

2007 DEPREM YÖNETMELİĞİ PERFORMANS ESASLI HESAP YÖNTEMLERİNİN KARŞILIKLI DEĞERLENDİRMESİ

Haluk SUCUOĞLU*

GİRİŞ

2007 yılında yayınlanarak yürürlüğe giren Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, özellikle mevcut binaları değerlendirme ve güçlendirme konusunda getirdiği performans yaklaşımı ile ülkemizde deprem mühendisliği uygulamalarında önemli bir açılım yapmıştır. Gelecek yıllarda inşaat mühendisliği eğitimi ve deprem mühendisliği araştırmaları üzerinde önemli etkisi olacaktır. Bununla birlikte yeni yönetmelikle uygulama yaşamımıza giren performans esaslı deprem mühendisliğinin anlaşılması ve yerleşmesi zaman alacaktır.

Bu yazının amacı yeni deprem yönetmeliğinde yer alan performans esaslı hesap yöntemlerini değerlendirmek, bu yöntemlerde içerilen temel kavramlar irdelenmek, yöntemlerin uygulanmasındaki zorluklar ve zayıf yönleri tartışmak ve gelişmesine katkıda bulunmaktır.

2007 DEPREM YÖNETMELİĞİNDEKİ YENİLİKLER

2007 Deprem Yönetmeliği'nde 1998 yönetmeliğine göre önemli yenilikler getirilmiştir. Bu yeniliklerin bir kısmı 1998 yönetmeliğinin içerdiği bölümlerin yeniden düzenlenmesi olmakla birlikte en önemli yenilik şüphesiz 2007 yönetmeliğine "Mevcut Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi" bölümünün eklenmesi olmuştur.

1998 Deprem Yönetmeliği depremin yanısıra sel, çığ ve kaya düşmesi gibi diğer doğal afetleri de kapsamaktaydı. Ancak bu afetlerle ilgili hükümler son derece kısıtlı olarak yer almaktaydı ve yönetmeliğin çok büyük bölümü depreme karşı yapı tasarımını kapsamaktaydı. Esasında sel, çığ ve kaya düşmesi gibi doğal afetlere yapı tasarımı ile önlem almak mümkün değildir. Bu tür "sakın-

calı alanlar" gerekli hidrolojik ve jeolojik etüdlerle belirlenir ve bu alanlara yapı yapılması planlama önlemleri ile engellenir. Deprem dışındaki diğer doğal afetler ile ilgili yapılaşma hükümleri 2007 Yönetmeliğinden çıkarılarak İmar Kanunu'nun ilgili yönetmeliklerine gönderilmiş ve 2007 Yönetmeliği "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik" adını alarak gerçek kimliğine ve kapsamına sahip olmuştur.

Diğer iki önemli yenilik ise ahşap ve kerpiç binaların deprem yönetmeliği kapsamında çıkarılmasıdır. 1998 Yönetmeliğinde yer aldığı şekliyle gerek ahşap, gerekse kerpiç binalar ile ilgili bölümler teknikerlik düzeyinde, oldukça ilkel bir mühendislik yaklaşımı seğilemekteydi. Hâlbuki özellikle ahşap yapıların depreme dayanıklı tasarımı orman ürünlerinin yoğun olarak kullanıldığı Kuzey Amerika ve Avrupa'da oldukça gelişmiş bir konudur. Ahşap yapıların tasarımı ile ilgili kapsamlı bir Avrupa Yönetmeliği de bulunmaktadır (Eurocode 5: Design of Timber Structures). Ülkemizde ahşap yapı standardı olan TS-647'nin Eurocode 5 kapsamında tekrar hazırlanıp yürürlüğe girmesine kadar ahşap yapıların deprem yönetmeliğinde yer almasının ertelenmesi şimdilik en uygun çözüm olarak düşünülmüştür. Diğer yandan kerpiç yapıları bir mühendislik yapısı olarak değerlendirmek güçtür. Kerpiç yapılar özel (kırsal) bir yığma yapı türü olarak düşünülebilir. 2007 Deprem Yönetmeliğinde kapsamlı olarak revize edilen ve boyut kontrolü yanısıra gerilme kontrollerinin de yer aldığı yığma binalar bölümünün gerekli veriler sağlandığında kerpiç binalar için de geçerli olacağı kabul edilmiştir.

Kapsamlı olarak revize edilen bir diğer bölüm çelik binaların deprem tasarımıdır. 2007 Yönetmeliğinin 4. Bölümü yük ve dayanım faktörleri tasarımı (LRFD) yaklaşımını göz önüne alarak tekrar düzenlenmiştir. Ancak benzer düzenlemenin TS-648 için de yapılması gereklidir.

1998 yönetmeliğinin yenilenmesinin temel amacı,

(*) Prof. Dr., Deprem Yönetmeliği Komisyonu Üyesi
ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara

1998 yönetmeliği koşullarına uygun olarak yapılmamış mevcut binaların gelecekte maruz kalacakları deprem etkileri altında sergileyecekleri performansın değerlendirilmesi ve deprem dayanımı yeterli olmayan binaların güçlendirilmesi için gerekli olan kuralların tanımlanmasıdır. 2007 Deprem Yönetmeliği'nin 7. Bölümü bu amaçla hazırlanmıştır.

MEVCUT BİNALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE GÜÇLENDİRİLMESİ: GENEL İLKELER VE ESASLAR

Ülkemizde depremlerin büyük hasarlara neden olmasının en önemli nedeni, binaların hangi yılda yapılmış olurlarsa olsun deprem etkileri dikkate alınmadan tasarlanmış ve yapılmış olmalarıdır. Mevcut binalarımızın neredeyse tamamı gerekli deprem dayanımına sahip değildir. Bu nedenle gelecekte meydana gelecek ve yerleşim bölgelerini etkileyecek depremlerde deprem zararlarının azaltılması için öncelikle mevcut binaların deprem performanslarının belirlenmesi gereklidir. Özellikle yıkılma veya ağır hasar görme riski yüksek olan binaların güçlendirilmesi, eğer güçlendirme işlemi ekonomik olarak verimli değilse de yıkılarak yeniden yapılması depremde en etkili zarar azaltma önlemidir.

Binaların deprem performansı yeni bir kavramdır. Deprem performansı, *"belirli bir deprem etkisi altında bir binada oluşabilecek hasarların düzeyi ve dağılımına bağlı olarak belirlenen yapı güvenliği durumu"* olarak tanımlanabilir.

Deprem hasarları kiriş, kolon, perde ve birleşim bölgesi gibi elemanlarda meydana gelir. Eleman hasarlarının değerlendirilmesinde öncelikle hasarın incelenen elemanın sünek ya da gevrek davranışından kaynaklandığının belirlenmesi gereklidir. Gevrek olarak hasar gören elemanlar (kesme kırılması) göçmüş kabul edilir. Sünek olarak hasar gören elemanların hasarları ise hesaplanan iç kuvvet veya şekildeğiştirme düzeylerine göre minimum hasar, belirgin hasar, ileri hasar veya göçme olarak derecelendirilir. Daha sonra binanın her katındaki hasarlı elemanların hasar dereceleri, sayıları ve dağılımları göz önüne alınarak binanın deprem performansı belirlenir. Bina deprem performansının belirlenmesi için dört ayrı performans düzeyi tanımlanmıştır. *Hemen Kullanım* performans düzeyini sağlayan binaların göz önüne alınan depreme maruz kalması halinde depremden hemen sonra kullanılabilir durumda olduğu kabul edilmektedir. *Can Güvenliği* performans düzeyini sağlayan binalar göz önüne alınan deprem etkisi altında muhtemelen belirgin derecede hasar göreceklerdir.

Ancak bu hasarlar deprem sırasında binada bulunanların can güvenliği için tehdit oluşturmayacaktır. Diğer yandan binada oluşması beklenen eleman hasarları ağırlıklı olarak ileri hasar derecesinde ise, ancak binada topyekün göçme oluşmuyorsa, bina *Göçme Öncesi* performans düzeyinde kabul edilir. Eğer göz önüne alınan deprem etkisi altında bu performans düzeyi de sağlanamıyorsa binanın *Göçme Durumu*'nda olduğuna karar verilir.

Mevcut bir binanın deprem performansının belirlenebilmesi için öncelikle binanın yapılmış olan durumunun yeterli ölçüde bilinmesi gereklidir. Bu amaçla mevcut binalardan toplanacak yapısal sistem özellikleri, boyutlar, malzeme ve detaylarla ilgili bilgilerin kapsamı Yönetmelikte ayrıntılı olarak belirtilmiştir. Daha sonra bu bilgiler kullanılarak binanın yapısal modeli oluşturulur ve deprem etkileri altında elemanlarda meydana gelecek iç kuvvetler ve şekildeğiştirmeler hesaplanır.

Mevcut binaların deprem hesabında uyulan genel ilkeler ve kurallar ile yeni binaların deprem hesabında uyulan genel ilkeler ve kurallar arasında bazı önemli farklar vardır. Bunların başlıcaları aşağıda özetlenmiştir.

- Deprem yüklerinin tanımında yüklerin azaltılması amacıyla taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R katsayısı) uygulanmaz.
- Malzemelerin tasarım dayanımı yerine, yerinde incelemelerle belirlenen mevcut dayanımları göz önüne alınır.
- Kat ağırlıkları kat kütleleri ile uyumlu olmalıdır.
- Kat kütleleri her katın kütle ağırlık merkezinde tanımlanır. Deprem kuvvetlerinin etkime noktalarının tanımında ayrıca ek dışmerkezlik uygulanmaz.
- Betonarme elemanların modellenmesinde çatlamış kesit özellikleri kullanılır.

2007 yönetmeliğinde deprem hesabı ve performans değerlendirmesi için binaların doğrusal elastik ve doğrusal olmayan davranış kabullerine dayalı, birbirinden oldukça farklı iki yöntem tanımlanmıştır. İki yöntem karşılıklı olarak değerlendirilmesi izleyen bölümlerde sunulmaktadır. Bu değerlendirmelerde performans değerlendirme yöntemlerinin esasını oluşturan temel kavramlar üzerinde durulacak ve yazar tarafından özellikle yöntemlerin zayıf bulunan yönleri irdelenecektir.

DOĞRUSAL ELASTİK HESAP YÖNTEMLERİ

Yukarıdaki bölümde belirtilen farklılıklar dışında, iç kuvvetlerin ve şekildeğiştirmelerin hesaplanması

için kullanılan hesap yöntemleri Yönetmeliğin 2. bölümünde yeni binalar için verilen hesap yöntemleri ile yaklaşık olarak aynıdır. Tek önemli fark, kat sayısı 8'i aşmayan ve burulma düzensizliği bulunmayan binalara uygulanabilen eşdeğer deprem yükü yönteminde taban kesme kuvvetinin hesabıdır:

$$V_t = \lambda W A(T_1) \quad (1)$$

Denklem (1)'de λ katsayısı, üç ve daha çok katlı binalarda 0.85 alınmaktadır. Bunun nedeni birinci titreşim modunun hâkim olduğu bu tür binalarda birinci moda ait etkin kütlelerin genel olarak bina ağırlığının %85'ini geçmemesidir.

Deprem Yönetmeliğinin 7. Bölümündeki doğrusal elastik hesap yöntemlerinin Yönetmeliğin 2. Bölümündeki doğrusal elastik hesap yöntemlerinden temel farkı performans değerlendirmesindedir. Bu fark aşağıdaki bölümlerde irdelenecektir.

Yeni Binaların Performans Değerlendirmesi

Yeni binaların tasarımında doğrusal elastik davranış kabulü ile hesaplanan (azaltılmamış) deprem kuvvetleri, tasarlanan yapının elastik ötesi süneklik ve fazla dayanım (tasarım dayanımına göre) özellikleri göz önüne alınarak seçilen deprem yükü azaltma katsayısına (R_a) bölünmesi ile azaltılır. Bu azaltma, binanın kapasite tasarımı ilkelerine uygun olarak tasarlandığında deprem etkileri altında hiçbir elemanda gevrek kırılma olmayacağı ve tüm elemanların benzer süneklik ve fazla dayanım özelliklerine sahip olacağı varsayımına dayanır. Azaltılmış deprem kuvvetleri altında hesaplanan iç kuvvetler, düşey yüklerden kaynaklanan iç kuvvetlerle birleştirilerek elemanların tasarım kuvvetleri belirlenir.

Depremden kaynaklanan tüm iç kuvvetlerin aynı yük azaltma faktörü ile azaltılmasının gerekçesi, binanın deprem sırasında tek dereceli bir sistem gibi davranacağı varsayımdır. Özellikle birden fazla titreşim modunun hesaba katıldığı mod birleştirme yönteminde bu kabul doğru değildir, sadece pratik bir yaklaşıklık sağlar. Esasında bu durumda her mod için ayrı bir R_a katsayısı tanımlamak gereklidir.

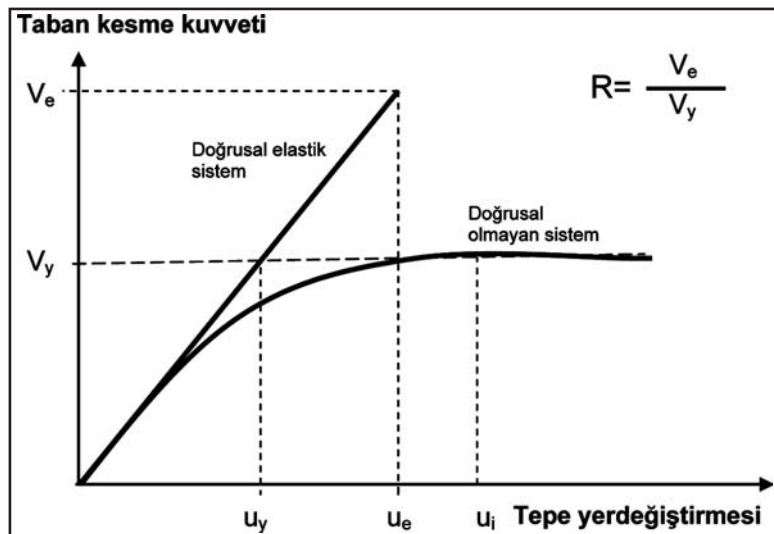
Kapasite tasarımı ilkelerine göre tasarlanan bir binanın deprem etkisi altında tek dereceli bir sistem gibi davranacağını ve dayanım faz-

lası olmadığını, yani binanın gerçekleşen dayanımının tasarım dayanımına tam tamına eşit olduğunu kabul edelim. Bu durumda binanın doğrusal elastik ve doğrusal olmayan deprem davranışını Şekil 1'de gösterildiği şekilde ifade edebiliriz. Şekilde taban kesme kuvveti (V) ile tepe yerdeğiştirmesi (u) ilişkisi eşdeğer bir tek dereceli sistemi tanımlamaktadır. V_e ve u_e deprem etkisi altında doğrusal elastik sisteme ait taban kesme kuvveti ve yerdeğiştirme talebini göstermektedir. V_y ve u_y tasarlanan sistemin akma dayanımı ve akma yerdeğiştirmesi, u_i ise deprem etkisi altında doğrusal olmayan sisteme ait yerdeğiştirme talebidir. Bu durumda doğrusal elastik sistem için deprem yükü azaltma katsayısı R , elastik sisteme ait taban kesme kuvveti talebinin (V_e) taban kesme kuvveti kapasitesine (V_y) oranıdır.

Tasarlanan sistemin yerdeğiştirme kapasitesi deprem etkisi altında gerçekleşen doğrusal olmayan davranışa ait yerdeğiştirme talebini (u_i) karşıladığı sürece, deprem yüklerinin bir deprem yükü azaltma katsayısı kullanarak azaltılması tutarlıdır. Sünek olarak tasarlanan elemanlardan meydana gelen ve özellikle kuvvetli kolon-zayıf giriş durumunun sağlandığı binalar yüksek şiddetli deprem etkileri altında dahi yeterli şekilde yerdeğiştirme ve yerdeğiştirme kapasitesini sağlayabilmektedir. Betonarme elemanların sünekliği, tüm kritik kesitlerin sargı donatısı kullanılarak sarılması ile önemli miktarda artırılabilir.

Mevcut Binaların Performans Değerlendirmesi

Deprem Yönetmeliği koşullarını sağlamayan mevcut bir binada tek bir R katsayısı kullanarak deprem yüklerini azaltmak ve eleman kapasitelerini azaltılmış deprem yükleri ve düşey yük etkilerinin



Şekil 1 - Tipik bir binanın taban kesme kuvveti - tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi

birleşik etkisi altında kontrol etmek doğru değildir. Zira elemanlarının tümü aynı derecede sünek olmayan bir binada tek R katsayısı tanımı geçerli değildir. Bu nedenle doğrusal elastik performans hesabında deprem yükü azaltma katsayısı uygulanmamış, deprem etkileri azaltılmamış deprem yükleri altında hesaplanmıştır.

Doğrusal elastik olarak modellenen bir binanın elemanlarının performans kontrolü, kritik kesitlerde azaltılmamış deprem etkisi ve düşey yük etkisi altında hesaplanan iç kuvvetlerin kesit kapasiteleri ile karşılaştırılması sonucunda yapılabilir. Kesit kapasitesinin aşılmasına, ancak kesit yeterli sünekliğe sahipse izin verilebilir. Dolayısıyla eleman kesitlerinde iç kuvvetler cinsinden elde edilen *etki / kapasite oranları* kesitten talep edilen sünekliğin bir göstergesi olmaktadır.

2007 Deprem Yönetmeliği'nde etki / kapasite oranları (r faktörleri), kapasite tasarımı yaklaşımının tersen formüle edilmesi ile tanımlanmıştır.

$$r = (\text{Deprem momenti}) / (\text{Artık moment kapasitesi}) \quad (2)$$

$$\text{Artık moment kapasitesi} = \text{Kesit moment kapasitesi} - \text{Düşey yük momenti} \quad (3)$$

Bu şekilde hesaplanan r talepleri, kesit hasar sınırları için tanımlanan sınır değerleri ile karşılaştırılarak kesitin ve elemanın hasar durumuna karar verilmektedir. Denklem (2) ve (3)'teki büyüklüklerin hepsi vektördür. Eğilme yönleri dikkate alınmalıdır.

Yukarıdaki iki denklem birleştirilerek kesit moment kapasitesi denklemden çekilirse

$$\text{Kesit moment kapasitesi} = \text{Düşey yük momenti} + (\text{Deprem momenti}) / r \quad (4)$$

ilişkisi elde edilmektedir. Bu ilişki kapasite tasarımında tüm elemanlar için tek bir deprem yükü azaltma katsayısı (R) kullanılması durumu ile eşdeğerdir. Ancak birbirinden farklı süneklik özelliklerine sahip elemanlardan meydana gelen mevcut ve güçlendirilmiş binalarda bu eşdeğerliğin ne kadar geçerli olduğu tartışılmalıdır.

Deprem Yönetmeliğine uygun olarak tasarlanmış yüksek süneklik düzeyine sahip bir binada (R=8) kesit kapasiteleri denklem (4)'ü sağlayacak şekilde seçildiği için, aynı binanın doğrusal elastik yöntem ile performans değerlendirmesi yapıldığında eleman r talepleri 8'i aşmayacaktır. Bu durum ileride sunulan Örnek 1'de gösterilmektedir. Ancak Deprem Yönetmeliği'ni sağlamayan mevcut

veya güçlendirilmiş binalarda benzer bir tutarlılığı aramak gerçekçi olmamaktadır. Özellikle düşey yük momentlerinin kesit moment kapasitesine yaklaştığı durumlarda denklem (3)'den hesaplanan artık moment kapasitesi sıfıra, dolayısıyla r talepleri de sonsuza yakın değerlere ulaşmaktadır. Hatta giriş kesiti düşey yükler altında akma dayanımına ulaşmışsa, r talebi eksi olmaktadır ve anlamsız bir durum ortaya çıkmaktadır. Bu durumda girişler çok sünek olsa dahi hiçbir şekilde $r_{\text{sınır}}$ değerlerini sağlayamazlar. Binanın yatay yükler için güçlendirilmesi de bu durumu değiştirmez, zira girişler güçlendirilmediği sürece bu aritmetik dengesizlik devam edecektir. Girişlerin güçlendirilmesi ise güçlendirme tasarımında en son tercih edilen işlemdir, çünkü giriş güçlendirmesi hem pahalı, hem de güçtür. Mühendislik pratiği açısından sadece kesme dayanımı yetersiz gevrek girişlerin kesme dayanımını arttırmak amacıyla güçlendirilmesi anlamlıdır. Diğer yandan sünek girişlerin hasar görmesi binada gerçek anlamda can güvenliği tehlikesi de yaratmaz. Güçlendirilmiş bir binanın sünek girişlerinde denklem (2)'ye göre tanımlanan r taleplerinin ne kadar yüksek değerlere ulaştığı Örnek 2'de gösterilmektedir.

Denklem (2) ve (3) yerine, r talebinin tanımında aşağıda verilen denklem (5) kullanılırsa hem işlemler basitleşecek, hem de girişlerde ortaya çıkan aritmetik dengesizlik giderilecektir.

$$r = (\text{Toplam moment}) / (\text{Kesit moment kapasitesi}) \quad (5)$$

Bu durumda "artık moment kapasitesi" gibi fiziksel olarak anlamı olmayan bir ara aritmetik değere de gerek kalmayacaktır. Denklem (5) ile tanımlanan r talebi elbette yeni bina tasarımında geçerli olan denklem (4) ile birebir uyumlu değildir. Ancak özellikle 1. ve 2. derece deprem bölgelerinde Deprem Yönetmeliğine uyumlu olarak tasarlanmış binalarda deprem momentleri düşey yük momentlerine göre her zaman baskın olduğu için aradaki farklar da önemsiz mertebelerde olacaktır.

Denklem (5) ile tanımlanan r değerleri denklem (4)'de olduğu gibi bir yük azaltma katsayısı olarak değil, kesit süneklik talebini ifade eden katsayılar olarak algılanmalıdır. Bir kesit için süneklik talebi elbette toplam moment etkisi altında anlam kazanır. FEMA-356'da önerilen doğrusal elastik yöntemde kullanılan kesit etki/kapasite oranları da denklem (5) ile tanımlanmıştır.

Eksenel Kuvvetlerin Hesabı

Doğrusal elastik hesap yöntemi ile azaltılmamış deprem yükleri kullanarak hesaplanan eksenel

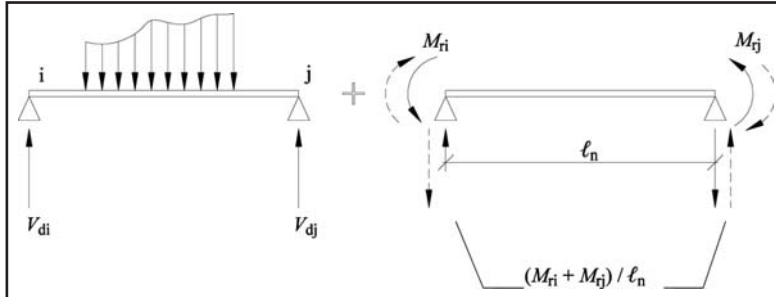
kuvvetler özellikle dış çerçevelerin düşey elemanlarında çok yüksek değerlere ulaşabilir. Halbuki kolonlara aktarılabilen eksenel kuvvetler, kirişler tarafından aktarılabilen kesme kuvvetleri ile sınırlıdır. Kirişlerde oluşabilecek en büyük kesme kuvvetlerini de kirişlerin çift eksenli eğilme altındaki kapasiteleri belirler. Dolayısıyla bir binadaki tüm kirişlerin düşey yükler ve yatay deprem yükleri altında çift eksenli eğilme ile kapasitelerine ulaştığı varsayılarak kolonlarda oluşacak en büyük eksenel kuvvetleri hesaplamak mümkündür. Bunun için bir kapasite hesabı (limit analizi) yapmak yeterlidir. Ancak düşey yükler ve deprem yükleri altında kapasitesine ulaşmayan kiriş kesitleri varsa, bu kesitler için kapasite momentleri yerine analiz momentlerini kullanmak daha gerçekçidir.

Düşey yük ve deprem yükü etkisi altında bir kirişin i ve j uçlarında oluşabilecek en büyük kesme kuvveti, deprem kuvvetinin soldan ve sağdan etkimesi durumuna göre denklem (6) ile hesaplanır (Şekil 2).

$$V_{i,j} = V_{di,j} \pm (M_{ri} + M_{rj})/l_n \quad (6)$$

Denklem (6) kullanılarak tüm kirişlerde kapasite kesme kuvvetleri hesaplanır ve kirişlerin saplandığı kolonlara aktararak kolonlarda oluşan kapasite eksenel kuvvetleri bulunur. Deprem yükleri altında yatay yük taşıma kapasitesine ulaşan bir binada kolon eksenel kuvvetleri bu şekilde hesaplanan kapasite eksenel kuvvetlerine eşittir.

Burada yapılan değerlendirme son derece açık olduğu halde 2007 Deprem Yönetmeliği Ek 7A'da kolon eksenel kuvvetlerinin hesabı için yaklaşık bir "grafik yöntem" önerilmekte, kapasite eksenel kuvvetleri ise grafik yöntemle bulunan eksenel kuvvetlerin bir üst sınırı olarak tarif edilmektedir (Madde 7A.3). Grafik yöntemin verilmesinin amacı, denklem (2-4)'de uygulanan "artık kapasite" yaklaşımını kolon eksenel kuvvetlerine de yansıtma ve yeni binaların kapasite tasarımında kullanılan R katsayısını tersten elde etmektir. Ancak bu yaklaşımın



Şekil 2 - Kirişlere oluşan kapasite kesme kuvvetleri (V_d : düşey yük altındaki kesme kuvveti; M_r : kesit eğilme kapasitesi)

fiziksel bir tutarlılığı yoktur. Bir kolonun bir kesitinin eğilme momentleri kullanılarak eksenel kuvveti hesaplanamaz. Zira kolon eksenel kuvvetlerini kolon kesitinin durumu değil, binanın uygulanan dış yükler altındaki denge durumu belirler. Yönetmelik Şekil 7A.1'de gösterilen K noktası denge koşullarını sağlamayan gelişigüzel bir noktadır. Bunun sonucunda grafik yöntem ile bir kolonun alt ve üst kesitlerinde iki farklı eksenel kuvvet hesaplanmaktadır. Bir kolonda iki eksenel kuvvet bulunması da grafik yöntemin tutarsızlığının açık bir kanıtıdır.

Grafik yöntemle hesaplanan kolon eksenel kuvvetleri genellikle kapasite eksenel kuvvetlerini aştığı için esasında fazladan bir iş yapılmış olmaktadır. Özellikle dış çerçevelerdeki perdelerin ve geniş kesitli kolonların grafik yöntemle hesaplanan eksenel kuvvetleri gerçek dışı büyük değerlere ulaşmaktadır. Örnek 2'de grafik yöntem ile hesaplanan eksenel kuvvetler kapasite eksenel kuvvetleri ile karşılaştırılmakta ve grafik yöntemin tutarsızlığı sergilenmektedir.

Performans Değerlendirmesinde Kullanılan Etki/Kapasite Oranı Sınırları

Betonarme kirişler, kolonlar, perdeler ve güçlendirilmiş dolgu duvarların hasar sınırlarını belirlemek için gerekli olan sünek davranışa ait etki/kapasite oranı sınırları 2007 Deprem Yönetmeliği Tablo 7.2-7.5'de verilmiştir. Tablolardaki $r_{sınır}$ değerlerinin kirişlerde sargılama durumu, basınç donatısının çekme donatısına oranı ve kesme gerilmesine, kolonlarda ise sargılama durumu, basınç gerilmesi ve kesme gerilmesine bağlı olarak değiştiği gözlenmektedir. Sargılama betonarme kesitlerin sünekliğini artırır. Kesme gerilmelerinin betonun çekme dayanımını aşması durumunda ise kırılma modu eğilmeden eğilme/kesme kırılmasına doğru eğim gösterir. Bu durum kesitin süneklik kapasitesini azaltır. Diğer yandan süneklik kapasitesi kiriş kesitlerinde basınç donatısı oranı ile artar, kolon kesitlerinde ise eksenel basınç oranı ile azalır. Tüm bu etkiler ilgili $r_{sınır}$ tablolarına yansıtılmıştır. Dolayısıyla r oranlarının kesit düzeyinde deprem momentlerini azaltma katsayıları olmadığı, ancak kesit süneklik taleplerini temsil ettikleri $r_{sınır}$ tabloları tarafından da ifade edilmektedir. Bu durum r katsayısının kavramsal olarak denklem (2-4) ile uyumlu olmadığına bir başka göstergesidir.

Deprem Yönetmeliği Tablo 7.2'de kirişler için verilen $r_{sınır}$ değerleri

kirişlerin gerçek sünekliliğini yansıtmaktan uzaktır. Bu nedenle doğrusal elastik yöntem kullanılarak yapılan performans değerlendirmesinde, abartılı biçimde güçlendirilmiş binalar dahi girişler nedeniyle yeterli performansa ulaşamamaktadır. Bu durum Örnek 2’de irdelenecektir.

DOĞRUSAL ELASTİK OLMAYAN HESAP YÖNTEMLERİ

2007 Deprem Yönetmeliği’nde doğrusal olmayan davranışa ait performans değerlendirmesi için iki ayrı eşdeğer statik hesap yöntemi verilmektedir. Bu yöntemler esasında doğrusal elastik sistemler için kullanılan eşdeğer deprem yükü ve mod birleştirme yöntemlerinin doğrusal olmayan sistemlere uygulamalarıdır.

Doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin doğrusal elastik hesap yöntemlerine göre en önemli avantajı, artan yükler altında sistemde bulunan yapısal elemanlar sırayla kapasitelerine ulaştıkça, bu elemanlar tarafından taşınamayan yüklerin diğer elemanlara dağılmasına (yeniden dağılım) izin vermesidir. Böylece iç kuvvet dağılımı daha gerçekçi olarak hesaplanabilmektedir. Diğer yandan en önemli dezavantajlarından bir tanesi doğrusal olmayan çözüm yöntemlerinin henüz standartlaşmamış olmasıdır. Diğerleri ise deprem etkisi altında performans değerlendirmesine esas teşkil eden doğrusal olmayan sisteme ait maksimum yerdeğiştirmelerin yeterli hassasiyetle hesaplanamaması, ancak yaklaşık yöntemlerle tahmin edilebilmesidir.

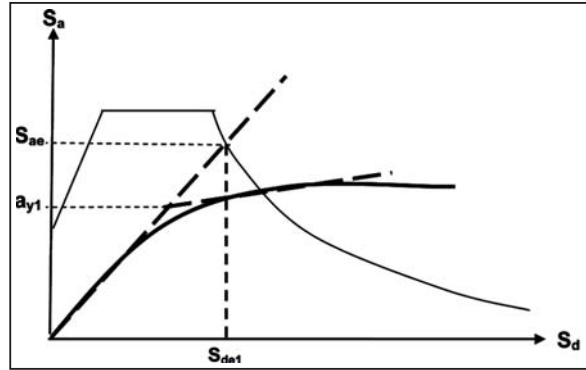
Doğrusal olmayan yöntemlerde eşdeğer deprem yükleri bir defada değil adım adım artırılarak uygulanır. Bu nedenle bu yöntemler “statik itme analizi” olarak adlandırılır. İki ayrı doğrusal olmayan yöntemin farkını ise göz önüne alınan mod sayıları belirler.

Tek Modlu Statik İtme Analizi (Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi)

Bu yöntem doğrusal elastik sistemler için eşdeğer deprem yükü yönteminin uygulanabildiği binalara uygulanır. Eşdeğer statik yatay yük dağılımı doğrusal elastik sistem ile aynı şekilde hesaplanır, ancak adım adım artırılarak uygulanır. Deprem sırasında binanın en fazla zorlandığı duruma bu şekilde ulaştığı varsayılır. Arttırılarak uygulanan yatay yükler altında binada elastik ötesi statik davranışın oluşması ile Şekil 1’de gösterilen kapasite eğrisi elde edilir.

Bina yatay yük kapasitesine ulaştıktan sonra, artan yatay yükler altında hangi yerdeğiştirme

değerine ulaşacağına statik itme analizi ile karar vermek mümkün değildir. Bu durumda elde edilen kapasite eğrisinden yararlanılarak bina tek dereceli bir elasto-plastik sisteme dönüştürülür ve bu tek dereceli sistemin aynı deprem etkisi altındaki maksimum yerdeğiştirmesi (spektral deplasmanı) bağımsız bir dinamik analizle hesaplanır. Bu işlem sadece bir deprem yer hareketinin ivme-zaman kaydını kullanarak yapılabilir. Ancak tasarım spektrumu ile tanımlanan bir yer hareketi için bu işlemi yapmak mümkün değildir. Bunun yerine “eşit deplasman” prensibi kullanılarak doğrusal olmayan sistemin maksimum yerdeğiştirmesinin eşdeğer doğrusal sistemin maksimum yerdeğiştirmesine eşit olacağı varsayılır ve binanın performans değerlendirmesi doğrusal elastik sisteme ait maksimum yerdeğiştirme değerinde yapılır. Bu işlemler Şekil 3’de spektral ivme-spektral deplasman düzleminde gösterilmektedir.



Şekil 3 - Statik itme analizinde tepe yerdeğiştirme talebinin eşit deplasman prensibi ile belirlenmesi

Çok Modlu Statik İtme Analizi (Mod Birleştirme Yöntemi)

Bu yöntemde, önce doğrusal elastik sistemin titreşim modları hesaplanır ve her moda ait modal kuvvetler binaya birbirinden bağımsız şekilde ayrı ayrı uygulanarak statik itme analizi yapılır. Ancak her modun statik itme analizi sırasında oluşan elastik ötesi etkiler birbirlerinden bağımsız olamayacağı için bu durumun bazı ilave yaklaşık hesaplarla düzeltilmesi gerekir. Daha sonra elde edilen modal değerler bir istatistiksel yöntemle birleştirilir.

Çok modlu statik itme analizi henüz gelişmekte olan bir araştırma konusudur. Kabul edilmiş standart bir yöntemle sahip değildir. Çok modlu statik itme analizi için geliştirilmekte olan birbirinden farklı yöntemler vardır ve hepsi de birbirlerinden farklı sonuçlar vermektedir. Bu yöntemlerin içerdiği hesaplar oldukça karmaşıktır ve pratik olarak uygulanması pek de kolay değildir. Kullanılan çok modlu

itme analizi yöntemlerinin hassasiyeti arttıkça yapılan hesap miktarı zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemine (7.6.7) yaklaşmakta ve amacını yitirmektedir. Bu nedenlerle de ülkemiz haricinde hiçbir ülkenin bina deprem yönetmeliğinde yer almamaktadır.

Performans Değerlendirmesinde Yapılan Kabuller ve Kullanılan Sınırlar

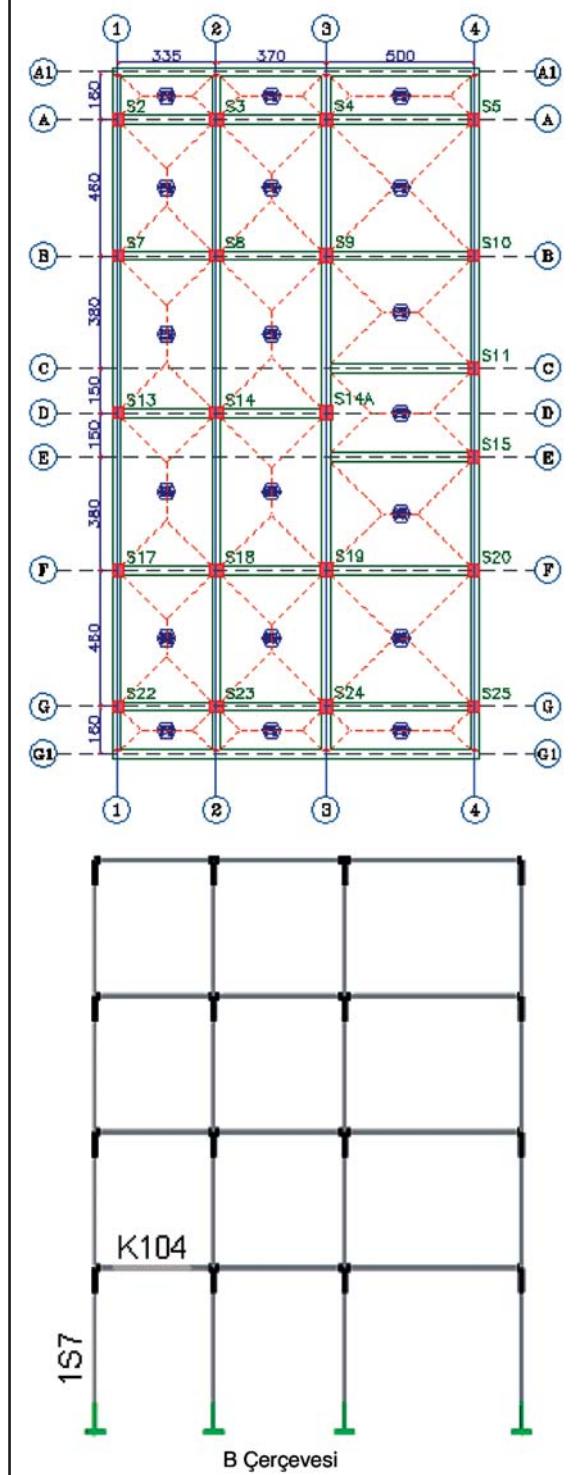
Statik itme analizlerinde yığılı plastik davranış modeli esas alındığı için hesap sonucunda eleman uçlarındaki maksimum plastik mafsal dönmeleri elde edilir. 2007 Deprem Yönetmeliği'nde itme analizinden elde edilen mafsal dönmeleri, kabul edilen bir plastik mafsal boyuna bölünerek kesit eğrilik değerlerine dönüştürülmekte, daha sonra ilgili kesitin moment-eğrilik ilişkisi kullanılarak bu eğrilik değerine karşılık gelen beton ve çelik birim şekil değiştirmeleri hesaplanmaktadır. Bu değerlerin de her malzeme için tanımlanan birim şekil değiştirme sınır değerleri ile karşılaştırılmaları sonucunda kesitin hasar durumuna karar verilmektedir.

Burada özetlenen işlemler esasında oldukça zahmetlidir ve uygulayıcı mühendisin hesap sonuçlarını kontrolü altında tutabilmesi neredeyse imkansızdır. Bunun yanında plastik dönmeden birim şekil değiştirmeye geçebilmek için beton ve donatının tam aderans sağladığı varsayılmaktadır. Önceki yıllarda yapılmış mevcut binalarda bu durum geçerli değildir. FEMA-356 standardı bu nedenle tek modlu statik itme analizinde eleman hasarlarını doğrudan plastik mafsal dönmeleri ile ilişkilendirmiştir. Böylece hem plastik mafsal boyu için yapılan varsayımın gerek kalmamış, hem de eleman hasar değerlendirme işlemleri oldukça basitleşmiştir. Ülkemiz deprem yönetmeliğinde de böyle bir yaklaşımın benimsenmesi doğrusal elastik olmayan yöntemin daha kolay ve gerçekçi olarak uygulanmasını ve benimsenmesini sağlayacaktır.

Doğrusal olmayan yöntemle betonarme elemanların hasar sınırlarının belirlenmesinde kabul edilen beton birim şekil değiştirme sınırları da tartışılmalıdır. Mevcut binaların hemen hepsinde betonarme kesitler sargılanmamıştır. Sargılanmamış kesitlerde, minimum hasar ve güvenlik sınırları için beton birim şekil değiştirmesinin 0.0035 olmasına izin verilmektedir. Bu değerdeki sargısız beton, artık basınç yükünü boşaltmakta ve ezilme durumuna yaklaşmaktadır (Bakınız: Yönetmelik Şekil 7B.1). Dolayısıyla betonu bu denli yüksek birim şekil değiştirme değerine ulaşan bir kesitin minimum hasar veya güvenlik bölgesinde olacağını beklemek pek gerçekçi değildir.

ÖRNEK 1: 1998 YÖNETMELİĞİ KOŞULLARINA GÖRE TASARLANMIŞ DÖRT KATLI KONUT BİNASININ PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Birinci derece deprem bölgesinde ve Z3 sınıfı zemin üzerinde bulunan dört katlı bir betonarme konut



Şekil 4 - Tipik kat planı ve B- çerçevesi

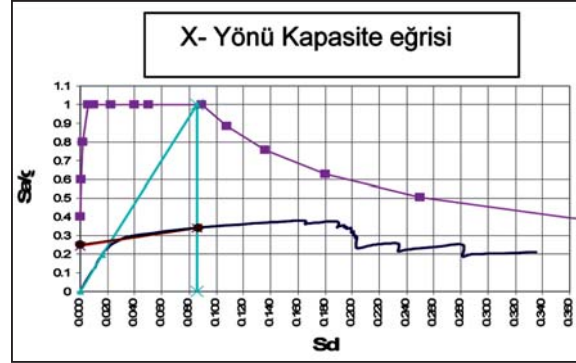
binası önce 1998 Deprem Yönetmeliği koşullarına göre yüksek süneklığe sahip çerçeve sistemi olarak tasarlanmıştır. Birinci katın yüksekliği 4 m, diğer katların yüksekliği ise 3 m'dir. Kolon kesit boyutları dış akslarda 0.40X0.40 m, iç akslarda 0.45X0.40 m, kiriş kesit boyutları ise 0.30X0.50 m'dir. Tasarımda kullanılan beton ve çelik karakteristik dayanımları sırayla 25 ve 420 MPa'dır. Tasarlanan bina daha sonra 2007 Deprem Yönetmeliği'nin 7. Bölümüne göre mevcut bir bina olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme hem doğrusal elastik yöntem, hem de doğrusal elastik olmayan yöntem kullanılarak yapılmıştır. Binanın tipik kat planı ve kesiti Şekil 4'de gösterilmektedir.

Binanın çatlamış kesit kullanarak hesaplanan doğal titreşim periyodları X- yönünde 0.59, Y- yönünde ise 0.62 saniyedir. Burulma düzensizliği yoktur. Doğrusal olmayan yöntem için tepe yerdeğiştirme istemleri X- yönünde 0.112, Y- yönünde 0.118 metre olarak hesaplanmıştır. Binanın X- yönünde hesaplanan kapasite eğrisi ve yerdeğiştirme talebi Şekil 5'de spektral ivme- spektral yerdeğiştirme düzleminde gösterilmektedir.

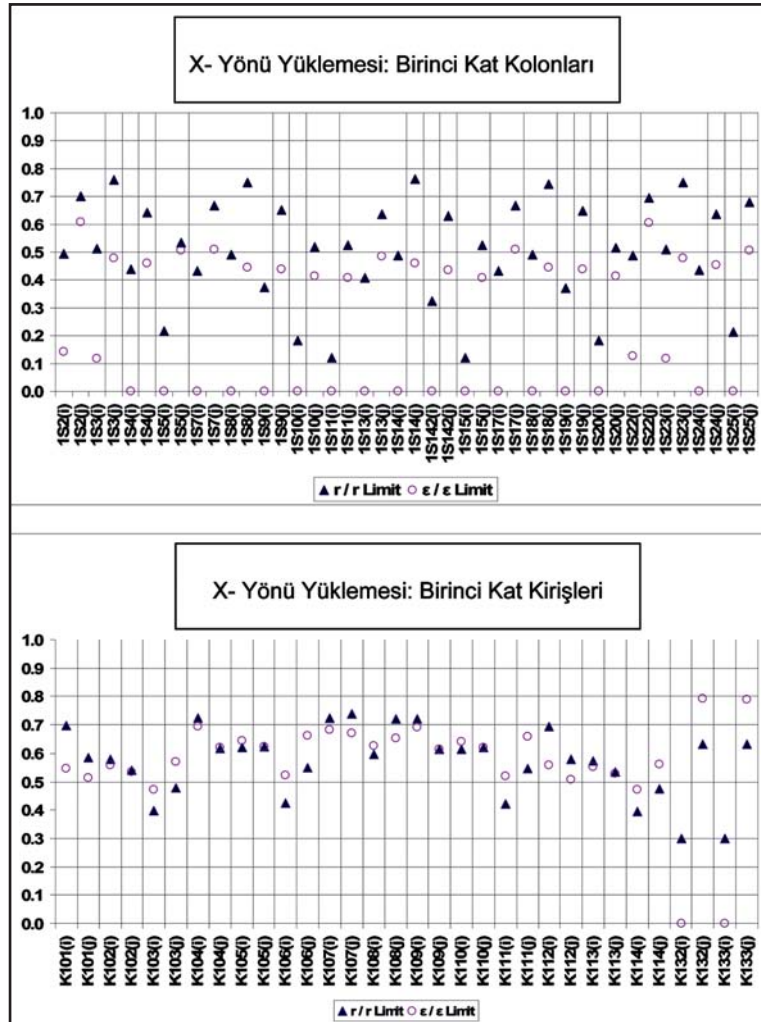
Deprem yönetmeliği koşullarına göre tasarlanan binanın X-yönündeki taban kesme kuvveti katsayısı yaklaşık olarak 0.25'dir. Tasarım taban kesme kuvveti katsayısı $R=8$ için 0.125 olduğuna göre, binanın gerçek yatay dayanımı tasarım dayanımının iki katıdır. Esasında binanın gerçekleşen deprem yükü azaltma katsayısı R_a , $1.0/0.25 = 4$ olmuştur. Diğer yandan yerdeğiştirme talebi binanın yatay yerdeğiştirme kapasitesinin yarısından daha azdır. Bu sonuçlar ışığında binanın depremden kaynaklanan dayanım ve şekildeğiştirme taleplerini rahatlıkla karşılayacağı anlaşılmaktadır.

Örnek bina doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan yöntemleri kullanarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar eleman uç kesitlerinde doğrusal elastik yöntem için etki/kapasite oranları $r/r_{sınır}$ doğrusal olmayan yöntem için ise birim şekildeğiştirmeler cinsinden $\epsilon/\epsilon_{sınır}$ değerleri olarak sunulmuştur. Bu durumda bir eleman uç kesitinde $r/r_{sınır}$ veya $\epsilon/\epsilon_{sınır}$ değerleri 1.0'in altında ise, bu elemanın can

güvenliği (GV) hasar sınırını sağladığı anlaşılabacaktır. Değilse GV sınır değerleri aşılmış demektir. Birinci katta X-yönünde kolon ve kirişlerin değerlendirme sonuçları Şekil 6'da sunulmaktadır.



Şekil 5 - Örnek binanın X- yönü kapasite eğrisi ve yerdeğiştirme talebi



Şekil 6 - 1998 Deprem Yönetmeliği'ne uygun olarak tasarlanan örnek binanın birinci katındaki kolon ve kiriş elemanlarının X- yönü deprem yüklemesi altında doğrusal elastik ve doğrusal olmayan yöntemlerle değerlendirilmesi

Doğrusal elastik yöntemle göre birinci kat kolonlarının r talepleri $r_{sınır}$ değerlerinin en fazla %75'ine ulaşmaktadır. Diğer bir tanımla, izin verilen süneklik kapasitelerinin en fazla %75'ini kullanmışlardır. Bu oran doğrusal olmayan yöntemle göre en fazla %60 olmaktadır. Kirişlerde ise her iki yöntemle göre de bu oranlar en fazla %70 olmaktadır. Gerek kolonlarda, gerekse kirişlerde doğrusal yöntemin doğrusal olmayan yöntemle göre genellikle daha emniyetli olduğu görülmektedir. Üst kat kirişlerinde doğrusal elastik yöntem sonuçları daha da emniyetli yönde çıkmaktadır. Ancak deprem yönetmeliğine uygun olarak tasarlanmış bir binada her iki yöntemle elde edilen sonuçların genellikle birbirleri ile tutarlı olduğu gözlenmektedir. Sonuç olarak yönetmelik koşullarını sağlayan bir bina mevcut bir bina olarak değerlendirildiğinde, kolon ve kirişleri tasarımda sağlanan süneklik kapasitelerinin en fazla %75'ini kullanmaktadırlar.

ÖRNEK 2: GÜÇLENDİRİLMİŞ OKUL BİNASININ PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

2003 Bingöl depreminde hasar gören bir yatılı okul pansiyon binası depremden sonra güçlendirilmiştir. Bina birinci derece deprem bölgesinde ve Z3 sınıfı zemin üzerinde yer almaktadır. Dört katlı betonarme binanın kat yükseklikleri 3.1 metredir. Mevcut beton dayanımı 8.5 MPa, mevcut çelik dayanımı ise 220 MPa'dır. Binanın projesi vardır. Kolon boyutları 0.30x0.60 m, kiriş boyutları 0.30x0.50 ve 0.30x0.70 m'dir.

Güçlendirilen okulun fotoğrafı Şekil 7'de, tipik kat planı Şekil 8'de görülmektedir. Güçlendirme



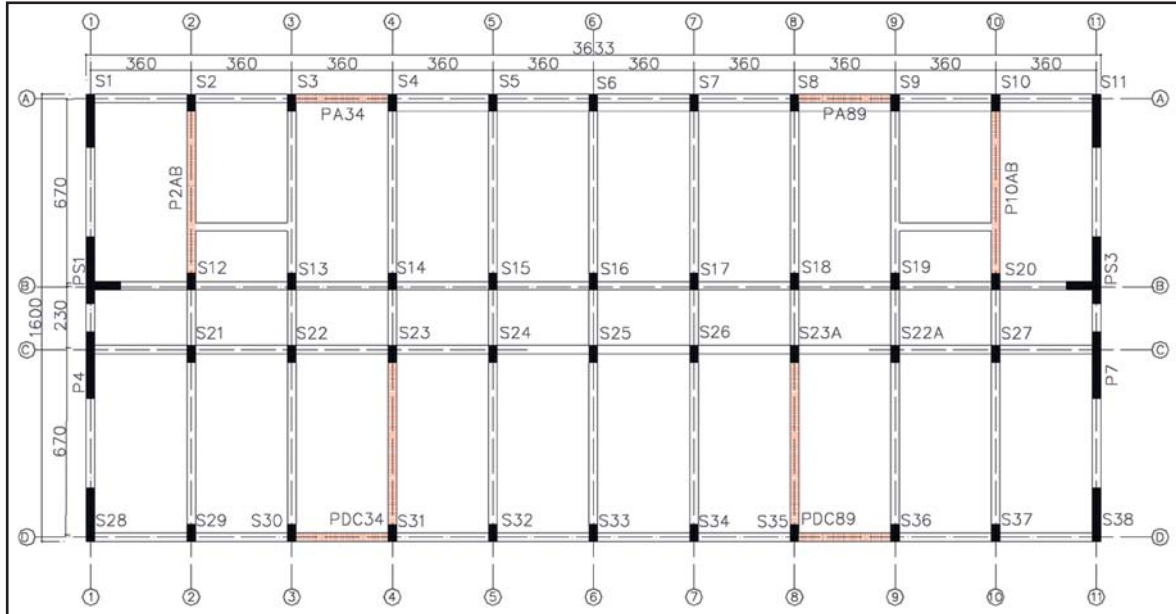
Şekil 7 - Güçlendirilen pansiyon binası

sadece sünek betonarme perdeler eklenerek yapılmıştır. Sisteme eklenen perdelerin kalınlıkları 0.25 m, perde oranları (perde alanı / toplam kat alanı) X- yönünde 0.0016, Y- yönünde 0.0044'dür. Güçlendirme tasarımının iki yöndeki dengesizliği belirgindir.

Binanın çatlamış kesit kullanarak hesaplanan doğal titreşim periyotları X- yönünde 0.38, Y- yönünde ise 0.20 saniyedir. Burulma düzensizliği yoktur. Güçlendirilmiş binanın performans değerlendirmesi doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan yöntemler kullanılarak yapılmıştır. Binanın performans hedefi 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan deprem etkisi altında Can Güveniği'dir.

Doğrusal Elastik Yöntem ile Performans Değerlendirmesi

Güçlendirilmiş binanın tüm kolonları, perdeleri ve kirişleri sünekler. Tüm birleşim bölgelerinin kesme



Şekil 8 - Güçlendirilen binanın tipik kat planı

güvenliği yeterlidir. Bu durumda sistemde bulunan kiriş, kolon ve perde elemanlarının performans değerlendirilmesi, kritik kesitlerdeki r taleplerinin $r_{sınır}$ değerleri ile karşılaştırılması yoluyla yapılacaktır. Sonuçlar Şekil 9'da birinci kat elemanları için $r/r_{sınır}$ değerlerinin çubuk diyagramı şeklinde verilmektedir.

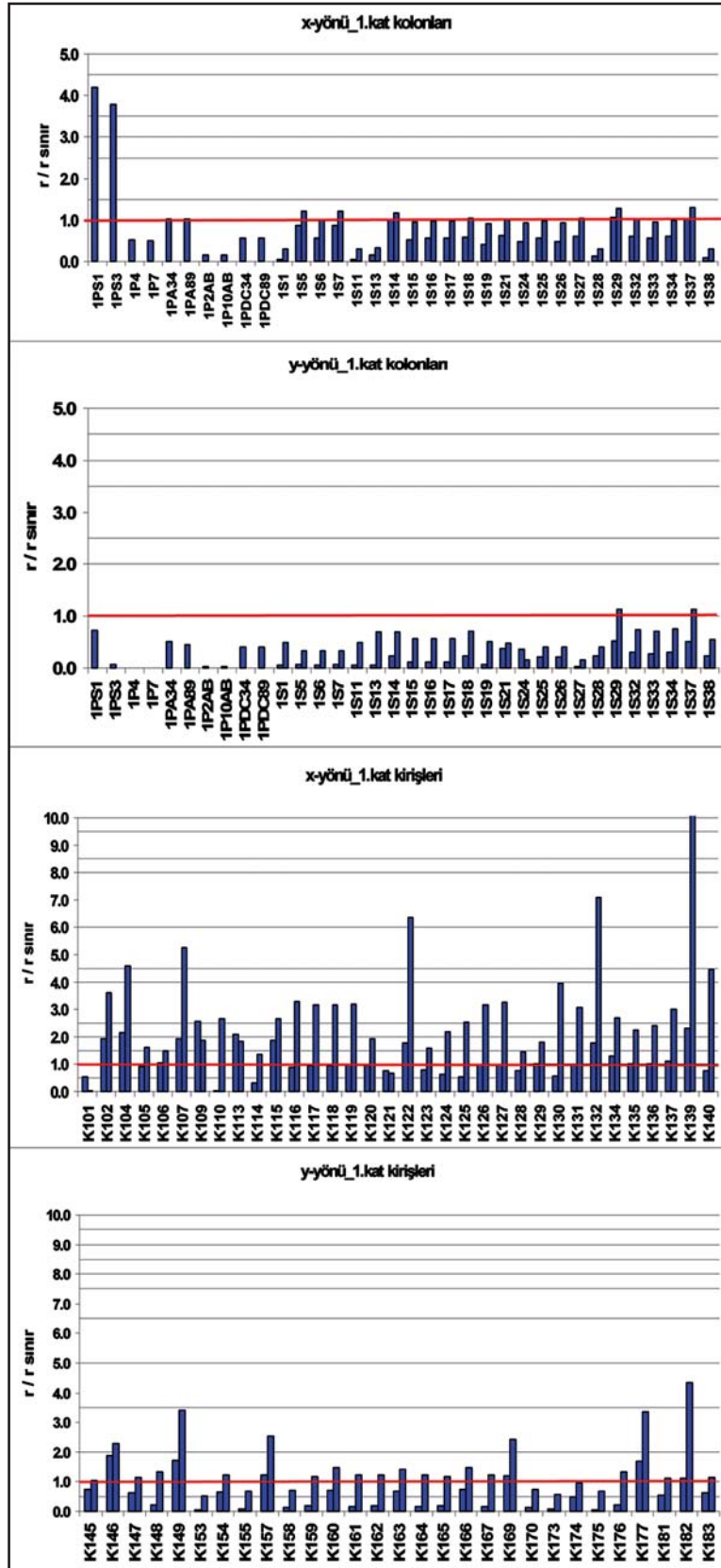
Tüm katlardaki elemanların performans değerlendirme sonuçları toplu olarak Tablo 1'de sunulmaktadır. Tabloda verilen değerler GV hasar sınırını sağlamayan elemanların yüzde olarak oranlarıdır. Verilen oranlar kirişler için GV sınırını sağlamayan elemanların o katta ve yüklemeye yönündeki tüm kiriş sayısına oranı, kolon ve perdeler için ise GV sınırını sağlamayan kolon ve perdelerin taşıdığı kesme kuvvetinin kat kesme kuvvetine oranıdır. Binada Can Güvenliği performans düzeyinin sağlanabilmesi için bu oranların her katta kirişlerde %30, kolonlarda ise %20 sınırını (üst katta %40) aşmaması gereklidir.

Tablodan görüldüğü gibi yapılan güçlendirme sonucu kolon ve perdeler yeterli performansı sağlamakta, ancak kirişler tüm katlarda yetersiz kalmaktadır. Y- yönünde oldukça ağır bir güçlendirme yapılmasına karşın bu durum kirişlerin performansına yansımamıştır. Bu nedenle bina doğrusal elastik yöntem ile yapılan değerlendirme sonucunda Can Güvenliği performans düzeyini sağlamamaktadır.

Doğrusal Elastik Olmayan Yöntem ile Performans Değerlendirmesi

Güçlendirilen binanın tepe yerdeğiştirme istemleri X- yönünde 0.112, Y- yönünde 0.051 metre olarak hesaplanmıştır. Binanın X- yönünde hesaplanan kapasite eğrisi ve yerdeğiştirme talebi Şekil 10'da spektral ivme- spektral yerdeğiştirme düzleminde gösterilmektedir.

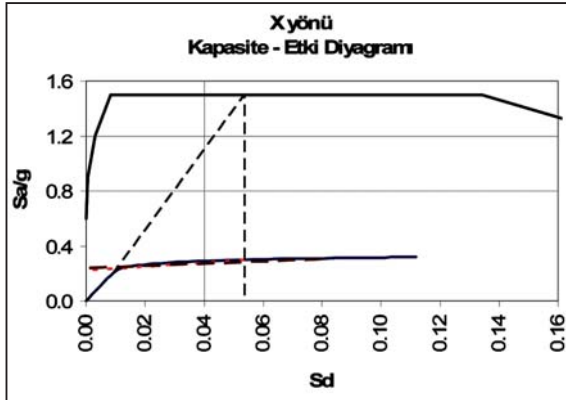
Güçlendirilen binanın X-yönündeki (zayıf yön) taban kesme kuvveti kat-



Şekil 9 - Güçlendirilmiş pansiyon binası birinci kat elemanlarının $r/r_{sınır}$ değerleri

Tablo 1 - Güçlendirilmiş Pansiyon Binasında GV Hasar Sınırını Sağlamayan Elemanların Oranları (Doğrusal Elastik Yöntem)

Kat	+X Yönü		+Y Yönü	
	Kirişler (%)	Kolonlar (%)	Kirişler (%)	Kolonlar (%)
	GV	GV	GV	GV
1	94	6	76	6
2	97	13	93	4
3	94	17	93	0
4	78	32	59	5



Şekil 10 - Güçlendirilmiş pansiyon binasının X- yönü kapasite eğrisi ve yerdeğiştirme talebi

Tablo 2 - Güçlendirilmiş Pansiyon Binasında GV Hasar Sınırını Sağlamayan Elemanların Oranları (Doğrusal Elastik Olmayan Yöntem)

Kat	+ X yönü		+ Y yönü	
	Kirişler (%)	Kolonlar (%)	Kirişler (%)	Kolonlar (%)
	CG	CG	CG	CG
1	0	0	17	0
2	3	0	17	0
3	3	0	17	0
4	3	0	0	0

sayısı yaklaşık olarak 0.25'dir. Elastik taban kesme kuvveti katsayısı 1.5 olduğuna göre, gerçekleşen deprem yükü azaltma katsayısı R_a 'nın $1.5 / 0.25 = 6$ olduğu anlaşılmaktadır. Yerdeğiştirme talebi ise binanın yatay yerdeğiştirme kapasitesinin yaklaşık yarısı kadardır. Bu sonuçlar binanın depremden kaynaklanan dayanım ve şekildeğiştirme taleplerini rahatlıkla karşılayacağını göstermektedir. Doğrusal olmayan yöntem ile hesaplanan kiriş, kolon ve perde elemanlarının performans değerlendirmesi, kritik kesitlerdeki birim şekildeğiştirme taleplerinin sınır değerleri ile karşılaştırması yoluyla yapılacaktır.

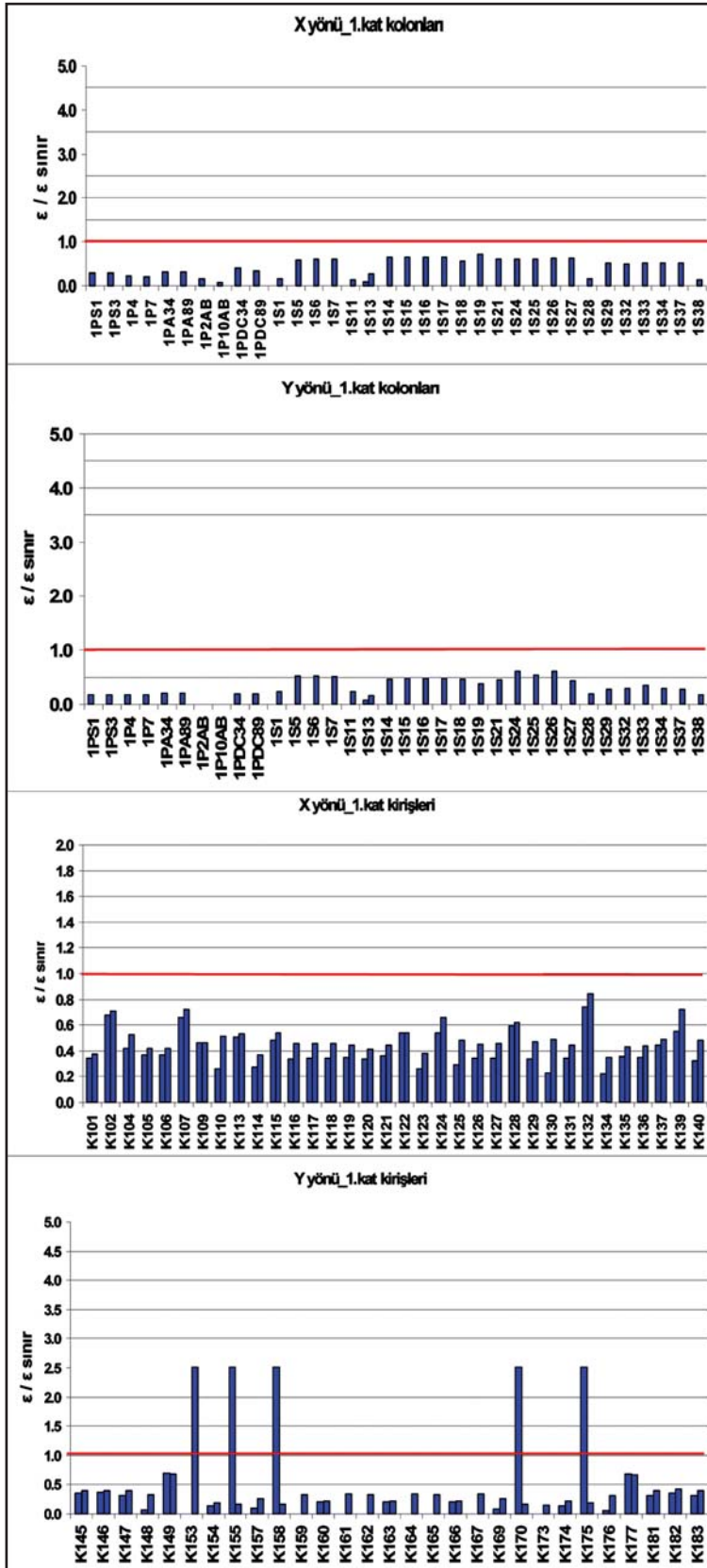
tır. Sonuçlar Şekil 11'de birinci kat elemanları için kritik kesitleri kontrol eden $\epsilon/\epsilon_{sınır}$ değerlerinin çubuk diyagramı olarak verilmektedir.

Tüm katlardaki elemanların performans değerlendirme sonuçları toplu olarak Tablo 2'de sunulmaktadır. Tablodan görüldüğü gibi yapılan güçlendirme sonucu tüm kolon ve perdeler yeterli performans sağlamaktadır. Bazı kirişler alt katlarda yetersiz kalmaktadır, ancak bunların oranı düşüktür ve bina Can Güvenliği (GV) performans düzeyini sağlamaktadır.

Doğrusal Elastik ve Doğrusal Elastik Olmayan Yöntemlerin Karşılaştırılması

İki farklı yöntemle hesaplanan ve Tablo 1 ve 2'de sunulan sonuçlar arasında önemli farklar olduğu gözlenmektedir. Düşey eleman performansları arasındaki farklar normal kabul edilebilir, zira her iki yöneme göre de düşey elemanlar kat bazında izin verilen sınır değerleri sağlamaktadırlar. Ancak kirişler için elde edilen performanslar çok farklıdır. Doğrusal elastik yöntemde tüm katlardaki kirişlerin neredeyse tamamı yetersiz, doğrusal elastik olmayan yöntemde ise tüm katlardaki kirişlerin neredeyse tamamı yeterli bulunmuştur. Bu kadar büyük farklar elbette normal değildir. Farkların bir kısmının nedeni yukarıda tartışıldığı gibi r tanımında denklem (2) ve (3)'ün kullanılmasıdır. Denklem (5)'in kullanılması halinde kirişlerde daha dengeli sonuçlar elde edilecektir.

Farkların diğer önemli nedeni ise mevcut (sargısız) kirişlerin performans değerlendirmesinde doğrusal elastik yöntemde kullanılan $r_{sınır}$ değerlerinin oldukça tutucu olmasına karşın doğrusal elastik olmayan yöntemde kullanılan $\epsilon_{sınır}$ değerlerinin oldukça cömert biçimde tanımlanmış olmasıdır. Örneğin, doğrusal olmayan yöntemde çelik için birim şekildeğiştirme (ϵ) hesabında beton ile çelik arasında tam aderans olduğu varsayılmaktadır. Halbuki düz donatılı mevcut kirişlerde tam aderans sağlanması mümkün değildir ve eleman hasarları donatının oldukça düşük ϵ değerlerinde oluşur. Bu durumu göz önüne almak için $\epsilon_{sınır}$ değerlerini de düşürmek gerekir. Ayrıca kesme gerilmelerinin süneklik üzerindeki olumsuz etkisi $r_{sınır}$ değerlerinin tanımında göz önüne alındığı halde $\epsilon_{sınır}$ değerlerinin tanımında göz önüne alınmamıştır. FEMA-356'da doğrusal olmayan yöntemin performans kabul koşullarında bu tür tutarsızlıklara neden olmamak için performans değerlendirmesinde malzeme birim şekildeğiştirmeleri yerine kesit dönmeleri kullanılmıştır. Böylece plastik mafsal boyu gibi hassasiyeti olmayan bir değer kabulü yapmaya da gerek kalmamıştır.

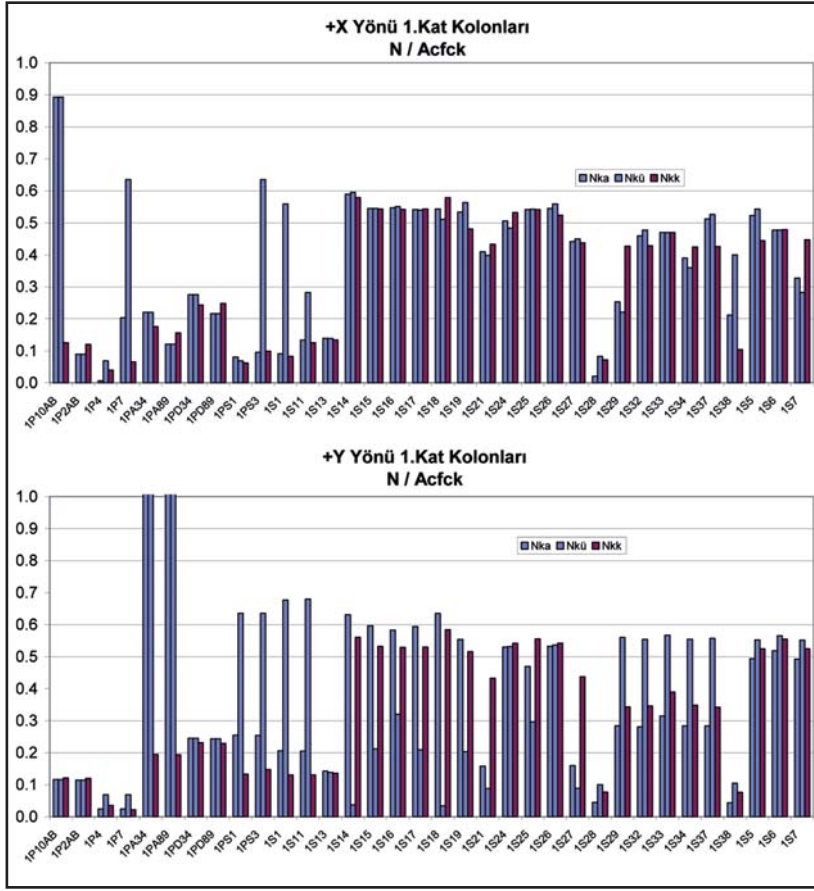


Şekil 11 - Güçlendirilmiş pansiyon binası birinci kat elemanlarının $\epsilon/\epsilon_{sınır}$ değerleri

Doğrusal Elastik Yöntemde Eksenel Kuvvetlerin Hesaplanması

Güçlendirilmiş pansiyon binasındaki düşey elemanların eksenel kuvvetleri hem grafik yöntem, hem de kapasite yöntemi ile hesaplanmış ve statik itme analizinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. X ve Y yönü deprem yüklemesi için birinci kat elemanlarında elde edilen sonuçlar Şekil 12'de karşılaştırılmaktadır. Şekilde N_{ka} ve $N_{kü}$ aynı kolonun alt ve üst ucunda grafik yöntem ile hesaplanan iki farklı eksenel kuvveti, N_{kk} ise kapasite yöntemi ile hesaplanan eksenel kuvveti temsil etmektedir. Eksenel kuvvetler her elemanın eksenel basınç kapasitesi ile normalize edilmiştir.

Şekil 11 ve 12'de hemen göze çarpan önemli tutarsızlıklar vardır. İlk gözlem grafik yöntem ile bir kolonda birbirinden tamamen farklı iki eksenel kuvvetin hesaplanabilmesidir. Bu durum herşeyden önce en basit fiziksel gerçeklere aykırıdır. Özellikle yatay deprem yüklemesinin kolon eksenel kuvveti üzerinde en fazla etkili olduğu dış kolonlarda bu durum iyice belirgindir. Bu durumlarda hangi eksenel kuvvetin kullanılacağı konusunda bir tercih yapılması da mümkün değildir. İkinci gözlem, kolonların çoğunda grafik yöntemle hesaplanan eksenel kuvvetlerin, eksenel kuvvet üst sınırını belirleyen kapasite eksenel kuvvetlerini aşmasıdır. Şekil 11 ve 12'de gözlemlendiği gibi, birinci kattaki X- yönü yüklemesinde 34 kolondan 20'sinde, Y- yönü yüklemesinde 34 kolondan 27'sinde bu sınır aşılmaktadır. Kapasite sınırının aşıldığı kolonlar ve perdeler, deprem yükünden en fazla etkilenen merkeze uzak akslardaki düşey elemanlardır. Bu elemanlarda grafik yöntemle son derece gerçek dışı değerler elde edildiği görülmektedir. Deprem yükü etkisinin az olduğu orta çerçeve elemanlarında farklar azdır, zira merkeze yakın çerçevelerde kolon eksenel kuvvetlerini zaten düşey yükler belirlemektedir.



Şekil 12 - Güçlendirilmiş pansiyon binasında grafik yöntem ve kapasite yöntemi ile hesaplanan normalize edilmiş eksenel kuvvetlerin karşılaştırılması

Grafik yöntemle eksenel kuvvet hesaplamasının mühendislere oldukça gereksiz bir iş yaptırdığı görülmektedir. Eksenel kuvvetleri hemen her durumda kapasite yöntemi ile hesaplanan, yani eğilme kapasitesine ulaşan kirişlerden aktarılabilen kesme kuvvetleri belirlemektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

2007 Deprem Yönetmeliği'nde ilk kez yer alan performans esaslı hesap yöntemlerinin benimsenmesi ve yaygın biçimde uygulanabilmesi kuşkusuz zaman alacaktır. Ancak bu yöntemlerin daha doğru ve kolay uygulanabilmesi için öncelikle bazı zayıflıklarının giderilmesi ve basitleştirilmesi gereklidir. Bunların yanında basit güçlendirme uygulamaları için daha pratik bir yöntem de ihtiyaç vardır. Yönetmelikte yer alan her iki yöntemin geliştirilmesi ve basit güçlendirme uygulamaları için önerilen hususlar aşağıda özetlenmiştir.

Doğrusal Elastik Yöntemler

- Sünek elemanların performans değerlendirme-

sinde kullanılan etki/kapasite oranlarının tanımında, artık kapasite momenti tanımı terk edilmeli ve toplam momentin toplam kapasiteye oranı kullanılmalıdır.

- Düşey elemanların eksenel yük hesabında sadece kapasite yöntemi kullanılmalı, çok hatalı sonuçlar veren ve gereksiz işlemlere neden olan grafik yöntem kullanılmamalıdır.
- Etki/kapasite oranları sınır değerleri, özellikle kiriş kesitlerinin sünekliklerini daha gerçekçi biçimde yansıtmalıdır.

Doğrusal Elastik Olmayan Yöntemler

- Elemanların performans değerlendirmesinde özellikle mevcut bina elemanlarının davranış özelliklerini yansıtmayan birim şekildedışırmeler yerine deneylerle ölçülebilen ve davranış özellikleri ile ilişkilendirilebilen plastik mafsallı dönmeleri kullanılmalıdır.

- Çok modlu statik itme analizi yöntemi, tüm ülkelerde kabul edilen standart bir yöntem haline gelmeden ve eğitim altyapısı oluşturulmadan ülkemiz deprem yönetmeliğinde de yer almamalıdır.

Basit Güçlendirme Uygulamaları İçin Hesap Yöntemi Önerisi

Ülkemizde en yaygın güçlendirme uygulaması, kat sayısı 5'i aşmayan ve oldukça düzenli taşıyıcı sistemlere sahip okul binalarının betonarme perdelerle güçlendirilmesidir. Deprem yüklerinin tamamına yakını yeni eklenen perdeler tarafından karşılanan, hiçbir elemanı gevrek olarak hasar görmeyen ve yanal ötelenmesi çok azaltılmış sistemler için bir eşdeğer R katsayısı yaklaşımı getirilmesi güçlendirme uygulamalarını oldukça kolaylaştıracak ve rahatlatacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu yazıda sunulan örneklerin sayısal çözümleri İnş. Y. Müh. Zeynep Düzce, İnş. Müh. Ali Şengöz ve İnş. Müh. Aydan Özmen tarafından yapılmıştır. 