

Binaların deprem etkisi altındaki lineer olmayan davranışının belirlenmesi için çok modlu uyarlamalı yük artımı yöntemi

Kaan TÜRKER*, Erdal İRTEM

Balıkesir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 10145 Çağış Kampüsü, Balıkesir

Özet

Çalışmada, binaların deprem etkileri altındaki lineer olmayan davranışının belirlenmesi için çok modlu uyarlamalı bir yük artımı yöntemi sunulmuştur. Yöntemde yığılı plastisite yaklaşımı kullanılmaktadır. Oluşan ardışık plastik kesitler arasındaki bölgelerde, sistemin geometri değişimi bakımından lineer olmayan davranışı (ikinci merteye etkileri) ve bileşik eğilme etkisindeki kesitlerde akma koşulları lineerleştirilmekte ve bu bölgelerde geleneksel davranış spektrumu analizi esaslarından yararlanılarak yüksek mod etkileri göz önüne alınmaktadır. Yapılan lineerleştirmelerle, plastik kesitlerin oluşumu için gerekli yük artımları, ardışık yaklaşıma veya adım-adım analize gerek kalmadan direkt olarak belirlenebilmektedir. Her yük artımındaki modal yüklerin belirlenmesinde, plastikleşen kesitler nedeniyle sistemin değişen dinamik özellikleri kullanılmaktadır. Böylece önemli rijitlik değişimleri, kısmi mekanizma vb. durumların modal yatay yükler üzerindeki etkileri de göz önüne alınabilmektedir. Çalışmada, modal yatay yüklerin hesabı için yeni bir yaklaşım da önerilmektedir. Önerilen yöntem ile yüksek modların etkili olduğu çok katlı betonarme bir bina çerçevesinin analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar, farklı deprem yer hareketi kayıtları için yapılan Lineer Olmayan Dinamik Analiz (LODA) sonuçları referans (kesin çözüm) alınarak birçok parametre ile değerlendirilmiştir. Ayrıca, FEMA 356'da önerilen üç farklı dağılım (birinci mod, SRSS ve üniform dağılım) için de lineer olmayan statik analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Buna göre, önerilen yöntemin, FEMA 356'daki prosedürlere göre LODA'ye oldukça yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Binaların deprem davranışı, yük artımı yöntemi, çok modlu uyarlamalı lineer olmayan statik analiz, ikinci merteye etkiler, betonarme binalar.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Kaan TÜRKER. kturker@balikesir.edu.tr; Tel: (266) 612 13 85.

Makale metni 28.12.2005 tarihinde dergiye ulaşmış, 07.12.2006 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.12.2007 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

A multi modal adaptive load increment method for determination of seismic response of buildings

Extended abstract

Today, investigations on low-rise irregular buildings, high-rise regular and irregular buildings show that traditional non-linear static (pushover) analysis (T-NSA) procedures based on monotonically increasing lateral loads proportional to first mode or similar shapes are not sufficient in determination of the non-linear seismic behavior. In these buildings, higher modes besides fundamental modes are effective in structural behavior and/or modal properties of the buildings change extremely due to plastification (yielding with pure bending moment or bending moment and axial force) in structural system. Therefore, higher mode effects and/or change of dynamic properties due to plastification in system should be considered in NSA of these buildings. In order to consider these effects, it is stipulated that NSA are performed separately for least two different load distribution (pattern) in FEMA 356 and in Eurocode 8. Thus, consideration of all inertial effects occurred during earthquake are intended in the evaluation of buildings. In addition recently, improved pushover procedures including multi-mode and/or effect of plastification in system on mode shapes (adaptive procedures) have been developed by several researchers in order to overcome the deficiencies of T-NSA procedures. These improved procedures generally utilize from the essentials of traditional response spectrum analysis and use traditional load increment approaches (iterative approximations or step-by-step techniques). In these procedures, determination of formation of plastic sections and change of dynamic properties increase greatly computation process. Furthermore, some mathematical stability problems can arise in application of changing load distribution along the building height due to plastification. For this reasons, development of more effective load increment methods is needed for multi modal and adaptive non-linear static analysis of buildings. In this study, an effective multi modal adaptive load increment method is presented for determination of non-linear behaviour of building type structures under seismic effects. The scope of this study is restricted to plane frame systems. However, essentials of the proposed procedure are general and can be applied to three dimensional systems readily. In the method, lumped plasticity approach is adopted and geometrical non-linearities (second-order effects) are included.

Geometrical non-linearity effects between successive plastic sections and non-linear yield conditions of column elements are linearized. Thus, load increment required for determination of the plastic sections can be determined directly without using the iterative or step-by-step techniques. After formation of each plastic section, the higher mode effects are considered by utilizing essentials of the traditional response spectrum analysis at the linearized regions between successive plastic sections. Changing dynamic properties due to plastification in structural system are used on the calculation of modal lateral loads. Thus, effects of stiffness changes and local mechanism at system on lateral load distribution are included. Earthquake characteristics and changes of modal effectiveness due to plastification in structural system are considered by scaling the modal load distributions with the elastic spectral accelerations. Different scaling approximations for modal loads can be used in each step without any mathematical stability problems in the method. In the study, a new approach is also proposed for the determination of modal lateral loads. In order to evaluate the proposed method, a 15 story RC building frame are analyzed by the proposed method, then compared with Non-linear Dynamic Analysis (NDA) results and FEMA 356 Non-linear Static Analysis (NSA) procedures based on fixed loads distributions (first mode, SRSS and uniform distribution) in terms of floor displacements, story drifts, max. beam plastic rotations, story shears and distribution of plastic sections in the system. Three ground motions that have different frequency content are used in the evaluation. At the end of the evaluations taking the NDA results as reference, it is determined that the proposed method yielded generally better results than all FEMA 356 procedures for all the investigated parameters. The first mode distribution in FEMA 356 yield generally good results at the lower stories, but it is not sufficient for determination of the response quantities at the upper stories. The SRSS distribution proposed in FEMA 356 to consider higher mode effects yield generally good results at the upper stories, but it is not sufficient for determination of the response quantities at the mid and lower stories of the frame. The uniform distribution in FEMA 356 is generally not sufficient for determination of the response quantities at all stories of the frame.

Keywords: Earthquake response of buildings, load increment method, modal adaptive non-linear static analysis, second-order effects, RC buildings.

Giriş

Performansa dayalı tasarım ve değerlendirme yaklaşımının yaygınlaşması ile onun temel aracı olan lineer olmayan statik analiz (pushover analiz) de önem kazanmıştır. Günümüzde, az katlı düzensiz binalar ile çok katlı düzenli ve düzensiz binalar üzerinde yapılan araştırmalar birinci (temel) mod şekli veya buna benzer şekiller ile orantılı yatay yük dağılımlarının monoton olarak arttırılmasını esas alan Geleneksel Lineer Olmayan Statik Analiz (G-LOSA) prosedürlerinin yapıların lineer olmayan davranışını belirlemede yetersiz kaldığını göstermektedir (Krawinkler ve Seravindra, 1998; Kim ve D'Amore, 1999; Mwafy ve Elnashai, 2001; FEMA 440, 2004). Söz konusu yapılarda temel modun yanı sıra yüksek modlar da yapı davranışında etkin olmakta ve/veya yapının modal özellikleri yapıdaki plastikleşmenin mertebesine bağlı olarak büyük değişim gösterebilmektedir. Bu nedenle, bu tür binaların LOSA'inde yüksek mod etkilerinin ve/veya yapının dinamik özelliklerinin plastikleşme nedeniyle değişiminin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Son dönemde bir çok araştırmacı tarafından mevcut geleneksel yöntemlerin eksikliklerini gidermek amacıyla çok modlu ve/veya sistemdeki plastikleşmelere bağlı olarak değişen mod şekillerini (veya sistemin deplasman profilini) gözönüne alan (uyarlamalı) LOSA prosedürleri ortaya konmuştur (Paret vd., 1996; Moghadam, 1998; Gupta ve Kunnath, 2000; Chopra ve Goel, 2001; Elnashai, 2001; Antoniou vd., 2002; Aydınoglu, 2003; Jan vd., 2004). Bu prosedürlerde çoğunlukla, ardışık yaklaşımla veya küçük yük artımlarıyla adım-adım çözüm yaklaşımlarını esas alan geleneksel yük artımı yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çözüm tekniklerinde plastik kesitlerin oluşumunun ve buna bağlı olarak değişen dinamik özelliklerin ayrıntılı olarak belirlenmesi hesap hacmini çok büyük oranda arttırmaktadır. Ayrıca sistemde, plastik kesitler oluşukça yatay yüklerin (modal kat kuvvetlerinin) yapı yüksekliğince dağılımının sürekli olarak değiştirilmesi (önceki adımdaki yük dağılımlarından bağımsız yüklerin kullanılması) bazı matematiksel stabilize problemlerine yol açabilmektedir (Rovithakis, 2001; Elnashai, 2001). Bu nedenlerle, daha etkin çözüm tekniklerinin geliştirilmesine ihtiyaç

duyulmaktadır. Bu çalışmada, bina tipi yapıların çok modlu ve uyarlamalı lineer olmayan statik analizi için etkin bir yük artımı yöntemi sunulmuştur. Önerilen yöntem ile çok katlı betonarme çerçeve bir binanın sayısal analizi yapılmış ve sonuçlar Lineer Olmayan Dinamik Analiz (LODA) ve FEMA 356'da (2000) önerilen LOSA yaklaşımlarından elde edilen sonuçlarla çeşitli parametreler için karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Önerilen yöntem ile yüksek modların etkili olduğu binaların deprem etkisindeki lineer olmayan davranışının, sistemdeki plastikleşmeler nedeniyle özellikleri değişen çok sayıda mod için etkin olarak belirlenebildiği gösterilmiştir.

Çok modlu uyarlamalı yük artımı yöntemi

Varsayımlar

Bu çalışma düzlem çubuk sistemleri içermektedir. Ancak önerilen yöntemin esasları genel olup uzay çubuk sistemlere de uygulanabilecek özelliktedir. Dolgu duvarlar yük olarak göz önüne alınmakta, dayanım ve rijitlik etkileri ihmal edilmektedir. Normal kuvvet ve eğilme momenti etkisindeki çubuk elemanlarda iç kuvvet-deformasyon bağıntı-larının *ideal elasto-plastik* olduğu varsayılmaktadır. Lineer olmayan eğilme ve uzama deformasyonlarının plastik kesit adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bu kesitler dışındaki bölgelerde ve kesme kuvveti etkisi altında sistemin lineer-elastik davrandığı varsayılmaktadır. Akma koşullarının eğilme momentine ve normal kuvvete bağlı olduğu, kesme kuvvetinin akma koşullarına etkisinin terk edilebileceği varsayılmaktadır. Bileşik eğilme etkisindeki elemanlarda (kolonlarda) akma vektörünün akma yüzeyine dik olduğu varsayılmaktadır. *İkinci mertebe etkiler* kolon elemanlarda göz önüne alınmakta, normal kuvvet değerinin küçük olduğu kiriş elemanlarda ise ihmal edilmektedir.

Yöntemin esasları

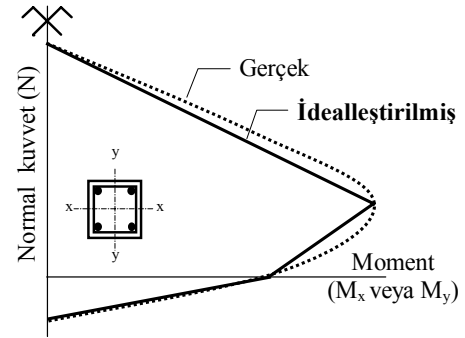
Yöntem, ardışık plastik kesitler arasındaki bölgelerde, sistemin geometri değişimi bakımından lineer olmayan davranışının (ikinci mertebe etkilerin) ve bileşik eğilme etkisindeki kesitler-

de akma koşullarının lineerleştirilmesini ve bu lineerleştirilen bölgelerde geleneksel *davranış spektrumu analizi* esaslarından yararlanılarak yüksek mod etkilerinin gözönüne alınmasını esas almaktadır. Bu amaçla önerilen yöntemde her plastik kesit oluşumundan sonra, modal yatay yükleri belirlemek için serbest titreşim analizi ve üzerinde plastik kesitlerin olduğu sistemin birim modal yük artımı için lineer olmayan analizi yapılmaktadır.

- *İkinci mertebeye etkilerin lineerleştirilmesi*
Binaların deprem davranışının belirlenmesinde, hareketli yüklerdeki değişimin düşey yüklerin değerlerini çok fazla değiştirmemesi nedeniyle analiz genellikle sabit düşey yükler altında ve artan yatay yükler için yapılmaktadır. Bu durumda, elemanlarda düşey yüklerden oluşan normal kuvvet değerleri eleman stabilite fonksiyonlarında kullanılarak ikinci mertebeye etkileri göz önüne alınabilmektedir. Böylece ardışık plastikleşen kesitler arasındaki bölgelerde geometri değişimi bakımından lineer olmayan etkiler lineerleştirilmiş olmaktadır. Çok katlı yapılarda artan yatay yükler ile özellikle alt kat kolonlarındaki normal kuvvetler önemli oranda değişim gösterebilmektedir. Bu durumda analiz sonunda bulunan normal kuvvetler için analizin tekrarlanması gerekmektedir. Ancak bina tipi yapılarda, bir kattaki kolonların normal kuvvetlerinin toplamının genellikle değişmesi nedeniyle, normal kuvvetlerdeki değişimin *ikinci mertebeye etkileri* terk edilebilecek düzeyde olmaktadır (Özer, 1987; İrtem, 1991). Bu nedenle bina tipi yapılarda genellikle analizin tekrarlanmasına gerek kalmamaktadır.

- *Akma koşulları ve lineerleştirilmesi*
İkinci mertebeye etkileri lineerleştirilse de bileşik eğilme etkisindeki elemanların akma koşullarının (karşılıklı etki diyagramlarının) lineer olmayan özellikte olması nedeniyle plastik kesitlerin oluşumu için gerekli yük artımları, ardışık yaklaşım yoluyla veya yüklere küçük artımlar verilerek adım adım analiz yoluyla belirlenebildiği bilinmektedir. Önerilen prosedürde ise düzlem sistemlerin bileşik iç kuvvet etkisindeki kesitlerinde akma koşullarını ifade eden eğrilerin gerçeğe yakın bir şekilde, doğru

parçaları ile idealleştirilmesi öngörülmektedir. Böylece istenilen yük dağılımı için, plastik kesitlerin oluşumu, lineerleştirilen akma koşullarından direkt olarak belirlenebilmektedir. Bu idealleştirmeler istenilen hassasiyet için yeteri kadar doğru parçası ile yapılabilmektedir. Tipik bir betonarme kesit için akma koşullarının idealleştirilmesi Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu lineerleştirme yaklaşımı uzay sistemler için de uygulanabilmektedir. Bu durumda üç boyutlu akma yüzeyleri düzlem parçaları ile idealleştirilmektedir (İrtem, 1991; Girgin, 1996).



Şekil 1. Tipik bir betonarme kesit için akma koşullarının idealleştirilmesi

- *Birim modal yatay yük dağılımlarının hesabı*
Bu çalışmada geliştirilen yöntemde Gupta ve Kunnath (2000) tarafından önerilen prosedürde olduğu gibi, elastik spektral ivmelerin kullanıldığı geleneksel davranış spektrumu analizinin artımsal olarak uygulanması esas alınmıştır. Ancak söz konusu prosedürden farklı olarak, herhangi bir adımdaki modal yatay yüklerin belirlenmesinde yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Buna göre (k) adımdaki modal yükler, bir önceki adımdaki modal yüklere, ilgili (k) adıma ait özellikleri içeren modal yüklerin eklenmesi ile elde edilmektedir (1). Böylece herhangi bir adımdaki modal yüklerin hesabında önceki adımlardaki modal yüklerin etkisi de göz önüne alınabilmektedir. Bu modal yüklerin belirlenmesinde kullanılan modal özellikler ve elastik spektral ivmeler her plastik kesit oluşumundan sonra değişmektedir. Böylece deprem özellikleri ve periyot büyümesi nedeniyle modların birbirine göre etkinliklerinin değişimi de gözönüne alınabilmektedir.

$$F_{ij}^k = F_{ij}^{k-1} + (\Gamma_j^k \cdot \Phi_{ij}^k \cdot m_i \cdot Sa_j^k) \quad (1)$$

Burada, k yük artımı adımını, F_{ij}^k , j nolu modda i nolu kata ait kuvveti, Γ_j^k , j nolu moda ait modal katılım çarpanını, m_i i nolu katın kütlelerini, Φ_{ij}^k , j nolu modda i nolu kata ait özvektör bileşenini, Sa_j^k , j nolu moda ait elastik spektral ivmeyi göstermektedir. Bu spektral ivme değeri, ξ , sönüm oranı ve j nolu titreşim periyodu T_j 'ye bağlı olarak, göz önüne alınan deprem yer hareketine ait elastik ivme spektrumundan alınmaktadır.

Modal yüklerin hesabı için her plastik kesit oluşumundan sonra sistemin serbest titreşim analizi yapılarak, modal özellikleri belirlenmektedir. Hesapları kısaltmak amacıyla sistem rijitlik matrisi kütleli serbestlikleri için yoğunlaştırılmakta ve hesaplarda sadece her kattaki yatay öteleme serbestliğini içeren dinamik rijitlik matrisi kullanılmaktadır. Bu çalışmada serbest titreşim analizi için *Jacobi İterasyonu*'ndan yararlanılmıştır (Bathe, 1996).

- *Birim yük artımı için hesap ve plastikleşen kesit ile davranış büyüklüklerinin belirlenmesi*
Her plastik kesit oluşumundan sonra lineerleştirilen davranış bölgesinde, geleneksel davranış spektrumu analizinde olduğu gibi, gözönüne alınan modlara ait yatay yükler plastik kesitlerin olduğu sisteme bağımsız olarak etkilir ve sistem çözülerek (k) sayılı adıma ait R_j^k birim modal davranış büyüklükleri (deplasmanlar, ötelemeler, iç kuvvetler, plastik deformasyonlar vb.) belirlenir.

Bu çalışmada, üzerinde plastik kesitler bulunan sistemin birim modal yük artımı için hesabında, düzlem çubuk sistemler için Özer (1987) tarafından esasları verilen, uzay çubuk sistemler için İrttem (1991) tarafından geliştirilen ve özel olarak betonarme binalar için Girgin (1996) tarafından geliştirilen etkin prosedürden yararlanılmıştır. Bu etkin prosedürde, her plastik kesitin oluşumundan sonra sistemdeki rijitlik değişimi, plastikleşen kesitteki lineerleştirilen akma koşulunu ifade eden yeni bir lineer denk-

lemin bir önceki adıma ait denklem takımına ilave edilmesi ile ifade edilmektedir. İlave edilen denklemdeki yeni bilinmeyen, plastikleşen kesitteki bağımsız bir plastik deformasyon bileşenini ifade etmektedir. Böylece, bileşik eğilme etkisindeki plastik kesitlerde her yük artımında akma koşulları sağlanmış olmakta ve eğilme ile uzama plastik deformasyonları arasındaki etkileşim de göz önüne alınmış olmaktadır. Bu prosedürde her yük artımında denklem takımının tamamının yeniden kurulup, çözülmesine gerek kalmamaktadır. Bir önceki yük artımına ait çözüm elde edilirken denklem takımının katsayılar matrisi indirgenmiş olduğundan, sadece yeni eklenen denklemin ve göz önüne alınan mod sayısı kadar yüklem matrisinin indirgenmesi ile çözüm elde edilebilmektedir. Böylece, çok sayıda mod için birim yük artımlarından meydana gelen davranış büyüklükleri, etkin bir şekilde belirlenebilmektedir.

R_j^k modal davranış büyüklükleri, ilgili adım için uygun olan kombinasyon kuralı ile birleştirilerek (k) sayılı adım için birim yük artımına ait ΔR_c^k davranış büyüklükleri belirlenir. Böylece plastik kesitlerin oluşumunda modların etkileşimi de gözönüne alınmış olmaktadır. Modal davranış büyüklüklerinin birleştirilmesinde, sistemin titreşim periyotlarının yakınlığı göz önünde bulundurularak "Tam karesel birleştirme" veya "Karelerinin toplamının kare kökü" kurallarından uygun olanı kullanılmaktadır (Chopra, 2001). Bilindiği gibi modal davranış büyüklüklerinin işaretleri, birleştirme işlemi sonunda daima pozitif olmaktadır. Ancak akma koşulları kullanılarak plastikleşen kesitlerin belirlenmesi sırasında kesit tesirlerinin işaretlerinin göz önüne alınması gerekmektedir. Bu nedenle, modal davranış büyüklükleri birleştirildikten sonra etkin modun işareti gözönüne alınmaktadır.

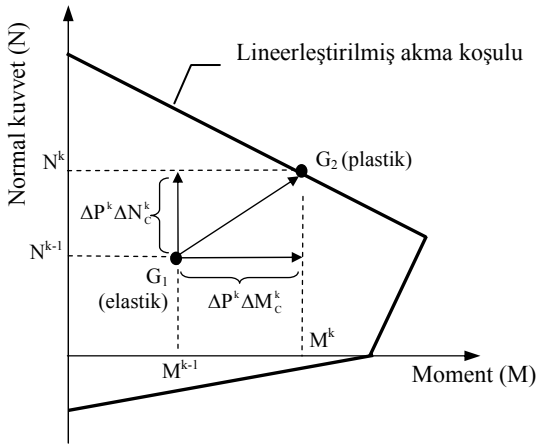
Sistemde (k) sayılı plastik kesitin olduğu yeri belirlemek amacıyla plastikleşme potansiyeli olan kesitlerdeki (kritik kesitler) lineerleştirilmiş akma koşullarından yararlanılır. Bunun için, yalnız eğilme momenti etkisindeki kesitlerde (2) bağıntısı, bileşik eğilme etkisindeki kesitlerde (3) bağıntısı ile ifade edilen akma koşulları

kullanılır (Şekil 2).

$$K(M) = M^{k-1} + \Delta P^k \Delta M_C^k - M_p = 0 \quad (2)$$

$$K(M,N) = a_1 (M^{k-1} + \Delta P^k \Delta M_C^k) + \dots \\ \dots + a_2 (N^{k-1} + \Delta P^k \Delta N_C^k) + b = 0 \quad (3)$$

Bu bağıntılarda, k yük artımı adımını, ilgili kesite ait ΔP^k yük artımı çarpanını, M_p kesitin eğilme momenti taşıma kapasitesini, M^{k-1} ve N^{k-1} ilgili kesitlerdeki eğilme momentlerini ve normal kuvvetleri göstermektedir. İlk yük artımında M^{k-1} ve N^{k-1} düşey yüklerden oluşan eğilme momentlerine ve normal kuvvetlere karşılık gelmektedir. ΔM_C^k ve ΔN_C^k her bir moda ait birim yük artımından dolayı kritik kesitlerde oluşan birim modal değerlerin birleştirilmesi ile elde edilen eğilme momentlerini ve normal kuvvetleri göstermektedir.



Şekil 2. Tipik bir betonarme kesit için yatay yük artımı çarpanının (ΔP^k) belirlenmesi

Sistemdeki tüm kritik kesitler için ΔP^k yük artımı çarpanları hesaplanarak ilgili adıma ait ΔP_{\min}^k en küçük yük artımı çarpanı belirlenir. Böylece, k sayılı adım için plastik kesitin yeri belirlenmiş olur. Bu adım sonunda herhangi bir davranış büyüklüğünün değeri R^k (4) bağıntısı ile elde edilir.

$$R^k = R^{k-1} + \Delta P_{\min}^k \Delta R_C^k \quad (4)$$

- *Yöntemin hesap adımları* Yöntemin hesap adımları aşağıda özetlenmiştir.

1) Malzeme ve enkesit özellikleri kullanılarak elemanların (kolon ve kiriş) moment-eğrilik bağıntıları ve akma koşulları belirlenir. Moment eğrilik bağıntısı ideal elasto-plastik olacak şekilde iki doğru parçası ile, kolonların akma koşulları da istenilen hassasiyete bağlı olarak yeterli kadar doğru parçası ile idealleştirilir.

2) Düşey hesap yükleri için sistemin hesabı yapılarak gerekli davranış büyüklükleri (kesit tesirleri, yerdeğiştirmeler vb.) belirlenir. Bu yükleme altında kolonlardaki normal kuvvet değerleri esas alınarak ikinci mertbe etkiler eleman stabilite fonksiyonlarında gözönüne alınır. Bu yükler altında sistemde plastikleşen kesit oluşup oluşmadığı kontrol edilir. Plastikleşen kesit olması halinde 5. ve 6. adımlardaki işlemler her düşey yük artımı için, düşey hesap yüklerine ulaşıncaya kadar tekrarlanır ve daha sonra modal yatay yük artımları için hesaba başlanır.

3) Sistem rijitlik matrisi, yatay öteleme serbestlikleri için yoğunlaştırılır ve serbest titreşim analizi yapılır. Daha sonra (1) bağıntısı ile göz önüne alınan modlar için modal yatay yük dağılımları belirlenir.

4) Her bir modal yatay yük dağılımı bağımsız olarak sisteme etkilir ve birim modal davranış büyüklükleri (R_j^k) belirlenir. Bunlar uygun modal kombinasyon kuralı ile birleştirilerek birim yük artımı için davranış büyüklükleri (ΔR_C^k) belirlenir. Elde edilen büyüklüklere akma koşullarında kullanılmak üzere etkin moda ait büyüklüklerin işareti verilir.

5) Kritik kesitlerdeki lineerleştirilmiş akma koşulları (2,3) kullanılarak bir sonraki plastikleşen kesitin yeri ve ΔP_{\min}^k en küçük yük artımı çarpanı belirlenir. Daha sonra (4) bağıntısı ile gerekli davranış büyüklükleri (R^k) hesaplanır.

6) Sistem rijitlik matrisi ilgili rijitlik değişimleri için yeniden düzenlenerek 3. hesap adımından itibaren işlemler tekrarlanır. Yük artımına sistemde stabilite yetersizliğinin olduğu limit duruma ulaşıncaya kadar devam edilir. Limit duruma ulaşılması, sistem rijitlik matrisinin determinantının negatif ya da sifıra eşit olması veya kritik deplasmanların (kat yatay deplasmanları vb) işaretlerinin değişmesi ile belirlenebilir.

Yöntemin değerlendirilmesi

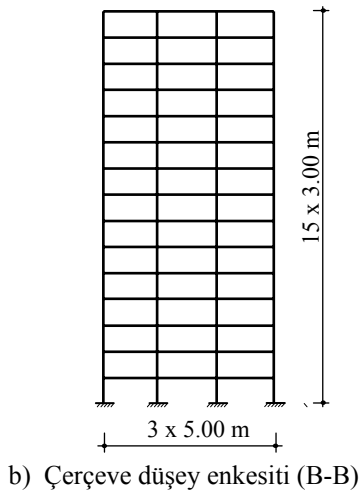
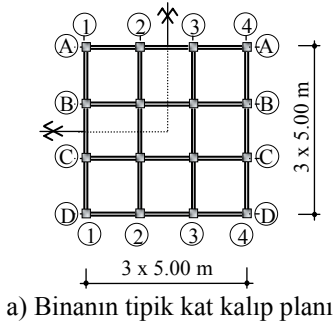
Önerilen yöntemin sonuçları, lineer olmayan dinamik analiz (LODA) sonuçları referans alınarak, FEMA 356'daki sabit yük dağılımlarını (birinci mod, SRSS ve üniform dağılım) esas alan LOSA prosedürlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak yöntemin davranış büyüklüklerini belirlemedeki etkinliği değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarının karşılaştırılmasında göz önüne alınan parametreler kat yatay yerdeğiştirmeleri, görel kat ötelemeleri, maksimum kiriş plastik dönmeleri, kat kesme kuvvetleri ve sistemdeki plastikleşen kesit dağılımlarıdır.

- *Bina modelinin ve deprem yer hareketlerinin özellikleri* Önerilen yöntemin değerlendirme çalışması, yüksek modların etkilerini gözleyebilmek amacıyla 15 katlı düzenli bir betonarme bina üzerinde yapılmıştır.

Geometrisi Şekil 3'de verilen 15 katlı betonarme bina Türk Standartları ve Yönetmeliklerine göre boyutlandırıldıktan sonra, B-B aksı çerçevesinin önerilen yöntemle lineer olmayan anali-

zi yapılmıştır. Betonarme bina süneklik düzeyi yüksek olarak tasarlanmıştır. Binanın B-B aksı çerçevesinin kiriş ve kolon enkesit boyutları ile donatıları Tablo 1'de verilmiştir. Çerçevenin kat kütleleri $m_i = 68.5 \text{ kNs}^2/\text{m}$ ve çatlamış kesitli (efektif rijitlikli) birinci periyodu $T_1=3.02\text{s}$ olarak hesaplanmıştır. Önerilen yöntemin betonarme binalara uygulanabilmesi için betonarme kesitlerin davranışlarının yöntemin esaslarına uygun olarak idealleştirilmeleri gerekmektedir. Bu amaçla kesit ve donatı özellikleri gözönüne alınarak belirlenen eğilme momenti-eğrilik ($M-\chi$) bağıntıları Şekil 4a'da gösterildiği gibi iki doğru parçası ile, gerçek akma koşulları ise simetrik kesitler için Şekil 4b'de gösterildiği gibi güvenli tarafta kalacak şekilde üç doğru parçası ile idealleştirilmiştir. Simetrik olmayan kesitlerde ise benzer karakteristik değerler (M_o , M_d , N_{ob} , $N_{oç}$, N_d) kullanılarak idealleştirme yapılabilir.

Şekil 4a'daki grafikte, M_y kesitin akma momentini, M_p kesitin sabit normal kuvvet altındaki eğilme momenti taşıma kapasitesini, χ_y ve χ_{max}

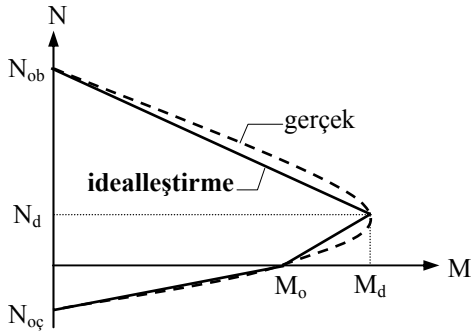
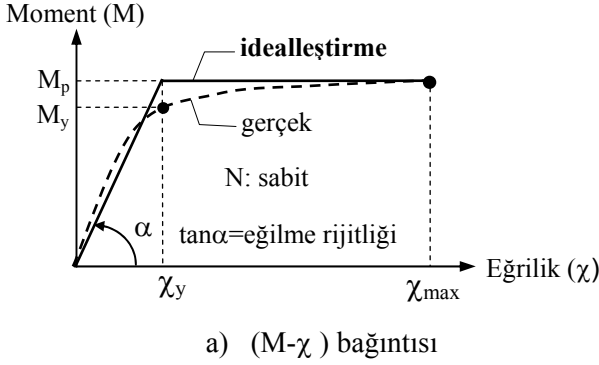


Şekil 3. 15 katlı betonarme binanın geometrisi

Tablo 1. Kiriş ve kolonların enkesit özellikleri

B-B Aksı		Kiriş donatıları (cm ²)		Kiriş boyutları (cm*cm)
Kat	Yer	mesnet (1), (2)	açıklık (1-2), (2-3)	
15	üst	6.28	6.28	25*50
	alt	6.28	6.28	
12-14	üst	9.43	6.28	
	alt	6.28	6.28	
10-11	üst	12.57	6.28	
	alt	6.28	6.28	
7-9	üst	12.57	6.28	
	alt	6.28	6.28	
5-6	üst	12.57	6.28	
	alt	9.43	6.28	
2-4	üst	15.71	6.28	30*60
	alt	9.43	6.28	
1	üst	12.57	6.28	
	alt	9.43	6.28	
Kat	Kolon adı	Kolon donatısı (cm ²)	Kolon boyutları (cm*cm)	
14-15	B1,B4	24.12	35*35	
	B2,B3	16.08	40*40	
11-13	B1,B4	16.08	40*40	
	B2,B3	24.12	45*45	
7-10	B1,B4	24.12	45*45	
	B2,B3	25.12	50*50	
4-6	B1,B4	20.32	50*50	
	B2,B3	40.64	60*60	
1-3	B1,B4	25.12	50*50	
	B2,B3	50.24	70*70	

sırasıyla kesitte plastik deformasyonların başladığı duruma ve kesitin kırılmasına karşı gelen eğrilikleri göstermektedir. Şekil 4b'deki grafikte, N_{oc} ve N_{ob} sırasıyla kesitin çekme kuvveti ve basınç kuvveti taşıma kapasitesini, N_d dengeli kırılmaya karşılık gelen normal kuvveti, M_o ve M_d sırasıyla kesitin eğilme momenti taşıma kapasitesini ve dengeli kırılmaya karşılık gelen eğilme momentini göstermektedir.



Şekil 4. Moment eğrilik bağıntılarının ve akma koşullarını idealleştirilmesi

Kirişlerin ve kolonların efektif (çatlamış) eğilme rijitliklerinin belirlenmesinde Şekil 4a'da verilen idealleştirilmiş (M- χ) moment-eğrilik bağıntısındaki başlangıç rijitliği kullanılmıştır. Kirişler, içindeki donatı yerleşimine bağlı olarak iki mesnet bölgesi ve bir açıklık bölgesi olmak üzere üç eşit uzunlukta bölgeye ayrılmıştır. Her bölgede, düşey işletme yükleri altında oluşan eğilme momentlerine karşılık gelen eğilme rijitlikleri kullanılmıştır. Kolonların eğilme rijitliklerinin belirlenmesinde düşey işletme

yüklerinden oluşan normal kuvvet düzeyleri esas alınmış, artan yatay yükler ile değişen normal kuvvetlerin rijitliğe etkisi ihmal edilmiştir. Kolonların uzama rijitliklerinin belirlenmesinde brüt beton enkesit alanı esas alınmıştır. Bu kesit özelliklerinin belirlenmesinde BEKE-3 (Girgin, 1996) programından yararlanılmıştır. Yöntemin değerlendirilmesi amacıyla, farklı frekans içeriklerine sahip üç deprem yer hareketi kaydı kullanılmıştır (PEER, 2005). Bu depremlere ait özellikler Tablo 2'de, ivme kayıtları ve % 5 sönümlü elastik ivme spektrumları Şekil 5'de verilmiştir.

Tablo 2. Depremlerin özellikleri

Deprem adı	Imperial Valley ABD (1940)	Erzincan Türkiye(1992)	Kocaeli Türkiye(1999)
Bileşen adı	ELC-180	ERZ-DB	SKR-090
Büyüklüğü (M)	7.0	6.9	7.4
Maks. yer ivmesi (g)	0.313	0.496	0.376
Maks. yer hızı (cm/s)	29.8	64.3	79.5
Maks. yer depl. (cm)	13.32	22.78	70.52

- *Analiz özellikleri* Yapılan lineer olmayan statik ve dinamik analizlerde sabit düşey yük olarak (1.0ölü yük+1.0hareketli yük) yüklemesi esas alınmıştır. Önerilen yöntem ile yapılan analizlerde, elde edilen sonuçları değerlendirebilmek amacıyla LODA'lerde kullanılan deprem yer hareketlerine ait ivme spektrumları esas alınmıştır. Önerilen yöntemde çerçevenin bütün titreşim modları gözönüne alınmıştır. Ayrıca, yüksek modların etkinliğini belirlemek amacıyla, çerçevenin 1, 2, 3 ve 4 modlu analizleri de yapılmıştır. Analiz sonuçlarından, yöntemde ilk üç modun gözönüne alınmasının yeterli olduğu, diğer yüksek modların analiz sonuçlarına etkilerinin ihmal edilebilecek düzeyde kaldığı belirlenmiştir. Bu analizlere ait detaylı bilgiler Türker (2005)'den alınabilir. Önerilen yöntemin sayısal uygulamaları MEPARCS bilgisayar programı (Türker, 2005) ile yapılmıştır. Çerçevenin farklı deprem yer hareketi kayıtları için LODA'lerinde sönümün rijitlikle orantılı olduğu

kabul edilmiş ve %5'lik sönüm oranı (ξ) esas alınmıştır. Kiriş ve kolon kesitlerinin *Moment-Plastik Dönme* bağıntılarına ait histeresis matematik model için, statik analizlerdeki kabuller ile uyumlu olacak şekilde *ideal-rijit-plastik* davranış kullanılmıştır. LODA'ler RAM Perform-2D (RAM Int., 2004) programı ile yapılmıştır. Çalışmada FEMA 356 (2000)'da önerilen birinci mod dağılımı, birleştirilmiş modal kat kesme kuvvetleri ile orantılı dağılım (SRSS) ve üniform dağılım için de LOSA yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu dağılımlarda kullanılan yüklerin hesabı aşağıda özetlenmiştir.

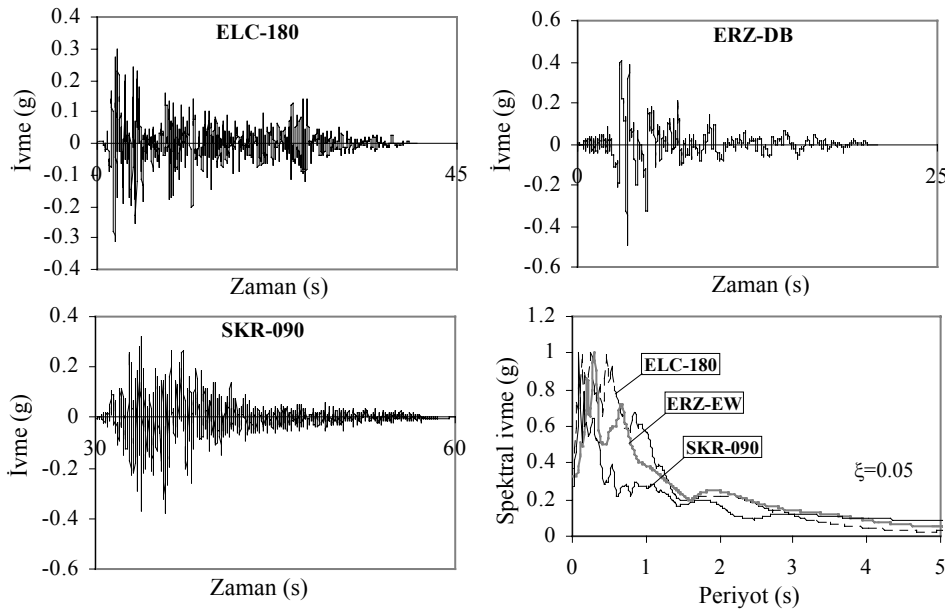
a) *Birinci mod dağılımı*: G-LOSA'lerde kullanılan bu dağılımda birinci elastik mod şekli ile orantılı kuvvetler kullanılmaktadır.

b) *SRSS dağılımı*: Yüksek mod etkisindeki binalar için önerilen bu dağılımda, elastik davranış spektrumu analizinden elde edilen kat kesme kuvvetleri ile orantılı kuvvetler kullanılmaktadır. FEMA 356'da modal kütle katılım oranları toplamı en az %90 olacak sayıda modun gözönüne alınması öngörülmektedir. Bu çalışmada, ilk 4 mod gözönüne alınmış ve spektral ivme (S_a) değerleri ilgili ivme kaydına ait %5 sönümlü elastik ivme spektrumundan alınmıştır.

c) *Üniform dağılım*: Bu dağılımda kat kütleleri ile orantılı kuvvetler kullanılmaktadır.

- *Analiz sonuçlarının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi* Analiz sonuçlarının karşılaştırılması, önerilen yöntemdeki stabilite yetersizliğinin olduğu limit duruma ait davranış büyüklükleri üzerinde yapılmıştır. Bu nedenle LODA'lerde her bir ivme kaydı, ilgili limit değere karşılık gelen çerçeve tepe deplasmanları elde edilecek şekilde ölçeklenmiştir. LODA'lerde deprem süresince elde edilen maksimum değerler esas alınarak en elverişsiz durumu gösteren davranış büyüklükleri referans (kesin sonuç) alınmıştır. Önerilen yöntemden, LODA'lerden ve FEMA 356'daki üç farklı dağılım için yapılan LOSA'lerden elde edilen sonuçlar her bir parametre için Şekil 6-7'de verilen grafiklerde karşılaştırılmıştır. Birinci mod dağılımı, deprem özelliklerinden bağımsız olması nedeniyle her üç deprem için aynı karakteristikte sonuçlar vermiştir. SKR-090 depreminde frekans içeriği bakımından yüksek modlar çok etkin olmadığı için birinci mod dağılımı ile analizde kat kesme kuvvetleri dışında genel olarak iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak ELC-180 ve ERZ-DB depremlerinde yüksek modların etkin olması nedeniyle, çerçevenin üst katlarındaki görelî kat ötelemelerinin ve kiriş plastik dönmelerinin birinci mod dağılımı ile belirlenemediği görülmüştür.

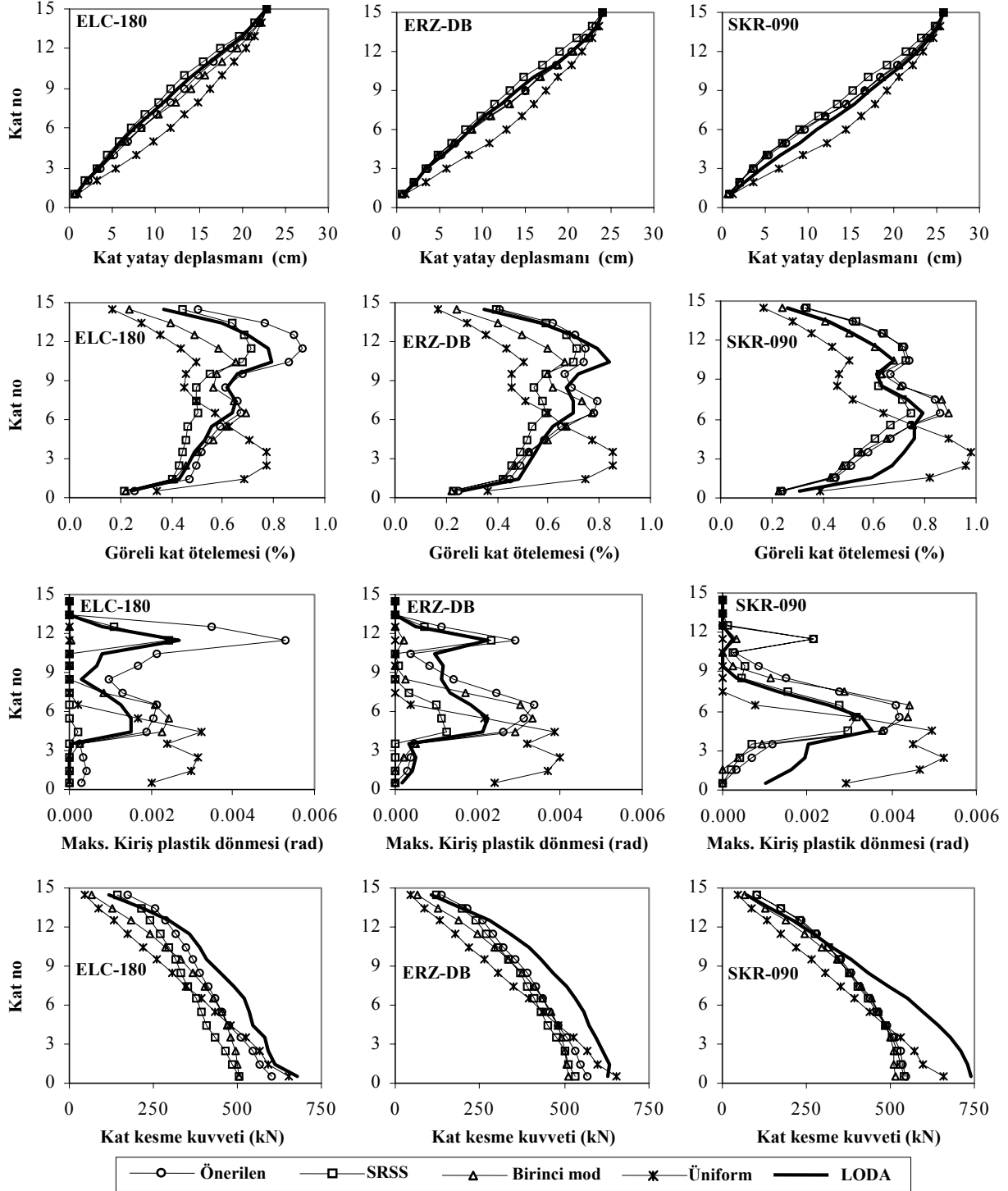
Üniform dağılım da deprem özelliklerinden bağımsızdır ve her üç deprem için aynı karak-



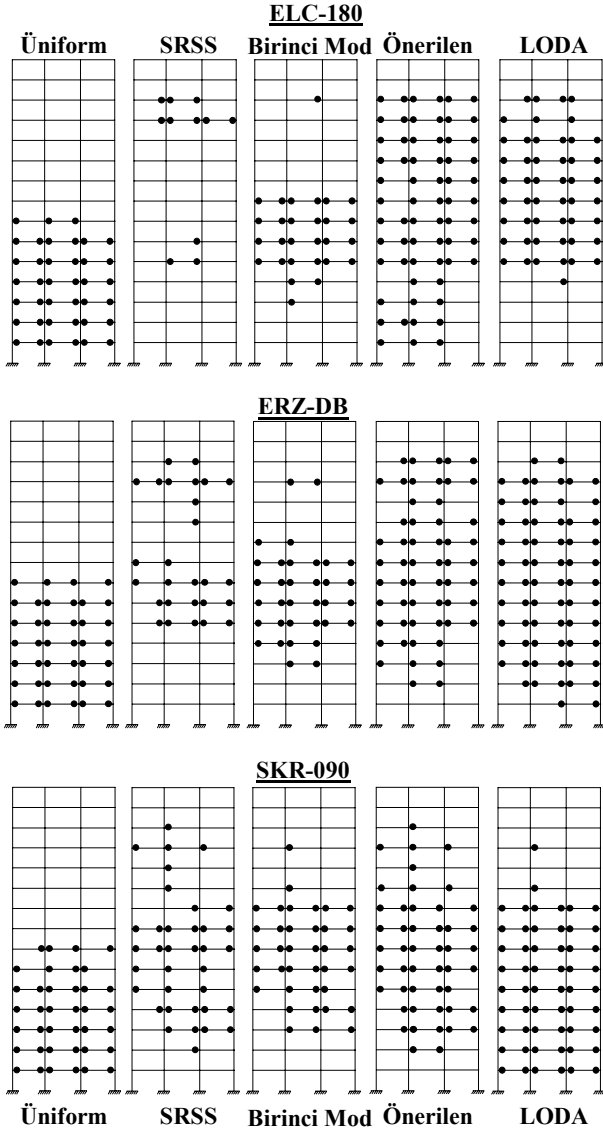
Şekil 5. Deprem yer hareketlerine ait ivme kayıtları ve spektrumları

teristikte sonuçlar vermiştir. Ancak beklendiği gibi, bu dağılımdan elde edilen sonuçların diğer iki dağılımdan ve önerilen yöntemden çok farklı karakterde olduğu görülmüştür. Bu dağılımdan elde edilen davranış büyüklükleri LODA referans (kesin sonuç) alınarak değerlendirildiğinde,

kat yatay yerdeğiştirmelerinin bütün katlarda daha büyük olduğu (Şekil 6), görel kat ötelemeleri ve katlardaki maksimum kiriş plastik dönme melerinin üst katlarda oldukça küçük, alt katlarda ise oldukça büyük olduğu, kat kesme kuvvetlerinin oldukça düşük değerlerde olduğu, sadece



Şekil 6. Kat yatay deplasmanlarının, görel kat ötelemelerinin, maks. kiriş plastik dönmelerinin ve kat kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması



Şekil 7. Sistemdeki plastik kesit dağılımlarının karşılaştırılması

alt birkaç kattaki kesme kuvvetlerinin FEMA 356'daki diğer LOSA ve bu çalışmada önerilen yöntemde ait analiz sonuçlarına göre daha iyi olduğu görülmüştür. Plastikleşen kesit dağılımları incelendiğinde ise üniform dağılımın üst katlarda oluşan plastik kesitleri belirleyemediği görülmektedir (Şekil 7). SRSS dağılımı, ilgili deprem kayıtlarına ait elastik spektral ivmeleri kullanarak, deprem karakteristiklerini gözönüne almaktadır. ELC-180 ve ERZ-DB depremlerinde, yüksek modlar nedeniyle, çerçevenin üst katlarındaki görelî kat ötelemeleri, plastik dönme değerleri ve plastik kesit dağılımları oldukça iyi olarak belirlenebilmektedir. Ancak, Şekil 6-7'de görüldüğü gibi, SRSS dağılımı, çerçevenin

alt ve orta katlarında aynı büyüklükleri belirlemede çok yetersiz kalmaktadır. Önerilen yöntem ile deprem karakteristikleri ve sistemin değişen dinamik özellikleri (periyot büyümesi ve spektral büyüme) gözönüne alınabilmektedir. Bu nedenle hemen hemen incelenen bütün parametreler için LODA ile elde edilen karakteristik sonuçlar oldukça yakın olarak belirlenebilmiştir. Önerilen yöntem sadece ELC-180 depreminde bazı bölgelerdeki plastik dönmeleri LODA'ye göre daha büyük vermiş ve çerçevenin alt katlarındaki kesme kuvvetlerini genel olarak LODA'ye göre küçük vermiştir. Ancak, yüksek modların yöntemde gözönüne alınması nedeniyle, FEMA 356'daki dağılımlara göre oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuçlar

Çalışmada, bina tipi yapıların deprem etkileri altındaki lineer olmayan davranışının etkin bir biçimde belirlenebildiği çok modlu uyarlamalı yük artımı yöntemi sunulmuştur. Önerilen yöntemde, ardışık plastikleşen kesitler arasındaki ikinci mertbe etkileri ve bileşik eğilme etkisindeki kesitlerde akma koşulları lineerleştirilmektedir. Böylece plastik kesitlerin oluşumu için gerekli yük artımı direkt olarak belirlenebilmektedir. Analiz boyunca tüm plastik kesitlerin oluşumu ve modal özelliklerin değişimleri ayrıntılı olarak izlenebilmektedir. Önerilen yöntem, birim yatay yük dağılımı için analizi esas aldığından her adımda yatay yüklerin hesabı için farklı ölçekleme yaklaşımları kullanılabilir. Çalışmada 15 katlı betonarme çerçeve üzerinde, üç farklı deprem yer hareketi kaydı için, lineer olmayan dinamik analiz (LODA) referans alınarak yapılan değerlendirmede; FEMA 356'daki (2000) birinci mod dağılımının genel olarak alt katlarda iyi sonuçlar verdiği, üst katlardaki davranış büyüklüklerini belirlemede ise yetersiz kaldığı görülmüştür. FEMA 356'daki üniform dağılımının ise genel olarak üst katlardaki davranış büyüklüklerini belirlemede yetersiz kaldığı, alt katlarda kat kesme kuvvetlerini düşük verdiği, diğer davranış büyüklüklerine ait değerleri ise çok büyük verdiği görülmüştür. FEMA 356'da yüksek mod etkilerini gözönüne almak amacıyla önerilen SRSS dağılımının üst katlarda iyi sonuçlar

verdiği, ancak alt ve orta katlardaki davranış büyüklüklerini belirlemede çok yetersiz kalabildiği görülmüştür. Bu çalışmada önerilen prosedürün ise incelenen tüm davranış büyüklükleri için genel olarak LODA sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu ve FEMA 356'daki dağılımlara göre (birinci mod, üniform, SRSS) oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak önerilen prosedürün, çok sayıda düzenli ve düzensiz bina örneği ve farklı özelliklerdeki deprem yer hareketi kayıtları ile değerlendirilmesi gerektiği düşünülmekte ve bu nedenle araştırmaya devam edilmektedir.

Kaynaklar

- Antoniou, S., Rovithakis, A. ve Pinho, R., (2002). Development and verification of a fully adaptive pushover procedure, *12th European Conference on Earthquake Engineering*, No.822, London.
- Aydinoğlu, M.N., (2003). An incremental response spectrum analysis procedure based on inelastic spectral displacements for multi-mode seismic performance evaluation, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **1**, 3-36.
- Bathe, J.K., (1996), *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, Englewood Cliffs New Jersey.
- Chopra, A.K. and Goel, R.K., (2001). A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: Theory and preliminary evaluation, PEER Report 2001/03, University of California Berkeley, California.
- Elnashai, A.S., (2001). Advanced inelastic static (pushover) analysis for earthquake applications, *Structural Engineering and Mechanics*, **12**, 51-69.
- FEMA, (2000). Prestandart and commentary for the seismic rehabilitation of buildings FEMA 356, American Society of Civil Engineers, Virginia.
- FEMA, (2004). Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, FEMA 440 (ATC-55 project), Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- Girgin, K., (1996). Betonarme yapı sistemlerinde ikinci mertbe limit yükün ve göçme güvenliğinin belirlenmesi için bir yük artımı yöntemi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gupta, B. ve Kunnath, S.K., (2000). Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures, *Earthquake Spectra*, **16**, 367-391.
- İrtem, E., (1991). Uzay çubuk sistemlerde ikinci mertbe limit yükün hesabı için bir yük artımı yöntemi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Jan, T.S., Liu, M.W. ve Kao, Y.C., (2004). An upper-bound pushover analysis procedure for estimating the seismic demands of high-rise buildings, *Engineering Structures*, **26**, 117-128.
- Kim, S. ve D'Amore, E., (1999). Push-over analysis procedure in earthquake engineering, *Earthquake Spectra*, **15**, 417-434.
- Krawinkler, H. ve Seneviratna, G.D.P.K., (1998). Pross and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation, *Engineering Structures*, **20**, 452.
- Moghadam, A.S., (1998). A pushover procedure for tall buildings, *Proceedings of 12th European Conference on Earthquake Engineering*, No.395, Balkema, Rotterdam, London.
- Mwafy, A.M. ve Elnashai, A.S., (2001). Static pushover versus dynamic collapse analysis of RC buildings, *Engineering Structures*, **23**, 407-424.
- Özer, E., (1987). Determination of the second-order limit load by a method of load increments, *Bulletins of the Technical University of Istanbul*, **40**, 815-836.
- Paret, T.F., Sasaki, K.K., Eilbeck, D.H. ve Freeman, S.A., (1996). Approximate inelastic procedures to identify failure mechanisms from higher mode effects, *Proceedings of Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, No.966, Acapulco.
- Rovithakis, A., (2001). Verification of adaptive pushover analysis procedures, M.Sc. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, UK.
- Türker, K., (2005). Yapıların deprem davranışının belirlenmesi için çok modlu uyarlamalı yük artımı yöntemi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- PEER (Pasific Earthquake Engineering Research Center), (2005). Strong Motion Database, <http://www.peer.berkeley.edu>.
- RAM International, (2004). User guide and element descriptions RAM Perform-2D Ver.1.30, <http://www.ramint.com>.