



## Teknik Not

# Binaların Yapısal Performansının Statik İtme Analizi İle Belirlenmesi

Musa Hakan ARSLAN, Mehmet Alpaslan KÖROĞLU, Ali KÖKEN

Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Konya

## ÖZET

Ülkemiz bulunduğu coğrafya ve sahip olduğu yapı stoğunun coğrafi konumu gereği oldukça ciddi deprem tehdidi altındadır. Depremi vereceği zararlarının en aza indirilmesi ülkemiz için oldukça önemlidir. Bu nedenle bu konuyla ilgili bütün bilimsel gelişmelerin yakından takip edilmesi gereklidir. Yeni yapılacak ve özellikle de mevcut yapıların deprem performansının değerlendirilmesinde en gelişmiş yöntemler doğrusal ötesi statik ve dinamik analiz yöntemleridir. Bu çalışmada; betonarme yapıların doğrusal olmayan statik itme analizi ile yapısal performanslarının belirlenmesi anlatılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** statik, yapısal analiz

## 1. GİRİŞ

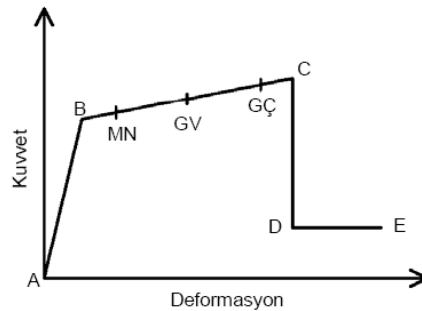
Aktif deprem kuşaklarından biri üzerinde bulunan ülkemizde riskli bölgelerdeki önemli yapılardan başlamak üzere tüm yapıların deprem performanslarının tespit edilmesi gerekmektedir. Bir yapının deprem performansı yapının talep edilen sismik yer hareketini karşılayabilme kapasitesi olarak tanımlanabilir [1]. Bu anlamda *Afet Yönetmeliği (ABYYHY-1998)* içinde yer alan depreme dayanıklı yapı tasarım kuralları deprem afetine daha fazla vurgu yaparak *Deprem Yönetmeliği (DBYBHY-2007)* adı altında yenilenmiştir ve yönetmeliğe “Mevcut Yapıların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi” adı altında ilk defa olarak mevcut yapılarla ilgili hükümler içeren bir bölüm eklenmiştir. İlgili bölümde yapıların deprem etkisi altında doğrusal ötesi davranışının yansıtılması için kullanılabilecek yöntemlerden birisi olarak deprem mühendisliğinde dünyada yaygın olarak kullanılan *İtme Analizi* (pushover analiz), “Artımsal İtme Analizi” adı ile önerilmektedir [2].

ATC 40’da [3] mevcut betonarme yapıların deprem performansının değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi ile ilgili konulara yer verilmiştir. ATC 40’da yapısal ve yapısal olmayan elemanlar ayrı ayrı değerlendirilmiş, yapısal ve yapısal olmayan elemanlara ait performans seviyeleri ve aralıkları tanımlanmış ve bunların birleşiminden elde edilen yapı performans seviyeleri belirtilmiştir. FEMA 273’de [4], hesaplarda esas alınacak deprem etki seviyeleri, doğrusal ve doğrusal olmayan statik analiz yöntemleri, yapıların onarımı ve güçlendirilmesi hakkında açıklamalar yapılmıştır. Taşıyıcı sistem elemanları ile ilgili modelleme parametrelerine yer verilmiş, çelik ve betonarme yapıların performans seviyelerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi ile ilgili kriterlere ve sınır değerlere ait kriterler sunulmuştur. FEMA 356’da [5], performans hedefleri, yapısal ve yapısal olmayan elemanlara ait performans seviyeleri ve aralıkları, deprem etki seviyeleri tanımlanmıştır. Analiz yöntemleri hakkında bilgiler verilmiş ve doğrusal olmayan statik artımsal itme analizi yöntemleri kapsamında, yapı

sistemlerinin performans seviyesinin belirlenmesinde kullanılmakta olan Deplasman Katsayıları Yöntemi ayrıntılı biçimde verilmiştir. Çelik ve betonarme yapı elemanları ayrı iki bölümde ele alınmış ve her bölümde elemanlara ait modelleme parametreleri ile performans seviyelerine ait sınır değerlere yer verilmiştir. FEMA 356'da dolgu duvarların modellenmesi ile ilgili açıklamalar yapılmıştır. Ayrıca ahşap ve hafif metal yapıların performans esaslı tasarımı ve değerlendirilmesinde yeni yaklaşımlara yer verilmiştir. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'de, mevcut binaların deprem performansının belirlenmesi ve güçlendirilmesiyle ilgili olan Bölüm 7 yer almış ve bu bölümde performans ve hasar düzeyi tanımlamalarına ve ayrıca doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemleri hesap esaslarıyla, güçlendirme çalışmalarında uyulması gereken kurallar tanımlanmıştır [6].

Bugünkü tasarım yönetmeliklerinde sözü edilen performansa dayalı tasarım, depreme maruz kalan herhangi bir yapıda meydana gelen hasarların belirlenen performans seviyeleriyle karşılanması şeklinde açıklanan daha genel bir tasarım felsefesidir. Bu felsefeye göre, geleneksel kuvvete dayalı tasarımın yerini alması için performansa (deprem güvenliğine) dayalı tasarım ve değerlendirme ile ilgili çalışmalar önem kazanmıştır. Meydana gelen gelişmeler çerçevesinde giderek daha yaygın olarak benimsenen bu yaklaşım, mevcut yapıların deprem performanslarının belirlenmesinde ve yeni yapıların deprem tasarımında, şekil değiştirmeye göre tasarım ilkesinin esas alınması öngörmektedir [7].

Betonarme yapı elemanlarının ve sistemlerinin doğrusal olmayan davranışını dikkate alarak yapılacak çözümler, statik ve dinamik doğrusal olmayan çözümler olmak üzere ikiye ayrılır. Her ikisinde de kesitin doğrusal olmayan davranışını ifade etmek üzere Şekil 1'deki yük-deplasman eğrileri kullanılmaktadır. Yük deplasman eğrisinin karakteristik köşeleri olan A-B-C-D-E noktalarının tanımı kesitin geometrik özellikleri, malzeme özellikleri ve yükleme koşullarına göre değişir [8].



Şekil 1. Eleman İçin Kuvvet-Deformasyon Eğrisi

Burada;

**MN:** "Minimum Güvenlik Sınırı": Kritik kesitte elastik ötesi davranışın başlangıcı,

**GV:** "Güvenlik Sınırı": Kesitin dayanımını güvenli olarak sağlayabileceği elastik ötesi davranış sınırını,

**GÇ:** "Göçme Sınırı": Kesitin göçme öncesi davranış sınırını göstermektedir.

Yapıların tasarımında doğrusal olmayan davranışın kullanılması oldukça eskidir. Ancak, betonarme malzemesinin daha yakından tanınması ve bunun yanında bilgisayar teknolojisinin de gelişerek daha ayrıntılı sayısal hesabı mümkün kılması, doğrusal olmayan davranışın daha ayrıntılı ve gerçekçi biçimde göz önüne alınmasını sağlamıştır. Özellikle DBYBHY-2007 bu davranışın daha yaygın olarak kullanılmasını gerektirmektedir. Daha önce sadece akademik çevrelerde tartışılan betonarme yapıların doğrusal olmayan davranışı ile ilgili bazı kavramların günümüzde tasarım mühendisleri tarafından kullanılmaktadır.

Bu çalışmada performansa dayalı deprem mühendisliği kavramlarının ve taşıyıcı sistemlerin doğrusal olmayan davranışını basit ve toplu biçimde açıklanması amaçlanmıştır.

## 2. TAŞIYICI SİSTEMLERİN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞI

Doğrusal olmayan analizde elastik analizden farklı olarak elemanların belirli bir dayanım kapasitesi mevcuttur. Eleman üzerindeki yük etkileri arttıkça rijitliğinde azalma olur ve kritik bölgelerde dayanım değerine ulaştıktan sonra eleman sabit sayılabilecek yük değeri altında deformasyon yaparak enerji sönmülemeyi sürdürür. Bu durum eleman deformasyon kapasitesini kaybedene kadar devam eder. Doğrusal olmayan analizdeki bu dayanım deformasyon ilişkisi “plastik mafsallar” yoluyla modellenir [2]. Lineer olmayan statik analiz yöntemleri ile yapının yatay kuvvet taşıma kapasitesini ifade eden kapasite eğrisinin belirlenmesini, bu kapasite eğrisini kullanarak göz önüne alınan deprem için elastik olmayan maksimum deplasmanının (deplasman talebinin) hesaplanmasını ve bu deplasman değerine kadar statik olarak itilmiş yapının performansının (deprem güvenliğinin) belirlenmesini içermektedir. Bu yöntemler ile yapı performansının değerlendirilmesi genel olarak iki farklı kritere göre yapılabilmektedir. Dayanım (kuvvet) bazlı değerlendirme adı verilen birinci tür değerlendirmede, yapıya etkitilen yatay deprem yükleri yönetmeliklerde öngörülen seviyeye ulaştığında, gerek dayanım gerekse yer değiştirme ve şekil değiştirmeler bakımından yapıdan istenen performans hedefinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmektedir. Yer değiştirme ve şekil değiştirme bazlı değerlendirmenin esas alındığı yöntemlerde ise, belirli bir yatay deprem yükü dağılımı için yapıdaki yer değiştirme istemine ulaşıldığında, yapıdan beklenen performans hedefinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmektedir.

## 3. YAPISAL PERFORMANSI BELİRLEME YÖNTEMLERİ

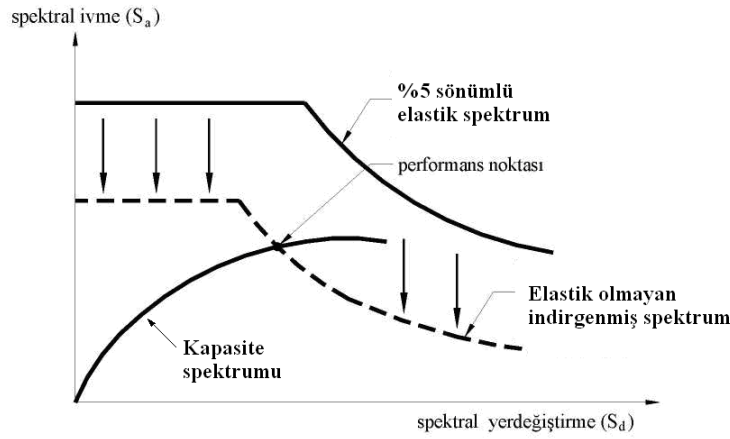
Taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan davranışının ve yapısal performansın belirlenmesinde yaygın kabul gören iki farklı yöntem vardır. Bu bölümde bu yöntemler kısaca açıklanacaktır.

### 3.1. Kapasite Spektrum Yöntemi

Kapasite spektrum yöntemi, yapının genel kuvvet deplasman spektrum eğrisi ile talep spektrum eğrisinin indirgenmesi ile elde edilen indirgenmiş tasarım spektrumu eğrisinin grafiksel olarak bir arada görülmesini sağlamaktadır. Yapının kapasitesi, elastik ötesi statik itme analizi ile belirlenen kuvvet-deplasman eğrisi (kapasite eğrisi) ile temsil edilmektedir. İtme analizinde elde edilen taban kesme kuvvetleri ve tepe deplasmanları (1) denklemi kullanılarak eşdeğer tek serbestlik dereceli bir sistemin spektral ivmelerine ve spektral deplasmanlarına dönüştürülür.

Bu spektral değerler kapasite spektrumunu tanımlar. Deprem talepleri yüksek sönümlü elastik spektrum ile tanımlanmaktadır (Denklem 1). Ancak bu spektrumda kapasite spektrumu gibi spektral ivme-spektral deplasman formatında ifade edilir. Aynı grafik üzerinde çizilen talep ve kapasite spektrumlarının kesişimi (performans noktası), elastik olmayan dayanım ve deplasman talebini verir, (Şekil 2). Tepe deplasmanı performans noktasına ulaşmış yapıda, kesitlerdeki iç kuvvet-şekil değiştirme bağıntıları, yapısal ve yapısal olmayan elemanlardaki hasar seviyesini ifade eden sınır değerler ile karşılaştırılarak yapının performans düzeyi belirlenir [3].

$$S_a = \frac{V_T / W}{\alpha_1} \quad S_d = \frac{\delta_{\max}}{PF_1 \phi_{tepe,1}} \quad (1)$$



Şekil 2. Kapasite Spektrumu Yöntemi İle Performans Noktasının Belirlenmesi

Burada;

$S_a$  : Spektral ivme

$S_d$  : Spektral deplasman

$V_T$  : İtme analizinin her bir adımındaki taban kesme kuvveti

$\delta_{max}$  : İtme analizinin her bir adımındaki tepe deplasmanı

$W$  : Toplam yapı ağırlığı

$\phi_{tepe,1}$  : 1. moda ait en üst kattaki genliği

$\alpha_1$  : Birinci doğal moda ait modal kütle katsayısını

$PF_1$  : Birinci doğal moda ait modal katılım çarpanını göstermektedir.

$$SR_A = \frac{3.21 - 0.68 \ln(\beta_{eff})}{2.12} \quad SR_V = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})}{1.65} \quad (2)$$

Burada;

$\beta_{eff}$  : Efektif viskoz sönüm

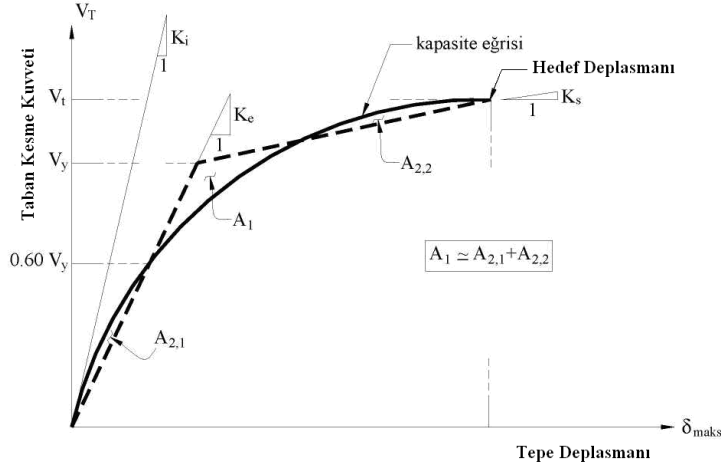
$SR_A$  : Spektrumun sabit ivme bölgesindeki spektral indirgeme katsayısı

$SR_V$  : Spektrumun sabit hız bölgesindeki spektral indirgeme katsayısıdır.

### 3.2. Deplasman Katsayıları Yöntemi (DKY)

Deplasman katsayısı yöntemi, kapasite spektrumu yöntemine benzer olarak, kapasite ve talebin birbirine bağlı olduğu esasına dayanmaktadır. Ancak bu yöntemde, deplasman talebi grafik olarak değil, sayısal bir şekilde belirlenmektedir. Bu durumda, kapasite eğrisinin kapasite spektrumuna dönüştürülmesine de gerek olmamaktadır. Deplasman talebi esas olarak, istatistiksel analizlere dayanan bazı düzeltme çarpanları kullanılarak elastik deplasman spektrumundan elde edilen elastik olmayan deplasman spektrumu ile belirlenmektedir. Bu yöntemde öncelikle kapasite eğrisi elde edilir. Bu eğri birincisinin eğimi elastik rijitliği ( $K_e$ ), ikincisinin eğimi elastoplastik rijitliği ( $K_s$ ) temsil eden iki doğru parçası ile idealleştirilir (Şekil 3). İdealleştirme yapılırken, gerçek ve idealleştirilmiş kapasite diyagramlarının altında kalan alanların eşit olması ve  $K_e$  eğimli doğrunun kapasite eğrisini kestiği noktanın ordinatının,  $K_e$  ve  $K_s$  eğimli doğruların kesiştiği noktanın ordinatının 0.60 katı olması koşulları esas alınır. Ancak iki doğrunun kesim noktası başlangıçta bilinmediğinden, bir deneme-yanılma yöntemi uygulanması gerekir.

Daha sonra idealleştirilmiş eğri kullanılarak (Denklem 3) ile efektif periyot  $T_e$  ve ilgili düzeltme katsayıları kullanılarak (Denklem 4) ile deplasman talebi  $\delta_{\max}$  (hedef deplasmanı) hesaplanır. Bu deplasman değerine kadar itilmiş yapının performansının değerlendirilmesi kapasite spektrum yönteminde olduğu gibidir [5].



Şekil 3. Deplasman Katsayıları Yöntemi İle Performans Noktasının Belirlenmesi

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (3)$$

Burada ;

$T_i$  : Yapının elastik dinamik analiz ile bulunan birinci doğal periyodu,

$K_i$  : Yapının elastik başlangıç rijitliği,

$K_e$  : Yapının elastik efektif rijitliğidir.

$$\delta_{\max} = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a T_e^2 / (4\pi^2) \quad (4)$$

Burada;

$C_0$  : Yapının tepe deplasmanını spektral deplasman ile ilişkilendiren katsayı

$C_1$  : Lineer elastik davranış için hesaplanmış deplasmanlar ile maksimum elastik olmayan deplasmanları ilişkilendiren katsayı

$C_2$  : Histeresis şeklin maksimum deplasman davranışı üzerindeki etkisini temsil eden katsayı

$C_3$  : II. Mertebe etkiler nedeniyle artırılmış deplasmanları temsil eden katsayı

$S_a$  : Yapının birinci doğal periyoduna karşılık gelen spektral ivmedir [5].

#### 4. TDY 2007'DE DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ

Deprem Yönetmeliği, yeni yapılacak binaların depreme dayanıklı tasarımında kuvvete dayalı yöntemler öngörmektedir. Yani deprem tanımlanan deprem etkisinden ortaya çıkan iç kuvvetlerin kesitler tarafından karşılanması söz konusudur. Mevcut binaların değerlendirmesi ve güçlendirilmesinde ise, genel olarak bu kural çerçevesinde kalınarak yeni binalara göre daha ayrıntılı ve farklı bir yaklaşım öngörülmüştür. Bu farklı yaklaşımın yakın bir gelecekte yeni binaların tasarımında da esas alınması muhtemeldir [9]. Deprem Yönetmeliği'nde verilen bütün kayıtları aşağıdaki gibi üç ana bölümde toplamak mümkündür [3]:

a. Yönetmelik binanın kullanım amacına ve bulunduğu deprem bölgesine, binanın taşıyıcı sisteminin özelliğine ve taşıyıcı sistemin statik ve dinamik parametrelerine bağlı olarak bir deprem etkisi tanımlar. Bu etki *Tasarım Depremi* olarak adlandırılır. Tasarım Depremi, orta şiddetteki bir deprem olarak ve *Bina*

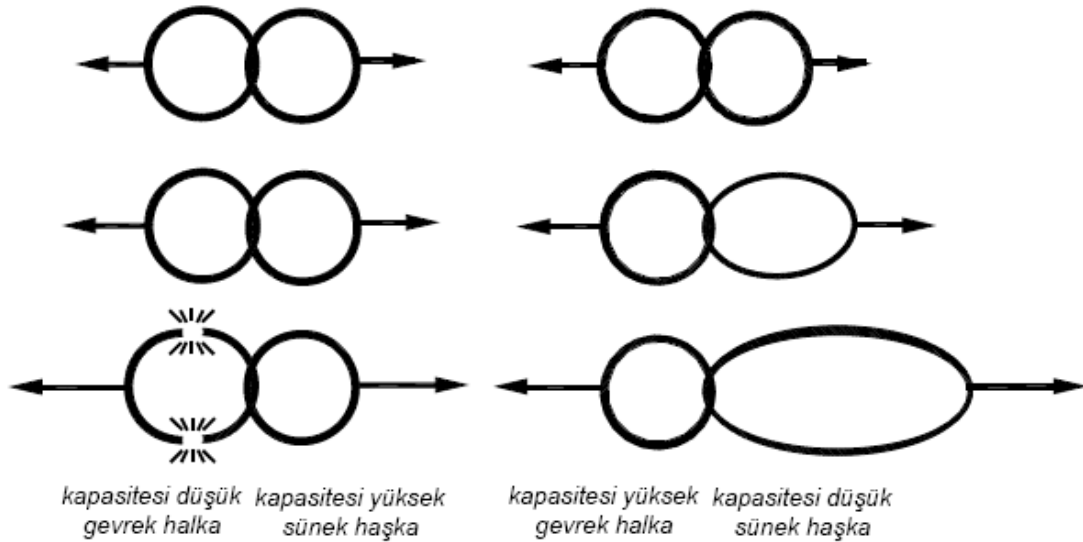
*Önem Katsayısı*  $I = 1$  olan binalar için, ilgili bölgede bu depreminin 50 yıllık bir süre içinde aşılma olasılığı %10 olacak şekilde belirlenir. Burada 50 yıl binanın ömrü ile ilgili olmayıp, sadece kabul edilen bir ölçüdür. Tasarımda deprem etkisi taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan davranışı öngörerek bulunan deprem etkisi  $R_a$  Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı ile azaltır. Deprem etkisi altında taşıyıcı sistemde oluşacak yükler ve kesit etkilerini azaltılmamış ve yerdeğiştirmeleri azaltılmamış etki altında hesap eder. Bu etkileri karşılayacak şekilde kesit tasarımı yapılır.

**b.** Yönetmelik, taşıyıcı elemanların hasarı yanında taşıyıcı olmayan elemanların da hasarının azaltılmamış deprem yükü altında yatay yerdeğiştirmelerin sınırlandırılmasını öngörür. Bu sınırlandırma ikinci mertbe etkilerin sınırlandırılması olarak kabul edilebileceği gibi, belirli ölçüde daha az etki meydana getirecek olan “*hafif şiddetteki deprem*”lerde binalardaki yapısal olmayan sistem elemanlarındaki hasarın minimuma indirilmesi olarak da kabul edilebilir.

**c.** Yönetmelik daha küçük olasılıkla daha büyük deprem etkilerinin ortaya çıkabileceği uyarır. Ekonomik olmaması sebebiyle daha büyük deprem etkilerinin yukarıdaki çerçevede deprem etkilerinin karşılanması tasarımı yapan inşaat mühendisinden beklenmez ve böyle bir depremde yapısal hasarın sınırlandırılarak can kaybının en aza indirilmesi amaçlanır. Yönetmelik bunun için, gevrek güç tükenmesi biçimlerini önlemeyi hedefler ve kapasite tasarımı öne çıkarır.

#### 4.1. Kapasite Tasarımı

Taşıyıcı sisteme etkileyen düşey ve deprem yüklerinin belirlenmesindeki belirsizlikler yanında malzeme dayanımındaki değişimler göz önüne alınarak, güvenlik katsayıları öngörülmüştür. Deprem etkisinin sayısal olarak kabul edilip, taşıyıcı sistemin çözümlenmesi pek çok kabulü içerir. Yönetmelikte öngörülen deprem etkisinden daha küçük bir etkinin meydana gelmesi nasıl mümkünse, bu etkiden daha büyük deprem etkisinin meydana gelmesi de, çok düşük bir ihtimalle de olsa bile, mümkündür. Yönetmeliklerde deprem etkisinin meydana gelme ihtimali ve yapının önemi göz önünde tutularak muhtemel deprem etkisi öngörülür. Bu deprem etkisinin, taşıyıcı sistemde sınırlı hasarın kabulü ile elastik ötesi kapasite kullanılarak karşılanması hedeflenir. Buna karşılık daha büyük deprem etkisinin meydana gelebileceğinin de göz önüne alınarak, ileri oranda hasarla da olsa bu etkinin karşılanması, güç tükenmesinin sünek olarak meydana gelmesi ve taşıyıcı sistemin toptan göçmesinin önlenmesi hedeflenir. Boyutlamada kapasite ilkesinin kabulü kesitte, elemanlarda ve taşıyıcı sistemde oluşacak güç tükenmesinin sünek olarak meydana gelmesinin sağlanması ile mümkündür. Diğer bir deyişle, sünek güç tükenmesi (örneğin; eğilme momenti güç tükenmesi) ile sünek olmayan güç tükenmesi (örneğin; aderans çözülmesi, kesme kuvveti ve zımbalama güç tükenmesi) beraber bulunduğu sünek olmayan etkiye ait kapasite arttırılarak, eleman beklenilenin üstünde zorlandığında, güç tükenmesinin sünek olarak ortaya çıkması sağlanır. *Şekil 6*.da iki halkadan meydana gelen bir zincirde uygulanan kuvvetlerle güç tükenmesi durumuna getirilmeye çalışılmaktadır. Burada halkalardan birinin gevrek (sınırlı elastik şekil değiştirme yaptıktan ve plastik şekil değiştirme yapmadan kopacağı) ve diğerinin sünek (sınırlı elastik şekil değiştirme yaptıktan ve daha sonra önemli plastik şekil değiştirme yaparak güç tükenmesine erişeceği) olduğu kabul edilmiştir. Birinci durumda sünek halkanın kapasitesi gevrek halkaya göre daha yüksek olup, zincirin güç tükenmesini gevrek halka kontrol eder ve zincirin toplam güç tükenmesi gevrek olarak meydana gelir. İkinci durumda ise, gevrek halkanın kapasitesi sünek halkaya göre daha yüksek olup, zincirin güç tükenmesi sünek halkanın kontrol eder ve zincirin toplam güç tükenmesi sünek halkanın büyük şekil değiştirmeler yapmasıyla oluşur. Kapasite tasarımın esası yönetmeliklerde öngörülen etkilerin karşılanmasından sonra, etkilerin öngörülmeyen bir şekilde artması durumunda güç tükenmesinin sünek olarak büyük şekil ve yer değiştirmelerle meydana gelmesini sağlamaktır. Bu suretle sünek olan bütün halkaların kapasitelerine erişmesi sağlanır [9].



Şekil 6. İki Halkalı Zincirin Gevrek ve Sünek Güç Tükenmesi

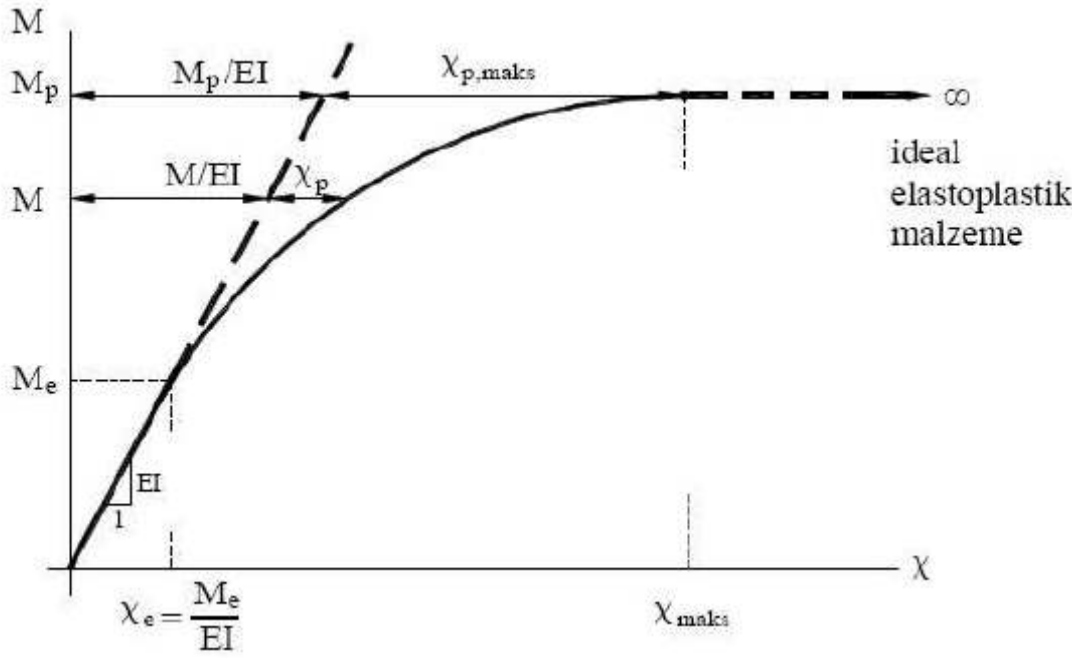
#### 4.2. Plastik Mafsallı Kabulü

Betonarme kesitlerde moment etkisi altında dönme meydana gelmektedir. Yeterli sünekliğe sahip betonarme kesitlerin eğilme momenti-eğrilik ( $M - \chi$ ) ilişkileri incelendiğinde, bu bağıntılarının esas olarak iki farklı bölgeden oluştuğu gözlenmektedir. Birinci bölgede, eğilme momentinin düşük değerleri için, moment eğrilik bağıntısı yaklaşık olarak doğrusal elastik kabul edilmektedir. Bu bölgede, kesitteki beton ve çelik doğrusal davranış bölgesinde kaldığı için moment-eğrilik bağıntısı da benzer davranış göstermektedir. Fakat kesitte gerilmelerin artmasına paralel olarak çekme bölgesinde beton çatlak ve donatı akar. Kesitteki gerilmelerin artmasıyla birlikte, betonda ve çelik de doğrusal olmayan gerilme-sekil değiştirme ilişkilerinin kesitin davranışında hakim olmaya başlaması, kesitin eğilme momenti-eğrilik bağıntısının doğrusal davranışı sona erer. Eğilme momenti-eğrilik bağıntısının ikinci bölgesinde, eğri yataya yakın olmaktadır. Plastik davranışın hakim olduğu bu bölgede, kesite etkiyen eğilme momentinde çok küçük artışlar meydana gelirken kesit dönmeleri ve eğrilik hızlı bir şekilde artmakta ve eğriliğin sınır değerine erişmesi ile kesitte güç tükenmesi meydana gelmektedir [10].

Betonarme kolon ve kiriş gibi elemanlarda eğilme momenti elemanın eksenine boyunca değişir. Kritik kesitin bulunduğu sınırlı bölgenin dışındaki kesitler güç tükenmesine erişmez. Bazı kesitlerde momentin küçük olması sebebiyle çekme bölgesinde çatlama oluşmaz. Küçük moment değerlerinde moment ile eğrilik doğrusal davranış gösterirler. Ancak, kesitte meydana gelen çatlakların kesitin atalet momentini azaltmasından dolayı eğriliğin çatlak kesitlerinde büyüdüğü görülmektedir. Mesnede yakın bölgelerde eğilme momenti büyük olduğu için elastik davranış ötesi plastik dönmeler daha etkili olur [11].

Toplam sekil değiştirmelerin doğrusal sekil değiştirmelere oranı olarak tanımlanan  $\mu$  süneklik oranının büyük olduğu ve doğrusal olmayan sekil değiştirmelerin küçük bir bölgeye yayıldığı sistemlerde, doğrusal olmayan eğilme sekil değiştirmelerinin plastik mafsallı adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde ise sistemin doğrusal-elastik davrandığı kabul edilebilir. Bu hipoteze, plastik mafsallı (plastik kesit) hipotezi adı verilir. Yeterli düzeyde sünek davranış gösteren sistemlerde (çelik yapılar ve bazı koşullar altında betonarme yapılar), plastik mafsallı hipotezi yapılarak sistem hesapları önemli ölçüde kısaltılabilmektedir [7].

Gerçek eğilme momenti – eğrilik bağıntısı Şekil 7 de verilen düzlem çubuk elemanın belirli bir bölgesine ait eğilme momenti diyagramının, toplam eğilmeleri ve doğrusal olmayan sekil değiştirmeleri Şekil 7, 8,9 ve 10’ da gösterilmektedir.



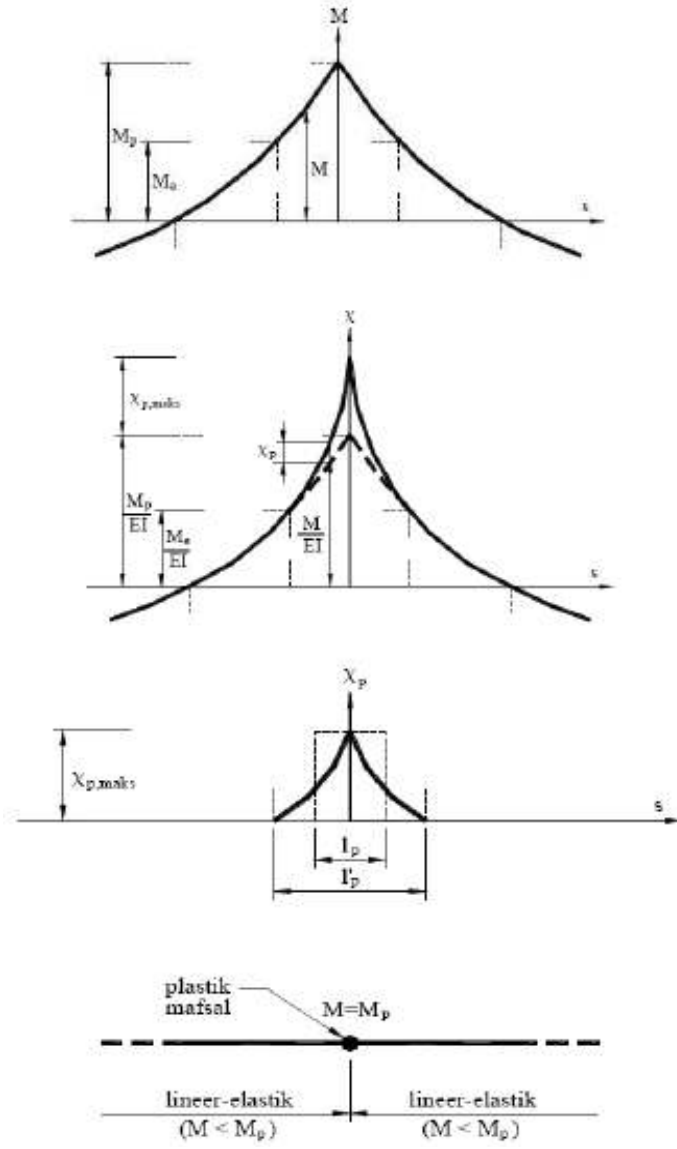
Şekil 7. Düzlem Çubuk Elemanın Eğilme Momenti – Eğrilik Diyagramı

Plastik mafsal hipotezinde, çubuk elemanı üzerinde  $l_p$  uzunluğundaki bir bölgeye yayılan doğrusal olmayan (plastik) şekil değiştirmelerin

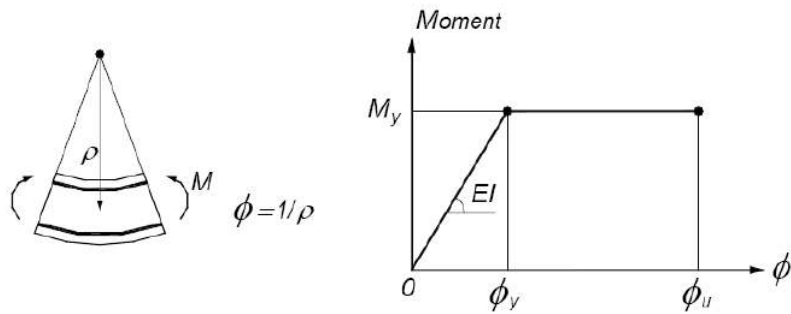
$$\varphi_p = \int_{l_p} \chi_p ds \quad (5)$$

plastik mafsal olarak tanımlanan bir noktada toplandığı varsayılmaktadır. Burada,  $\varphi_p$  plastik mafsalın dönmesini göstermektedir.

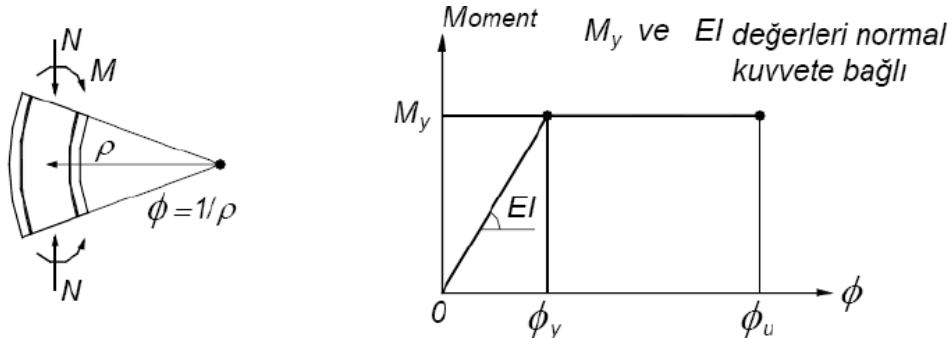




Şekil 8. Kiriş Mesnet Bölgesinde Doğrusal Olmayan Şekil Değişiklikleri



Şekil 9. Kirişlerde Eğilme Momenti-Eğrilik



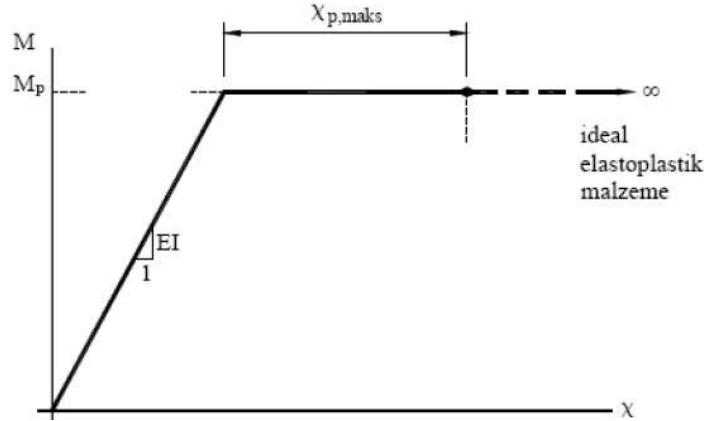
Şekil 10. Kolonlarda Eğilme Momenti-Eğrilik İliksisi

Plastik mafsal hipotezinin uygulanması, gerçek eğilme momenti – eğrilik bağıntısının iki doğru parçasıyla idealleştirilmesi ile mümkün olmaktadır.

$$M \leq M_p \quad \text{için} \quad \chi = \frac{M}{EI}$$

$$M = M_p \quad \text{için} \quad \chi \rightarrow \chi_{p,maks}$$

Plastik mafsal hipotezinde, eğilme momenti-eğrilik bağıntısı, biri yatay olmak üzere iki doğru parçası ile idealleştirilmektedir. Bu iki nokta kesin bir nokta ile birbirinden ayrılmamasına rağmen, çekme donatısının akmaya erişmesi ve betondaki birim kısalmanın  $\epsilon_{cu}$  sınır değerine ulaşması, bu iki doğrusal davranışı birbirinden ayıran nokta olarak kabul edilebilmektedir [7].



Şekil 11. İdealleştirilmiş Bünye Bağıntısı

Dış yüklerin artmasıyla plastik mafsalın dönmesi de artarak dönme kapasitesi adı verilen bir sınır değere eşit olunca, meydana gelen büyük plastik şekil değiştirmeler nedeniyle kesit kullanılamaz hale gelir. Plastik mafsal dönmelerinin yapı sisteminin bir veya daha çok kesitinde dönme kapasitesine ulaşması ile yapı kullanılamaz hale gelir. Diğer bir deyişle yapı göçer.

Dönme kapasitesi

$$maks \int_{l_p} \chi_p ds \quad (\chi_p \rightarrow \chi_{p,maks}) \quad (6)$$

eğilme momenti diyagramının sekline ve  $M - \chi$  bağıntısına bağlı olarak belirlenir. Dönme kapasitesinin yaklaşık olarak hesabı

Dönme kapasitesi

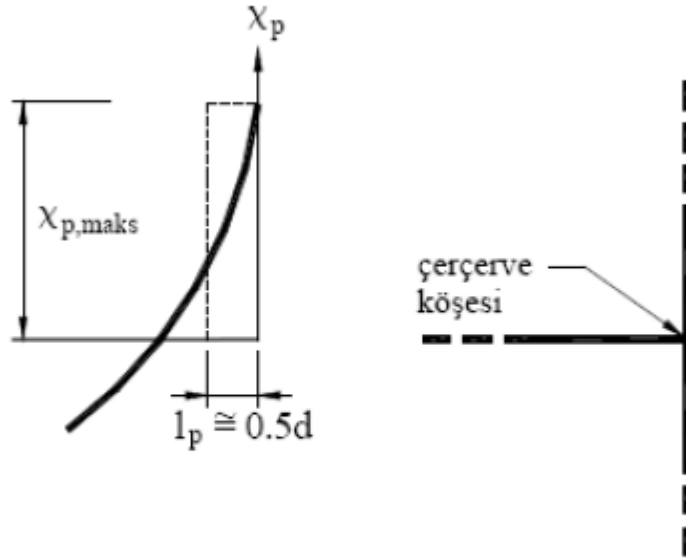
$$maks \varphi_p = l_p \chi_{p,maks} \quad (7)$$

formülü ile hesaplanabilir. Burada  $l_p$  plastik bölge uzunluğunu (plastik mafsal boyu) göstermektedir ve yaklaşık olarak

$$l_p \cong 0,5 d$$

(8)

(d: en kesit yüksekliği) formülü ile hesaplanır.



Sekil 12. Plastik Mafsall Boyu

Plastik mafsall dönmelerini etkileyen çeşitli etkenler aşağıda verilmiştir. Bunların en önemlileri:

- Betonarme betonu ve beton çeliğinin  $\sigma$ - $\varepsilon$  diyagramlarını belirleyen  $\varepsilon_{cu}$  ve  $\varepsilon_{su}$  sınır birim boy değişimleri,
- Betonarme betonunun  $\varepsilon_{cu}$  birim boy değişmesini etkileyen sargı donatısının miktarı, şekli ve yerleşim düzeni,
- Plastik bölge uzunluğunu etkileyen en kesit boyutları,
- Eğilme momenti diyagramının şekli,
- Yapı elemanının normal kuvvetinin büyüklüğüdür.

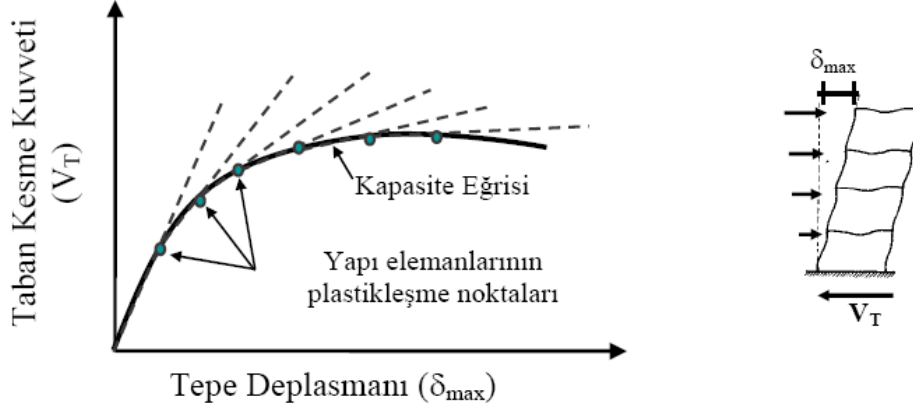
Çelik yapı sistemlerinin dönme kapasitesi betonarme yapı sistemlerine göre daha büyük değerler almaktadır. Diğer taraftan, performansa dayalı tasarım ve değerlendirme (performance based design and evaluation) yöntemlerinde, dönme kapasitesinin belirlenmesinde yapıdan beklenen performans düzeyi de etkili olmaktadır.

### 4.3. Plastik Mafsall Hipotezinin Esasları

- Bir kesitte plastik mafsall oluşması için o kesitteki eğilme momentinin  $M_p$  plastik moment değerine eşit olması gerekir. Kesitteki eğilme momenti  $M_p = M'$  ye eşit olunca taşıyabileceği en büyük moment değerine ulaşmış demektir. Bundan sonra kesit daha fazla moment taşıyamaz ve serbestçe döner. Kesitte oluşan plastik dönmesi  $\varphi_p$  maks  $\varphi_p'$ ye ulaşıncaya dönme kapasitesine erişir ve kesit kullanılamaz duruma gelir.
- Plastik mafsallar genellikle taşıyıcı elemanların uç kısımlarında ve orta noktalarında oluşur. Fakat sistemin stabilitesini etkileyen mafsallar uç noktalardaki mafsallardır. Uç noktalar arasında kalan sistem ise doğrusal - elastik olarak davranır.
- Bilindiği gibi düşey taşıyıcı elemanlar (kolonlar ve perdeler) normal kuvvet etkisi kadar eğilme momenti etkisi altındadır. Yönetmeliklerde bu elemanların boyutlandırılmasında sadece normal kuvvet etkisinin alınmasını yasaklamıştır. Bu yüzden bu elemanlarda plastik mafsall hesabı yapılırken kesite  $M_p$  plastik moment yerine, kesitteki N normal kuvvetine bağlı olarak akma koşulundan bulunan indirgenmiş plastik moment  $M_p'$  değeri esas alınır.

## 5. YAPININ KAPASİTE EĞRİSİNİ BELİRLENMESİ

Yapının kapasite eğrisini elde etmek için yapı, sabit düşey yükler ve aralarındaki oran sabit kalarak artan yatay yükler altında, malzeme ve geometri değişimi bakımından lineer olmayan teoriye göre hesaplanarak limit duruma ulaşmaya kadar izlenir. Her yük değeri için toplam taban kesme kuvveti ( $V_T$ ) ve buna karşılık gelen en üst kat yatay deplasmanı ( $\delta_{max}$ ) (tepe deplasmanı) arasındaki grafik çizilir (Şekil 13).



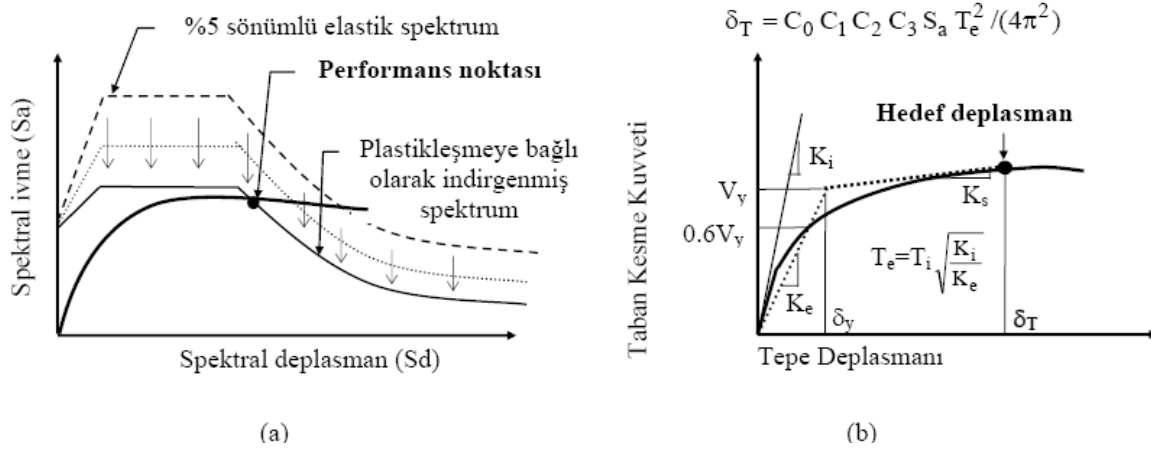
Şekil 13. Lineer Olmayan Teori İle Kapasite Eğrisinin Elde Edilmesi

Hesaplarda plastik şekil değiştirmelerin *plastik kesit* adı verilen belirli bölgelerde toplandığı bunun dışındaki bölgelerde davranışın *lineer-elastik* olduğu kabul edilmiştir. Kirişlerde plastikleşmenin sadece eğilme momenti ile meydana geldiği, kolonlarda ise iki eksendeki eğilme momenti ile normal kuvvetin etkileşimi ile meydana geldiği kabul edilmektedir.

Kolon ve kiriş elemanlarında burulma ve kesme kuvveti taşıma kapasitesinin aşılmış aşılmadığı bağımsız olarak kontrol edilmektedir. Elemanların iç kuvvet-şekil değiştirme bağıntılarına ait karakteristik değerler için FEMA 356' da önerilen değerler esas alınmış ve Moment-Plastik dönme bağıntısı *pekleşen-rijit-plastik* davranış olarak kabul edilmiştir [11].

## 6. MAKSİMUM DEPLASMANIN BELİRLENMESİ

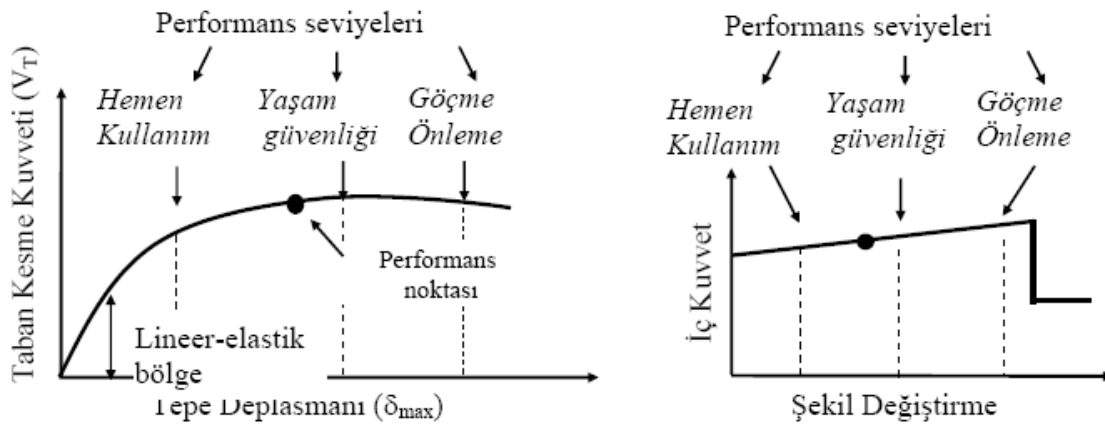
Verilen bir yapı ve deprem için maksimum deplasman deprem esnasında yapının beklenen maksimum davranışının bir tahminidir. İki yöntem arasındaki temel fark, göz önüne alınan depremde yapının deplasman talebinin (plastikleşmiş yapının maksimum deplasman değerinin) belirlenmesi işlemidir. KSY'nde maksimum deplasman değeri, yapıda meydana gelen plastik deformasyonlara bağlı olarak elastik talep spektrumunun indirgenmesiyle belirlenirken, DKY' nde performans düzeyinin kontrol edileceği nokta (hedef deplasmanı) elastik olmayan talep spektrumu esas alınarak bazı katsayılar ile belirlenmektedir (Şekil 14). Kapasite eğrisinin belirlenmesi ve performans düzeyinin belirlenmesi işlemleri her iki yöntemde de aynıdır [11].



Şekil 14. (a) KSY ile Maks. Deplasmanın Belir. (b) DKY ile Maks. Deplasmanın Belir.

## 7. YAPININ PERFORMANS SEVİYESİNİN BELİRLENMESİ

Performans kontrolünün yapılacağı deprem için yapının maksimum deplasmanı belirlendikten sonra maksimum tepe deplasmanı değeri ve yapı elemanlarının *iç kuvvet-şekil değiştirme* durumları sınır değerler ile karşılaştırılarak yapının performans seviyesi belirlenmektedir (Şekil 15). Sınır değerler, belirli bir deprem yükü için yapısal ve yapısal olmayan elemanlardaki hasar seviyesini istenilen sınırlar içinde tutan değerler olup bu çalışmada ATC 40 ve Fema 356'da önerilen değerler kullanılmıştır [11].



Şekil 15. Performans Seviyesinin Belirlenmesi

## 8. SONUÇ

Lineer olmayan çözüm yöntemi olan pushover (statik itme yöntemi), çok fazla parametreye bağlı olarak hesap yapılmasını gerektirdiği için elle hesap yapmak son derece karışık ve zaman alıcıdır. Doğrusal olmayan yöntemlerin ilk basamaklarından biri elemanların belirli bölgelerinde oluşacak plastik mafsallık özelliklerinin belirlenmesidir. Yapıların tasarlanması gereği bu davranış büyük ölçüde plastik mafsalda eğilme davranışına, dolayısıyla kritik kesitlerin moment-eğrilik ilişkilerine bağlıdır. Bu yüzden lineer olmayan çözüm yöntemlerinde bilgisayar programları kullanılmaktadır.

Doğrusal olmayan statik yöntemde dinamik davranışın tek bir titreşim moduyla kısıtlı olması, iki boyutlu davranış gösteren az katlı ve planda düzenli binalarda güvenle uygulanabilmesine rağmen, çok katlı binalar veya düzensiz binalar için kullanılması çok güvenli olmayacaktır. Ancak uygulamada bu yöntem bilinçsizce her yapıda kullanılmaktadır. Bu yüzden yönetmeliklerde bu konulara açıklık getirilmelidir.

**KAYNAKLAR**

1. Oral K., 2005, Statik İtme Analizi Kullanılarak Mevcut Bir Betonarme Yapının İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
2. Özmen, H., İnel, M., Bilgin, H., 2007, Betonarme Elemanların Doğrusal Ötesi Davranışlarının Modellenmesi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.
3. Applied Technology Council., 1996, ATC 40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, (V.1), Washington DC.
4. Federal Emergency Management Agency., 1997, FEMA 273 NEHRP, Guidelines For The Seismic Rehabilitation Of Buildings, Washington DC.
5. Federal Emergency Management Agency., 2000, FEMA 356, Prestandart And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings, Washington DC.
6. DBYBHY, 2007, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Türkiye.
7. Yön, B., 2007, Betonarme Yapıların Statik İtme Analizi İle Performanslarının Belirlenmesi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
8. Özmen, H. B., İnel, M., Bilgin, H., 2007, Sargılı Beton Davranışının Betonarme Eleman ve Sistem Davranışına Etkisi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 22, No 2, 375-383.
9. Celep, Z., 2007, Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış ve Çözümleme, Beta Yayıncılık, İstanbul.
10. Cakıroğlu, A., Ozer, E., 1980, Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistemler, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, Ankara.
11. İrtem, E., Türker, K., Hasgöl, H., 2003, Türk Deprem Yönetmeliğinin Performans Hedeflerinin Lineer Olmayan Statik Analiz Yöntemleri ile Değerlendirilmesi, Türkiye İnşaat Mühendisliği XVII Teknik Kongre ve Sergisi, Balıkesir.