İnşaat Müh. Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul*
*Email: ailki@itu.edu.tr*

**ÖZET:**

Betonarme yapıların deprem güvenliğinin belirlenmesi ve yetersiz olanların güçlendirilmesi yurdumuzda önemli güncel inşaat mühendisliği problemlerindendir. Çeşitli yöntemler kullanılarak güçlendirilen yapılarda güçlendirme seviyesinin yeterliliğinin belirlenmesi de bu konunun kapsamı içindedir. Bu yazıda Deprem Yönetmeliği'nde (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik) mevcut binaların deprem güvenliğinin belirlenmesine yönelik olarak öngörülen yöntemlerin ana hatları özetlenmiş, ilgili yönetmelik yaklaşımları FEMA ve Eurocode dökümanlarında verilen yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır. Özellikle deprem etkisinin tanımında ve taşıyıcı sistemde bu etki altında oluşan kuvvetlerin (kuvvet, moment, gerilme) ve şekil değiştirmelerin (şekil değiştirme, yerdeğiştirme, kesit dönmesi, çember kiriş dönmesi, birim uzama veya kısalma) hesabında ve bunların sınır değerlerinin tespitindeki belirsizliklere dikkat çekilmiştir. Diğer mühendislik uygulamalarında olduğu gibi, yapıların deprem güvenliğinin belirlenmesinde mühendislik deneyiminin yeri vurgulanmıştır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Betonarme yapı, deprem güvenliği, güçlendirme, yapısal performans

## 1. GÜVENLİK KAVRAMI

Mevcut betonarme yapıların düşey yükler ve deprem yükleri altında güvenliğinin belirlenmesinde; yükler, malzeme özellikleri ve taşıyıcı sistem elemanları ile ilgili kabullerin yapılması, taşıyıcı sistem çözümlemesinin gerçekleştirilmesi, ve güvenli-güvensiz ayrımı yapılacak kriterin belirlenmesi gerekirlidir. Bu adımlar sembolik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir. Güvenli olmadığı belirlenen yapıların güçlendirildikten sonra, yeterli güçlendirmenin yapıldığının gösterilmesi de yine güvenlik belirlemesi ile gerçekleştirilir. Bu adımların yeni taşıyıcı sistem tasarımında da belirli bir ölçüde izlendiği açıktır. Yeni tasarımda, taşıyıcı sistem elemanlarının geometrisi öngörülür, malzeme türü seçilir, güvenlik sınırını sağlayacak şekilde kesit donatısı belirlenir. Bu arada örneğin belirlenen donatının uygun sınırlar dışında çıkması durumunda, tekrar başa dönerek geometriyi (örneğin kesit boyutlarını) değiştirerek işlem tekrarlanır. Sonuç olarak deneme-yanılma yöntemi ile en uygun tasarıma ulaşılabilir. Değerlendirmede ise, taşıyıcı sistem geometrisi yanında mevcut yapının malzeme özellikleri ve donatı düzeni ile donatı detayları da belirlidir. Mevcut binaların deprem güvenliğinin belirlenmesi üç adım olarak görülebilir:

a. *Kapasitenin belirlenmesi:* Mevcut binanın taşıyıcı sistem elemanlarının geometrik ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi. Bu bilgileri kullanarak deprem etkisinde zorlanması beklenen eleman kapasitelerinin hesabı.

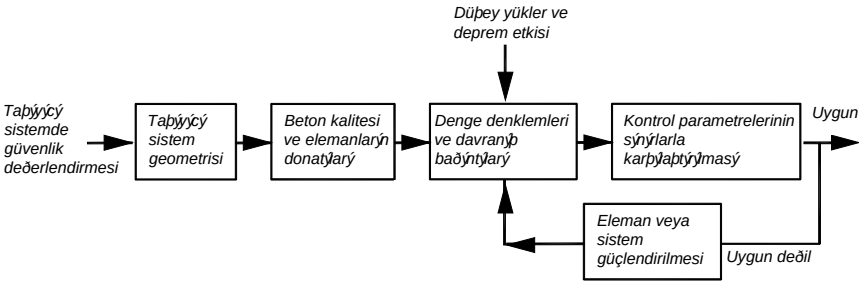
b. *Talebin belirlenmesi:* Gözönüne alınacak deprem etkisinin seçilmesi ve bu depremde binada ortaya çıkacak kesit etkileri, şekil değiştirme ve yerdeğiştirmelerin hesabı.

c. *Karşılaştırma ve sonuç*: Eleman ve kesitlerde bulunan kapasite ve talebin karşılaştırılarak beklenen hasar durumunun (taşıyıcı sistem performans durumunun) belirlenmesi. Bu durumun kabul edilebilir veya edilemez olmasına göre güvenlik konusunda karar verilmesi.

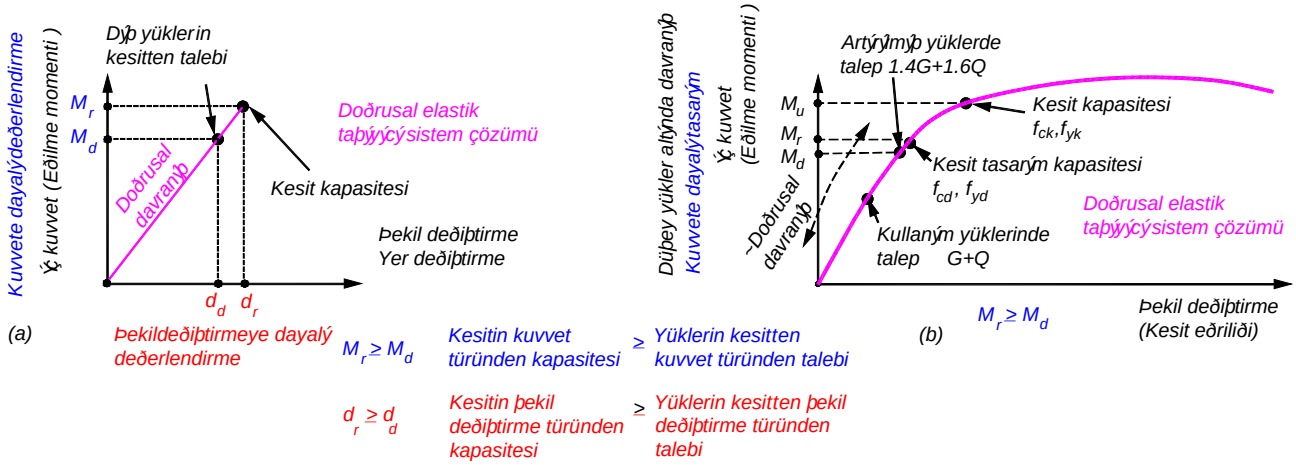
Bu işlemler sonucunda;

$$R_r \geq R_d \qquad\qquad d_r \geq d_d \qquad (1)$$

ifadelerinden seçilen birinin sağlanması durumunda yeterli güvenliğin bulunduğu kabul edilir. Verilen ifadenin birincisi kuvvete dayalı karşılaştırmayı, ikincisi şekil değiştirmeye dayalı karşılaştırmayı göstermektedir. Burada $R_r$ ve $R_d$ kuvvet (kuvvet veya moment) türünden kapasite ve talebi, $d_r$ ve $d_d$ şekil değiştirme (şekil değiştirme ve yerdeğiştirme) türünden kapasite ve talebi göstermektedir. Doğrusal elastik davranış için bu karşılaştırma Şekil 2.a'da gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, kesitin talep ve kapasite noktalarının karşılaştırmasının kuvvet (veya moment) veya şekil değiştirme (veya yerdeğiştirme) eksenlerinde yapılması tamamen birbiri ile eşdeğerdir. Ancak, betonarme taşıyıcı sistemde kesitte betonun çatlaması, betonun ve donatının elastik ötesi davranışları, sistemin davranışını doğrusaldan ayıracaktır (Şekil 2.b). Düşey yüklerin ortaya çıkma sıklığı yüksek olduğu için, güç tükenme durumunda taşıyıcı sistemin elastik ötesi davranışı sınırlandırılır. Kapasite noktasının talep noktasının üzerinde olmasının kontrolü (güvenlik değerlendirilmesi) iki eksende yapılabilmesine karşılık, inşaat mühendislerinin kuvvet veya yükü günlük hayatta şekil değiştirme veya yerdeğiştirmeden daha yaygın kullanması sebebiyle, kontrol düşey eksende yapılır ve Kuvvete Dayalı Değerlendirme sözkonusu olur. Eğer deprem etkisinde olduğu gibi, elastik ötesi şekil değiştirmeler kabul edilirse, Şekil 3'de görüldüğü gibi, düşey eksende bir kıyaslama yapılması pratik olmaz, bu durumda karşılaştırma yatay eksende yapılır ve Şekil değiştirmeye Dayalı Değerlendirme sözkonusu olur.




Şekil 1. Betonarme taşıyıcı sistem güvenlik değerlendirmesi adımları




Şekil 2. Düşey yükler altında a) doğrusal elastik kesitte ve b) betonarme kesitte kuvvete ve şekil değiştirmeye dayalı güvenlik değerlendirmesi

Eğer bir güçlendirme problemi sözkonusu ise, (1) de verilen eşitsizliğin büyük farkla sağlanması güçlendirmenin gereksiz düzeyde fazla olduğuna ve hafifletilebileceğine işaret eder. Deprem Yönetmeliği'nde (2007) bu kavramlar tasarlanan yeni ve mevcut binalar için farklı yöntemlerle tanımlanmıştır.

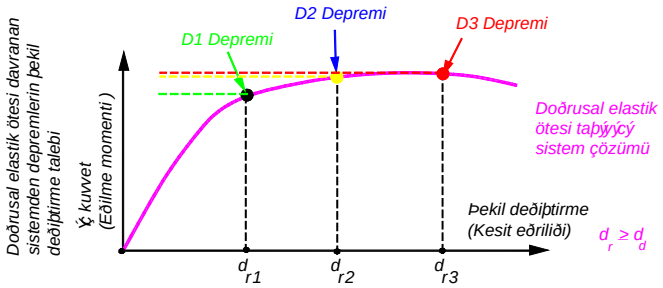
## 2. DEPREM ETKİSİ

Deprem Yönetmeliği'nde Tasarım Depremi (D2), 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem olarak tanımlanır. Tasarımı yapılan binalarda bina önem katsayısı kullanılarak, deprem etkisi çeşitlendirilir ve arttırılır. Örneğin, toplumsal olarak önemli binalar için ya da deprem sonrası kullanımda kalması gereken binalar için deprem etkisi bina önem katsayısı olarak tanımlanan bir katsayı ile büyütülür. Bina önem katsayısının 1.5 olarak kullanılması 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan depremin (D3) tasarımda kullanılmasına karşı geldiği kabul edilebilir. Sonuç olarak tasarımı yapılacak binalar için binanın önemine ya da binanın hasar görmesi durumunda doğacak tehlike ve kaybın boyutuna bağlı olarak farklı depremlerin tasarımda esas alındığı anlaşılmaktadır. Her yeni binanın tasarımında tek bir deprem gözönüne alınır ve depremin seçimi bina önem katsayısı ile yapılır. Eğer tasarım için yapılan çözümleme statik eşdeğer deprem kuvvetini esas alıyorsa, deprem spektrumunun tanımlanması yeterli olur. Ancak, eğer zaman tanım alanında bir çözüm yapılacaksa, bu spektruma uygun deprem kayıtlarının oluşturulması gerekir. Bu kayıtların sayısı ve spektrum ile olan uyuşumu konusunda Deprem Yönetmeliği'nde (2007) ayrıntılı bilgi bulunmaktadır.

Mevcut binaların deprem performanslarının değerlendirilmesinde gözönüne alınan üç farklı depremin parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablodaki Tasarım Depremi, bina önem katsayısı $I = 1$ olan yeni konut binaları için gözönüne alınan deprem etkisine karşı gelmektedir. Bunun yanında En Büyük Deprem'in yeni projelendirilen ve toplumsal açıdan önemli binalar için gözönüne alınan deprem etkisine belirli bir yaklaşıklıkla karşı geldiği söylenebilir. Kullanım Depremi ise, yeni bir etki olarak görülebilir. Dönüş periyotları incelendiğinde kullanım depremi binanın ömrü boyunca maruz kalma olasılığının göreli olarak yüksek olduğu bir deprem olarak kabul edilebilir.

Tablo 1. Deprem etkisi parametreleri

| *Deprem türü* | *Deprem etkisi katsayısı* | *50 yılda aşılma olasılığı* | *Ortalama dönüş periyodu* |
|---|---|---|---|
| *D1 Kullanım depremi* | *~ 0.50* | *% 50* | *72 yıl* |
| *D2 Tasarım depremi* | *1.00* | *% 10* | *474 yıl* |
| *D3 En büyük deprem* | *~ 1.50* | *% 2* | *2475 yıl* |




Şekil 3. Elastik ötesi şekil değiştirmelerin kabul edildiği durumda şekil değiştirmeye dayalı güvenlik değerlendirmesi

Tasarım depremi ise, binanın ömrü boyunca maruz kalma ihtimali düşük bir etkidir. Buna karşılık en büyük deprem ise, binanın ömrü boyunca maruz kalma ihtimali çok düşük bir etki olarak kabul edilebilir. Güvenlik değerlendirmesinde tanımlanan diğer iki depremin spektrumu, tasarım depreminkine bağlı olarak yaklaşık olarak verilmiştir. Yakın gelecekte bu depremler için de, tasarım deprem için olduğu gibi haritaların geliştirilmesi beklenebilir.

## 3. TAŞIYICI SİSTEMİN KAPASİTESİ

Betonarme yapılarda taşıyıcı sistemi, temel, döşeme, kolon, perde ve kirişler meydana getirir. Düzlemleri içindeki etkiler altında kalan döşemeler, deprem etkilerinin karşılanmasında genellikle kapasitelerinin çok altında etkilere maruz kalırlar ve elastik sınırlarının üstünde zorlanmazlar. Döşemeler, bir diyafram gibi davranarak, kolon ve perdelere yüklerin iletilmesinde önemli rol oynar. Diyaframın olabildiğince boşluksuz olması ve rijit davranması, kolon ve perdede etkilerin bölüştürülmesi ve yerel aşırı zorlanmaların önlenmesi bakımından önemlidir. Deprem Yönetmeliği'nde döşeme boşluklarına verilen sınırlara uyulması rijit diyafram davranışının rahatlıkla ortaya çıkmasını sağlar. Taşıyıcı sistemde kolon, kiriş ve perdeler deprem yüklerinin karşılanmasında etkilidir. Genel olarak perdeler konsol kolona benzer davranış göstereceği için, mesnede (yani temele) yakın bölgesi en çok zorlanırken, kiriş ve kolonlarda birleşim bölgelerine yakın uç bölgeleri en çok zorlanır. Deprem Yönetmeliği'nde bu bölgelerdeki muhtemel elastik ötesi şekil değiştirme talebinin karşılanması ve gerekli şekil değiştirme kapasitesinin (sünekliğin) oluşması için, ayrıntılı geometrik ve donatı şartları öngörülmüştür. Bunun yanında kiriş ve kolonlarda kesme kuvveti kapasitesinin eğilme momenti kapasitesinden yüksek tutulması, kolon-kiriş birleşim bölgesinde kolon kapasitelerinin kirişlerinkinden büyük olması, birleşim bölgesinin güç tükenmesinin betonun kesme kuvveti dayanımından önce birleşen kirişlerin boyuna donatılarının akmaya erişerek güç tükenmesine gelmesi, taşıyıcı sistemin elastik ötesi davranış yeteneğinden etkili şekilde yararlanılmasını sağlar. Öte yandan, beklenen elastik ötesi şekil değiştirmelerin kullanım bakımından kabul edilebilir olması gerekir. Örneğin, tasarım depremi etkisi altında konut binasında belirli bir kontrollü hasar kabul edilebilirken, bir hastane binasında bu hasar kabul edilmeyebilir.

## 4. BİNALAR İÇİN PERFORMANS HEDEFLERİ

Tablo 1'de verilen deprem etkileri altında binaların sağlaması gerekli performans hedefleri Tablo 2'de verilmiştir. Bu tablo yeni tasarımı yapılacak binalar için sözkonusu olan bina önem katsayısı tablosuna benzerdir. Tasarımı yapılan binalarda bina önem katsayısı ile karşılanması öngörülen deprem etkisi arttırılırken, mevcut binalarda, Tablo 2'de verildiği gibi, binanın kullanım amacı ve türü ile deprem etkisine bağlı olarak binanın sağlaması gereken performans hedefi öngörülür.

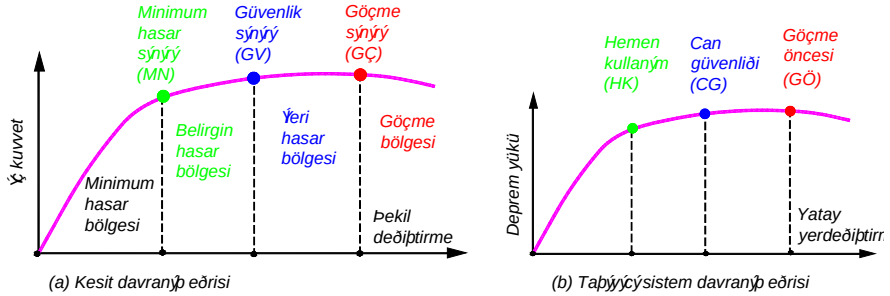
Sünek bir kesitteki iç kuvvet ve şekil değiştirme (örneğin eğilme momenti ve eğrilik) ilişkisi Şekil 4'de verilmiştir. İlk bölümde elastik davranışa benzeyen bir davranış ve daha sonra elasto-plastik davranış ortaya çıkar. Bu eğri üzerinde elastik ötesi davranışın belirgin başlangıcı Minimum Hasar Sınırı (MN) ve iç kuvvetlerin azalarak güç tükenmesinin ortaya çıkması Göçme Sınırı (GÇ) nispeten kolay şekilde tanımlanabilir. Güvenlik Sınırı (GV) ise, kesitin dayanımını güvenli olarak sağlayabileceği elastik ötesi davranışın üst sınırı olarak bu iki sınırın arasında bulunur. Bu sınırlar arasında Şekil 4'de verilen hasar bölgeleri tanımlanır.

Deprem etkisindeki taşıyıcı sistemin davranışı, Şekil 4.b'deki gibi örneğin en üst kat yerdeğiştirmesi ve toplam deprem taban kesme kuvveti arasında çizilecek eğri ile ifade edilebilir. Bu değişim Şekil 4.a'da kesit davranışı için verilen eğriye benzer olup, tüm taşıyıcı sistem için elde edilmiştir. Benzer şekilde elastik davranışa benzetilebilecek ilk bölümden sonra elasto-plastik davranışı simgeleyen bir bölüm ortaya çıkar. Bu eğri üzerinde elastik ötesi davranışın (elasto-plastik şekil değiştirmenin) belirgin başlangıcı sınırlı hasara karşı geldiği için, Hemen Kullanım Performans Düzeyi (HK) olarak isimlendirilir. Büyük yerdeğiştirmelerden sonra yatay yükün azalması taşıyıcı sistemde güç tükenmesinin ortaya çıktığına işaret eder. Bu nokta Göçme Öncesi Performans

Düzeyi (GÖ) olarak bilinir. Can Güvenliği Performans Düzeyi (CG) taşıyıcı sistemin sınırlı elastik ötesi şekil değiştirmelerle yatay yük kapasitesini güvenli olarak koruduğu sınır olarak tanımlanır. Bu performans düzeylerinin kiriş ve kolonlarda meydana gelen kontrollü hasara bağlı olarak sayısal tanımı Deprem Yönetmeliği'nde bulunabilir.

Tablo 2. Binalar için öngörülen deprem performans hedefleri (Deprem Yönetmeliği, 2007)

| *Binanın kullanım amacı ve türü* | *Depremin 50 yılda aşılma olasılığı* | | |
|---|---|---|---|
| | *% 50* | *% 10* | *% 2* |
| *Deprem sonrası hemen kullanımı gereken binalar*<br>*Hastaneler, sağlık tesisleri, itfaiye binaları, haberleşme ve enerji tesisleri, ulaşım istasyonları, vilayet, kaymakamlık, belediye binaları, afet yönetim merkezleri, vb* | – | *HK* | *CG* |
| *İnsanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar ve müzeler*<br>*Okullar, yatakhaneler, yurtlar, pansiyonlar, askeri kışlalar, cezaevleri, müzeler, vb* | - | *HK* | *CG* |
| *İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar*<br>*Sinema, tiyatro, konser salonları, kültür merkezleri, spor tesisleri, vb.* | *HK* | *CG* | - |
| *Tehlikeli madde içeren binalar*<br>*Toksik, parlayıcı ve patlayıcı özellikleri olan maddelerin bulunduğu ve depolandığı binalar, vb* | – | *HK* | *GÖ* |
| *Diğer binalar*<br>*Yukarıdaki tanımlara girmeyen diğer binalar (konutlar, işyerleri, oteller, turistik tesisler, bina türü endüstri yapıları, vb)* | – | *CG* | – |




Şekil 4. a) Kesitte etki ve şekil değiştirme eğrisi, hasar sınır ve bölgeleri ve b) taşıyıcı sistemde deprem yükü ve yatay yerdeğiştirme eğrisi ve performans düzeyleri

## 5. DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ

Deprem Yönetmeliği'nde mevcut betonarme binaların deprem güvenliğinin değerlendirmesinin performans kavramına dayalı yapılması öngörülmüştür. Performans kavramı, deprem mühendisliğinde yeni gelişen bir kavram olup, önce mevcut binaların deprem güvenliğinin belirlenmesi için geliştirilmiştir. Aslında performans kavramına dayalı tasarım, klasik tasarımın genişletilmesi olarak da kabul edilebilir. Deprem yönetmeliklerinin oluşumu incelenirse, daha önce de performans kavramının belirli ölçüde tanımlandığı da görülebilir.

Yönetmelikte, genel anlamda binanın küçük depremleri hasarsız atlatması, büyük depremleri can güvenliğini sağlayan sınırlı hasarla atlatması ve çok büyük depremleri de toptan göçme olmadan atlatması gibi performans seviyeleri hedeflenmiştir. Yeni önerilen performansa dayalı değerlendirmede bu amaçlar daha belirgin şekilde tanımlanmıştır.

Deprem Yönetmeliği'nde mevcut binaların performansa dayalı değerlendirmesinin, yakın bir gelecekte performansa dayalı tasarım olarak yeni binalara da genişletileceği beklenmektedir. Mevcut durumda önem katsayısı $I = 1$ olan binaların depreme dayanıklı tasarımının "Can Güvenliği" olarak tanımlanan performans seviyesi esas alınarak yapıldığı kabul edilebilir.

Deprem Yönetmeliği'nde sınır durumlar ile binalar için performans seviyesi tanımlanır. Performansa dayalı değerlendirmede, binada değişik deprem etkilerinde değişik performans seviyesinin incelenmesi öngörülmüştür (*Tablo 2*). Değerlendirilecek veya güçlendirildikten sonra yeterliliğine karar verilecek binalar ile ilgili deprem performansı belirleme çalışmaları düşey yüklerin ve deprem etkilerinin birleşik etkisi altında incelenir. Performans seviyesi, depremden sonra binada meydana gelecek hasar seviyesi ile ölçülür. Binanın deprem performansı, taşıyıcı sistem elemanlarının (kiriş, kolon ve perde) deprem hasar seviyesinin bir bütünü olarak ifade edilir. Kesitin hasar durumunun belirlenmesi, çözüm neticesinde elde edilecek iç kuvvetler veya şekil değiştirmelerin, yönetmelikte tanımlanan sınır değerlerle karşılaştırılmasıyla yapılır. Bir taşıyıcı sistem elemanının hasar durumu, bu elemanın depremde en çok zorlandığı kabul edilen ve doğrusal olmayan şekil değiştirmenin ortaya çıkması beklenen kesitlerin hasar durumları değerlendirilerek tanımlanır.

Deprem Yönetmeliği'nde doğrusal elastik olan ve olmayan farklı çözümleme yöntemlerine izin verilmektedir. Bu yöntemlerin kabul ve çözüm işlemleri birbirinden farklı olduğu için, matematiksel olarak aynı sonuçların elde edilmesi beklenmez. Ancak, uygulama açısından ve yasal sorunların çıkmaması bakımından sonuçların birbirinden çok farklı olmaması da gerekir.

Deprem Yönetmeliği'nde mevcut binaların güvenliklerinin değerlendirilmesinde değişik açılardan taşıyıcı sistemin elastik ötesi ve doğrusal olmayan davranışını göz önüne alan üç yöntem bulunmaktadır: (a) yeni binalar için öngörülen tasarım yönteminin mevcut binalara dönüştürülerek uygulandığı Doğrusal Elastik Hesap Yöntemi, (b) taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan davranışının doğrudan göz önüne alındığı, buna karşılık deprem etkisinin eşdeğer statik yük olarak kabul edildiği Artımsal Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi ve (c) taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan davranışının doğrudan gözönüne alındığı, deprem etkisinin atalet kuvvetleri olarak gözönüne alındığı Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi. İlk iki yöntemin tek modlu uygulaması yanında çok modlu uygulaması da mevcuttur.

Aşağıda karşılaştırmalı olarak özetlenen ve yönetmelikte ayrıntısı verilen yöntemlerde taşıyıcı sistem periyot, kesit etkileri ve yerdeğiştirme hesapları çatlamış kesit eğilme rijitlikleri,

$$\textit{Kirişlerde:} \qquad (EI)_e = 0.40\,(EI)_o \tag{2}$$

$$\textit{Kolon ve perdelerde:} \qquad (EI)_e = 0.40\,(EI)_o \quad \textit{eğer} \;\; N_{g+q+e}/(A_c f_{cm}) \le 0.10$$

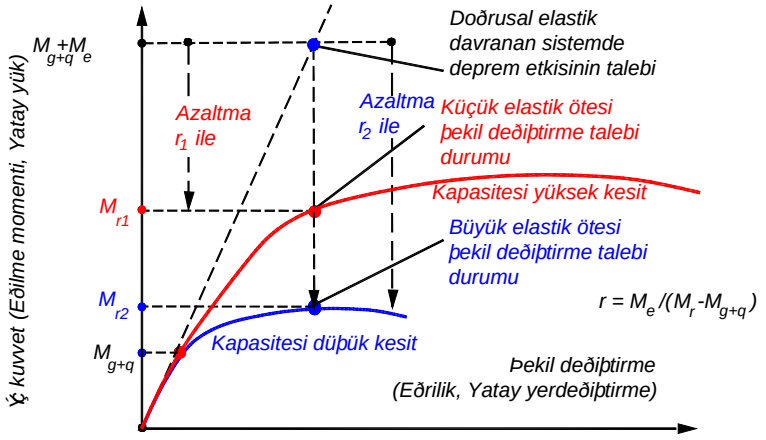
$$(EI)_e = 0.80\,(EI)_o \quad \textit{eğer} \;\; N_{g+q+e}/(A_c f_{cm}) \ge 0.40$$

esas alınarak yapılır. Burada $(EI)_o$ çatlamamış kesitin eğilme rijitliğidir. Bu azaltma ile elastik ötesi davranışta, plastik şekil değiştirmeler ve betonun çatlaması sonucu oluşacak rijitlik azalması gözönüne alınmış olur. Doğrusal elastik yöntemde göreli kat ötelemeleri taşıyıcı sistemde taşıyıcı olmayan elemanların hasarını ve ikinci mertebe etkilerini küçük tutmak için sınırlandırılır. Buna karşılık doğrusal elastik olmayan yöntemde beton ve donatının birim uzamaları doğrudan sınırlandırıldığı için ayrıca göreli kat ötelemesi kontrolüne ihtiyaç duyulmaz.

### *5.1. Doğrusal Elastik Değerlendirme Yöntemi*

Yeni tasarımı yapılan binalarda, elastik deprem etkisi tüm bina için öngörülen Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı $R$ ve ona bağlı kullanılan Deprem Yükü Azaltma Katsayısı $R_a$ ile azaltılarak gözönüne alınır. TS500'e (2000) göre kesit tasarımı yapılan bir taşıyıcı sistemde elastik ötesi davranışın ve kontrollü hasarın kabul edildiği durumda elastik deprem yükünün azaltılmasının sebepleri aşağıdaki gibi verilebilir:

a. Kesit tasarımında beton ve donatı için $f_{cd}$ ve $f_{yd}$ tasarım dayanımları kullanılır. Karakteristik malzeme dayanımları $f_{ck} = 1.50\, f_{cd}$ ve $f_{yk} = 1.15\, f_{yd}$ bu değerlerden daha büyüktür. Ayrıca donatının maksimum dayanımı $f_{su} \approx 1.30\, f_{yk}$ pekleşme sebebiyle karakteristik akma dayanımından daha büyüktür. Beton ve donatıdaki mevcut dayanım fazlalıkları birleştirilirse, yaklaşık 1.5 değerinde Dayanım Fazlalığı olduğu kabul edilebilir.
b. Elastik ötesi davranışta plastik mafsalların oluşumu ile zorlanan kesitlerde etkiler artmaz ve plastik şekil değiştirmeler ortaya çıkarken, daha az zorlanan kesitlerde etkiler artar. Bu ise, sistemde Kapasite Artışı'na sebep olur. Sistemin hiperstatiklik derecesi (fazla bağ sayısı) artıkça, güç tükenmesine daha fazla plastik mafsal oluşumu ile erişileceği için kapasite artışı da fazla olur.
c. Elastik ötesi davranışta yükleme arttıkça plastik mafsalların oluşması ile sistemin rijitliği azalır ve periyodu artar. Taşıyıcı sistemin esnekliğinin artması ile depremin sistemi zorlaması azalır, bir Talep Azalması meydana gelir.
d. Doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan davranış gösteren yapı sistemlerinin aynı deprem hareketine maruz kalmaları durumunda yaklaşık olarak benzer düzeyde yerdeğiştirme yapacağı bilinmektedir. Buradan hareketle; yapıların depreme doğrusal elastik davranarak karşı koymasına izin verilebileceği gibi, yapının belli düzeyde kontrollü hasar görmesinin kabul edilmesi durumunda (elastik ötesi şekil değiştirmelere izin verilmesi durumunda), elastik deprem talebinin önemli ölçüde altında bir deprem talebi kabul edilebilir. Talepteki bu azaltmanın yapılabilmesi için yapının yeterli sünekliğe sahip olması gereklidir. Bir başka ifade ile elastik deprem yükünün azaltılmasında kullanılan deprem yükü azaltma katsayısının önemli bir bölümü yapı sisteminin sünek davranış gösterebilme yeteneğinden kaynaklanmakta olup, doğrusal elastik hesap yönteminde, doğrusal elastik olmayan davranış dolaylı şekilde yapı sisteminin sünekliği dikkate alınarak hesaba katılır.




Şekil 5. Doğrusal elastik yöntemin iki kesitte uygulaması ve farklı r katsayılarının elde edilmesi

Yeni yapıların tasarımında, yukarıdaki dört sebepten dolayı bir deprem yükü azaltma katsayısı kullanılır. Bu katsayının değeri sistemin sünekliğine (elastik ötesi şekil değiştirme yapabilme kapasitesine) ve hiperstatiklik derecesini yansıtan özelliğine bağlı olarak ortaya çıkar. Deprem Yönetmeliği'nde bu parametrelere bağlı olarak Deprem Yükü Azaltma Katsayısı $R_a$ ya doğrudan bağlı olan Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı $R$ için bir tablo bulunmaktadır. Örneğin eğilme momentine maruz bir kesitte tasarım,

$$M_{g+q} + \frac{M_e}{R_a} \le M_r \tag{3}$$

sağlanacak şekilde $M_r$ kesit kapasitesinin oluşturulmasıyla yapılır. Mevcut kesit durumunda bütün kesit değerleri bilindiği için bu denklem,

$$r = \frac{M_e}{M_r - M_{g+q}} \le r_{sınır} \tag{4}$$

olarak her bir kesit için kullanılır. Mevcut binaların değerlendirilmesinde kullanılan Doğrusal Elastik Değerlendirme Yöntemi'nde her kesit için $r = Etki / Kapasite$ oranı hesaplanır. Bu parametre için farklı hasar düzeylerine karşı gelen sınır $r_{sınır}$ değerleri (a) sünekliği olumsuz etkileyen kesme kuvveti ve normal kuvvetin değerlerine ve (b) sünekliği olumlu etkileyen sargı donatısına bağlı olarak Deprem Yönetmeliği'nde verilmiştir. Bu yöntemde çözümleme işlemi doğrusal olmakla beraber, taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan davranışını yansıtan $r$ katsayısı kesit esasına dayalı olarak hesaplanır ve sınır değerlerle karşılaştırılarak, kesitin (elemanın) hasar düzeyi belirlenir. Şekil 5'de iki farklı kesit için $r$ katsayısının belirlenmesine yönelik açıklamalar gösterilmiştir. Görüldüğü gibi her iki kesit de deprem etkisini karşılamasına rağmen, kapasitesi düşük kesitte büyük olana göre daha büyük elastik ötesi şekil değiştirmeler ortaya çıkmaktadır. Bu yöntemin iki uygulaması mevcuttur: sadece birinci modun göz önüne alındığı Doğrusal Eşdeğer Deprem Yükü Uygulaması ve birinci mod yanında diğer modların da gözönüne alındığı Mod Birleştirme Uygulaması.

***Eşdeğer deprem yükü uygulaması***
Bu uygulama, birinci modun etkili olduğu düşük katlı binalarda ve binada burulma düzensizliğinin sınırlı olduğu durumda yeterli yaklaşımı sağlar. Yönetmelikte uygulamanın sınırları aşağıdaki gibi verilmiştir:

- Bodrum üzerindeki toplam yüksekliği $25m$ den az binalar,
- Toplam kat adedi 8 i aşmayan binalar,
- Burulma düzensizlik katsayısı 1.4 den küçük olan binalar.

Bodrum üzerindeki kat adedi ikiden fazla olan binalarda eşdeğer deprem yükü $\lambda = 0.85$ katsayısı çarpılarak azaltılır.

***Mod birleştirme uygulaması***
Bu uygulamada gerektiği kadar titreşim modu gözönüne alınabildiği için tüm binalarda uygulanabilir. Bu yöntemde birden fazla mod için deprem kuvvetleri ve kesit etkileri ayrı ayrı hesaplanır, daha sonra bu etkiler yönetmelikte bulunan mod etkilerinin birleştirilmesi için verilen yöntem kullanılarak birleştirilir. Bu adımdan sonra Eşdeğer Deprem Yükü ve Mod Birleştirme Yöntemleri'nin uygulaması aşağıdaki gibi benzer olarak devam eder.

Doğrusal Elastik Değerlendirme Yöntemi sünek olan elemanlar (eğilme momentinin kritik olduğu elemanlar) için uygulanır. Gevrek olan (sünek olmayan) kesme kuvvetinin veya basınç kuvvetinin kritik olduğu elemanlarda

uygulanmaz. Kolon, kiriş ve perdelerin sünek eleman olarak sayılabilmeleri için bu elemanlarda eğilme kapasitesi ile uyumlu olarak hesaplanan kesme kuvvetinin mevcut malzeme dayanımı değerleri kullanılarak TS500'e göre hesaplanan kesme kapasitesini aşmaması gereklidir. Kolon, kiriş ve perdelerde eğilme momenti ile uyumlu kesme kuvvetinin hesabında pekleşmeli taşıma gücü momentleri yerine taşıma gücü momentleri kullanılır. Birleşim bölgesi kesme kuvvetinin kesme dayanımını aşması durumunda, kolon-kiriş birleşim bölgesi gevrek olarak tanımlanır.

Yeni binaların tasarımında kullanılan yöntemin mevcut binalara genişletilmişi olan Eşdeğer Deprem Yükü uygulamasında, taşıyıcı sisteme ayrı ayrı her iki doğrultuda elastik (azaltılmamış) deprem yükü yüklenerek çözüm yapılır. Mod Birleştirme uygulamasında ise, deprem etkisini tanımlayan spektrum eğrisi azaltılmadan kullanılır. Deprem etkisinde zorlanan eleman kesitlerinde deprem etkisinde ortaya çıkan $M_e$ eğilme momenti (ve diğer kesit etkileri) hesap edilir. Buna paralel olarak malzeme katsayıları ile bir azaltma yapmaksızın $f_{cm}$ ve $f_{ym}$ mevcut malzeme dayanımları kullanılarak kesitlerin $M_r$ eğilme momenti (ve diğer etkiler için) kapasiteleri hesap edilir. Bu değerlerden tüm elemanlar için (4) bağıntısı ile $r$ değeri hesaplanır. Deprem etkisinin elastik ötesi davranış ile karşılanması ve sınırlı hasara izin verilmesi sözkonusu olduğu için, doğrudan sünekliğe bağlı olan $r$ nin sınır değerleri birden büyüktür. Büyük değerler alması beklenen durumlar kontrollü hasarın büyük olacağına işaret eder. Kiriş ve kolon kesitlerinde sargı donatısının bulunması ve kesme kuvveti düzeyinin düşük olması sünekliği arttırır. Bunun gibi kirişlerde basınç donatısı sünekliği artırırken, çekme donatısı azaltır. Kolonlarda ise normal kuvvet seviyesinin artması sünekliği olumsuz etkiler. Süneklikle doğrudan ilişkili olan $r_{sınır}$ sınır değerleri kiriş ve kolonlar için Tablo 3 ve Tablo 4'de verilmiştir. Sünekliğe etkili olan parametrelerin $r_{sınır}$ değerlerine de etkili olduğu kolayca görülebilir.

Tablo 3. Betonarme kirişler için hasar sınırlarını tanımlayan etki/kapasite oranları (Deprem Yönetmeliği, 2007)

| *Sünek kirişler* | | | *Hasar sınırı* | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $(\rho-\rho')/\rho_b$ | *Sargılama* | $V_e/(b_w\ d\ f_{ctm})$ | *MN* | *GV* | *GÇ* |
| $\le 0.0$ | *var* | $\le 0.65$ | *3* | *7* | *10* |
| $\le 0.0$ | *var* | $\ge 1.30$ | *2.5* | *5* | *8* |
| $\ge 0.5$ | *var* | $\le 0.65$ | *3* | *5* | *7* |
| $\ge 0.5$ | *var* | $\ge 1.30$ | *2.5* | *4* | *5* |
| $\le 0.0$ | *yok* | $\le 0.65$ | *2.5* | *4* | *6* |
| $\le 0.0$ | *yok* | $\ge 1.30$ | *2* | *3* | *5* |
| $\ge 0.5$ | *yok* | $\le 0.65$ | *2* | *3* | *5* |
| $\ge 0.5$ | *yok* | $\ge 1.30$ | *1.5* | *2.5* | *4* |

Mevcut yapılar için gerçekleştirilen değerlendirme çözümlemelerinde çatlamış kesit özelliklerinin kullanılması ve iki kattan yüksek binalarda taban kesme kuvvetinin 0.85 katsayısı ile azaltılması, Deprem Yönetmeliği tarafından yeni binalar için önerilen deprem yükü azaltma katsayıları ve mevcut yapıların taşıyıcı elemanları için GV ve GÇ sınırları için tanımlanmış olan $r_s$ değerleri birlikte değerlendirildiğinde, Can Güvenliği Performans düzeyi için yeni binalarda ve sünek düzenlenmiş yapı elemanlarına sahip mevcut binalarda kullanılan $R_a$ ve $r_s$ katsayılarının birbirlerine yakın olduğu söylenebilir. Bu benzeşime dayanarak doğrusal elastik değerlendirme yöntemi, yeni binaların tasarımında kullanılan yöntemin genişletilmişi olarak görülebilir.

Tablo 4. Betonarme kolonlar için hasar sınırlarını tanımlayan etki/kapasite oranları (Deprem Yönetmeliği, 2007)

| *Sünek kolonlar* | | | *Hasar sınırı* | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $N_K / (A_c\ f_{cm})$ | *Sargılama* | $V_e / (b_w\ d\ f_{ctm})$ | *MN* | *GV* | *GÇ* |
| $\leq 0.1$ | *var* | $\leq 0.65$ | *3* | *6* | *8* |
| $\leq 0.1$ | *var* | $\geq 1.30$ | *2.5* | *5* | *6* |
| $\geq 0.4$ *ve* $\leq 0.7$ | *var* | $\leq 0.65$ | *2* | *4* | *6* |
| $\geq 0.4$ *ve* $\leq 0.7$ | *var* | $\geq 1.30$ | *1.5* | *2.5* | *3.5* |
| $\leq 0.1$ | *yok* | $\leq 0.65$ | *2* | *3.5* | *5* |
| $\leq 0.1$ | *yok* | $\geq 1.30$ | *1.5* | *2.5* | *3.5* |
| $\geq 0.4$ *ve* $\leq 0.7$ | *yok* | $\leq 0.65$ | *1.5* | *2* | *3* |
| $\geq 0.4$ *ve* $\leq 0.7$ | *yok* | $\geq 1.30$ | *1* | *1.5* | *2* |
| $\geq 0.7$ | – | – | *1* | *1* | *1* |

Yeni binalarda tüm taşıyıcı sistem için öngörülen tek bir $R_a$ Deprem Yükü Azaltma Katsayısı mevcutken, mevcut binada taşıyıcı eleman kesiti esasına bağlı olarak $r = Etki\ /\ Kapasite$ biçiminde hesaplanmakta ve öngörülen sınır değerleri ile karşılaştırılmaktadır. Bunun en önemli sebebi, mevcut taşıyıcı sistem elemanlarının sahip olduğu süneklik düzeyi farklılığıdır. Yeni binalarda süneklik düzeyinin bütün elemanlarda tasarımda uygun şartları sağlayarak belirli bir seviyeye getirilmesi mümkünken, mevcut binada mevcut süneklik seviyesinin dikkate alınması gerekir. Doğrusal elastik olan yöntemde taşıyıcı sistem çözümü doğrusal ise de, sistemin elastik ötesi davranışı $r = Etki\ /\ Kapasite$ katsayısı ile gözönüne alınmaktadır. Deprem yükleri altındaki çözümün doğrusal olması büyük bir kolaylık getirmekte ve mevcut bilgisayar çözümleme programlarının kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

Doğrusal elastik yöntemde aynen yeni tasarımda olduğu gibi göreli kat ötelemelerinin sınırlandırılması öngörülür. İlgili sınır değerler Tablo 5'de verilmiştir. Burada $\delta_i$ belirli bir kattaki kolonun (veya perdenin) üst ucunun alt ucuna göre göreli ötelemesi ve $h_i$ kat yüksekliğidir. Hasar sınırı ilerledikçe izin verilen yerdeğiştirmelerin büyüdüğü görülmektedir. Değerlendirmede çatlamış eğilme rijitlikleri kullanıldığı için yerdeğiştirmeler yaklaşık olarak çatlamamış kesit rijitlikleri ile elde edilen değerlerden 1.5 kat daha büyük olarak belirlenir ($1/\sqrt{0.4} = 1.6$ ve $1/\sqrt{0.8} = 1.3$ değerlerinin ortalaması $1.5$). Deprem Yönetmeliği tarafından GV sınırı için verilen değer de (0.03), yeni tasarım için verilen 0.02 değerinden yaklaşık bu oran kadar büyüktür. Kolon ve perdeler için belirlenen r sayıları ile ulaşılan hasar durumu, yerdeğiştirmeler için bulunan hasar durumundan daha olumlu durumda ise, elemanların hasar düzeyine yerdeğiştirme sınırları dikkate alınarak karar verilmelidir.

Tablo 5. Göreli kat ötelemesi sınırları (Deprem Yönetmeliği, 2007)

| *Göreli kat ötelemesi oranı* | *Hasar sınırı* | | |
|---|---|---|---|
| | *MN* | *GV* | *GÇ* |
| $\delta_i / h_i$ | *0.01* | *0.03* | *0.04* |

### *5.2. Doğrusal Elastik Olmayan Değerlendirme Yöntemi*

Bu yöntemde taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan davranışı daha gerçekçi biçimde ele alınır. Buna karşılık yöntemin uygulamasında taşıyıcı sisteme ait daha çok parametreye ihtiyaç duyulur (plastik mafsal boyu, sargı

donatısı özellikleri, bindirmeli ek detayları, vb.). Bu durumda özellikle mevcut binalar için bazen aşılması zor olan belirsizlikler ortaya çıkabilir. Ayrıca, doğrusal elastik çözüm yapan mevcut programlar kullanılamaz ve çok daha ayrıntılı çözüm tekniklerini içeren programlara ihtiyaç duyulur. Sonuçlar, doğrusal elastik olan yönteme göre taşıyıcı sistemin düzensizliğinden daha çok etkilenir.

Şekil değiştirme ve yerdeğiştirme esaslı değerlendirmenin göz önüne alındığı bu yöntemde, belirli bir yatay deprem yükü dağılımı için binadaki yerdeğiştirme talebine ulaşıldığında, bina için beklenen performans hedefinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Bu yöntemin iki uygulaması mevcuttur: Artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi ve Artımsal mod birleştirme yöntemi.

***Artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi***
Bu yöntem birinci modun etkili olduğu düşük katlı binalarda ve binada burulma düzensizliğinin sınırlı olduğu durumda yeterli yaklaşım sağlar. Yönetmelikte bu şartlar aşağıdaki gibi verilmiştir:

- Toplam kat adedi 8 i aşmayan binalarda,
- Burulma düzensizlik katsayısı 1.4 den küçük olan binalarda,
- Deprem doğrultusundaki birinci titreşim moduna ait etkin kütle oranı 0.70 den büyük olan binalarda.

Yöntem, taşıyıcı sistemin yatay yük kapasitesi ile deprem etkisi talebinin buluşturularak, depremli duruma karşı gelen performans durumunun belirlenmesi olup, üç adımdan ibaret kabul edilebilir: a) kapasite eğrisinin belirlenmesi, b) deprem etkisinin talep eğrisinin belirlenmesi, c) iki eğrinin kesiştirilerek taşıyıcı sistemde talep ile kapasitenin eşitlendiği bina performans durumunun belirlenmesi, d) performans durumunda iç kuvvetler ve şekil değiştirme durumunun incelenerek sağlanan performans durumunun hedeflenene uygun olup olmadığının tespiti.

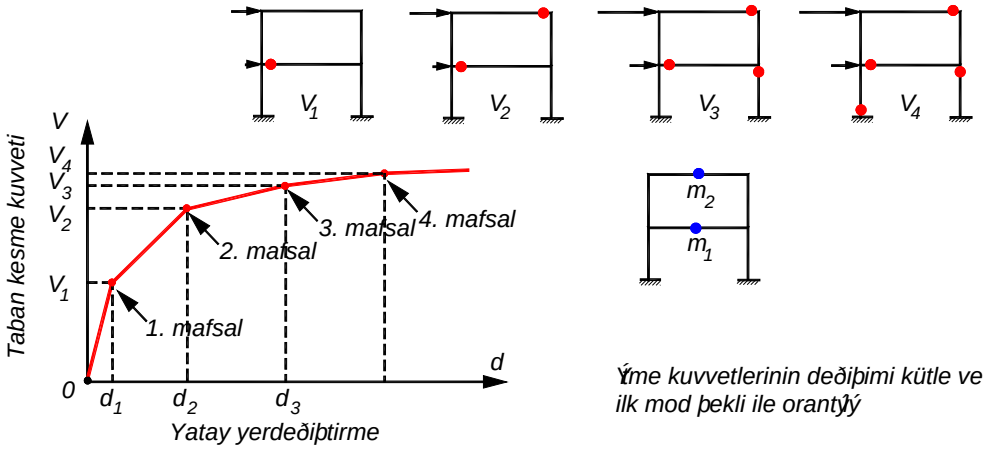
Yatay Yük Kapasite Eğrisinin elde edilmesi için taşıyıcı sistemin geometrisi, kesit ve malzeme özellikleri ve taşıyıcı sistem elastik ötesi davranışı gözönüne alınarak sistem adım adım yüklenir (Statik İtme Analizi) ve genellikle plastik mafsal hipotezi kullanılarak, toplam yatay yükle en üst noktanın yerdeğiştirmesi arasındaki ilişki elde edilir (Şekil 6). Yatay yükün değişiminin birinci titreşim modu ve kat kütleleri ile orantılı olduğu kabul edilir. Statik İtme Analizi'nde aşağıdaki kabuller yapılır:

- Plastik şekil değiştirmelerin belirli kesitlerde toplandığı kabul edilerek, plastik mafsal kabulü kullanılır.
- Plastik mafsal boyu kesit yüksekliğinin yarısı olarak kabul edilir ( $L_p = 0.5\,h$ ).
- Plastik mafsalların, deprem etkisinde en çok zorlanan kolon ve kirişlerin uçlarında, perdelerde ise her katta kat seviyesinde oluşabileceği kabul edilir.

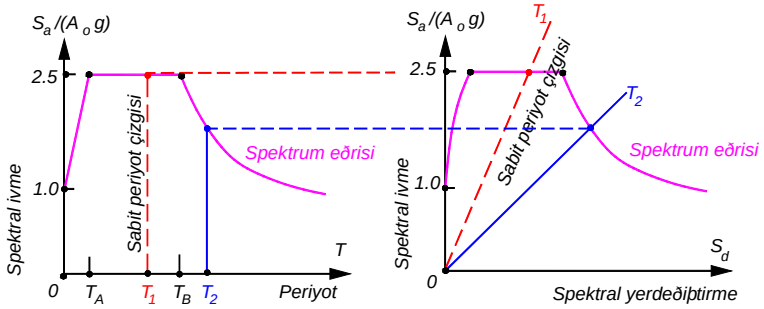
Statik itme eğrisinde yatay kuvvet arttıkça plastik şekil değiştirmeler ve yatay yerdeğiştirmeler büyümekte ve sistemde elastik ötesi şekil değiştirmeler artarak ortaya çıkmaktadır. Bu eğrinin adımlarında kesitlerde plastik mafsalların ortaya çıkış sırasının izlenmesi, sistemin davranışının değerlendirilmesi bakımından önemli bilgiler içerir.

Taşıyıcı sistem kapasitesini gösteren $V_t = V_t(d)$ taban kesme kuvveti ve yatay yerdeğiştirme eğrisi ile depremin elastik sistemden talebinin gösteren $S_a = S_a(T)$ elastik spektrum eğrisini bir araya getirebilmek ve talep ile kapasitenin kesim noktasının bulunması için, her ikisi de eksen takımlarının dönüşümü yapılarak $S_a = S_a(S_d)$ olarak ifade edilir. Ancak bu eğrilerden kapasite eğrisi elastik ötesi davranışı içerirken, spektrum eğrisi sadece elastik sistemdeki talebi içerdiği için, ek bir adıma ihtiyaç gösterir. Bu ek adım spektrum eğrisinin elastik ötesi davranışta ortaya çıkan çevrimsel sönümü içerecek şekilde azaltılması ve daha sonra kapasite eğrisi ile ortak

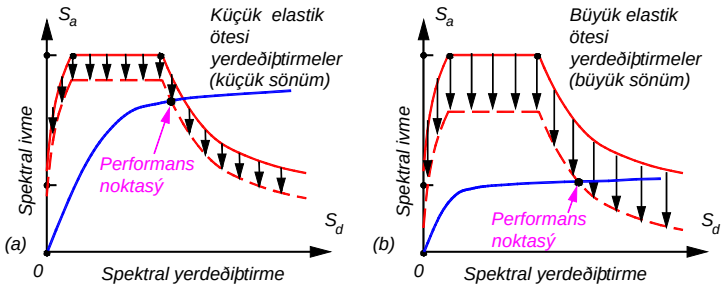
noktanın bulunması olarak gerçekleştirilebilir (Şekil 8). Ancak sönüm, elastik ötesi şekil değiştirmeye bağlı olduğu için işlem ancak iteratif olarak gerçekleştirilebilir. Sönümün deprem talebi üzerindeki azaltıcı yöndeki bu olumlu etkisi Deprem Yönetmeliğinde burada gösterildiği gibi doğrudan hesaplara katılmamaktadır. Diğer bir işlem de Eşit Yerdeğiştirme Kuralının kullanılmasıdır. Büyük periyotlu yapılar için bu kural doğrudan kullanılırken, küçük periyotlu yapılarda bu kuralda değişiklik yapılarak kullanılır (Şekil 9). Bu uygulama Deprem Yönetmeliği'nde ayrıntıları ile verilmiştir.



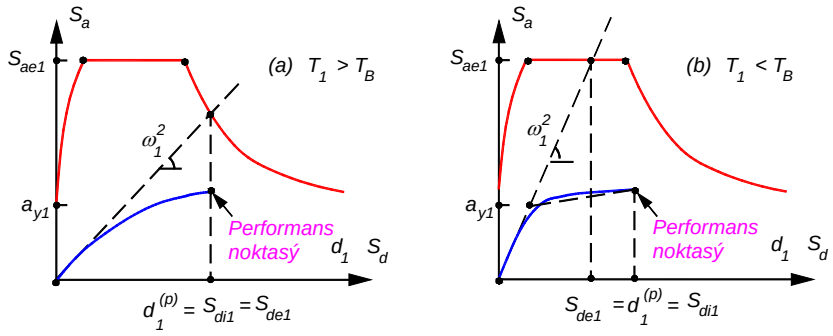

Şekil 6. Statik itme analizi




Şekil 7. Spektrum eğrisinde eksen değiştirilmesi




Şekil 8. Elastik spektrum eğrisinin sönümle azaltılması

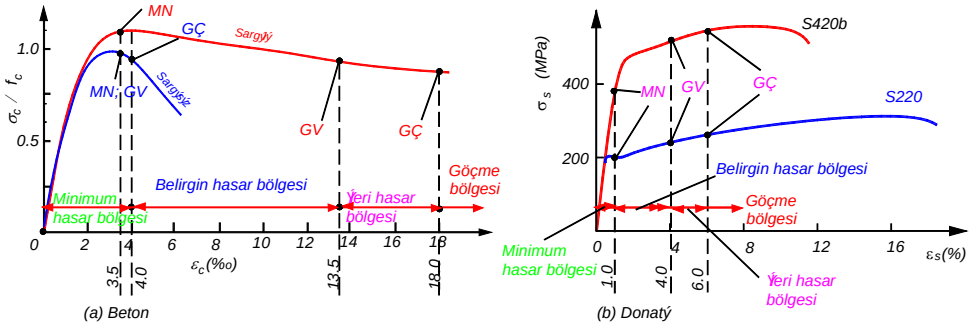



Şekil 9. Elastik spektrum eğrisi ile kapasite eğrisinin kesiştirilerek performans noktasının bulunması

Performans noktasının belirlenmesinden sonra, bu duruma karşı gelen elastik ötesi şekil değiştirmelerin bulunması ve bu değerlerin kabul edilebilir olduğunun gösterilmesi gerekir. Kapasitesi düşük olan taşıyıcı sistemlerde kapasite eğrisi performans noktası oluşmayabilir. Bu durum deprem etkisinin karşılanamayacağına işaret eder. İstenirse güçlendirme ile kesit veya eleman kapasitesi (kuvvet ve/veya şekil değiştirme açısından) arttırılarak kapasite eğrisinin performans noktasına ulaşması sağlanabilir.

Performans noktasına ulaşıldığında kesitte bulunan normal kuvvet ve eğilme momenti esas alınarak kesitteki şekil değiştirme durumu (betonun en büyük kısalması ve donatının en büyük uzaması) hesap edilebilir. Bu değerler Tablo 6'daki performans durumlarına ait sınır değerlerle karşılaştırılarak kesitin bulunduğu hasar bölgesi belirlenir. Bu adımdan sonraki adımlarda doğrusal elastik yöntemde olduğu gibi, kesitlerden elemanlara ve katlara geçilerek binanın performans durumu bulunur.

Tablo 6 incelendiğinde hasar sınırının ilerlemesiyle donatıda daha büyük şekil değiştirmelere müsaade edildiği görülmektedir. Betonda minimum hasar sınırında en dış betondaki birim kısalmanın sınırı $\varepsilon_{cu}$ verilirken, güvenlik ve göçme sınırında enine donatı içinde kalan betonun birim kısalmasının sınırı $\varepsilon_{cg}$ verilir (Şekil 10).




Şekil 10. a) Beton ve b) donatı için kesit hasar sınırları ve bölgeleri

Tablo 6. Beton ve donatıda şekil değiştirme sınır değerleri (Deprem Yönetmeliği, 2007)

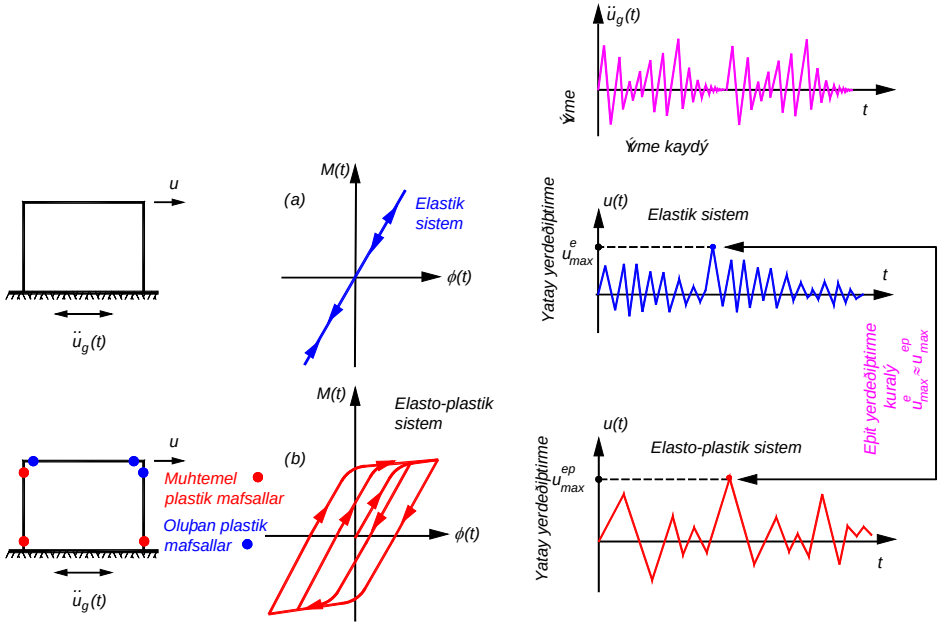
| *Şekil değiştirme sınırı* | *Hasar sınırı* | |
|---|---|---|
| | *Betonda birim kısalma* | *Donatıda birim kısalma ve uzama* |
| *Minimum hasar sınırı* | $\varepsilon_{cu} = 0.0035$ | $\varepsilon_{su} = 0.010$ |
| *Güvenlik sınırı* | $\varepsilon_{cg} = \min[0.0035 + 0.010\rho_s / \rho_{sm}; 0.0135]$ | $\varepsilon_{su} = 0.040$ |
| *Göçme sınırı* | $\varepsilon_{cg} = \min[0.0040 + 0.014\rho_s / \rho_{sm}; 0.0180]$ | $\varepsilon_{su} = 0.060$ |

***Artımsal mod birleştirme yöntemi***

Bu yöntemde, birinci modal kütlenin davranışa yeterli katkıda bulunmadığı durumlarda (yüksek binalar ve taşıyıcı sisteminde düzensizlik bulunan binalar gibi) yeterli kütle katılımının sağlanması için diğer modların katkıları da gözönüne alnır. Yöntemin uygulanması taşıyıcı sistemin davranışını temsil eden yeteri sayıda doğal titreşim mod şekli ve kat kütlesi ile orantılı olacak şekilde monotonik olarak adım adım arttırılan ve birbirleri ile uygun biçimde ölçeklendirilen modal yerdeğiştirmeler veya onlarla uyumlu modal deprem yükleri esas alınarak yapılır.

***5.3. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi***

Bu yöntemde taşıyıcı sistemdeki doğrusal olmayan davranış gözönüne alınarak, kabul edilen bir deprem hareketi altında taşıyıcı sistemin hareket denklemi sayısal olarak çözülerek, doğrusal davranışta olduğu gibi, sistemin bütün elastik ve elastik ötesi şekil değiştirmeleri, yerdeğiştirmeleri ve kesit etkileri zamana bağlı olarak bulunur (Şekil 11). Daha sonra sistemde plastik mafsal dönmesi ile beton ve donatının birim uzama/kısalma talepleri belirlenir. Çözümü en kapsamlı olan bu yöntemde, kabullerin çok sayıda olması sonuçların yorumlanmasında özenli olmayı gerektirir. Ayrıca, seçilen deprem kaydının yönetmelikte verilen spektrum eğrisi ile uyuşması ve belirli bir sayıda kayıtla çözüm yapılması önerilir.




Şekil 11. a) Elastik davranış ve b) elastik ötesi davranış altında zaman tanım alanında çözüm

## 6. FEMA VE EUROCODE YAKLAŞIMLARI

Mevcut yapıların deprem güvenliğinin belirlenmesine yönelik yaklaşım ve kurallar Deprem Yönetmeliği ile birlikte Eurocode 8 (2005), ATC-40 (1996) ve FEMA 356 (1997) tarafından da tanımlanmıştır. Daha sonra FEMA 356 tarafından verilen yöntemlerde çeşitli güncellemeler yapılmıştır (ASCE/SEI 41, 2007 ve Update to ASCE/SEI 41, 2007). Bu çalışmada kısaca özetlenen Avrupa ve Amerika yaklaşımları Eurocode ve FEMA yaklaşımları olarak tanımlanmış olup, FEMA yaklaşımında daha sonra yapılan güncellemeler dikkate alınmıştır. Deprem Yönetmeliği'nde sınırlar doğrusal elastik olan ve olmayan yöntemlerde;

$$r = Etki / Kapasite \le r_{sınır} \qquad \varepsilon_c \le \varepsilon_{c\,sınır} \qquad |\varepsilon_s| \le \varepsilon_{s\,sınır} \tag{5}$$

olarak verilmesine karşılık FEMA yaklaşımında plastik mafsal dönmesi ana parametere olarak kabul edilir ve sınırlar bu parametreye bağlı olarak verilir (Tablo 7 ve Tablo 8). Eurocode yaklaşımında ise, Şekil 12'de kiriş ve kolonlar için tanımlanan çember kiriş dönmesinin plastik değeri ana parametre kabul edilir. Bu parametreye bağlı sınırlar;

Tablo 7. Eğilme açısından kritik kirişler için plastik mafsal dönme sınırları (Update to ASCE/SEI 41, 2007)

| *KİRİŞLER İÇİN PLASTİK MAFSAL DÖNME SINIRLARI (BİRİMLER: N, MM)* | | | *PLASTİK MAFSAL DÖNMESİ* $10^3 \times \phi_p \ell_p$ | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | *Performans seviyeleri* | | |
| $(\rho - \rho')/\rho_b$ | *Sargı donatısı* | $V_d / (b_w d \sqrt{f_c})$ | *MN* | *GV* | *GÇ* |
| *≤0.0* | *var* | *≤0.25* | *10* | *20* | *25* |
| *≤0.0* | *var* | *≥0.50* | *5* | *10* | *20* |
| *≥0.5* | *var* | *≤0.25* | *5* | *10* | *20* |
| *≥0.5* | *var* | *≥0.50* | *5* | *5* | *15* |
| *≤0.0* | *yok* | *≤0.25* | *5* | *10* | *20* |
| *≤0.0* | *yok* | *≥0.50* | *1.5* | *5* | *10* |
| *≥0.5* | *yok* | *≤0.25* | *5* | *10* | *10* |
| *≥0.5* | *yok* | *≥0.50* | *1.5* | *5* | *5* |

Tablo 8. Önce eğilme hasarı gören sonra eğilme ve kesmenin ortak etkisinin davranışta etkili olduğu kolonlar için plastik mafsal dönme sınırları (Update to ASCE/SEI 41, 2007)

| *KOLONLAR İÇİN PLASTİK MAFSAL DÖNME SINIRLARI (BİRİMLER: N, MM)* | | | *PLASTİK MAFSAL DÖNMESİ* $10^3 \times \phi_p \ell_p$ | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | *Performans seviyeleri* | | |
| $N_d / (A_c f_c)$ | *Sargı donatısı* | $V_d / (b_w d \sqrt{f_c})$ | *MN* | *GV* | *GÇ* |
| *≤0.1* | *var* | *≤0.25* | *5* | *24* | *32* |
| *≤0.1* | *var* | *≥0.50* | *5* | *19* | *25* |
| *≥0.4* | *var* | *≤0.25* | *3* | *8* | *9* |
| *≥0.4* | *var* | *≥0.50* | *3* | *6* | *7* |
| *≤0.1* | *yok* | *≤0.25* | *5* | *9* | *10* |
| *≤0.1* | *yok* | *≥0.50* | *4* | *5* | *5* |
| *≥0.4* | *yok* | *≤0.25* | *2* | *3* | *3* |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *≥ 0.4* | *yok* | *≥ 0.50* | *0* | *0* | *0* |

*Minimum hasar sınırı (MN)* $\theta_{ch}^{pl} = 0$ $\theta_{ch} = \theta_y$

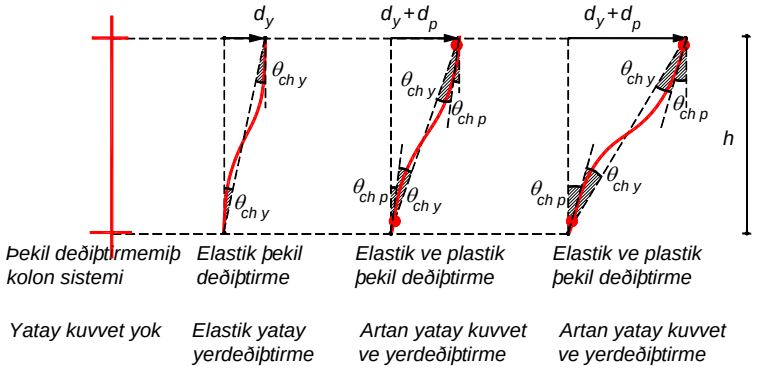
*Güvenlik sınırı (GV)* $\theta_{ch}^{pl} = 0.75\,\theta_{um}^{pl}$

*Göçme sınırı (GÇ)* $\theta_{ch}^{pl} = \theta_{um}^{pl}$ (6)

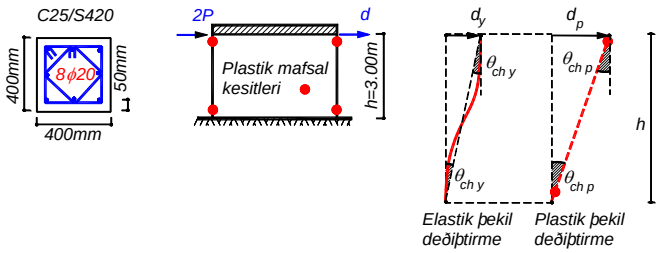
olarak verilir. Burada

$$\theta_{um}^{pl} = \frac{f_c^{0.2}}{125}\left[\frac{A_{s1}}{A_{s\,toplam} - A_{s1}}\right]^{0.3}\left[\frac{h_{kat}/2}{h_{kolon}}\right]^{0.35} \tag{7}$$

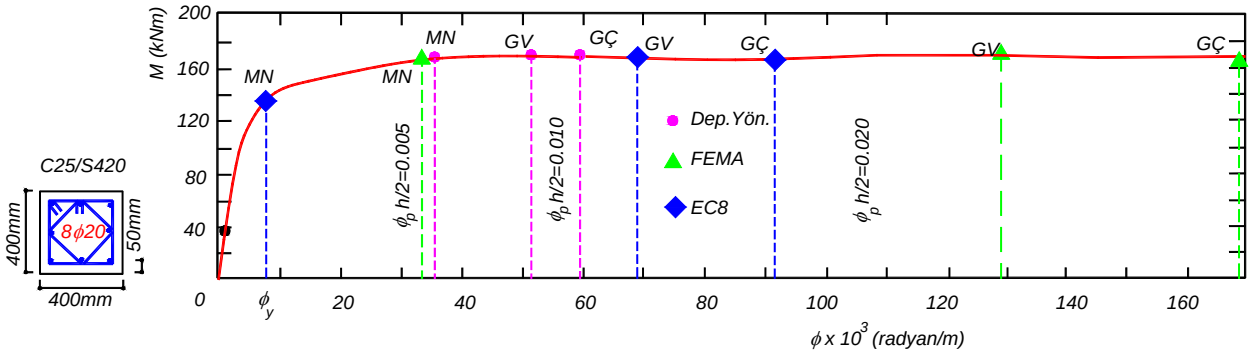
olarak tanımlanmıştır. Bu sınır değerin incelenmesinden a) donatı alanlarını içeren terimde kesitteki $A_{s1}$ basınç donatısının sünekliğe olumlu etkisinin, b) $h_{kat}$ kat yüksekliğinin $h_{kolon}$ kolon kesit yüksekliğine oranının, eğilme momentinin etkili olması durumunda sünekliğe olumlu etkisinin gözönüne alındığı görülmektedir. Ayrıca, kesitte normal kuvvetin etkili olması durumunda, sünekliğin azalması dönme sınır değerinin $0.25^{N_d/(f_c A_c)}$ ile çarpılması şeklinde gözönüne alınır.




Şekil 12. EC8 de plastik şekil değiştirmelerin sınırları için taşıyıcı sistem elemanında tanımlanan çember kiriş dönmesi




Şekil 13. Örnekte gözönüne alınan çerçeve




Şekil 14. Kesitte moment eğrilik bağıntısı ve Deprem Yönetmeliği, FEMA ve Eurocode yaklaşımlarına göre belirlenen sınırlar

## 7. SAYISAL ÖRNEK

Şekil 13'de verilen basit çerçevedeki kolon kesiti için elde edilmiş olan moment eğrilik bağıntısı sınır değerler gözönüne alınarak değerlendirilecektir. Bu kolonda eksenel kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin çok düşük düzeyde olduğu kabul edilmiştir.

***Deprem Yönetmeliği yaklaşımı***

*a. Minimum hasar sınırı (MN):* $\varepsilon_{cu} = 0.0035$ $\varepsilon_{su} = 0.010$

$\varepsilon_{su} = 0.010$ kabul edilerek aşağıdaki değerler hesap edilebilir:

$M_u = 167.8 kNm$ $\phi = \varepsilon_{su} / (d - c) = 35.84 \times 10^{-3} radyan / m$

$\varepsilon_c = \varepsilon_{su}\, c / (d - c) = 0.0025 < \varepsilon_{cu} = 0.0035$

*b. Güvenlik sınırı (GV):* $\varepsilon_{cg} = 0.0035$ $\varepsilon_{su} = 0.040$

$\varepsilon_{su} = 0.0035$ kabul edilerek aşağıdaki değerler hesap edilebilir:

$M_u = 169.8 kNm$ $\phi = \varepsilon_c / c = 51.47 \times 10^{-3} radyan / m$ $\varepsilon_s = 0.0145 < \varepsilon_{su} = 0.040$

*c. Göçme sınırı (GÇ)*: $\varepsilon_{cg} = 0.004$ $\varepsilon_{su} = 0.060$

$\varepsilon_{cg} = \varepsilon_{cu} = 0.004$ kabul edilerek aşağıdaki değerler hesap edilebilir:

$M_u = 173.3 kNm$ $\phi_u = \varepsilon_{cu} / c = 58.8 \times 10^{-3} radyan / m$

$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu}(d-c)/c = 0.0166 < \varepsilon_{su} = 0.060$

***FEMA yaklaşımı***

Sınırlar plastik dönmeler olarak verilmiştir. Kesit için plastik mafsal boyu $\ell_p = h/2 = 0.20m$ kabul edilerek elastik davranışın sona ermesi olan akma durumu değerleri

$\varepsilon_s = \varepsilon_y = 0.0021$ $\quad M_y = 134.4kNm$ $\quad \phi_y = \varepsilon_y/(d-c) = 8.24\times10^{-3}\,radyan/m$

olarak bulunabilir. Hasar sınırlarına karşı gelen toplam eğrilik değerleri de aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

*a. Minimum hasar sınırı (MN)*: $\theta_p = \phi_p\, h/2 = 0.005$

$\phi_p\, h/2 = (\phi - \phi_y)\, h/2 = (\phi - 8.24\times10^{-3})\times 0.20 = 0.005$ $\quad \phi = 33.24\times10^{-3}\,radyan/m$

*b. Güvenlik sınırı (GV)*: $\theta_p = \phi_p\, h/2 = 0.010$

$\phi_p\, h/2 = (\phi - \phi_y)\, h/2 = (\phi - 8.24\times10^{-3})\times 0.20 = 0.024$ $\quad \phi = 128.24\times10^{-3}\,radyan/m$

*c. Göçme sınırı (GÇ)*: $\theta_p = \phi_p\, h/2 = 0.020$

$\phi_p\, h/2 = (\phi - \phi_y)\, h/2 = (\phi - 8.24\times10^{-3})\times 0.20 = 0.032$ $\quad \phi = 168.24\times10^{-3}\,radyan/m$

***Eurocode yaklaşımı***

Sınırlar çember kiriş dönmesine bağlı verildiği için, tek katlı çerçevede $h_{kat} = 3.0m$ kabul edilerek, karşılaştırma yapılacaktır. Kolonda normal kuvvet değeri küçük kabul edilerek aşağıdaki kesit değerleri bulunabilir:

*Minimum hasar sınırı (MN):* $\phi_{mesnet} = \phi_y$

$\phi_y = 8.24\times10^{-3}\,radyan/m$ $\quad M_y = 134.4kNm$ $\quad P_y = 2M_y/h = 2\times134.4/3.0 = 89.6kNm$

$$\theta_{ch\,y} = \frac{d_y}{h} = \frac{P_y h^2}{12\,EI} = \frac{M_y h}{6\,EI} = \phi_y \frac{h}{6} = 8.24\times10^{-3}\frac{3.0}{6} = 4.12\times10^{-3}\,radyan$$

Kolonun şekil değiştirmiş eğrisinde tanımlanan $\theta_{um}$ çember kirişi dönmesinin sınır değerleri:

$$\theta_{um}^{pl} = \frac{f_c^{0.2}}{125}\left[\frac{A_{s1}}{A_{s\,toplam} - A_{s1}}\right]^{0.3}\left[\frac{h_{kat}/2}{h_{kolon}}\right]^{0.35} = \frac{25^{0.2}}{125}\left(\frac{2}{5}\right)^{0.3}\left[\frac{3.00/2}{0.40}\right]^{0.35} = 20.95\times10^{-3}\,radyan$$

$$\theta_{um}^{pl} = \theta_{um} - \theta_{ch\,y} = (20.95 - 4.12)\times 10^{-3} = 16.83\times 10^{-3}\, radyan$$

$$\theta_{um}^{pl} = 16.83\times 10^{-3}\, radyan = \phi_{pl}\,\ell_p = \phi_{pl}\,h_{kolon}/2 = \phi_{pl}\times 0.40/2 \qquad \phi_{pl} = 84.14\times 10^{-3}\, radyan/m$$

$$\phi_{toplam}^{sınır} = \phi_y + \phi_{pl} = (8.24 + 84.15)\times 10^{-3} = 92.39\times 10^{-3}\, radyan/m$$

*Güvenlik sınırı (GV)*: $\phi = 0.75\,\phi_{toplam}^{sınır} = 0.75\times 92.39\times 10^{-3} = 69.29\times 10^{-3}\, radyan/m$

*Göçme sınırı (GÇ)*: $\phi = \phi_{toplam}^{sınır} = 92.39\times 10^{-3}\, radyan/m$

Elde edilen sonuçlar Şekil 14'de gösterilmiş olup, sınırlar için oldukça farklı değerler elde edildiği gözlenmektedir.

Benzer bulgular, deneysel sonuçlar ile Deprem Yönetmeliği, FEMA ve Eurocode yaklaşımları ile elde edilen teorik sonuçlar arasında karşılaştırmalar yapan Işıltan (2010), Acun ve Sucuoğlu (2011) ve Ekici (2011) tarafından da elde edilmiştir.

## 8. DEĞERLENDİRME

Yukarıdaki açıklamalar çerçevesinde betonarme yapıların deprem güvenliklerinin belirlenmesinde kullanılan değerlendirme yöntemleri ve sınırlar konusunda aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

a. Güvenlik değerlendirmesinde kuvvet ve şekil değiştirmeye dayalı kurallarının kullanılması durumunda sünek davranışın (kontrollü hasarın) sağlanmış olması ve bunun sonucunda deprem sonrası ortaya çıkabilecek hasarın kabul edilebilir olması gereklidir.
b. Mevcut yapıda malzeme kalitesi, donatının durumu ve detaylar konusunda önemli belirsizlikler varsa, güvenlik değerlendirmesinde şekil değiştirmeye dayalı ayrıntılı yaklaşım ile elde edilen hesap sonuçları anlamlı olmayabilir. Bu tür durumlarda mevcut belirsizliklere uygun daha basit bir yaklaşım olan kuvvete dayalı hesap yönteminin seçilmesi yerinde olur. Ancak, şekil değiştirmeye dayalı değerlendirmede daha gerçekçi inceleme ve kapasite hesabı mümkün olduğu için, mevcut yapı hakkında yeterli bilgiye sahip olunması durumunda, bu yapıların değerlendirilmesinde şekil değiştirmeye dayalı hesap esaslarının kullanılması mevcut kapasitenin daha gerçekçi olarak hesap edilmesi bakımından anlamlı olabilir.
c. Her türlü hesap yönteminde olduğu gibi, taşıyıcı sistemin deprem güvenliği değerlendirmesinde de çözümleme sırasında oluşturulan yapı mekanik modelinin davranışı ve kapasitesi hesap edilir. Elde edilen sonuçlar modelin yapıyı temsil etme derecesine bağlı bir yaklaşıklığa sahiptir. Taşıyıcı sistemin "kesin" çözümü hedeflenmez, değerlendirme ve tasarım için yeterli düzeyde bilgi elde edilmesi hedeflenir.
d. Şekil değiştirmeye dayalı yöntemlerin en basiti statik itme çözümüdür. Çözümde deprem etkisi olarak deprem kaydı değil, spektrum esas alınır. Bu çözüm tek modu esas aldığı için, yüksek modların katkısının olduğu yüksek binalarda yaklaşımı yetersizdir. Çok modlu statik itme çözümünün ise, oldukça farklı sonuçlar veren değişik uygulama biçimleri mevcuttur.
e. Şekil değiştirmeye dayalı değerlendirme yöntemlerinde elastik ötesi davranış doğrudan kullanıldığı için, taşıyıcı sistemin kuvvetli ve zayıf noktaları oldukça gerçekçi biçimde tespit edilebilir.
f. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan çözüm sonuçları, yapılan kabullerden çok etkilenir. Farklı deprem kayıtlarından farklı sonuçlar elde edilir. Taşıyıcı sistemde ve diğer verilerdeki küçük bir değişiklik tamamen

farklı bir sonuca götürebilir. Çözümde şekil değiştirme kapasitesi yetersiz kesitin kapasitesi arttırılarak tekrar çözüm yapıldığında, beklenen yakınsama her zaman ortaya çıkmayabilir.

g. Deprem güvenliğinin değerlendirilmesinde, kuvvet ve şekil değiştirmeye dayalı incelemenin mümkün olması için, sünek olmayan gevrek elemanların elastik kalması sağlanmalıdır. Bu elemanlarda iç kuvvet talepleri hesap edilerek, (gerekirse güçlendirilerek) iç kuvvet kapasiteleri büyük tutulur. Sünek olmayan güç tükenmesi durumları (kesme kuvveti, donatı sıyrılması, birleşim bölgesi gibi) önlenmeli, sünek mafsal dönmesi sağlanmalıdır.
h. Çözümler çoğu zaman mevcut bilgisayar yazılımları ile yapılmaktadır. Bunlar daha çok düzenli yapılar için daha anlamlı sonuçlar vermektedir. Düzensiz taşıyıcı sistemde çözüm, karmaşık ve açıklaması zor sonuçlar verebilir.
i. Bütün yukarıdaki hususlar değerlendirmede mühendisin deneyimine daha fazla ihtiyaç olunduğuna işaret etmektedir.

## KAYNAKLAR

Acun, B. ve Sucuoğlu, H. (2011). Betonarme kolonların şekildeğiştirme performans sınırlarının deneysel gözlemlerle değerlendirilmesi, *İMO, Teknik Dergi*, **22(3)**, 5523-5541.

ASCE/SEI 41 (2007). Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers, Virginia.

ATC-40 (1996). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Applied Technology Council, California.

Aydınoğlu, N., Celep, Z., Özer, E., Sucuoğlu, H. (2009). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik – Örnekler Kitabı, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.

Bayındırlık ve İskan Bakanlığı (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Ankara.

Celep, Z. (2008). Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış ve Çözümleme - Deprem Yönetmeliği Kavramları, Beta Yayıncılık, İstanbul.

Ekici, E. (2010). Comparison of Observed Structural Damages and Code Given Structural Performance Limits, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Elwood, K.J., Matamoros, A., Wallace, J.W., et. al. (2007). Update to ASCE/SEI 41 Concrete Provisions, *Earthquake Spectra* **23(3)**, 493-523.

Eurocode 8 (2005): Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings, European Committee for Standardization, Brussels.

FEMA356 (1997). Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington.

Işıltan, Ö. (2010). Betonarme Kolonlar için DBYBHY 2007, Eurocode 8 ve FEMA 356 ile Yapılan Performans Değerlendirmelerinin Deney Sonuçlarıyla Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

TS500 (2000). Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, TSE, Ankara.