



XVIII. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ
26 - 30 Ağustos 2013, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa

DEPREM YÖNETMELİĞİ'NDE PLASTİSİTE TEORİSİNİN UYGULAMALARI

Zekai Celep

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Maslak, İstanbul

ABSTRACT

Various concepts of the theory of plasticity can be found often implicitly almost in all design codes for reinforced concrete structures; however, since often controlled damages are accepted in design of regular structures subjected to the design earthquake, concepts of the theory of plasticity are employed directly in seismic codes. Although the older versions of the Turkish Seismic Codes include these concepts indirectly, the Turkish Seismic Code (2007) contains them explicitly. These concepts are used more often than ever in Turkish civil engineering community sometimes without grasping their actual meaning. However, it is often difficult to go into details of these concepts to explain them, when a sophisticated problem, such as design and seismic evaluation of a complex structure, is involved. The present paper attempts to give the main plasticity concepts by using graphical representations without going into detail as they are considered in the Turkish Seismic Code (2007).

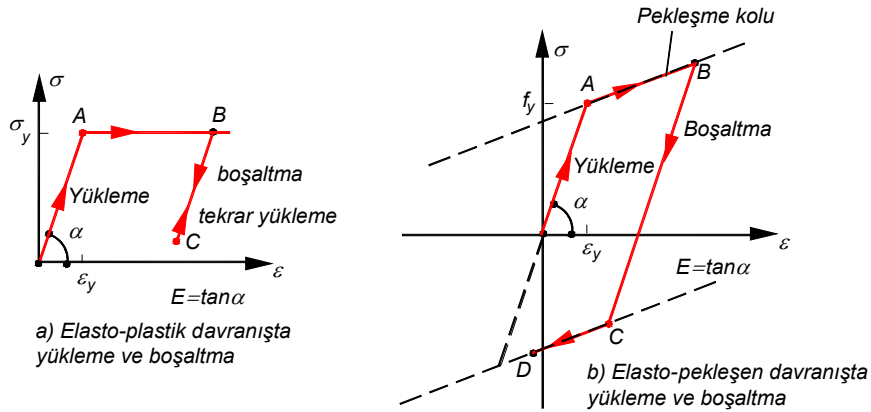
ÖZET

Betonarme yapıların tasarım yönetmeliklerinde plastisite teorisinin bazı kavramları daha çok dolaylı olarak bulunur. Buna karşılık yapıların deprem güvenliğinin sağlanmasında kontrollünde hasar kabul edildiği için, deprem yönetmeliklerinde plastisite teorisinin değişik kavramları yaygın biçimde kullanılır. Deprem Yönetmeliği'nin daha önceki baskılarında bu kavramların dolaylı görülmesine rağmen, Deprem Yönetmeliği (2007) de plastisite teorisinin kavramları doğrudan kullanılmıştır. Günümüzde bu kavramlar uygulamadaki mühendisler tarafından yaygın bir şekilde, bazı durumlarda anlamı tam anlaşılmadan kullanılmaktadır. Bir yapının tasarımı veya deprem güvenliğinin belirlenmesi gibi karmaşık problemlerde ayrıntıya girilerek bu kavramların açıklanması ve anlaşılması çoğu zaman zordur. Bu yazıda Deprem Yönetmeliği (2007) de kullanılan plastisitenin bazı ana kavramlarının ayrıntıya girmeden açıklanmasını hedeflenmiştir.

GİRİŞ

Betonarme yapıların düşey ve deprem yükleri altındaki tasarımında ve değerlendirilmesinde ilgili yükler altında taşıyıcı sistemin analizi ve tasarımı yapılır. Bu iki işlem elastik malzeme kabulleri ile başlamış, zamanla çelik ve betonun elastik ötesi davranışı da göz önüne alınmıştır. Kesit tasarımında elastik ötesi davranışın göz önüne alınması, yönetmeliklere güç

tükenmesi durumunu esas taşıma gücü tasarım kabulleri ile girmiştir. Bunun yanında taşıyıcı sistemin elastik ötesi davranışının göz önüne alınması, bazı basitleştirici kabullerle yönetmeliklere girmiştir. Buna örnek TS500 de öngörülen *Yeniden Dağılım*'la, taşıyıcı sistemde moment diyagramının sınırlı olarak değiştirilmesi ve Deprem Yönetmeliği (2007) de yeni binaların tasarımında plastik davranış sonucu kapasite artımını göz önüne almak için *Deprem Yüklü Azaltma Katsayısı*'nın kullanılması verilebilir [8, 11]. Deprem etkisi altındaki taşıyıcı sistemin analizinde kontrollü hasara (elastik ötesi şekil değiştirmelere) müsaade edildiği için, elastik ötesi davranış önemli olur. Ancak, bu tür analizin zorluğu ve süperpozisyon kuralının kullanılamaması yanında, yüklemelerdeki belirsizlikten dolayı bu analizin yaygınlaşmasının geciktiği görülür. Betonarme malzeme ve elemanlarının davranışının daha yakından tanınması yanında, bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerin daha ayrıntılı sayısal hesabı mümkün kılması, taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan davranışının daha ayrıntılı ve gerçekçi biçimde göz önüne alınmasını ve elastik ötesi analizin yaygınlaşmasını sağlamıştır. Özellikle depreme karşı güvenliğin sağlanmasında sınırlı (kontrollü) hasarın kabul edilmesi, analizde elastik ötesi (plastik) şekil değiştirmelerin de gözönüne alınmasını beraberinde getirmiştir. Yönetmelikte mevcut binaların deprem güvenliklerinin incelenmesinde ise, plastik davranışın hesaba katılması daha belirgin bir şekilde görülür. Günümüzde bu kavramlar uygulamadaki mühendisler tarafından yaygın bir şekilde, bazı durumlarda anlamı tam anlaşılmadan kullanılmaktadır. Buna sebep olarak bir yapının tasarımı gibi karmaşık problemlerde ayrıntıya girilerek bu kavramların anlaşılmasının zorluğu söylenebilir. Bu yazıda plastisite teorisinin Deprem Yönetmeliği'nde (2007) kullanılan bazı ana kavramların olabildiğince şekillerle açıklanmasını hedeflenmiştir [3, 2].



Şekil 1. a) İdeal elasto-plastik malzemede ve b) doğrusal elastik-pekleşen plastik malzemede bir eksenli gerilme durumunda yükleme ve boşaltma

PLASTİK DAVRANIŞ

Yapı malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi genel olarak karmaşık bir değişim sergiler. Ancak, taşıyıcı sistem analizlerinde ve kesit tasarımında talep edilen yaklaşık derecesine bağlı olarak değişik incelikte malzeme modelleri kullanılır. Elastik ötesi malzeme modellerin en basiti doğrusal olan elasto-plastik malzeme modelidir (Şekil 1). Genellikle küçük gerilmeler için malzeme daima doğrusal elastik kabul edilebilir. Bir eksenli gerilme-şekil değiştirme arasındaki ilişki E elastiklik modülü kullanılarak tanımlanabilir. Ancak, bir eksenli davranışın çok eksenliye genişletilmesi ek kabulleri gerektirir. Tek eksenli elasto-

plastik malzeme modelinde gerilmenin f_y akma gerilmesine erişmesi durumunda elastik davranışın sona erdiği kabul edilir ve malzemenin elastik ötesi davranışının gerilme-şekil değiştirme ilişkisi tanımlanır. Çok eksenli gerilme durumunda bu kavramın da genişletilmesi gerekir. Gerilmeler için öngörülen bu tanımlar kesit etkileri için genelleştirilebilir. Bu genelleştirme özellikle elastik ötesi şekil değiştirmenin önemli olduğu eğilme momenti ve eğilme momenti ile normal kuvvet etkisindeki kesitlerde kolayca yapılabilir.

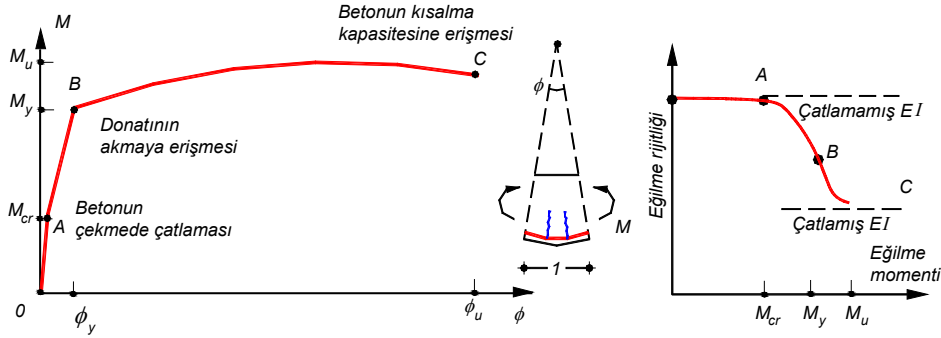
BETONARME KESİTTE EĞİLME MOMENTİ VE EĞRİLİK

Şekil 2.de eğilme momenti altındaki betonarme bir kolon kesitindeki eğilme momenti-eğrilik değişimi gösterilmiştir. Eğilme momentinin küçük değerleri için beton ve donatı elastik davranır. Bu durumda bütün beton kesiti davranışa etkili olduğu için donatının katkısı sınırlı olur. Kesitin eğilme rijitliğinde, betonun elastiklik modülü ve kesitin brüt atalet momenti belirleyici olur. Momentin artmasıyla çekme bölgesindeki beton çatlak ve çatlak tarafsız eksene doğru ilerler. Kesitteki çekme gerilmelerinin hemen hemen tamamı çekme donatısı tarafından karşılanır. Tarafsız eksenin altında çekme gerilmelerinin küçük olduğu bir bölge kalırsa da, analizde bu gerilmelerin katkısı küçük olduğundan ihmal edilir ve çekme bölgesinde betonun tamamen çatladığı kabul edilir. Eğilme momenti artarken, beton basınç gerilmeleri dağılışı doğrusal olmayan bir değişimle oluşur ve donatı akma gerilmesine ulaşır. Momentin bu değeri M_y Akma Momenti olarak bilinir. Momentin artması ile donatı plastik uzama yaparken, betonda da doğrusal olmayan $\sigma_c - \varepsilon_c$ değişimi çok daha belirgin duruma gelir. Genellikle donatının uzama kapasitesi büyük olduğu için, güç tükenmesi betonun en büyük kısıalma kapasitesine erişmesiyle ortaya çıkar ve kesit taşıma gücüne erişir.

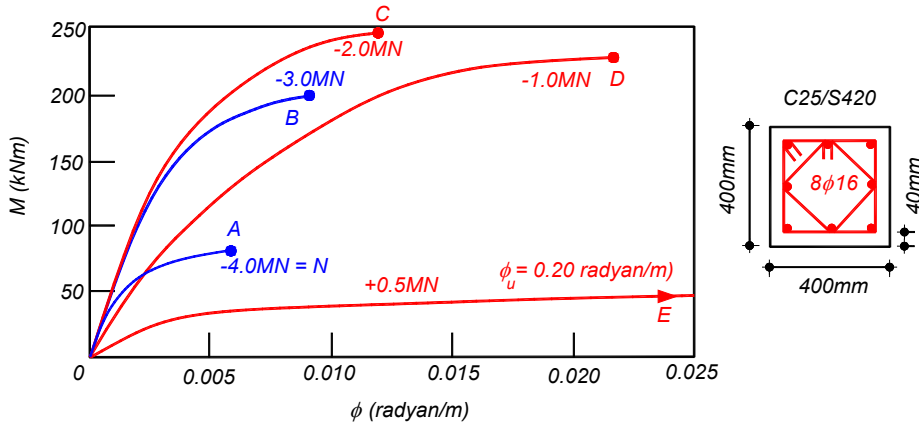
Betonun çatlaması moment-eğrilik değişiminde küçük de olsa, başlangıçtaki doğrusal davranıştan ayrılmayı doğurur ve değişim yataya doğru yaklaşır. Bu durum plastisitede bulunan *Plastik Mafsal* kabulünün uygulanabileceğine işaret eder. Bir kesitte $M - \phi$ moment-eğrilik bağıntısında yataya yakın kolun uzun olması, yani kesit güç tükenmesinin sünek olması, çekme donatısına bağlıdır. Donatının küçük olduğu durumda, plastik şekil değiştirmelerin daha belirgin ortaya çıkar. Kesitte çekme donatısının dengeli donatıdan daha büyük olması durumunda donatı akmaya erişmeden, beton ε_{cu} en büyük kısılmasına ve kesit de güç tükenmesine erişir. Bu durumda $M - \phi$ moment-eğrilik bağıntısında belirgin yatay kol ortaya çıkmaz ve güç tükenmesi gevrek olarak meydana gelir. Kesitin eğilme rijitliği $EI = M / \phi$ bağıntısı ile tanımlanır. Güç tükenmesine yakın durumda $M - \phi$ değişimi yataya yakın olduğu için eğilme rijitliği çok küçülür. Bu davranış plastik davranışının belirgin olmasında karşı gelir. Kesitte basınç donatısının bulunması, basınç bölgesini küçülteceği ve daha büyük kesit eğriliklerine sebep olacağı için, kesitin davranışında plastikleşme daha belirginleştirir.

Kolonlarda eğilme momenti yanında normal kuvvet de etkili olur. Basınç normal kuvvetin bulunması, moment-eğrilik bağıntısında değişikliğe sebep olur ve plastikleşmeyi gösteren yatay kolu küçültür. Genellikle, eğilme momenti kiriş ve kolonda kesitten kesite değişim gösterirken, normal kuvvet kolonlarda sabit değişim sergiler. Bununla beraber normal kuvvetin bulunması plastikleşme bölgesinin artmasına, buna karşılık plastik eğrilik azalmasına sebep olur. Teorik olarak normal kuvvetin etkili olduğu bir kolonda artan yükler altında da tüm eleman plastikleşeceği için, plastikleşme bölgesi çok genişler ve plastik mafsal kabulü geçerliliğini kaybeder. Ancak bu durumda moment eğrilik bağıntısı gittikçe küçülür.

Kesitte sargı donatısının bulunması plastikleşme kolunu belirgin bir şekilde uzatırken, normal kuvvetin etkili olduğu bölgede sınırlı kapasite artımına sebep olur (Şekil 3).



Şekil 2. Betonarme kesitte eğilme momenti-egrilik ilişkisi

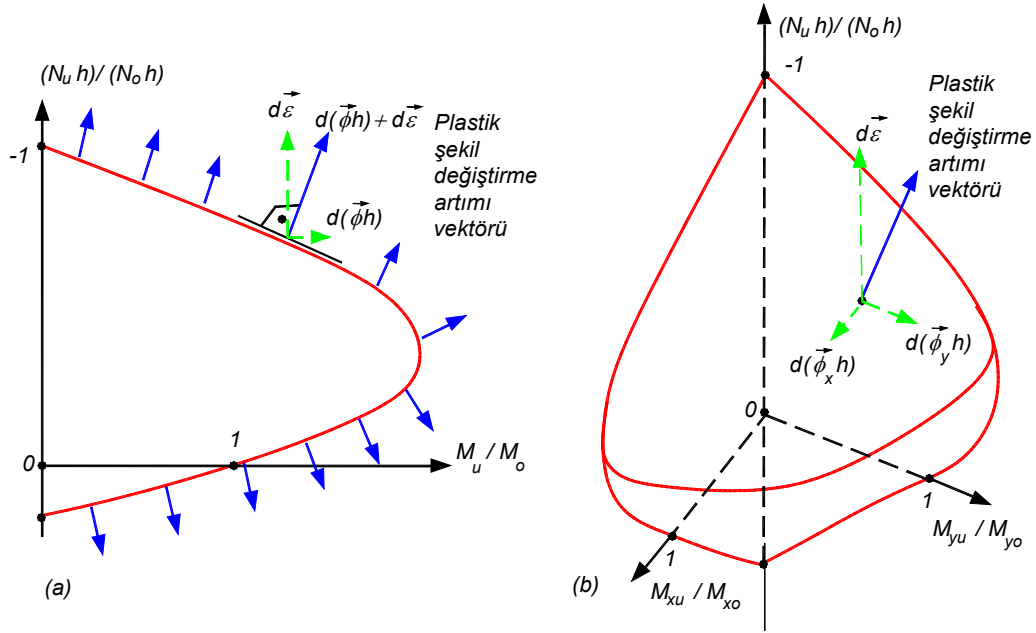


Şekil 3. Normal kuvvet etkisindeki bir betonarme kesitin eğilme momenti-egrilik ilişkisi

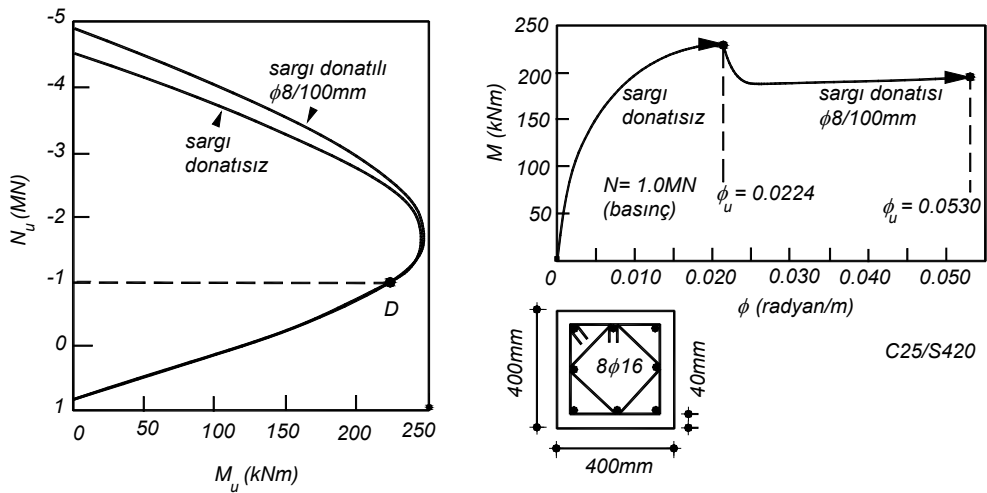
BETONARME KESİTTE PLASTİK ŞEKİL DEĞİŞTİRMELER

Betonarme kesitlerde beton ve çeliğin tasarım gerilmelerini f_{cd} ve f_{yd} ve müsaade edilen birim şekil değiştirmelerini ε_{cu} ve ε_{su} ile tasarımda kullanılan $M_r - N_r$ karşılıklı etki zarf eğrisi ve f_c ve f_y değerleri kullanılarak kesitin $M_u - N_u$ taşıma gücü zarf eğrisi oluşturulur. Bir yüklemde bu zarf eğrisine erişilmesi, gevrek davranış durumunda güç tükenmesine karşı gelir. Buna karşılık özellikle sargı donatısı ile sünek duruma getirilen kesitin, şekil değiştirme bakımından kapasitesine eriştiğini göstermez. Eğilme momentinin çok küçük artmalarına karşılık plastik şekil değiştirmelerin ortaya çıktığı sünek durumda (karşılıklı etki zarf eğrisi üzerinde hareket ederek) plastik şekil değiştirmeler meydana gelir. Bu sebepten sünek davranış için bu zarf *Akma Yüzeyi* (*Akma Şartı*) olarak bilinir (Şekil 4). Kesitin eğilme momentini ve normal kuvvet değerleri karşılıklı etki diyagramına eriştikten sonra, taşıyıcı sisteme yapılan yükleme sonucu oluşan şekil değiştirmelere bağlı olarak, kesitin moment ve normal kuvvet değerleri sabit kalabileceği gibi, karşılıklı etki diyagramı üzerinde hareket edebilir. Bu iki durumda sünek kesitte plastik şekil değiştirmeler meydana gelir. Bunlar kesitte plastik dönme ve plastik kısılma (veya uzama) olarak ortaya çıkar. Bu durumda

karşılıklı etki diyagramını aynı zamanda akma eğrisi olarak da görülebilir ve plastik şekil değiştirme artım vektörünün bu eğrinin normaline doğrultusunda bulunduğu kabul edilir. Karşılıklı etki eğrisi (akma eğrisi) eğilme momenti-normal kuvvet eksen takımında plastik şekil değiştirme artımı akma eğrisinin normaline her noktada değişken olduğu için, $d(\bar{\phi} h) + d\bar{\varepsilon}$ plastik şekil değiştirme artımı vektörünün de doğrultusu değişken olacaktır. Akma eğrisi uygun yaklaşıklıkta doğrular ile ifade edilerek, işlem basitleştirilebilir. Betonarme kesitin özelliğinden dolayı basit eğilmede kesit dönmesi yanında kesite uzama çıkacağı da görülür [1].



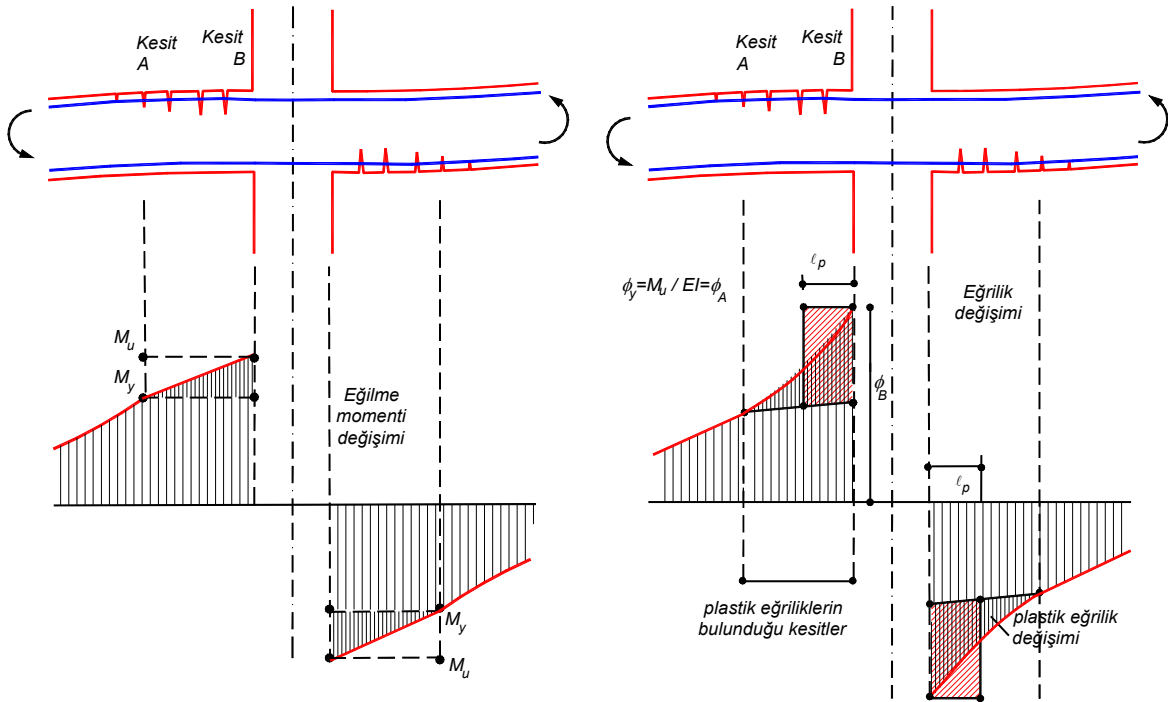
Şekil 4. Betonarme kesitin (a) karşılıklı etki zarfı ve (b) karşılıklı etki yüzeyi



Şekil 5. Bir betonarme kesitin eğilme momenti-normal kuvvet karşılıklı etki diyagramına ve moment eğrilik değişimine sargı donatısının etkisi

BETONARMEDE PLASTİK MAFSAL

Kirişte momentin küçük olduğu bölgede kiriş tamamen elastik davranırken, zorlanan kesitlerde, kesitin tarafsız eksene yakın bölümleri elastik kalır ve diğer bölümleri plastikleşir. Bu bölümde kesitin şekil değiştirmesi elasto-plastik olarak ortaya çıkar. Özellikle deprem etkisinde en çok zorlanan kesitler kiriş ve kolonların uç kesitleridir. Kirişin plastikleşen bölgesinin kapsamı; yükleme seviyesine, kesit yüksekliğine ve momentin ilgili bölgedeki değişimine bağlıdır. Şekil 6.da kirişte mesnet civarında eğilme momenti ve eğrilik değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, A kesitinde moment M_y değerine erişmiş ve akma eğriliği ϕ_y meydana gelmiştir. Momentin daha küçük olduğu kesitlerde elastik eğrilik, momentle orantılı olarak $\phi = M / EI$ şeklinde oluşur. Kolon yüzüne yakın kesitlerde plastik eğrilikler meydana gelir. A ile B kesiti arasındaki eğriliklerin toplamı iki kesitin birbirine göre göreli dönmesini oluşturur ve eğrilik değişimindeki taralı alana karşı gelir. Bu dönme, elastik ve plastik bölümlerde meydana gelir. B kesitindeki plastik eğrilik esas alınarak şekildeki taralı alana eşdeğer olarak oluşturulan dikdörtgen alanın boyu ℓ_p eşdeğer Plastik Mafsal Boyu olarak kabul edilir. Kirişin bu boyu, en büyük plastik eğriliğin meydana geldiği kiriş parçası olarak da görülebilir. Kiriş mesnedinde momentin değişiminin sivrilik oluşturması bu boyun küçük olmasına sebep olur. Bu açıklamalar normal kuvveti de içerecek şekilde kolon için genişletilebilir.

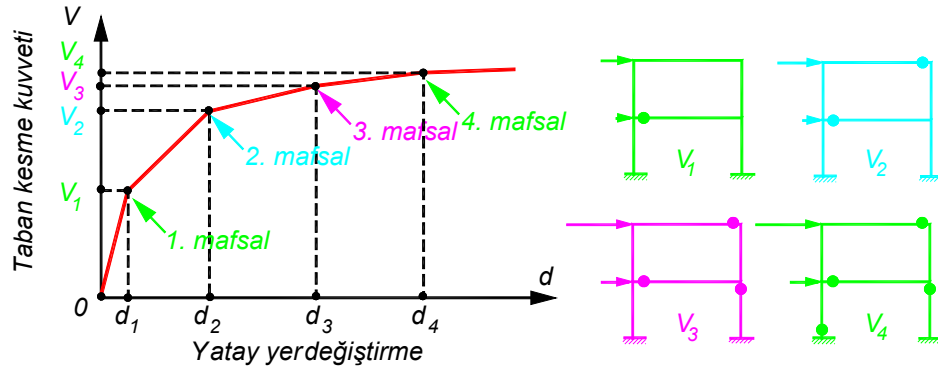


Şekil 6. Sürekli kirişte mesnet bölgesinde plastik eğrilik değişimi ve plastik mafsal kabulü

Şekil 6.da kirişin $0 \leq M \leq M_y$ olan kesitleri tamamen elastik kalmakta ve kesitte eğilme rijitliği ile orantılı elastik eğrilik ortaya çıkmaktadır. Kirişin $M_y \leq M \leq M_u$ olan kesitlerinde ise, kesitin bir kısmı elastik bir kısmı plastik olduğu için, eğrilik elastik ve plastik bölümlerin toplamı olarak oluşur. Eleman zorlandıkça, plastikleşme bölgesi genişler ve eğrilik artar.

Teorik olarak kesitin M_u taşıma gücü momentine erişmesi eğriliğin çok büyük değerlere erişmesi ile mümkün olur. Plastikleşme bölgesinin başlangıcında bulunan B kesitin mesnet yüzündeki A kesitine göre dönmesi, toplam eğriliğin bu iki kesit arasında integrasyonu ile ortaya çıkar: Genellikle plastik eğrilik elastiğe göre büyük olduğu için, sadece plastik eğrilik de gözönüne alınabilir. Hesaplanan en büyük plastik eğriliğin toplam dönmeye bölünmesiyle ℓ_p eşdeğer plastik mafsal boyu elde edilir. Hesaplanan bu boyun, Şekil 6.de görüldüğü gibi, plastik şekil değiştirmelerin meydana geldiği boydan daha küçük bir “eşdeğer boy” olduğu unutulmamalıdır. Plastik mafsal, kesitte eğilme momentinin belirli bir değere erişmesi ile oluşur. Yaklaşık olarak $M_u \approx M_y$ kabul edilerek, plastik mafsal kesitin zorlanması durumunda, eğilme momenti artmadan kapasite değerinde sabit kalarak kesit kolayca normal mafsalda olduğu gibi dönebilir. Plastik mafsal bölgesinin boyu, eğrilik-moment bağıntısına, eleman boyunca eğilme momentinin değişimine, kesit yüksekliğine ve kesitteki normal kuvvete bağlıdır. Deprem Yönetmeliği’nde daha basit olan $\ell_p = 0.5 h$ kabulü benimsenmiştir.

Deprem yükleri etkisinde, kolon ve kirişlerde iki uç alt ve üst kesitler genellikle daha çok zorlandığı için plastik şekil değiştirmelerin bu kesitlerde oluşur. Bu sebepten bu kesitler muhtemel plastik mafsal kesitleri olarak ortaya çıkar. Plastik şekil değiştirmelerin dolayısıyla plastik mafsal dönmesinin meydana gelebilmesi için, bu bölgedeki kesitlerin plastik şekil değiştirme kapasitesine sahip olması gerekir. Ayrıca, bu kapasitenin kullanılabilmesi, ortaya çıkan plastik şekil değiştirmelerin kabul edilebilir olması ile mümkündür. Kesitte kesme kuvvetinin bulunması (normal kuvvette de olduğu gibi) ile kesitteki plastik şekil değiştirme kapasitesinin azalacağı da unutulmamalıdır.



Şekil 7. Plastik mafsal oluşumu ve statik itme analizi

STATİK İTME ANALİZİ VE LİMİT YÜK

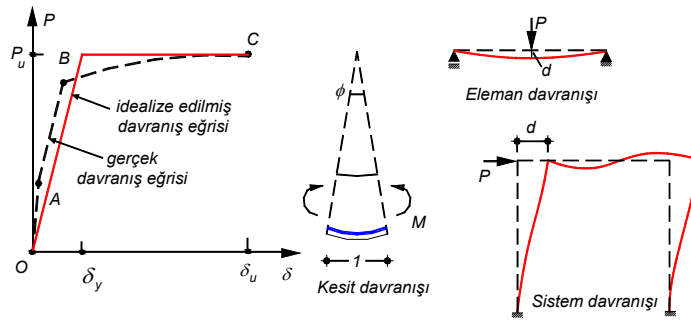
İzostatik sistemlerde en çok zorlanan kesitte plastik mafsalın oluşması ile sistem yük taşıyamaz duruma gelir. Hiperstatik sistemlerde oluşan plastik mafsal, sistemin hiperstatiklik derecesini düşürür. Fakat güç tükenmesi durumunu oluşturmaz. Yükleme ve plastik mafsal kabulü kullanılmaya devam edilirse, plastik mafsal sayısının artmasıyla, taşıyıcı sistem, yerel olarak veya sistem olarak mekanizma durumuna gelir ve bu durumda yük de sınır değerine erişir. Yükün en son değeri *Limit Yük* olarak adlandırılır. Plastik mafsal kabulünü kullanarak, bir taşıyıcı sistemin güç tükenme yükünün elde edilmesinde en basit yöntem; kabul edilen uygun bir yükleme düzeninin adım adım artırılarak plastikleşen kesitlerin belirlenerek limit yükün elde edilmesi olup, bu işlem *Statik İtme Analizi* olarak bilinir. Bu işlemde, sistemin

davranışı kesit etkilerinin sınır değere eriştiği kesitlere plastik mafsallı yerleştirilerek, taşıyıcı sistemde mekanizma durumu oluşuncaya kadar devam edilmesiyle limit yük bulunur (Şekil 7). Limit yüke erişinceye kadar plastik mafsallarda dönmeler ve bunun sonucu sistemde yerdeğişmeler ortaya çıkar. Limit yükün kullanılabilir olması için, bu dönme ve yerdeğişmelerin kabul edilebilir olması gerekir. Kabul edilebilir seviyeyi iki türlü yorumlamak gerekir. Birincisi ortaya çıkan plastik yerdeğiştirme ve şekil değiştirmelerin ilgili kesitin ve sistemin kapasitesi içinde olması gerekir. İkincisi ise, plastik yerdeğiştirme ve şekil değiştirme kalıcı türden olduğu ve (kontrollü) hasar olarak ortaya çıktığı için sistemin kullanıcısı tarafından kabul edilebilir olması gerekir.

Limit yükün hesap edilmesinde yük artımı yönteminin uygulaması, sistemde plastik mafsallı kesitlerin oluşma sırasının izlenmesi ve davranışın daha yakından değerlendirilmesi bakımından tercih edilebilir. Ancak, sadece limit yükün hesap edilmesi sözkonusu olduğu zaman, yöntem uzun hesap adımlarını gerektirir. Limit yükün hesabında geçilen adımlarda doğal olarak denge denklemleri ve sistemin sınır (bağ) şartları yanında akma şartı da sağlanır. Kesitteki eğilme momenti ve normal kuvvet değerleri akma eğrisi veya yüzeyi üzerinde hareket ederek değişir. En son adımda sistem yerel veya tamamen mekanizma durumuna gelir. Bu şartların tümünün sağlanması limit yükün hesabı için gereklidir. Limit yükün doğrudan hesabında bütün bu şartların hepsinin sağlanması yerine bir kısmı sağlanarak limit yükün yaklaşık değerine alttan veya üstten yaklaşılması da mümkündür. Bu amaçla plastisite teorisinde *Alt ve Üst Sınır Teoremleri* geliştirilmiştir.

SÜNEKLİK

Süneklik, bir kesitin veya bir elemanın veya bir taşıyıcı sistemin, dış yükte önemli bir değişim olmaksızın, plastik şekil değiştirme, dolayısıyla yerdeğiştirme yapma yeteneği olarak tanımlanabilir. Sayısal tanımı, güç tükenme durumu ile elastik sınır şekil değiştirme (veya yer değiştirme) nin oranı olarak yapılır: $\mu = \delta_u / \delta_y$. Eğilme momenti etkisi altındaki bir kesitte karşı gelen eğrilik gözönüne alınarak, kesit eğrilik sünekliği tanımlanabilir. Bunun gibi ortasından yüklü bir kirişte düşey yük ve düşey yer değiştirme ilişkisi göz önüne alınarak eleman düşey yerdeğiştirme sünekliği ve yatay yüklü bir çerçeve göz önüne alınarak taşıyıcı sistem yatay yerdeğiştirme sünekliği tanımlanabilir (Şekil 8). Seyrek meydana gelecek şiddetli deprem etkisinde, taşıyıcı sistemin plastik şekil değiştirme yaparak karşılaması öngörülür. Taşıyıcı sistem elastik sınırı geçtikten sonra, bazı kesitlerinde plastik şekil değiştirmeler meydana gelirken, az zorlanan ve kapasitesi olan kesitlerin sistemin yük taşımadaki katkıları ortaya çıkar. Bu yolla depremin dinamik etkisi, plastik ve kalıcı olan enerji türüne dönüştürülerek tüketilir.



Şekil 8. Kesit, eleman ve sistem etki-şekil (yer) değiştirme ilişkisi

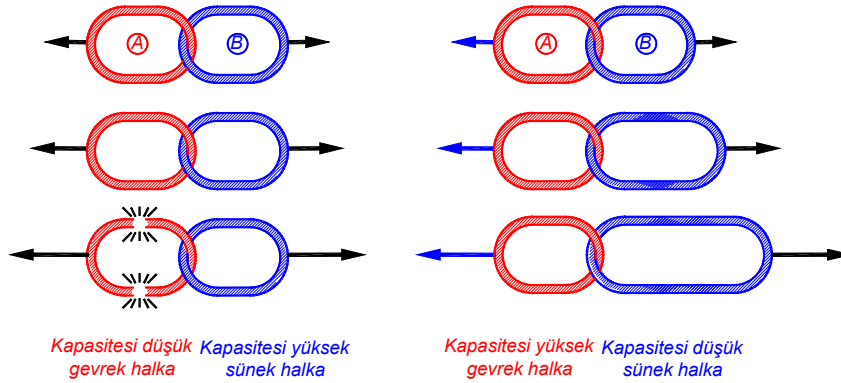
Süneklik sayesinde, tasarım depremine göre boyutlanan sistem sınırlı ve kontrollü plastik şekil değiştirmelerle enerji tüketilirken, iç kuvvetlerin daha az zorlanan kesitlere dağılması sağlanır. Daha büyük depremleri ise, sistemin büyük plastik şekil değiştirmelerle karşılaması beklenir. İyi düzenlenmiş sünek bir taşıyıcı sistemde tasarım depreminde deprem enerjisi, geçmeden uzak kalınarak kontrollü hasarlarla karşılanır. Plastik şekil değiştirmelerin sistemin davranışına etkisi ve plastik taşıma gücü kapasitesinin büyümesi, sistemin hiperstatiklik derecesi ile artar. Bu suretle çok sayıda kesitin kapasitesine erişmesi sağlanır. Plastik şekil değiştirmelerle ortaya çıkan süneklik büyük şekil ve yer değiştirme yapabilme yanında, tekrarlı yüklemelerde enerji söndürebilme özelliğini de içerir. Kolon ve kirişlerin plastikleşen kısımlarında betonda sargı donatısı kullanarak, betonun basınç dayanımını ve özellikle en büyük birim kısalma değerini arttırarak, kesitin sünekliğini arttırmak mümkündür. Kolonlarda ayrıca ortalama normal gerilmeyi düşürerek betonun gevrek davranışı sınırlandırılabilir ve sünekliğe katkıda bulunabilir. Donatının kopma dayanımının akma gerilmesinden çok yüksek olmamasının sağlanması, sünek olan plastik davranışın gerçekleşmesi ve donatının kopma uzamasının büyük olmasının sağlanması sünek davranış için önemlidir. Betonarme elemanların eğilme momenti altında donatının akma gerilmesine erişmesi sonucu meydana gelen güç tükenmesi, uygun tedbirler alındığında, sünek olarak ortaya çıkar. Buna karşılık kesme kuvveti altında betonda oluşan eğik basınç gerilmelerinin etkili olması sebebiyle plastik şekil değiştirmeler çok sınırlı olarak ortaya çıkar. Bunun gibi, donatı ile beton arasında aderansın sağlanmaması sonucu donatının betondan sıyrılması durumunda plastik şekil değiştirmeler ortaya çıkamayacağı için güç tükenmesi de gevrek olur.

KAPASİTE TASARIMI

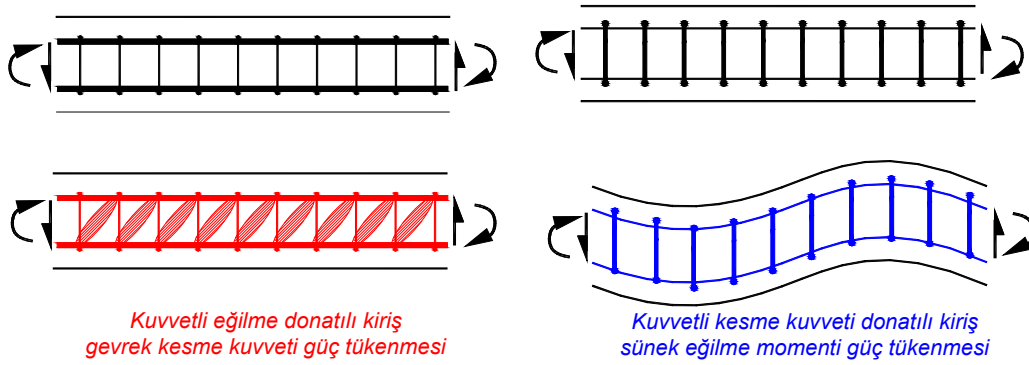
Taşıyıcı sistemin plastik davranışı sonucu kapasitenin artması için, plastikleşme beklenen kesitlerde bu davranış sebebiyle beklenen sünekliğin sağlanması ve plastikleşme oluşumuyla ortaya çıkacak gevrek güç tükenmesinin önlenmesi *Kapasite Tasarımı* olarak bilinir. Bu işlem tasarım depreminde ve özellikle daha büyük depremlerde taşıyıcı sistemde güç tükenmesi mekanizmasının kontrol edilmesini sağlar. Kesitlerin plastikleşme sonucu ortaya çıkacak kapasitelerinin olabildiğince birbirine yakın bulunması ile plastikleşmenin birbirini izleyen biçimde ortaya çıkmasını sağlar ve böylece taşıyıcı sistemin plastik şekil değiştirmelerin bir kesitte yoğunlaşması önlenerek, yayılı olarak ortaya çıkması, yerel büyük plastik şekil değiştirmeler yerine, dağılı küçük olanlar ile depremin karşılanması sağlanır. Tasarımda kapasite ilkesinin kabulü ile kesitlerde, elemanlarda ve taşıyıcı sistemde oluşacak güç tükenmesinin sünek olarak meydana gelmesi sağlanır. 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 durumda sünek olmayan etkiye ait kapasite arttırılarak, eleman beklenilenin üstünde zorlandığında, güç tükenmesinin sünek olarak ortaya çıkması sağlanır.

Şekil 8.de iki halkadan meydana gelen bir zincir uygulanan kuvvetlerle güç tükenmesi durumuna getirilmeye çalışılmaktadır. Burada halkalardan birinin (*A* halkası) sınırlı elastik şekil değiştirme kapasitesinin bulunduğu ve plastik şekil değiştirme kapasitesinin bulunmadığı, halkanın elastik şekil değiştirme sonucu güç tükenmesine ani olarak erişeceği kabul edilmiştir. Diğer halkanın (*B* halkası) ise, önemli plastik şekil değiştirme kapasitesinin bulunduğu için güç tükenmesinin büyük şekil değiştirmeler sonucu oluşacağı kabul edilmiştir. Birinci durumda *A* halkasının kapasitesinin *B* halkasına göre daha yüksek olduğu kabul edilmiş olup, zincirin güç tükenmesini plastik şekil değiştirme kapasitesi olmayan *B* halkası

kontrol eder ve zincirin güç tükenmesi plastik şekil değiştirme olmadan ani ve gevrek biçimde meydana gelir. İkinci durumda ise, *B* halkasının kapasitesi *A* halkasına göre daha yüksek olup, zincirin güç tükenmesini plastik şekil değiştirme kapasitesi olan *A* halkası kontrol eder ve zincirin güç tükenmesi büyük plastik şekil değiştirmeler sonucu haberli ve sünek biçimde meydana gelir. Kapasite tasarımın esası, yönetmeliklerde öngörülen deprem etkilerinin karşılanması yanında, bu etkilerin öngörülme-yen bir şekilde artması durumunda da güç tükenmesinin büyük plastik şekil değiştirmeler sonucu sünek olarak meydana gelmesini sağlamaktır [5,6]



Şekil 8. İki halkalı zincirin gevrek ve sünek güç tükenmesi



Şekil 9. İki halkalı zincire kesme kuvveti ve eğilme momenti etkisindeki kiriş benzeşimi

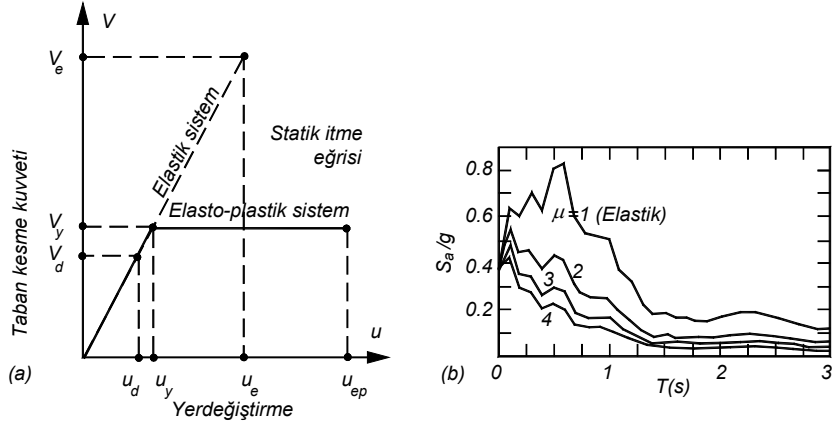
Şekil 9.da bir kirişin deprem etkisi altında güç tükenmesine erişme durumları gösterilmiştir. Kirişin gevrek (kesme kuvveti güç tükenmesi) ve sünek (eğilme momenti güç tükenmesi) halkalardan oluştuğu kabul edilebilir. Birinci güç tükenme durumunda kesme kuvveti donatısı (enine donatılar, etriyeler) iki halkalı zincirin zayıf halkasını oluşturmakta ve güç tükenmesi beton basınç çubuklarının kapasitesine erişmesiyle önemli plastik şekil değiştirmeler oluşmadan (gevrek) ortaya çıkar. İkinci güç tükenmesi durumunda ise, eğilme momenti halkasının kapasitesi daha küçüktür. Bu durumda kirişin güç tükenmesi eğilme donatısının akmaya erişmesi ile büyük plastik şekil ve yer değiştirmelerle sünek biçimde ortaya çıkacaktır. Bu sebepten Deprem Yönetmeliği'nde kiriş veya kolonda kesme kuvveti

donatısının, kesme kuvveti halkasının kapasitesi güçlü oluşacak biçimde tasarlanmasını ve bunun için elemanın kesme kuvveti kapasitesinin uç kesitlerinin eğilme momenti kapasitesi ile düşey yüklerden hesaplanacak kesme kuvvetinden daha büyük olması öngörülmüştür.

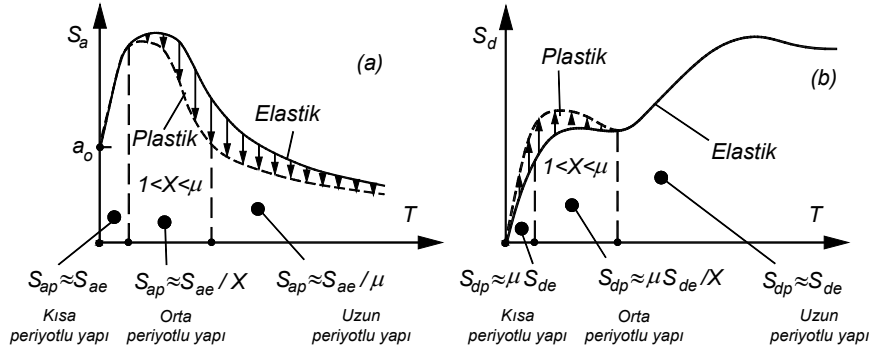
Deprem Yönetmeliği, kapasite tasarımını öne çıkararak tasarım depremi etkisinde ve daha büyük depremlerde plastik şekil değiştirmelerin oluşacağı sünek güç tükenmesinin sağlanmasını amaçlamaktadır. Bu husus plastik davranışın kullanıldığını göstermektedir. Deprem Yönetmeliği'nde bulunan kavramlardan; bir çerçeve birleşim bölgesinde kolonların kirişlerden güçlü olması, kiriş ve kolonların kesme kuvveti kapasitesinin eğilme kapasitesinden yüksek olması, kiriş ve kolonların deprem etkisinde en çok zorlanan kesitlerinde sargı donatısı öngörerek betonda sınırlı da olsa plastik şekil değiştirmelerin oluşmasının (sünekliğin) sağlanması, perdelerin de en çok zorlanan kesitleri olan mesnet bölgelerinde (kritik perde yüksekliği) ve perde kesitinin uç bölgelerinde sargı donatısının öngörülmesiyle plastik şekil değiştirmelerle oluşan sünek güç tükenmesinin sağlanması kapasite tasarımının kullanımı olarak görülebilir. Benzer şekilde perde tasarım momentinin, perde kritik yüksekliğinde (potansiyel plastik mafsallık bölgesi) sabit değişim ve yükseklik boyunca momentin değişimini doğrusal biçimde kabul edilmesi ve tabandaki perde kesme kuvvetinin tasarımında kesitin eğilme momenti kapasitesine uygun olarak artırılması da plastik şekil değiştirmelerin etkili olduğu sünek güç tükenmesinin oluşturulması veya başka ifade ile kapasite tasarımının uygulaması olarak görülebilir.

DEPREM YÜKÜ AZALTMA KATSAYISI

Deprem Yönetmeliği tasarım depreminde, binanın yapısal elemanlarında oluşacak hasarı (kapasitede önemli kayıp olmadan meydana gelen plastik şekil değiştirmeleri) kabul eder, kontrollü ve sınırlı düzeyde kalmasını öngörür. Plastik davranış, taşıyıcı sistemi daha kolay şekil değiştirebilir duruma getirdiği için, sisteme olan deprem talebinin azalmasına sebep olduğu gibi, elastik ötesi davranış sebebiyle kapasitenin artmasına da sebep olur. Bu iki olumlu katkının kapsamı, plastik şekil değiştirmelerin kabul edildiği bir çözümde görülebilir. Böyle bir çözümün yapılması değişik açılardan zorluk arz ettiği gibi, çözümde yük birleştirmesinin (süperpozisyon kuralı) geçerli olmaması, her yükleme durumunun ayrı olarak ele alınmasını gerektirir. Ayrıca, bu tür çözümler kesit kapasitelerinin (kesit boyutu ve donatısının) belirli olması durumunda yapılabilir. Böyle bir çözüm Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi'ndeki gibi statik türden olabildiği gibi, Zaman Tanım Alanında Çözüm Yöntemi gibi çok daha kapsamlı ve zaman alıcı olabilir. Bütün bu sebeplerden elasto-plastik çözüm sonucu bulunacak taşıyıcı sistem yatay yük kapasitesi ile elastik çözüm yaparak bulunacak eşdeğer yatay yük kapasitesi arasında bir geçiş katsayısı tanımlanması amaçlanmıştır. Gerçekte böyle bir geçiş katsayısı taşıyıcı sistem türüne ve dış etkinin türüne bağlı olduğu gibi, elemandaki iç kuvvet dağılımına ve güç tükenme durumuna bağlı olarak ortaya çıkar. Deprem Yönetmeliği'nde *Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı* (veya *Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı*) olarak isimlendirilen bu geçiş katsayısını sadece taşıyıcı sistem türüne ve kapasite tasarım esaslarının uygulanma kapsamına bağlanmıştır. Bu katsayı, kesit tasarımında ayrıca beton ve donatı için kısmen plastik davranışı ile ilgili olan $f_{ck} = 1.50 f_{cd}$ ve $f_{su} \approx 1.30 f_{yk} \approx 1.30 \times 1.15 f_{yd}$ dayanımları yerine f_{cd} ve f_{yd} tasarım dayanımlarının kullanılmasından ortaya çıkan *Dayanım Fazlalığı Katsayısı*'ni da içerir (Şekil 10.a).



Şekil 10. a) Elastik ve elasto-plastik sistemde basitleştirilmiş statik itme eğrileri ve b) Elastik spektrum ve plastik şekil değiştirmelerin gözönüne alındığı spektrum



Şekil 11. Elastik a) ivme ve b) yerdeğiştirme spektrumundan plastik davranışına ait olanların basit dönüşüm ile yaklaşık olarak elde edilmesi

Şekil 10.b.de yapıya etkileyen deprem kuvveti (Taban Kesme Kuvveti) ile doğrudan ilgili olan ivme spektrumu verilmiştir. Belirli bir deprem kaydına bağlı olarak elde edilen bu spektrum eğrisi, elastik tek serbestlik dereceli sistemde maksimum mutlak ivmeleri sistem periyoduna bağlı olarak ifade eder. Deprem Yönetmeliği'nde bu eğrinin basitleştirilmiş ve yuvarlatılmış spektrum katsayısının değişimi olarak verilir. Bu eğride $\mu = 1$ değeri sistemin elastik olmasına karşı gelir. Sistemin elasto-plastik davranması durumunda (f_y değerinden sonra akmanın başlaması) spektral ivmenin μ süneklige (süneklik talebi = yerdeğiştirme talebi /akma yerdeğiştirmesi) bağlı olarak ortaya çıkar. Bu eğrilerde spektral ivmelerin, plastik yerdeğiştirmelerden oluşan çevrimsel davranış sonucu enerji kaybı sebebiyle küçültüğü görülmektedir. Sistemin çok rijit (periyodunun çok küçük) olması durumunda plastik şekil değiştirmelerin (sünekliğin) etkili olmadığı görülmektedir. Çok rijit yapıda meydana gelen göreceli yerdeğiştirmelerin yer hareketi yerdeğiştirmelerine göre küçük olacağı için süneklığın etkisi de çok düşük olacaktır. Buna karşılık periyodu büyük olan rijitliği küçük olan yapılar, yer hareketinde nerdeyse mutlak olarak hareketsiz kaldıkları için, spektral yerdeğiştirme, maksimum yer hareketi yerdeğiştirmesine yakın değerde elastik ve elasto-plastik sistemde oluşur. Bu durum *Eşit Yerdeğiştirme Kuralı* olarak da bilinir. Buna göre orta ve uzun periyotlu elasto-plastik taşıyıcı sistem, elastik olanınla aynı yerdeğiştirmeyi yaparken,

rijitliğin azalması sonucu μ oranında daha küçük deprem kuvvetine maruz kalır. Ancak meydana gelen yerdeğiştirmelerde plastik bölüm etkili olduğu için, önemli kontrollü hasar (plastik yerdeğiştirmeler) meydana gelmesi kaçınılmazdır (*Şekil 11*). Taban kesme kuvveti, spektral ivme ile doğrudan orantılı olduğu için S_a spektral ivme için öngörülen değişikliğin aynı şekilde ona da uygulanabileceği söylenebilir. Burada çok küçük ve orta periyot değerleri için yaklaşık olarak zeminin karakteristik periyotları T_A ve T_B değerleri sınır olarak kabul edilebilir [2].

KESİTLERİN PLASTİKLEŞME DERECELERİ

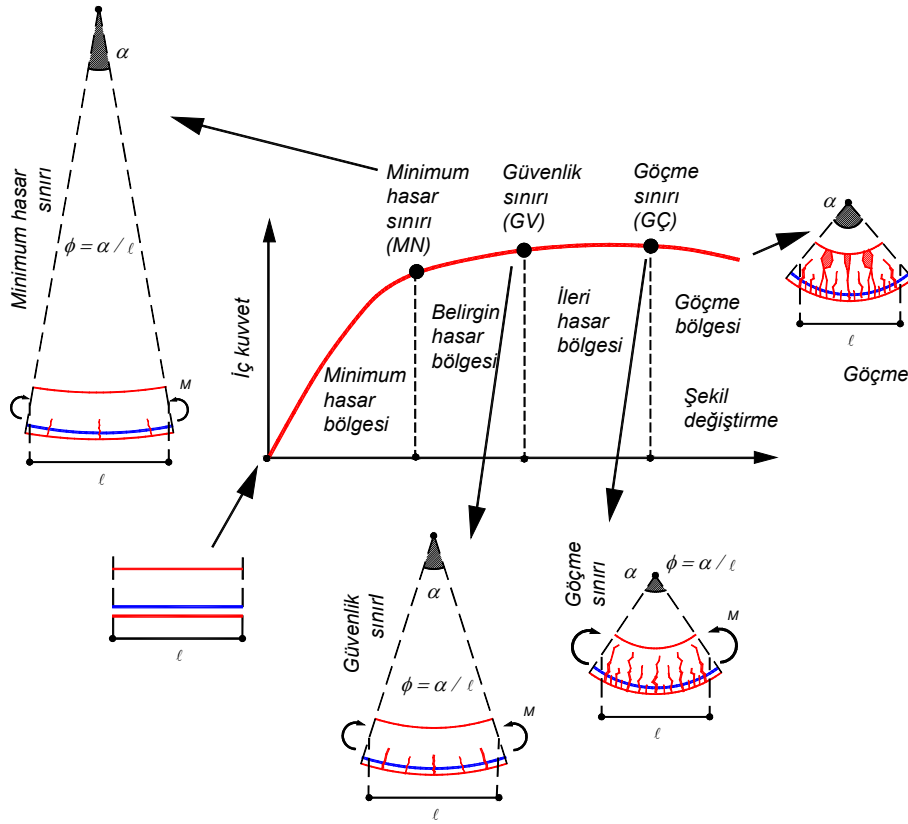
Deprem Yönetmeliği'nde kesitlerde plastikleşme durumuna, beton ve çelikteki birim kısalma (veya uzama) değerlerinin hesabı ve bunların verilen sınırlarla karşılaştırılması sonucu karar verilir. Sünek bir kesitteki iç kuvvet ve şekil değiştirme (örneğin eğilme momenti ve eğrilik) ilişkisi *Şekil 11*.de verilmiştir. Beklendiği gibi ilk bölümde elastik davranışa benzetilebilecek bir davranış ve daha sonra elasto-plastik davranış ortaya çıkar. Bu eğri üzerinde plastik şekil değiştirmelerin belirgin başlangıcı *Minimum Hasar Sınırı (MN)* ve plastik şekil değiştirme kapasitesine erişilmesiyle güç tükenmesinin ortaya çıkması *Göçme Sınır (GÇ)* nispeten kolayca tanımlanabilir. *Güvenlik Sınırı (GV)* ise, kesitin dayanımını güvenli olarak sağlayabileceği kontrollü plastik şekil değiştirmelerin meydana geldiği durum olup, bu iki sınırın arasında ortaya çıkar. Bu sınırlar arasında *Şekil 12*.de verilen plastikleşme (hasar) bölgeleri ortaya çıkar. Gevrek olarak hasarı beklenen elemanlarda plastik şekil değiştirme kapasitesi çok düşük olduğu veya hiç olmadığı için bu tür bir tanımlama geçerli değildir. Buna paralel olarak taşıyıcı sistemde oluşan elastik ötesi davranış ve bina performans durumu *Şekil 13*.de verilmiştir [7, 8, 9].

DOĞRUSAL ELASTİK DEĞERLENDİRME YÖNTEMİ

Kesitler için plastikleşme bölgelerinin sınırlarının matematiksel olarak tanımlanması kolay değildir. Yönetmelikte doğrusal elastik değerlendirme yönteminde plastikleşme (hasar) bölgelerini ayıran bu sınırlar, kuvvet türünden kesit etkisi ve depreme kalan ilgili kapasite esas alınarak $r = Etki / Kapasite = E / [K - (G + Q)] \leq r_{sınır}$ şeklinde tanımlanmıştır. Burada K , kesitin ilgili kapasitesini, E karşılanması beklenen azaltılmamış elastik deprem etkisinin oluşturduğu kesit etkisini, $G + Q$ düşey yüklerden oluşan kesit etkisini, $K - (G + Q)$ kesitte düşey yüklerden artan (geriye kalan) kapasiteyi göstermektedir. Kesitin sadece elastik davranışla öngörülen deprem etkisinin karşılanması söz konusu olsaydı, $r_{sınır} = 1$ olması beklenirdi. Bu çözüm ekonomik olmadığı için, elasto-plastik davranış hesaba katılır ve $r_{sınır} > 1$ olarak kabul edilir. Bu sınır değer, kabul edilecek hasar seviyesine ve kesitte sünekliliği etkileyecek diğer kabullere bağlı olarak ortaya çıkar.

Burada doğrusal olan yöntemin taşıyıcı sistemin davranışı anlamında “doğrusal” olduğunu kabul etmek uygun değildir. Yeni tasarımı yapılacak binalarda, plastik davranış sonucu oluşan deprem etkisi talebinin azalması ile yatay yük kapasite artımı tüm bina için öngörülen *Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı R* ve ona bağlı kullanılan *Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı R_a* ile gözönüne alınır. Mevcut binaların değerlendirilmesinde kullanılan Doğrusal Elastik Değerlendirme Yöntemi'nde her eleman için göz önüne alınan $r = Etki / Kapasite Oranı$ katsayısı ile doğrusal olmayan plastik davranışla oluşacak yatay yük kapasite artımı ile talebin azalmasını gözönüne alınmaktadır. Diğer bir ifade ile çözüm işlemi doğrusal elastik olmakla beraber bu yöntemde de taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan davranışı, kesit için hesaplanan

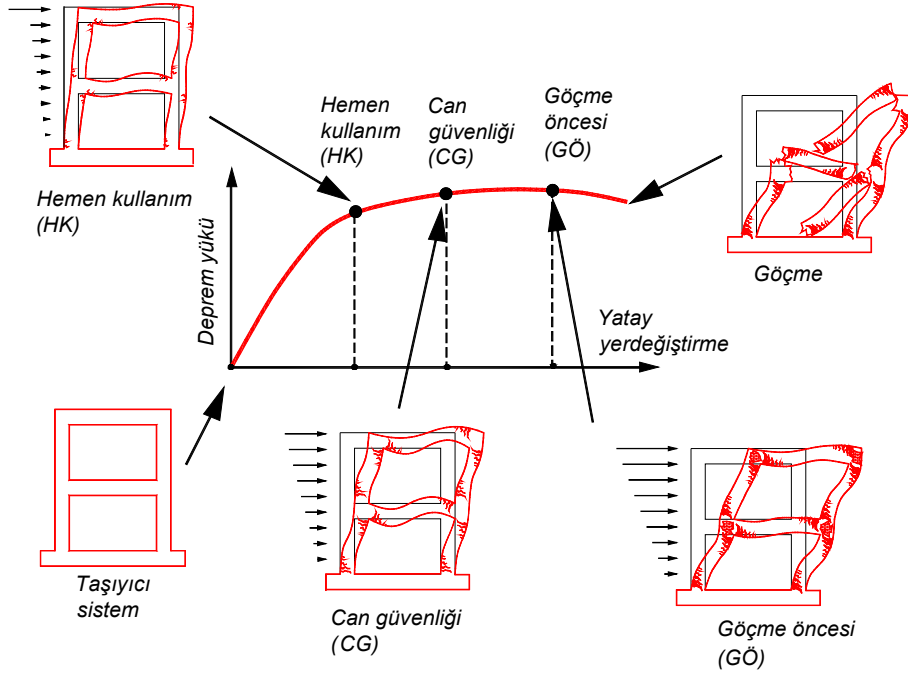
bir katsayı ile gözönüne alınır. Bu yapı tasarımında bu durum tüm taşıyıcı sistem için kabul edilen bir katsayının kullanılması şeklindedir.



Şekil 12. Kesit plastikleşme (hasar) sınırları ve bölgeleri

Doğrusal elastik değerlendirme yöntemi yeni binaların tasarımında kullanılan yöntemin mevcut binalara genişletilmiş olarak kabul edilebilir. Yeni bina tasarımında olduğu gibi, bu yöntemde de kesit ve elemanların dayanımları esas alınır. Bu amaçla taşıyıcı sisteme ayrı ayrı her iki doğrultuda elastik (azaltılmamış $R_a = 1$) deprem yükü yüklenir. Bu işlem eşdeğer deprem yükü yönteminde azaltılmamış deprem yükü statik olarak yüklenerek yapılır. Mod birleştirme yönteminde ise, deprem etkisini tanımlayan spektrum eğrisinin azaltılmadan kullanılması ile yapılır. Örneğin, bir kiriş kesitinde deprem etkisinde ortaya çıkan M_E eğilme momenti ve N_E normal kuvvet hesap edilir. Buna paralel olarak malzeme katsayıları ile bir azaltma yapmaksızın f_{cm} ve f_{ym} mevcut malzeme dayanımları kullanılarak kesitin M_K eğilme momenti kapasitesi bulunarak $r = M_E / (M_K - M_{G+Q})$ oranı elastik ötesi davranışın (plastik şekil değiştirmelerin) bir ölçüsü olarak değeri hesaplanır. Bu oranının $r_{sınırlı}$ değeri; kesitte kabul edilecek plastik şekil değiştirmelerin (kontrollü hasarın) seviyesine, plastik şekil değiştirme kapasitesini olumsuz etkileyen kesme kuvveti ve normal kuvvetin değerlerine ve plastik şekil değiştirme kapasitesini olumlu etkileyen sargı donatısına bağlı olarak belirlenir. Yeni bina tasarımında deprem etkisi durumunda $M_{G+Q} + M_E / R_a \leq M_r$ olarak kullanılan tasarım denklemi hatırlanırsa, son iki ifadenin denklemin birbiri ile örtüştüğü görülebilir. Son ifadede M_r kesit kapasitesini göstermektedir. Sonuç olarak değerlendirme de kullanılan $r_{sınırlı}$

değerin R_a ile eşleştiği ve benzeşime dayanarak doğrusal elastik değerlendirme yöntemi, yeni binaların tasarımında kullanılan yöntemin genişletilmiş olarak görülebilir.



Şekil 13. Taşıyıcı sistem (bina) performans düzeyleri

DOĞRUSAL ELASTİK OLMAYAN DEĞERLENDİRME YÖNTEMİ

Bu yöntemde taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan davranışı ve oluşan elastik ve plastik şekil değiştirmeler daha ayrıntılı biçimde ele alınır. Buna karşılık yöntemin uygulamasında taşıyıcı sisteme ait daha çok parametreye ihtiyaç duyulur. Bu durumda özellikle mevcut binalar için bazen aşılması zor olan belirsizlikler ortaya çıkabilir. Bu yöntemin esasını statik itme analizi oluşturur.

Statik itme çözümünün adımlarında elemanların güç tükenmesi durumlarının kontrolü gerekir. Örneğin elde edilen kesme kuvveti mevcut donatı ile karşılanmıyorsa, sistemin bu itme adımına ulaşmadan gücünün tükeneceğine karar verilir. Geri dönülerek kesit etkilerine karşı gelen mevcut kapasite ile karşılaştırılmasıyla, ulaşılabilecek en büyük itme adımı bulunur. Bu yöntemde kesitteki betonun birim kısalması ve donatının birim uzama ve kısalması, yani şekil değiştirme esas alınarak, $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{c,sınır}$ ve $\varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,sınır}$ olarak plastikleşme (hasar) bölgelerini ayıran sınırlar tanımlanmıştır. Bu şekil değiştirme sınır değerlerin elastik sınırın üzerinde olup, elasto-plastik davranışın beklendiğine işaret eder. Bu değerlendirme yönteminde de, sınır değerler kabul edilecek hasar seviyesine bağlıdır. Deprem Yönetmeliği'nde verilen şekil değiştirmelerin sınır değerleri incelendiğinde hasar bölgesi sınırının ilerlemesiyle donatıda ve betonda daha büyük toplam şekil değiştirmelere müsaade edildiği görülmektedir. Betonda minimum hasar sınırında en dış betondaki birim kısalmanın sınırı ε_{cu} verilirken, güvenlik ve göçme sınırında enine donatı içinde kalan betonun birim kısalmasının sınırı ε_{cg} verilir.

ZAMAN TANIM ALANINDA DOĞRUSAL OLMAYAN HESAP YÖNTEMİ

Bu yöntemde taşıyıcı sistemdeki doğrusal olmayan (elasto-plastik) davranış gözönüne alınır ve kabul edilen bir deprem hareketi altındaki taşıyıcı sistemin hareket denklemi sayısal olarak çözülürse, doğrusal davranışta olduğu gibi, sistemin bütün elastik ve plastik şekil değiştirmeleri, yerdeğiştirmeleri ve kesit iç etkileri zamana bağlı olarak bulunur. Daha sonra sistemde plastik mafsal dönmesi ve beton ve donatının birim uzama/kısalma talepleri belirlenir. Çözümü çok kapsamlı olan bu yöntemde, kabullerin çok sayıda olması sonuçların yorumlanmasında özenli olmayı gerektirir. Ayrıca, seçilen deprem kaydının yönetmelikte verilen spektrum eğrisi ile uyuşması ve birden daha (en az üç veya yedi) çok sayıda kayıtlı çözüm yapılması önerilir.

SONUÇLAR

Yukarıdaki açıklamaların çerçevesinde aşağıdaki tespitler yapılabilir:

- a. Betonarme taşıyıcı sistemlerin plastik davranış sebebiyle deprem etkisi talebinin azalması ve taşıyıcı sistemde kapasitenin artması uzun zamandır yönetmeliklerde değişik seviyelerde çoğu zaman dolaylı olarak göz önüne alınmıştır. Ancak Deprem Yönetmeliği (2007) de daha belirgin ve kapsamlı olarak kullanılmaktadır. Daha önceleri akademik çevrelerde kullanılan plastik şekil değiştirmeye ve süneliğe ait kavramlar, günümüzde yaygın biçimde uygulamadaki mühendisler tarafından kullanılmaktadır.
- b. Deprem Yönetmeliği (2007) de kullanılan süneklik ve kapasite tasarımı, plastik şekil değiştirmelerin sağlanmasının bir sonucudur. Bu sebepten mühendislik eğitiminde yapı sistemlerinin “elastik” davranışı yanından “plastik” davranışına da önem verilmesi yerinde olacaktır.
- c. Doğrusal olmayan elastik ötesi (plastik) davranışın gözönüne alınmasıyla, taşıyıcı sistem davranışının daha gerçekçi anlaşılması, kapasitesinin daha gerçekçi tasarım ve değerlendirilmesi mümkündür. Aynı zamanda bu sayede taşıyıcı sistemin kuvvetli ve zayıf taraflarını belirlemek de kolay olmaktadır.
- d. Doğrusal olmayan elastik ötesi (plastik) davranışın belirlenmesinde malzeme değerlerinin ve davranış eğrilerinin daha gerçekçi belirlenmesi önemlidir. Daha ileri bir çözüm için daha gerçekçi kabullere ihtiyaç vardır. Bu sebepten pek çok belirsizliği içeren mevcut binalar üzerinde doğrusal olmayan (plastik şekil değiştirmelerin göz önüne alındığı) bir çözüm yönteminin daha fazla özen ile uygulanması gerektiği unutulmamalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Aydınoğlu N., Celep Z., Özer E., Sucuoğlu H. "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik – Örnekler Kitabı", Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2007.
- [2] Booth E., Key D., Earthquake design practice for buildings, Thomas Telford, London, 2006.
- [3] Celep Z., Kumbasar N., "Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı (Bölüm 11: Performans kavramına dayalı tasarım)", Beta Yayıncılık, İstanbul, 2004.

- [4] Celep Z., "Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal olmayan Davranış ve Çözümleme", Beta Yayıncılık, İstanbul, 2008.
- [5] Paulay T., Priesley M.J.N.. "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings", John Wiley, New York, 1992.
- [6] Priesley M.N.J., Seible F., Calvi M., "Seismic Design and Retrofit of Bridges", Wiley Interscience, New York, 1996.
- [7] "ATC40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", Applied Technology Council, California, 1996.
- [8] "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik", Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2007.
- [9] "FEMA273 NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Federal Emergency Management Agency, Washington, 1997.
- [10] "FEMA356 Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings", Federal Emergency Management Agency, Washington, 1997.
- [11] "TS500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.