

Doğrusal olmayan yapısal analiz yöntemlerinin değerlendirilmesi

Armağan KORKMAZ^{*1}, Mustafa DÜZGÜN²

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çünür, Isparta

²Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kaynaklar, İzmir

Özet

Binaların deprem yükleri altındaki doğrusal olmayan davranışlarının belirlenmesinde birçok analiz yönteminden söz etmek mümkündür. Bunlara, doğrusal olmayan artımsal itme ve doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analiz yöntemleri örnek olarak verilebilir. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analiz, sismik davranışı belirlemede en iyi yöntem olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte doğrusal olmayan artımsal itme analizleri de kolaylıkları sebebiyle uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Artımsal itme analizleri, klasik, uyarlanmış ve enerji esaslı olmak üzere üç ana başlık altında toplanabilir. Bu çalışmanın amacı, binaların performansının belirlenmesinde kullanılan doğrusal olmayan artımsal itme analizlerinin, doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analizlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesidir. Bu amaçla çalışmada periyotları farklı, üç açıklıklı, 4, 6, 8 ve 12 katlı dört betonarme çerçeve tipi bina ele alınmıştır. Bu çerçeve tipi binalar için klasik artımsal itme analizleri, dikdörtgen, üçgen (IBC, $k=1$) ve parabol (IBC, $k=2$) yük etkileri altında gerçekleştirilmiştir. Ardından uyarlanmış ve enerji esaslı doğrusal olmayan artımsal itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen artımsal itme eğrileri, farklı 30 deprem verisi ile yapılan doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Klasik, uyarlanmış ve enerji esaslı artımsal itme analizleri, zaman tanım alanında dinamik analiz, betonarme çerçeve tipi binalar.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Armağan KORKMAZ. armagan@mmf.sdu.edu.tr; Tel: (246) 211 11 97.

Makale metni 20.10.2006 tarihinde dergiye ulaşmış, 08.05.2007 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.04.2008 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Evaluation of nonlinear structural analyses

Extended abstract

Nonlinear static procedures are now widely used in engineering practice to predict seismic demands in building structures under earthquake effects. Moreover, some seismic codes including new Turkish design code'06 have begun to consider them to aid in performance assessment of structural systems. The main aim of Performance assessment is to determine the performance target and performance criteria of structures. A critical component of evolving performance-assessment is the accurate estimation of seismic demand parameters. Nonlinear analyses are used in performance assessment. Time History analysis is the most reliable analysis method among the all nonlinear analysis methodologies. However Pushover analysis is become important due to its easy application comparing to time history analysis. It has been employed as a capacity analysis tool for the main purpose of seismic demand estimation. It is possible to mention three different pushover methodologies as classical, adaptive and energy based. With the increase in the number of alternative pushover procedures proposed in recent years, it is useful to identify the potential limitations of these methods and compare and contrast their effectiveness in simulating seismic demands at the structure, story and component level. The main purpose of this study is to evaluate the push over methodologies for frame type structures with different natural periods by comparing to nonlinear dynamic time history analyses. Each building is subjected to 30 near fault ground motions having different characteristics. 4-6-8-12-story frame type structures are selected and dimensioned regarding with the Turkish Design Code. These four structures are typical reinforced concrete (R/C) frame systems. First, classical pushover analysis is applied on the sample frame type structures, then, adaptive and energy based push over analyses are performed. To evaluate the results from the pushover analyses, nonlinear dynamic time history analyses are performed with earthquake ground motions. For the analyses, DRAIN 2DX program is conducted. Different types of loading patterns for classical pushover analyses are considered in the study. These are triangular, rectangular, and parabolic patterns taken from IBC. The lateral load patterns are applied step by step on the structures to sketch the pushover curves. Plastic hinge hypothesis is used to follow the structural behavior. The classi-

cal pushover analysis is based on the lateral load-deformation relationship in the aspect of material and geometric nonlinearity. The adaptive pushover analysis is based on a methodology changing with the inertia distribution for each modal shape and redistribution of loading. In this methodology it is possible to consider the higher mode effects and redistribution of inertia forces. There are so many different applications on adaptive pushover methodology. Chopra and Goel (Modal Pushover Analysis), Antoniou and Pinho, Mwafy and Elnashai, Gupta and Kunnath and Aydinoglu (Incremental Response Spectrum Analysis) methodologies are most important ones. Most of them are based on consideration of the higher mode effects. For the classical and adaptive pushover analyses, energy parameters are not taken into account. Structural damage is stated with the function of the structural displacement. However it is necessary to involve the energy parameters into pushover analyses for more realistic results. Energy based pushover analyses is applied by Montesfirst. Its aim is to consider energy parameters into pushover analyses. The structural displacements are calculated with the work from the pushover analyses. After conducting three different types of pushover methodologies, finally, time history analysis is realized. The displacements are found directly as a result of time history analysis which is not possible with any of pushover analyses. Dynamic loads are applied on the structures directly to get the structural displacement. For more realistic earthquake behavior estimation, more realistic nonlinear analysis is necessary. Therefore, to improve the pushover analyses for more realistic results is the primary focus of the earthquake engineering in the last decade. The importance of the pushover analysis explains the rising interest in recent developments of various methodologies. In this present study, the results of the pushover methodologies are evaluated with the time history analysis. The time history analysis is known as the most reliable nonlinear analysis since earthquake loads are applied on the structures directly in the analysis. As a result of this study, it is observed that, pushover analyses are to be developed for getting more approximate results to time history analysis. Over the three methodologies in pushover analyses, the best fitting result are observed in energy based pushover analysis.

Keywords: Classical, adaptive and energy based pushover analyses, time history analysis, R/C frame type structures.

Giriş

Bu çalışma kapsamında yapısal kapasitelerini belirlemek amacıyla kullanılan doğrusal olmayan artımsal itme ve doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analiz yöntemleri ele alınmış ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Doğrusal olmayan artımsal itme analiz yöntemleri çalışma kapsamında klasik, uyarlanmış ve enerji esaslı olarak sınıflandırılmıştır. Bu analiz yöntemlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesini yapabilmek amacıyla 4, 6, 8 ve 12 katlı betonarme çerçeve tipi binalar seçilerek bu yöntemler ayrı ayrı uygulanmış ve elde edilen kapasite eğrileri, aynı çerçeve tipi binaların zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçlarına göre değerlendirilmiştir.

Doğrusal olmayan artımsal itme analizleri, yapının yatay deprem yükleri altında dayanımını ifade eden kuvvet-yer değiştirme kapasite eğrisinin elde edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Kapasite eğrileri kat seviyelerinde artımsal yatay yükler uygulanarak elde edilir. Bu yükleme işlemine yapının stabilitesi bozuluncaya veya belirlenen bir sınır yer değiştirme değerine ulaşıncaya kadar devam edilir. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analizde ise yapıya deprem kuvveti doğrudan verilerek dinamik analiz gerçekleştirilir. Bu analiz, belirli bir yer hareketinin zaman tanım alanındaki kaydı ile yapıda meydana gelen elastik ötesi davranışı elde etmek için kullanılmaktadır ve doğrusal olmayan analizler içinde en gerçekçi analiz olarak tanımlanmaktadır. Ancak bu analizin zahmetli ve karmaşık olması sebebiyle yapıların performansına bağlı analizlerinde artımsal itme analizlerinin kullanılması tavsiye edilmektedir (FEMA, 2005).

Ülkemizde, Deprem Yönetmeliğine 2006 yılında mevcut yapıların deprem davranışlarının değerlendirilmesi amacıyla ilaveler yapılmıştır. ‘Doğrusal elastik’ ve artımsal itme analizlerinin kullanıldığı ‘doğrusal elastik olmayan’ şeklinde iki analiz yöntemi sunulmuştur (ABYYHY, 2006). Bu yöntemlerle mevcut yapıların deprem davranışlarının daha gerçekçi şekilde değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Yönetmelik kapsamında binaların deprem performanslarını tanım-

lamak için belirli performans aralıkları ve seviyeleri de tanımlanmıştır.

Doğrusal olmayan artımsal itme analizleri

Daha gerçekçi deprem değerlendirmeler yapabilmek amacıyla günümüzde birçok artımsal itme analizi yöntemi geliştirilmiştir ve konuyla ilgili çalışmalar halen devam etmektedir.

Artımsal itme analizlerinin bir takım eksiklikleri mevcuttur. Örneğin çok güçlü bir teorik alt yapısı yoktur. Ayrıca yapının dinamik etkilerinden kaynaklanan kinetik ve viskoz sönüm enerjileri ihmal edilmektedir. Analiz kuvvet bazlıdır ve önemli yapısal bozuklukların olması durumunda yanlış sonuçlar verebilmektedir (Lefort, 2000). Bu sorunların bir kısmı yüksek mod etkilerinin dikkate alınmaması durumunda daha da artmaktadır. Artımsal itme analizleri statik bir yaklaşım olduğu için zaman ve toplam enerji etkileri ihmal edilmektedir. Yapısal hasar, sadece yapının yanal yer değiştirmesinin fonksiyonudur. Dolayısıyla, artımsal itme analizi dinamik yüklemenin önemli etkilerini dikkate alamamaktadır. Ancak, tüm bu olumsuzluklara rağmen zaman tanım alanında dinamik analizin uygulamadaki zorlukları sebebiyle alternatif bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

Klasik artımsal itme analizleri

Klasik artımsal itme analizlerinde, yapı malzemesinin doğrusal elastik ötesi davranışı ve/veya büyük yer değiştirmelerin meydana gelmesi durumları göz önüne alınır. Yapının elastik ötesi davranışı incelenirken klasik artımsal itme analizlerinde belirli yanal yük dağılımları kullanılarak artımsal itme analizleri yapılır (Korkmaz, 2005; Korkmaz ve Düzgün, 2005). Yapının mevcut düşey yükler altında davranışı incelenir. Herhangi bir kesitte plastik mafsall oluşmaması istenir. Daha sonra bu yapıya yatay yükler etkililir. Yapıya etkililen yatay yükler adım adım arttırılarak plastik mafsalların oluşmalarının sıraları belirlenir. Klasik artımsal itme analizlerinde yük şekilleri belirlenerek yapı bu yük şekliyle yüklenerek tüm analiz boyunca değişmeksizin itilir. Yanal yük dağılımının seçimine

göre plastik mafsallı oluşum sırası değiştiği için artımsal itme analizleri farklı sonuçlar vermektedir. Yük dağılımının uygun olması yapının doğrusal olmayan davranışının daha gerçekçi olarak ifade edilmesini sağlar. Doğrusal olmayan artımsal itme analizi temel olarak, yapının yatay kuvvetler altındaki dayanımını ifade eden yatay kuvvet-yer değiştirme ilişkisinin, malzeme ve geometri değişimi bakımından elde edilmesine ve bunun değerlendirilmesine dayanmaktadır (Li, 1996). Artımsal itme analizleri, taban kesme kuvveti/yapı ağırlığı (V/W) oranıyla tepe yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi gösteren eğrileri elde etmek amacıyla yapılır.

Uyarlanmış artımsal itme analizleri

Uyarlanmış artımsal itme analizleri deprem kuvvetlerinin dağılımındaki her bir mod için atalet kuvveti dağılımını kullanan bir elastik ötesi analiz yöntemidir. Uyarlanmış artımsal itme analizlerinde, artımsal itme eğrilerinin elde edilmesinde yüksek mod etkileri dikkate alınmaktadır. Uyarlanmış artımsal itme analizlerinde birçok yaklaşım mevcuttur. Bu yaklaşımlardan en önemlilerinden biri Chopra ve Goel (2001) tarafından öne sürülen “Modal Pushover” MPA olarak adlandırılan uyarlanmış artımsal itme analizidir. Bunun yanı sıra Mwafy ve Elnashai (2001) birleştirilmiş mod yöntemini öne sürmüşlerdir. Gupta ve Kunnath (2000) çok modlu analiz için geliştirdikleri programlarla uyarlanmış artımsal itme analizini gerçekleştirmişlerdir. Aydınoglu (2003), ARSA (Artımsal Spektrum Analizi) yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntemin esası modal kapasite diyagramları adı verilen modal çevrimsel eğrilerinin iskelet eğrileri olarak tanımlanan diyagramların yaklaşık olarak elde edilmesine dayanmaktadır. Bu diyagramlar çok modlu itme analizinin her adımında hesaplanan doğrusal olmayan spektral yer değiştirmelere bağlı olarak tanımlanmaktadır. Antoniou ve Pinho (2004), “Adaptive Pushover” olarak yanal yük dağılımının sürekli olarak değiştiği bir yöntem geliştirmişlerdir. Çok modlu analiz yöntemlerinde yanal yüklemeler klasik yöntemde olduğu gibi adım adım arttırılarak uygulanmaktadır. Her ardışık adımda modal analiz yapılarak mod şekilleri ve modal katılım oranları bulunarak bunların değişimine

göre yeni yük dağılımı belirlenir ve gene her adımda bu yeni yük dağılımıyla işlemler tekrarlanır. Uyarlanmış artımsal itme analizleri klasik artımsal itme analizlerine göre daha karmaşık ve zahmetlidir. Uyarlanmış artımsal itme analizleri sayesinde yüksek mod etkileri ve buna ilaveten yapıda zorlamalar sonucu meydana gelen akma ve çatlama sonucunda atalet kuvvetlerinin yeniden dağılımı dikkate alınabilmektedir. Yük dağılımı, rijitlik azalımı dikkate alınarak her adımda yenilenmektedir. Özellikle, yapılarda düzensizlik olması durumunda veya yapı yüksekliğinin fazla olması durumunda uyarlanmış artımsal itme analizi, klasik artımsal itme analizlerine göre daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Bu analizler yeni geliştirilmekte olduğu için bilgisayar programlarıyla dahi bu analizleri gerçekleştirmek oldukça zahmetlidir. Yöntemin iyi sonuç vermesi için analizde yeterli sayıda mod kullanılması gereklidir.

Enerji esaslı artımsal itme analizleri

Uyarlanmış artımsal itme analizlerinin ötesinde günümüzde enerji parametrelerini de dikkate alan yöntemlerin geliştirilmesi için çalışmalar hız kazanmıştır. Enerji esaslı artımsal itme analiz yöntemi, ilk olarak Montes ve arkadaşları (2004) tarafından ortaya atılmıştır. Bu yöntem, artımsal itme eğrisi elde edilirken yer değiştirme ekseninde tepe yer değiştirme değerinin yerine yapı tarafından tüketilen enerjiden elde edilen yer değiştirmenin kullanılması üzerine kurulmuştur. Yapı tarafından tüketilen enerji, uyarlanmış artımsal itme analizinde her adımda elde edilmektedir. Enerji esaslı artımsal itme analizinde, yapının yer değiştirmesi, artımsal itme analizinden elde edilen iş ile hesaplanmaktadır. V/W değeri ise uyarlanmış artımsal itme analizinden elde edilmektedir. Deprem sırasında yapının tükettiği enerji, Uang ve Bertero (1998) tarafından yer değiştirmeye bağlı olarak entegrasyon ifadesiyle verilmiştir.

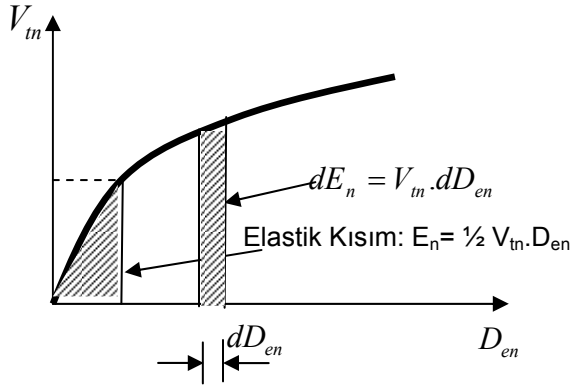
Şekil 1’de elastik haldeki D_n ’e karşı gelen V_{tn} çizdirilmiştir. $D_{en} = 2E_n/V_{tn}$ halinde yazılabilir. Çünkü elastik halde, $D_{en} = D_n$ ’dir (Montes vd., 2004). Şekil 2a’da; $\frac{V_{tn}}{W}$ ’a karşı Δ_n ’in gösterdiği

klasik artımsal itme eğrisi, 2b'de, $\frac{V_m}{\alpha_n W}$ 'e karşı

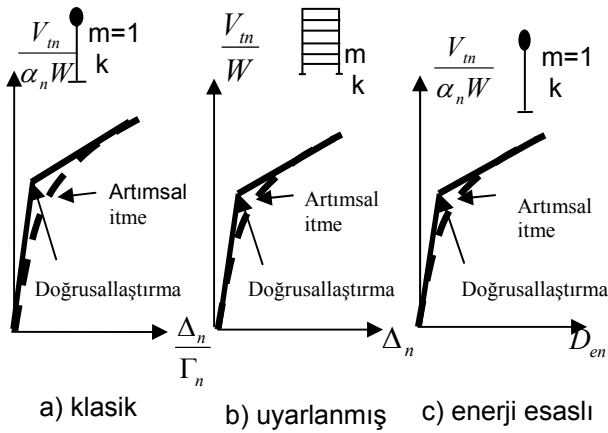
$\frac{\Delta_n}{\Gamma_n}$ 'in gösterdiği uyarlanmış artımsal itme eğrisi

ve 2c'de ise $\frac{V_m}{\alpha_n W}$ 'e karşı D_{en} 'in gösterdiği

enerji esaslı artımsal itme eğrisi şematik olarak çizdirilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü gibi üç farklı artımsal itme analizi üç farklı artımsal itme eğrisi vermektedir.



Şekil 1. Elastik ve elastik ötesi kısımda dD_{en} 'in gösterimi ve hesaplanması



Şekil 2. Artımsal itme analizleri

Enerji esaslı artımsal itme analizi yönteminin diğer artımsal itme analizlerine göre üstünlüğü enerji parametrelerinin de analizlere dahil edilmesidir. Diğer artımsal itme analizlerinde enerji parametreleri analizlere girmemektedir. Bu nedenle enerjinin tüketilmesinden kaynaklanan etkiler dikkate alınamamaktadır.

Doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analiz

Doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analiz, belirli bir yer hareketinin zaman tanım alanındaki ivme kaydı ile yapıda meydana gelen elastik ötesi davranışı elde etmek için kullanılmaktadır (FEMA, 2005). Doğrusal olmayan artımsal itme analizinin aksine bu yöntemle deprem sırasındaki yer değiştirme talepleri doğrudan elde edilebilmektedir. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analiz, depremin tersinir etkisini temsil edebildiği için doğrusal olmayan artımsal itme analizine göre daha doğru sonuçlar vermektedir (Li, 1996). Ancak uygulamadaki zorlukları sebebiyle doğrusal olmayan artımsal itme analizleri mühendislerce tercih edilmektedir.

Doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analizlerde, depremlere ait kesin ivme kayıtları kullanılmaktadır. Hareket denklemleri, yapının kütle ve rijitlik karakteristiklerinin ifade edilmesi için gerekli olan serbestlik derecesi kadar kurulabilir. Yapının sismik davranışı önemli birkaç yanal yer değiştirme moduyla ifadelendirilebilir. Örneğin, deprem sırasında yapıların en büyük tepe yer değiştirmeleri, %90 mertebesinde ilk veya hakim moduyla belirlenebilmektedir. Bu nedenle hareket denklemini fiziksel halden doğal koordinatlara getirmek daha uygun olabilir. Matematiksel olarak doğrudan entegrasyon modeliyle zaman tanım alanında analiz yapılabilmektedir. Doğrudan entegrasyon yöntemi, zaman tanım alanında dinamik analizler için en doğru sonuçları veren yöntemdir. Bu yöntemde, dinamik yükler yapıya Δt zaman aralıklarında artımsal olarak etkitilmektedir. Zaman tanım aralığında denklemlerin çözümü nümerik olarak doğrudan entegrasyon yöntemiyle gerçekleştirilmektedir.

Doğrusal olmayan analizlerin karşılaştırılması

Seçilen örnek betonarme çerçeve tipi binalar üzerinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan artımsal itme analiz yöntemlerinden elde edilen kapasite eğrileriyle zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Buna

bağlı olarak da artımsal itme analizlerinin değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Böylelikle zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçlarına en yakın sonucu veren artımsal itme analizi yönteminin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Seçilen örnek betonarme çerçeve tipi binalar

Şekil 6'da açıklık, yükseklik ve en kesit boyutları verilen örnek betonarme çerçeve tipi binalar, ABYYHY, 1998 ve TS500'e (2000) göre boyutlandırılmıştır. Analizlerde yatay yüklerin hesaplanmasında yapı önem katsayısı 1 olarak alınmıştır. Kolonların zemine tam ankastre mesnetlendiği kabulü yapılmıştır. Hesaplarda donatı karakteristik akma dayanımı $f_y=420\text{MPa}$ (S420), beton karakteristik basınç dayanımı ise $f_c=20\text{MPa}$ (C20) olarak alınmıştır.

4 katlı betonarme çerçeve tipi binanın kirişleri $30\times 60\text{ cm}$, kolonları $40\times 40\text{ cm}$ ve doğal periyodu 0.54 s 'dir. 6 katlı çerçeve tipi binanın kirişleri $30\times 60\text{ cm}$, kolonları $50\times 50\text{ cm}$, doğal periyodu 0.72 s 'dir. 8 katlı çerçeve tipi binanın kirişleri $30\times 60\text{ cm}$ kolonları $60\times 60\text{ cm}$, doğal periyodu 0.90 s 'dir. 12 katlı çerçeve tipi binanın kirişleri $30\times 60\text{ cm}$, kolonlar $80\times 80\text{ cm}$, doğal periyodu 1.10 s 'dir. Çerçeve tipi binalara ait özellikler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Doğrusal olmayan analizlerde yapılan kabuller

Çalışma kapsamında doğrusal olmayan analizlerde DRAIN-2DX bilgisayar programı kullanılmıştır (Prakash vd., 1993). Yapılan analizlerde ve kullanılan programdaki kabuller şöyledir;

1. Her düğüm noktası için üç serbestlik derecesi dikkate alınmıştır.
2. Çerçeve tipi binaların modellemesinde kiriş ve kolonlar çubuk elemanlar olarak alınmıştır.
3. Kütlelerin düğüm noktalarında topaklandığı kabul edilmiştir.
4. Betonarme kiriş ve kolon elemanların çevrimsel davranışları düğüm noktalarında tanımlanmıştır.
5. Kesit özellikleri ve moment-eğrilik ilişkisi programa dışardan verilmiştir (Şekil 3).

6. Deprem hareketleri, zaman tanım aralığında tanımlanmaktadır ve yer ivmesi değerleri programa veri olarak sunulmuştur.

7. Dinamik analizler, adım adım artımsal entegrasyon yöntemiyle yapılmıştır.

8. P- Δ ikinci mertebeye etkileri, yatay düzlemdeki yer değiştirmeler dikkate alınarak geometrik doğrusal olmayan analizler dahil edilmiştir.

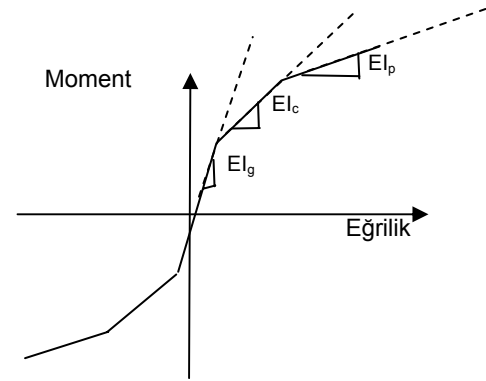
9. Eğilme ve kesme etkileri yer değiştirmelerin hesaplanmasında dikkate alınmıştır.

10. Kirişlerde ve kolonlarda eksenel şekil değiştirmeler ihmal edilmiştir.

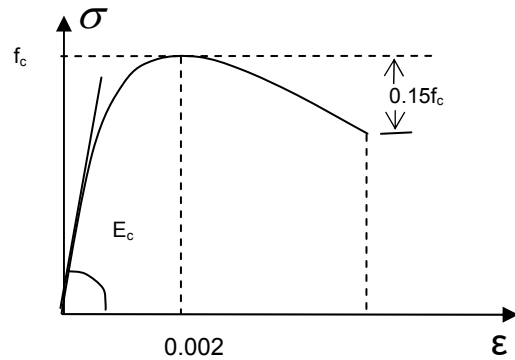
11. Deprem kuvvetinin etkimesi sırasındaki rijitlik değişimleri dikkate alınmıştır.

12. Hognestad malzeme modeli kullanılmıştır (Şekil 4).

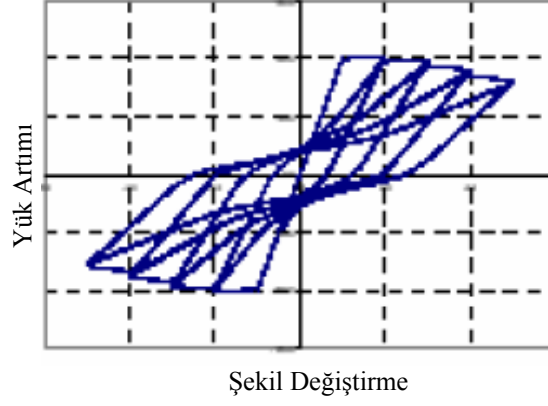
13. Kiriş, kolon elemanların yük-şekil değiştirme ilişkisi ise Şekil 5'te verilmiştir (Prakash vd., 1993).



Şekil 3. Betonarme elemanlar için DRAIN-2DX'de verilen moment-eğrilik ilişkisi



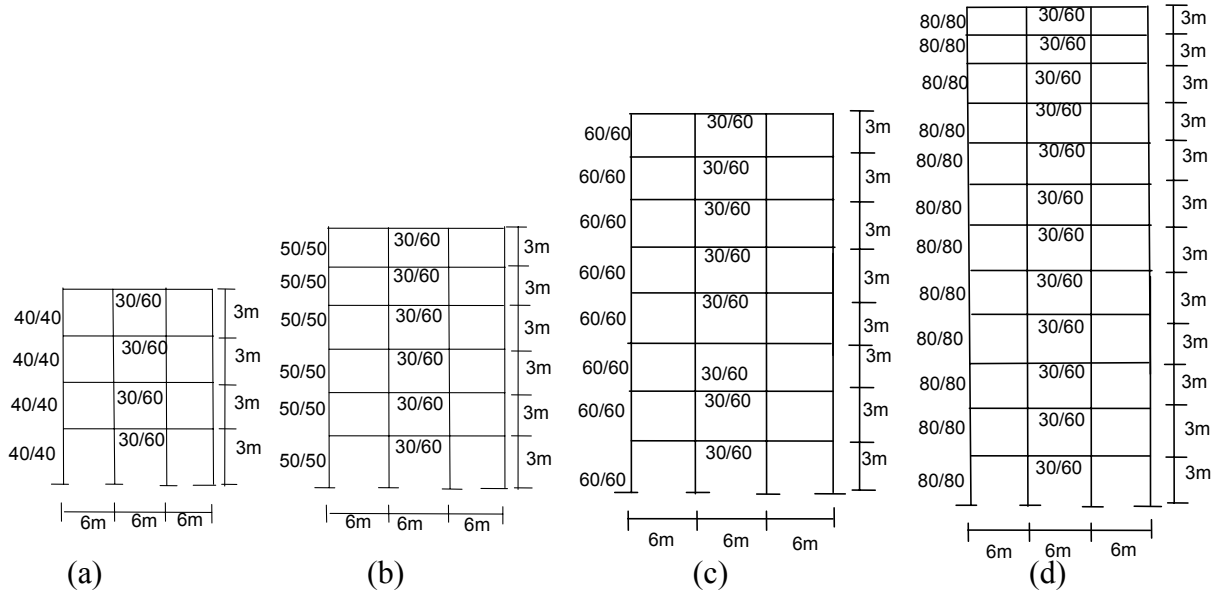
Şekil 4. Hognestad modelinde $\sigma - \epsilon$ eğrisi



Şekil 5. Betonarme kiriş-kolon yük-şekil değiştirme davranışı

Tablo 1. Örnek betonarme binaların özellikleri

	4 Katlı	6 Katlı	8 Katlı	12 Katlı
Periyot (s)	0.54	0.72	0.90	1.10
Kat adedi	4	6	8	12
Açıklık sayısı	3	3	3	3
Kat yükseklikleri (m)	3	3	3	3
Açıklık mesafeleri (m)	6	6	6	6
Kolon Boyutları ve Donatıları	40x40 As = 3040 mm ²	50x50 As = 4520 mm ²	60x60 As = 7500 mm ²	80*80 As = 14500 mm ²
Kiriş Boyutları ve Donatıları	30x60 As = 4500 mm ²	30x60 As = 4500 mm ²	30x60 As = 4500 mm ²	30x60 As = 4500 mm ²
f_c (Betonun Basınç Dayanımı)	20 MPa	20 MPa	20 MPa	20 MPa
f_y (Çeliğin Akma Dayanımı)	420 MPa	420 MPa	420 MPa	420 MPa

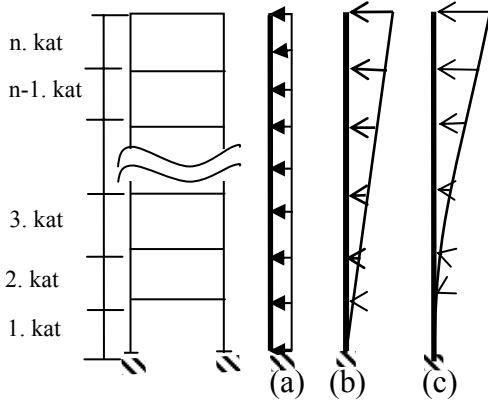


Şekil 6. Analizlerde kullanılan örnek binaların şematik gösterimi

Örnek betonarme çerçeve tipi binaların doğrusal olmayan artımsal itme analizleri

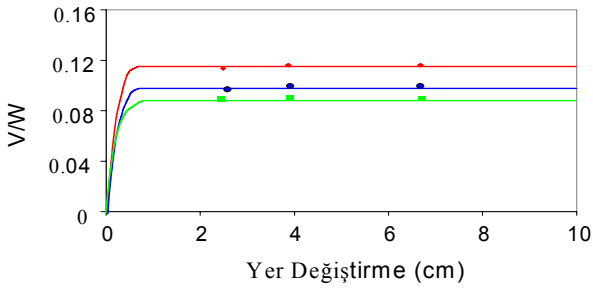
Klasik artımsal itme analizleri

İtme analizlerinde yanal yüklemeler, tepe yer değiştirmeleri, 4, 6 ve 8 katlı binalarda 50 cm'e; 12 katlı binada ise 100 cm'e ulaşıncaya kadar arttırılmıştır. Elastik olmayan etkiler eleman uç noktalarında plastik mafsallarla tanımlanmıştır. Donatı pekleşmesi tüm elemanlar için ihmal edilmiştir. Şekil 7'de yükleme tipleri verilmiştir.

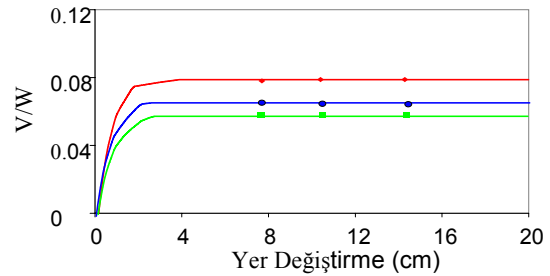


Şekil 7. (a) Dikdörtgen, (b) Üçgen, (c) Parabol yüklemelerinin şematik gösterimi

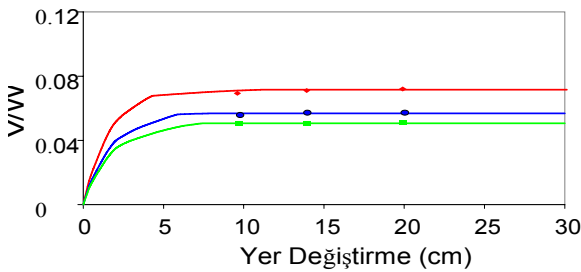
Kiriş ve kolon elemanları için çatlamış kesit atalet momenti I_c , kesit atalet momenti, I_g , değerinin yarısı alınmıştır. Artımsal itme analizleri seçilen betonarme çerçeve tipi binalar için, dikdörtgen, üçgen (IBC, $k=1$) ve parabol (IBC, $k=2$) yük dağılımı dikkate alınarak her bir çerçeve tipi bina için gerçekleştirilmiştir (IBC, 2000). Şekil 8'de klasik artımsal itme analizi sonuçları grafikler halinde verilmiştir. Grafikler, her yükleme dağılımı ve taban kesme kuvveti/yapı ağırlığı oranının; yer değiştirmeye karşı çizilen eğrileridir. Dikdörtgen yük dağılımları diğer yük dağılımlarıyla karşılaştırıldığında daha büyük etki yüküne sahip olduğundan, yapısal davranışta tüm mod katkılarını dikkate alan yükleme tipini temsil etmektedir. Kapasite eğrilerini (artımsal itme eğrilerini) elde edebilmek için, yapının malzeme ve geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan teoriye göre elastik ötesi artımsal itme analizi yapılmıştır. İncelenen örnek binalar üzerinde dikdörtgen, üçgen (IBC, $k=1$) ve parabol (IBC, $k=2$) yük dağılımları kullanılmıştır. Burada k , yapının analizinde periyoduna bağlı olarak yük dağılımı için kullanılan katsayıdır (IBC, 2000).



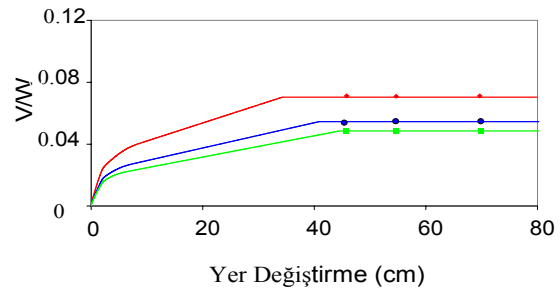
a) 4 Katlı bina klasik artımsal itme eğrileri



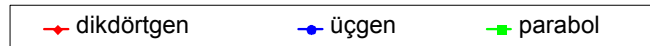
b) 6 Katlı bina klasik artımsal itme eğrileri



c) 8 Katlı bina klasik artımsal itme eğrileri



d) 12 Katlı bina klasik artımsal itme eğrileri



Şekil 8. Tüm betonarme çerçeve tipi binaların çatı katı artımsal itme eğrileri

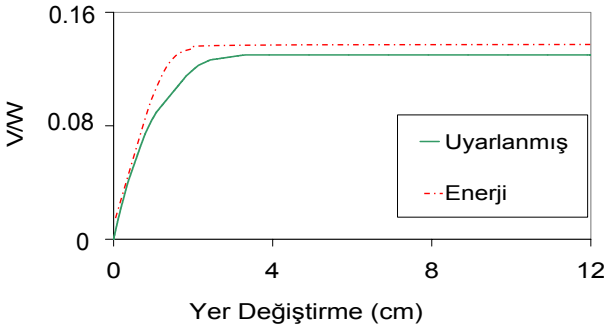
Uyarlanmış ve enerji esaslı artımsal itme analizleri

Çalışma kapsamında uyarlanmış artımsal itme ve enerji esaslı artımsal itme analizleri seçilen örnek binalar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Uyarlanmış artımsal itme analizlerinde yüksek mod etkileri dikkate alınmış, yanal yüklemeler sabit tutulmayarak, sürekli olarak mod şekillerine ve özdeğer analizlerinden elde edilen mod katılım faktörlerine göre arttırılmıştır. Birçok uyarlanmış artımsal itme analizi yönteminden bahsetmek mümkündür. Bu çalışma kapsamında uyarlanmış artımsal itme eğrilerini elde etmek için Chopra ve Goel (2001) tarafından geliştirilen yöntem uygulanmıştır. Enerji esaslı artımsal itme analizlerinde enerji parametreleriyle yer değiştirme değerleri belirlenmiş, V/W değerleri ise uyarlanmış artımsal itme analizinden elde edilen değerler olarak alınmıştır. Bu iki analiz sonuçlarından elde edilen eğriler Şekil 9'da çizdirilmiştir. Bu grafiklerden yer değiştirmeler belirlenmiştir.

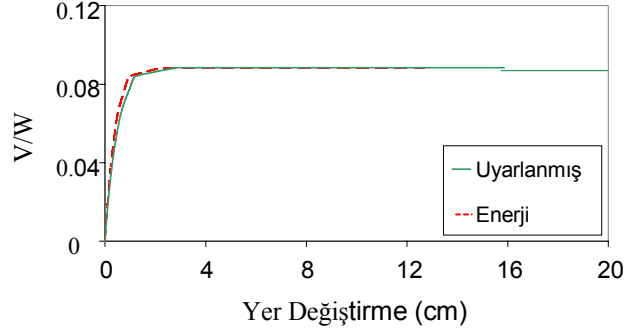
Bu grafikler, uyarlanmış ve enerji esaslı artımsal itme analizlerinin gerçekleştirilmesiyle çizdirilmiştir. Çalışma kapsamında uygulanan enerji esaslı artımsal itme analizlerinde Montes ve diğerleri (2004) tarafından geliştirilen yöntem uygulanmıştır. Artımsal itme analizlerinde kullanılan betonarme çerçeve tipi binalar, zati ve hareketli yük etkileri altında, $P-\Delta$ etkileri de dikkate alınarak zaman tanım alanında dinamik analizlerde de kullanılmıştır.

Doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analiz

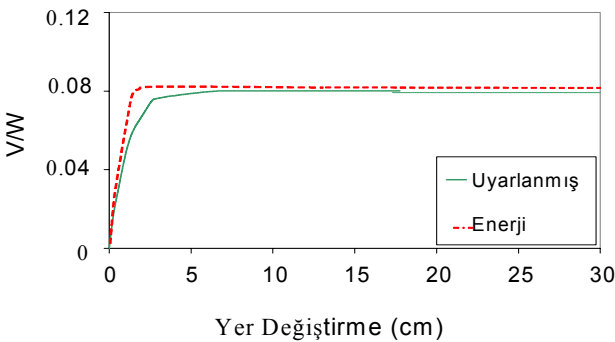
Çalışma kapsamında artımsal itme analizlerinin değerlendirilmesi amacıyla zaman tanım alanında dinamik analizler, örnek betonarme çerçeve tipi binalar üzerinde 30 deprem verisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Artımsal itme analizlerinde kullanılan betonarme binalar, zati ve hareketli yük etkileri altında, $P-\Delta$ etkileri de dikkate alınarak zaman tanım alanında dinamik analizlerde de kullanılmıştır.



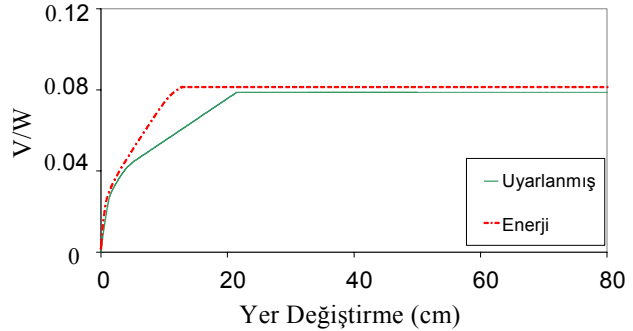
a) 4 Katlı bina uyarlanmış ve enerji esaslı artımsal itme eğrisi



b) 6 Katlı bina uyarlanmış ve enerji esaslı artımsal itme eğrisi



c) 8 Katlı bina uyarlanmış ve enerji esaslı artımsal itme eğrisi



d) 12 Katlı bina uyarlanmış ve enerji esaslı artımsal itme eğrisi

Şekil 9. Betonarme çerçeve yapıların uyarlanmış ve enerji esaslı artımsal itme analizleri

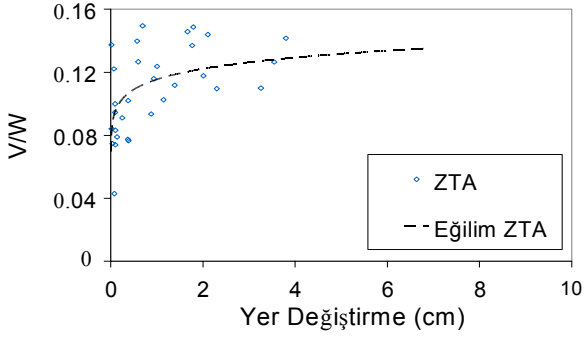
Zaman tanım alanında dinamik analiz için özellikleri farklı Tablo 2’de detayları verilen deprem verileri kullanılmıştır. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analizlerin gerçekleştirilmesi için kullanılan deprem verilerinin elde edilmesi için PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) sayfası kullanılmıştır (<http://peer.berkeley.edu>). Kullanılan deprem kayıtları, “Anza (Horse Canyon), Parkfield, Morgan Hill, Kocaeli, Coyote Lake, Palm Springs, Northridge, Santa Barbara, Imperial Valley, Kobe, Central Lytle Creek Whittier

Narrows, Hollister California, Westmoreland, Landers, Livermore ve Cape Mendocino” depremlerine aittir.

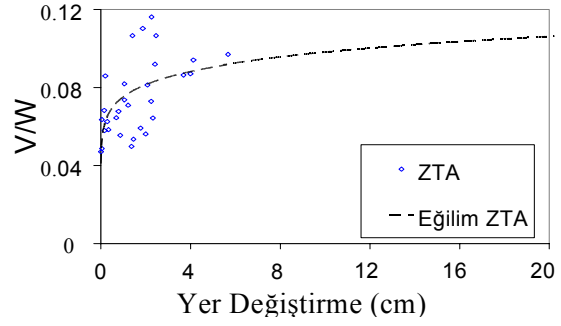
B Zemin sınıfı için deprem kayma dalgası hızı, 360 m/s ile 750 m/s arasındadır. Bu zemin sınıfına göre her bir 30 deprem verisiyle yapılan zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçları ile, dikdörtgen, üçgen (IBC, $k=1$), parabol (IBC, $k=2$) yükleme tiplerine bağlı klasik artımsal itme, uyarlanmış artımsal itme ve enerji esaslı artımsal itme analiz sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 10’da sunulmuştur.

Tablo 2. Zaman tanım alanında dinamik analizlerde kullanılan deprem verileri

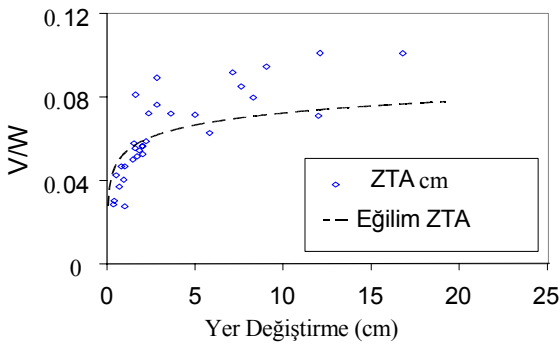
No	Deprem	Tarih	(M_w)	Kayıt	Yer Hızı (cm/s)	Yer ivmesi (g)	Odak Uzaklığı (km)	Tip
1	Parkfield	28/06/1966	5.6	C12320	6.8	0.0633	14.7	Yanal Atımlı
2	Morgan Hill	24/04/1984	6.2	GIL067	3.6	0.1144	16.2	Yanal Atımlı
3	Kocaeli	17/08/1999	7.4	ARC000	17.7	0.2188	17	Yanal Atımlı
4	Morgan Hill	24/04/1984	6.2	G06090	36.7	0.2920	11.8	Yanal Atımlı
5	Coyote Lake	06/08/1979	5.8	G06230	49.2	0.4339	3.1	Yanal Atımlı
6	Northridge	17/01/1994	6.7	ORR090	52.1	0.5683	22.6	Ters Eğik Atımlı
7	Loma Prieta	18/10/1989	7.1	CLS000	55.2	0.6437	5.1	Ters Oblik Atımlı
8	Kobe	16/01/1995	6.9	KJM000	79.3	0.8213	6.9	Yanal Atımlı
9	Santa Barbara	13/08/1978	7.2	SBA222	16.3	0.203	14.0	Ters Oblik Atımlı
10	Livermore	27/01/1980	7.4	LMO355	9.8	0.252	8.0	Yanal Atımlı
11	N. Palm Springs	08/07/1986	6.0	DSP000	33.8	0.331	8.2	Ters Oblik Atımlı
12	N. Palm Springs	08/07/1986	6.0	FVR045	41.2	0.129	13.0	Ters Oblik Atımlı
13	Northridge	17/01/1994	6.7	TPF000	17.6	0.364	37.9	Ters Eğik Atımlı
14	San Fernando	02/09/1971	6.6	ORR021	15.6	0.324	24.9	Ters Eğik Atımlı
15	Whittier Narrows	10/01/1987	6.0	ALH180	22	0.333	13.2	Ters Eğik Atımlı
16	Kocaeli	17/08/1999	7.4	SKR090	79.5	0.376	3.1	Yanal Atımlı
17	Victoria, Mexica	09/06/1980	6.1	CPE045	31.6	0.62	34.8	Yanal Atımlı
18	Horse Canyon	25/02/1980	4.9	BAR225	2.6	0.047	40.6	Yanal Atımlı
19	Horse Canyon	25/02/1980	4.9	RDA045	6.7	0.097	19.6	Yanal Atımlı
20	Borrego Mtn	09/04/1968	6.8	PAS270	4.7	0.090	203.0	Yanal Atımlı
21	Coyote Lake	06/08/1979	5.8	SJ3337	7.6	0.124	17.2	Yanal Atımlı
22	Coyote Lake	06/08/1979	5.8	SJ5337	7.4	0.114	17.2	Yanal Atımlı
23	Imperial Valley	15/10/1979	7.0	CPEDW N	6.8	0.116	8.3	Yanal Atımlı
24	Imperial Valley	15/10/1979	7.0	PTS315	16.1	0.204	14.2	Yanal Atımlı
25	Hollister	28/11/1974	5.2	SG3295	9.3	0.339	14.9	Yanal Atımlı
26	Mendocino	25/04/1992	7.1	EUR090	28.3	0.178	44.6	Ters Eğik Atımlı
27	Mendocino	25/04/1992	7.1	FOR000	30	0.116	23.6	Ters Eğik Atımlı
28	Kern County	21/07/1952	7.4	PAS180	5.6	0.045	127.0	Ters Oblik Atımlı
29	Kern County	21/07/1952	7.4	SBA132	15.5	0.127	87.0	Ters Oblik Atımlı
30	Loma Prieta	18/10/1989	6.9	A09137	15.6	0.113	46.9	Ters Oblik Atımlı



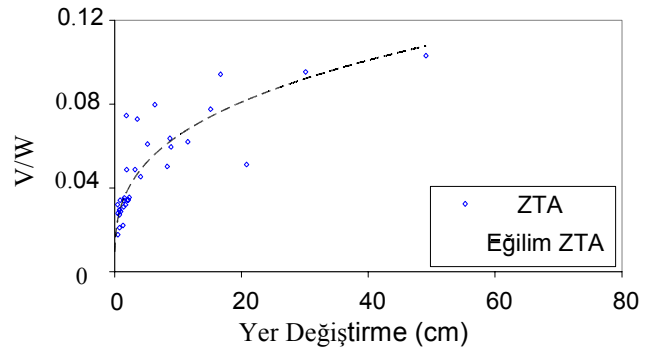
a) 4 Katlı binanın B Zemin sınıfı için zaman tanım alanında dinamik analizi



b) 6 Katlı binanın B Zemin sınıfı için zaman tanım alanında dinamik analizi



c) 8 Katlı binanın B Zemin sınıfı için zaman tanım alanında dinamik analizi



d) 12 katlı binanın B Zemin sınıfı için zaman tanım alanında dinamik analizi

Şekil 10. Örnek binaların zaman tanım alanında dinamik analizleri

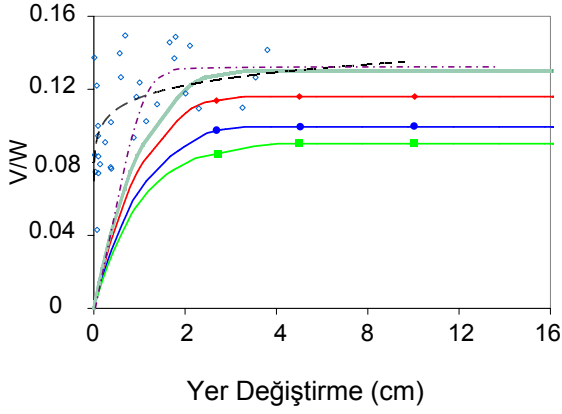
Doğrusal olmayan analizlerin değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler Şekil 11’de karşılaştırılmış ve dikdörtgen, üçgen ve parabol yükleme ile gerçekleştirilmiş olan klasik artımsal itme analizleri, yüksek mod etkilerinin dikkate alındığı uyarlanmış ve enerji esaslı artımsal itme analizleri sonucu elde edilen artımsal itme eğrileri ve zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçları birlikte verilmiştir. Artımsal itme analizlerinin zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçlarına olan yakınlıklarının karşılaştırılması amaçlanmıştır.

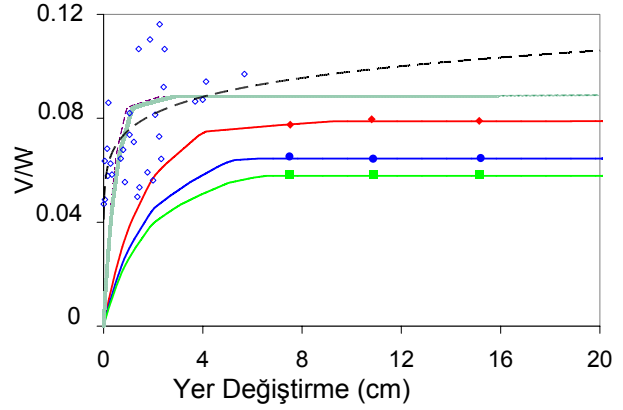
Sonuçlar

Bu çalışmada, betonarme yapıların performansının belirlenmesinde kullanılan, gerçekçi ancak karmaşık olan doğrusal olmayan zaman tanım

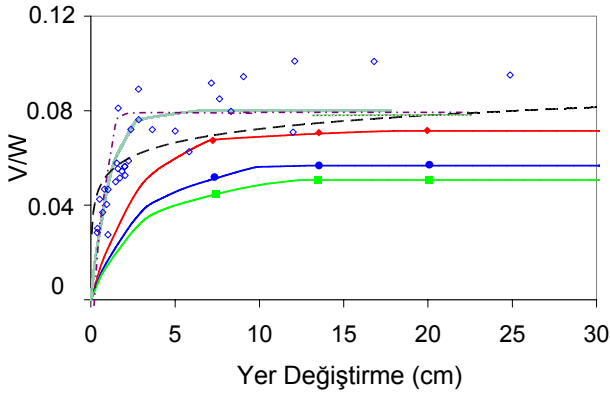
alanında dinamik analiz yöntemlerinin yerine, uygulamada kolaylıkları sebebiyle doğrusal olmayan artımsal itme analiz sonuçlarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Şekil 11 üzerinde tüm analizlerin sonuçları verilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, klasik artımsal itme analizleri için yükleme tiplerinin değiştirilmesi, yüksek mod etkilerinin ve enerji parametrelerinin analizlere dahil edilmesinin sonuçları nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bu sebeple çalışma kapsamında klasik, uyarlanmış ve enerji esaslı olmak üzere üç farklı artımsal itme analizi ele alınmış ve incelenmiştir. 4, 6, 8 ve 12 katlı dört adet üç açıklıklı betonarme çerçeve tipi bina ele alınarak boyutlandırılmış, daha sonra analizler gerçekleştirilmiştir. Klasik artımsal itme analizlerinde dikdörtgen, üçgen (IBC, k=1) ve parabol (IBC, k=2) yük dağılım tipleri uygulanmıştır. Ardından arlanmış enerji esaslı artımsal itme analizleri gerçekleştirilmiştir.



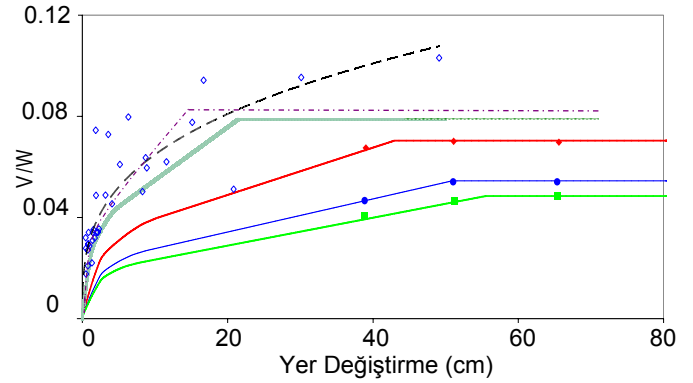
a) 4 Katlı binanın artımsal itme - zaman tanım alanında dinamik analiz karşılaştırılması



b) 6 Katlı binanın artımsal itme - zaman tanım alanında dinamik analiz karşılaştırılması



c) 8 Katlı binanın artımsal itme - zaman tanım alanında dinamik analiz karşılaştırılması



d) 12 Katlı binanın artımsal itme - zaman tanım alanında dinamik analiz karşılaştırılması



Şekil 11. Artımsal itme eğrilerinin zaman tanım alanında dinamik analizi sonuçlarıyla karşılaştırılması

Zaman tanım alanında dinamik analizlerde, elde edilen en büyük yer değiştirmeye karşı gelen en büyük V/W oranına bağlı sonuçlar, bir eğilim çizgisiyle ifade edilmiştir. Zaman tanım alanında dinamik analizden elde edilen bu eğriler, dikdörtgen, üçgen (IBC, $k=1$) ve Parabol (IBC, $k=2$) yük dağılımları kullanılarak elde edilen klasik artımsal itme, uyarlanmış artımsal itme ve enerji esaslı artımsal itme eğrilerinin grafik değerleriyle karşılaştırılmıştır. Grafikler, artımsal itme değerlerinin zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçlarıyla bire bir örtüşmediğini

göstermektedir. Ancak sonuçların yakın olduğu da grafiklerden görülmektedir. Klasik artımsal itme analizleri için kullanılan dikdörtgen dağılımın; üçgen ve parabol yük dağılımıyla karşılaştırıldığında her zaman daha yüksek taban kesme kuvveti/yapı ağırlığı (V/W) oranı verdiği görülmektedir.

Uyarlanmış artımsal itme eğrileri ele alındığında uyarlanmış artımsal itme eğrilerinin klasik artımsal itme eğrilerine göre zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçlarına daha yakın sonuçlar

verdiği görülmektedir. Enerji esaslı artımsal itme eğrileri, zaman tanım alanında dinamik analizlere en yakın sonuçları vermektedir.

Diğer yöntemlerde hesaba katılmayan enerji parametreleri enerji esaslı analizlerde dahil edilmektedir. Bu da analiz sonuçlarını daha gerçekçi hale getirmektedir.

Artımsal itme analizlerinin yapılarındaki kabul-ler daha gerçekçi hale getirildikçe, örneğin yüksek mod etkileri dikkate alındıkça ve enerji parametreleri analizlere dahil edildikçe elde edilen eğriler, zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçlarına yaklaşmaktadır. Özellikle kat yüksekliği arttıkça, yüksek mod etkileri önem kazandığı için uyarlanmış ve enerji esaslı artımsal itme eğrileri zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçlarına daha yakın olmaktadır. Bu durum 8 ve 12 katlı binaların analiz sonuçlarından görülmektedir. Ancak, uyarlanmış ve enerji esaslı artımsal itme analizleri klasik artımsal itme analizlerine göre daha karmaşık ve uygulaması daha zor bir yapıdadır. Dolayısıyla pratikte klasik artımsal itme analizlerinin uygulanmasında, dikkörtgen yük dağılımının kullanılması daha gerçekçi olacaktır.

Kaynaklar

- Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, (1998). İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Yayını No: 25.
- Antoniou S., Pinho R., (2004). Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 5, pp.643-661.
- Aydınoglu, M. N., (2003) Yapıların Deprem Performanslarının Değerlendirilmesi İçin Artımsal Spektrum Analizi (ARSA) Yöntemi, 5. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Türkiye.
- Chopra, A. K. ve Goel, R. K., (2001). Capacity-Demand-Diagram Methods Based on Inelastic Design Spectrum, Earthquake Spectra, 15, 4.
- Chopra A., (2003). Evaluation of modal pushover analysis using generic frames, Earthquake

- Engineering And Structural Dynamics, Earthquake Engineering Struct. Dyn.
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Esaslar, (2006). Mevcut Yapıların Değerlendirilmesi Eki (7. Bölüm), Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara (6 Mart 2006 Tarih ve 26100 Sayılı Resmi Gazete).
- FEMA 440, (2005). Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings and other Structures, Washington ABD
- Gupta, B., Kunnath, S.K., (2000). Adaptive Specra-Based Pushover Procedure for Seismic Evaluation of Structures, Earthquake Spectra, 16
- ICBO-IBC, (2000). International Building Code, International Conference of Building Officials, Whittier, CA, A.B.D.
- Korkmaz, A., (2005). Yapı Sistemlerinin Güvenilirlik Esaslı Performansa Bağlı Analizi, *Doktora Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir
- Korkmaz, A., Düzgün M., (2005). İnşaat Mühendisleri Odası IMO Teknik Dergi, Statik İtme Analizinde Kullanılan Yük Dağılımlarının Değerlendirilmesi, Ankara.
- Lefort, T., (2000). Push Over Analysis of Multi Storey Buildings, *Doktora Tezi*, Berkeley, San Francisco, CA, A.B.D.
- Li, Y.R., (1996). Non-Linear Time History and Pushover Analyses for Seismic Design and Evaluation, *Doktora Tezi*, University of Texas, Austin, TX, A.B.D.
- Mwafy, A. Elnashai, A., (2001). Static Pushover Versus Dynamic Collapse Analysis Of Rc Buildings, Engineering Structures, 23.
- Montes H., Kwon, O., Aschheim, M., (2004). An Energy-Based Formulation For First-And Multiple-Mode Nonlinear Static (Pushover) Analyses, Journal of Earthquake Engineering, 8.
- Prakash, V., Powell, G., Campbell, S., (1993). DRAIN 2D Kullanım Klavuzu V 1.10, University of California, Berkeley, CA, ABD.
- PEER Internet veri tabanı, Pacific Earthquake Engineering Research Center <http://peer.berkeley.edu/smcat/>.
- TS 500, (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, T.S.E. Kurumu.
- Uang, L., Bertero, C. (1998). Energy Based Design Parameters in Performance Approach, Seismic Research Letters, V3.