

BETONARME SİSTEMLERDE DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ: PLASTİK MAFSAL KABULÜ VE ÇÖZÜMLEME

Prof. Dr. Zekai CELEP

İTÜ İnşaat Fakültesi - İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi

ÖZET

Deprem Yönetmeliği (2007) nin yayınlanmasıyla, betonarme taşıyıcı sistemlerin doğrusal olmayan davranışı ve bununla ilgili kavramlar yaygın bir şekilde kullanılır olmuştur. Daha önceden akademik çevrede kullanılan bazı kavramların uygulamadaki tasarım mühendisleri tarafından da tartışıldığı görülmektedir. Bu yazıda TS500 (2000) ve özellikle Deprem Yönetmeliği (2007) bulunan betonarme yapıların doğrusal olmayan davranışı ile ilgili kavramların toplu bir şekilde açıklanması amaçlanmıştır. Anahtar Kelimeler: Betonarme, Deprem yönetmeliği, Doğrusal olmayan davranış, Plastik mafsalsal

GİRİŞ

Betonarme yapıların tasarımında doğrusal olmayan davranışın kullanılması oldukça eskidir. Ancak, betonarme malzemesinin daha yakından tanınması ve bunun yanında bilgisayar teknolojisinin gelişerek daha ayrıntılı sayısal hesabı mümkün kılması, doğrusal olmayan davranışın daha ayrıntılı ve gerçekçi biçimde göz önüne alınmasını sağlamıştır. Özellikle yeni olarak yayınlanan Deprem Yönetmeliği (2007) bu davranışın daha yaygın olarak kullanılmasını gerektirmektedir. Daha önce sadece akademik çevrelerde tartışılan betonarme yapıların doğrusal olmayan davranışı ile ilgili bazı kavramların günümüzde

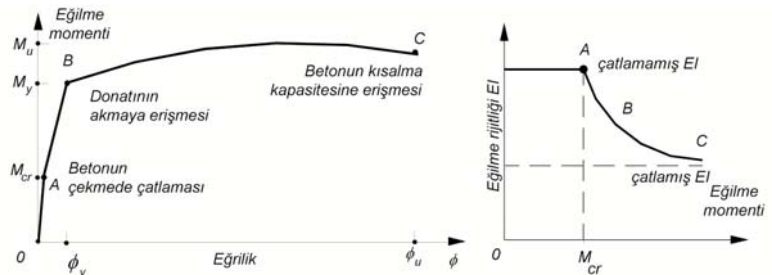
tasarım mühendisleri tarafından kullanılmaktadır. Bu yazıda bu kavramların ve doğrusal olmayan davranışı göz önüne alan yönetmelik maddelerinin basit ve toplu biçimde açıklanması amaçlanmıştır (Celep, 2007).

BETONARMEDE DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ

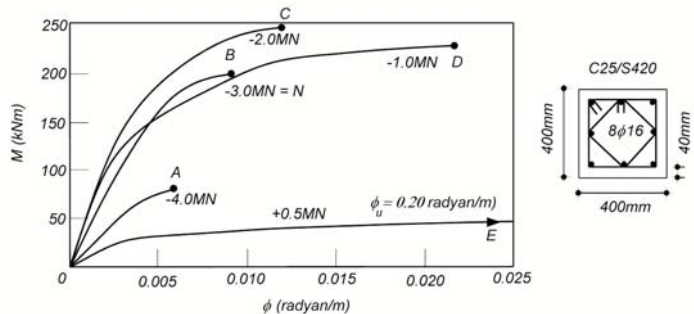
Betonarme Kesitte Eğilme Etkisi

Şekil 1’de basit eğilme altındaki bir dikdörtgen kesitteki eğilme momenti-eğrilik değişimi gösterilmiştir. Eğilme momentinin küçük değerleri için betonda basınç

ve çekme gerilmeleri meydana gelirken, donatı elastik davranır. Bütün beton kesiti davranışa etkili olduğu için donatının katkısı bu devrede sınırlı olur. Kesitin eğilme rijitliğine beton kesitinin elastiklik modülü ve brüt atalet momenti etkili olur. Momentin artmasıyla çekme bölgesindeki beton çatlak ve çatlak tarafsız eksene doğru ilerler. Betonun çatlaması moment-eğrilik değişiminde küçük de olsa ilk doğrusal davranıştan ayrılmayı doğurur. Gerçekte betonun doğrusal olmayan davranışı artan gerilmelerle yavaş yavaş belirgin duruma gelir. Eğilme momenti artarken, beton basınç gerilmeleri dağılışı doğrusal olmayan bir



Şekil 1. Betonarme kesitte eğilme momenti-eğrilik ilişkisi



Şekil 2. Normal kuvvet etkisindeki bir betonarme kesitin eğilme momenti-eğrilik bağıntısı

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 kısalma kapasitesine erişmesiyle ortaya çıkar ve kesit taşıma gücüne erişir.

Bir kesitte $M - \phi$ moment-eğrilik değişiminde yataya yakın kolun uzun olması, yani kesit güç tükenmesinin sünek olması çekme donatısının miktarına bağlıdır. Kesitin çekme donatısının dengeli donatıdan daha büyük olması durumunda donatı akmaya erişmeden beton ε_{cu} en büyük kısalmasına ve kesit de güç tükenmesine erişir. Bu durumda $M - \phi$ moment-eğrilik değişiminde belirgin yatay kol ortaya çıkmaz ve güç tükenmesi sünek değil gevrek olarak meydana gelir. Kesitin eğilme rijitliği $EI = M / \phi$ olarak tanımlanır. Başlangıçtaki eğilme rijitliğine brüt beton kesiti etkili olur. **Şekil 1**'de görüldüğü gibi, momentin artması ile çekme bölgesindeki beton çatladığı için eğilme rijitliğinde azalma görülür. Bu bölümdeki eğilme rijitliğine çekme donatısı da etkili olur. Güç tükenmesine yakın durumda $M - \phi$ değişimi yataya yakın olduğu için eğilme rijitliği çok küçüldür. Bu davranış plastik malzeme davranışına benzediği için, donatının dengeli donatıdan daha küçük olduğu sünek güç tükenmesi durumunda, kesitte plastik mafsallık kabulünün kullanılabilmesi ortaya çıkar.

Şekil 2'de değişik normal kuvvet altındaki eğilme momenti-eğrilik bağlantıları gösterilmiştir. Bu değişimde kabul edilen normal kuvvet değerleri ile momentin en

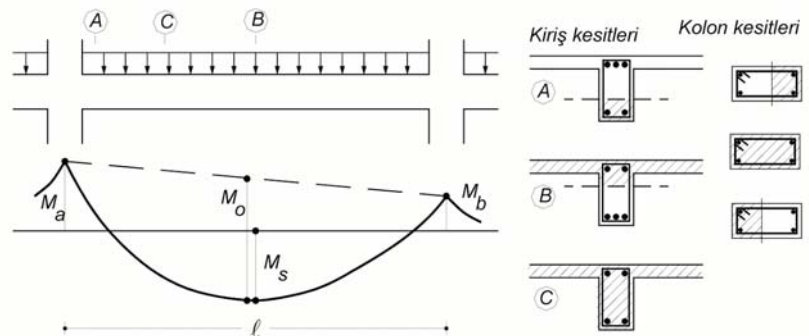
büyük değerleri karşılıklı etki diyagramında da görülebilir. Karşılıklı etki diyagramındaki $M_u - N_u$ değerleri kesit etkileri bakımından taşıma gücü sınırına erişildiğini gösterir. Bu durum sargı donatısı ile sünek duruma getirilen kesitin şekil değiştirmesi bakımından kapasitesine eriştiğini göstermez. Kesitin eğilme momenti ve normal kuvvet değerleri karşılıklı etki diyagramına eriştikten sonra taşıyıcı sisteme yapılan yükleme ile kesit moment ve normal kuvvet değerleri sabit kalabileceği gibi, karşılıklı etki diyagramı üzerinde hareket edebilir. Bu durumda sünek kesitte plastik şekil değiştirmeler meydana gelir. Bu durumda karşılıklı etki diyagramı aynı zamanda akma eğrisi olarak görülebilir ve plastik şekil değiştirme artımı vektörünün bu eğriye dik kalması gerektiği kabul edilir.

Betonarme Kesitin Eğilme Rijitliği

Betonarme taşıyıcı sistemler düşey ve yatay yükler altındaki çözümünde kesit rijitliklerine iki bakımdan ihtiyaç duyulur. Birincisi hiperstatik sistemde kesit etkilerinin elemanlardaki değişiminin bulunmasında kesitlerin birbirine göre görelî rijitlikleri kullanılır. İkincisi ise, yerdeğiştirmelerin hesabında kesit rijitliklerinin değerlerinin bilinmesi gerekir.

Genellikle betonarme taşıyıcı sistemlerde kesit rijitliklerinden eğilme rijitliği diğerlerine göre daha çok etkili olur. Betonarme kirişler döşeme ile beraber döküldüğü için, kesit eğilme rijitliklerinin hesabında tablalı kesitlerde etkili tabla genişliği için yapılacak kabul de sonucu değiştirir. Eğilme momentinin artması ile daha büyük tabla bölümünün kiriş kesiti ile etkileşime girmesi ve bu açıdan eğilme rijitliğinin artması beklenir. Eğilme momenti-eğrilik ilişkisinde momentin küçük olduğu durumda çatlama meydana gelmeyecek ve eğilme rijitliğine çatlamamış kesitin atalet momenti ve betonun elastiklik modülü etkili olur. Momentin büyümesiyle bazı kesitlerde çatlama meydana gelirken arada çatlamamış kesitler de bulunur. Çatlak kesit sayısının artması ile eğilme rijitliği düşer ve asimptotik olarak çatlamış kesit rijitliğine yaklaşır (**Şekil 1**). Küçük eğilme momentleri için çatlamamış kesit rijitliği etkili olurken, eğilme momentinin artmasıyla bu değer hızla küçülerek çatlamış kesit eğilme rijitliğine iner.

Şekil 3'de görüldüğü gibi, sürekli kirişin mesnedinde basınç bölgesi kesitin alt bölümünde olup, üstteki çekme bölgesi eğilme momentinin değerine bağlı olarak çatlamış durumda olabilir. Açıklık kesitinde ise, geniş bir basınç bölgesi üstte



Şekil 3. Sürekli kirişte ve kolonda değişik kesit durumları

ve muhtemelen çatlamış olan çekme bölgesi alttadır. Geometrik boyutlar yanında donatı miktarı ve momentin değeri de kesitin çatlayıp çatlamadığına ve tarafsız eksenin yerine etkili olur. Ayrıca, **Şekil 3'**de açıklandığı gibi, çatlamış kesitler arasında çatlamamış bölümler bulunacağı unutulmamalıdır. Mesnet ve açıklık kesitleri arasında eğilme momentinin küçük olduğu kesitlerde ise çatlama söz konusu olmayacaktır. Donatı ve eğilme momenti kiriş boyunca değiştiği için, atalet momenti, dolayısıyla eğilme rijitliğinin hesabının ne kadar karmaşık olduğu ortaya çıkar.

Süneklik

Süneklik, bir kesitin veya bir elemanın veya bir taşıyıcı sistemin, dış yükte önemli bir değişme olmaksızın, elastik sınırın ötesinde 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: $\mu = \delta_u / \delta_y$. Süneklik herhangi bir etki ve karşı gelen şekil değiştirme için tanımlanabilir.

Şekil 4'de F bir etkiyi ve δ karşı gelen şekil (veya yer) değiştirmeyi göstermektedir. F_u yükün en büyük değerine ve δ_y elastik davranışın

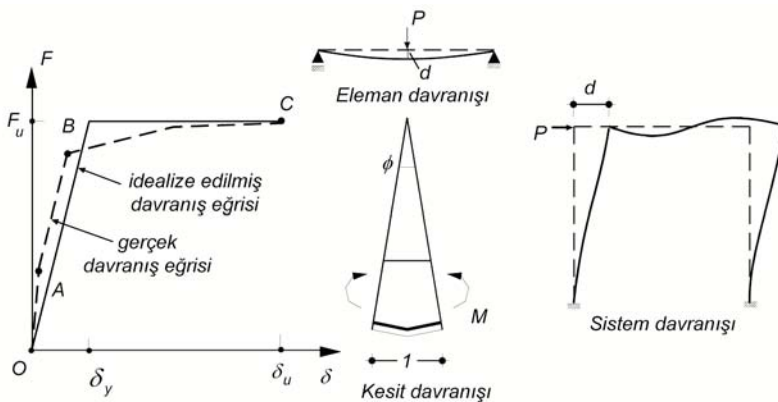
sona erdiğine akma şekil (veya yer) değiştirmesine ve δ_u maksimum şekil (veya yer) değiştirmesine karşı gelmektedir. Eğilme momenti etkisi altındaki bir kesitte karşı gelen şekil değiştirme eğrilik kabul edilerek, kesit eğrilik sünekliği tanımlanabilir. Bunun gibi ortasında yüklü bir kirişte düşey yük 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.

Seyrek meydana gelecek şiddetli deprem etkisinin, yapının elastik ötesi şekil değiştirerek karşılaması öngörülür. Böyle bir durumda ise elastik olmayan davranış önem kazanır. Yapının elastik sınırı geçip, sünerek kesit zorlarında önemli artmalar olmadan şekil değiştirme yapması beklenir. Bu yolla depremin dinamik etkisi elastik ötesi ve geri dönüşümü olmayan enerji türüne dönüştürülerek yutulmakta ve sönmelenmektedir. Elemanın yüklenmesi durumunda sünme bölgesinin uzun olması ve tekrarlı yön değiştiren yüklenme durumunda ortaya çıkan çevrimlerin geniş olması ile süneklik artar. Süneklik, güç tükenmesi sırasında elastik olmayan büyük şekil veya yerdeğiştirmelerin ortaya çıkması

olarak da görülebilir.

Bir yapı sünekse, deprem sırasında zeminden yapıya iletilen enerjinin büyük bir kısmı, elastik sınırın ötesindeki büyük genlikli titreşimlerle yapının dayanımını önemli bir kayba uğratmadan, yutulur. Süneklik sayesinde, yüklemenin aşırı artmasında akmaya ulaşan kesitlerde plastik şekil değiştirmelerle enerji alınırken, iç kuvvetlerin daha az zorlanan kesitlere dağılması sağlanır. Bu arada, sünekliğin müsaade edilen hasarla orantılı olduğu unutulmamalıdır. İyi düzenlenmiş sünek bir taşıyıcı sistemde deprem enerjisi, göçmeden uzak kalınarak kontrollü hasarlarla karşılanmış olur. Sünekliğin gereği olan plastikleşme bölgelerinin meydana gelebilmesi için sistemin yüksek mertebeden hiperstatik olması gerekir. Yapıda büyük hasarların ve toptan göçmenin önlenmesi, taşıyıcı sistemin yatay yük dayanımının büyük bir kısmını büyük elastik ötesi yerdeğiştirmelerle devam ettirebilmesi ile mümkündür. Taşıyıcı sistemin veya elemanlarının veya kullanılan malzemenin elastik ötesi davranışı ve süneklikle mümkündür. Şekil ve yer değiştirmeler artarken, dayanımının önemli bir kısmını sürdürme özelliği de süneklikle mümkündür. Sünek kavramı aynı zamanda büyük şekil ve yer değiştirme yapabilme, tekrarlı yüklemelerde enerji söndürebilme özelliğini de içerir.

Taşıyıcı sistemin sünek davranış göstermesi için kullanılan malzemelerin gerilme altındaki davranışlarının sünek olması gerekir. Betonarme kesitlerde betonun gevrek davranışı donatı kullanılarak kabul edilebilir ölçüde sünek duruma getirilebilir. Ancak, donatının katkısının düşük olduğu, normal kuvvetin etkili olduğu veya kesitte basınç gerilmelerinin meydana gelip, kesitin güç tükenmesine erişmesinde sadece



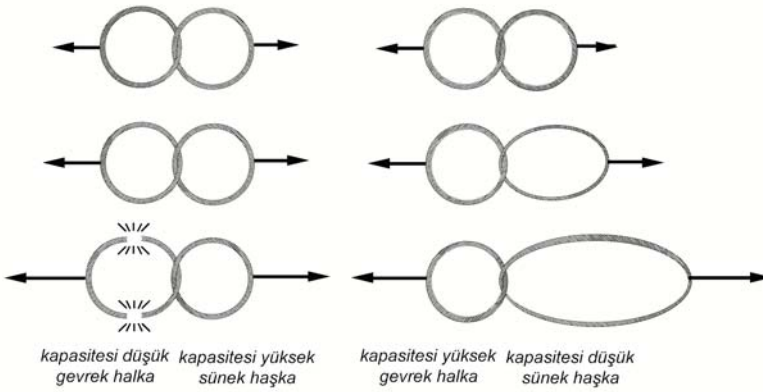
Şekil 4. Kesit, eleman ve sistem etki-şekil (yer) değiştirme ilişkisi

betonun etkili olduğu durumlarda boyuna donatının kullanılması önemli bir süneklik sağlamaz. Bu durumda basınç gerilmelerinin düşürülmesi, yani kesitin taşıyabileceği normal kuvvet değerine daha kısıtlı bir üst sınır öngörülür. Betonda sıklaştırılmış etriye düzeni ile yanal basınç oluşturarak, betonun basınç dayanımını ve özellikle en büyük birim kısalma değerini, dolayısıyla sünekliğini arttırmak mümkündür

sistemin çözülmesi 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 gözönünde tutularak muhtemel deprem etkisi öngörülür. Bu deprem etkisinin, taşıyıcı

arttırılarak, eleman beklenenin üstünde zorlandığında, güç tükenmesinin sünek olarak ortaya çıkması sağlanır.

Şekil 5'de 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 tasarımının esası yönetmeliklerde öngörülen etkilerin karşılanmasından sonra, etkilerin öngörülme bir şekilde artması durumunda güç tükenmesinin sünek olarak büyük şekil ve yerdeğiştirmelerle meydana gelmesini sağlamaktır. Bu suretle sünek olan bütün halkaların kapasitelerine erişmesi sağlanır.



Şekil 5. İki halkalı zincirin gevrek ve sünek güç tükenmesi

Betonarme elemanların eğilme momenti altında donatının akma gerilmesine erişmesi sonucu meydana gelen güç tükenmesi sünektir. Buna karşılık kesme kuvveti altında eğik çekme gerilmeleri veya eğik basınç gerilmelerinin betonda oluşturduğu güç tükenmesi gevrek olarak meydana gelir. Bunun gibi, donatı ile beton arasında aderansın sağlanmaması sonucu donatının betondan sıyırılması ile ortaya çıkan güç tükenmesi de sünek değildir.

Kapasite Tasarımı

Taşıyıcı sisteme etkiyen düşey ve deprem yüklerinin belirlenmesindeki belirsizlikler yanında malzeme dayanımındaki değişimler gözönüne alınarak, güvenlik katsayıları öngörülmüştür. Deprem etkisinin sayısal olarak kabul edilip, 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

Plastik Mafsallı Kabulü

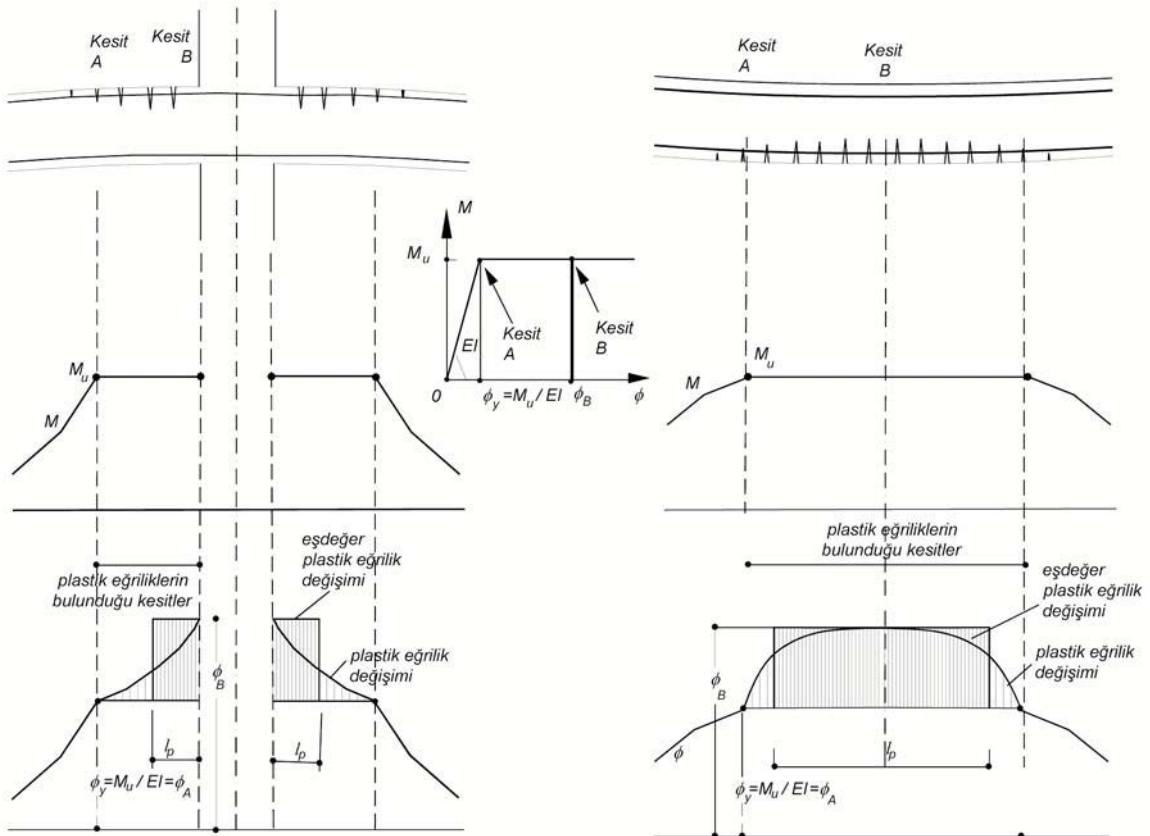
Basit eğilme etkisinde kirişlerde plastik şekil değiştirmeler kiriş eksenini boyunca değişken olarak meydana gelir. **Şekil 6**'da kirişte mesnet civarında eğilme momenti ve eğriliklerin değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, A kesitinde moment M_u değerine erişmiş ve akma eğriliği ϕ_u meydana gelmiştir. Momentin daha küçük olduğu

kesitlerde elastik eğrilik momentle orantılı olarak $\phi = M / EI$ şeklinde oluşur. Kolon yüzüne yakın kesitlerde moment aynı değerde kalırken, plastik eğrilikler meydana gelmektedir. *A* ile *B* kesiti arasındaki eğriliklerin toplamı iki kesitin birbirine göre göreceli dönmesini oluşturur ve eğrilik değişimindeki taralı alana karşılık gelir. Bu dönme elastik ve plastik bölümlerden meydana gelir. *B* kesitindeki plastik eğrilik esas alınarak taralı alana eşdeğer olarak oluşturulan dikdörtgen alanın boyu l_p plastik mafsalsal boyu olarak kabul edilir. Bu boy eşdeğer plastik eğriliklerin meydana geldiği kiriş parçası olarak da görülebilir. Kiriş mesnedinde momentin değişiminin sivrilik oluşturması bu boyun küçük olmasına sebep olur. **Şekil 6**'da kiriş açıklığında eğilme momenti ve eğrilik değişimi ve plastik mafsalsal

oluşumu gösterilmiştir. Burada moment diyagramının yumuşak bir değişim göstermesi plastik mafsalsal boyunun büyük olarak ortaya çıkmasına sebep olmuştur.

Plastik mafsalsal meydana gelebilmesi için, bu bölgedeki kesitlerin plastik eğrilik kapasitesine sahip olması gerekir. Ayrıca, bu kapasitenin kullanılabilmesi, ortaya çıkan plastik şekil değiştirmelerin kabul edilebilir seviyede kalması gerekir. Yukarıdaki açıklamalarda aynı türden gerilme oluşturan eğilme ve normal kuvvet durumunun birleştirilmesi yapıldığı halde, kesme kuvvetinden oluşan kayma gerilmelerinin etkisi göz önüne alınmamıştır. Kesitte kesme kuvvetinin bulunması (basınç normal kuvvette de olduğu gibi) ile kesit dönme kapasitesinin

azalacağı unutulmamalıdır. Kolonlarda eğilme momenti yanında normal kuvvet de etkili olur. Normal kuvvetin bulunması, moment-eğrilik bağıntısında değişikliğe sebep olur ve plastikleşmeyi gösteren yatay kolu küçültür. Bu durumda plastik mafsalsal kabulü sözkonusu olursa da, dönme kapasitesi küçük olacağı için kullanımı çok sınırlı olur. Genellikle, eğilme momenti kiriş ve kolonda kesitten kesite değişim gösterirken, normal kuvvet kolonlarda sabit değişim gösterir. Bununla beraber normal kuvvetin bulunması plastikleşme bölgesini ve dolayısıyla plastik mafsalsal boyunun artmasına sebep olur. Hatta teorik olarak normal kuvvetin etkili olduğu bir kolonda artan yükler altında da tüm eleman plastikleşeceği için, plastikleşme bölgesi çok genişler ve plastik mafsalsal kabulü geçerliliği kaybeder.



Şekil 6. Sürekli kirişte mesnet ve açıklık bölgesinde plastik eğrilik değişimi

Diğer taraftan normal kuvvetin etkili olduğu betonarme kesitlerde normal kuvvet etkisi altında normal kuvvet-birim kısalma değişiminde plastikleşme kolu çok sınırlı olduğu için, başka bir ifade ile sünek davranış sözkonusu olmadığı için, plastik mafsallı kabulü zaten geçerliliğini yitirir. Plastik mafsallı bölgelerin boyu, eğrilik-moment değişimine, eleman boyunca eğilme momentinin değişimine, kesit yüksekliğine ve kesitteki normal kuvvete bağlıdır. Deprem Yönetmeliği'nde basit olan $l_p = 0.5 h$ kabulü benimsenmiştir.

TS500 DE DOĞRUSAL OLAMAYAN DAVRANIŞ

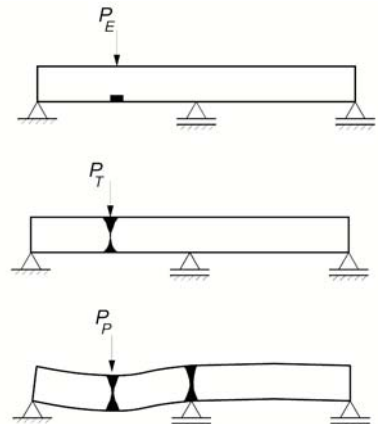
Betonarme yönetmeliklerinde betonarme yapıların tasarımda esas alınan güç tükenmesi durumları **Şekil 7**'de gelişim sırasıyla gösterilmiştir. Her bir tasarımda farklı kabuller ve sınır durumu sözkonusu olduğu için, taşıyıcı sistem farklı yük hesaplanacaktır. Birinci sınır durumu bir elemanın kesitinde beton veya donatının gerilmesinin sınır duruma erişmesi olarak tanımlanmıştır. Bu durumun betonarmenin gelişme döneminde *Mukavemet Bilgisi*'nin genelleştirilmesi olarak ortaya çıkan *Elastik Hesap Yöntemi*'ne karşı geldiği söylenebilir. İkinci sınır durumu elemanda bir kesitin güç tükenmesi durumuna gelmesi şeklinde tanımlanabilir. Bu durum esas alınarak hesaplanacak yük, TS500 ve pek çok yönetmelikte tanımlanan *Taşıma Gücü Hesap Yöntemi* ilkelerinin sonucu olarak ortaya çıkar. Eğer kritik olarak adlandırılan en çok zorlanan kesitlerde gerekli süneklik (kesit dönme kapasitesi) mevcutsa, dış yüklerin artırılması ile kritik kesitlerde plastik mafsallı ortaya çıkar ve bu işleme sistem mekanizma durumuna gelinceye kadar devam edilerek, sistemin

taşıma kapasite yükü bulunur. Uygulanan işlem *Taşıma Kapasitesi Hesap Yöntemi* ile uyuştuğu söylenebilir. Benzer şekilde sistemde düşey yükü mevcutken deprem yüküne benzer yatay yük adım adım yüklenerek *Statik İtme Çözümü* ile sistemin statik yatay yük kapasitesi bulunabilir. Yukarıdaki üç yöntemle bulunacak yük sıra ile kesitteki malzemenin (donatı veya betonun), kesitin ve taşıyıcı sistemin sınır yükü olacaktır. Bu durumlardan hareketle tanımlanacak taşıyıcı sistem güvenliği farklı olacaktır. Bulunacak sınır yükler sıra ile daha büyük olacaktır. Üçüncü yöntemde hesaplanan yük en büyük olmasına karşılık, bu durumda daha çok kesit sınır duruma erişip plastik (kalıcı) şekil değiştirmeler yapacaktır. Bu ise, betonarme kesitlerde betonun çatlaması ve donatının akmasına, yani sınırlı hasarın ortaya çıkmasına karşı gelir. **Şekil 7**'de verilen üçüncü durumda sistemin taşıma kapasitesi tam olarak ortaya çıkmaktadır. Burada hem malzemenin plastik davranışından faydalanılmakta ve hem de hiperstatik taşıyıcı sistemde kapasitesine erişen kesitlerin şekil değiştirerek daha az zorlanan kesitlerin taşıyıcılığa katılması sağlanmaktadır. TS500'de *Taşıma Gücü Hesap Yöntemi* öngörüldükçe,

yeniden dağılım ilkesi ile, sınırlı biçimde üçüncü yöntem kullanılarak taşınabilecek yükün artması sağlanır.

TS500 ve diğer betonarme yönetmeliklerinde kesit hesabında beton ve donatının elasto-plastik davranışı kullanılırken, taşıyıcı sistemin düşey ve yatay yükler altında (süperpozisyon gibi büyük bir kolaylığı sağlayan) elastik hesap yönteminin kullanılması uyuşumsuzluk olarak görülebilir. *Plastisite Teorisi*'nin bu durumla ilgili olan ana teoremi betonarme taşıyıcı sistemler için aşağıdaki şekilde ifade edilebilir: "*Bir taşıyıcı sistem verilen bir yüklemeye ait statik bakımdan kabul edilebilir bir iç kuvvet durumu esas alınarak boyutlandırılırsa, bu sistemin taşıma gücü yükü, verilen yükten daha küçük değildir.*" İşte bu sebepten, kesit etkilerinin bulunması için taşıyıcı sistem çözümünde verilen bir yüklemeye ait iç kuvvet dağılımını veren elastik hesap kabullerinin kullanılması güvenli bir çözümdür. Kullanma yükü altında taşıyıcı sistemin davranışı doğrusal elastik çözüme çok yakındır. Ancak, yüklerin artması ile taşıyıcı sistemin davranışı elastik kabullerden uzaklaşırken, iç kuvvet dağılımında da değişiklikler olur. Sistemdeki en önemli etki olan eğilme momenti

- Elastisite teorisi çözümü*
Malzeme güç tükenmesi
- Taşıma gücü çözümü*
Kesit güç tükenmesi
- Plastisite teorisi çözümü*
Sistem güç tükenmesi



Şekil 7. Betonarme taşıyıcı sistemde tasarıma esas olan sınır durum türleri

diyagramındaki değişiklik, taşıyıcı sistemin elastik ötesi şekil değiştirme yapabilmesine bağlıdır. Plastik mafsallarda yeterli dönme kapasitesi varsa, güç tükenme yükü elastik hesapla bulunandan oldukça farklı olarak mesnet ve açıklık kesitlerinin moment taşıma gücüne bağlı olarak ortaya çıkar. Ancak, burada mesnetteki plastik mafsalin dönme kapasitesinin yeterli olmaması veya ortaya çıkan plastik mafsal dönmelerinin (beton ve donatıda elastik ötesi birim kısalma ve uzamalar) kabul edilebilir sınırın üzerinde olması sistemde tam bir yeniden dağılımın ortaya çıkmasını önleyebilir. Bu nedenle moment diyagramının yeniden dağılım ilkesine uygun olarak değiştirilebilmesi ancak plastik mafsal bölgelerinde yeterli sünekliğin sağlanmasıyla ve elastoplastik şekil ve yer değiştirmelerin kabul edilebilir düzeyde olmasıyla mümkündür.

Kesitin tasarımında eğilme momenti değişiminde doğrusal elastik çözümlerin tasarımda esas alınmasıyla, kritik kesitler beraberce güç tükenmesi momentine erişme eğiliminde olacakları için, güç tükenme durumuna erişilmeden yeniden dağıtılması gereken moment azaltılmış olur. Bu suretle kritik kesitlerde gerekli olan plastik dönmeler de küçük kalır ve genellikle kontrole ihtiyaç kalmaz. Ayrıca, doğrusal çözüm kabul edilerek, kullanma yükleri altında çelik ve beton gerilmelerinin ve bunlara bağlı olarak çatlak açılmalarının en düşük değerlerde tutulması sağlanmış olur. Doğrusal elastik çözüm için yaygın ve kullanışlı hesap yöntemlerinin geliştirilmiş olması, kullanımı için ayrı bir üstünlük teşkil eder. Bu açıklamalardan, atalet momentinin giriş boyunca değişimi için yapılacak kabule dayanan hemen her çözümden sonra bir

moment dağılımı olacağı anlaşılmaktadır. Bu moment dağılımının oluşması ve kritik kesitlerin güç tükenmesi momentine erişmesi için yeterli sünekliğin sağlanmış olması gerekir. TS500 sünekliğin sağlanması şartıyla sürekli eğilme elemanlarında herhangi bir yükleme durumunda mesnetlerde bulunan negatif momentini belirli ölçüde değiştirilmesine izin vermektedir. Değiştirilmiş moment diyagramı iç ve dış kuvvetlerin dengesi sağlanacak şekilde oluşturulmalıdır. Bu ise, açıklık momentlerinin de denge koşulunu sağlayacak biçimde yeniden hesaplanmasına karşı gelir. TS500'de momentin değiştirme (azaltma veya arttırma) oranı donatı oranına bağlı olarak en fazla % 15 olarak verilmiştir. Kesitin sünekliğinin yani güç tükenmesi durumunda dönmelerinin, çekme donatısının alanı ile ters ve basınç donatısının alanı ile doğru orantılı olduğu hatırlanırsa, TS500'de verilen koşulunun nedeni anlaşılır. Ayrıca kesitte yeterli süneklik için donatının kenetlenmesinin sağlanmasının da önemli olduğu unutulmamalıdır.

DEPREM YÖNETMELİĞİ'NDE DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ

Doğrusal Olmayan Davranış

Deprem Yönetmeliği, yeni yapılacak binaların depreme dayanıklı tasarımında kuvvete dayalı yöntemler öngörmektedir. Yani deprem tanımlanan deprem etkisinden ortaya çıkan iç kuvvetlerin kesitler tarafından karşılanması sözkonusudur. Mevcut binaların değerlendirmesi ve güçlendirilmesinde ise, genel olarak bu kural çerçevesinde kalınarak yeni binalara göre daha ayrıntılı ve farklı bir yaklaşım öngörülmüştür. Bu farklı yaklaşımının yakın bir gelecekte yeni binaların tasarımında

da esas alınması muhtemeldir. Deprem Yönetmeliği'nde verilen bütün kayıtları aşağıdaki gibi üç ana bölümde toplamak mümkündür (ATC40, 1996):

- 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 depremin 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 Yüklü 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.
- Yönetmelik, taşıyıcı elemanların hasarı yanında taşıyıcı olmayan elemanların da hasarının azaltılmamış deprem yükü altında yatay yerdeğiştirmelerin sınırlandırılmasını öngörür. Bu sınırlandırma ikinci mertebeye 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.
- 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 tasarımını öne çıkarır.

Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı ve Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı

Yönetmelik tasarım depreminde, binanın taşıyıcı sisteminde yapısal elemanlarda oluşacak hasarı kabul eder ve sınırlı ve onarılabilir düzeyde kalmasını öngörür. Bu kabul, yani sınırlı hasarın kabul edilmesi taşıyıcı sistemin elastik ötesi davranışının kullanılmasına karşı gelir. Ancak, taşıyıcı sistemin düşey yükler ve deprem yükleri altında elasto-plastik kabullerle çözümünün yapılması değişik açılardan uygulaması zordur. En başta böyle bir çözümde yük birleştirmesinin (süperpozisyonun) geçerli olmayacağı için, her yüklemeye durumunun ayrı olarak çözülmesi gerekir. Bu tür bir çözümde plastik mafsallı kullanılması en basit bir yöntemdir. Ancak, bu durumda plastik mafsallı özelliklerinin belirlenmesi için, kesit geometrisi yanında donatının da önceden (daha sonra gerekirse çözümü tekrarlamak ve düzeltmek kaydı ile) tahmin edilmesi gerekir. Plastik mafsallı çözümünün en gerçekçi anlamda sadece basit eğilme durumunda geçerlidir. Kesitte basınç normal kuvvetinin bulunması, plastik mafsallı özelliklerini değiştirdiği gibi, mafsallı boyunu da uzatır. Plastik mafsallı özelliklerinin belirlenmesinde genellikle kesme kuvvetinin ve burulma momentinin etkisi göz

önüne alınmaz. İki doğrultuda eğilme momentinin bulunması ise, plastik mafsallı kabulünü daha karmaşık duruma getirir. Özellikle burulma düzensizliği bulunan yapılarda, düzensizlik arttıkça plastik mafsallı kabullerinin gerçekçiliği tartışmaya açık duruma gelir. Elasto-plastik çözüm için daha ayrıntılı malzeme parametrelerinin değerleri gereklidir. Böyle bir çözüm Eşdeğer Deprem Yüğü ve Mod Birleştirme Yöntemleri'nde olduğu gibi statik türden olabildiği gibi, Zaman Tanım Alanında Çözüm Yöntemi gibi çok daha kapsamlı olabilir. Bu sebepten 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 bağlı gibi, olduğu elemandaki iç kuvvet dağılımına ve güç tükenme durumuna bağlı olarak ortaya çıkar. Deprem Yönetmeliği *Tablo 2.5*'de verildiği gibi, bu geçiş katsayısını sadece taşıyıcı sistem türüne ve kapasite tasarım esaslarının uygulanma kapsamına bağlamıştır. Bu açıklamalar arasında önemli bir hususun vurgulanması uygundur. Eğer, binanın taşıyıcı sistemi olabildiğince düzenli ise ve malzeme ve kesit parametreleri için uygun ve gerçekçi kabuller yapılabiliyorsa, elasto-plastik çözümden daha gerçekçi sonuçlar almak ve taşıyıcı sistemin davranışını daha gerçekçi belirlenmek mümkündür. TS500'de yapılan kesit hesabı kabulleri ile tasarlanmış bir taşıyıcı sistemin güç tükenme yükü aşağıdaki sebeplerden daha fazladır:

- Kesit tasarımında beton ve donatı için f_{cd} ve f_{yd} tasarım dayanımları kullanılır. Karakteristik $f_{ck} = 1.50 f_{cd}$ ve

$f_{yk} = 1.15 f_{yd}$ dayanımlar bu değerlerden daha büyüktür. Ayrıca donatı kopma dayanımı $f_{su} = 1.20 f_{yk}$ pekleşme sebebiyle karakteristik dayanımından da daha büyüktür. Bu beton ve donatıdaki "dayanım fazlalığı" birleştirilirse, yaklaşık olarak bunun 1.5 değerinde olduğu söylenebilir.

- Elasto-plastik çözümde plastik mafsalların oluşumu ile kesitler birbiriyle yardımlaşacak ve iç kuvvet dağılımında aşırı zorlanan kesitlerde plastik dönmeler (sınırlı hasarlar) meydana gelirken, diğer kesitler devreye girer ve böylece taşıyıcı sistemin güç tükenme yükü artar. Sistemin hiperstatiklik derecesi (fazla bağ sayısı) arttıkça, güç tükenmesine daha fazla plastik mafsallı oluşumu ile erişileceği için, güç tükenme yükü büyür. Bu sebepten betonarmede izostatik taşıyıcı sistemler hemen hemen hiç kullanılmamakla beraber, izostatik sistemlerde bu tür bir güç tükenmesi yükü artması sözkonusu değildir. Bu açıklama çerçevesinde, R_a Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı'na doğrudan bağlı olan Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı R değerlerinin hiperstatiklik derecesi yüksek olan yerinde dökme betonarme taşıyıcı sistemlerde prefabrike taşıyıcı sistemlere göre daha büyük olması gerektiği anlaşılır. Yatay yük altındaki perde türünde taşıyıcı sistem elemanlarda kritik kesit mesnet olup, bir tanedir. Buna karşılık kolon ve kirişlerden oluşan çerçeve sistem incelendiğinde, kritik kesit kolon ve kirişlerin uç kesitleridir. Sayıları basit olarak kolon ve kiriş sayısının toplamının iki katı olarak kabul edilebilir. Bu açıklamadan çerçeve türünde taşıyıcı sistemlerin elastik ve elasto-plastik çözümle bulunacak

güç tükenme yüklerinin oranının daha büyük olduğu söylenebilir. Boşluklu perdelerin, boşluksuz perdelerle çerçeve sistemi arasında kaldığı kabul edilirse, deprem yükü azaltma katsayısının da arada bulunması gerektiği ortaya çıkar. Deprem Yönetmeliği *Tablo 2.5.*'de bunların yansıdığı kolayca görülebilir.

- c. Elasto-plastik davranışta yüklemeye arttıkça plastik mafsalların oluşarak güç tükenmesi yükün artması, ancak taşıyıcı sistem kesitleri ve elemanlarının sünek tasarımının yapılması şartıyla mümkündür. Kesit ve elemanlarda süneklik sağlandığında, elastik ve elasto-plastik çözümle bulunacak güç tükenme yüklerinin oranının daha büyük olduğu söylenebilir. Böylece kapasite tasarımı uygulanarak gevrek güç tükenmesi önlenecektir. Deprem Yönetmeliği süneklik düzeyi yüksek sistemlerde kapasite tasarımını öngörmektedir. Deprem Yönetmeliği'nde verilen R değerleri incelendiğinde beklendiği gibi süneklik düzeyi yüksek sistemlerde daha büyük değerler öngörülmüştür.
- d. Taşıyıcı sistemlerin elastik ve elasto-plastik çözümle bulunacak güç tükenme yüklerinin oranının Dayanım Fazlalığı Katsayısı 1.5'den büyük olması için, sistemin güç tükenmesine gelmeden yerdeğiştirme yapabilmeye gerekir. Eğer sistem çok rijitse, elasto-plastik davranış ortaya çıkmayacağı $R_a \approx 1.5$ olarak ortaya çıkar. Bu sonuç Deprem Yönetmeliği'nde (2.3) denklemi ile verilmiştir. Buna göre periyodu $0 \leq T \leq T_A$ olan rijit sistemlerde $1.5 \leq R_A \leq R$ değişimi öngörülmüştür. Burada sınırın T_A Spektrum Karakteristik Periyodu türünden verilmesi, olayın zemin ile ilgili olduğu

yorumu yapılmasından yerine, T_A 'nin küçük bir değer olarak görülmesi uygundur. Sistem rijitliği azaldıkça periyodu büyüyeceği için $R_A = R$ gibi büyük bir değer kabul edilir.

Mevcut Binaların Deprem Güvenliğinin Değerlendirilmesi

Deprem Yönetmeliği (Bölüm 7) de doğrusal olmayan davranış ve çözüm yöntemi daha ayrıntılı biçimde ortaya çıkarılmıştır. Gerçekte elasto-plastik çözüm ve değerlendirme için malzeme ve kesit parametrelerinin daha gerçekçi elde edilebilen yeni yapıların tasarımında için bu yöntemin öngörülmesi daha çok kabul edilebilir olabilirdi. Ancak, yurdumuzda en önemli sorunlardan birisi mevcut yapıların deprem güvenliklerinin olabildiğince gerçekçi belirlenmesi ve uygun müdahalelerin yapılması önemli olduğu için, doğrusal olmayan çözüm yöntemlerinin ayrıntılı biçimde mevcut binaların değerlendirilmesi bölümünde verilmiştir. Yönetmelikte yapılacak en yakın değişiklikte de bu doğrusal olmayan yöntemlerin yeni yapı tasarımına (Deprem Yönetmeliği Bölüm 2) da daha ayrıntılı biçimde yansması muhtemeldir. Ayrıca yönetmeliğin bu bölümü güçlendirilecek binalar için de kullanılabilir (Aydinoğlu vd., 2007; Celep ve Kumbasar, 2004, Priesley vd., 1996).

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. Performans kavramına dayalı tasarım, klasik tasarımın genişletilmesi olarak

tespit edilebilir. Deprem yönetmeliklerinin oluşumu incelenirse, daha önce de performans kavramının tanımlandığı 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 tanımlanarak kabul edilmiştir.

Deprem Yönetmeliği'nde mevcut binaların performansa dayalı değerlendirmesinin, yakın bir gelecekte performansa dayalı tasarım olarak yeni binalara da genişletileceği söylenebilir. Mevcut durumda bina önem katsayısı $I = 1$ olan binaların depreme dayanıklı bina tasarımının "Can Güvenliği" olarak tanımlanan performans seviyesi esas alınarak yapıldığı kabul edilebilir. Deprem yönetmeliğinde tanımlanan sınır durumlar ile bina için performans seviyesi tanımlanır. Performansa dayalı değerlendirmede, binada değişik deprem etkilerinde değişik performans seviyesinin incelenmesi söz konusu olabilir.

Değerlendirilecek veya güçlendirildikten sonra yeterliliğine karar verilecek binalar ile ilgili deprem performansı belirleme çalışmaları düşey yüklerin ve deprem etkilerinin birleşik etkileri 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. Taşıyıcı sistem elemanlarının hasar durumu, bu elemanın depremde en çok zorlandığı kabul edilen ve doğrusal olmayan şekil değiştirmenin ortaya çıkması beklenen kesitlerin hasar durumları değerlendirilerek tanımlanır. Farklı yöntemlerin yönetmelikte bulunması, bir uygulama zenginliği olarak görülebilir. Bu yöntemlerin kabul ve çözüm işlemleri birbirinden farklı olduğu için, matematiksel aynı sonuçların elde edilmesi beklenmez. Ancak, uygulama açısından ve yasal sorunların çıkmaması bakımından sonuçların birbirinden çok farklı çıkmaması beklenir. Böylece Deprem Yönetmeliği'nde değişik açılardan taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan davranışını göz önüne alan üç yöntem bulunmaktadır. Bunlar (a) yeni binalar için öngörülen tasarım yöntemi, mevcut binalar için öngörülen (b) doğrusal olan ve (c) doğrusal olmayan değerlendirme yöntemleri olarak verilebilir. Hatta doğrusal olmayan yöntem çerçevesinde verilen (d) Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi, kabulleri farklı olması bakımından, ayrı bir dördüncü bir yöntem olarak kabul edilebilir. İlk üç yöntemin ayrıca, tek modlu ve çok modlu uygulaması sözkonusudur. Yönetmelikte ayrıntısı verilen yöntemlerde taşıyıcı sistem periyot, kesit etkilerinin ve yerdeğiştirmelerinin hesapları çatlama kesit eğilme rijitlikleri esas alınarak yapılır. Burada $(EI)_o$ nın çatlama kesitin eğilme rijitliği olduğu verilmiştir. Bu suretle daha gerçekçi bir yaklaşım sözkonusu olmaktadır. Doğrusal elastik yöntemde görel kat ötelemeleri taşıyıcı sistemde taşıyıcı olmayan elemanların hasarını sınırlı tutmak için sınırlandırılır. Buna karşılık doğrusal elastik olmayan yöntemde beton ve donatının birim uzamaları

doğrudan sınırlandırıldığı için, ayrıca görel kat ötelemesi kontrolüne ihtiyaç duyulmaz. Eğilme rijitliklerinin kolon ve kirişlerde aynı ölçüde azaltılması kesit etkilerinin elemanlarda dağılımını değiştirmez sadece yerdeğiştirmelerin aynı oranda artmasına sebep olur. Yönetmelikte eğilme rijitliğinin azaltılması kolonlarda normal kuvvet etkisi sebebiyle kirişlere göre daha azdır. Bu durumda kiriş ve kolonların brüt atalet momenti ile yapılan çözüme göre, kolonlar daha rijit olarak görülecektir. Düşey yüklerde kiriş mesnet momenti artarken, açıklık momenti azalır. Yatay yüklerde etkisinde ise, kolonların kirişlerle bağlantısı daha hafifleyecektir. Yatay yük etkisi altında yerdeğiştirmeler yaklaşık olarak $1.25 (\approx 1/0.80) \sim 2.50 (\approx 1/0.40)$ çözümde brüt kesit kullanımına göre artar. Bunun gibi eğilme rijitliği değişimi sistemin periyodunu $1.12 (\approx \sqrt{1.25}) \sim 1.58 (\approx \sqrt{2.50})$ katı arasında arttırır. Bu ise, spektrum eğrisinin düşen kolu üzerinde bulunulması durumunda deprem yükünün azalmasına sebep olur. Sonuç olarak spektrum eğrisinin düz kolu üzerinde deprem kuvveti değişmezken, yerdeğiştirmeler $1.25 \sim 2.50$ oranı ile artar. Buna karşılık spektrum eğrisinin azalan kolunda deprem kuvveti $0.91 (\approx 1/1.12^{0.8}) \sim 0.69 (\approx 1/1.58^{0.8})$ oranı ile azalırken, yerdeğiştirmeler $1.14 (\approx 1.25 \times 0.91) \sim 1.73 (\approx 2.50 \times 0.89)$ oranı ile artar. Çatlama kesit rijitliğinin göz önüne alınmasının daha gerçekçi olduğu için muhtemelen bu kavramın yeni tasarımı yapılan binalara da yaygınlaşarak kullanılacağı beklenebilir. Deprem Yönetmeliği'nde doğrusal elastik olan ve olmayan olmak üzere iki tür değerlendirme yöntemi öngörülmüştür. (FEMA273, 1997; FEMA356, 1997)

Doğrusal Elastik Değerlendirme Yöntemi

Burada doğrusal olan yöntemin taşıyıcı sistemin davranışı anlamında "doğrusal" olduğunu kabul etmek uygun değildir. Yeni tasarımı yapılacak binalarda, doğrusal olmayan davranışla oluşacak yatay yük kapasite artımı tüm bina için öngörülen Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı R ve ona bağlı kullanılan Deprem Yükü Azaltma Katsayısı R_a ile gözönüne alınmaktadır. Mevcut binaların değerlendirilmesinde kullanılan Doğrusal Elastik Değerlendirme Yöntemi'nde her eleman için göz önüne alınan *Etki/Kapasite Oranı* r katsayısı ile doğrusal olmayan davranışla oluşacak yatay yük kapasite artımı göz önüne alınmaktadır. Diğer bir ifade ile, çözüm işlemi doğrusal olmakla beraber bu yöntemde de taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan davranışı göz önüne alınır. Bu yöntem (eğilme momentinin kritik olduğu elemanlar) sünek olan elemanlarda uygulanır. Kolon, kiriş ve perdelerin sünek eleman olarak sayılabilmeleri için bu elemanlarda eğilme kapasitesi ile uyumlu olarak hesaplanan kesme kuvvetinin bilgi düzeyi ile uyumlu mevcut malzeme dayanımı değerleri kullanılarak TS500'e göre hesaplanan kesme kapasitesini aşmaması gereklidir. Kolon, kiriş ve perdelerde eğilme momenti ile uyumlu kesme kuvvetinin hesabında taşıma gücü momentleri kullanılır. Bu yöntem yeni binaların tasarımın kullanılan yöntemin mevcut binalara genişletilmiş olarak kabul edilebilir. Yeni tasarımda olduğu gibi bu yöntemde kesit ve elemanların dayanımları esas alınır. Bu amaçla taşıyıcı sistem ayrı ayrı her iki doğrultuda elastik (azaltılmamış $R_a = 1$) deprem yükü yüklenir. Bu işlem eşdeğer deprem yükü yönteminde azaltılmış deprem yükü statik etki olarak ortaya çıkar. Mod

birleştirme yönteminde ise, deprem etkisini tanımlayan spektrum eğrinin azaltılmaması şeklinde yapılabilir. Deprem etkisinde zorlanan kiriş, kolon ve perde kesitlerinde 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 kesitlerin M_K eğilme momenti ve N_K normal kuvvet kapasiteleri hesap edilir. Bu kapasite momentinden (veya normal kuvvetinden) düşey yüklerin talep ettiği değer çıkarılarak deprem etkisinin karşılanmasına kalan *Artık Kapasite*

$$M_A = M_K - M_D = M_K - M_{G+Q} \quad (1)$$

$$N_A = N_K - N_D = N_K - N_{G+Q}$$

ve deprem etkisi için $r = \text{Deprem etkisi} / \text{Deprem etkisine kalan kapasite}$ olmak üzere

$$r = \frac{M_E}{M_A} = \frac{M_E}{M_K - M_A} = \frac{M_E}{M_K - M_{G+Q}}$$

$$r = \frac{N_E}{N_A} = \frac{N_E}{N_K - N_A} = \frac{N_E}{N_K - N_{G+Q}} \quad (2)$$

değeri hesaplanır. Burada azaltılmamış (elastik) deprem yükünün mevcut kapasite ile karşılanması sözkonusu olsaydı $r \leq 1$ olması gerekirdi. Bu durumda elemanlarda hemen hemen hiç hasar beklenmezdi. Ancak, deprem etkisinin elastik ötesi davranış karşılanması ve sınırlı hasara izin verilmesi sözkonusu olduğu için doğrudan süneklığe bağlı olan r 'nin sınır değeri birden büyük olarak, (a) kesitte kabul edilecek hasar seviyesine, (b) sünekliliği olumsuz etkileyen kesme kuvveti ve normal kuvvetin değerlerine ve (c) sünekliliği olumlu etkileyen sargı donatısının yönetmelikte öngörülen düzeyde bulunmasına bağlı olarak verilen Kiriş, kolon ve perdeler için verilen

bu sınır değerlerin bu üç parametreye bağlılığı yönetmelikte kolayca görülebilir. Sonuç olarak belirli bir hasar bölgesinin aşılmaması için $r \leq r_s$ sağlanması gerektiği ortaya çıkar. Bu eşitsizliğin sağlanamaması, göz önüne alınan depremde ilgili kesitte öngörülen hasar sınırının aşıldığına işaret eder.

Kesitin sadece elastik davranışla öngörülen deprem etkisinin karşılanması söz konusu olsaydı, $r \leq r_{s\text{mnr}} = 1$ olması beklenirdi. Bu çözüm ekonomik olmadığı için $r \leq r_{s\text{mnr}}$ sözkonusu olur ve burada $r_{s\text{mnr}} \geq 1$ seçilir. Bu sınır değerleri kabullenebilecek hasar seviyesine ve kesitte sünekliliği etkileyecek diğer kabullere bağlı olarak ortaya çıkar. Bulunan r değerleri ilgili eleman için verilen $r_{s\text{mnr}}$ değerleri ile karşılaştırılarak kesit, bu sonuçlardan eleman ve kat hasar bölgeleri ve sonuç olarak taşıyıcı sistem performans durumu belirlenir. Son ifade biraz değiştirilirse yazılırsa, kullanılan ifadenin yeni tasarımı yapılan binalar için deprem etkisi durumunda tasarım denklemine benzediği görülür:

$$M_{G+Q} + \frac{M_E}{r_s} \leq M_K \quad (3)$$

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

Denklemlerde $M_K = M_r$ kesit kapasitesine ve R_a tasarımın başında R Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı'na bağlı olarak ortaya çıkan Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı'na karşı gelmektedir. Değerlendirme de kullanılan r_s sınır değer R_a ile eşleştiği görülür. Bilindiği gibi, yeni tasarımda bina önem katsayısı 1 olan yapılarda deprem etkisinde "Can Güvenliği Performans Düzeyi" hedeflenir ve süneklilik düzeyi yüksek çerçeve türü yapılarda $R = 8$ ve $R_a \approx R = 8$ kabul edilir. Gerçekte de Deprem Yönetmeliği'nde verilen *Tablo 7.3.*'de kesme kuvvetinin düşük

değerleri ve sargılamanın olduğu durumda kirişler için Güvenlik Sınırı için verilen $r_s = 7$ değerinin belirli yaklaşımla $R_a = 8$ ile uyduğu görülebilir. İşte bu benzeşime dayanarak doğrusal elastik yöntem olanı, yeni binaların tasarımında kullanılan yöntemin genişletilmiş olarak görülebilir.

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

Doğrusal elastik 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. Bu özellikle mevcut binalar için bazen aşılması zor olan belirsizlikler ortaya çıkarabilir. Ayrıca, doğrusal elastik çözüm yapan mevcut çözüm programları kullanılamaz ve çok daha ayrıntılı çözüm tekniklerini içeren programlara ihtiyaç duyulur. Doğrusal yöntemde olduğundan

daha fazla; çözüm, taşıyıcı sistemin düzensizliğinden etkilenir. Tahmin edileceği gibi, elde edilecek sonuç ne kadar çok kabul ortaya çıkıyorsa, güvenilirliği de o oranda daha az olacaktır. Bu yöntemin esasını oluşturan statik itme analizi olarak ifade edilen bu çözümün, doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçları ile önemli derecede farklılık gösterdiği bilinmektedir (Paulay ve Priesley, 1992). Şekil değiştirme ve yer değiştirme esaslı değerlendirmenin göz önüne alındığı bu yöntemde, belirli bir yatay deprem yükü dağılımı için binadaki yer değiştirme talebine ulaşıldığında, binanın beklenen performans hedefinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Artımsal eşdeğer deprem yükü yöntem birinci modun etkili olduğu düşük katlı binalarda ve binada burulma düzensizliğinin sınırlı olduğu durumda yeterli yaklaşım sağlar. Yöntem, taşıyıcı sistemin yatay kapasitesi ile deprem etkisi talebinin buluşturularak, depremleri duruma karşı gelen performans durumunun belirlenmesi olup, dört adımdan ibaret kabul edilebilir: a) kapasite eğrisinin belirlenmesi, b) deprem etkisinin talep eğrisinin belirlenmesi, c) iki eğrinin kesiştirilerek taşıyıcı sistemde dengenin olduğu bina performans durumunun belirlenmesi, d) performans durumunda iç kuvvetler ve şekil değiştirme durumunun incelenerek sağlanan performans durumunun hedeflenen uygun olup olmadığının tespiti. Statik itme çözümünün adımlarında elemanların güç tükenmesi durumlarının kontrolü gerekir. Eğer bu güç tükenmesi gevrek ise, örneğin elde edilen kesme kuvveti mevcut donatı ile karşılanmıyorsa, sistemin bu itme adımına ulaşmadan gücünün tükeneceğine karar verilir. Geri dönerek kesit etkilerinin dayanımlarla karşılaştırılmasıyla, ulaşılacak itme adımı bulunur. Bu adım eğer

depremin talep yer değiştirmesinden küçük kalıyorsa, deprem etkisi karşılanamıyor demektir. Kesitte bulunan normal kuvvet ve eğilme momenti belirli olduğuna göre bu değerler kullanılarak kesitteki şekil değiştirme durumu (betonun en büyük kısalması ve donatının en büyük uzaması) hesap edilebilir. Bu değerler yönetmelikte performans durumlarına ait sınır değerlerle karşılaştırılarak kesitin bulunduğu hasar durumu elde edilir. Bu adımdan sonra doğrusal elastik yöntemde olduğu gibi, kesitlerden elemanlara ve katlara geçilerek binanın performans durumu belirlenir. Doğrusal elastik olmayan değerlendirme yönteminde kesitteki betonun birim kısalması ve donatının birim uzama ve kısalması, yani şekil değiştirmesi esas alınarak, $\epsilon_c \leq \epsilon_{c \text{ sınır}}$ ve $|\epsilon_s| \leq \epsilon_{s \text{ sınır}}$ olarak tanımlanmıştır. Sınır değerler elastik sınırın üzerinde olup, elasto-plastik davranışı beklenir. Burada da bu sınır değerleri kabul edilecek hasar seviyesine bağlıdır. Yönetmelikte verilen tablo incelendiğinde hasar sınırının ilerlemesiyle donatıda daha büyük şekil değiştirmelere müsaade edildiği görülmektedir. Betonda minimum hasar sınırında en dış betondaki ϵ_{cu} birim kısalma esas alınırken, güvenlik ve göçme sınırında enine donatı içinde kalan betonun ϵ_{cg} birim kısalma esas alınır.

SONUÇ

Yukarıdaki açıklamaların çerçevesinde aşağıdaki tespitler yapılabilir:

- Betonarme taşıyıcı sistemlerin doğrusal olmayan davranışı uzun zamandır yönetmeliklerde değişik seviyelerde bulunmaktadır.
- Doğrusal olmayan davranışın göz önüne alınması daha gerçekçi davranış ve kapasite hesabını mümkün kılar ve taşıyıcı sistemin kuvvetli ve zayıf taraflarını belirlemek mümkün olur.

c. Doğrusal davranışın göz önüne alınması ile kapasite daha yüksek bulunduğu belirlenebilmektedir.

d. Doğrusal davranışın belirlenmesinde malzeme değerlerinin ve davranış eğrilerinin daha gerçekçi belirlenmesi önemlidir. Daha ileri hesap için daha gerçekçi kabullerle ihtiyaç vardır. Bu sebepten mevcut yapıların doğrusal davranışı yerine, tasarımda doğrusal davranışın kullanılması daha gerçekçi görülebilir.

e. Doğrusal olmayan hesap günümüzde ancak belirli yazılımlarla yapılabilmektedir. Bu sebepten uygulayıcıların bu hesap yöntemlerine ait ayrıntılı kabullerden çok ana kabulleri bilmeleri önemlidir. Mevcut kabuller ve yazılımlar günümüzde düzenli yapılar için daha anlamlı sonuçlar vermektedir.

KAYNAKLAR

- **Aydinoğlu N, Celep Z, Özer E, Sucuoğlu H** (2007) *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik - Örnekler Kitabı*, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı
- **Celep Z, Kumbasar N** (2004) *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı* (Bölüm 11: Performans kavramına dayalı tasarım), Beta Yayıncılık, İstanbul
- **Celep Z** (2007) *Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal olmayan Davranış ve Çözümleme*, Beta Yayıncılık, İstanbul
- **Paulay T, Priesley , MJN.** (1992) *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley, New York
- **Priesley MNJ, Seible F, Calvi M** (1996) *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, Wiley Interscience, New York
- **ATC40** (1996) *Seismic Evaluation And Retrofit Of Concrete Buildings*, Applied Technology Council, California
- **Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik** (2007) Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara
- **FEMA273** (1997) *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington
- **FEMA356** (1997) *Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington
- **TS500** (2000) *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara