

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİNALARIN DEPREM PERFORMANSININ
BELİRLENMESİ İÇİN
YÖNLÜ MODAL BİRLEŞTİRME VE
ENERJİ ESASLI YERDEĞİŞTİRMEYE DAYALI
BİR ARTIMSAL İTME ANALİZ YÖNTEMİ

Özgür BOZDAĞ

Temmuz, 2010
İZMİR

**BİNALARIN DEPREM PERFORMANSININ
BELİRLENMESİ İÇİN
YÖNLÜ MODAL BİRLEŞTİRME VE
ENERJİ ESASLI YERDEĞİŞTİRMEYE DAYALI
BİR ARTİMSAL İTME ANALİZ YÖNTEMİ**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Anabilim Dalı

Özgür BOZDAĞ

Temmuz, 2010

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ÖZGÜR BOZDAĞ, tarafından **PROF.DR.MUSTAFA DÜZGÜN** yönetiminde hazırlanan “**BİNALARIN DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ İÇİN YÖNLÜ MODAL BİRLEŞTİRME VE ENERJİ ESASLI YERDEĞİŞTİRMEYE DAYALI BİR ARTIMSAL İTME ANALİZ YÖNTEMİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr.Mustafa DÜZGÜN

Yönetici

Prof.Dr. Hikmet Hüseyin ÇATAL

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof.Dr.Attila ORBAY

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof.Dr.Erdal İRTEM

Jüri Üyesi

Prof.Dr.Yıldırım ERTUTAR

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisansa başladığım günden bugüne kadar bana her zaman destek olan, benim iyi bir akademisyen ve gerçek bir mühendis olmam için sürekli çaba sarf eden, verdiğim tüm kararlarda ve yaptığım tüm çalışmalarda beni sürekli olarak destekleyen ve motive eden ve bugün olduğum yere gelmemde büyük emeği olan değerli hocam ve tez danışmanım sayın Prof.Dr. Mustafa Düzgün'e yakın ilgisi ve yardımları için sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında bana sürekli olarak görüş ve katkıları ile yardımcı olan, tez izleme komitesindeki sayın hocalarım Prof.Dr. Hikmet Hüseyin Çatal'a ve Prof.Dr.Attila Orbay'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her zaman bana destek olan, benim bugünlere gelmem için sürekli çabalayan ve her zaman karşılıksız yanımda olan hep arkamda varlığını hissettiğim Annem ve Babam'a şükranlarımı sunarım.

Uzun zamandır hayatımda olan ve hayatıma mutluluk ve sevgi katan sevgili Deniz'e varlığından dolayı çok teşekkür ederim.

Uzarlarda da olsa her zaman varlığını hissettiğim ve varlığı ile kendimi güvende ve mutlu hissettiğim kardeşime desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim

Üniversitede çalışma arkadaşım olan tüm asistan arkadaşlarıma, üniversitede geçen güzel zamanlarımız için teşekkür ederim.

Özgür BOZDAĞ

BİNALARIN DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ İÇİN YÖNLÜ MODAL BİRLEŞTİRME VE ENERJİ ESASLI YERDEĞİŞTİRMEYE DAYALI BİR ARTIMSAL İTME ANALİZ YÖNTEMİ

ÖZ

Yapıların deprem güvenliğinin belirlenmesi son yıllara meydana gelen yıkıcı depremlerden sonra önemli bir konu haline gelmiştir. Bu alanda pek çok çalışma yapılmış ve araştırma sonuçları yönetmeliklerde yer almaya başlamıştır.

Bu tez kapsamında, yapıların deprem performansının belirlenmesinde yüksek mod etkilerini dikkate almak amacıyla yönlü modal birleştirme ve enerji esaslı yeni bir artımsal itme analiz yöntemi geliştirilmiştir. Yöntemde, yapının deprem sırasındaki davranışının daha gerçekçi belirlenmesi için yapının elastik ötesi davranışa geçtikten sonra her bir ardışık plastik mafsallarda oluşum adımıyla, plastik mafsallarda tüketilen plastik enerjilerin toplanması ile hesaplanan yapının toplam plastik enerjisi dikkate alınmıştır. Analizdeki her bir hesap adımıyla yapısal tepkiler, o adımdaki modlara bağlı hesaplanan modal büyüklükler dikkate alınarak, karelerinin toplamının karekökü yönteminin bu tez kapsamında geliştirilen özel bir şekli olan yönlü modal birleştirme kuralı ile bulunmaktadır. Yapılan analizler sonucunda, yapının deprem performansının belirlenmesinde kullanılacak yapı plastik enerji kapasite eğrisinin oluşturulması amaçlanmıştır. Seçilen örnek betonarme yapıların, klasik artımsal itme analizi yöntemleri ve geliştirilen yöntemle analizleri yapılmış, elde edilen sonuçlar zaman tanım alanında analiz sonuçları ile karşılaştırılarak geliştirilen yöntem ile ilgili irdellemeler yapılmıştır.

Anahtar sözcükler: Artımsal itme analizi, deprem, yapı, depreme dayanıklı yapı tasarımı, performans analizi

A PUSHOVER METHODOLOGY BASED ON DIRECTED MODAL COMBINATION AND ENERGY BASED DISPLACEMENT FOR SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF BUILDINGS

ABSTRACT

After recent catastrophic earthquakes, evaluation of the earthquake safety of existing buildings becomes an important issue. In this research area, many studies are conducted and results obtained from these studies are started to include in earthquake codes.

In the present thesis, for considering higher modal effects, a new directed modal combination and energy based pushover analysis method is developed. In this method, total plastic energy consumption of structure is obtained after beginning the inelastic behavior by summing plastic energy consumed at each plastic hinge for each consecutive plastic hinge formation steps. Structural responses for each computation steps are calculated by the special form of square root of the sum of the squares rule, which is developed in this thesis by considering instantaneous modal quantities. Following these calculations, it is aimed to construct structural plastic energy capacity curve for determining earthquake performance of a structure. In the examples, designed reinforced concrete buildings are analyzed by traditional pushover analysis procedures and the proposed procedure and obtained results are compared with the nonlinear time history analysis.

Keywords : Pushover analysis, earthquake, structure, earthquake resistant building design, performance analysis

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
1.1 Giriş	1
1.2 Amaç ve Kapsam.....	2
1.3 Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesinde Literatürdeki Çalışmalar.....	4
BÖLÜM İKİ – YAPILARIN DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİNDE KULLANILAN DOĞRUSAL OLMAYAN STATİK ARTIMSAL İTME ANALİZİ YÖNTEMLERİ.....	13
2.1 Giriş	13
2.2 Tek Modlu Artımsal İtme Analiz Yöntemi	20
2.3.1 Uyarlamalı Mod Birleştirme (AMC) Yöntemi	25
2.3.2 Artımsal Spektrum Analizi (ARSA) Yöntemi.....	29
2.3.3 Modal Artımsal İtme Analizi (MPA) Yöntemi	34
2.3.4 Üst Sınır Artımsal İtme Analizi (UBPA) Yöntemi	36
BÖLÜM ÜÇ – BİNALARIN DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ İÇİN YÖNLÜ MODAL BİRLEŞTİRME VE ENERJİ ESASLI YERDEĞİŞTİRMeye DAYALI BİR ARTIMSAL İTME ANALİZ YÖNTEMİ	38

3.1 Giriş	38
3.2 Geliştirilen Enerji Esaslı ve Çok Modlu Statik Artımsal İtme Analizinde Kullanılacak Yükleme Şeklinin Belirlenmesi İçin Önerilen Yeni Bir Modal Birleştirme Yöntemi	42
3.3 Statik Artımsal İtme Analizinde Eşdeğer Tek Serbestlik Dereceli Sistemin Hesaplanmasında Kullanılan Enerji Esaslı Yerdeğiştirme Yöntemi	45
3.4 Tez Kapsamında Geliştirilen Yönlü Modal Birleştirme ve Enerji Esaslı Yerdeğiştirmeye Bağlı Artımsal İtme Analizi Yönteminin Hesap Adımları ...	50

**BÖLÜM DÖRT- YÖNLÜ MODAL BİRLEŞTİRME VE ENERJİ ESASLI
YERDEĞİŞTİRMEYE BAĞLI YENİ BİR
ARTIMSAL İTME ANALİZ YÖNTEMİ İLE
YAPILARIN DEPREM PERFORMANSININ
BELİRLENMESİ İÇİN BİLGİSAYAR YAZILIMI 53**

4.1 Giriş	53
4.2 Geliştirilen Bilgisayar Yazılımının Genel Kabulleri	53
4.3 Analizlerde Kullanılan Yük Artımı Yöntemi	55
4.3.1 Stabilitate Fonksiyonları ile İkinci Mertebe Etkilerini Dikkatte Alan Temel Rijitlik Matrisi	56
4.3.2 Çubuk Elemanların Uçlarındaki Mafsallaşmayı Dikkatte Alan Temel Rijitlik Matrisi	58
4.4 Geliştirilen Bilgisayar Yazılımının Esasları	63
4.5 Geliştirilen Bilgisayar Yazılımının Sonuçlarının Literatürdeki Yazılımlar ile Karşılaştırılması	66
4.5.1 Seçilen 2 Açıklıklı 4 Katlı Örnek Yapının	
Geliştirilen Bilgisayar Yazılımı ve SAP2000 Paket Bilgisayar Programından Elde Edilen Modal Büyüklük Sonuçlarının Değerlendirilmesi	67
4.5.2 Seçilen 2 Açıklıklı 4 Katlı Örnek Yapının Tepe Noktası Yerdeğiştirmesi ve Taban Kesme Kuvveti Değerleri İle Plastik Mafsal Sayılarının ve Mod Şekilleri Sonuçlarının Karşılaştırılması	71

BÖLÜM BEŞ- SAYISAL UYGULAMALAR VE KARŞILAŞTIRMALAR 74

5.1 Giriş	74
5.2 Örnek Betonarme 8, 14 ve 20 Katlı Çerçevelerin Karşılaştırılması.....	74
5.2.1 Örnek Betonarme 8, 14 ve 20 Katlı Çerçevelerin Tasarımı ve Modellenmesi	74
5.2.2 Analizlerde Kullanılan Deprem İvme Kayıtları	82
5.2.3 Örnek Çerçevelerin Geliştirilen Enerji Esaslı ve Çok Modlu Statik Artımsal İtme Analizi Yöntemi ve Diğer Yöntemlerle Yapılan Çözümünde Karşılaştırılan Yapısal Büyüklükler	86
5.2.4 Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi	87
5.2.4.1 Örnek 8 Katlı Çerçeveye Ait Yapısal Büyüklüklerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi	100
5.2.4.2 Örnek 14 Katlı Çerçeveye Ait Yapısal Büyüklüklerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi	101
5.2.4.3 Örnek 20 Katlı Çerçeveye Ait Yapısal Büyüklüklerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi	102
5.2.5 Geliştirilen YMB Analiz Yönteminde Mod Sayısının Yapısal Büyüklük Değerlerine Etkisi	103
5.3 Mevcut Prefabrike Bir Yapının Geliştirilen YMB Analiz Yöntemi ile İncelenmesi ve Değerlendirilmesi	105
5.3.1 Mevcut Prefabrike Yapının Özellikleri	105
5.3.2 Analizlerde Kullanılan Deprem Kayıtları.....	107
5.3.3 Örnek Prefabrike Binanın Modellenmesi	109
5.3.4 Artımsal İtme Analizi ve Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	110

BÖLÜM ALTI- SONUÇLAR 113

KAYNAKLAR 117

EKLER..... 123

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Giriş

Özellikle son yıllarda meydana gelen yıkıcı depremlerden sonra yapıların deprem performansının belirlenmesi deprem mühendisliğindeki önemli konulardan birisi haline gelmiştir. Bu amaçla yapılan çalışmalar sonunda, yapıların elastik ötesini davranışlarını belirlemek üzere çeşitli analiz yöntemleri ortaya konulmuştur. Deprem sırasında binaların davranışını en iyi gösteren yöntem zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi olarak kabul edilmektedir. Ancak bu yöntem ile yapı davranışını belirlemede çok sayıda deprem ivme kaydına ihtiyaç duyulması, analizin zaman alıcı olması, elde edilen sonuçların yorumlanmasının ve düzenlenmesinin güç olması v.b. nedenlerle basitleştirilmiş yöntemlere ihtiyaç duyulmuştur. Araştırmalar sonunda, özellikle planda ve düşeyde düzenli olan yapıların elastik ötesi davranışını yapının elastik hâkim periyoduna bağlı olarak belirleyen artımsal itme analiz yöntemleri (pushover) geliştirilmiştir. Yaklaşık olan bu analiz yöntemlerinin en kabul görenleri ATC 40 (1996), FEMA 356 (2000), FEMA 440 (2004) v.b. dokümanlarda yer almıştır.

Artımsal itme analiz yönteminin düzensiz yapılarda da uygulanabilmesi için yapılan çalışmalar çok modlu analiz yöntemleri üzerine yoğunlaşmıştır (Mwafy ve Elnashai, 2001; Gupta ve Kunnath, 2000; Aydınoglu, 2003a; Chopra ve Goel, 2002) . Bu yöntemlerde, tek modlu artımsal itme analiz yöntemlerine benzer olarak, yapıya düşey yükler etki edildikten sonra monotonik artan yanal yükler uygulanmaktadır. Yanal yüklemenin şekli yapının mod şekilleriyle veya kat kütleleriyle orantılı olabildiği gibi ters üçgen veya parabol gibi yönetmeliklerde bulunan fiktif yüklemeler de kullanılabilir. Hangi durumda hangi yükleme şeklinin daha iyi sonuç vereceğinin kestirilmesi kolay olmamakla birlikte analizi yapan mühendisin konu ile ilgili bilgi ve tecrübesine bağlıdır.

Klasik artımsal itme analiz yöntemlerinde, yapının davranışı adım adım hesaplanan artan yükler altında toplam taban kesme kuvvetine karşı bina tepe noktası yerdeğiştirmesi olarak çizilen kapasite eğrisi ile karakterize edilmektedir. Tepe noktasının yerdeğiştirmesi aynı zamanda deprem yerdeğiştirme talebinin belirlenmesi için de önemlidir. Deprem yapıdan talep ettiği yerdeğiştirme ile yapının yerdeğiştirme kapasitesi karşılaştırılarak incelenen yapının deprem performansı belirlenebilmektedir.

Doğrusal elastik bölgede, yapının tepe noktasının yerdeğiştirmesi yanal yüklerle orantılı olarak artmaktadır. Kapasite eğrisi, yapının istenen herhangi bir yapısal büyüklüğü için çizilebileceği halde, genelde yapının yatay deprem yüklerine tepkisini daha iyi temsil eden toplam taban kesme kuvvetine karşı tepe noktası yerdeğiştirmesi olarak oluşturulmaktadır. Ancak, tepe noktası yerdeğiştirmesi düzenli çerçeve yapılar için iyi sonuç vermesine karşın taşıyıcı sistemi düzensiz olan yapılarda veya fiktif yükleme şekillerinin kullanıldığı durumlarda yeterli olamamaktadır.

Artan yatay yükler altında plastik mafsalları oluşumu başladıktan sonra yerdeğiştirmeler yanal yüklerin artım oranına göre daha hızlı olarak artmaya başlayacaktır. Plastik mafsalları oluşumunun yapı davranışına olan etkisi kapasite eğrisinden izlenebilmektedir. Ancak kapasite eğrisinin oluşturulmasında kullanılan büyüklükler rastgele seçilmiş parametrelere bağlı olduğundan farklı yapısal büyüklükler için farklı kapasite eğrileri oluşturulabilmektedir. Bu durum, özellikle planda ve/veya düşeyde düzensiz yapı sistemlerinin performansının belirlenmesinde olumsuzluklar meydana getirmektedir. Bu nedenle, yapı kapasitesinin belirlenmesinde genel parametrelere bağlı daha gerçekçi analiz yöntemlerinin geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

1.2 Amaç ve Kapsam

Bu tez kapsamında, yapıların deprem performansının belirlenmesinde yüksek mod etkilerini dikkate almak amacıyla “**yönlü modal birleştirme ve enerji esaslı yeni bir artımsal itme analiz yöntemi**” geliştirilmiştir. Yöntemde, yapının deprem

sırasındaki davranışının daha gerçekçi belirlenmesi için yapının elastik ötesi davranışa geçtikten sonra her bir ardışık plastik mafsallarda oluşum adımında, plastik mafsallarda tüketilen plastik enerjilerin toplanması ile hesaplanan yapının toplam plastik enerjisi dikkate alınmıştır. Analizdeki her bir hesap adımındaki “**yapısal tepkiler**” (iç kuvvetler, taban kesme kuvveti, plastik dönmeler, kat yerdeğiştirmeleri v.b.), o adımıdaki modlara bağlı hesaplanan modal büyüklükler dikkate alınarak, karelerinin toplamının karekökü yönteminin bu tez kapsamında geliştirilen özel bir şekli olan yönlü modal birleştirme kuralı ile bulunmaktadır. Buna bağlı olarak yapının deprem performansının belirlenmesinde kullanılacak “**yapı plastik enerji kapasite eğrisi**”nin oluşturulması amaçlanmaktadır.

Tez çalışması kapsamında, enerji esaslı artımsal itme analiz yönteminin uygulanabilmesi için bir bilgisayar yazılımı da geliştirilmiştir. Yöntemin uygulanabilirliğini görebilmek için değişik örnek yapılar üzerinde; geliştirilen yöntemin bilgisayar yazılımı kullanılarak yöntemden elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan klasik artımsal itme analiz yöntemleri ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Tez altı ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde tezin amacı açıklanmış ve konu ile ilgili daha önce yapılan literatür çalışmaları özetlenmiştir.

İkinci bölümde, yapıların deprem performansının belirlenmesinde kullanılan başlıca artımsal itme analiz yöntemleri açıklanmıştır. İncelenen yöntemlerdeki kabuller açıklanarak hesap adımları verilmiştir.

Üçüncü bölümde, tez kapsamında geliştirilen enerji esaslı çok modlu artımsal itme analizi yönteminin teorik esasları açıklanmıştır. Önerilen yöntemin dayandığı kabuller ve hesap adımları ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölümde, tez kapsamında geliştirilen enerji esaslı çok modlu artımsal itme analizi yönteminin uygulamasını yapabilmek için geliştirilen bilgisayar yazılımında yapı elemanlarını ile ilgili yapılan genel kabuller verilmiştir. Kullanılan

hesap algoritması açıklanmış ve yapılan analizlerin doğruluğunu göstermek üzere bir örnek verilmiştir.

Beşinci bölümde, yöntemin uygulanabilirliğini görebilmek için değişik örnek yapılar üzerinde; geliştirilen yöntemin bilgisayar yazılımı kullanılarak elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan klasik artımsal itme analiz yöntemleri ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Altıncı ve son bölümde ise tez kapsamında geliştirilen **“yönlü modal birleştirme ve enerji esaslı yerdeğiştirmeye bağlı artımsal itme analiz yöntemi”**nin kullanılabilirliği açısından gerekli irdelemeler yapılmıştır. Düşeyde düzensizliğe sahip değişik yapı örnekleri seçilerek, geliştirilen **“yönlü modal birleştirme ve enerji esaslı yerdeğiştirmeye bağlı artımsal itme analiz yöntemi”**, literatürdeki klasik **“artımsal itme analiz yöntemleri”** ve **“zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi”** ile analizleri yapılmış ve her bir yöntemden elde edilen sonuçlar birbirleriyle kıyaslanarak, geliştirilen yöntemle ilgili irdelemeler yapılmıştır.

1.3 Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesinde Literatürdeki Çalışmalar

Yapıların deprem performansının belirlenmesinde kullanılan çeşitli yöntemler aşağıda özet olarak açıklanmıştır.

Gülkan ve Sözen (1974), betonarme yapıların deprem etkileri altında elastik ötesi davranışlarını incelemek için, çeşitli depremlere ait ivme kayıtlarını kullanarak üç adet tek katlı tek açıklıklı betonarme çerçevenin zaman tanım alanında analizlerini yapmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, deprem hareketi sırasında betonarme çerçevelerde rijitlik azalması ve enerji sönmüleme kapasitesindeki artış meydana geldiği belirlenmiştir. Araştırmacılar bu sonuca dayanarak, yapıların tasarım taban kesme kuvvetinin belirlenmesi için eşdeğer sönmü oranına sahip tek serbestlik

dereceli yapı modelini ve doğrusal olmayan davranışı göz önüne alan basitleştirilmiş bir hesap yöntemi önermişlerdir.

Özer (1987), düzlem çerçevelerin ikinci mertebe limit yükünün hesabı için bir yük artım yöntemi geliştirmiştir. Yöntemde, malzemenin elastik ötesi davranışı ve geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi göz önüne alınmaktadır. Çalışmada ayrıca plastik mafsal hipotezi, bileşik iç kuvvet durumunu da kapsayacak şekilde genişletilmiştir.

Fajfar ve Fischinger (1988), yaptığı çalışmada yapıların deprem performansının belirlenmesi için “N-2 Yöntemi” adını verdikleri bir analiz yöntemi önermişlerdir. Bu yöntemde, artan yatay yükler altında yapının artımsal itme analizi yapılarak oluşturulan kapasite eğrisi, modal dönüşüm parametreleri kullanılarak eşdeğer tek serbestlik dereceli sisteme ait kapasite spektrumuna dönüştürülmekte ve elastik olmayan spektrumlar kullanılarak depremin yerdeğiştirme talebi belirlenmektedir.

İrtem (1991), esasları daha önce Özer (1987) tarafından ortaya konulan yük artım yöntemini üç boyutlu uzay çerçevelere uygulamıştır. Geliştirilen ikinci mertebe yük hesap yönteminde, düşey ve yatay yükler aynı anda dikkate alınabilmektedir. Yöntemin sayısal uygulamalarının yapılabilmesi için yazar tarafında IMEP-3D isimli bir bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir.

Lawson ve diğerleri (1994) yaptıkları çalışmada, artımsal itme analizi yönteminin hangi durumlarda uygulanabileceğini ve yöntemin sınırlandırmalarını incelemiştir. Bu amaçla, değişik yüksekliklerde 2-15 katlı çelik binaların artımsal itme analizinden elde edilen kat ötelenmesi, plastik mafsal dönmesi ve çevrimsel enerji değerleri zaman tanımlananında dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, birinci modun hâkim olduğu az katlı yapılar için artımsal itme analizi sonuçlarının zaman tanım alanında analiz sonuçlarına yakın olduğu ancak yüksek modların etkili olduğu çok katlı yüksek yapılarda yöntemin güvenilir sonuçlar vermediği belirtilmiştir.

Fajfar ve Gaspersic (1996) çalışmalarında, N-2 yönteminin açıklamasını yaparak, yöntemin sonuçlarını değerlendirmek üzere laboratuvar ortamında sarsma tablası deneyi yapılan 7 katlı betonarme perde çerçeve sistemin deprem performans analizini yapmış ve N-2 yönteminin sonuçlarının sarsma tablası deneyinden bulunan sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermiştir.

Ye ve Otani (1999), yaptıkları çalışmada deprem sırasında yapıya giren enerjiyi inceleyerek tek serbestlik dereceli sistemler için elastik ötesi davranış ile elastik davranış arasındaki yerdeğiştirme ilişkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, eşdeğer enerji kuralının yerdeğiştirme açısından üst sınır olduğu gösterilmiş ve yerdeğiştirme için alt sınırın belirlenmesi için bir denklem türetilmiştir.

Fajfar (2000) yaptığı çalışmada, yapıların deprem performansının değerlendirilmesi için kullanılan N-2 yönteminin teorik esaslarının açıklamasını yaparak söz konusu yöntemin FEMA 273 (FEMA, 1997) ve ATC 40 (ATC, 1996) dokümanlarında tanımlanan doğrusal olmayan statik analiz yöntemleri ile benzerlik ve farklılıklarını ile ilgili değerlendirmeler yapmıştır.

Ghobarah (2001), betonarme yapıların deprem performansının değerlendirmesinde kullanılan analiz yöntemleri üzerine inceleme yapmıştır. Çalışmanın sonunda; mevcut betonarme yapıların deprem performansının belirlenmesinde zaman tanım alanında doğrusal dinamik analiz yönteminin yeterli olmadığı, artımsal itme analizi yönteminin, yöntemin uygulanması ile ilgili koşullara uyulmak kaydı ile betonarme yapıların deprem performansı değerlendirilmesinde pratik bir analiz yöntemi olduğu ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yönteminin mevcut yapıların deprem davranışlarının değerlendirilmesinde en güçlü yöntem olmasına karşın elde edilecek sonuçların, deprem kayıtlarının özelliğine bağlı olması nedeni ile bu yöntemin sadece özel yapılarda ve bilimsel araştırmalarda kullanıldığı belirtilmiştir.

Chopra ve Goel (2001), yaptıkları çalışmada yapıların deprem performansının belirlenmesi için yüksek mod etkilerini dikkate alan “Modal Artımsal İtme Analizi”

(MPA) yöntemini geliştirmişlerdir. Yöntem, esas olarak elastik davranış gösteren yapıların davranışını belirlemede kullanılan tepki spektrumu yönteminin, doğrusal elastik ötesi davranış gösteren yapılara uygulamasına dayanmaktadır. Yapının, dinamik analizden her bir mod için elde edilen yanal yüklemeler yapıya ayrı ayrı etki ettirilmekte ve her bir modun yerdeğıştirme talebine ulaştığı anda hesaplanan tepki büyüklükleri karelerinin toplamının karekökü (SRSS), tam karesel birleştirme (CQC) gibi uygun bir yöntemle birleştirilmektedir. Çalışmada ayrıca yöntemin, FEMA 273 (FEMA, 1997) ön standardında tanımlanan doğrusal olmayan statik analiz yöntemi ile karşılaştırması yapılmıştır. Ayrıca örnek yapıların analizi yapılmış ve geliştirilen yöntemin zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz ile uyumlu sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Mwafy ve Elnashai (2001), statik artımsal itme analiz sonuçlarının geçerliliğini incelemek üzere, kapasite eğrisine benzer olarak, zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizden elde edilen taban kesme kuvveti ve tepe noktası yerdeğıştirme değerlerini grafik olarak ifade etmiş ve her iki yöntemin sonuçlarının karşılaştırmasını yapmıştır. Analizler sonucunda, statik artımsal itme analizinden elde edilen kapasite eğrisinin dinamik analizden elde edilen eğri ile uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Chopra ve Goel (2002), yaptıkları bir diğerk çalışmada geliştirdikleri “Modal Artımsal İtme Analizi” (MPA) yönteminin teorik esaslarını detaylı olarak açıklamış ve 9 katlı, çelik SAC binasının, önerilen yöntem ile yapılan deprem performans analizinden elde edilen sonuçlarının zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırmasını yapmışlardır.

Albanesi ve diğerkleri (2002a) çalışmalarında, doğrusal olmayan statik analiz yöntemlerinden kapasite spektrumu, yerdeğıştirme katsayıları ve N-2 yöntemlerinin karşılaştırmasını yapmışlardır. Bu amaçla, 2 ve 7 katlı betonarme çerçevelerin incelenen yöntemlerden elde edilen sonuçları zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Albanesi ve diğerleri (2002b) yaptıkları diğer bir çalışmada, artımsal itme analizi yöntemlerinin ve kapasite spektrumu yönteminin değerlendirmesini yapmış ve artımsal itme analizinde yanal yükün kuvvet veya yerdeğiştirme yerine hız dağılımı ile tanımlandığı enerji esaslı bir yöntem önermiştir. 7 katlı – 2 açıklıklı ve 3 katlı – 3 açıklıklı çerçevelerin incelenen yöntemler ve önerilen enerji esaslı yöntemle analizleri yapılarak sonuçları karşılaştırılmıştır.

Chou ve Uang (2003), yapıların deprem performansının belirlenmesinde, yapı tarafından tüketilen enerjiyi esas alan bir yöntem geliştirmiştir. Yöntemde ilk olarak analizde dikkate alınan her bir mod için oluşturulan kapasite eğrisinin idealleştirilmesi ile belirlenen modal akma kuvvetleri belirlenmektedir. Modal akma kuvvetinin dönüştürülmesi ile modal akma dayanımı katsayısı hesaplanmakta ve sabit süneklik oranlı akma dayanımı spektrumu kullanılarak modal süneklik faktörü elde edilmektedir. Hesap yapılan moda ait modal katılım faktörü ve periyot değerleri ile modal süneklik faktörüne bağlı olarak sabit süneklik oranlı enerji spektrumu ile her bir mod için tüketilen enerji hesaplanmakta ve belirlenen enerji dağılım profili ile orantılı olarak yapıya etkitilmektedir.

Aydinoğlu (2003a), özellikle planda düzensizlikleri bulunan ve çok katlı yapıların deprem performansının belirlenmesinde tek moda dayalı artımsal itme analiz yöntemlerinin kullanılamaması nedeni ile yüksek mod etkilerini de dikkate alan “Artımsal Spektrum Analizi” (ARSA) yöntemini geliştirmiştir.

Aydinoğlu (2003b), diğer bir çalışmada “Artımsal Spektrum Analizi” (ARSA) yönteminin esaslarını açıklayarak 9 katlı, çelik “SAC” binasının söz konusu yöntem ile analizini yapmıştır. Elde edilen sonuçlar zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçları ile karşılaştırılarak, yöntem ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır.

Antoniou ve Pinto (2004a) yaptıkları çalışmada, yapıların deprem performansının belirlenmesinde yüksek mod etkilerini dikkate alan “Kuvvet Esaslı Uyarlanmış Artımsal İtme Analizi” (FAP) yöntemini geliştirmişlerdir. Önerilen yöntemde, artımsal itme analizinde yapıya etki eden yanal yükler, her bir hesap adımında yük

faktörü ile orantılı olarak değiştirilmektedir. Yöntemin sonuçları, farklı süneklik oranlarına sahip analizi yapılan 4 adet 12 katlı düzenli çerçeve, 4 adet 8 katlı düzensiz çerçeve ve 4 adet 8 katlı düzenli perde-çerçeve sistem üzerinde incelenmiştir. Yapılan analizler sonucu, önerilen yöntemin, zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz ile uyumlu sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Antoniou ve Pinto (2004b) yaptıkları bir başka çalışmada, daha önce geliştirdikleri “Kuvvet Esaslı Uyarlanmış Artımsal İtme Analizi” (FAP) yönteminin farklı bir uyarlamasını yapmışlardır. “Yerdeğiştirme Esaslı Uyarlanmış Artımsal İtme Analizi” (DAP) adını verdikleri bu yöntemde, yapıya etkiyen yatay yükleme şekli kuvvet artımı yerine, yapının her bir hesap adımında yaptığı yerdeğiştirmelerle orantılı olarak değişmektedir. Yöntemin sonuçlarını incelemek için daha önce yaptıkları çalışmada (Antoniou ve Pinto, 2004a) kullandıkları çerçevelerin önerilen yöntemle analizleri yapılmış ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırmaları verilmiştir.

Mevcut artımsal itme analizlerinin büyük çoğunluğu yapının kapasite eğrisinin tanımlanmasında yapı tepe noktası yerdeğiştirmesini esas almaktadır. Hernandez-Montes ve diğerleri (2004) ise yaptıkları çalışmada, kapasite eğrisinin belirlenmesinde yapının en üst seviyesindeki herhangi bir noktanın yerdeğiştirmesi yerine artan yatay yükler altında yapının tükettiği enerjiyi kullanan bir yöntem geliştirmişlerdir. Ayrıca aynı çalışmada, yapının kapasite eğrisinin tanımlanması için alternatif grafik gösterimler önerilmiştir.

Goel ve Chopra (2004), geliştirdikleri “Modal Artımsal İtme Analizi” (MPA) yöntemi ile FEMA-356 (FEMA, 2000) dokümanında yer alan yöntemin karşılaştırmasını yapmıştır. Bu amaçla, Amerika Birleşik Devletleri’nde SAC binaları olarak tanımlanan yapıların “Modal Artımsal İtme Analizi” (MPA) ve FEMA-356 (FEMA, 2000) dokümanında bulunan yöntemlerle yapılan analizlerinden elde edilen sonuçlar, zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, MPA yönteminin sonuçlarının FEMA-356 (FEMA, 2000) ön standardında tanımlanan yöntemden elde edilenlerden daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Chopra ve Goel (2004), yaptıkları çalışmada daha önce yazarlar tarafından önerilen “Modal Artımsal İtme Analizi” (MPA) yönteminin basitleştirilmiş bir uyarlamasını yapmışlardır. Önerilen yöntemin (MMPA), “Modal Artımsal İtme Analizi” (MPA) yönteminden tek farkı sadece yapının birinci modunun doğrusal olmayan davranış gösterdiğinin ve yüksek modların elastik davrandığının kabul edilmesidir. Bu kabulün analizlerde hesap yoğunluğunu azalttığı belirtilmiştir. Çalışmada, SAC binaları ve 108 adet örnek çerçevenin önerilen yöntemle analizi yapılmış ve sonuçların zaman tanım alanında dinamik analizden elde edilen sonuçlarla ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Isaković ve Fischinger (2005), betonarme viyadük ayaklarının artımsal itme analizi ile deprem performansını belirlenmesinde yüksek modların etkisini incelemiştir. Çalışmada örnek viyadük ayaklarının; N-2, “Modal Artımsal İtme Analizi” (MPA), “Modal Uyarlanmış Doğrusal Olmayan Statik Analiz” (MANSP) ve “Artımsal Spektrum Analizi” (ARSA) yöntemleri ile analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, kullanılan analiz yöntemleri ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır.

Türker (2005) yaptığı çalışmada, yüksek modların etkili olduğu binaların deprem etkileri altındaki doğrusal olmayan davranışın belirlenebilmesi için, çok modlu uyarlamalı bir yük artım yöntemi geliştirmiştir. Yöntemin uygulanması için de MEPAKS adlı bir yazılım hazırlamıştır. Yöntemi değişik yüksekliklerde üç farklı deprem için incelemiş ve sonuçların yeterli doğrulukta olduğunu göstermiştir.

Kalkan ve Kunnath (2006), yaptıkları çalışmada yapıların deprem performansını belirlenmek için “Uyarlanmış Mod Birleştirme” (AMC) yöntemini geliştirmiştir. Önerilen yöntemde, ATC-40 (ATC, 1996) dokümanında önerilen kapasite spektrumu yöntemi, Gupta ve Kunnath (2000) tarafından önerilen uyarlanmış artımsa itme analizi yöntemi ve Chopra ve Goel (2002) tarafından önerilen “Modal Artımsal İtme Analizi” (MPA) yöntemlerinin sentezi yapılmıştır. Analizde dikkate alınan modlar için yapıya etkiyen yatay yükleme şekli her bir hesap adımında

yenilenmektedir. Hedef yerdeğiştirme değeri, enerji esaslı modal kapasite eğrisi ve sabit süneklik oranlı kapasite spektrumları kullanılarak her hesap adımında dinamik olarak belirlenmektedir. Geliştirilen yöntemin, 8 ve 13 katlı örnek çelik çerçevelerde uygulaması yapılmış ve zaman tanım alanında dinamik analizden ile uyumlu sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Lee ve diğerleri (2006) çalışmalarında, yapıların deprem performansının belirlenmesi için elastik ve elastik ötesi yapı davranışlarının eşdeğer tepkilerini esas alan bir yöntem önermişlerdir. Yöntemin sonuçlarının değerlendirilmesi için 8 ve 20 katlı örnek çelik yapıların kapasite spektrumu, “Modal Artımsal İtme Analizi” (MPA) ve araştırmacılar tarafından önerilen yöntemle deprem performans analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar zaman tanım alanında dinamik analiz ile karşılaştırılmıştır.

Kalkan ve Kunnath (2007), yaptıkları çalışmada; FEMA 356’da tanımlanan statik artımsal itme analizi ile çok modlu artımsal itme analiz yöntemlerinden “Modal Artımsal İtme Analizi” (MPA), “Üst Sınır Artımsal İtme Analizi” (UBPA) ve “Uyarlanmış Mod Birleştirme” (AMC) yöntemlerinin zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırmasını yapmıştır. 6 ve 13 katlı çelik yapılar ile 7 ve 20 katlı betonarme yapılar üzerinde yapılan analizlere sonucunda, zaman tanım alanında dinamik analiz ile MPA ve AMC yöntemlerinden elde edilen sonuçların uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Aydinoğlu (2007) yaptığı bir başka çalışmada, yazar tarafından geliştirilen “Artımsal Spektral Analiz” (ARSA) yönteminin pratikte uygulanması ile ilgili detaylı açıklamasını yapmıştır. Çalışmada, 8, 12, 16 ve 20 katlı betonarme binalar için ARSA yönteminde elde edilen sonuçlarla zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçları karşılaştırılmış ve yöntemin çok katlı yapılarda da güvenilir sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Aschheim ve diğerleri (2007), ATC-55 projesi kapsamında geliştirilen ve detayları FEMA 440’da açıklanan ölçeklendirilmiş doğrusal olmayan dinamik analiz

yöntemini incelemiştir. Bu amaçla, 9 katlı çelik bir çerçevenin incelenen yöntem ve diğer ölçekleme yöntemleri ile analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır.

Poursha ve diğerleri (2008) yaptıkları çalışmada, FEMA 273 (FEMA, 1997) ön standardında tanımlanan yanal yükleme şekilleri esas alınarak yapılan statik artımsal itme analizi sonuçları ile “Modal Artımsal İtme Analizi” (MPA) yönteminden elde edilen sonuçların kıyaslamasını yapmıştır. İnceleme sonucunda, Modal Artımsal İtme Analizi” (MPA) yönteminin FEMA 273’de tanımlanan yöntemlerden daha iyi sonuç verdiği, ancak her iki yöntemin de elemanlarda oluşan plastik mafsallı dönmelerinin belirlenmesinde yetersiz kaldığı belirtilmiştir.

Erduran (2008), planda simetrik olmayan yapıların deprem performansının belirlenmesinde tek modlu artımsal itme analizi, N-2 ve “Modal Artımsal İtme Analizi” (MPA) yöntemlerinin etkinliğini incelemiştir. Örnek yapılar üzerinde yapılan analizler sonucunda, planda simetrik olmayan yapılarda N-2 ve “Modal Artımsal İtme Analizi” (MPA) yönteminin, tek modlu artımsal itme analizi yönteminden daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir.

Poursha ve diğerleri (2009), artımsal itme analizi yönteminde yüksek mod etkilerini dikkate alan “Ardışık Modal Artımsal İtme Analizi” (CMP) yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yöntemde artımsal itme analizi, hâkim periyodu 2,2 sn’den düşük olan yapılarda ilk iki mod, hâkim periyodu 2,2 sn’den büyük olan yapılarda ilk üç mod için ayrı ayrı yapılarak, yapının deprem performansı her bir analizden elde edilen tepki büyüklüklerinin en büyüğü olarak kabul edilmektedir. Önerilen yöntem ile üç açıklıklı; 10, 15, 20 ve 30 katlı olmak üzere dört farklı çerçevenin analizi yapılarak, elde edilen sonuçlar “Modal Artımsal İtme Analizi” (MPA) ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizden sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

BÖLÜM İKİ

YAPILARIN DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİNDE KULLANILAN DOĞRUSAL OLMAYAN STATİK ARTİMSAL İTME ANALİZ YÖNTEMLERİ

2.1 Giriş

Geçtiğimiz yıllarda dünyada ve ülkemizde meydana gelen 1989 ABD-California Loma Prieta, 1994 ABD-Northridge, 1995 Japonya-Hyogo-Ken Nambu, 1999 Türkiye-Kocaeli, 2001 Hindistan, 2003 İran, 2005 Güney Asya, 2005 Pakistan ve 2009 İtalya-L'Aquila depremleri, mevcut yapı stoklarının büyük bir kısmının deprem güvenliklerinin yeterli olmadığını göstermiştir. Bunun sonucunda, mevcut yapıların deprem davranışlarının belirlenmesi ve yeni yapılacak yapıların depreme dayanıklı olarak tasarlanması konusu inşaat mühendisliğinde önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Deprem sonrası yapılan incelemeler, yapılarda meydana gelen yapısal ve yapısal olmayan hasarların deprem sırasında taşıyıcı elemanlarda oluşan yerdeğiştirmelerle ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, yapılan çalışmalar yapılara etkiyecek eşdeğer deprem kuvvetleri yerine, deprem sırasında meydana gelecek yerdeğiştirmeleri belirleyen yeni analiz yöntemlerinin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

Yapıların deprem sırasındaki davranışlarının belirlenmesinde ve buna bağlı olarak deprem performanslarının değerlendirilmesinde en iyi yöntem olarak **“Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Yöntemi”** kabul edilmektedir. Ancak bu yöntemin uygulanabilmesi için çok sayıda güvenilir parametreye ihtiyaç duyulmaktadır. Yapısal analizde kullanılacak deprem takımının oluşturulması ve istenen deprem tepki büyüklüklerinin belirlenmesinde kullanılacak uygun matematiksel analiz yönteminin seçilmesi, kısıtlı zamanda proje üretmek zorunda olan çoğu tasarım bürosunun imkânlarını aşmaktadır. Bu nedenle, yapıların deprem performansının belirlenmesinde kullanılacak daha basit, pratik ve güvenilir yöntemlere ihtiyaç duyulmuştur.

Yukarıda açıklanan nedenlerle, yapıların deprem performansının belirlenmesinde, basitleştirilmiş yerdeğiştirme esaslı analiz yöntemlerinden “**Statik Artımsal İtme Analizi Yöntemi**”, inşaat mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

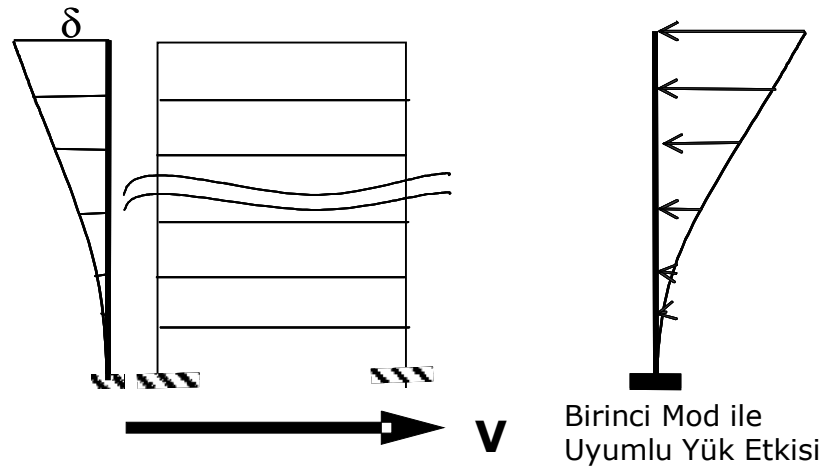
Statik artımsal itme analizi yönteminin esası, incelenen yapının dayanım ve yerdeğiştirme kapasitelerinin doğrusal olmayan statik analiz yöntemleri ile belirlenmesi ve bu değerlerin daha önceden hedeflenen performans seviyesine ait deprem talepleri ile karşılaştırılarak yapının genel deprem performansının değerlendirilmesine dayanmaktadır.

Yapıların yanal yük kapasitesinin belirlenmesi için geliştirilen “statik artımsal itme analizi yöntemi”nin ilk esasları uzun yıllar önce ortaya konmuştur (Gülkan ve Sözen, 1976). Ancak, deprem talebi ile yapı kapasitesinin karşılaştırılmasına imkân veren ilk yöntem Freeman (1978, 1998) tarafından geliştirilen “**kapasite spektrumu**” yöntemidir. Bu yöntemde, ivme tepki spektrumu ile temsil edilen deprem yerdeğiştirme talebi ve statik artımsal itme analizinden elde edilen yapı kapasitesi, yatay eksen eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemin yerdeğiştirmesi ve düşey eksen spektral ivme olarak tanımlanan spektral ivme-spektral yerdeğiştirme grafiğine çizilerek yapının deprem performansına karar verilmektedir. Deprem yapıdan talep ettiği elastik olmayan yerdeğiştirmeler, elastik ivme tepki spektrumunun eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem için yaklaşık olarak hesaplanan çevrimsel enerjiye bağlı olarak elde edilen eşdeğer viskoz sönüm oranında indirgenmesi ile belirlenmektedir.

Kapasite spektrumu yöntemine benzer olarak Fajfar ve Fischinger (1988), kapasite spektrumu yönteminin bir türevi olan “**N2**” adını verdikleri bir yöntem önermişlerdir (Fajfar, 2000). Bu yöntemde, yerdeğiştirme süneklilik talebinin belirlenmesinde elastik tepki spektrumunun indirgenmesi yerine yerdeğiştirme sünekliliğine bağlı olarak elde edilen elastik olmayan tepki spektrumu kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar, özellikle ivme tepki spektrumunun ivme ve yer değiştirme hâkim bölgelerinde, N2 yönteminin kapasite spektrumu yönteminden daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir (Chopra ve Goel, 1999).

Yapıların deprem performanslarının belirlenmesine yönelik ilk değerlendirme kriterleri Vision 2000 (SEAOC, 1995), Eurocode 8 (CEN, 1995) gibi dokümanlarda bir araya toplanmıştır. Bu dokümanlarda, basitleştirilmiş deprem performans analiz yöntemlerinin açıklanması yanında konu ile ilgili yapılması gereken çalışmalar hakkında öneriler sunulmuştur.

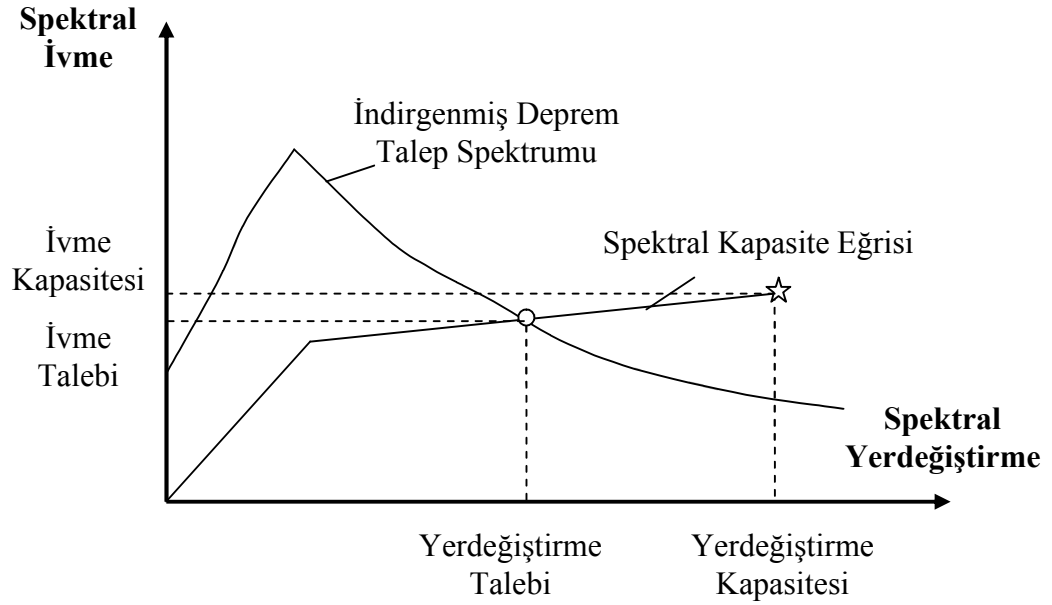
Amerika Birleşik Devletleri'nin California eyaletindeki betonarme yapıların deprem performansının değerlendirilmesi ve güçlendirmesinde kullanılmak üzere ön standart olarak ATC 40 (ATC, 1996) yayınlanmıştır. Bu ön standartta, deprem performans hesaplarında kapasite spektrumu yöntemi esas alınmıştır. Yapıların kapasite spektrumunda kullanılan kapasite eğrilerinin belirlenmesi için tarif edilen statik artımsal itme analizi yönteminde dikkate alınacak yanal yük dağılımının, yapının analiz yapılan doğrultusundaki birinci mod şekli ile orantılı olarak alınması öngörülmüştür. (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 ATC 40 Kapasite spektrumu yöntemindeki yatay yük dağılımı ve yatay yerdeğiştirme grafiği

Analiz sonucunda çok serbestlik dereceli sistem için toplam taban kesme kuvvetine karşı yapı tepe noktası yatay yerdeğiştirmesi olarak elde edilen kapasite eğrisi, deprem talebinin ve hedef yerdeğiştirmenin grafiksel olarak belirlenmesi amacı ile eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemi temsil eden spektral ivme-spektral yerdeğiştirmeye bağlı spektral kapasite eğrisine dönüştürülmektedir (Şekil 2.2).

Yapının hedef yerdeğiştirmeye ulaştığı andaki yerdeğiştirmeler, ATC 40’da verilen sınır değerlerle karşılaştırılarak yapının deprem performansına karar verilir.

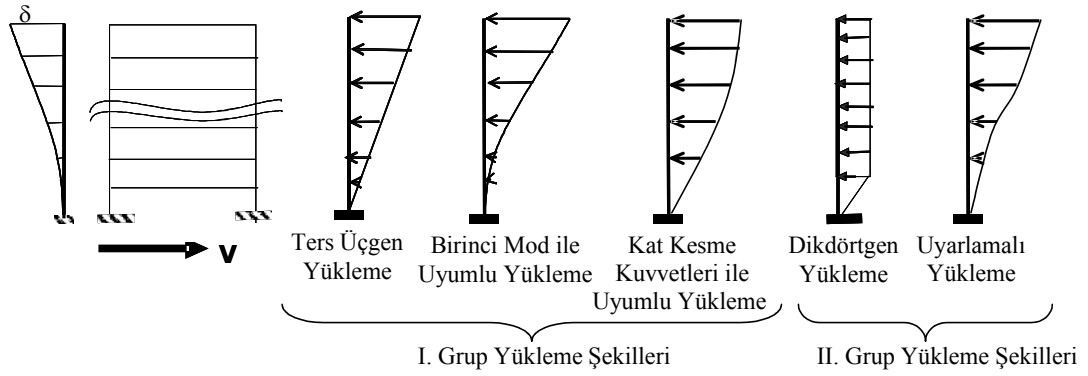


Şekil 2.2 ATC 40 Kapasite spektrumu yönteminin grafik olarak gösterimi

ATC 40’ın yayınlanmasından sonra Amerikan “Federal Emergency Management Agency” tarafından, yerdeğiştirme esaslı tasarım ve mevcut yapıların deprem performansının değerlendirilmesinde kullanılan yöntemleri açıklayan FEMA 273 (1997) ve FEMA 274 (1997) ön standartları hazırlanmıştır. Daha sonra Amerikan İnşaat Mühendisleri Topluluğu’nca bu yayınlar FEMA 356 (2000) adı altında birleştirilerek ön standart haline getirilmiştir.

FEMA 356’da (2000) açıklanan artımsal itme analizi yönteminde kullanılacak yatay yük dağılımları iki ana gruba ayrılmıştır. Birinci grupta; birinci mod şekli ile orantılı yatay yük dağılımı, yönetmeliklerde yer alan ters üçgen yük dağılımı ve %90 kütle katılım oranını sağlayacak sayıda mod dikkate alınarak mod birleştirme yönteminden elde edilen kat kesme kuvvetleri ile orantılı yatay yük dağılımı yer almaktadır. Bu yükleme şekillerinin ilk ikisi birinci moda ait kütle katılım oranı %75 ve üzerinde olan yapılarda kullanılabilir. Son yükleme şeklinin ise birinci periyodu 1sn ve üzerinde olan yapılarda kullanılması önerilmektedir. İkinci grup

yüklemeye dağılımında ise uniform yük dağılımı ve uyarlamalı yük dağılımları bulunmaktadır. Yapının deprem sırasındaki davranışını yeterli olarak temsil etmek üzere yapının deprem performansının, her iki yüklemeye grubundan seçilen en az birer yüklemeye dağılımı kullanılarak elde edilen sonuçların en olumsuzuna göre belirlenmesi istenmektedir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 FEMA 356'da tanımlanan yerdeğiştirmeleri katsayıları yönteminde kullanılan yatay yüklemeye şekilleri

Yatay yük dağılımının seçilmesinden sonra, yük dağılımının artımsal itme analizi sırasında değişmediği kabul edilerek, yapı tepe kontrol noktası “Yerdeğiştirme Katsayıları Yöntemi” kullanılarak belirlenen hedef yerdeğiştirme değerine ulaşana kadar itilmektedir. FEMA 356'da yer alan “Yerdeğiştirme Katsayıları Yöntemi”nde, hedef yerdeğiştirme aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır:

$$\delta_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (2.1)$$

Burada;

C_0 , yapı tepe noktası yerdeğiştirmesini eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemin yerdeğiştirmesine dönüştirme katsayısı,

C_1 , eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem için hesaplanan elastik yerdeğiştirmeler ile elastik ötesi yerdeğiştirmeler arasındaki ilişkiyi eşdeğer enerji ve eşdeğer yerdeğiştirme kuralları ile tanımlayan ve aşağıdaki denklemlerle belirlenen modifikasyon katsayısı,

$$C_1 = 1,0 \quad (T_e > T_s) \quad (\text{Eşdeğer yerdeğiştirme kuralı}) \quad (2.2)$$

$$C_1 = [1,0 + (R-1) T_s / T_e] / R \quad (T_e < T_s) \quad (\text{Eşdeğer enerji kuralı}) \quad (2.3)$$

T_e : Analiz yapılan doğrultu için elde edilen kapasite eğrisinin iki doğrultu idealleştirilmesi ile hesaplanan etkin yapı periyodu.

T_s : Elastik tasarım ivme tepki spektrumunun karakteristik periyodu.

R : Elastik dayanım talebinin hesaplanan akma dayanımı katsayısına oranı.

C_2 , yapı elemanlarının histeretik karakteristiklerini temsil eden katsayı,

C_3 , P-Δ etkilerinden dolayı yerdeğiştirmelerde meydana gelecek artmayı tanımlayan katsayıdır.

S_a , hesap yapılan yöndeki birinci periyoda karşı gelen elastik spektral ivme katsayısı,

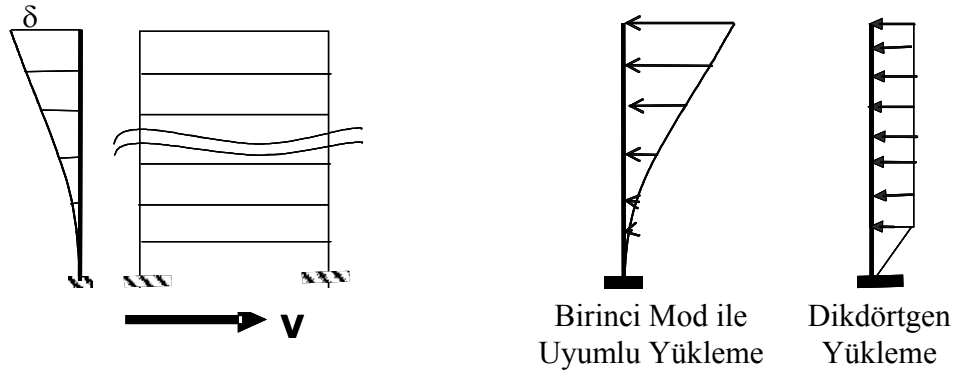
g , yerçekimi ivmesidir.

Genelde, mevcut yapıların deprem performansının belirlenmesinde, ATC 40’da tanımlanan “Kapasite Spektrumu Yöntemi” ve FEMA 273/274, FEMA 356’da tanımlanan “Yerdeğiştirme Katsayıları Yöntemi” yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ancak, aynı eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem ve deprem kaydı için yapılan çalışmalarda, “Kapasite Spektrumu Yöntemi” ve “Yerdeğiştirme Katsayıları Yöntemi”nden elde edilen elastik ötesi yerdeğiştirme sonuçların uyumlu olmadığı görülmüştür. Söz konusu uyumsuzluğu gidermek, yöntemlerin geçerliliğini araştırmak ve yöntemleri geliştirmek üzere ATC 55 projesine başlanmıştır. Proje sonucunda elde edilen sonuçlar FEMA 440 (2005) raporunda açıklanmıştır. Çalışma sonucunda “Yerdeğiştirme Katsayıları Yöntemi”nde kullanılan C_1 ve C_2 katsayıları için yeni ifadeler önerilmiştir. Ayrıca, P-Δ etkilerinden dolayı yerdeğiştirmelerde meydana gelecek artmayı tanımlayan C_3 katsayısı kaldırılarak bu etkileri kontrol etmek üzere dayanım sınırları konulmuştur. Sonuç olarak, FEMA 440’da son hali verilen ve hedef yerdeğiştirmeyi tanımlayan ifade aşağıdaki gibidir:

$$\delta_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (2.4)$$

Amerika Birleşik Devletleri'nde, daha önce FEMA 356 ön standardında tanımlanan analiz yöntemleri esas alınarak, yapı performans hesaplarında kullanılmak üzere ASCE 41-06 standardı hazırlanmıştır. Bu standartta, artımsal itme analizinde FEMA 356'da yer alan farklı yatay yükleme şekillerinin yerine sadece birinci mod şekli ile orantılı yükleme şeklinin kullanılması öngörülmüştür. Ayrıca, hedef yerdeğiştirmenin hesaplanmasında kullanılan katsayılar için FEMA 440 verilen denklemler de bu standartta yer almıştır.

Avrupa ülkelerinde de yapıların deprem performansının hesaplanması için çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda mevcut ve yeni yapıların deprem performansını belirlemede kullanılacak yöntemler Eurocode-8 (2005) standardında yer almıştır. Eurocode-8'de yer alan yöntem, kapasite spektrumu yönteminin bir türevi olan N2 yöntemini (Fajfar ve Fischinger, 1988) esas almakta ve hedef yerdeğiştirme değeri bu yöntemle göre bulunmaktadır. Eurocode 8'e göre yapı performansı, kat kütleleri ile orantılı olarak tanımlanan uniform yatay yükleme ve yapı birinci periyodu ile uyumlu yükleme şekli kullanılarak yapılan artımsal itme analizinden elde edilen sonuçlara göre belirlenmektedir. (Şekil 2.4)



Şekil 2.4 Eurocode 8'de tanımlanan yatay yükleme şekilleri

Kapasite eğrisinin iki doğrulu idealleştirilmesi ile hesaplanan etkili başlangıç periyoduna karşı gelen elastik ötesi yerdeğiştirme değeri, FEMA 356'da tanımlanan ve denklem (2.1)'de verilen ifade ile elde edilmektedir.

Ülkemizde de dünyadaki gelişmelere paralel olarak, mevcut ve yeni yapılacak yapıların deprem performansının belirlenmesinde kullanılacak yöntemler **“Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik”** (2007)’de yer almıştır. Yönetmelik kapsamında doğrusal elastik olmayan analiz yöntemleri, **“Artımsal Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi”**, **“Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi”** ve **“Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi”** olarak tanımlanmıştır. Yöntemlerden **“Artımsal Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi”**nde yapının birinci mod şekli ile orantılı sabit veya uyarlamalı yanal yükleme şekillerinin kullanılması önerilmiştir. Tek modu esas alan bu yöntemin, sadece planda simetrik veya çok az burulma düzensizliğine sahip ve birinci mod kütle katılım oranı %70’in üzerinde olan yapılarda kullanılmasına izin verilmektedir. Elastik ötesi yerdeğiştirmeler yine denklem (2.1)’e benzeştirilerek elde edilmektedir.

Yüksek mod etkilerinin etkili olduğu yapılarda ise taşıyıcı sistemin davranışını temsil eden yeterli sayıda mod etkilerini dikkate alan analiz yöntemlerinin kullanılması istenmektedir. Yönetmelikte, diğer standartlardan farklı olarak çok modlu analiz yöntemlerinden **“Artımsal Spektral Analiz-ARSA”** yöntemi yönetmelik eklerinde öneri olarak yer verilmiştir.

Yapıların deprem davranışlarını belirlemekte kullanılan analiz yöntemlerinden **“tek modlu artımsal itme analiz yöntemi”** ve yüksek mod etkilerini dikkate alan **“çok modlu itme analiz yöntemleri”**nin teorik esasları aşağıda açıklanmıştır.

2.2 Tek Modlu Artımsal İtme Analiz Yöntemi

Deprem etkisi altındaki doğrusal elastik, çok katlı bir yapının dinamik tepkisinin diferansiyel denklemi;

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{u}_g(t) \quad (2.5)$$

denklemini ile ifade edilir.

Burada;

$\mathbf{u}$: Yapının yerdeğiştirme vektörü,

$\mathbf{M}$: Yapının kütle matrisi,

$\mathbf{C}$: Yapının sönüm matrisi,

$\mathbf{K}$: Yapının rijitlik matrisi,

$\mathbf{1}$: Tüm elemanları bir olan kolon vektör,

$\ddot{\mathbf{u}}_g$: Yer hareketinin ivmesi'dir.

Yapının yerdeğiştirme vektörü $\mathbf{u}$, yapının mod şekillerine bağlı olarak,

$$\mathbf{u} = \sum_{n=1}^N \phi_n q_n(t) \quad (2.6)$$

olarak gösterilebilir. Burada;

N : Mod sayısı

ϕ_n : n. modun şekli,

q_n : n. modal koordinat'tır.

Denklem (2.6), denklem (2.5)'de yerine konulursa n. mod için;

$$\mathbf{M}\phi_n \ddot{q}_n(t) + \mathbf{C}\phi_n \dot{q}_n(t) + \mathbf{K}\phi_n q_n(t) = -\mathbf{M}\mathbf{1} \ddot{u}_g(t) \quad (2.7)$$

elde edilir. Bu denklemin her iki tarafı önden ϕ_n^T ile çarpılırsa;

$$\phi_n^T \mathbf{M}\phi_n \ddot{q}_n(t) + \phi_n^T \mathbf{C}\phi_n \dot{q}_n(t) + \phi_n^T \mathbf{K}\phi_n q_n(t) = -\phi_n^T \mathbf{M}\mathbf{1} \ddot{u}_g(t) \quad (2.8)$$

elde edilir.

Denklem (2.8)'in her iki tarafı $(\phi_n^T \mathbf{M} \phi_n)$ ye bölünürse;

$$\ddot{q}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = -\Gamma_n \ddot{u}_g(t) \quad (2.9)$$

elde edilir. Burada;

ζ_n : n. modun modal sönüm oranı;

ω_n : n. modun doğal titreşim frekansı

Γ_n : n. modun modal katılım oranı'dır.

Denklem (2.9)'da;

$$q_n(t) = \Gamma_n d_n(t) \quad (2.10)$$

dönüşümü yapılırsa;

$$\ddot{d}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{d}_n(t) + \omega_n^2 d_n(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (2.11)$$

elde edilir. Bu denklem tek serbestlik dereceli sistemin hareket denklemidir. Denklem (2.11) dikkate alınan deprem kaydı için çeşitli doğal frekans değerleri için çözülerek o depremin tepki spektrumu elde edilir.

Denklem (2.11) yapının tüm periyotları için çözülerek, her bir modun yapı yerdeğiştirmesine katkısı;

$$u_n(t) = \phi_n q_n(t) = \phi_n \Gamma_n d_n(t) \quad (2.12)$$

şeklinde hesaplanır.

Yapıya etkiyecek eşdeğer statik kuvvet $f_{sn}(t)$, n. mod için elde edilen yerdeğiştirmeye bağlı olarak;

$$f_{sn}(t) = \mathbf{K}u_n(t) = \mathbf{K}\phi_n\Gamma_n d_n(t) \quad (2.13)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

$$\mathbf{K}\phi_n = \omega^2 \mathbf{M}\phi_n \quad (2.14)$$

ve

$$a_n(t) = \omega^2 d_n(t) \quad (2.15)$$

dönüşümleri yapılırsa;

$$\left. \begin{aligned} f_{sn}(t) &= \mathbf{K}\phi_n\Gamma_n d_n(t) = \omega^2 \mathbf{M}\phi_n\Gamma_n d_n(t) \\ f_{sn}(t) &= \mathbf{M}\phi_n\Gamma_n a_n(t) \\ f_{sn}(t) &= \mathbf{M}\bar{u}_n a_n(t) \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

elde edilir.

Elastik durum için yapıya ait herhangi bir büyüklük $r(t)$ (örneğin yerdeğiştirme, eleman iç kuvvetleri v.b.) her bir modun modal tepkilerinin toplanması ile;

$$r(t) = \sum_{n=1}^N r_n(t) \quad (2.17)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Burada;

$r_n(t)$: Eşdeğer statik $f_{sn}(t)$ kuvvetinden dolayı yapıda oluşacak n. moda ait tepki büyüklüğü'dür .

$r_n(t)$ büyüklüklerinin en büyük değerleri r_{no} ile gösterilebilir. Bu durumda, yapıya etkiyen modal eşdeğer statik kuvvetlerin modal yerdeğiştirmeler ile orantılı olması koşulundan, her mod için en büyük yerdeğiştirmeyi meydana getirecek eşdeğer statik kuvvet;

$$\left. \begin{aligned} f_{sno} &= \mathbf{M}\phi_n \Gamma_n S_{an} \\ f_{sno} &= \mathbf{M}\bar{u}_n S_{an} \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

şeklinde elde edilir.

Denklem (2.18)'den de görülebileceği gibi yapıya etkiyecek eşdeğer statik kuvvetler yapının yaptığı yerdeğiştirme ile orantılı olarak her adımda değişmektedir. Artan yatay yükler altında yapıda plastik mafsallar oluşukça, yapının periyotları, mod şekilleri ve dolayısı ile modal katılım oranları değişecektir. Bunun sonucunda yapıya etkiyen yükün sürekli değişmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Klasik statik itme analizlerinde yapıya etkiyen yük yapı göçme noktasına ulaşana kadar hiç değiştirilmemektedir. Bu durum, yapıya etkiyen kuvvetlerle yapı yerdeğiştirmelerinin uyumunu bozmaktadır. Ayrıca klasik analiz yönteminde yapı sadece birinci mod için hesaplanan eşdeğer yatay kuvvet ile itilerek kapasite eğrisi elde edilmektedir.

Tek modlu artımsal itme analiz yöntemi, birinci mod katkısının fazla olduğu yapılar için geçerli olduğu halde yüksek modların hâkim olduğu çok katlı yapılarda iyi sonuç vermemektedir. Bu sebeplerden dolayı yapının elastik ötesi davranışını daha iyi elde edebilmek için yüksek mod etkilerini dikkate alan çok modlu analiz yöntemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur.

2.3 Çok Modlu Artımsal İtme Analiz Yöntemi

Son yıllarda yapılan çalışmalar, düzensiz ve çok katlı yapıların deprem performansının daha gerçekçi belirlenmesinde yüksek mod etkilerini de dikkate alacak yöntemler üzerine yoğunlaşmıştır. Bu kapsamda, konu üzerine çalışan araştırmacılar tarafından çok modlu analiz yöntemleri önerilmiştir.

“Artımsal İtme Analizi (MPA)” (Chopra ve Goel, 2001), “Üst Sınır Artımsal İtme Analizi (UBPA)” (Jan v.d, 1999), gibi bazı çok modlu artımsal itme analiz yöntemlerinde her bir moda ait yanal yük dağılımını yapının ilk plastik mafsallardan oluşmadan önceki elastik mod şekilleri ile orantılı olarak kabul etmekte, ancak “Uyarlamalı Mod Birleştirme (AMC)” (Kalkan ve Kunnath, 2006), “Artımsal Spektrum Analizi (ARSA)” (Aydınoglu, 2003), “Tam Uyarlamalı Artımsal İtme Analiz (DAP)” (Antoniou ve Pinho, 2004b) gibi bazı yöntemlerde ise yapıya etkiyecek her bir mod ile orantılı yanal yük dağılımı ile yerdeğiştirme şeklinin uyumlu olması için plastik mafsallardan oluşumuna bağlı olarak her bir yük artım adımında modal analiz yapılmakta ve yanal yük dağılımı mod şekillerinin değişimi ile uyumlu olacak şekilde yeniden belirlenmektedir.

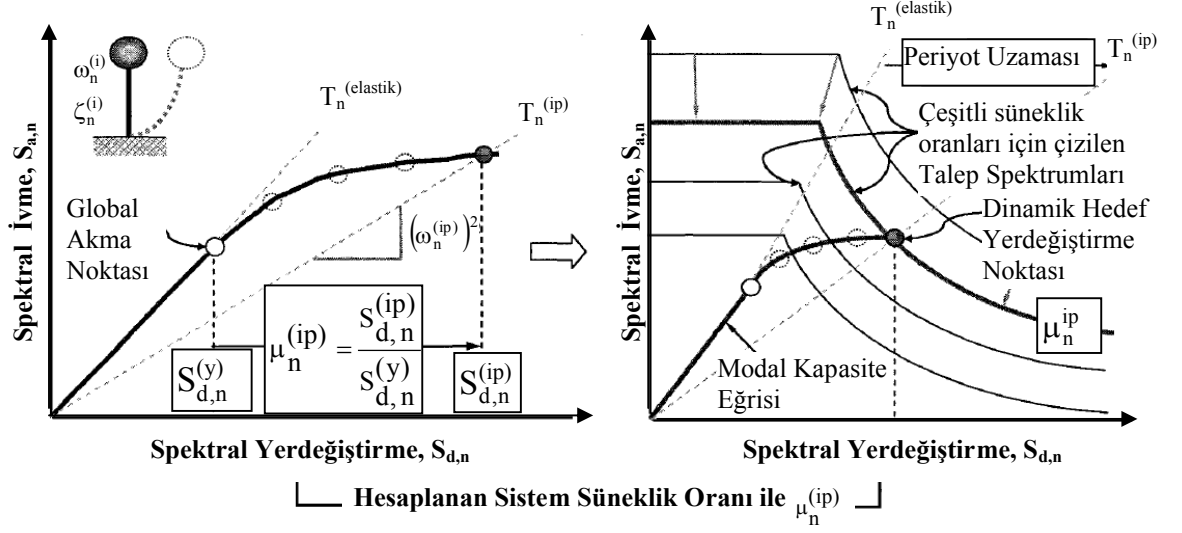
Bu kısımda, literatürdeki yüksek mod etkilerini dikkate alan çok modlu artımsal itme analiz yöntemlerinden, **“Uyarlamalı Mod Birleştirme (AMC) Yöntemi”**, **“Artımsal Spektrum Analizi (ARSA) Yöntemi”**, **“Modal Artımsal İtme Analizi (MPA) Yöntemi”**, **“Üst Sınır Artımsal İtme Analizi (UBPA) Yöntemi”** açıklanacaktır.

Bu yöntemler dışında da pek çok artımsal itme analizi yöntemi olduğu unutulmamalıdır.

2.3.1 Uyarlamalı Mod Birleştirme (AMC) Yöntemi

Kalkan ve Kunnath (2006), yapıların deprem performansının belirlenmesinde kullanılacak yüksek mod etkilerini dikkate alan “Uyarlanmış Mod Birleştirme (AMC)” (Adaptive Modal Combination) yöntemini geliştirmiştir.

Yöntem, esas olarak MPA yöntemine dayanmaktadır. MPA yöntemine benzer olarak yapı her bir mod etkisi ile ayrı ayrı yüklenmektedir. Ancak hedef yerdeğiştirme değeri, modal kapasite eğrilerinin süneklik oranlarının değişimine bağlı olarak elastik olmayan tepki spektrumu kullanılarak sürekli yenilenmektedir.



Şekil 2.5 AMC yönteminin grafiksel gösterimi

AMC yönteminin ana dönüşümleri Şekil 2.5’de gösterilmektedir. Yöntemin uygulanmasında izlenen hesap adımları aşağıda özet olarak verilmiştir:

Adım 1. Serbest titreşim analizi yapılarak dikkate alınan tüm modlar için anlık modal büyüklükler (özdeğer, özvektör, modal kütle katılım oranı, modal katılım çarpanları v.b.) hesaplanır.

Adım 2. Hesap yapılacak n. mod için uyarlanmış yanal yükleme şekli aşağıdaki denklem ile belirlenir:

$$s_n^{(i)} = m \phi_n^{(i)} \quad (2.19)$$

Burada (i), hesap adım numarası; m, yapı kütle matrisi; $\phi_n^{(i)}$, (i). hesap adımında n. moda ait mod vektörüdür. Yanal yük dağılımı her yük artım adımında yeniden hesaplanır.

Adım 3. Her bir eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem için enerji esaslı yaklaşım kullanılarak bir sonraki artım adımı hesaplanır. Serbest titreşim analizi yapılarak dikkate alınan tüm modlar için anlık modal büyüklükler (özdeğer, özvektör, modal kütle katılım oranı, modal katılım çarpanları v.b.) hesaplanır. n. moda karşı gelen eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem için enerji esaslı yerdeğiştirme artımı $\Delta D_n^{(i)}$ aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\Delta D_n^{(i)} = \frac{\Delta E_n^{(i)}}{V_{b,n}^{(i)}} \quad (2.20)$$

Burada $\Delta E_n^{(i)}$, (i). hesap adımındaki n. mod için $s_n^{(i)}$ anlık yanal yük dağılımı altında yapıda $\Delta d_n^{(i)}$ yerdeğiştirme artımını oluşturacak enerji artımı; $V_{b,n}^{(i)}$, (i). hesap adımındaki n. moda ait toplam taban kesme kuvvetidir. Kapasite eğrisinin yatay eksenini olan spektral yerdeğiştirme $S_{d,n}^{(i)}$, $\Delta D_n^{(i)}$ enerji esaslı yerdeğiştirme artımlarının toplamı olarak belirlenir. Kapasite eğrisinin düşey eksenini olan spektral ivme $S_{a,n}^{(i)}$ klasik olarak aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$S_{a,n}^{(i)} = \frac{V_{b,n}^{(i)}}{\alpha_n^{(i)} W} \quad (2.21)$$

Burada $\alpha_n^{(i)}$, (i). hesap adımında n. mod için hesaplanan modal kütle sabitidir.

Adım 4. (i). hesap adımında n. mod için hesaplanan tepkinin elastik ötesi olması durumunda global sistem süneklik oranı aşağıdaki denklem ile hesaplanır ve kapasite eğrisinden akma sonrası rijitlik belirlenir:

$$\mu_n^{(i)} = \frac{S_{d,n}^{(i)}}{S_{d,n}^{(y)}} \quad (2.22)$$

Burada $S_{d,n}^{(i)}$, (i). hesap adımındaki n. moda ait spektral yerdeğiştirme ve $S_{d,n}^{(y)}$, n. moda ait akma anındaki spektral yerdeğiştirmedir. Akma sonrası rijitlik, kapasite eğrisinin iki doğrulu olarak idealleştirilmesi ile bulunabilir. Kapasite eğrisinin akma sonrası kısmında negatif rijitlik oluşması durumunda, iki doğrulu idealleştirmede ikinci doğru parçasının eğimi de negatif olacaktır.

Adım 5. Hedef yerdeğiştirme değerini belirlemek amacıyla, önceden belirlenen çeşitli süneklik oranları için, özel deprem kayıtları kullanılarak spektral ivme-spektral yerdeğiştirme formatındaki kapasite spektrumları oluşturulur.

Adım 6. Adım 3’de hesaplanan modal kapasite eğrisi ve Adım 5’de farklı süneklik oranları için hesaplanan deprem talep spektrumları spektral ivme-spektral yerdeğiştirme grafiğinde birlikte gösterilir. n. moda ait modal kapasite eğrisi ile global sistem sünekliği için hesaplanan deprem talep spektrumunun kesişimi dinamik hedef yerdeğiştirme noktası D_n^{ip} belirlenir ve aşağıdaki denklem kullanılarak global sistem tepe noktası yerdeğiştirmesi hesaplanır:

$$u_{r,n}^{ip} = D_n^{ip} \phi_{t,n}^{ip} \Gamma_n^{ip} \quad (2.23)$$

Burada $\phi_{t,n}^{ip}$, hedef yerdeğiştirmeye ulaşıldığı anda n. mod için tepe noktası modal yerdeğiştirmesi, Γ_n^{ip} , hedef yerdeğiştirmeye ulaşıldığı anda n. mod için modal katılım faktörüdür.

Adım 7. n. mod için hedef yerdeğiştirmeye ulaşıldığı hesap adımında, istenen tepki büyüklükleri r_n^{ip} (düğüm noktası yerdeğiştirmesi, kat ötelenmesi, eleman dönmesi v.b.) hesaplanır.

Adım 1–7, analizde gerekli olan tüm modlar için tekrarlanır. İlk birkaç mod az katlı ve orta yükseklikteki yapıların çoğunda yeterli olmaktadır. Yapının toplam tepkisi, her bir mod için belirlenen en büyük modal tepkilerin uygun bir yöntemle birleştirilmesi ile elde edilir. Örneğin, modal büyüklüklerin birleştirilmesinde karelerinin toplamının karekökü (SRSS), tam karesel birleştirme (CQC) kuralı gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan karelerinin toplamının karekökü (SRSS) aşağıdaki şekilde kullanılmaktadır:

$$r = \max \left(\left(\sum_n (r_n^{ip})^2 \right)^{0.5} \right) \quad (2.24)$$

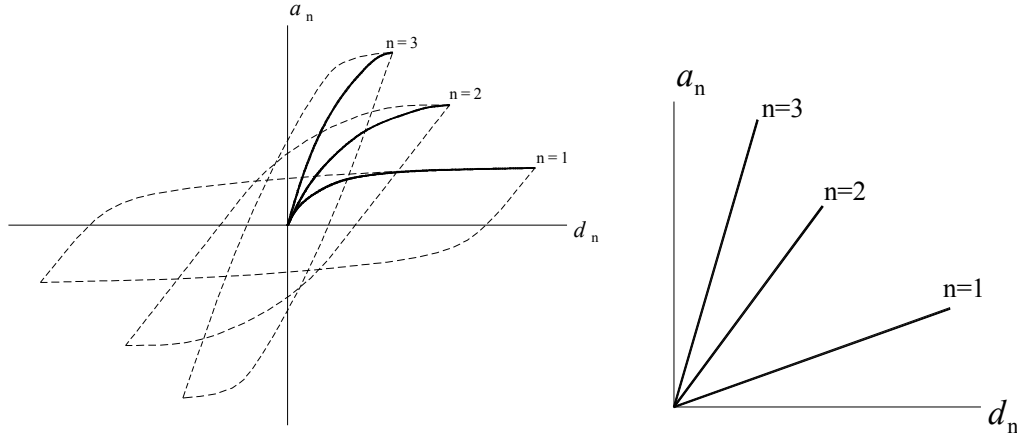
Sistemin herhangi bir mod için elastik davranması durumunda, istenen modal büyüklükler klasik tepki spektrumu analizi ile hesaplanır.

2.3.2 Artımsal Spektrum Analizi (ARSA) Yöntemi

Aydınoğlu (2003), yapıların deprem performansının belirlenmesinde kullanılacak yüksek mod etkilerini dikkate alan “Artımsal Spektral Analiz” (ARSA) yöntemini geliştirmiştir.

Yöntemin esası modal kapasite diyagramlarının yaklaşık olarak elde edilmesine dayanmaktadır. Her bir mod için ayrı ayrı tanımlanan modal kapasite diyagramı, o moda ait “modal spektral yerdeğiştirme – modal spektral ivme” grafiği olarak tanımlanmaktadır. (Şekil 2.6a). Doğrusal elastik durumda modal kapasite diyagramları doğrusal olmaktadır (Şekil 2.6b). Doğrusal olmayan kapasite diyagramları esas olarak deprem istemine bağlıdır. Farklı depremler altında diyagramlar da farklı olacaktır. Tek istisna deprem davranışının tek modla temsil edildiği ve yüksek mod etkilerinin ihmal edildiği durumdur.

Artımsal spektrum analizi yöntemi, birbirini izleyen plastik mafsall oluşumları arasındaki her bir itme adımında doğrusal davranış gösterdiği varsayılan taşıyıcı sistemde, mod birleştirme yönteminin kullanılarak spektrum analizinin artımsal olarak uygulanmasına dayanmaktadır. Bu nedenle analiz sırasında, oluşan her plastik mafsaldan sonra değişen yapı sistemi için modal analiz yapılması gerekmektedir.



Şekil 2.6. ARSA Yönteminde Doğrusal olmayan ve doğrusal modal kapasite diyagramları

Çok serbestlik dereceli bir sistemde (i-1) ve (i). plastik mafsall oluşumları arasındaki tipik bir (i). itme adımındaki yerdeğiştirme vektörü artımına n. modun katkısı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta u_n^i = \Phi_n^{(i)} \Gamma_{xn}^{(i)} \Delta d_n^{(i)} \quad (2.25)$$

Burada Δu_n^i yerdeğiştirme vektörü artımını, Φ^i i. itme adımına ait mod vektörünü, Γ_{xn}^i x doğrultusunda etkiyen deprem için hesaplanan modal katkı çarpanını, Δd_n^i modal yerdeğiştirme artımını göstermektedir. Her bir yerdeğiştirme vektörüne karşı gelen yük artımı aşağıdaki denklemle ifade edilebilir:

$$\Delta f_{Sn}^i = M \Phi_n^{(i)} \Gamma_{xn}^{(i)} \Delta a_n^{(i)} \quad (2.26)$$

Burada Δf_{Sn}^i eşdeğer deprem yükü yük artımını, M kütle matrisini, $\Delta a_n^{(i)}$ modal spektral ivme artımını göstermektedir. Spektral ivme ile spektral ivme arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta a_n^{(i)} = (\omega_n^{(i)})^2 \Delta d_n^{(i)} \quad (2.27)$$

Burada $\omega_n^{(i)}$, i. itme adımıdaki plastik mafsallar göz önüne alınarak hesaplanan serbest titreşim frekansıdır. Buna göre, n. mod için çizilen modal kapasite diyagramının eğimi $\omega_n^{(i)}$ 'e eşittir.

Denklem 2.25'de tanımlanan yerdeğiştirme vektörü artımı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta u_n^{(i)} = \bar{u}_n^{(i)} \Delta d_n^{(i)} \quad (2.28)$$

$$\bar{u}_n^{(i)} = \Phi_n^{(i)} \Gamma_{xn}^{(i)} \quad (2.29)$$

Doğrusal olmayan analizde en önemli konu, her bir itme adımında farklı modlardaki modal büyüklüklerin nasıl ölçekleneceğidir. Bu yöntemde modal ölçekleme için modal yerdeğiştirmeler kullanılmakta ve bu amaçla her bir itme adımına karşı gelen doğrusal olmayan spektral yerdeğiştirmeler kullanılmaktadır. Bu amaçla Şekil 2.7'de gösterilen n. moda ait kapasite diyagramında aşağıdaki bağıntının her zaman geçerli olduğu varsayılmaktadır.

$$\Delta d_n^{(i)} = \bar{F}^{(i)} (S_{din}^i - \Delta d_n^{(i-1)}) \quad (2.30)$$

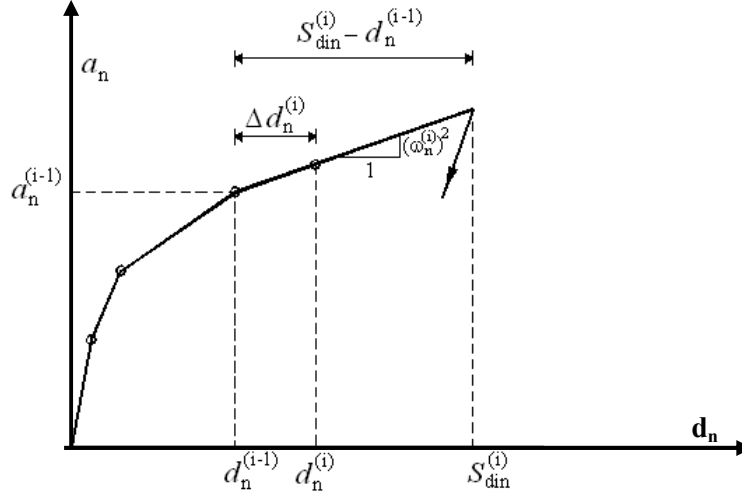
Burada $\bar{F}^{(i)}$ tüm modlar için geçerli olan modal ölçek katsayısıdır. Bu bağıntı daha sade olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\Delta d_n^{(i)} = \lambda_n^i \Delta d_n^{(i-1)} \quad (2.31)$$

Burada λ_n^i modlar arası göreceli ölçeklenme oranı olup;

$$\lambda_n^{(i)} = \frac{S_{din}^{(i)} - d_n^{(i-1)}}{S_{di1}^{(i)} - d_1^{(i-1)}} \quad (2.32)$$

olarak ifade edilir.



Şekil 2.7 ARSA Yönteminde Modal Yerdeğiştirmenin Ölçeklenmesi

Bu ifade kullanılarak her bir modun elastik ötesi davranışa katkısı belirlenebilir. Dikkate alınan modlar için belirlenen modal yerdeğiştirmeler kullanılarak her bir moda ait yerdeğiştirme, iç kuvvetler v.b. yapısal tepkiler SSRS, CQC gibi yöntemlerle süperpoze edilerek belirlenebilir.

Yöntemin diğer yöntemlerden temel farkı, modal kapasite eğrilerinin kullanarak yerdeğiştirmelerin doğrudan birleştirilmesidir. Yöntemde doğrudan bir yatay yükleme yapılmamaktadır.

Artımsal spektrum analizi (ARSA) yöntemin uygulanmasında izlenen hesap adımları aşağıda özetlenmiştir:

Adım 1. Bir önceki hesap adımı sonunda elde edilen anlık sistem rijitlik matrisi ve sistem kütle matrisi kullanılarak kütle bulunmayan serbestlik derecelerinde statik indirgeme yapılır.

Adım 2. Serbest titreşim analizi yapılarak dikkate alınan tüm modlar için anlık özdeğer, özvektör, modal kütle katılım oranı ve modal katılım çarpanları hesaplanır (Tek modlu analiz yapılması durumunda sadece birinci mod için işlem yapılır).

Adım 3. Her bir mod için $\overline{M}_{jn}^{(i)}$, $\overline{u}_n^{(i)}$ ve istenen diğer birim modal tepki büyüklükleri hesaplanır.

Adım 4. Her bir modal kapasite diyagramı iki doğrulu diyagrama dönüştürülerek etkili başlangıç periyodu hesaplanır. Birinci hesap adımında modal kapasite diyagramı doğrusal ve ikinci hesap adımında modal kapasite diyagramı iki doğrulu olduğundan bu adımlar için idealleştirme işlemi yapılmaz.

Adım 5. Her bir mod için, ek serbestlik dereceli sistemin dinamik hareket denkleminin dikkate alınan deprem ivme kaydı altında çözümü yapılarak veya önceden belirlenen idealleştirilmiş elastik tepki spektrumu kullanılarak etkili başlangıç periyoduna karşı gelen spektral yerdeğiştirme değerleri belirlenir. Analizlerde her bir mod için hesaplanan etkili başlangıç periyodu yerine o moda ait elastik periyodun kullanılması durumunda spektral yerdeğiştirmeler sadece birinci hesap adımında hesaplanır.

Adım 6. Analizde dikkate alınan tüm modlar için modlar arası ölçek faktörleri hesaplanır. Tek modlu analizde modlar arası ölçek faktörü birim değer alacağından bu adım atlanır.

Adım 7. Adım 3 ve Adım 6'ten bulunan değerler kullanılarak $\overline{M}_j^{(i)}$ ve istenen diğer birleştirilmiş birim tepki büyüklükleri hesaplanır. Tek modlu analizde bu adım atlanır.

Adım 8. Birinci moda ait modal yerdeğiştirme artımı hesaplanır ve bu hesap adımı sonunda akma meydana gelen kesite plastik mafsalları tanımlanır. İstenen tepki büyüklükleri hesaplanarak modal kapasite diyagramının yeni koordinatları belirlenir.

Adım 9. Birinci moda ait modal yerdeğiştirme değerinin Adım 5’te hesaplanan birinci moda ait spektral yerdeğiştirmeyi aşıp aşmadığı kontrol edilir. Eğer aşılmışsa, en büyük tepki değerleri hesaplanarak analize son verilir. Aşılmamışsa sonraki adıma geçilir.

Adım 10. Adım 8’de belirlenen akma meydana gelen kesite plastik mafsal tanımlanarak sistem rijitlik matrisi yenilenir ve sonraki artım adımı için Adım 1’e dönülür.

2.3.3 Modal Artımsal İtme Analizi (MPA) Yöntemi

Chopra, yapıların deprem performansının belirlenmesinde kullanılacak yüksek mod etkilerini dikkate alan ‘‘Modal Artımsal İtme Analizi (MPA)’’ (Modal Pushover Analysis) yöntemini geliştirmiştir. Analizde dikkate alınan her bir moda ait mod şekli ile orantılı yatay yük şekli dikkate alınarak ayrı ayrı artımsal itme analizi yapılmakta ve yapılan analizlerden elde edilen kapasite eğrileri kullanılarak her bir mod için hedef yerdeğiştirme belirlenmektedir. Her bir mod için hedef yerdeğiştirme değerine ulaşıldığı anda yapıdaki tüm i kuvvet ve yerdeğiştirmeler, uygun bir birleştirme yöntemi (karelerinin toplamının karekökü (SSRS), v.b.) ile birleştirilerek yapının nihai kapasite davranışı elde edilmektedir.

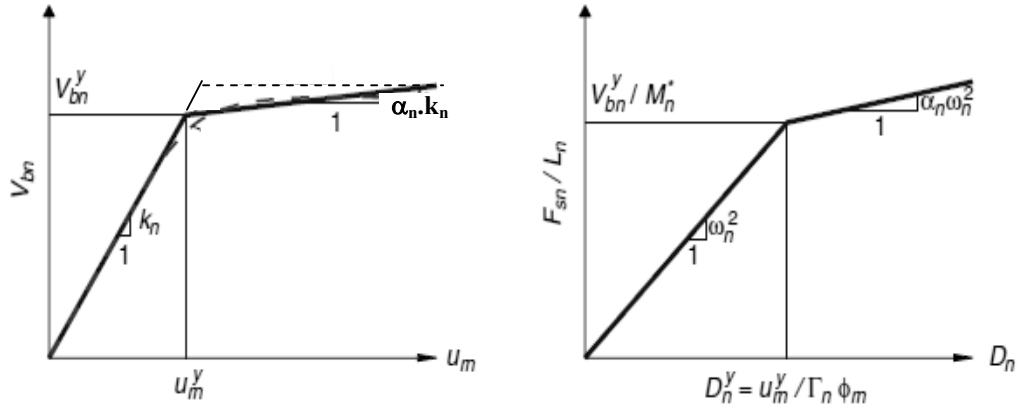
Modal artımsal itme analizi (MPA) yöntemin uygulanmasında izlenen hesap adımları aşağıda özetlenmiştir:

Adım 1. Yapının serbest titreşim analizi yapılarak dikkate alınan tüm modlar için elastik  zdeğer, özvektör, modal kütle katılım oranı ve modal katılım arpanları hesaplanır.

Adım 2. Yanal yük dağılımını $s^*=m.\phi_1$ şeklinde kabul edilerek yapının birinci modu için tepe noktası yerdeğiştirmesi-toplam taban kesme kuvveti ($V_{b1}-u_{r1}$) grafiği oluşturulur. Artımsal itme analizi başlamadan önce yapının düşey yükler altında analizi yapılır. P-Δ etkilerinden dolayı ($V_{b1}-u_{r1}$) eğrisinde akma sonrası negatif eğim oluşabilir.

Adım 3. ($V_{b1}-u_{r1}$) eğrisi iki doğrulu olarak idealleştirilir. Akma sonrasında negatif eğim oluşması durumunda idealleştirilen ikinci doğru parçasının eğimi negatif olmalıdır.

Adım 4. İdealleştirilmiş ($V_{b1}-u_{r1}$) eğrisi, n. mod için eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemin yük-yerdeğiştirme eğrisine dönüştürülür. (Şekil 2.8)



Şekil 2.8 MPA Yönteminde kapasite eğrisinin eşdeğer tek serbestlik dereceli sisteme dönüştürülmesi

Adım 5. Öngörülen sönüm altında n. moda ait eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemin en büyük yerdeğiştirme değeri hesaplanır.

Adım 6. Eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem için hesaplanan yerdeğiştirme yapının tepe noktasının gerçek yerdeğiştirmesine çevrilir.

Adım 7. Eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem için hesaplanan yerdeğiştirme yapının gerçek yerdeğiştirmesine çevrilir.

Adım 8. Adım 3 ve Adım 8 arasındaki işlemler dikkate alınan tüm modlar için tekrarlanır.

Adım 9. Düşey yüklerin yerdeğiştirmelerdeki etkisi çıkarılarak sadece deprem etkisinden oluşan tepki büyüklükleri hesaplanır.

Adım 10. Her bir mod için elde edilen tepki büyüklükleri SRSS veya CQC gibi uygun bir mod birleştirme yöntemi ile süperpoze edilir.

2.3.4 Üst Sınır Artımsal İtme Analizi (UBPA) Yöntemi

Jan ve diğerleri (1999) tarafından geliştirilen ve yüksek mod etkilerini dikkate alan “Üst Sınır Artımsal İtme Analizi (UBPA)” (Upper-Bound Pushover Analysis) yönteminde, yapıya etki edecek yanal eşdeğer deprem yükünün düşeydeki dağılımı elastik analizden her bir mod için bulunan deprem yükü dağılımlarının mutlak toplamı olarak alınmaktadır.

Üst sınır artımsal itme analizi (UBPA) yöntemin uygulanmasında izlenen hesap adımları aşağıda özetlenmiştir:

Adım 1. Yapının serbest titreşim analizi yapılarak dikkate alınan tüm modlar için elastik özdeğer, özvektör, modal kütle katılım oranı ve modal katılım çarpanları hesaplanır. Tüm mod şekilleri Φ_n , tepe noktası yerdeğiştirmesi $\phi_m = 1$ olacak şekilde normalize edilir.

Adım 2. Seçilen deprem ivme kayıtlarından elde edilen elastik tepki spektrumunu kullanarak yapının ikinci modunun katılım oranının $(q_2/q_1)_{UB}$ üst sınırı aşağıdaki denklemlerle hesaplanır:

$$\left(\frac{q_2}{q_1} \right)_{UB} = \left| \frac{\Gamma_2 D_2}{\Gamma_1 D_1} \right| \quad (2.33)$$

Burada Γ_n ($n=1,2$); n . modun modal katılım faktörü ve D_n ($n=1,2$) elastik yerdeğiştirme spektrumundan elde edilen modal yerdeğiştirme değerleridir.

Adım 3. Aşağıdaki formül kullanılarak yanal deprem yüklerinin yapı yüksekliğince dağılımını tanımlayan yük vektörü belirlenir:

$$\mathbf{f}_{s,UB} = \omega_1^2 \mathbf{m} \Phi_1 + \omega_2^2 \mathbf{m} \Phi_2 \cdot \left(\frac{q_2}{q_1} \right)_{UB} \quad (2.34)$$

Burada; ω_n ($n=1,2$), n . modun açısal frekansı; $\mathbf{f}_{s,UB}$, yatay yük dağılımı vektörü; $\mathbf{m}$, sistem kütle matrisi ve Φ_n ($n=1,2$), n . mod vektörüdür.

Adım 4. Yapının tepe noktası hedef yerdeğiştirmesi $u_{r,UB}$ aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$u_{r,UB} = u_{r,TLP} \left[1 + \left(\frac{q_2}{q_1} \right)_{UB} \right] \quad (2.35)$$

Burada; $u_{r,TLP}$, ters üçgen yatay yük dağılımı kullanılarak hesaplanan tepe noktası hedef yerdeğiştirme değeridir.

Adım 5. Yapıya etkiyen yanal yükler, sıfırdan başlayarak Adım 4’de bulunan tepe noktası hedef yerdeğiştirme değeri $u_{r,UB}$ ’ye ulaşılana kadar Adım 3’de belirlenen $\mathbf{f}_{s,UB}$, yatay yük dağılımı ile orantılı olarak arttırılır ve yapının deprem davranışı elde edilir.

BÖLÜM ÜÇ
BİNALARIN DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ İÇİN
YÖNLÜ MODAL BİRLEŞTİRME VE
ENERJİ ESASLI YERDEĞİŞTİRMEYE DAYALI
BİR ARTIMSAL İTME ANALİZ YÖNTEMİ

3.1 Giriş

Yapıların deprem etkisi altındaki elastik ötesi davranışını dikkate alarak deprem performansının belirlenmesinde “**statik artımsal itme analiz yöntemleri**” mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Yapıların birinci modunun dinamik davranışına hâkim olduğu, düzenli ve orta yükseklikteki binalar için uygun olan, ATC 40 ve FEMA 356’da da tariflenen klasik statik artımsal itme analizlerinin geliştirilmesi üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Özellikle yüksek modların yapı davranışına etkisini dikkate almak üzere literatürde, “modal artımsal itme analizi (MPA)” (Chopra ve Goel, 2001), “artımsal spektral analiz (ARSA)” (Aydinoğlu 2003), “üst sınır artımsal itme analizi (UBPA)” (Jan v.d., 1999) gibi çeşitli çok modlu statik artımsal itme analizi yöntemleri önerilmiştir.

Statik artımsal itme analiz yöntemlerinin büyük bir kısmı, kabul edilen bir yatay yük dağılımı altında, eşdeğer deprem yüklerinin adım adım arttırılarak yapının yerdeğıştirmeye bağı kapasite eğrisinin ve göçme mekanizmasının belirlenmesine dayanmaktadır. Burada en önemli parametre, her bir modun katkısını tanımlayacak yatay yük dağılımının gerçek şeklinin bulunmasıdır. Düzenli ve az katlı yapılarda yatay yük dağılımının, yapının birinci mod şekli ile uyumlu olduğu kabul edilmektedir. Ancak; çok katlı, planda ve düşeyde düzensiz yapılarda yatay yükleme şeklinin belirlenmesi oldukça zor ve karmaşık olmaktadır. Bu tip düzensiz yapı sistemlerinin deprem davranışlarının belirlenmesi için yapılan araştırmalar halen devam etmektedir.

Düzenli, az katlı, planda simetrik yapıların deprem performansını belirlemesine esas artımsal itme analiz yöntemlerinde yatay yük dağılımları için çok çeşitli kabuller bulunmaktadır. Bu dağılımların en basiti çoğu deprem yönetmeliğinde yer alan ters üçgen veya ikinci derece parabol yük dağılımıdır.

ATC 40'da (1996), yatay yükleme şeklinin yapının analiz yapılan doğrultusundaki “birinci mod şekli ile orantılı” olarak alınması önerilmektedir (Şekil 2.1).

FEMA 356'da (2000), yanal yük şekli olarak yapının “birinci mod şekli ile uyumlu yatay yükleme”, yapının kat kütleleri ile uyumlu “uniform yatay yükleme”, mod birleştirme yönteminden bulunan “kat kesme kuvvetleri ile uyumlu yükleme”, “ikinci derece dağılıma uygun yükleme” olmak üzere dört yükleme türü tanımlanmıştır (Şekil 2.3).

Artımsal itme analiz yöntemlerinin çok katlı, planda ve düşeyde düzensiz yapılarda da uygulanabilmesi için yapılan çalışmalar, çok modlu analiz yöntemleri üzerine yoğunlaşmıştır (Mwafy ve Elnashai, 2001; Gupta ve Kunnath, 2000; Aydınoglu, 2001; Chopra ve Goel, 2002). Bu yöntemlerde, tek modlu artımsal itme analiz yöntemlerine benzer olarak, yapıya düşey yükler etki edildikten sonra yapının mod şekilleriyle veya kat kütleleriyle orantılı ve ters üçgen veya parabol gibi monotonik artan yük şekilleri ile uyumlu yanal yükler uygulanmaktadır. Hangi durumda hangi yükleme şeklinin daha iyi sonuç vereceğinin kestirilmesi kolay olmadığından analizi yapan mühendisin konu ile ilgili bilgi ve tecrübesi önem kazanmaktadır.

Artımsal itme analiz yöntemlerinde yüksek mod etkilerinin dikkate alınması, halen üzerinde araştırmaların devam ettiği bir konudur. Bu konuda ilk olarak Sasaki ve diğer., (1998), farklı modal yükleme şekilleri kullanarak her mod için kapasite eğrisini elde etmeyi amaçlayan “çoklu modal artımsal itme analizi” (MMP) yöntemi geliştirilmiştir.

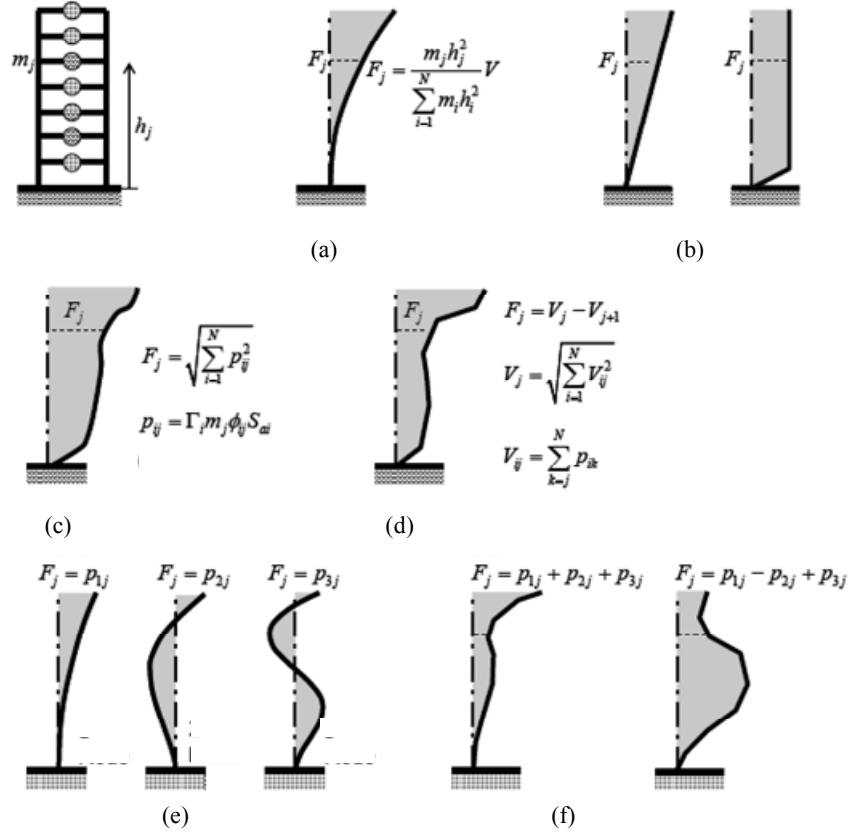
Gupta ve Kunnath (2000), yatay yükleme şeklinin her bir adımda plastik mafsall oluşumuna bağlı olarak yapının modal özelliklerinin değişimi ile uyumlu olacak şekilde yenilenmesini esas alan “uyarlamalı artımsal itme analizi” (APM) yöntemini geliştirmiştir.

Chopra ve Goel (2002) ise çoklu modal artımsal itme analizini (MMP) geliştirerek, “modal artımsal itme analizi yöntemi”ni önermiştir. Bu yöntemde incelenen yapı, dikkate alınan her bir mod şekli ile ayrı ayrı artımsal itme analizi yapılmakta, her bir mod yerdeğiştirme talebine ulaştığı andaki yerdeğiştirme ve iç kuvvet değerleri uygun bir modal birleşim kuralı ile hesaplanmaktadır.

Yüksek mod etkilerinin yatay yükleme şekline etkisini dikkate almak için doğrusal elastik analizde geçerli olan “karelerinin toplamının karekökü” (SRSS) veya “tam karesel birleştirme” (CQC) kuralları, doğrusal olmayan artımsal itme analizlerinde de kullanılmaya başlanmıştır. Bu amaçla, Requena (2000) yatay yükleme şeklini belirlerken, katlara etkileyen analizde dikkate alınan her bir moda ait modal deprem kuvvetlerinin SRSS veya CQC kuralı ile birleştirilmesi ile belirlenmesini önermiştir. Lee (2002) ise yaptığı çalışmada yatay yükleme şeklini her bir mod için elde edilen kat kesme kuvvetlerinin “karelerinin toplamının karekökü” (SRSS) kuralı ile birleşimi olarak kullanmıştır.

Kunnath (2004), ilk olarak Matsumori (1999) tarafından modal birleşim kuralını esas alarak artımsal itme analizinde yapıya etkileyen yük şekilleri, katlara etkileyen modal deprem kuvvetlerinin cebirsel olarak toplanması ile elde edilmektedir. Elde edilen yükleme birleşiminde yüklerin işareti kaybolmadığından, yüksek modların yönüne bağlı olarak farklı yükleme şekilleri oluşmaktadır. Ancak, mod şekillerine bağlı yüklemelerin cebirsel toplanabilmesi için tüm yükleme şekillerinin aynı zaman adımıyla oluşması gerekmekte olup yöntemde bu durum dikkate alınmamaktadır.

Yukarıda açıklanan yük dağılımları şematik olarak Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Artımsal itme analizinde kullanılan yatay yükleme şekilleri

- a) Deprem Yönetmeliği-2007; b) ATC-40 c) Requena (2000) d) Lee (2002)
e) Sasaki (1998) ve Chopra(2002) f) Kunnath (2004)

Gerçek durumda, depremin her bir anında yapıya farklı eşdeğer deprem kuvvetleri etki etmektedir. Daha gerçekçi sonuçlar verdiği kabul edilen “zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz”de, aynı zaman adımı için yapının her bir modu için bulunan **tepki büyüklükleri**, iki ardışık hesap adımı arasında elastik olduğu kabul edildiğinden süperpozisyon prensibi geçerli olup cebirsel olarak toplanarak bulunabilmektedir. Ancak, Şekil 3.1’de gösterilen statik artımsal itme analizi yöntemleri ile yapılan analizlerde, modal birleştirme kurallarından elde edilen tek bir yükleme şekli alınarak analiz yapmak doğru olmamaktadır. Bu nedenle, yüksek modların yönlerini de dikkate alan yükleme şekillerinin oluşturulduğu statik artımsal itme analiz yöntemleri kullanılmalıdır.

Yapıların deprem performansının belirlenmesinde literatürde yer alan çok modlu analiz yöntemleri, genellikle kontrol parametresi olarak yapı tepe noktası yerdeğiştirmesini kullanmakta ve buna göre plastik mafsall oluşumuna bağlı yapı kapasitesi elde edilmektedir. Bu yöntemlerde sadece tepe noktası yerdeğiştirmesi esas alındığından, yapının herhangi bir ara katında var olan bir düzensizliğin yapı kapasitesine etkisi tam olarak gözlemlenememektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, yapıların deprem performansının belirlenmesinde yüksek modların yönlerini de dikkate alan, yönlü modal birleştirme ve enerji esaslı yeni bir artımsal itme analiz yöntemi önerilmiştir.

Enerji esaslı ve çok modlu bu yöntemde, yapının plastik mafsall oluşumuna bağlı yapı plastik enerjiden faydalanarak yapının kapasitesinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Analizlerde kullanılacak yatay yükleme şeklinin belirlenmesinde ise karelerinin toplamının karekökü (SRSS) yöntemindeki kare alma işleminden kaynaklanan işaret kayıplarını önleyecek bir matematiksel birleşim kuralı geliştirilmiştir.

Önerilen yöntemin esasları aşağıdaki bölümlerde açıklanmaktadır.

3.2 Geliştirilen Enerji Esaslı ve Çok Modlu Statik Artımsal İtme Analizinde Kullanılacak Yükleme Şeklinin Belirlenmesi İçin Önerilen Yeni Bir Modal Birleştirme Yöntemi

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz, günümüzde en güvenilir yapısal analiz yöntemi olarak kabul edilmektedir. Elastik sistemler için süperpozisyon prensibi geçerli olduğundan, bu tür yapılar için yapılan zaman tanım alanında analizde, aynı zaman adımı için yapının her bir modu için bulunan tepki büyüklükleri cebirsel olarak toplanabilmektedir. Bu analiz yöntemi güvenilir olmasına karşın uzun analiz zamanı gerektirmesi ve pratik kullanıma uygun olmaması gibi nedenlerle özel durumlar dışında tercih edilmemektedir.

Deprem performansı belirlenecek yapılarda oluşacak en büyük yapısal tepki büyüklüklerinin daha hızlı ve daha pratik belirlenebilmesi için genellikle tepki spektrumu yöntemi kullanılmaktadır. Ancak, yerdeğiştirme esaslı tepki spektrumu yönteminde, elastik spektral ivme değerleri kullanıldığından, hesaplanan modal büyüklüklerin cebirsel olarak toplanması mümkün olmamakta ve modal etkilerinin birleştirilmesi için karelerinin toplamının karekökü (SRSS) veya tam karesel birleştirme (CQC) gibi yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. SRSS yöntemi, yapının ardışık periyotlarının birbirine yakın olmadığı sistemlerde kullanılabildiği halde, CQC yöntemi tüm sistemlerde kullanılabilmektedir.

Tepki spektrumu yönteminde, doğrusal elastik yapı sistemleri için geçerli olan SRSS ve CQC birleşim kuralları, süperpozisyon prensibinin geçerli olmadığı doğrusal olmayan yapı sistemlerinde doğrudan kullanılamamaktadır. Bu nedenle, yüksek mod etkilerinin dikkate alınması gereken ve doğrusal olmayan davranış gösteren sistemlerde modal etkilerinin birleştirilmesi önemli bir sorundur. Ancak, tüm artımsal itme analizlerinde, ardışık iki plastik mafsallı oluşumu arasında sistem elastik kabul edilerek, söz konusu birleşim yöntemleri kullanılabilmektedir.

Mod birleşim yöntemlerinin diğer bir problemi, karesel birleşim yapıldığından modların yön etkilerinin kaybolmasıdır. Özellikle yüksek modlarda, yapının her iki yönüne doğru olan mod şekilleri, SRSS ve CQC yöntemleri uygulandığında yapının birinci moduna benzer olarak tek yönlüymüş gibi dikkate alınmaktadır. Bu durum, artımsal itme analiz yöntemlerini için son derece önemli olan yapısal büyüklüklerin (plastik mafsallar, yerdeğiştirme, kat kesme kuvveti, taban kesme kuvveti v.b.) gerçekçi bir şekilde belirlenememesine neden olmaktadır.

Modların yön etkilerinin kaybolmasını engellemek üzere çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Örneğin, Kunnath (2004) ve Matsumori (1999) gibi araştırmacılar, modal etkilerin hiçbir birleştirme kuralına tabi olmadan cebirsel toplanmasını esas alan yöntemler önermiştir. Bu kabulün tam olarak geçerli olabilmesi için, modal etkilerin aynı zaman adımıyla oluşması gerekmektedir. Ancak, doğrusal ve doğrusal olmayan spektrum analizine dayalı yöntemlerde, dikkate alınan her bir mod için

herhangi bir zaman adımında oluşacak en büyük iç kuvvet ve şekil değiştirmeler esas alındığından, bu şartın sağlandığını söylemek zordur.

Yapılan tez çalışmasında, ortogonal olan modların birleştirilmesi sırasında, modal büyüklüklerin işaretlerinin yapısal büyüklüklere olan etkisini göz önüne alabilmek için yeni bir matematiksel birleştirme ifadesi önerilmiştir. Bu amaçla, karelerinin toplamının karekökü (SRSS) kuralı modifiye edilerek, modal büyüklüklerin yönünün yer değiştirme, kat kesme kuvveti v.b. yapısal büyüklüklere etkisinin dikkate alınması sağlanmıştır.

Önerilen matematiksel birleştirme ifadesi aşağıdaki şekilde kabul edilmiştir:

$$R_c = \text{sign}\left(\sum_{i=1}^N \phi_i\right) \sqrt{\sum_{i=1}^N \text{sign}(\phi_i) \cdot R_i^2} \quad (3.1)$$

Burada;

ϕ_i : i. mod vektörü,

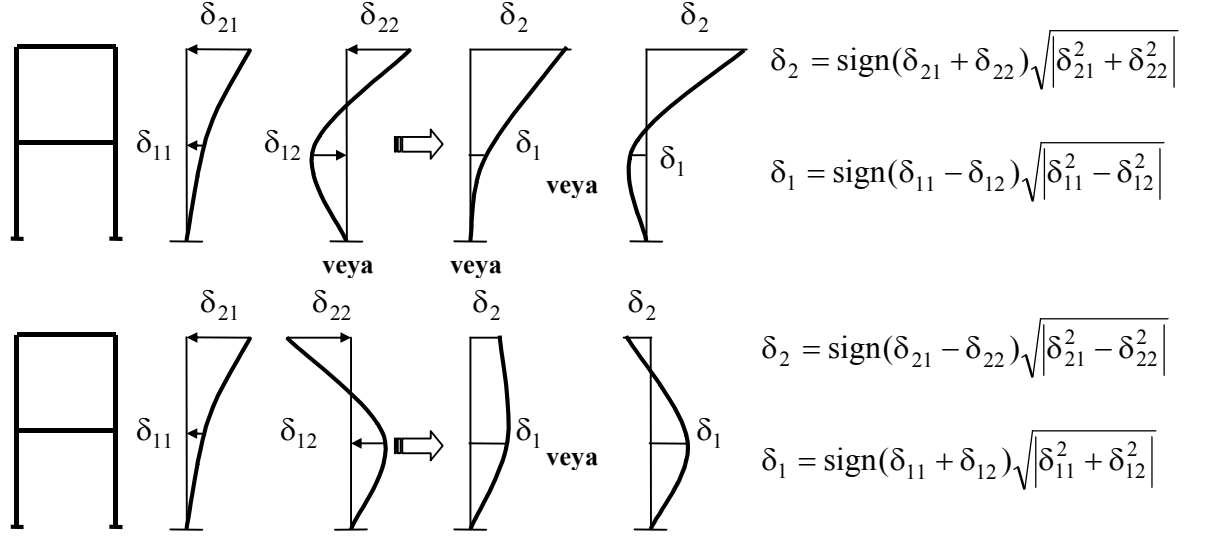
N: analizlerde kullanılan mod sayısı,

R_i : her bir moda ait birleştirilecek modal büyüklük,

R_c : birleşimden elde edilen yapısal büyüklük değeri'dir.

Yukarıdaki matematiksel birleştirme ifadesinde, modların yönleri kaybolmamakta ve her bir hesap adımında birden fazla yük dağılımı elde edilebilmektedir. Her bir yükleme için yapılacak artımsal itme analizinden elde edilecek yük artımlarının en küçüğünü veren dağılıma göre sistemin o adımıdaki yer değiştirme ve iç kuvvetleri hesaplanacaktır.

Önerilen matematiksel birleştirme kuralından elde edilecek yük dağılımları şematik olarak iki katlı bir yapıda iki mod için Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Önerilen matematiksel birleştirme ifadesi kullanılarak iki katlı bir yapıda elde edilen yükleme şekillerinin şematik gösterimi

Dikkate alınan mod sayısı ne kadar artarsa her bir adımda yapılacak hesap sayısının artması yanında yapının deprem davranışı daha iyi belirlenecektir. Örnek olarak, elastik tasarımdaki yaklaşım dikkate alınarak yapının en az %90 kütle katılımını sağlayan mod sayısının yeterli olacağı kabul edilebilir.

3.3 Statik Artımsal İtme Analizinde Eşdeğer Tek Serbestlik Dereceli Sistemin Hesaplanmasında Kullanılan Enerji Esaslı Yerdeğiştirme Yöntemi

Çok serbestlik dereceli bir yapı sisteminin mutlak enerji ifadesi Uang ve Bertero (1988) tarafından aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$\int_0^u m u_t'' du + \int_0^u u_t'^T c du + \int_0^u f_s du = \int_0^u \left(\sum_{i=1}^N m_i u_{ti}'' \right) du_g \quad (3.2)$$

Burada “m” kütle, “c” viskoz sönüm katsayısı, “f_s” yay kuvveti, “u_t” kütlenin mutlak yerdeğiştirmesi, “u_g” yer hareketinin yerdeğiştirmesidir.

Elastik durum için n. modda $\int_0^u f_s du$ aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$E_n = \int_0^u f_{ns} du = \frac{1}{2} f_{sn}^T u_n \quad (3.3)$$

Elastik bölgede, yapının n. modu için elastik yay kuvveti f_{sn} , ve yerdeğiştirme u_{sn} modal büyüklüklere bağlı olarak,

$$f_{sn}(t) = \mathbf{K} \phi_n \Gamma_n d_n(t) = \omega^2 \mathbf{M} \phi_n \Gamma_n d_n(t) \quad (3.4)$$

$$u_n(t) = \phi_n q_n(t) = \phi_n \Gamma_n d_n(t) \quad (3.5)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Yapı modları rijitlik matrisine göre ortagonal olduğundan, f_{sn} yay kuvveti sadece n. mod için yerdeğiştirme meydana getirecektir. Sonuç olarak bu kuvvetten dolayı diğer yapılan iş diğer modlar için sıfır olacaktır.

Elastik durum için, yapının n. modunun sıfır ile en büyük elastik yerdeğiştirme u_n arasında soğuracağı enerjiyi hesaplamak için denklem (3.4) ve (3.5), denklem (3.3)'de yerine konulursa her bir modun soğurduğu enerjiyi veren ifade;

$$E_n = \int_0^u f_{sn} du = \frac{1}{2} f_{sn}^T u_n = \frac{1}{2} (\omega^2 \mathbf{M} \phi_n \Gamma_n d_n(t)) (\phi_n^T \Gamma_n d_n(t)) = \frac{1}{2} \omega^2 \Gamma_n^2 \mathbf{M}_n d_n(t)^2 \quad (3.6)$$

olarak elde edilir.

Burada Γ_n , n. mod katılım faktörü; M_n , n. modun modal kütlesidir.

Yapının herhangi bir n.moduna ait toplam taban kesme kuvveti aşağıdaki denklemle ifade edilir.

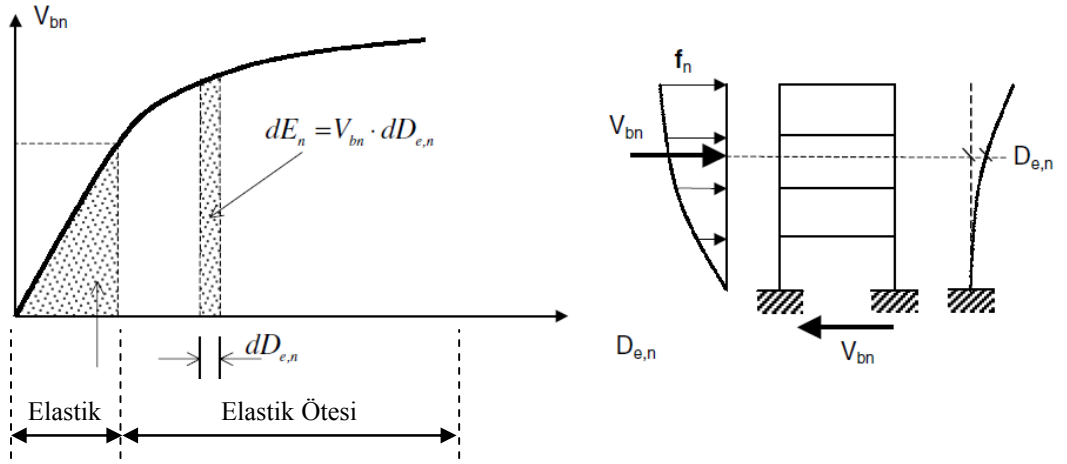
$$V_{bn} = f_n^T \mathbf{1} = \omega_n^2 \Gamma_n \phi_n^T \mathbf{M} \mathbf{1} d_n(t) = \frac{1}{2} \omega_n^2 \Gamma_n^2 M_n d_n(t) \quad (3.7)$$

Denklem (3.7) denklem (3.6)'da yerine konulursa n. mod için elastik enerji ifadesi;

$$E_n = \frac{1}{2} V_{bn} d_n(t) \quad (3.8)$$

şeklinde elde edilir.

Denklem (3.8) grafik olarak toplam taban kesme kuvveti ile modal yerdeğiştirme grafiğinin altındaki alan olarak tanımlanabilir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Enerji ifadesinin grafiksel gösterimi

Bu tanım kullanılarak, enerji esaslı modal yerdeğiştirme $D_{e,n}$;

$$D_{en} = \frac{2E_n}{V_{bn}} \quad (3.9)$$

şeklinde hesaplanır.

Genel olarak, elastik ve elastik ötesi durumda n. mod toplam taban kesme kuvveti V_{bn} tarafından diferansiyel yerdeğiştirme dD_{en} için yapılan iş dE_n ;

$$dE_n = V_{bn} dD_{en} \quad (3.10)$$

olarak hesaplanır.

Artımsal olan bu ifade kullanılarak, artımsal itme analizinin her adımı için belirlenen ΔE_n ve V_{bn} kullanılarak enerji esaslı yerdeğiştirme artımı ΔD_{en} ;

$$\Delta D_{en} = \frac{\Delta E_n}{V_{bn}} \quad (3.11)$$

şeklinde bulunur.

Bu yöntemin diğer yerdeğiştirme esaslı statik artımsal itme analizi yöntemlerine göre en büyük avantajı, herhangi bir anda ve herhangi bir kattaki yerdeğiştirmelerin tek bir değerine bağlı kapasite eğrisi yerine, oluşan plastik mafsallara bağlı tüm yapının tükettiği plastik enerji kullanılarak yapı davranışını daha iyi temsil eden bir kapasite eğrisinin oluşturulmasıdır.

İlk defa Hernandez-Montes (2004) tarafından önerilen, eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemin yerdeğiştirmesinin enerji esaslı yöntemle belirlenmesi daha sonra Kalkan ve Kunnath (2006) tarafından da kullanılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında da yerdeğiştirmeler, enerji esaslı bu yöntem ile hesaplanmıştır. Her bir adım için bulunan enerji esaslı yerdeğiştirmeler toplanarak plastik enerji kapasite eğrisinin yatay eksen tanımlanmaktadır.

Plastik enerji kapasite eğrisinin düşey eksen olarak, yapıda oluşan plastik mafsallarda tüketilen toplam enerji değeri tanımlanmıştır. Plastik mafsalların oluşumuna bağlı olarak

Sisteme etkileyen deprem enerjisi yapıda elastik ve plastik şekil değiştirmeler ile tüketilmektedir. Elastik olarak tüketilen enerji yapıda potansiyel enerjiye dönüşmekte ve yapıyı deprem sonrasında eski konumuna getirmeye çalışarak tekrar sıfırlanmaktadır. Plastik mafsallarda tüketilen enerji ise yapının deprem sırasında tükettiği plastik enerjiyi tanımlamaktadır. Bu enerji yapıda hasarı oluşturan enerji olup deprem sonrasında yapıda kalıcı yerdeğiştirmeler oluşturan ve geriye

döndürülemeyen enerjidir. Buna göre yapının deprem sırasında güvenli olabilmesi için, oluşacak plastik mafsallarda tüketilebilecek toplam enerji değerinin depremin yapıdan talep ettiği plastik enerji değerinden yüksek olması gerektiği düşünülebilir. Depremin yapıdan talep ettiği en büyük plastik enerji değeri, yeterli sayıda seçilecek deprem kayıtları kullanılarak oluşturulacak plastik enerji spektrumları ile belirlenebilir.

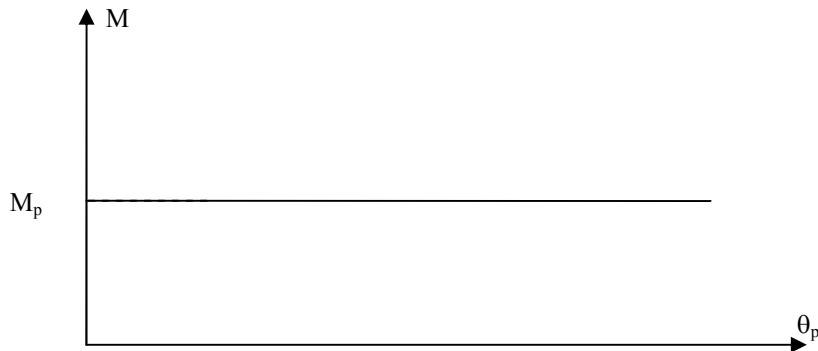
Tez çalışmasında ise belirli depremler altında yapı davranışı incelendiği için seçilen deprem kayıtları kullanılarak seçilen örnek yapılar için yapılan “zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz”den en büyük plastik enerji değeri hesaplanmış ve “geliştirilen yönlü modal birleştirme ve enerji esaslı yerdeğiştirmeye dayalı artımsal itme analiz yöntemi”nde hesaplanan bu değerler esas alınmıştır.

Plastik enerjinin, yığılı plastiste kabulüne göre plastik mafsal olarak adlandırılan belirli kesitlerde tüketildiği kabul edilmiş ve bu kesitlerde tüketilen plastik enerji kesitin moment-plastik dönme bağıntısının ideal elasto-plastik olduğu kabulü ile;

$$E_p = M_p \theta_p \quad (3.12)$$

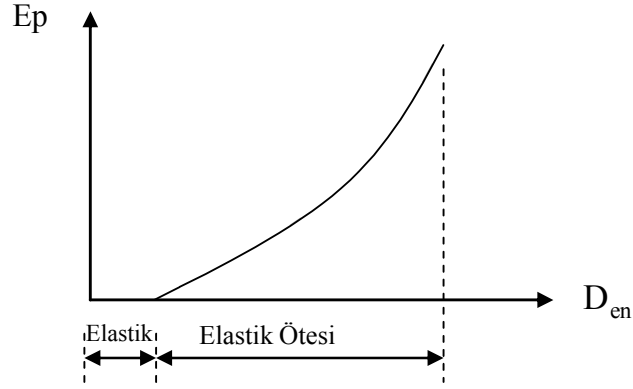
denklemleri ile hesaplanmıştır. (Akbaş, 1999; Leelataviwat, 1998)

Kesitler için kabul edilen ideal elasto-plastik moment-plastik dönme bağıntısı şematik olarak Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Plastik mafsallar için kabul edilen ideal elasto-plastik davranış

Plastik enerji ve enerji esaslı yerdeğiştirme kullanılarak oluşturulan “yapı plastik enerji kapasite eğrisi” şematik olarak şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Yapı plastik enerji kapasite eğrisi

3.4 Tez Kapsamında Geliştirilen Yönlü Modal Birleştirme ve Enerji Esaslı Yerdeğiştirmeye Bağlı Artımsal İtme Analizi Yönteminin Hesap Adımları

Tez kapsamında geliştirilen yönlü modal birleştirme ve enerji esaslı statik artımsal itme analizi yöntemi ile oluşturulacak “yapı plastik enerji kapasite eğrisi”nin hesaplanmasında izlenen adımlar aşağıdaki gibidir:

Adım 1. Yapısal elemanların (kolonlar ve kirişler) malzeme ve enkesit özellikleri kullanılarak plastik mafsal oluşabilecek kesitlerin moment-eğrilik bağıntıları ve akma koşulları belirlenir.

Adım 2. Düşey hesap yükleri altında sistemin analizi yapılarak artımsal itme analizinin ilk adımında kullanılacak gerekli büyüklükler (kesit iç kuvvetleri, yerdeğiştirmeler vb.) belirlenir.

Adım 3. Her bir hesap adımında yapının dinamik modal analizi yapılarak gerekli modal büyüklükler hesaplanarak analizde dikkate alınan her bir mod için yatay yük dağılımı belirlenir.

Adım 4. Her bir moda ait yatay yük dağılımı bağımsız olarak sisteme etki ettirilerek, birim modal davranış büyüklükleri (r_i) belirlenir. Burada, birinci modun etki yönü her zaman pozitif kabul edilir ve dikkate alınan diğer modlar ise bir pozitif bir negatif olarak kabul edilerek analiz yapılır.

Adım 5. Elde edilen birim modal davranış büyüklükleri, tez kapsamında önerilen matematiksel birleştirme ifadesi (3.1)'e göre birleştirilerek iki plastik mafsallardaki yük artımının belirlenmesine esas yerdeğiştirme şekilleri oluşturulur. En küçük yük artımını veren yerdeğiştirme şekli o hesap adımına ait yerdeğiştirme artımı olarak kabul edilir.

Adım 6. Adım 5'te belirlenen yerdeğiştirme şekline bağlı olarak yapının tüm elemanlarında iç kuvvet ve yerdeğiştirme artımları hesaplanır.

Adım 7. i'ninci hesap adımında enerji esaslı dönüşüm kullanılarak, yapının eşdeğer tek serbestlik dereceli sisteme ait yerdeğiştirme artımı hesaplanır ve kapasite eğrisindeki yatay ekseninde gösterilir (ΔD_{en}).

Adım 8. i'ninci hesap adımında yapıda tüketilen toplam plastik enerji, elemanlarda o hesap adımında oluşan her bir plastik mafsaldaki plastik enerjinin toplanması ile hesaplanır ve kapasite eğrisindeki düşey ekseninde gösterilir (E_p).

Adım 9. Yapıda tüketilen toplam plastik enerji, deprem sırasında yapının tüketmesi gereken plastik enerjiden küçük ise Adım 3'e dönülerek yeni hesap adımına geçilir.

Adım 10. Deprem sırasında yapının tüketmesi gereken toplam plastik enerji değerine ulaşıldığında analize son verilir.

Yöntemde her hesap adımında bir yerine birden çok yükleme şekli için analiz yapılmaktadır. Analizde kullanılan mod sayısı ne kadar fazla olursa işlem hacmi o kadar artacaktır. Hesap yoğunluğunu arttırmamak için yeterli sayıda modla analiz

yapılmalıdır. Örnek olarak, elastik tasarımdaki yaklaşım dikkate alınarak yapının en az %90 kütle katılımını sağlayan mod sayısının yeterli olacağı kabul edilebilir.

BÖLÜM DÖRT
YÖNLÜ MODAL BİRLEŞTİRME VE
ENERJİ ESASLI YERDEĞİŞTİRMEYE BAĞLI
YENİ BİR ARTIMSAL İTME ANALİZ YÖNTEMİ İLE YAPILARIN
DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ İÇİN
GELİŞTİRİLEN BİLGİSAYAR YAZILIMI

4.1 Giriş

Doğrusal olmayan statik artımsal itme analizi yöntemleri ile yapılan hesaplamalar, ardı ardına tekrarlanan bir dizi statik analiz gerektirmektedir. Bilgisayar yazılımları kullanılmadan bu tür ardışık analizlerin yapılması neredeyse imkansız olmaktadır.

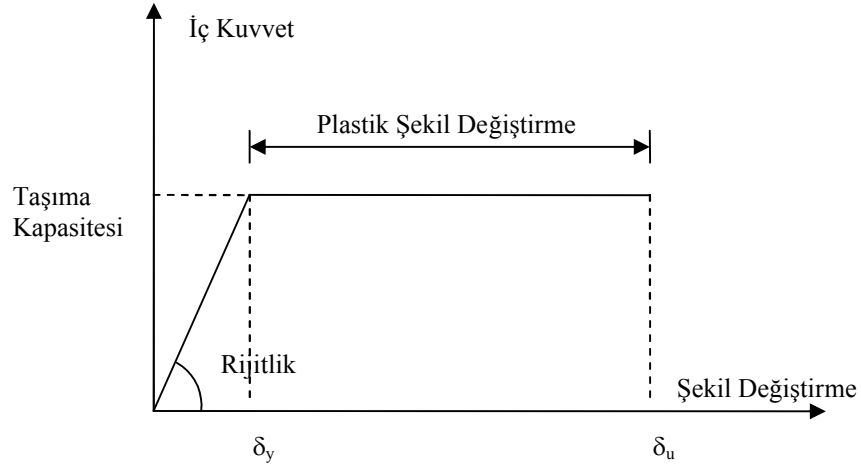
Değişik araştırmacılar tarafından geliştirilen doğrusal olmayan statik artımsal itme analiz yöntemleri için, farklı farklı bilgisayar yazılımları geliştirilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında da geliştirilen “**yönlü modal birleştirme ve enerji esaslı yerdeğiştirmeye bağlı statik artımsal itme analizi yöntemi**”nin kullanılabilmesi için MATLAB yazılımı kullanılarak bir bilgisayar programı hazırlanmıştır.

4.2 Geliştirilen Bilgisayar Yazılımının Genel Kabulleri

Matris-deplasman yöntemi kullanılarak tez kapsamında geliştirilen bilgisayar yazılımının kabulleri aşağıdaki gibidir.

- Analizi yapılan yapı sistemi iki boyutlu düzlemsel çubuk sistemdir.
- Düzlem kesitler, Bernoulli-Navier hipotezine uygun olarak şekil değiştirdikten sonra da düzlem kalır.
- Elemanların iç kuvvet-şekil değiştirme bağıntıları, Şekil 4.1’de gösterilen iki doğrulu ideal elastoplastik davranış şeklinde idealleştirilmiştir.



Şekil 4.1. İki doğrusu ideal elastoplastik davranış

- Doğrusal olmayan dönme ve uzama şekil değiştirmelerin plastik kesit olarak tanımlanan belli bölgelerde toplandığı ve bu bölgeler dışında kalan kısımlarda sistemin doğrusal elastik davrandığı kabul edilmiştir.
- Kirişler gibi eksenel yük düzeyinin düşük olduğu elemanlarda, plastik mafsall oluşumunun sadece eğilme momentine bağlı olduğu kabul edilerek, bu tür elemanlar için eksenel kuvvetin ve kesme kuvvetinin akma şartlarına etkisi dikkate alınmamaktadır.
- Kolon gibi bileşik eğilme etkisi altındaki elemanlarda, akma koşullarının eğilme momenti ve normal kuvvete bağlı olduğu kabul edilmiş ancak kesme kuvvetinin akma koşullarına etkisinin terk edilebileceği varsayılmıştır. Oluşturulan akma yüzeyleri için akma vektörünün akma yüzeyine dik olacağı varsayılmaktadır.
- Kolon gibi bileşik eğilme etkisi altındaki elemanlarda ikinci mertebe teorisi, kiriş gibi normal kuvvet seviyesinin düşük olduğu elemanlarda ise birinci mertebe teorisi uygulanmaktadır. İkinci mertebe teorisinde geometri değişimlerinin sadece denge denklemlerine etkisi dikkate alınmakta, geometrik uygunluk şartlarına etkisi ise ihmal edilmektedir.

- Analizlerde, yapı sisteminin şekil değiştirmesi sırasında yüklerin etkiye doğrultularının değişmediği kabul edilmektedir.
- Çubuk elemanlar doğru eksenli olup sabit en kesitlidir. Elemanlardaki normal kuvvetler sabittir.
- Yayılı yükler yeter sayıda eşdeğer tekil yüklere dönüştürülerek sisteme etki ettirilmektedir.
- Kayma şekil değiştirmelerinin denge denklemlerine etkisi dikkate alınmaktadır.
- Plastik mafsalların sadece çubuk elemanların uçlarında oluşacağı kabul edilmiştir.
- Dinamik analizlerde, topaklanmış kütle kabulü yapılarak kütleler kat seviyelerinde tanımlanmaktadır. Ayrıca, kütlelerin sadece yatay ötelenmeye ait atalet bileşeni göz önüne alınmakta, düşey ve dönme ataletlerinin etkileri terk edilmektedir.

4.3 Analizlerde Kullanılan Yük Artım Yöntemi

Yapıların deprem yüklerini temsil eden tek yönlü artan yatay yükler altında elastik ötesi davranışını belirlemek üzere literatürde çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Genel olarak ikinci mertebe plastik analizde kullanılan yöntemler:

- Yayılı plastik davranış esas alan yöntemler,
- Yığılı plastik davranış kabulü ile plastik mafsallara dayanan yöntemler,

şeklinde iki gruba ayrılabilir.

Yayıllı plastik davranışı esas alan yöntemlerde, çubuk elemanlar çok sayıda küçük parçalara bölünmektedir. Ayrıca çubuk en kesiti de kendi içinde çok sayıda life ayrılmaktadır. Yayıllı plastik davranışı kullanan yöntemler günümüzde en doğru analiz yöntemi olarak kabul edilmesine karşın çok uzun analiz süresi gerektirmesi ve pratik olmaması gibi nedenlerden dolayı bilimsel çalışmalar dışında fazla kullanım alanı bulamamaktadır.

Yapıların elastik ötesi davranışını belirlemede en yaygın kullanılan yöntemler yığıllı plastik davranışı esas alan plastik mafsallı hipotezine dayalı yöntemlerdir. Bu yöntemlerde plastikleşmenin plastik mafsallı olarak tanımlanan tek bir çubuk en kesitinde toplandığı kabul edilmektedir.

Yapı analizinde rijitlik matrisinin oluşturulmasında; ya plastik mafsallı oluşumuna bağlı olarak rijitlik matrisi mafsallı oluşumunu içerecek şekilde her adımda yeniden oluşturulur (Kim ve diğerleri, 2002) ya da her adımda rijitlik matrisine ilave satır ve sütun eklenerek plastik mafsallı etkisi dikkate alınmaktadır (İrtem, 1992; Türker, 2005).

Bu tez kapsamında hazırlanan bilgisayar yazılımında, rijitlik matrisinin her plastik mafsallı oluşum adımıyla yenilenmesine dayanan plastik mafsallı hipotezi kullanılmıştır.

4.3.1 Stabilite Fonksiyonları ile İkinci Mertebe Etkilerini Dikkate Alan Temel Rijitlik Matrisi

İkinci mertebe etkilerinin yapı davranışına etkisi genellikle stabilite fonksiyonları kullanılarak tanımlanmaktadır. Düzlemsel çubuk elemanlar için ikinci mertebe etkilerini içeren temel rijitlik matrisi aşağıdaki şekilde elde edilmektedir (Kim ve diğerleri, 2002);

$$\begin{Bmatrix} P \\ M_i \\ M_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & S_1 \frac{EI}{L} & S_2 \frac{EI}{L} \\ 0 & S_2 \frac{EI}{L} & S_1 \frac{EI}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta \\ \theta_i \\ \theta_j \end{Bmatrix} \quad (4.1)$$

Burada;

P: eksenel kuvvet,

M_i ve M_j : eğilme eksenine göre eleman uç momentleri,

δ : eksenel uzama,

θ_i ve θ_j : eleman uç noktalarındaki dönme,

S_1 ve S_2 : stabilite fonksiyonları,

A: çubuk en kesit alanı

L: çubuk elemanın uzunluğu,

I : eğilme eksenine göre eleman en kesitinin atalet momenti,

E: çubuk elemanın yapıldığı malzemeye ait elastisite modülü,
dür.

Denklem (4.1)'de yer alan stabilite fonksiyonlarının denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$S_1 = \begin{cases} \frac{\pi\sqrt{\rho} \sin(\pi\sqrt{\rho}) - \pi^2 \rho \cos(\pi\sqrt{\rho})}{2 - 2 \cos(\pi\sqrt{\rho}) - \pi\sqrt{\rho} \sin(\pi\sqrt{\rho})} & P < 0 \text{ için} \\ \frac{\pi^2 \sqrt{\rho} \cosh(\pi\sqrt{\rho}) - \pi \rho \sinh(\pi\sqrt{\rho})}{2 - 2 \cosh(\pi\sqrt{\rho}) + \pi\sqrt{\rho} \sinh(\pi\sqrt{\rho})} & P > 0 \text{ için} \end{cases} \quad (4.2)$$

$$S_2 = \begin{cases} \frac{\pi^2 \sqrt{\rho} - \pi\sqrt{\rho} \sin(\pi\sqrt{\rho})}{2 - 2 \cos(\pi\sqrt{\rho}) - \pi\sqrt{\rho} \sin(\pi\sqrt{\rho})} & P < 0 \text{ için} \\ \frac{\pi\sqrt{\rho} \sinh(\pi\sqrt{\rho}) - \pi^2 \sqrt{\rho}}{2 - 2 \cosh(\pi\sqrt{\rho}) + \pi\sqrt{\rho} \sinh(\pi\sqrt{\rho})} & P > 0 \text{ için} \end{cases} \quad (4.3)$$

Burada $\rho = \frac{P}{(\pi^2 EI / L^2)}$ olup, eksenel kuvvet P çekmede pozitif, basınçta negatiftir.

Denklem (4.2) ve (4.3)'de verinle stabilite fonksiyonları eksenel kuvvetin sıfır olması durumunda belirsiz olmaktadır. Söz konusu bu problemi aşmak ve eksenel kuvvetin yönüne bağlı olarak farklı ifade kullanılması sorununun önüne geçmek için Lui ve Chen (1986) tarafından önerilen ve stabilite fonksiyonlarının kuvvet serisi ile açılması ile elde edilen denklemler yardımıyla ikinci mertebe etkiler daha sade bir şekilde dikkate alınabilmektedir.

Stabilite fonksiyonlarının kuvvet serisine açılımında ilk 10 terimin yüksek yakınsaklık sağladığı gösterilmiştir. Ancak, eksenel kuvvete bağlı olarak hesaplanan ρ değerinin $-2 \leq \rho \leq 2$ aralığında kalması durumunda stabilite fonksiyonları yerine aşağıdaki basitleştirilmiş denklemler de kullanılabilir.

$$S_1 = 4 + \frac{2\pi^2\rho}{15} - \frac{(0.01\rho + 0.543)\rho^2}{4 + \rho} - \frac{(0.004\rho + 0.285)\rho^2}{8.183 + \rho} \quad (4.4)$$

$$S_2 = 2 - \frac{\pi^2\rho}{30} + \frac{(0.01\rho + 0.543)\rho^2}{4 + \rho} - \frac{(0.004\rho + 0.285)\rho^2}{8.183 + \rho} \quad (4.5)$$

Yukarıdaki ifadeler, eksenel yükün işaretinin hem pozitif hem de negatif olması durumları için geçerlidir. Denklem (4.4) ve (4.5) ile elde edilen değerler, denklem (4.2) ve (4.3) ile elde edilen kesin çözüm değerlerine oldukça yakın sonuçlar vermektedir (Lui ve Chen, 1986). Ancak, ρ değerinin $-2 \leq \rho \leq 2$ aralığında olmaması durumunda denklem (4.2) ve (4.3)'de verilen stabilite fonksiyonlarının kullanılması gerekmektedir.

4.3.2 Çubuk Elemanların Uçlarındaki Mafsallaşmayı Dikkate Alan Temel Rijitlik Matrisi

Plastik mafsal teorisine bağlı artımsal itme analizi yönteminde genellikle, plastik mafsalların artan yatay yükler altında çubuk elemanların uçlarında oluşabileceği kabul edilmektedir. Oluşacak plastik mafsalların yapı davranışına etkisini dikkate alabilmek için, çubuk eleman rijitlik matrisinin plastik mafsal özelliklerini de

içerecek şekilde ifade edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, düzlemsel sistemler için çubuk eleman uçlarındaki plastikleşmenin tanımlanabildiği aşağıda verilen temel rijitlik matrisi kullanılabilir (Kim ve diğerleri, 2002):

$$\begin{Bmatrix} P \\ M_i \\ M_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} EA/L & 0 & 0 \\ 0 & k_{ii} & k_{ij} \\ 0 & k_{ji} & k_{jj} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta \\ \theta_i \\ \theta_j \end{Bmatrix} \quad (4.6)$$

Burada;

$$k_{ii} = \eta_i \left(S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - \eta_j) \right) \frac{EI}{L} \quad (4.7)$$

$$k_{ij} = k_{ji} = \eta_i \eta_j \frac{EI}{L} \quad (4.8)$$

$$k_{jj} = \eta_j \left(S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - \eta_i) \right) \frac{EI}{L} \quad (4.9)$$

Burada; η_i ve η_j : çubuk elemanın A ve B uçlarındaki plastik mafsall oluşumuna bağlı rijitlik azaltma katsayısı olup, rijit düğüm noktası için 1, elastoplastik davranışa sahip plastik mafsall oluşması durumunda 0 değerini almaktadır.

Denklem 4.6'da tanımlanan temel rijitlik matrisi, genel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\{f_e\} = [K_e] \{d_e\} \quad (4.10)$$

Burada;

$\{f_e\}$: eleman düğüm noktası temel kuvvet vektörü,

$\{d_e\}$: eleman düğüm noktası temel yerdeğiştirme vektörü,

$[K_e]$: eleman temel rijitlik matrisi,

dir.

Denklem 4.10’da ifade edilen temel kuvvetler Şekil 4.2’de şematik olarak gösterilmiştir



Şekil 4.2 Çubuk eleman temel uç kuvvetleri

Denklem (4.6)’da verilen ifade sadece eğilme etkisini içermektedir. Kayma şekil değiştirmelerinin rijitlik matrisine etkisi aşağıdaki şekilde dikkate alınmaktadır (Kim ve diğerleri, 2002):

$$\begin{Bmatrix} P \\ M_i \\ M_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} EA/L & 0 & 0 \\ 0 & C_{ii} & C_{ij} \\ 0 & C_{ji} & C_{jj} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta \\ \theta_i \\ \theta_j \end{Bmatrix} \quad (4.11)$$

Burada;

$$C_{ii} = \frac{k_{ii}k_{jj} - k_{ij}^2 + k_{ii}A_sGL}{k_{ii} + k_{jj}2k_{ij} + A_sGL} \quad (4.12)$$

$$C_{ij} = C_{ji} = \frac{-k_{ii}k_{jj} + k_{ij}^2 + k_{ij}A_sGL}{k_{ii} + k_{jj}2k_{ij} + A_sGL} \quad (4.13)$$

$$C_{jj} = \frac{k_{ii}k_{jj} - k_{ij}^2 + k_{jj}A_sGL}{k_{ii} + k_{jj}2k_{ij} + A_sGL}$$

Burada;

A_s : enkesit kayma alanı

G: kayma modülü’dür.

Düzlemsel çubuk elemanlar için eleman uç kuvvetleri ile uç yerdeğiştirmelerinin pozitif yönleri Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Çubuk eleman uç kuvvetleri ve uç yerdeğiştirmelerinin pozitif yönleri

Temel kuvvetler ile eleman lokal uç kuvvetleri arasındaki ilişki denklem 4.14 ve temel yerdeğiştirmeler ile lokal eleman uç yerdeğiştirmeleri arasındaki ilişki denklem 4.15’de verilmiştir.

$$\{f_L\} = [T]^T \{f_e\} \quad (4.14)$$

$$\{d_e\} = [T]\{d_L\} \quad (4.15)$$

Burada;

$\{f_L\}$: eleman lokal uç kuvvetleri,

$\{d_L\}$: eleman lokal uç yerdeğiştirmeleri,

$[T]$: transformasyon matrisi,

dir. $[T]$ transformasyon matrisi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$[T] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1/L & 0 & 0 & -1/L & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Yukarıda verilen ifadeler kullanılarak, çubuk elemanın kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi aşağıdaki denklemle gösterilir.

$$\{f_L\} = [K_L]\{d_L\} \quad (4.17)$$

Burada $[K_L]$ eleman lokal rijitlik matrisi olup aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$[K_L] = [T]^T [K_e] [T] \quad (4.18)$$

$$[K_L] = \begin{bmatrix} [K_n]_1 & [K_n]_1 \\ [K_n]_2^T & [K_n]_3 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Burada;

$$[K_n]_1 = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & c \\ 0 & c & d \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$[K_n]_2 = \begin{bmatrix} -a & 0 & 0 \\ 0 & -b & c \\ 0 & -c & e \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$[K_n]_3 = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & -c \\ 0 & -c & f \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$a = \frac{EA}{L} \quad (4.23)$$

$$b = \frac{C_{ii} + 2C_{ij} + C_{jj}}{L^2} \quad (4.24)$$

$$c = \frac{C_{ii} + C_{jj}}{L} \quad (4.25)$$

$$d = C_{ii} \quad (4.26)$$

$$e = C_{ij} \quad (4.27)$$

$$f = C_{jj} \quad (4.28)$$

Denklem 4.18’de tanımlanan eleman lokal rijitlik matrisi, koordinat transformasyon matrisi kullanılarak global eleman rijitlik matrisine dönüştürülür:

$$[K_G] = [\beta]^T [K_L] [\beta] \quad (4.29)$$

Burada $[\beta]$, yerdeğiştirme ve eleman uç kuvvetlerinin doğrultman kosinüslerini tanımlayan matristir.

4.4 Geliştirilen Bilgisayar Yazılımının Esasları

Yazılıma veri olarak sistemin geometrik özellikleri (Düğüm noktası koordinatları; kesit atalet momentleri, alanları, plastik mukavemet momentleri, eleman bağlantı şeması, mesnetlenme durumu, kütleler) ve malzeme özellikleri (akma dayanımı, elastite modülü) tanımlanmaktadır. Sisteme etkiyen düşey yükler belirlenerek “düşey yükleme vektörü” oluşturulmaktadır. Plastik mafsall oluşması muhtemel kesitler olarak çubuk uçlarıdır. Bu noktalarda oluşabilecek plastik mafsalların türü veri olarak tanımlanmaktadır.

Hesaplarda malzemenin elastoplastik davrandığı kabul edilmiştir. Bu sebeple, herhangi bir kesit moment taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra kesit adi mafsall gibi davranmaktadır. Program mafsall oluşma yerini belirledikten sonra kesite otomatik olarak mafsall yerleştirmekte ve daha sonra sistem labil duruma gelene kadar analizi devam ettirmektedir. Sistemin labil olup olmadığı rijitlik matrisinin determinantı ile kontrol edilmektedir.

Program analize düşey yüklemeden başlamaktadır. Düşey yükler altında sistemde plastik mafsall oluşmaması istendiğinden bu yüklerden dolayı plastik mafsall oluşuyorsa analiz durdurulmaktadır.

Eğer düşey yüklemeden dolayı mafsall oluşmuyorsa modal analiz yapılarak yapının periyotları ve mod şekilleri hesaplanmaktadır.

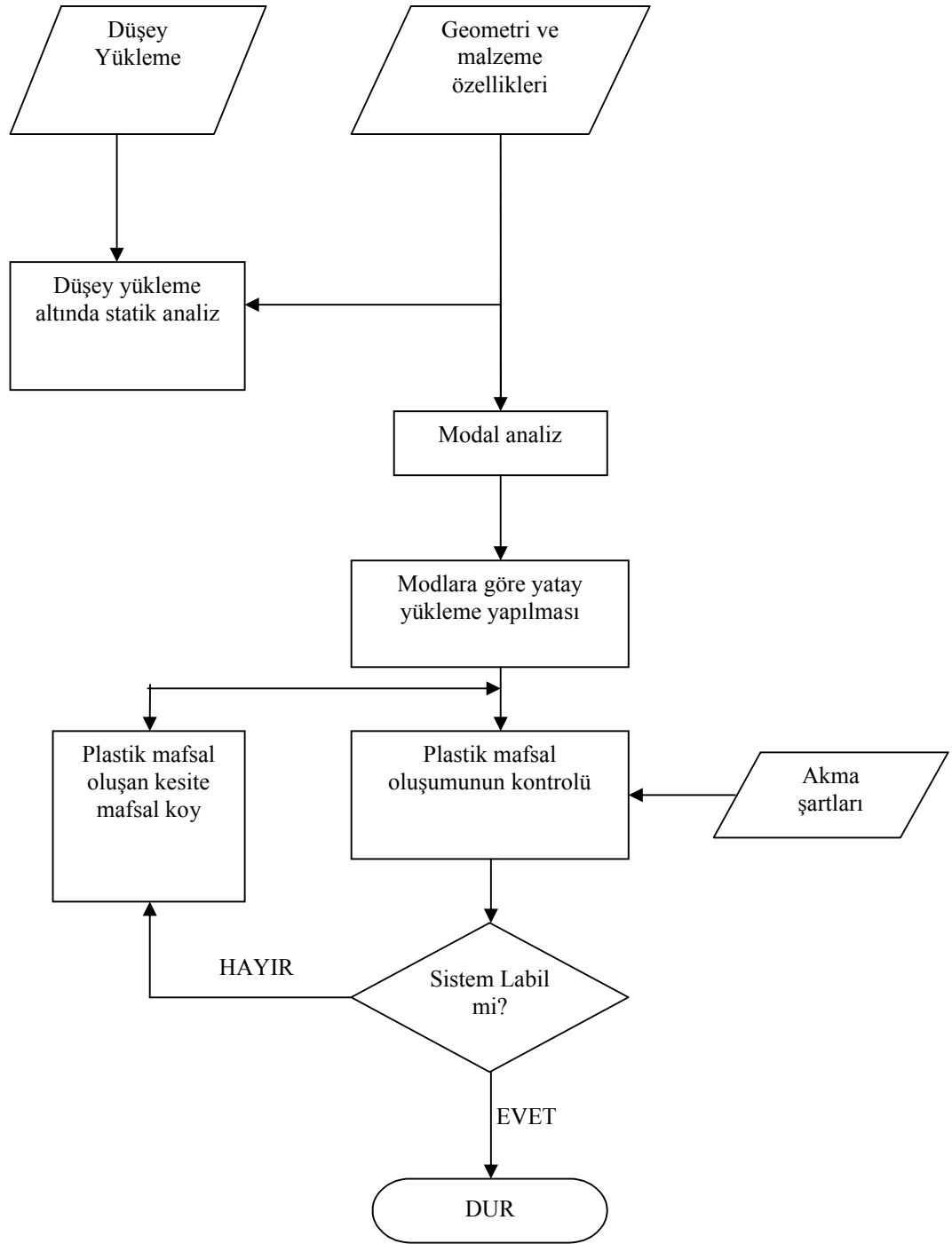
Her bir hesap adımında, dikkate alınan o moda ait yatay yük dağılımı bağımsız olarak sisteme etki ettirilerek, birim modal davranış büyüklükleri (r_i) belirlenir.

Elde edilen birim modal davranış büyüklükleri, tez kapsamında önerilen matematiksel birleştirme ifadesi (3.1)'e göre birleştirilerek iki plastik mafsall arasındaki yük artımının belirlenmesine esas yerdeğiştirme şekilleri oluşturulur. En küçük yük artımını veren yerdeğiştirme şekli o hesap adımına ait yerdeğiştirme artımı olarak kabul edilir. Belirlenen yerdeğiştirme şekline bağlı olarak yapının tüm elemanlarında iç kuvvet ve yerdeğiştirme artımları hesaplanır.

Her bir hesap adımında enerji esaslı dönüşüm kullanılarak, yapının eşdeğer tek serbestlik dereceli sisteme ait yerdeğiştirme artımı hesaplanır. Aynı hesap adımında yapıda tüketilen toplam plastik enerji, elemanlarda oluşan her bir plastik mafsaldaki plastik enerjinin toplanması ile hesaplanır.

Yapıda tüketilen toplam plastik enerji, depremin yapıdan talep ettiği plastik enerjiden küçük ise yeni hesap adımına geçilerek hesaplar tekrarlanır. Deprem sırasında yapının tüketmesi gereken toplam plastik enerji değerine ulaşıldığında analize son verilir ve yapı plastik enerji kapasite eğrisi oluşturulur.

Programın genel akış şeması Şekil 4.4'de verilmiştir.

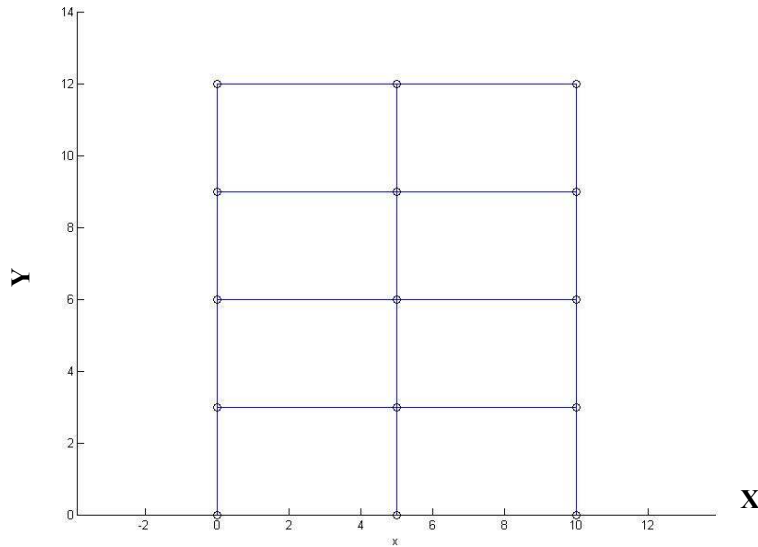


Şekil 4.4 Artımsal itme analizi için geliştirilen bilgisayar yazılımının genel akış şeması

4.5 Geliştirilen Bilgisayar Yazılımının Sonuçlarının Literatürdeki Yazılımlar ile Karşılaştırılması

Bilgisayar yazılımının sonuçlarının sınanması için seçilen iki açıklıklı, dört katlı örnek düzlem çerçeve; bu tez kapsamında geliştirilen bilgisayar yazılımı ve literatürde yer alan SAP2000 paket bilgisayar programı ile çözülerek sonuçları karşılaştırılmıştır.

Seçilen örnek çerçeve sistemin en kesit özellikleri Şekil 4.5’de verilmiştir. Örnek çerçevede tüm katlar 3m yükseklikte olup açıklıklar 5m seçilmiştir.



Şekil 4.5. İncelenen örnek sistem

İncelenen örnek sistemin eleman en kesit ve malzeme özellikleri Tablo 4.1 da verilmiştir.

Tablo 4.1 Örnek sistemin eleman en kesit ve malzeme özellikleri

	$A \text{ (cm}^2\text{)}$	$I \text{ (cm}^4\text{)}$	$W_p \text{ (cm}^3\text{)}$	$\sigma_a \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	$E \text{ (kg/cm}^2\text{)}$
KOLON	91.0	8091	827	2400	2100000
KİRİŞ	53.8	8356	628	2400	2100000

Tüm Düğüm Noktalarında Kütle: 1 t.sn²/m

Tüm düğüm noktalarında düşey yük : 10 t

İncelenen örnek sistemin en kesitlerinin moment-eğrilik ilişkisi Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. İncelenen örnek sistemin en kesitlerinin moment-eğrilik ilişkisi

Geliştirilen bilgisayar yazılımı ve SAP2000 paket bilgisayar programı ile çözümlerde yapının 12 serbestlik derecesine karşı gelen tüm 12 mod dikkate alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır.

4.5.1 Seçilen 2 Açıklıklı 4 Katlı Örnek Yapının Geliştirilen Bilgisayar Yazılımı ve SAP2000 Paket Bilgisayar Programından Elde Edilen Modal Büyüklük Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Seçilen iki açıklıklı 4 katlı örnek düzlem çerçevenin geliştirilen bilgisayar yazılımı ve SAP2000 paket bilgisayar programı ile çözümlerinden elde edilen; serbest titreşim periyotlarının, kütle katılım oranlarının ve modal katkı çarpanlarının karşılaştırılması sırasıyla Tablo 4.2, Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Yapı serbest titreşim periyodlarının karşılaştırılması

MOD	SAP2000	GELİŞTİRİLEN PROGRAM
1	1.092244	1.0922
2	0.338954	0.33895
3	0.185153	0.18515
4	0.129081	0.12908
5	0.041779	0.041779
6	0.041566	0.041566
7	0.040909	0.040909
8	0.03983	0.03983
9	0.024129	0.024129
10	0.024089	0.024089
11	0.023962	0.023962
12	0.023738	0.023738

Tablo 4.3. Kütle Katılım Oranlarının Karşılaştırılması

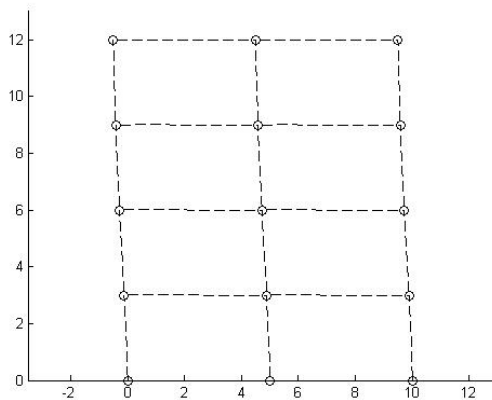
MOD	SAP2000	GELİŞTİRİLEN PROGRAM
1	0.83651	0.83651
2	0.109645	0.10964
3	0.041229	0.041229
4	0.012617	0.012617
5	0	2.6295e-031
6	0	6.4198e-033
7	0	5.7778e-032
8	0	2.5679e-034
9	3.451E-09	3.4509e-009
10	2.572E-08	2.5723e-008
11	1.699E-08	1.6993e-008
12	1.436E-08	1.4356e-008

Tablo 4.4. Modal Katılım Çarpanlarının Karşılaştırılması

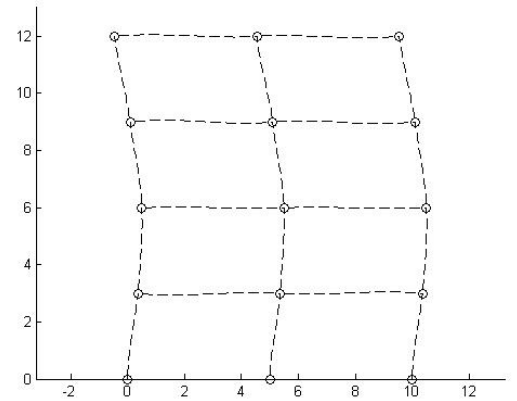
MOD	SAP2000	GELİŞTİRİLEN PROGRAM
1	-3.168299	-3.1683
2	1.147056	1.1471
3	0.703379	-0.70338
4	0.389101	0.3891
5	-4.959E-16	-1.78E-15
6	-1.668E-14	2.78E-16
7	-9.901E-15	-8.33E-16
8	8.212E-15	5.55E-17
9	0.000203	-0.0002
10	-0.000556	0.000556
11	-0.000452	-0.00045
12	0.000415	0.000415

Tablo 4.4'deki modal katılım çarpanlarının bazı değerlerin ters işaretli olmasının nedeni çözüm algoritmasının farklı olmasından dolayı mod şekillerinin ters yönlü çıkmasından kaynaklanmaktadır.

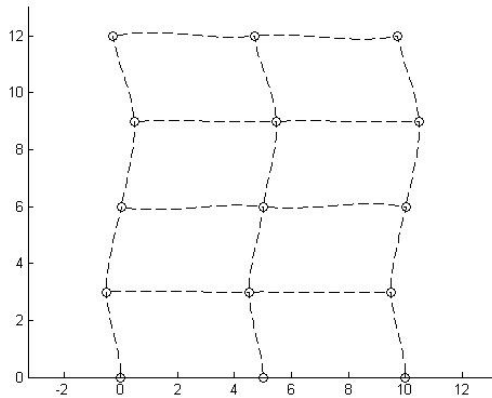
Geliştirilen bilgisayar yazılımından elde edilen mod şekilleri Şekil 4.7'de verilmiştir. Burada, her iki yazılımdan elde edilen mod şekilleri aynı olup geliştirilen yazılımdan elde edilen mod şekilleri gösterilmiştir.



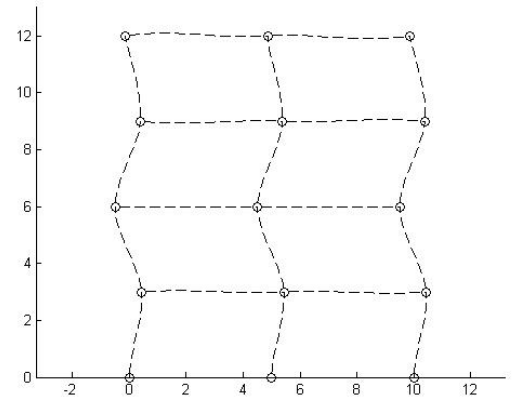
1.MOD



2.MOD

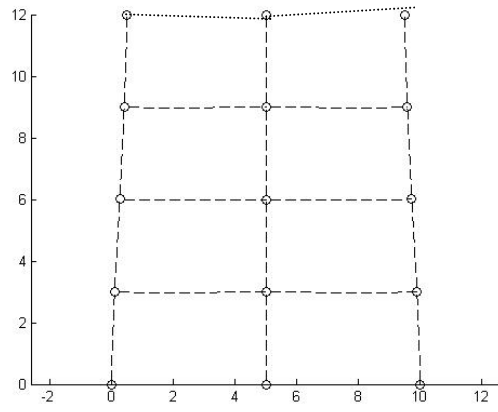
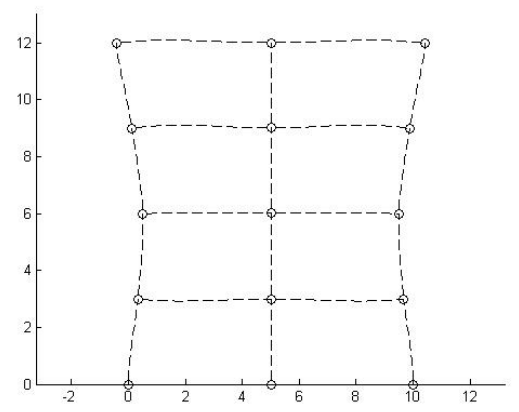
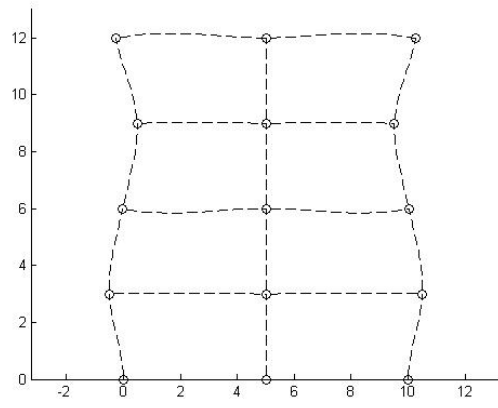
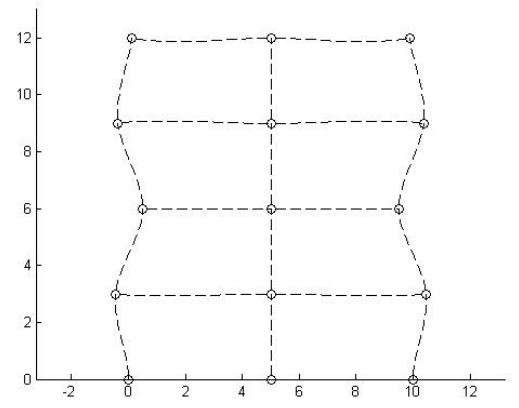
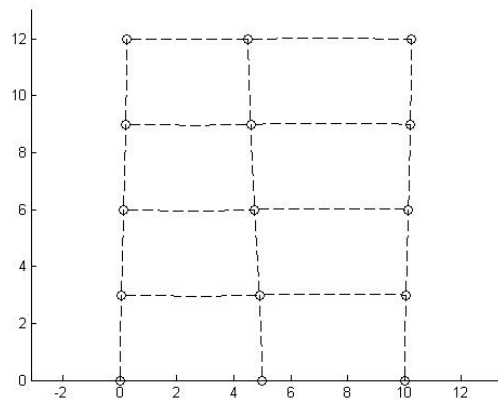
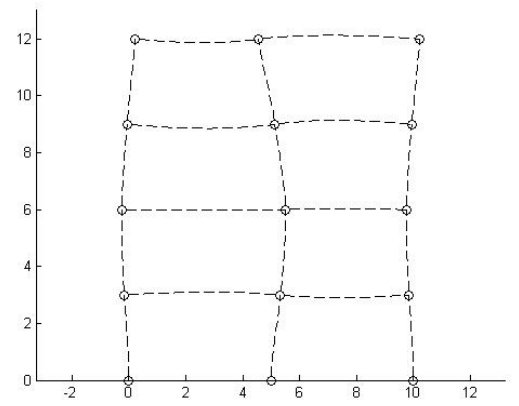


3.MOD

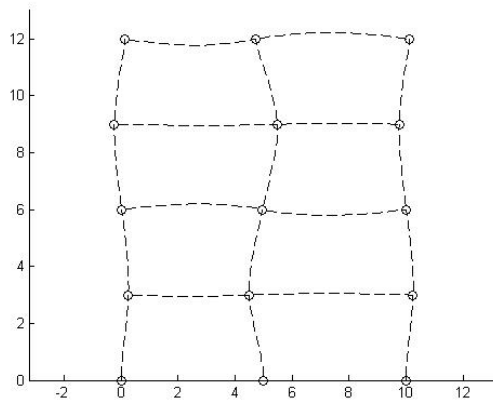


4.MOD

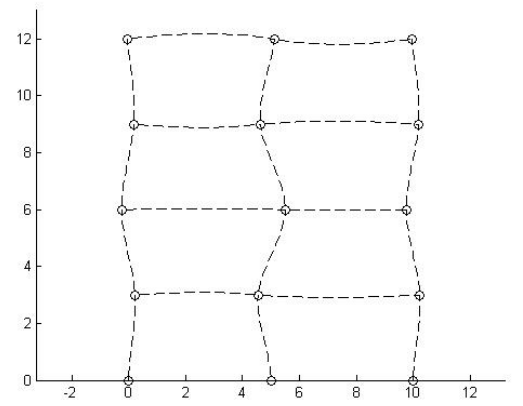
Şekil 4.7 Geliştirilen bilgisayar yazılımı ve SAP2000 ile yapılan çözümlerden elde edilen yapı mod şekilleri

**5.MOD****6.MOD****7.MOD****8.MOD****9.MOD****10.MOD**

Şekil 4.7 (DEVAM) Geliştirilen bilgisayar yazılımı ve SAP2000 ile yapılan çözümlerden elde edilen yapı mod şekilleri



11.MOD



12.MOD

Şekil 4.7 (DEVAM) Geliştirilen bilgisayar yazılımı ve SAP2000 ile yapılan çözümlerden elde edilen yapı mod şekilleri

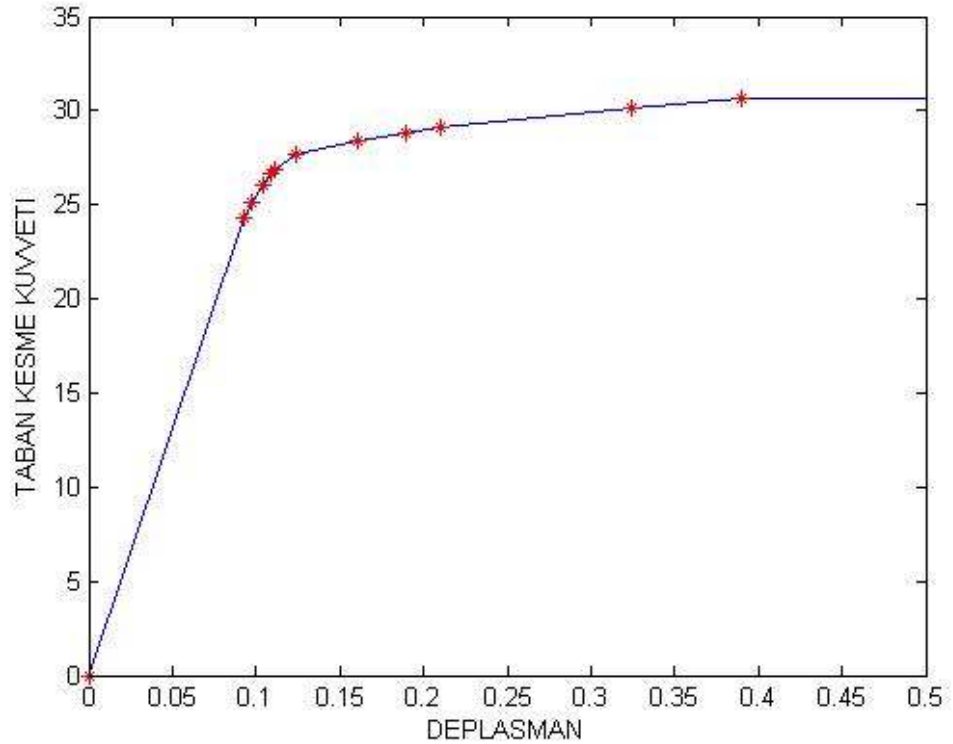
Seçilen iki açıklıklı dört katlı örnek yapının bu tez kapsamında geliştirilen bilgisayar yazılımı ve SAP2000 paket bilgisayar programının çözümünden elde edilen tablo 4.2, 4.3 ve 4.4'deki yapıya ait modal büyüklüklerden; serbest titreşim periyodlarının, kütle katılım oranlarının ve modal katılım çarpanlarının karşılaştırılması sonucu her iki programın sonuçlarının aynı olduğu ve mod şekillerinin de benzer oldukları belirlenmiştir.

4.5.2 Seçilen 2 Açıklıklı 4 Katlı Örnek Yapının Tepe Noktası Yerdeğiştirmesi ve Taban Kesme Kuvveti Değerleri İle Plastik Mafsal Sayılarının ve Mod Şekilleri Sonuçlarının Karşılaştırılması

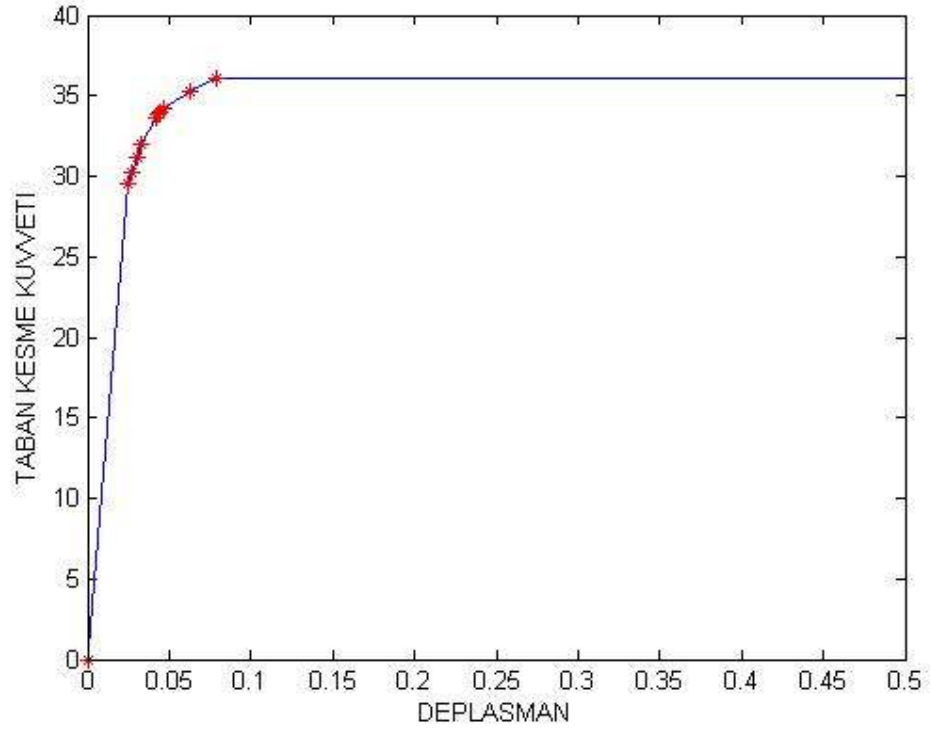
Geliştirilen bilgisayar yazılımı ve SAP2000 paket bilgisayar programlarının çözümünden elde edilen yapının; tepe noktası yerdeğiştirmesi, taban kesme kuvveti değerleri ile plastik mafsal sayıları Tablo 4.5'de karşılaştırılmış ve geliştirilen bilgisayar programı ile çözümü yapılan örnek yapının 1. ve 2. mod şekillerine göre yapılan yatay yüklemeler sonucunda elde edilen yerdeğiştirme kapasite eğrileri Şekil 4.8 ve 4.9'da gösterilmiştir.

Tablo 4.5. Birinci Mod Yüklemesine Göre Plastik Mafsalların Oluştugu Yerdeğiştirme, Taban Kesme Kuvveti ve Plastik Mafsals Sayısı Sonuçlarının Karşılaştırması

SAP2000			GELİŞTİRİLEN PROGRAM		
YER DEĞİŞTİRME (m)	TABAN KESME KUVVETİ (Ton)	PLASTİK MAFSAL SAYISI	YER DEĞİŞTİRME (m)	TABAN KESME KUVVETİ (Ton)	PLASTİK MAFSAL SAYISI
0	0	0	9,67E-20	0	0
0,093	24,3361	2	0,093043	24,347	2
0,096	24,914	4	0,096945	25,099	4
0,103	25,8535	5	0,10397	26,042	5
0,108	26,441	7	0,10924	26,661	7
0,11	26,6251	9	0,11060	26,817	9
0,123	27,4763	11	0,12429	27,691	11
0,159	28,1411	12	0,16035	28,357	12
0,187	28,6133	13	0,18927	28,845	13
0,208	28,8758	15	0,21025	29,107	15
0,321	29,8757	17	0,32475	30,121	17
0,386	30,3665	19	0,39029	30,615	19



Şekil 4.8. Geliştirilen Bilgisayar Yazılımı ve SAP2000 yazılımından elde edilen 1. Mod Yüklemesine Göre Yer Değiştirme Kapasite Eğrisi



Şekil 4.9. Geliştirilen Bilgisayar Yazılımı ve SAP2000 yazılımından elde edilen 2. Mod Yüklemesine Göre Kapasite Eğrisi

Sonuç olarak; seçilen iki açıklıklı dört katlı örnek yapının tez kapsamında hazırlanan bilgisayar yazılımı ve SAP2000 paket bilgisayar programı çözümünden elde edilen yapıya ait; tepe noktası yerdeğiştirmesi, taban kesme kuvveti değerleri ile plastik mafsalları sayılarının ve mod şekillerinin karşılaştırılmasından sonuçların aynı olduğu belirlenmiştir.

BÖLÜM BEŞ

SAYISAL UYGULAMALAR VE KARŞILAŞTIRMALAR

5.1 Giriş

Bu bölümde, binaların deprem performansının belirlenmesi için “geliştirilen yönlü modal birleştirme ve enerji esaslı yerdeğiştirmeye dayalı çok modlu statik artımsal itme analizi yöntemi” ile “FEMA 356’da yer alan artımsal itme analiz yöntemleri” ve “zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleri”nin karşılaştırılması için seçilen 8, 14, 20 katlı örnek betonarme çerçeve sistem ve mevcut bir prefabrike binanın, yukarıda belirtilen her bir yöntemle ayrı ayrı analizleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılarak irdelenmiştir.

5.2 Örnek Betonarme 8, 14 ve 20 Katlı Çerçevelerin Karşılaştırılması

5.2.1 Örnek Betonarme 8, 14 ve 20 Katlı Çerçevelerin Tasarımı ve Modellenmesi

Yöntemlerin farklı özelliklerdeki binalar üzerindeki etkilerini incelemek üzere, planda simetrik 8, 14 ve 20 katlı betonarme binalar TS 500 (2000) ve “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik”e (2007) koşullarına uygun olarak tasarlanmıştır.

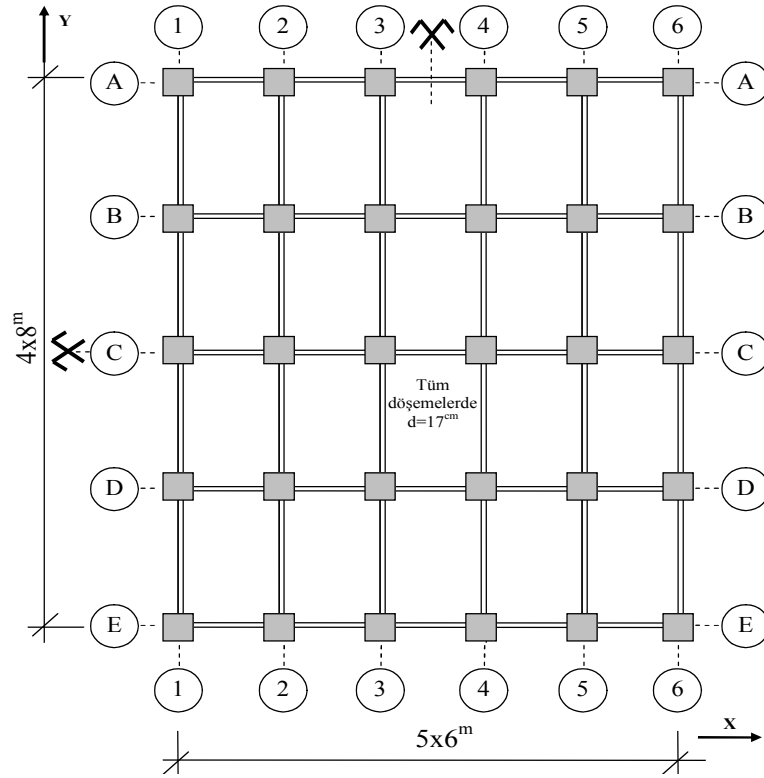
Katların plandaki boyutları 30x32m’dir. Planda, X doğrultusunda 6m’lik 5 adet ve Z doğrultusunda 8’er metrelik 4 adet açıklık bulunmaktadır. Yapının genelde kat yükseklikleri 3m olup, analizlerde yüksek mod etkilerini daha iyi görmek için bazı kat yükseklikleri 4m olarak tasarlanmıştır.

Döşeme kalınlıkları TS500-2000’e göre 17cm olarak hesaplanmıştır. Analizlerde yapı hareketli yükü $3,50 \text{ kN/m}^2$ olarak seçilmiştir. Yapının genelde kat kütleleri $210 \text{ kN.sn}^2/\text{m}$ olup, analizlerde yüksek mod etkilerini daha iyi görmek için bazı kat kütleleri ise $300 \text{ kN.sn}^2/\text{m}$ olarak alınmıştır.

8, 14 ve 20 katlı binaların tasarımda dikkate alınan genel özellikleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Örnek olarak seçilen binaların tümünün tipik kat kalıp planları Şekil 5.1’de verilmiştir.

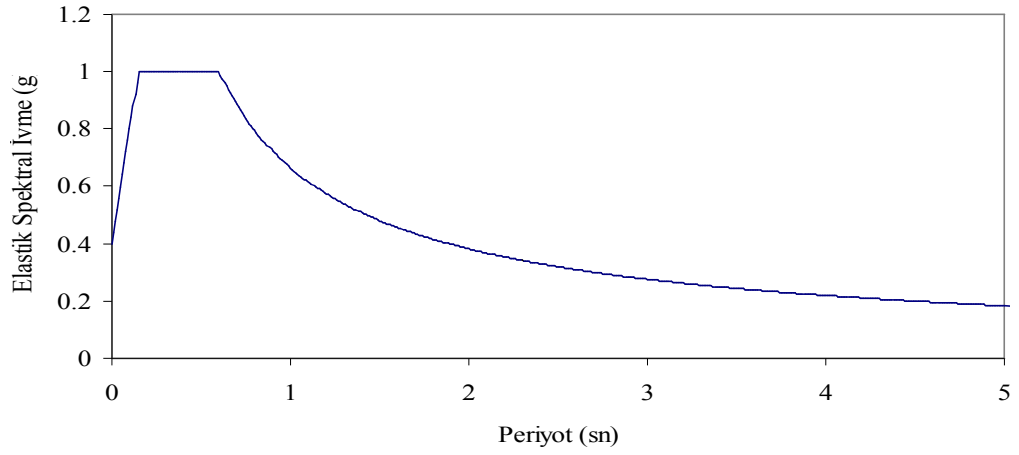
Tablo 5.1 Tasarlanan 8, 14 ve 20 katlı binaların genel özellikleri

Beton Sınıfı	C30 ($f_{ck}= 30 \text{ MPa}$; $E_c= 31800 \text{ MPa}$)
Donatı Sınıfı	S420 ($f_{yk}=420 \text{ MPa}$; $E_s=200000 \text{ MPa}$)
Sabit Döşeme Yükleri	$G= 5,50 \text{ kN/m}^2$ (Döşeme ağırlığı dâhil)
Hareketli Döşeme Yükleri	$Q= 3,50 \text{ kN/m}^2$
Duvar Yükleri	$2,88 \text{ kN/m}$ (Tüm kirişlerin üzerinde mevcuttur)
Bina Önem Katsayısı	$I=1$
Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı	$R=8$ (Süneklik düzeyi yüksek çerçeve)
Deprem Bölgesi	1. Derece ($A_0=0.40$)
Zemin Sınıfı	Z3 ($T_A=0.15\text{s}$, $T_B=0.60\text{s}$)



Şekil 5.1 Örnek 8, 14 ve 20 katlı binaların tipik kat planı

Birinci derece deprem bölgesinde, Z3 türü zemin üzerinde kabul edilen örnek binaların tasarımında; 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem ve %5 sönüm oranı için “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik”te (2007) verilen elastik tasarım ivme spektrumu alınmıştır (Şekil 5.2). Tasarlanan çerçevenin kiriş enkesit boyutları ve mesnet donatıları Tablo 5.2’de, kiriş enkesit boyutları ve donatıları Tablo 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.2 Türk Deprem Yönetmeliği (2007)'de 1. derece deprem bölgesi ve Z3 türü zemin için tanımlanan %5 sönümlü elastik tasarım ivme spektrumu

Tablo 5.2 8, 14 ve 20 katlı çerçevelerdeki kirişlerin en kesit boyutları ve donatıları

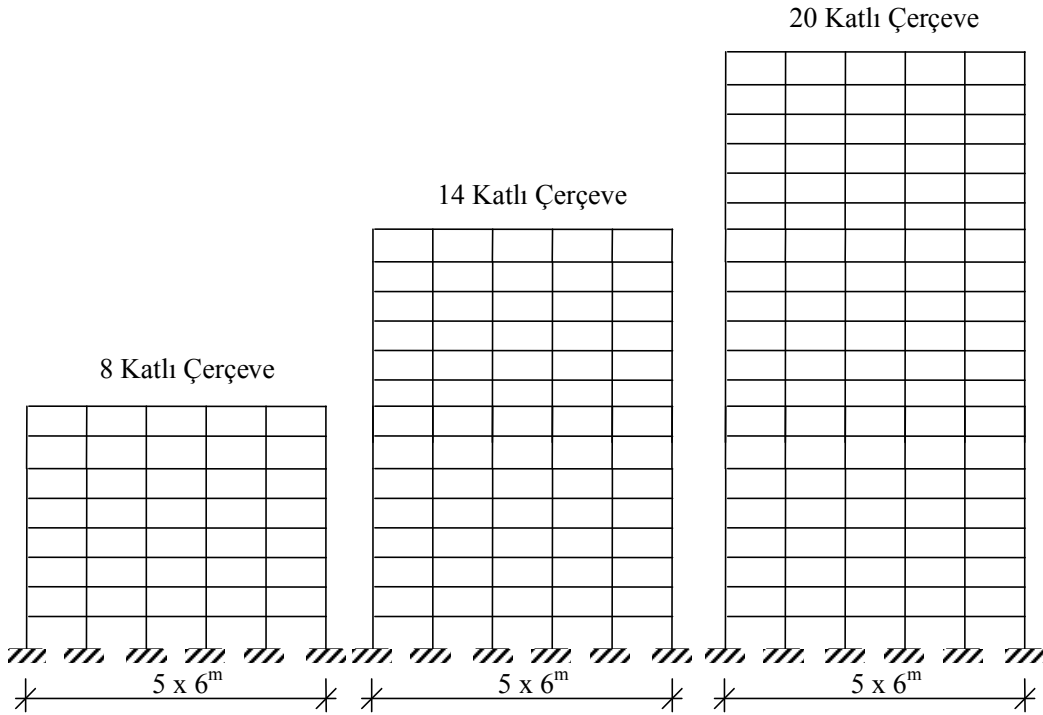
Çerçeve Adı	Kat	Kiriş Donatıları (cm ²)				Kiriş Boyutu (cm x cm)
		Yer	Mesnet (1)	Mesnet (2)	Mesnet (3)	
8-Katlı Çerçeve	1	Üst	12.57	12.57	12.57	30 x 60
		Alt	6.28	6.28	6.28	
	2-6	Üst	13.82	13.82	13.82	30 x 60
		Alt	9.43	9.43	9.43	
	7	Üst	10.11	10.11	10.11	25 x 50
		Alt	4.40	4.40	4.40	
	8	Üst	8.61	8.61	8.61	25 x 50
		Alt	6.28	6.28	6.28	
14-Katlı Çerçeve	1	Üst	16.64	16.64	16.64	30 x 60
		Alt	8.62	8.62	8.62	
	2-6	Üst	20.96	20.96	20.96	30 x 60
		Alt	10.65	10.65	10.65	
	7-11	Üst	18.58	18.58	18.58	30 x 60
		Alt	9.29	9.29	9.29	
	12-13	Üst	15.84	15.84	15.84	25 x 50
		Alt	7.71	7.71	7.71	
	14	Üst	7.74	7.74	7.74	25 x 50
		Alt	4.53	4.53	4.53	
20-Katlı Çerçeve	1	Üst	9.75	16.64	16.64	30 x 60
		Alt	6.33	8.62	8.62	
	2-6	Üst	15.54	20.96	20.96	30 x 60
		Alt	7.71	10.65	10.65	
	7-15	Üst	16.30	18.58	18.58	30 x 60
		Alt	7.81	9.29	9.29	
	16-17	Üst	16.84	16.84	16.84	30 x 60
		Alt	7.71	7.71	7.71	
	18-19	Üst	10.11	10.11	10.11	25 x 50
		Alt	4.40	4.40	4.40	
	20	Üst	7.74	7.74	7.74	25 x 50
		Alt	4.53	4.53	4.53	

Tablo 5.3 8, 14 ve 20 katlı çerçevelerdeki kolonların en kesit boyutları ve donatıları

Çerçeve Adı	Kat	Kolon Adı	Kolon Donatısı (cm ²)	Kolon Boyutu (cm x cm)
8 Katlı Çerçeve	1-3	C1 – C6	25.12	45 x 45
		C2 – C3 – C4 – C5	36.95	60 x 60
	4-6	C1 – C6	16.08	40 x 40
		C2 – C3 – C4 – C5	24.63	50 x 50
	7-8	C1 – C6	16.08	35 x 35
		C2 – C3 – C4 – C5	16.08	40 x 40
14 Katlı Çerçeve	1-3	C1 – C6	30.17	55 x 55
		C2 – C3 – C4 – C5	56.25	75 x 75
	4-7	C1 – C6	24.63	50 x 50
		C2 – C3 – C4 – C5	48.25	70 x 70
	8-11	C1 – C6	20.25	45 x 45
		C2 – C3 – C4 – C5	36.95	60 x 60
	12-13	C1 – C6	16.08	40 x 40
		C2 – C3 – C4 – C5	24.63	50 x 50
	14	C1 – C6	16.08	35 x 35
		C2 – C3 – C4 – C5	16.08	40 x 40
20 Katlı Çerçeve	1-3	C1 – C6	61.07	70 x 70
		C2 – C3 – C4 – C5	108.6	95 x 95
	4-6	C1 – C6	50.27	65 x 65
		C2 – C3 – C4 – C5	91.23	90 x 90
	7-10	C1 – C6	36.95	60 x 60
		C2 – C3 – C4 – C5	75.40	80 x 80
	11-14	C1 – C6	24.63	50 x 50
		C2 – C3 – C4 – C5	48.25	70 x 70
	15-17	C1 – C6	20.25	45 x 45
		C2 – C3 – C4 – C5	36.95	60 x 60
	18-20	C1 – C6	16.08	40 x 40
		C2 – C3 – C4 – C5	24.63	50 x 50

Kirişlerin etkili tabla genişlikleri TS 500-2000’e göre belirlenmiş ve kirişlerde sadece düz donatı seçilerek pilye kullanılmamıştır.

Tasarlanan binalar her iki yönde simetrik olduğundan, yapılan tüm analizlerde C-C aksı seçilmiş ve bu aksa ait sonuçlar incelenmiştir. (Şekil 5.4)



Şekil 5.4 Örnek 8, 14 ve 20 katlı betonarme C-C aksı çerçeveleri

Örnek çerçevelerdeki kolon ve kirişler çubuk elemanlarla modellenmiştir. Analizlerde, yapısal elemanlara ait çatlamış kesit rijitlikleri kullanılmıştır. Kirişlerin eğilme etkisi altındaki çatlamış kesitlere ait etkin eğilme rijitliği, brüt rijitliğinin %40’ı kabul edilmiştir. Kolonların etkin eğilme rijitliği ise eksenel yük seviyesine bağlı olarak “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik”de (2007) verilen denklem (5.1)’e göre hesaplanmıştır:

$$N_D/N_C \leq 0.10 \Rightarrow (EI)_e = 0.40 (EI)_0 \quad (5.1a)$$

$$N_D/N_C \geq 0.40 \Rightarrow (EI)_e = 0.80 (EI)_0 \quad (5.1b)$$

Burada; N_D , kolonun düşey yükler altındaki eksenel yükü; N_C , kolonun eksenel kuvvet taşıma kapasitesi; $(EI)_e$, kolonun etkin rijitliği ve $(EI)_0$, kolonun çatlamaadan önceki brüt rijitliğidir.

Binaların zemine bağlandığı mesnet düğüm noktaları tam ankastre mesnet alınmıştır.

Dinamik analizde kullanılacak bina kütleleri, $(G+0,3Q)$ yük birleşimi ile hesaplanmıştır. Her katın kendi içinde sonsuz rijit olduğu kabul edilerek, incelenen C-C çerçevesinin dinamik analizinde, bu çerçevenin etki alanı ile uyumlu olarak hesaplanan kat kütleleri her kat seviyesinde toplanmış kütle olarak modellenmiştir.

8, 14 ve 20 katlı betonarme çerçevelerin kat yükseklikleri ile kat kütleleri Tablo 5.4’de, dinamik analizden elde edilen modal özellikleri Tablo 5.5’de verilmiştir.

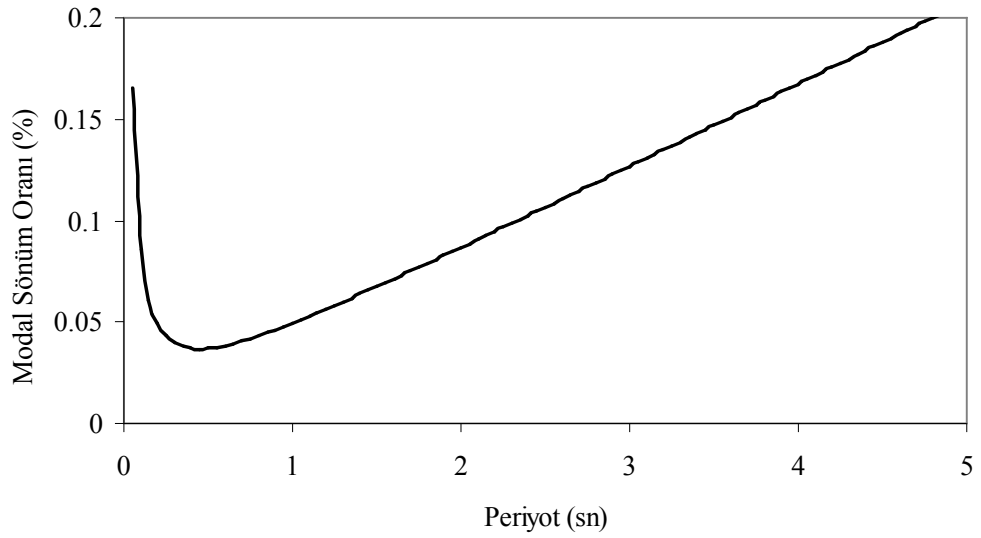
Tablo 5.4 Örnek 8, 14 ve 20 katlı betonarme C-C aksı çerçevelerinin kat yüksekliği ve kat kütleleri

Çerçeve	Katlar	Kat Yüksekliği (m)	Kat Kütlesi ($kN.sn^2/m$)
8 Katlı Çerçeve	1-2	3	300
	3-4	3	210
	5-6	4	300
	7-8	3	210
14 Katlı Çerçeve	1-3	3	300
	4-9	3	210
	10-11	4	300
	12-14	3	210
20 Katlı Çerçeve	1-3	3	300
	4-15	3	210
	16-17	4	300
	18-20	3	210

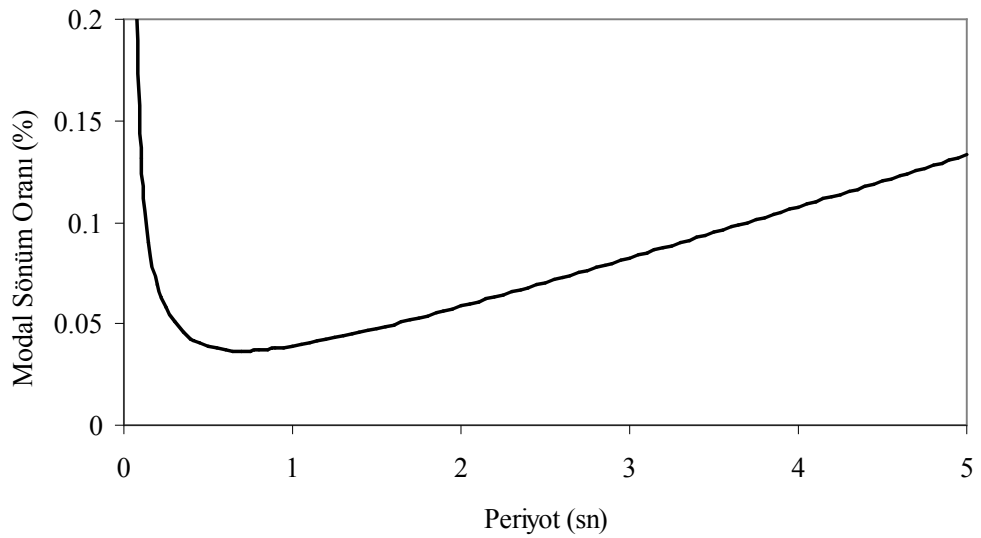
Tablo 5.5 Tasarlanan 8, 14 ve 20 katlı çerçevelerin modal özellikleri

Mod No	8 Katlı Çerçeve			14 Katlı Çerçeve			20 Katlı Çerçeve		
	Periyot (sn)	M_e (%)	ΣM_e (%)	Periyot (sn)	M_e (%)	ΣM_e (%)	Periyot (sn)	M_e (%)	ΣM_e (%)
1	1.99	0.71	0.71	3.29	0.69	0.69	3.85	0.68	0.68
2	0.74	0.14	0.85	1.29	0.12	0.81	1.41	0.13	0.81
3	0.47	0.06	0.91	0.73	0.06	0.87	0.86	0.06	0.87
4	0.32	0.03	0.94	0.52	0.03	0.90	0.58	0.03	0.90

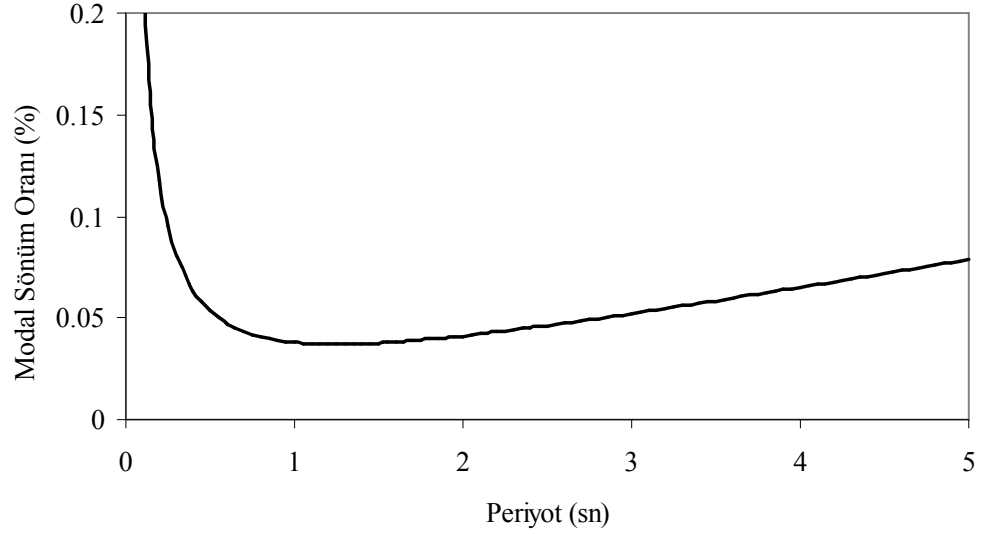
Çerçevelerin zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizi SAP2000 v.11.0.8 statik analiz yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Analizde sönüm etkisi, Rayleigh sönüm matrisi ile tanımlanmıştır (Chopra, 2001). Sönüm matrisi oluşturulurken, modal sönümün 1. ve 3. moda ait sönüm oranı ile orantılı olduğu ve bu modlar için sönüm oranının %5 olduğu kabul edilmiştir. 8, 14 ve 20 katlı binalar için modal sönüm oranının periyotla değişimini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.4 Örnek 8 katlı betonarme çerçeve için modal sönüm oranının periyotla değişimi



Şekil 5.5 Örnek 14 katlı betonarme çerçeve için modal sönüm oranının periyotla değişimi

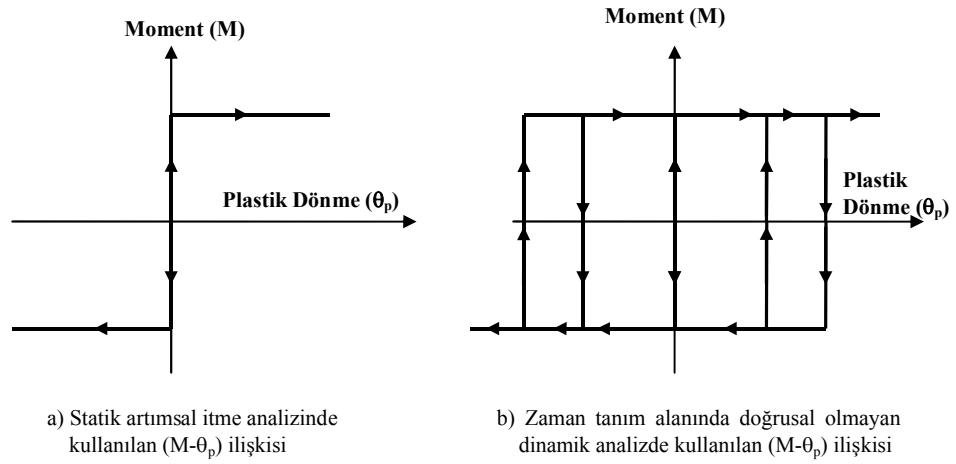


Şekil 5.6 Örnek 20 katlı betonarme çerçeve için modal sönüm oranının periyotla değişimi

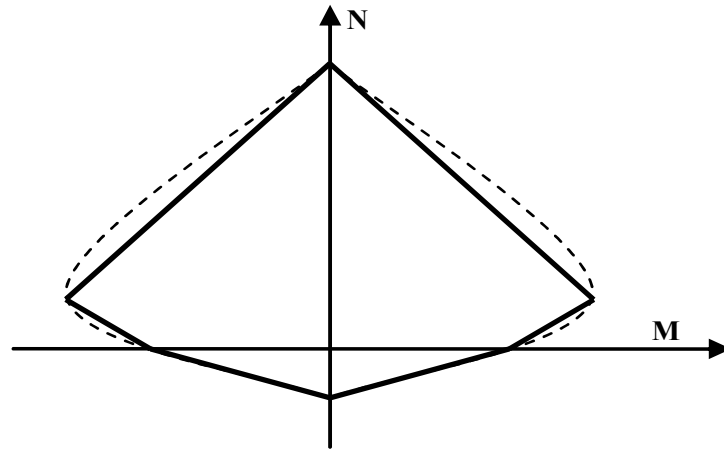
Betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışı yığılı plastik mafsallara hipotezi ile modellenmiştir. Plastik mafsallara oluşacak olan noktalar kolon ve kiriş elemanlarının her iki uç noktası olarak seçilmiştir. Plastik mafsalların plastik moment-dönme ilişkisi rijit plastik olarak tanımlanmış, pekleşme etkisi ihmal edilmiştir.

Geliştirilen artımsal itme analizi yöntemi ile diğer statik artımsal itme analiz yöntemleri ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizde kullanılan plastik moment-dönme ilişkisi Şekil 5.7'de verilmiştir.

Kolonlarda, eksenel kuvvetin eğilme momentine etkisi, akma diyagramı (karşılıklı etkileşim diyagramı) ile dikkate alınmıştır. Plastik mafsallara oluşacak her bir kolon en kesiti için hesaplanan akma diyagramı analizlerde kolaylık olması amacıyla üç doğrulu olarak idealleştirilmiştir (Şekil 5.8).



Şekil 5.7 Analizlerde kullanılan Moment-Plastik dönme modelleri



Şekil 5.8 Kolonların moment taşıma kapasitesinin belirlenmesinde kullanılan idealleştirilmiş akma diyagramı

5.2.2 Analizlerde Kullanılan Deprem İvme Kayıtları

Tez kapsamında geliştirilen “yönlü modal birleştirme ve enerji esaslı yerdeğiştirmeye dayalı çok modlu statik artımsal itme analizi yöntemi” ile “FEMA 356’da yer alan artımsal itme analiz yöntemleri” ve “zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleri”nin sonuçların karşılaştırılması amacı ile üç farklı deprem ivme kaydı seçilmiştir. Kayıtlar seçilirken; deprem büyüklüğü, deprem odağına uzaklık, kaydın alındığı istasyonun zemin koşulları v.b. özelliklerinin benzer olması amaçlanmıştır. Seçilen depremlerin büyüklükleri 6,4–7,6 arasında seçilmiştir. Depremin yakın mesafe etkilerinin analiz sonuçlarını etkilememesi için, deprem

kayıtlarının alındığı istasyonların deprem odağına mesafesinin 20 km’den fazla olmasına dikkate edilmiştir.

Düzeltilmiş ve filtrelenmiş deprem kayıtları “Pacific Earthquake Engineering Research Center” a (PEER, 2009) ait internet sitesinden alınmıştır. Analizlerde kullanmak üzere 1980 Victoria Mexico, 1994 Northridge ve 1999 Chi-Chi Taiwan depremleri seçilmiş ve bu depremlerle ilgili özellikler Tablo 5.6’da verilmiştir.

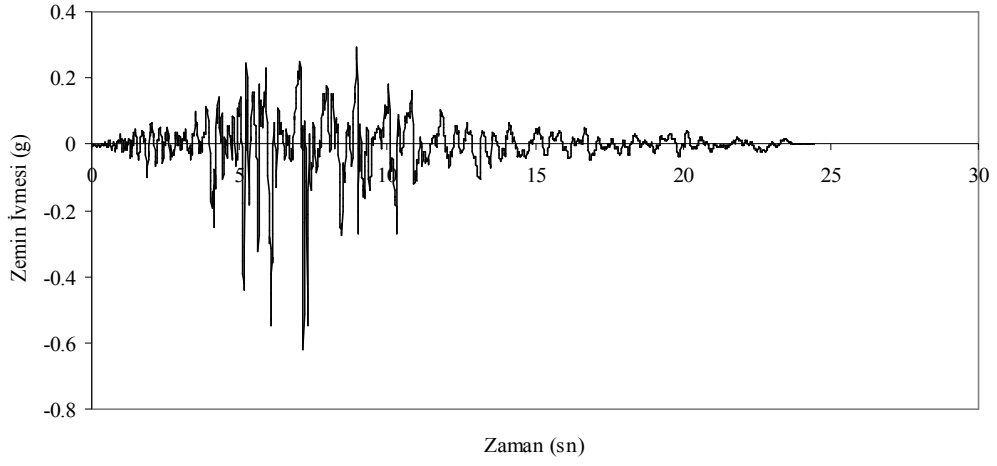
Tablo 5.6 Analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarının özellikleri

No	Tarih	Deprem Adı	M_w	İstasyon Adı	Kayıt Adı	Mesafe (km)	PGA (g)	PGV (cm/sn)	PGD (cm)
1	1980	Victoria, Mexico	6.4	6604 Cerro Prieto	CPE045	34.8	0.621	31.6	13.2
2	1994	Northridge	6.7	24278 Castaic – Old Ridge Route	ORR360	22.6	0.514	52.2	2.41
3	1999	Chi-Chi Taiwan	7.6	TCU045	TCU045-W	24.06	0.474	36.7	50.66

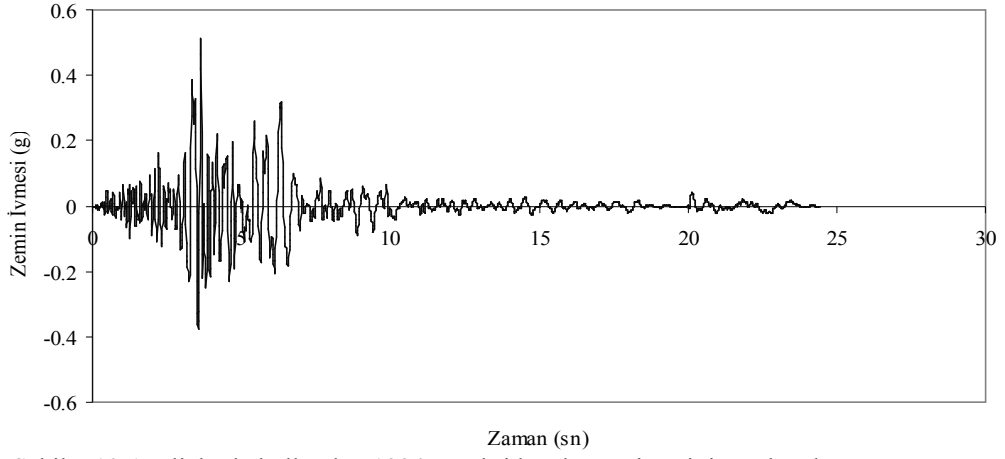
Deprem kayıtlarının tümü USGS standardına göre “B” sınıfı zemin üzerinde kaydedilmiştir. “B” türü zemin için kayma dalgası hızı USGS’e göre $V_s=360\text{--}750$ m/s olarak tanımlanmaktadır. Bu kayma dalgası hız sınırları “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik”te de (2007) yaklaşık olarak “B” grubu zemine karşı gelmektedir. Söz konusu zemin sınıfı yine aynı yönetmelikte Z3 türü zemin sınıfına karşı gelmektedir.

Seçilen depremlere ait deprem ivme kayıtları kullanılarak elastik ve elastik olmayan deprem ivme, hız ve yerdeğiştirme spektrumları yazar tarafından geliştirilen INELAS (İnelastik Spektrum Oluşturma) yazılımı ile hazırlanmıştır.

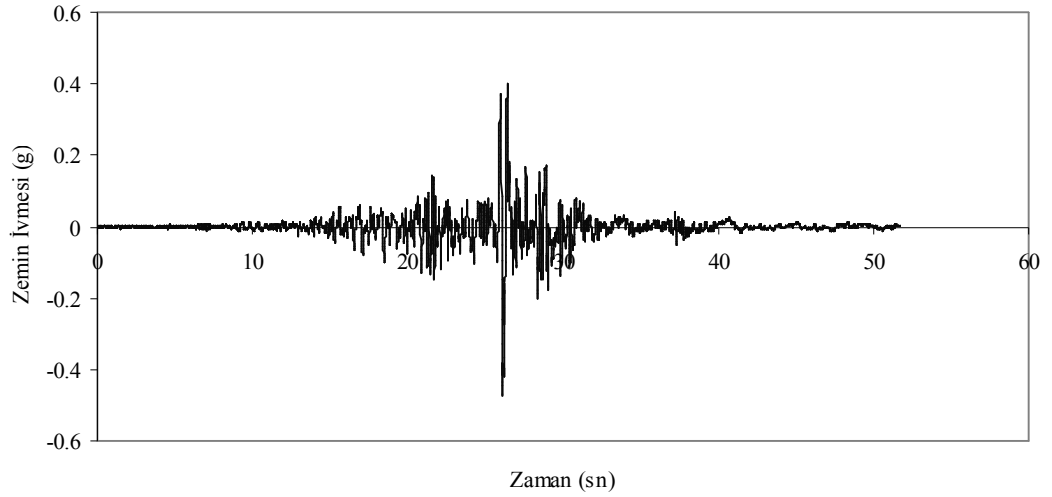
Analizlerde kullanılan deprem ivme kayıtları Şekil 5.9–5.10–5.11’de ve bu kayıtlar kullanılarak oluşturulan %5 sönümlü elastik ivme spektrumları Şekil 5.12–5.13–5.14’de verilmiştir.



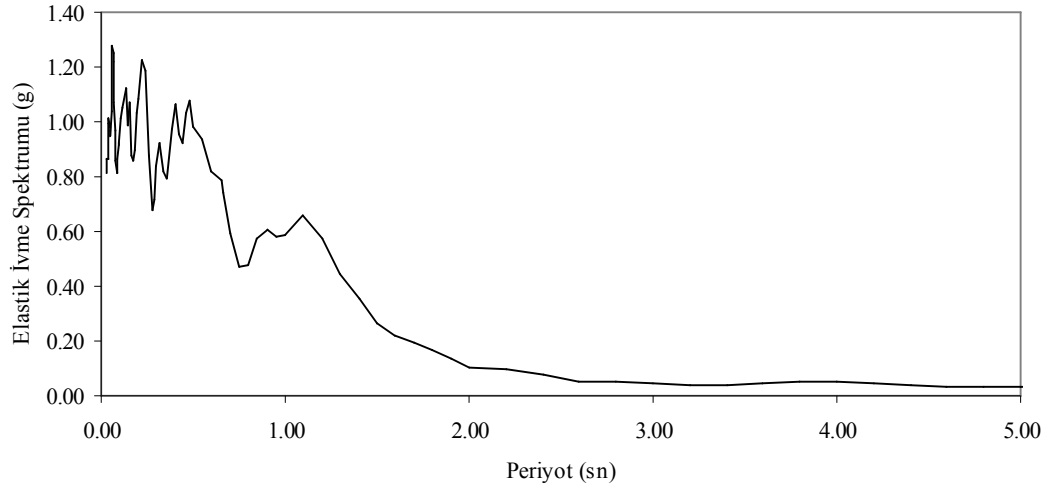
Şekil 5.9 Analizlerde kullanılan 1980 Victoria, Mexico depremine ait ivme kaydı



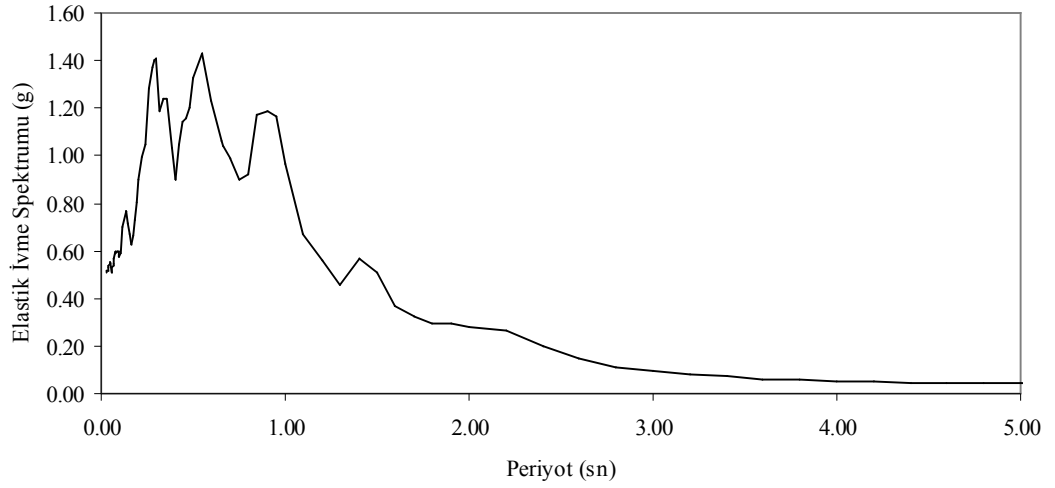
Şekil 5.10 Analizlerde kullanılan 1994 Northridge depremine ait ivme kaydı



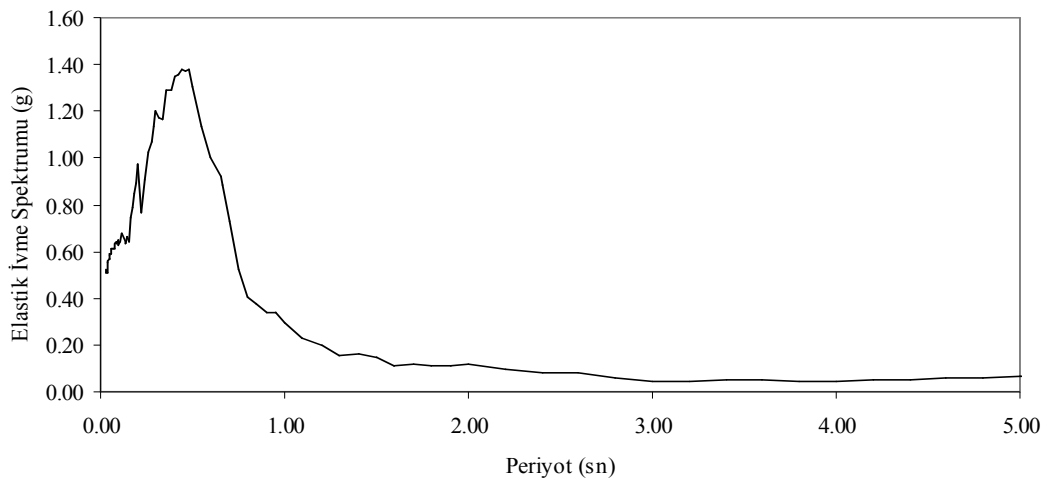
Şekil 5.11 Analizlerde kullanılan 1999 Chi-Chi, Taiwan depremine ait ivme kaydı



Şekil 5.12 1980 Victoria, Mexico depremine ait %5 sönümlü elastik ivme tepki spektrumu



Şekil 5.13 1994 Northridge depremine ait %5 sönümlü elastik ivme tepki spektrumu



Şekil 5.14 1999 Chi-Chi, Taiwan depremine ait %5 sönümlü elastik ivme tepki spektrumu

5.2.3 Örnek Çerçevelerin Geliştirilen Enerji Esaslı Ve Çok Modlu Statik Artımsal İtme Analizi Yöntemi ve Diğer Yöntemlerle Yapılan Çözümlerde Karşılaştırılan Yapısal Büyüklükler

Tez çalışmasında “geliştirilen enerji esaslı ve çok modlu statik artımsal itme analizi yöntemi YMB (yönlü modal birleştirme) kısaltması ile gösterilecektir.

Geliştirilen analiz yönteminin sayısal olarak değerlendirilmesi amacı ile seçilen üç farklı deprem kaydı için farklı periyot özelliklerine sahip 8, 14, 20 katlı örnek betonarme çerçevelerin bu yöntem ve diğer artımsal itme analiz yöntemleri ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemleri ile analizleri yapılmıştır.

Aynı örnek yapılar için “YMB” yönteminden elde edilen sonuçlar, zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz “ZTA”, geleneksel 1.mod esaslı statik artımsal itme analizi “1.MOD”, FEMA 356’da önerilen birleştirilmiş modal kat kesme kuvvetleri ile orantılı statik artımsal itme analizi “MODAL-SRSS” ve yine FEMA 356’da önerilen uniform yük dağılımı için statik artımsal itme analizi “UNIFORM” sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Yöntemin karşılaştırılmasında,

- **kat yatay yerdeğiştirmeleri,**
- **görelî kat ötelemeleri,**
- **en büyük kat giriş plastik dönmeleri,**
- **kat kesme kuvvetleri,**

incelenmiştir.

Ayrıca, geliştirilen YMB yönteminden her bir deprem için “yapı plastik enerji kapasite eğrileri” belirlenmiştir.

5.2.4 Analiz Yöntemlerinin Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Bu bölümde, geliştirilen enerji esaslı ve çok modlu statik artımsal itme analizi (YMB) yönteminden elde edilen yapısal büyüklükler, FEMA 356'daki 1.MOD, MODAL-SRSS ve UNIFORM yüklemelerinden elde edilen sonuçlar ve ZTA yönteminin sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

YMB yönteminin sonuçlarının ZTA yöntemi ile karşılaştırılmasında, çerçevede oluşan plastik mafsallarda tüketilen toplam plastik enerjinin eşitliği esas alınmıştır. FEMA 356'daki 1.MOD, MODAL-SRSS ve UNIFORM yöntemleri ise yerdeğiştirme esaslı yöntemler olduğu için, bu yöntemlerden elde edilen sonuçların ZTA ile karşılaştırılmasında çerçeve tepe yerdeğiştirmesinin eşitliği esas alınmıştır.

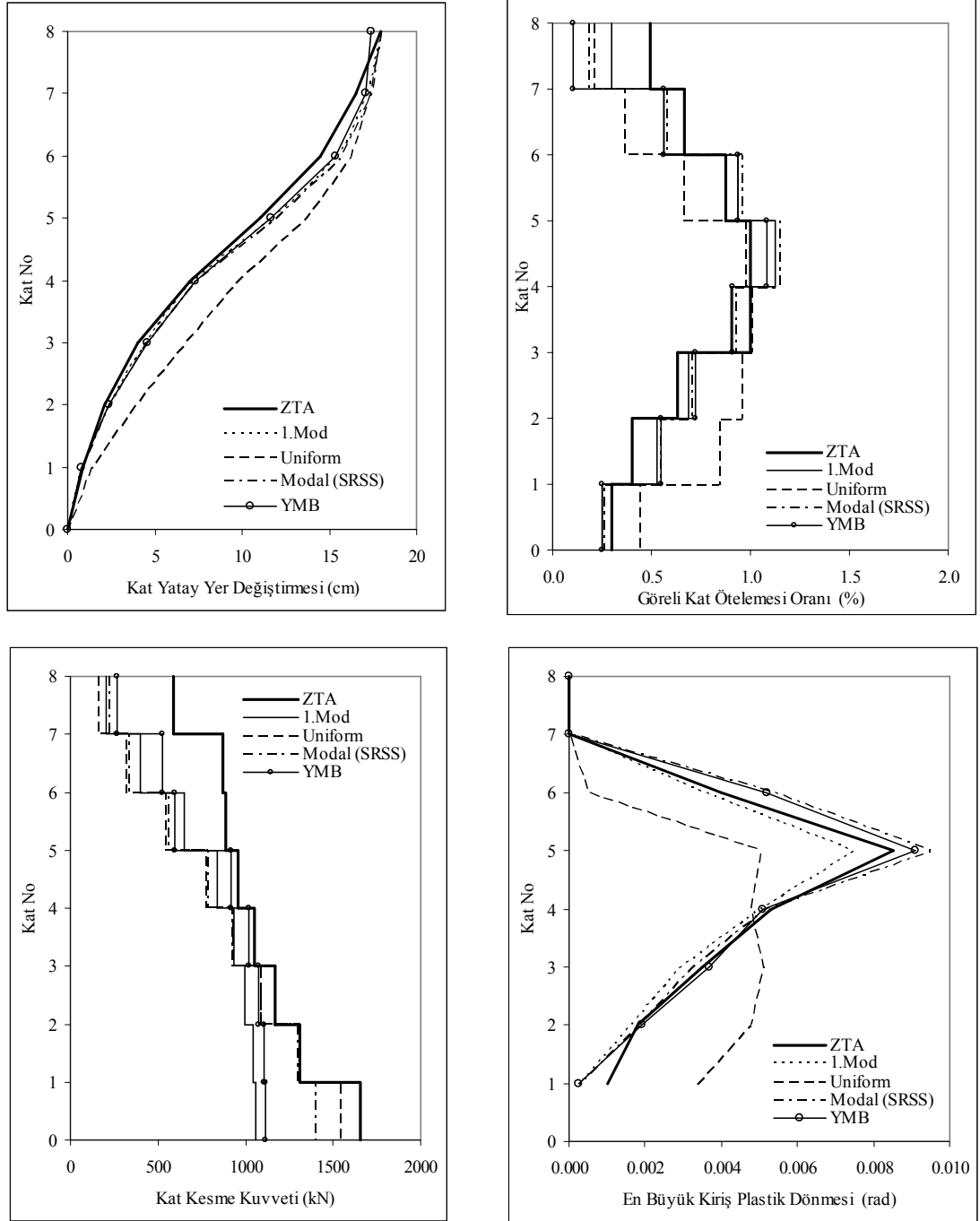
ZTA ile yapılan analizlerde örnek binalar için elde edilen kat yatay yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri, en büyük kiriş plastik dönmeleri ve kat kesme kuvvetlerinin belirlenmesinde, deprem süresince meydana gelecek en elverişsiz durumu gösteren zarflardan elde edilen en büyük değerler kullanılmıştır.

Her bir örnek betonarme çerçeve için, üç deprem kaydından elde edilen **kat yatay yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri, en büyük kiriş plastik dönmeleri ve kat kesme kuvvetlerine** ait grafikler verilmiştir. Plastik mafsalları dağılımları gösterilmiştir.

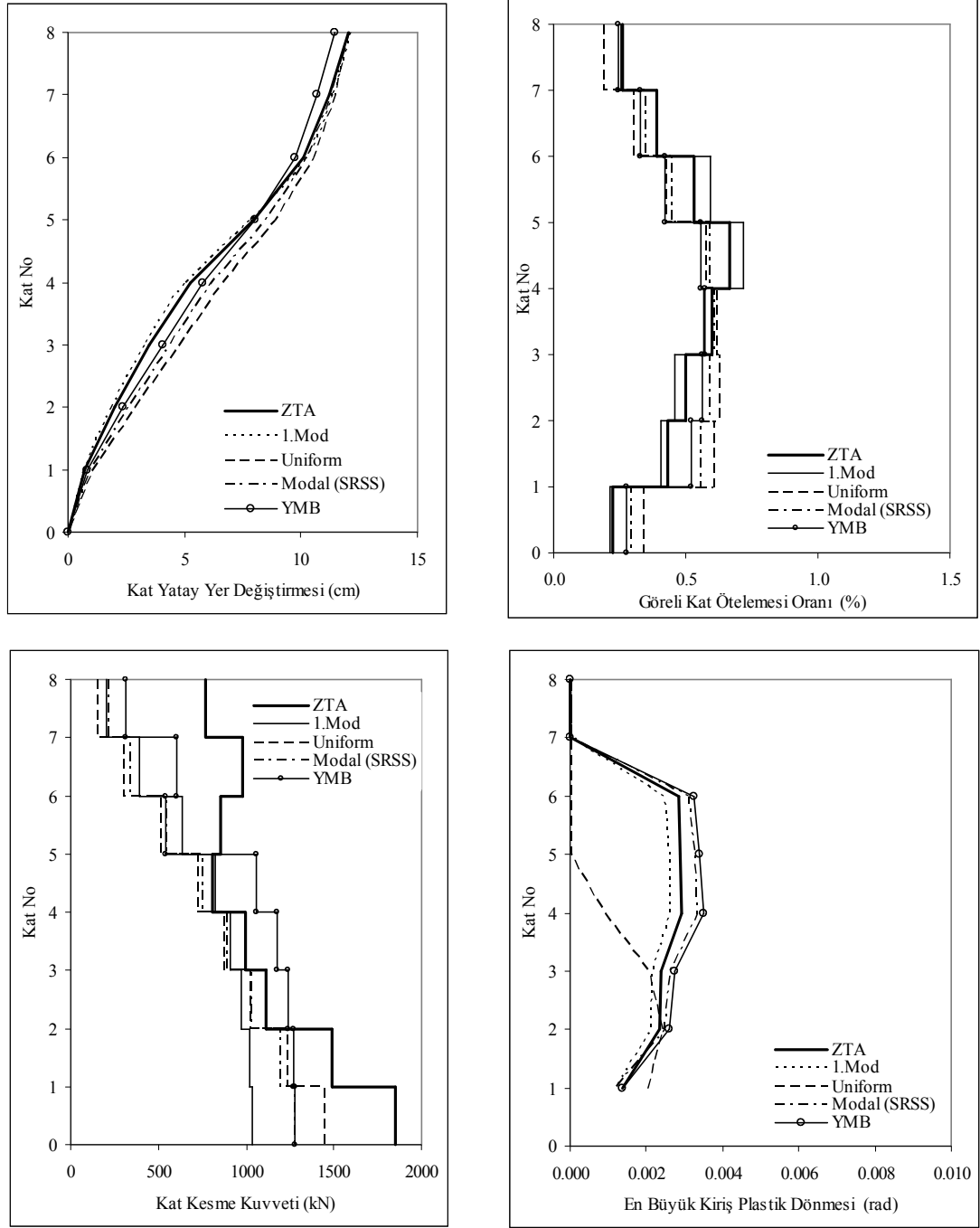
8 katlı örnek çerçeve için yukarıda tanımlanan yapısal büyüklüklerin sonuçları Şekil 5.15, 5.16, 5.17'de, 14 katlı çerçeveye ait sonuçlar Şekil 5.18, 5.19, 5.20'de ve 20 katlı çerçeveye ait sonuçlar Şekil 5.21, 5.22, 5.23'de grafikler halinde gösterilmiştir.

Geliştirilen enerji esaslı ve çok modlu statik artımsal itme analizi (YMB) yönteminden elde edilen sonuçlar kullanılarak 8, 14, 20 katlı binalar için plastik enerji kapasite eğrileri oluşturulmuştur. Analizlerde kullanılan üç deprem için oluşturulan bu eğriler Şekil 5.24, 5.25, 5.26'daki grafiklerde verilmiştir.

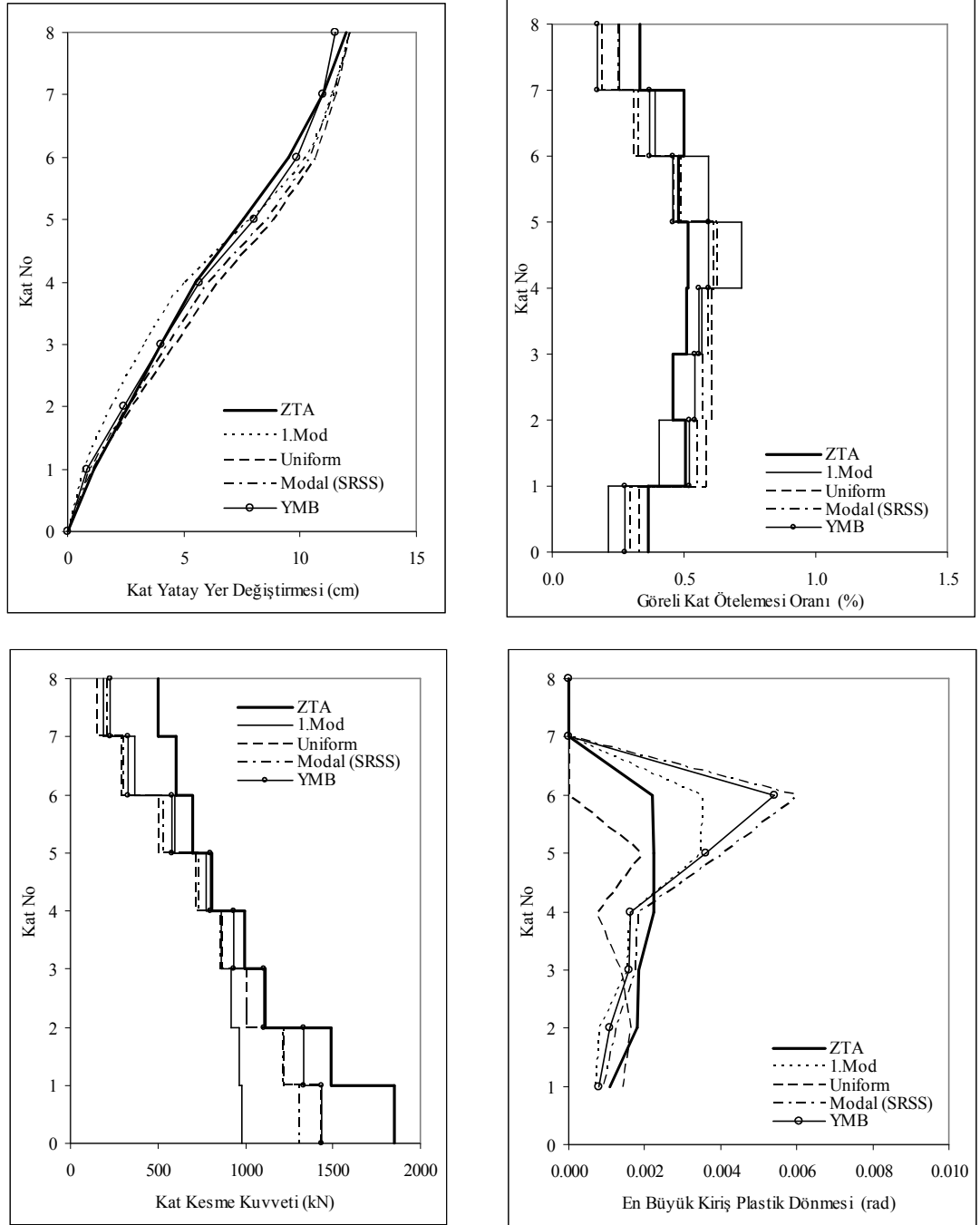
Ayrıca, Şekil 5.15, 5.16, 5.17,.....,5.23’de verilen grafiksel yapısal büyüklüklerin sayısal değerleri EK-1’de tablolar halinde verilmiştir. Her bir yöntem için elde edilen plastik mafsalların dağılımını gösteren grafikler ise EK-2’de gösterilmiştir.



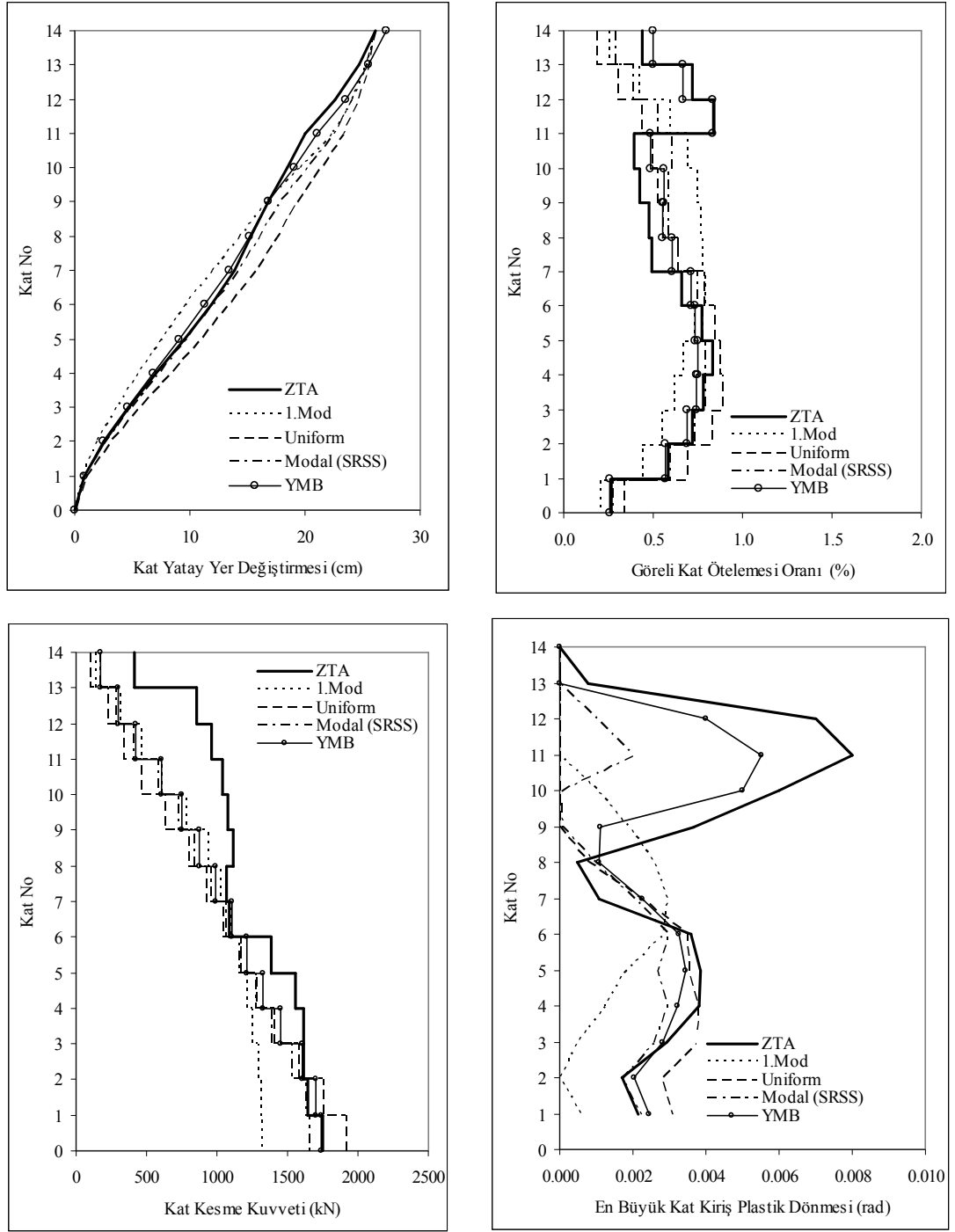
Şekil 5.15 1980 Victoria, Mexico depremi kaydına göre 8 katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması



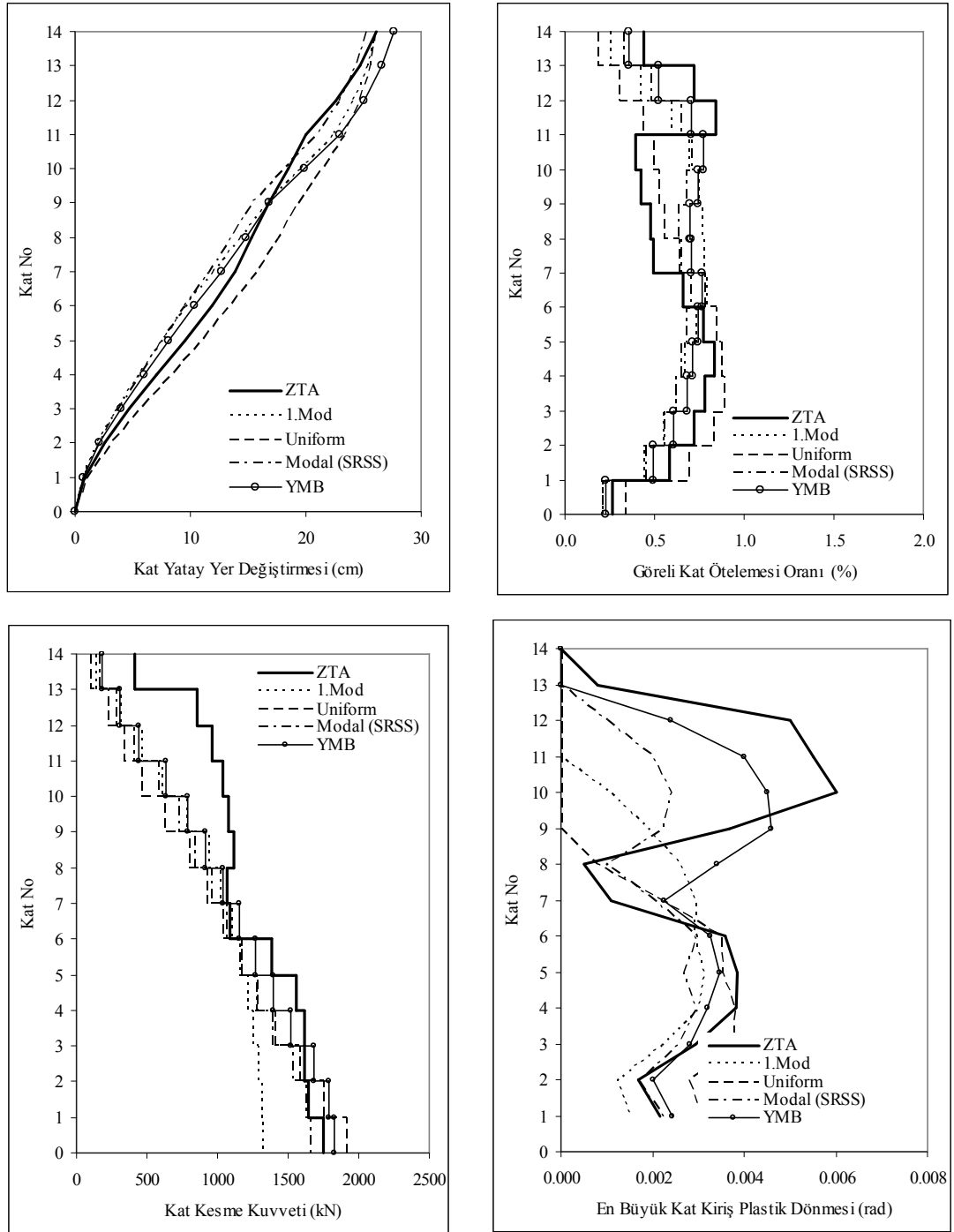
Şekil 5.16 1994 Northridge depremi kaydına göre 8 katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması



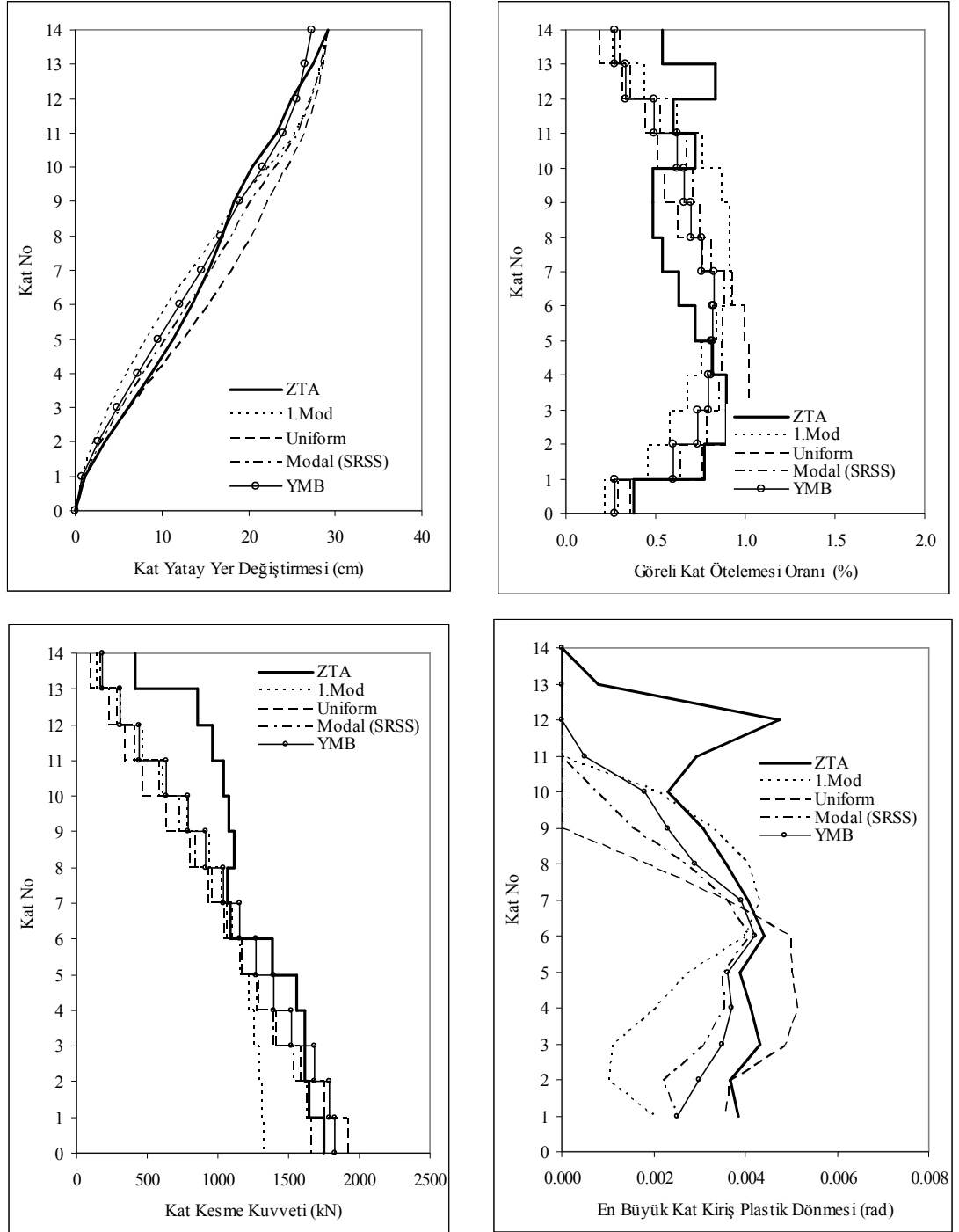
Şekil 5.17 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi kaydına göre 8 katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması



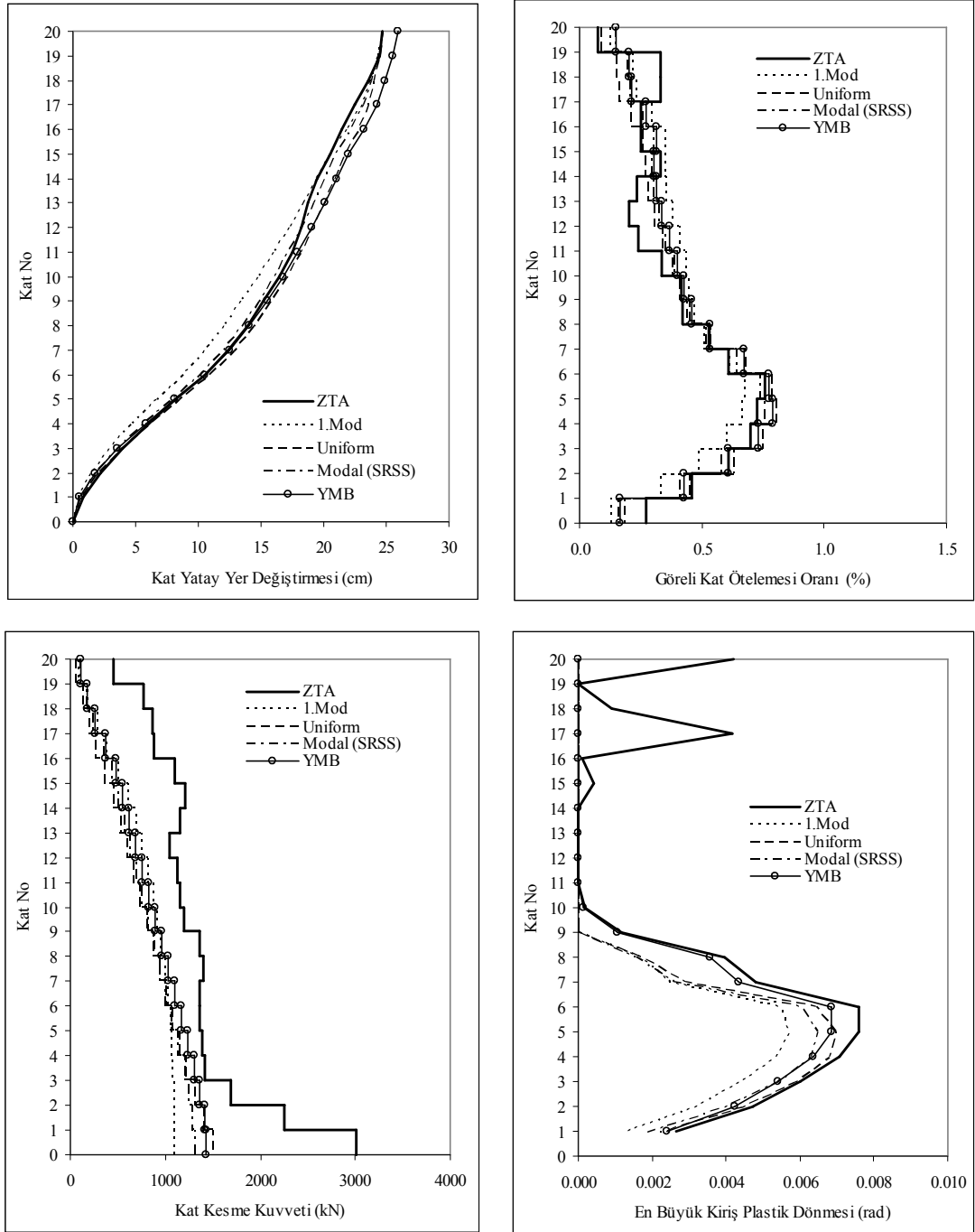
Şekil 5.18 1980 Victoria, Mexico depremi kaydına göre 14 katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması



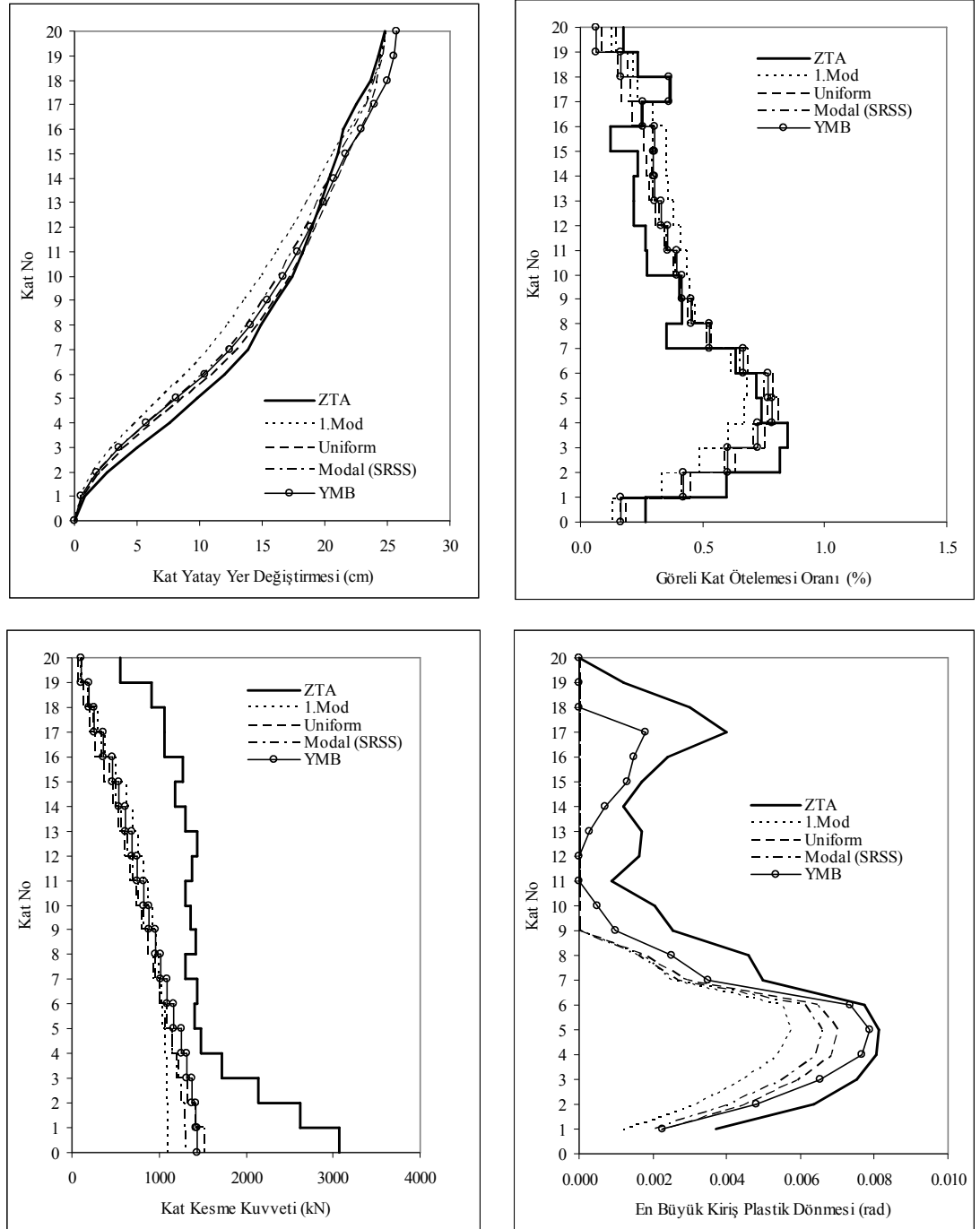
Şekil 5.19 1994 Northridge depremi kaydına göre 14 katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması



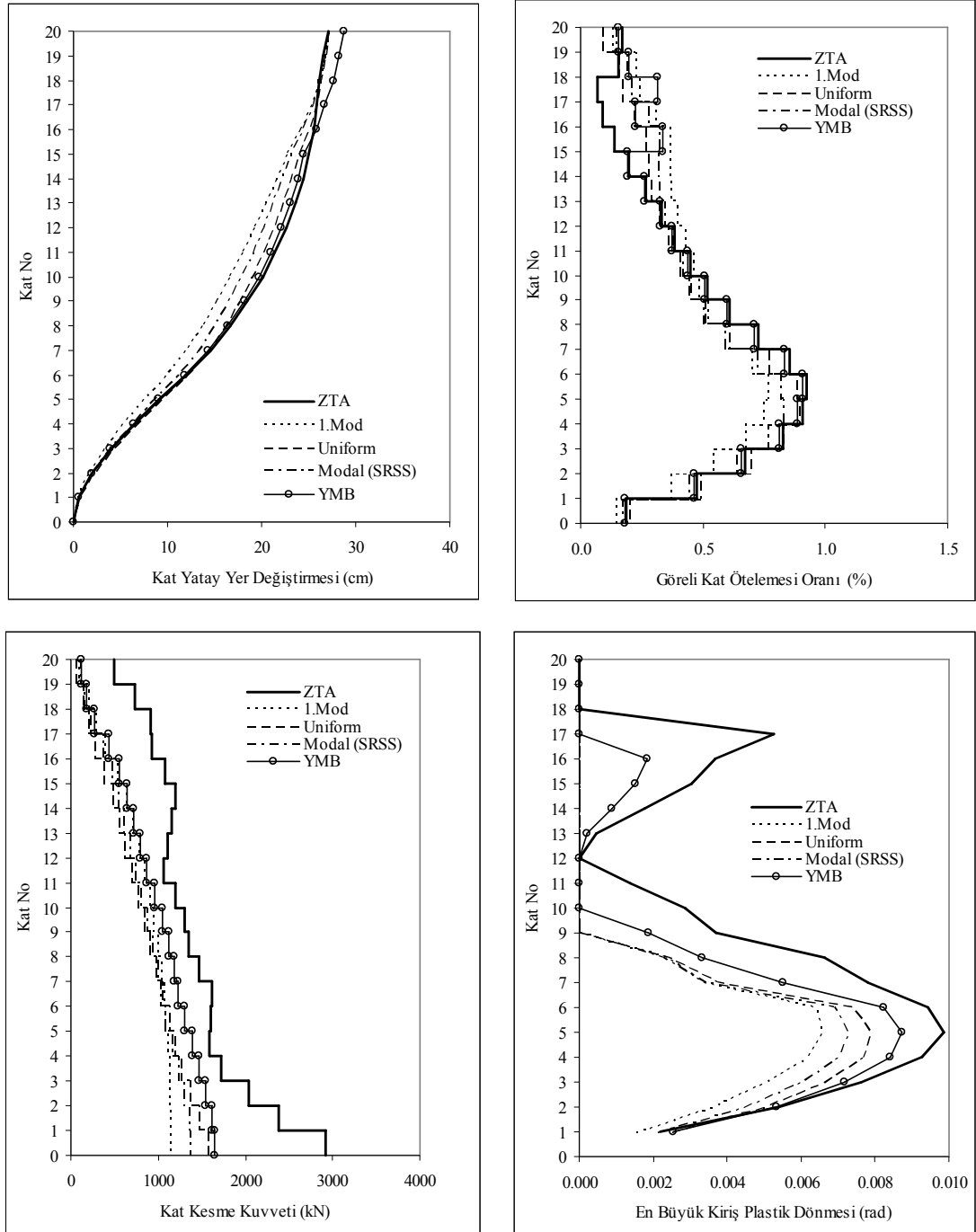
Şekil 5.20 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi kaydına göre 14 katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması



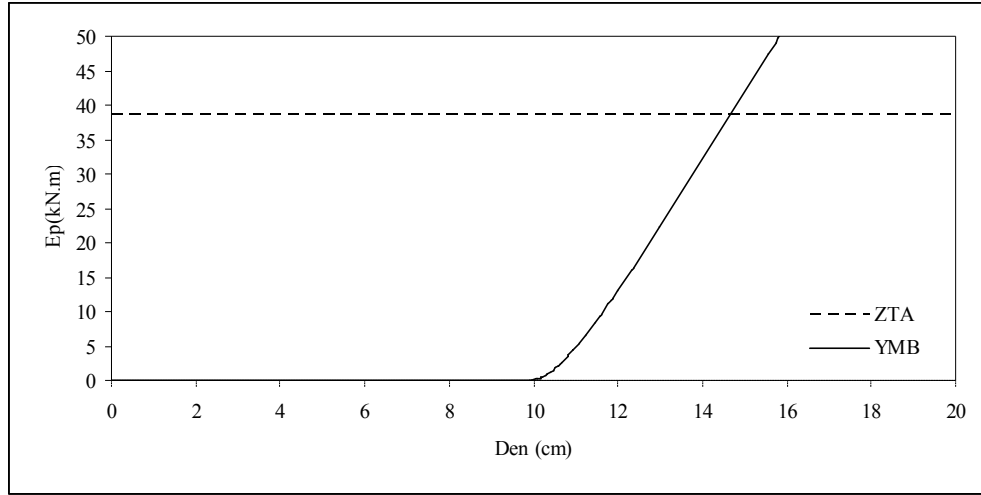
Şekil 5.21 1980 Victoria, Mexico depremi kaydına göre 20 katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması



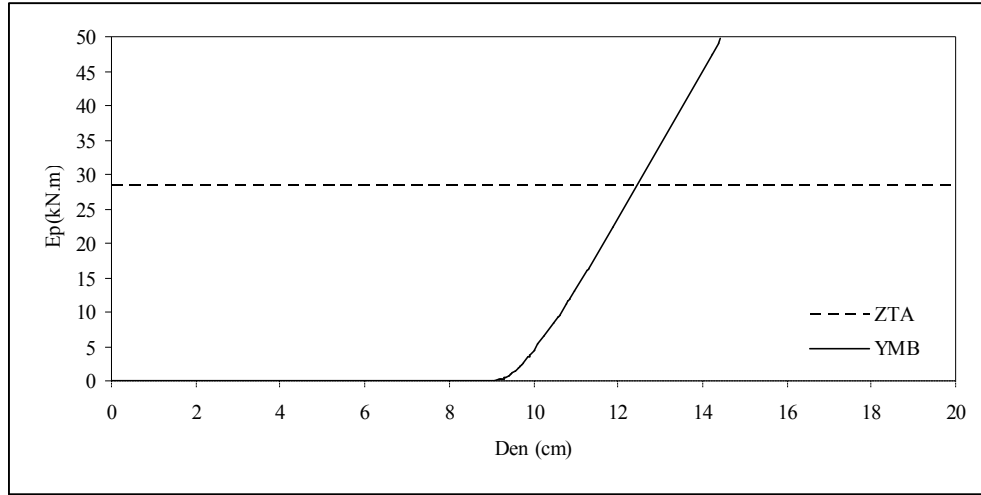
Şekil 5.22 1994 Northridge depremi kaydına göre 20 katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması



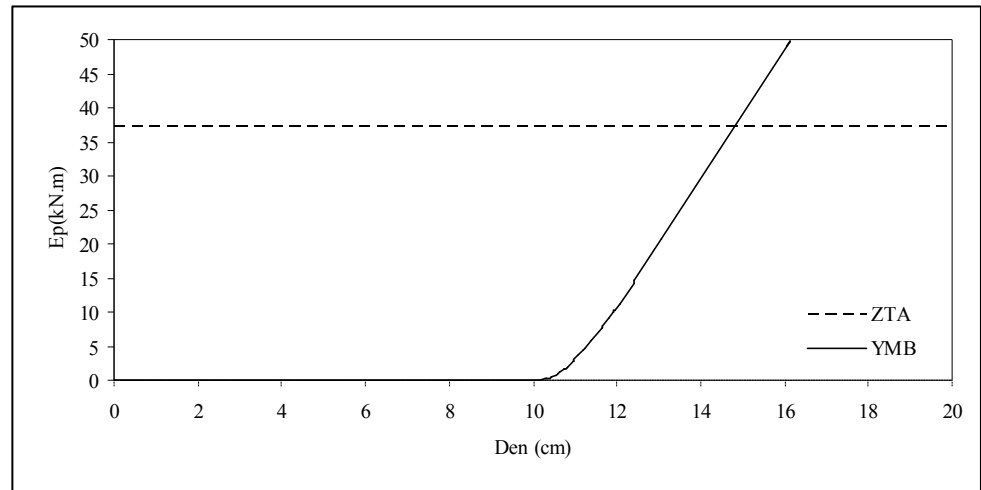
Şekil 5.23 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi kaydına göre 20 katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması



1980 Victoria, Mexico

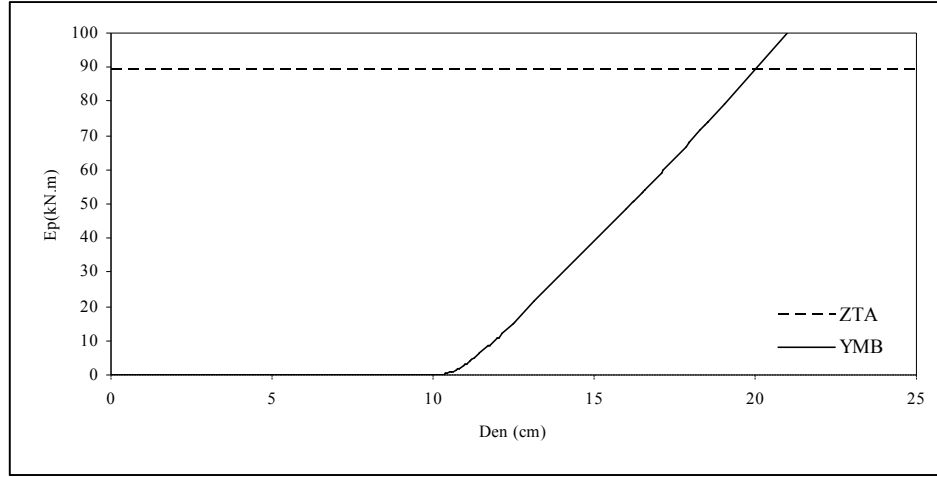


1994 Northridge

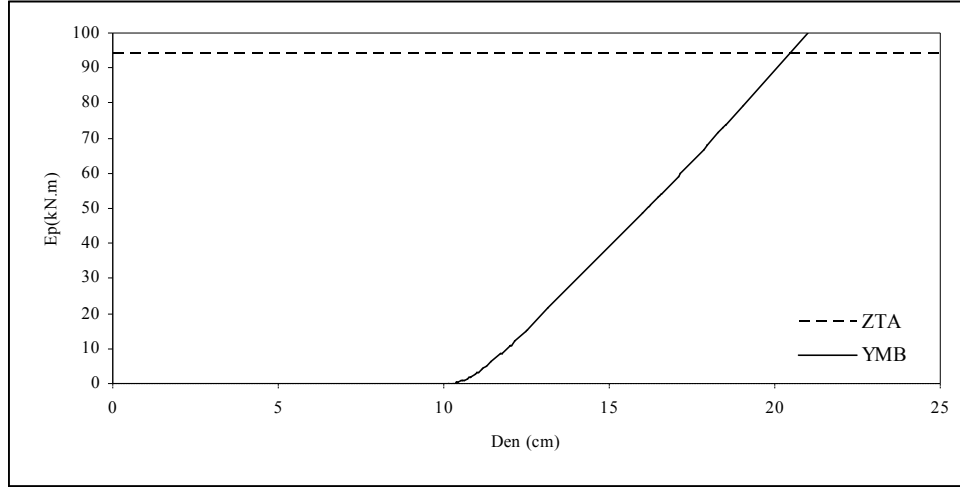


1999 Chi-Chi, Taiwan

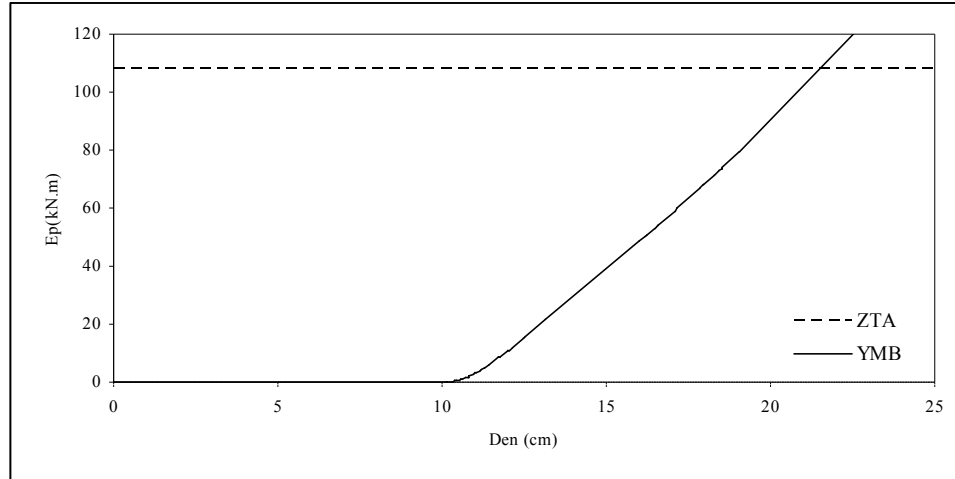
Şekil 5.24 8 katlı örnek betonarme çerçeve için plastik enerji kapasite eğrisi ve zaman tanım alanında analizlerden elde edilen plastik enerji tüketme talebi



1980 Victoria, Mexico

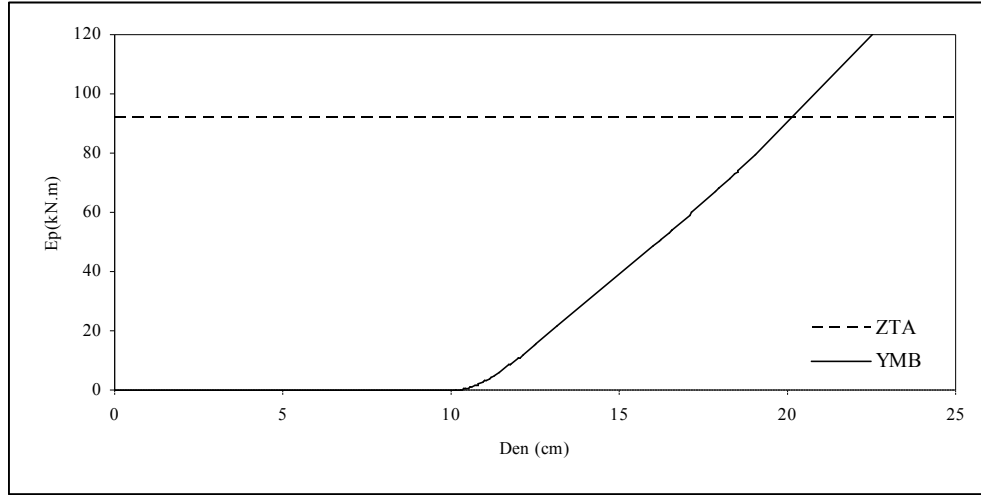


1994 Northridge

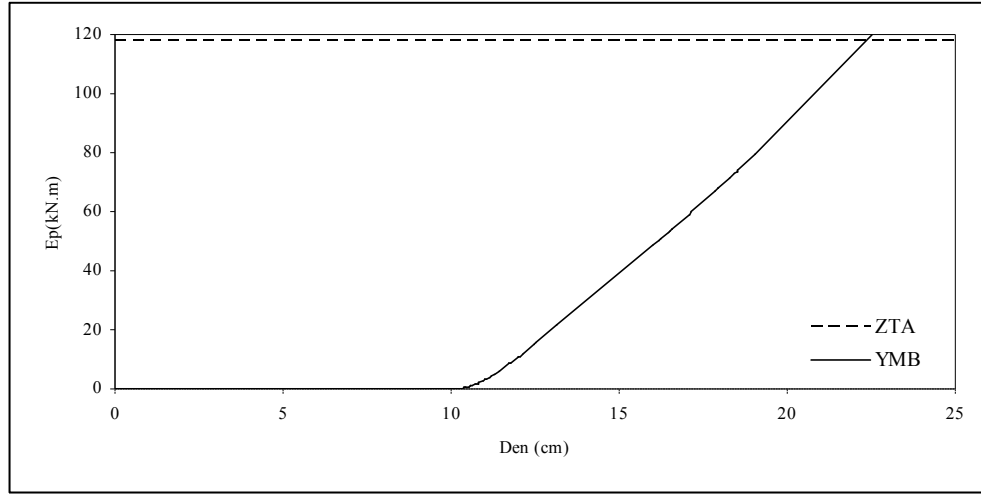


1999 Chi-Chi, Taiwan

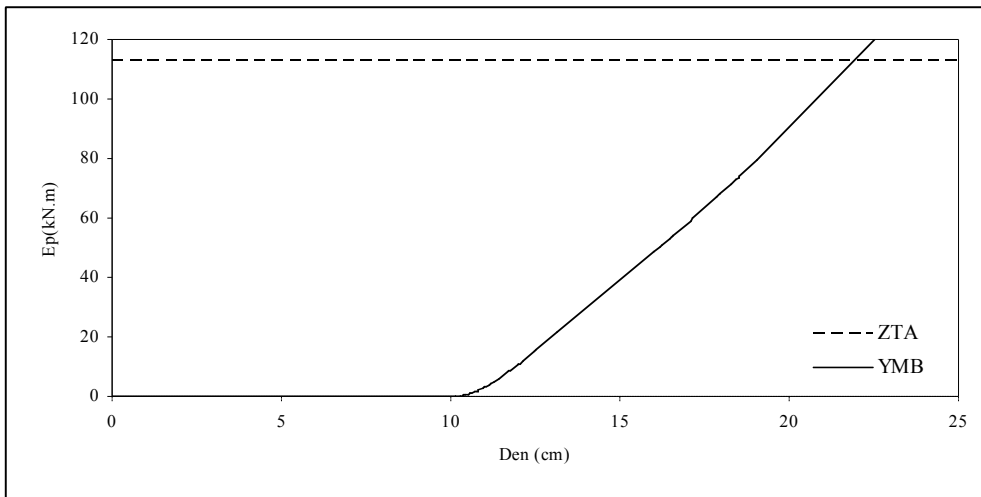
Şekil 5.25 14 katlı örnek betonarme çerçeve için plastik enerji kapasite eğrisi ve zaman tanım alanında analizlerden elde edilen plastik enerji tüketme talebi



1980 Victoria, Mexico



1994 Northridge



1999 Chi-Chi, Taiwan

Şekil 5.26 20 katlı örnek betonarme çerçeve için plastik enerji kapasite eğrisi ve zaman tanım alanında analizlerden elde edilen plastik enerji tüketme talebi

5.2.4.1 Örnek 8 Katlı Çerçeveye Ait Yapısal Büyüklüklerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

1980 Victoria, Mexico, 1994 Northridge ve 1999 Chi-Chi, Taiwan deprem kayıtlarına göre yapılan YMB, 1.MOD, MODAL-SRSS, UNİFORM ve ZTA analiz sonuçlarının incelenmesinden;

- Şekil 5.15-5.16-5.17’de verilen **kat yerdeğiştirmeleri** incelendiğinde geliştirilen YMB yöntemi ile elde edilen sonuçlar, 1.MOD, MODAL-SRSS ve ZTA sonuçlarına genel olarak yakın olduğu, ancak UNİFORM sonuçlarının diğer yöntemlere göre daha uzak sonuç verdiği görülmüştür.
- Şekil 5.15-5.16-5.17’de verilen **görelî kat ötelemeleri ve en büyük kiriş plastik dönmeleri** incelendiğinde, geliştirilen YMB yöntemi ile elde edilen sonuçların, 1.MOD, MODAL-SRSS ve ZTA analiz sonuçları ile uyumlu olduğu, ancak düzensizliğin bulunduğu üst katlarda aradaki farkın daha fazla olduğu görülmüştür. UNİFORM yükleme sonuçlarının diğer yöntemlerden daha uzak sonuç verdiği görülmüştür.
- Şekil 5.15-5.16-5.17’de verilen **kat kesme kuvvetleri** incelendiğinde, geliştirilen YMB yöntemi ile elde edilen sonuçların, 1.MOD, MODAL-SRSS ve UNİFORM analiz sonuçlarına göre ZTA sonuçlarına daha yakın olduğu görülmüştür.
- Şekil 5.15-5.16-5.17’de verilen **kat yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri, en büyük kiriş plastik dönmeleri ve kat kesme kuvvetleri** grafikleri incelendiğinde, tez kapsamında geliştirilen YMB yöntemi ile MODAL-SRSS yöntemlerinin, incelenen çerçevelerde birinci mod hakimiyetinin fazla olması ve yüksek mod etkilerinin az olmasından dolayı birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

5.2.4.2 Örnek 14 Katlı Çerçeveye Ait Yapısal Büyüklüklerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

1980 Victoria, Mexico, 1994 Northridge ve 1999 Chi-Chi, Taiwan deprem kayıtlarına göre yapılan YMB, 1.MOD, MODAL-SRSS, UNİFORM ve ZTA analiz sonuçlarının incelenmesinden;

- Şekil 5.18-5.19-5.20’de verilen **kat yerdeğiştirmeleri** incelendiğinde geliştirilen YMB yöntemi ile elde edilen sonuçların, 1.MOD, MODAL-SRSS ve UNİFORM analiz sonuçlarına göre ZTA sonuçlarına daha yakın olduğu görülmüştür.
- Şekil 5.18-5.19-5.20’de verilen **görelî kat ötelemeleri** incelendiğinde, geliştirilen YMB yöntemi ile elde edilen sonuçların, genel olarak yapının alt katlarında ZTA analiz sonuçları ile uyumlu olduğu, ancak üst katlarda farklı değerler verdiği görülmüştür. Aynı grafiklerin incelenmesinden 1.MOD, MODAL-SRSS ve UNİFORM analiz sonuçlarının alt katlarda YMB ve ZTA yönteminin sonuçlarına yakın olduğu ancak üst katlarda oldukça farklı değerler verdiği görülmüştür.
- Şekil 5.18-5.19-5.20’de verilen **en büyük kiriş plastik dönmeleri** incelendiğinde, geliştirilen YMB yöntemi ile elde edilen sonuçların, genel olarak yapının tüm katlarında ZTA analiz sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. 1.MOD, MODAL-SRSS ve UNİFORM analiz sonuçlarının ise hem YMB hem ZTA yönteminin sonuçlarından çok farklı olduğu görülmüştür.
- Şekil 5.18-5.19-5.20’de verilen **kat kesme kuvvetleri** incelendiğinde, geliştirilen YMB, MODAL-SRSS ve UNİFORM yöntemleri ile elde edilen sonuçların, genel olarak yapının alt katlarında ZTA analiz sonuçları ile uyumlu ancak üst katlarda ise uyumsuz olduğu görülmüştür. 1.MOD ile yapılan analiz sonuçlarının ise alt katlarda tüm yöntemlerden oldukça farklı olduğu, üst katlarda ise YMB, MODAL-SRSS ve UNİFORM yöntemlerinin sonuçlarına

yakın olduğu, ancak ZTA yönteminin sonuçlarından çok farklı olduğu görülmüştür.

- Şekil 5.18-5.19-5.20’de verilen **kat yerdeğiştirmeleri, görel kat ötelemeleri, en büyük kiriş plastik dönmeleri ve kat kesme kuvvetleri** grafikleri incelendiğinde, tez kapsamında geliştirilen ve modal büyüklüklerin birleştirilmesinde modların yönlerini dikkate alan geliştirilen YMB yönteminin, modal büyüklüklerin karesel birleştirilmesini esas alan MODAL-SRSS yöntemine göre özellikle yapının üst katlarında ZTA yöntemine daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

5.2.4.3 Örnek 20 Katlı Çerçeveye Ait Yapısal Büyüklüklerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

1980 Victoria, Mexico, 1994 Northridge ve 1999 Chi-Chi, Taiwan deprem kayıtlarına göre yapılan YMB, 1.MOD, MODAL-SRSS, UNIFORM ve ZTA analiz sonuçlarının incelenmesinden;

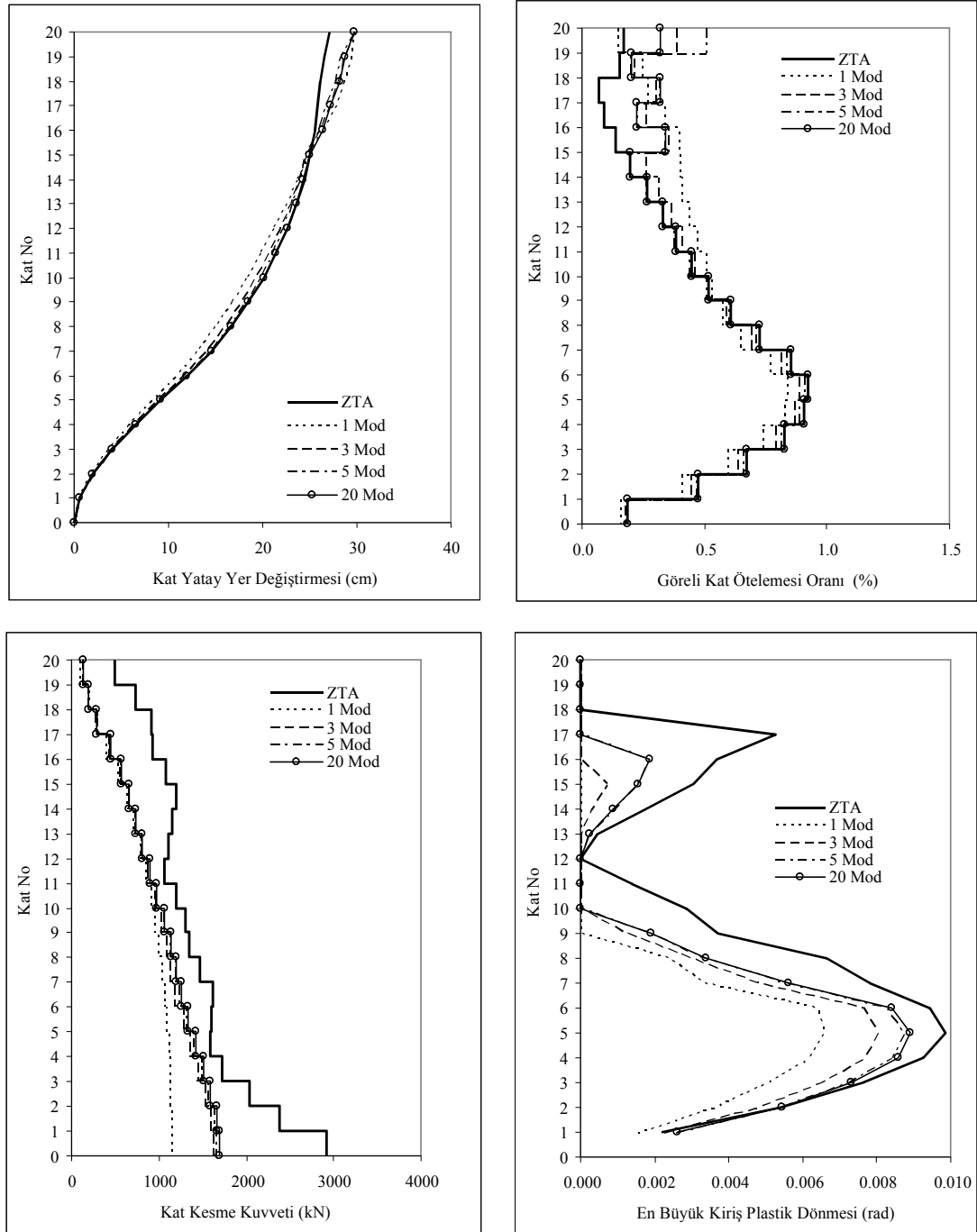
- geliştirilen YMB yöntemi ile elde edilen sonuçların, 1.MOD, MODAL-SRSS ve UNIFORM analiz sonuçlarına göre ZTA sonuçlarına daha yakın olduğu görülmüştür.
- Şekil 5.21-5.22-5.23’de verilen **kat yerdeğiştirmeleri** incelendiğinde geliştirilen YMB yöntemi ile elde edilen sonuçların, MODAL-SRSS, UNIFORM ve ZTA analiz sonuçlarının yakın olduğu ancak 1.MOD sonuçlarının tüm diğer yöntemlerden farklı sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Şekil 5.21-5.22-5.23’de verilen **görel kat ötelemeleri** incelendiğinde, geliştirilen YMB ve diğer 1.MOD, MODAL-SRSS, UNIFORM analiz sonuçlarının ZTA analiz sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

- Şekil 5.21-5.22-5.23’de verilen **en büyük kiriş plastik dönmeleri** incelendiğinde, geliştirilen YMB yöntemi ile elde edilen sonuçların, ZTA analiz sonuçlarına en yakın değerlerde olduğu ancak 1.MOD, MODAL-SRSS ve UNIFORM analiz sonuçlarının ise ilk 10 kat civarına kadar YMB ve ZTA ile uyumlu olduğu, daha üst katlarda ise bu yöntemlerin yetersiz kaldığı belirlenmiştir.
- Şekil 5.21-5.22-5.23’de verilen **kat kesme kuvvetleri** incelendiğinde, geliştirilen YMB analiz sonuçlarının 1.MOD, MODAL-SRSS ve UNIFORM sonuçları ile yakın olduğu ancak tüm yöntemlerin ZTA sonuçlarından daha küçük değerler verdiği belirlenmiştir.
- Şekil 5.21-5.22-5.23’de verilen **kat yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri, en büyük kiriş plastik dönmeleri ve kat kesme kuvvetleri** grafikleri incelendiğinde, tez kapsamında geliştirilen ve modal büyüklüklerin birleştirilmesinde modların yönlerini dikkate alan geliştirilen YMB yönteminin, modal büyüklüklerin karesel birleştirilmesini esas alan MODAL-SRSS yöntemine göre ZTA yöntemine daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

5.2.5 Geliştirilen YMB Analiz Yönteminde Mod Sayısının Yapısal Büyüklük Değerlerine Etkisi

Geliştirilen enerji esaslı ve çok modlu statik artımsal itme analizi yönteminde (YMB) kullanılan mod sayısının, analiz sonuçlarına etkisini incelemek üzere 20 katlı örnek betonarme çerçevenin 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi altında; 1 modlu, 3 modlu, 5 modlu ve 20 modlu olarak analizleri yapılmış ve aynı deprem etkisi altında ZTA sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen yapısal büyüklükler Şekil 5.27’de grafikler halinde gösterilmiştir.

Geliştirilen YMB analiz yönteminde yapı, tüm modlar için ZTA’dan bulunan toplam plastik enerji değerine ulaşılan kadar yük artımı uygulanmıştır.



Şekil 5.27 Örnek 20 katlı çerçevede göz önüne alınan mod sayısının analiz sonuçlarına etkisi (1999 Chi-Chi, Taiwan depremi)

Grafikler incelendiğinde, yüksek mod katkılarının dikkate alınması ile yapılan tüm çoklu mod analizlerinin ZTA ile uyumlu ancak 1 modlu analiz sonuçlarının

farklı değerler verdiği görülmüştür. Aynı grafiklerden, 5 modla ve 20 modla yapılan analiz sonuçları ile ZTA'ya daha en yakın sonuçları verdiği görülmüştür.

5.3 Mevcut Prefabrike Bir Yapının Geliştirilen YMB Analiz Yöntemi ile İncelenmesi ve Değerlendirilmesi

Bu bölümde ikinci örnek olarak mevcut betonarme prefabrike bir binanın FEMA 356'da tanımlanan 1.MOD, MODAL-SRSS ve UNIFORM artımsal itme analizi yöntemleri ve tez kapsamında geliştirilen YMB analiz yöntemi ile analizleri yapılmış ve zaman tanım alanında dinamik analiz ZTA ile karşılaştırılmıştır.

5.3.1 Mevcut Prefabrike Yapının Özellikleri

Bu çalışmada fabrika olarak kullanılan mevcut bir prefabrike binanın 12 deprem kaydına göre analizleri yapılmış ve yapısal büyüklükleri karşılaştırılmıştır.

Bina planda 68mx90m boyutlarına sahiptir. İncelenen yapı fabrika ve idari kısım olmak üzere iki birleşik bölümden oluşmaktadır (Şekil 5.28). Fabrika kısmı tek katlı olup kat yüksekliği 6.5 m'dir. İdari kısmın ise üç katlı olup ilk iki katı yatayda 2 açıklıklı, son katı tek açıklıklı olup kat yükseklikleri ilk iki kat 3.25m son kat ise 3.0 m'dir.

Binanın prefabrike çatı ve ara kat kirişleri, kolonlardaki guseler üzerine oturtulmuştur. İdari kısmın ara kat kirişleri öngermeli olup kolonlarla birleşim bölgeleri rijit düğüm noktası olarak teşkil edilmiştir. Kat döşemeleri prefabrike Π elemanlardan meydana gelmektedir. Yapının temel sistemi, bağ hatıllarıyla birbirine bağlı olan tekli temel sistemi olarak oluşturulmuştur.

Binanın, yapım tarihi itibarı ile 1998 yılında yürürlüğe giren "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik"e göre tasarlanmıştır.

Yapının orijinal projesinde; binanın 1. derece deprem bölgesinde bulunduğu, bina önem katsayısının $I=1$ alındığı, binanın üzerinde bulunduğu zeminin Z3 sınıfı olduğu

belirtilmiştir. Tasarımda beton sınıfı C25, donatı çeliği sınıfı ise S420 olarak seçilmiştir.

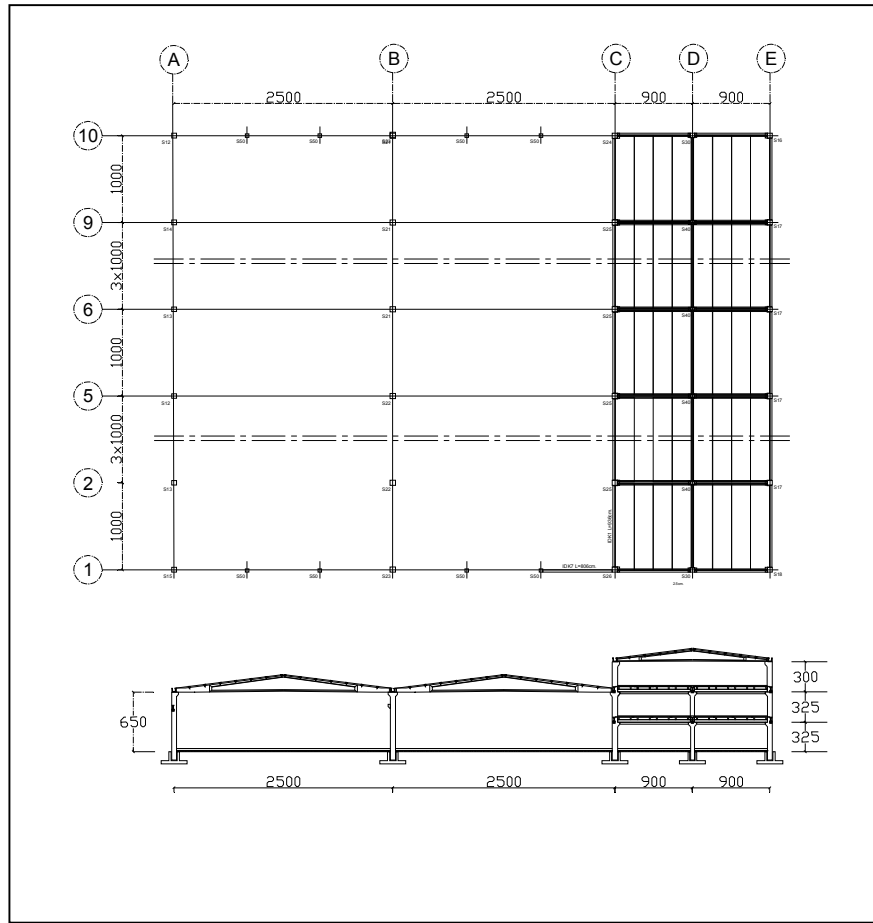
Yapı planda yatay eksene göre simetriye sahip olup düşey doğrultuda boyut ve özellikleri birbiri ile özdeş 10 çerçeveden oluşmaktadır. Yapının bu özelliği dikkate alınarak analizler, burulma düzensizliğinin olmadığı yatay doğrultu için yapılmıştır.

Yapının düşeydeki aks aralıkları da eşit olduğundan hesaplarda kolaylık olması ve sonuçların sade olarak gösterilebilmesi amacı ile analizler iki boyutlu olarak yapılmıştır.

Analizde modellenen çerçeveyi oluşturan elemanların en kesit boyut ve donatıları Tablo 5.7 'de verilmiştir.

Tablo 5.7 Prefabrike binadaki elemanların enkesit özellikleri

S1 Kolonu 55x55cm		Donatı: 12Φ18+8Φ25	S2 Kolonu 55x55cm		Donatı: 12Φ20+8Φ22
S3 Kolonu 60x60cm		Donatı (1.Kat): 12Φ20+12Φ25 Donatı (2.ve 3.kat): 12Φ20	S4 Kolonu 55x55cm		Donatı (1.Kat): 12Φ18+8Φ25 Donatı (2.ve 3.kat): 12Φ18
S5 Kolonu 55x55cm		Donatı (1.Kat): 12Φ18+8Φ25 Donatı (2.ve 3.kat): 12Φ18			



Şekil 5.28 Örnek prefabrike binanın plan ve kesit görünüşü

5.3.2 Analizlerde Kullanılan Deprem Kayıtları

Yapının artımsal itme analiz sonuçlarını karşılaştırmak üzere zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yapılmıştır. Analizde 12 adet deprem kaydı kullanılmıştır. Seçilen depremlerin moment büyüklüğü 6,0–7,4 arasındadır. İvme kayıtların alındığı istasyonların deprem odağına olan uzaklığı 12,8 km ve üzerindedir.

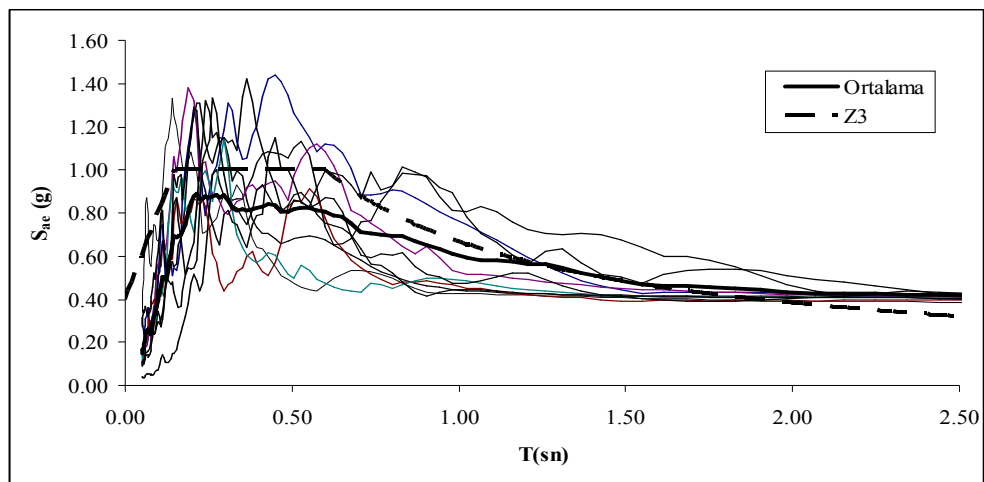
Analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının tümü düzeltilmiş kayıtlar olup PEER'in internet sitesinden alınmıştır. Deprem kayıtları ile ilgili özellikler Tablo 5.8'de verilmektedir.

Tablo 5.8 Analizlerde kullanılan deprem kayıtları

No	Tarih	Deprem Adı	M_w	İstasyon Adı	Mesafe (km)	PGA (g)	PGV (cm/sn)	PGD (cm)
1	21.07.1986	Chalfant Valley	6.2	54428 Zack Brothers Ranch	18.7	0.447	36.9	7.01
2	21.07.1986	Chalfant Valley	6.2	54428 Zack Brothers Ranch	18.7	0.400	44.5	8.56
3	18.10.1989	Loma Prieta	6.9	APEEL2 Redwood City	47.9	0.220	34.3	6.87
4	19.08.1999	Kocaeli	7.4	Ambarlı	78.9	0.249	40.0	30.08
5	25.05.1980	Mammoth Lakes	5.7	54301 Mammoth Lakes	14.2	0.390	23.9	2.72
6	01.10.1987	Whittier Narrows	6.0	Brea Dam (Downstream)	23.3	0.313	14.5	0.77
7	01.10.1987	Whittier Narrows	6.0	90034 LA - Fletcher Dr	14.4	0.213	12.6	1.45
8	01.10.1987	Whittier Narrows	6.0	90063 Glendale-Las Palmas	19.0	0.296	17.1	1.82
9	24.04.1984	Morgan Hill	6.2	47380 Gilroy Array #2	15.1	0.212	12.6	2.10
10	24.04.1984	Morgan Hill	6.2	57382 Gilroy Array #4	12.8	0.348	17.4	3.11
11	17.01.1994	Northridge	6.7	24575 Elizabeth Lake	37.2	0.155	7.3	2.7
12	17.01.1994	Northridge	6.7	24611 LA-Temple&Hope	32.3	0.184	20.0	2.74

Kaynak: <http://peer.berkeley.edu/smcat/index.html>

Seçilen deprem kayıtlarından elde edilen elastik ivme tepki spektrumlarının ortalamasının, birinci derece deprem bölgesindeki Z3 türü zemin için deprem yönetmeliğinde verilen tasarım deprem ivme spektrumuna benzer olması için kullanılan deprem ivme kayıtlarında ölçekleme yapılmıştır. Yapılan ölçekleme sonrasında deprem ivme kayıtlarından elde edilen elastik deprem ivme spektrumları ile bu spektrumların ortalaması Şekil 5.29’de gösterilmiştir. Yine aynı grafik üzerinde deprem yönetmeliğinde tanımlanan elastik tasarım deprem spektrumu da verilmiştir.



Şekil 5.29 Analizlerde kullanılan depremlere ait elastik ivme tepki spektrumları, ortalama elastik ivme tepki spektrumu, 1. derece deprem bölgesi için Z3 elastik tasarım ivme spektrumu

5.3.3 Örnek Prefabrike Binanın Modellenmesi

Yapılan çalışmada, binaların deprem performansının belirlenmesinde kullanılan çeşitli yöntemlerin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Deprem performans analizi, örnek olarak incelenen prefabrike yapının simetri eksenini de olan yatay doğrultusu için yapılmıştır.

Yapının özdeş çerçevelerden oluşmasından dolayı analiz modeli iki boyutlu olarak oluşturulmuştur. Yatay doğrultudaki her bir çerçeveye etkiyen kat kütleleri hesaplanarak, kat seviyelerinde toplanmış kütleler olarak tanımlanmıştır. Binanın prefabrike çatı makası guseler üzerine oturtulduğundan iki ucu mafsallı eleman olarak dikkate alınmıştır. İdari kısımdaki ara kat kirişlerinin kolonlarla birleşimi ise rijit düğüm noktası olarak modellenmiştir. Yapının dinamik analizinden elde edilen modal büyüklükler Tablo 5.9’da verilmiştir.

Tablo 5.9 Örnek prefabrike binanın modal özellikleri

	Birinci Mod	İkinci Mod
Periyot	0.54 sn	0.17 sn
Modal Katkı Faktörü	4.53	1.65
Kütle Katılım Oranı	%82	%11

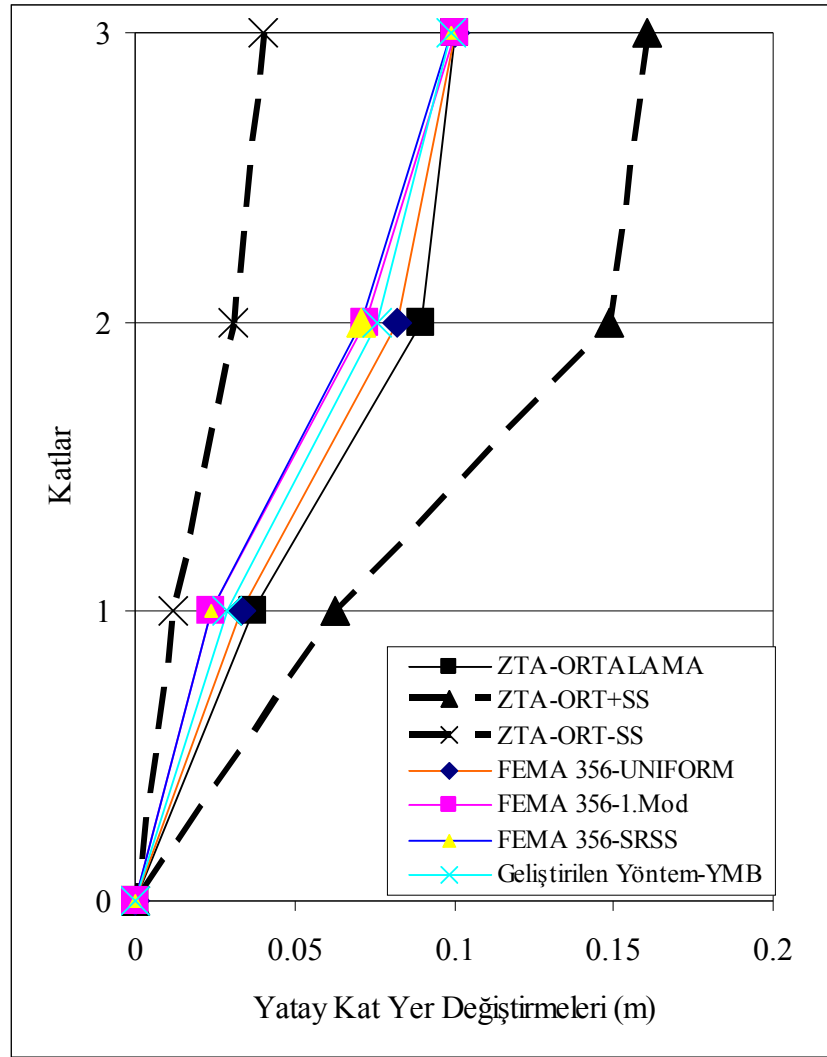
Artımsal itme analizlerinde, plastik mafsalların kolon ve kiriş elemanlarının uç bölgelerinde yığılı olarak oluşacağı kabul edilmiştir. Kirişlerde eksenel yük seviyesi düşük olduğundan sadece eğilme mafsalı tanımlanmıştır. Kolonlarda ise eksenel yükün akma momentine etkisi akma diyagramları kullanılarak dikkate alınmıştır. Elemanların moment dönme ilişkileri rijit plastik olarak modellenmiştir. Akma diyagramları, pratiklik ve hesaplarda kolaylık sağlanması amacı ile üç doğrulu idealleştirme yapılarak kullanılmıştır. Çalışmada, ikinci mertebe etkiler dikkate alınmamıştır.

Çalışmada FEMA 356’da tanımlanan yerdeğiştirme katsayıları yöntemi ve tez kapsamında önerilen YMB yöntemi ile yapı performansı araştırılmıştır. FEMA 356

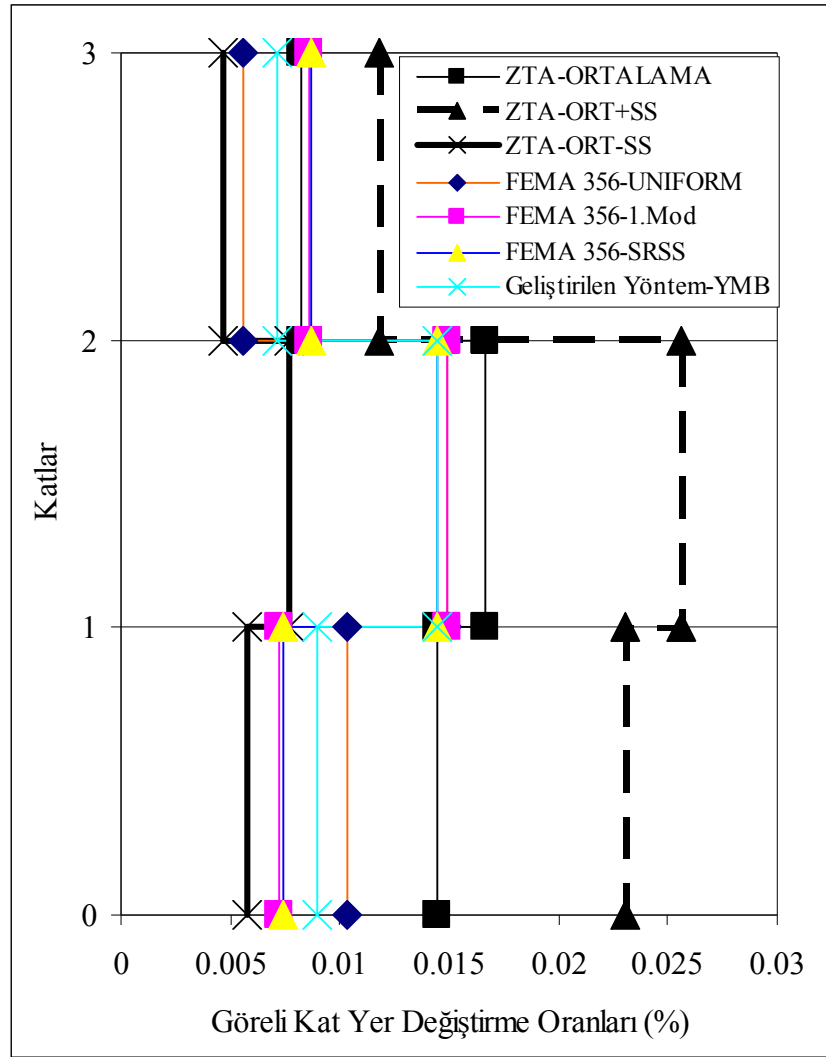
yöntemi ile analizde, yapının 1. mod şekli ile orantılı yükleme, dikdörtgen yükleme ve mod birleştirme yönteminden bulunan kat kesme kuvvetleri ile orantılı yükleme şekilleri kullanılarak ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Çok modlu artımsal itme analizlerinde ise, yapının ilk iki moduna ait etkin kütlelerin toplamı, bina toplam kütlelerini %90'ının üzerinde olduğundan sadece ilk iki mod dikkate alınmıştır. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler ZEUS yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

5.3.4 Artımsal İtme Analizi ve Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

FEMA 356'da tanımlanan düşey yüklemeler ve tez kapsamında önerilen YMB yöntemi kullanılarak incelenen prefabrike binanın deprem davranışı belirlenmiştir. Analizler sonucunda bulunan yatay kat yerdeğiştirmeleri ve katlar arası görelî kat öteleme oranları Şekil 5.30 ve Şekil 5.31'de verilmiştir. Aynı şekiller üzerinde daha önceki bölümlerde detayları verilen deprem ivme kayıtlarından bulunan büyüklüklere ait ortalama ve (ortalama $\pm$ standart sapma (ORT $\pm$ SS)) değerleri de gösterilmiştir.



Şekil 5.30 Artımsal itme analizi ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizden elde edilen kat yatay yerdeğiştirmeleri



Şekil 5.31 Artımsal itme analizi ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizden elde edilen katlar arası görece yerdeğiştirme oranı

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR

Yapıların deprem sırasındaki performanslarının daha gerçekçi belirlenmesi, deprem mühendisliği alanındaki pek çok araştırmacının ana çalışma konularından biri haline gelmiştir. Birçok araştırmacının yaptığı çalışmalara bağlı olarak mevcut ve yeni yapılacak binaların deprem performansının belirlenmesi için yeni ve pratik yöntemler geliştirilmiştir. Araştırmalar henüz son haline gelmemekle birlikte, söz konusu yeni analiz yöntemleri deprem yönetmeliklerinde yer almaya başlamıştır.

Bu tez çalışmasında, yapıların deprem davranışının belirlenmesine esas olacak enerji esaslı ve yönlü modal yük birleşimini (YMB) esas alan bir statik artımsal itme analizi yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen YMB yönteminde, malzemenin elastoplastik davranışı göz önüne alınarak, yapı sisteminin düşey yükler ve artan yatay yükler altında analizi yapılmaktadır. Geliştirilen yöntemde, plastik mafsallarda hipotezi benimsenmiş, bunun için plastik şekil değiştirmelerin, plastik kesit adı verilen çerçevedeki kiriş ve kolon uçlarında toplandığı kabul edilmekte ve diğer kesitlerin ise doğrusal davrandığı varsayılmaktadır. En kesitteki akma koşulları doğru parçaları ile idealize edilmektedir. Geliştirilen yöntemin uygulanabilmesi için yukarıdaki kabullere dayalı bir bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir. Analizlerde ikinci mertebe etkiler göz önüne alınmamıştır.

Tez çalışması kapsamında geliştirilen YMB yönteminde, yapı davranışını belirlemede etken olan mod katkılarının birleştirilmesi sırasında, literatürdeki diğer yöntemlerden farklı olarak, **modal davranışın yönlerini de dikkate alan yönlü modal birleşim kuralı** önerilmiştir. **Bu yöntemde, her bir kattaki modal büyüklük yön işareti ile işleme girmektedir. Her bir artımsal itme analizi adımında uyarlamalı olarak dikkate alınan mod sayısına bağlı birden fazla yükleme şekli elde edilmektedir. Her hesap adımında her bir yükleme şekli için, yük artımı belirlenmekte ve en küçük yük artımını veren yükleme biçimi o adımın yükleme şekli kabul edilerek işleme devam edilmektedir.**

Plastik mafsalların oluşumuna bağlı olarak, plastik mafsallarda tüketilen toplam plastik enerjiye karşı, tüketilen toplam (elastik+plastik) enerjiden hesaplanan, enerji esaslı yapıya ait eşdeğer yerdeğiştirme grafiği (plastik enerji kapasite eğrisi) elde edilmektedir.

Yöntemin sonuçlarının değerlendirilmesi amacı ile üç değişik deprem kaydı kullanılarak 8, 14 ve 20 katlı örnek betonarme düzlemsel çerçeve ve mevcut bir prefabrike yapı; geliştirilen enerji esaslı YMB yöntemi, FEMA 356'da tanımlanan statik artımsal itme analizi yöntemleri ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz (ZTA) yöntemi ile çözümleri yapılmış ve elde edilen bazı yapısal büyüklükler karşılaştırılarak sonuç değerlendirmeler yapılmıştır. Değerlendirmelerde **kat yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri, kat kesme kuvvetleri ve en büyük kat kiriş plastik dönme değerleri** incelenmiştir.

Değerlendirmeler sonucunda örnek 8 katlı yapıda 1. modun hakim olmasından dolayı tez kapsamında geliştirilen YMB yöntemi, FEMA 356'da tanımlanan statik artımsal itme analizi yöntemlerinden elde edilen **kat yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri, kat kesme kuvvetleri ve en büyük kat kiriş plastik dönme değerleri** zaman tanım alanında analiz (ZTA) yöntemi sonuçlarına yakın çıkmıştır.

14 ve 20 katlı yapılarda yüksek mod etkilerinden dolayı, FEMA 356'da tanımlanan yöntemlerden bulunan **kat yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri, kat kesme kuvvetleri ve en büyük kat kiriş plastik dönme değerlerinin** zaman tanım alanında analiz (ZTA) yönteminden farklılaştığı, geliştirilen YMB yönteminin ise zaman tanım alanında analiz (ZTA) yöntemine daha yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Buradan, farklı çok modun hakim olduğu yapılarda, tez kapsamında geliştirilen enerji esaslı yönlü modal birleştirme YMB yönteminin, FEMA 356'da tanımlanan yöntemlere göre zaman tanım alanında dinamik analize (ZTA) daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Mod şekillerinin yönlerinin yapısal davranışa etkisinin ne şekilde olduğunun belirlenmesi için; tez kapsamında analizi yapılan 8 katlı örnek betonarme düzlem

çerçeveye ait **kat yerdeğiştirmeleri, görelı kat ötelemeleri, en büyük kiriş plastik dönmeleri ve kat kesme kuvvetleri** grafikleri incelendiğinde, tez kapsamında geliştirilen YMB yöntemi ile modal büyüklüklerin karesel birleştirilmesini esas alan MODAL-SRSS yöntemlerinin sonuçlarının birbirine yakın olduğu, bununda incelenen çerçevelerde birinci mod hakimiyetinin katkısının diğer mod katkılarından daha fazla olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Analizi yapılan 14 ve 20 katlı örnek betonarme çerçeveye ait **kat yerdeğiştirmeleri, görelı kat ötelemeleri, en büyük kiriş plastik dönmeleri ve kat kesme kuvvetleri** grafikleri incelendiğinde, tez kapsamında geliştirilen, modal büyüklüklerin birleştirilmesinde mod şekillerinin yönlerini dikkate alan YMB yönteminin, MODAL-SRSS yöntemine göre ZTA yöntemindeki sonuçlara yakın olduğu görölmüştür.

Üç boyutlu modellenen mevcut bir prefabrike binanın deprem davranışı geliştirilen YMB, FEMA 356 ve ZTA yöntemleri ile analizleri yapılmış, **kat yerdeğiştirmeleri ve görelı kat ötelemeleri** yapısal büyüklükleri hesaplanarak karşılaştırması yapılmıştır. ZTA yöntemi ile yapılan analizlerde 12 farklı deprem kaydı kullanılmış ve “Ortalama”, “Ortalama $\pm$ Standart Sapma” sınırları belirlenmiştir. YMB ve FEMA 356 yöntemlerinden bulunan sonuçlar bu sınır değerler ile karşılaştırılmıştır.

Üç boyutlu modellenen mevcut prefabrike yapının geliştirilen YMB ve FEMA 356 bağlı analizlerinden elde edilen, **kat yatay yerdeğiştirmesi ve görelı kat yerdeğiştirmeleri** değerlerinin, ZTA’daki “Ortalama $\pm$ Standart Sapma” kat yerdeğiştirme zarfının içinde kaldığı, ancak, YMB yönteminden bulunan sonuçların ZTA yönteminden bulunan **ortalama kat yatay yerdeğiştirmesi** değerlerine daha yakın olduğu görölmüştür.

Bu tez çalışmasında, yapıların deprem davranışının belirlenmesine esas olacak enerji esaslı ve yönlü modal yük birleşimini (YMB) esas alan

Tez kapsamında geliştirilen enerji esaslı ve yönlü modal yük birleştirmesini esas alan YMB yöntemindeki mod yükleme işaretini dikkate alan düzenleme, literatürdeki karelerinin toplamının karekökü (SRSS) kuralını kullanan yöntemlerdeki modal büyüklüklerin işaretin kaybolması olumsuzluğunu engellemektedir.

Tez kapsamında geliştirilen yazılım kullanılarak yapılan analizlerden, önerilen YMB yöntemin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz ZTA ile oldukça uyumlu sonuçlar verdiğini göstermiştir. Ancak, önerilen yöntemin daha farklı yapısal özellikler içeren örnek yapılar üzerinde incelenerek, farklı yapısal büyüklükler için yöntemin sınırları ve geçerliliği daha detaylı olarak araştırılması gerekmektedir. Ayrıca, yapıya ait elde edilen plastik enerji kapasite eğrisi kullanılarak, yapının deprem performansının belirlenmesi için enerji esaslı bir performans belirleme yöntemi geliştirilmesine yönelik araştırma yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Albanesi, T., Nuti, C. ve Vanzi, I. (2002a). State of the art of non-linear static methods. Paper No: 602. *Proceedings of the Twelfth European Conference on Earthquake Engineering*, London, U.K.,
- Albanesi, T., Blondi, S. ve Petrangeli, M. (2002b). Pushover analysis: An energy based approach. Paper No: 605. *Proceedings of the Twelfth European Conference on Earthquake Engineering*, London, U.K.,
- Antoniou, S. ve Pinho, R. (2004a). Advantages and limitations of adaptive and non-adaptive force-based pushover procedures. *Journal of Earthquake Engineering*, 8 (4), 497-522.
- Antoniou, S. ve Pinho, R. (2004b). Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure. *Journal of Earthquake Engineering*, 8 (5), 643-661.
- Aschheim, M., Tjhin, T., Comartin, C., Hamburger, R. ve İnel, M. (2007). The scaled nonlinear dynamic procedure. *Engineering Structures*, 29, 1422-1441.
- ATC-Applied Technology Council (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC 40)*. Redwood City, California.
- Aydinoğlu, M.N. (2003a). An incremental response spectrum analysis procedure based on inelastic spectral displacements for multi-mode seismic performance evaluation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1, 3-36
- Aydinoğlu, M.N. (2003b). Yapıların deprem performansının değerlendirmesi için artımsal spektrum analizi (ARSA) yöntemi. *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul
- Aydinoğlu, M.N. (2007). A response spectrum based nonlinear assessment tool for practice: incremental response spectrum analysis (IRSA). *ISET Journal of Earthquake Technology*, 44(1), 169-192

- BİB-Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, (2007), *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*, Ankara.
- BİB-Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, (1998), *Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik*, Ankara.
- Bracci, J.B., Kunnath, S.K. ve Reinhorn, A.M. (1997). Seismic performance and retrofit evaluation of reinforced concrete structures. *Journal of Structural Engineering*, 123(1), 3-10.
- Chopra, A. K. ve Goel, R. K., (1999), Capacity-demand-diagram methods for estimating seismic deformation of inelastic structures: SDF systems, *Report No. PEER-1999/02*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, April.
- Chopra, A.K. ve Goel, R.K. (2001). A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: theory and preliminary evaluation. *Report No. PEER 2001/03*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of Berkeley, CA
- Chopra, A.K. ve Goel, R.K. (2002). A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3), 561-582.
- Chopra, A.K. ve Goel, R.K. (2004). Evaluation of a modified MPA procedure assuming higher modes as elastic to estimate seismic demands. *Earthquake Spectra*, 20, 757-778.
- Chou, C-C. ve Uang, C-M. (2003). A procedure for evaluating seismic energy demand of framed structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32, 229-244.
- Elnashai, A.S. (2002). Do we really need inelastic dynamic analysis?. *Journal of Earthquake Engineering*, 6(1), 123-130.

- Erduran, E. (2008). Assessment of current nonlinear static procedures on the estimation of torsional effects in low-rise frame buildings. *Engineering Structures*, 30, 2548-2558.
- Eurocode 8, (1994). *Part:1 European Prestandart* ENV1998, CEN, Brussels.
- Fajfar P, Vidic T. & Fishinger M. (1989) Seismic Design in Medium and Long Period Structures. *Earthquake Eng Struc. Dyn.* 18, 1133-1144
- Fajfar, P. ve Fischinger, M. (1988). N2—a method for nonlinear seismic analysis of regular structures. *Proceeding of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, 111-116.
- Fajfar, P ve Gaspersic P. (1996). The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 31–46.
- Fajfar, P., (1999). Capacity spectrum method based inelastic demand spectra. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 979–993.
- Fajfar, P. (2000). A nonlinear analysis method for performance based seismic design. *Earthquake Spectra*, 16 (3), 573-592.
- Fajfar, P. (2002). Structural analysis in earthquake engineering-A breakthrough of simplified non-linear methods. Paper No: 843, *Preceedings of 12th European Conference on Earthquake Engineering*, London
- FEMA-Federal Emergency Management Agency (1997). “*NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 273)*”, Washington, DC.
- FEMA-Federal Emergency Management Agency (1997). *NEHRP Commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 274)*, Washington, DC.
- FEMA-Federal Emergency Management Agency (2000). *Pre-standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)*, Washington, DC.

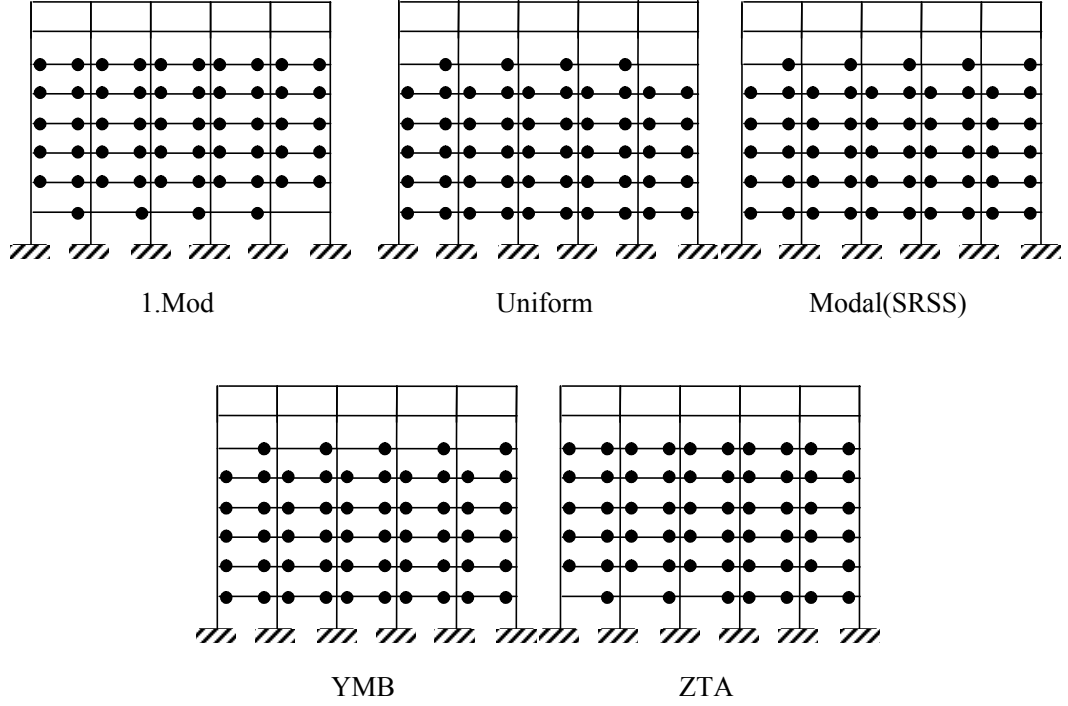
- FEMA-Federal Emergency Management Agency (2005). *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures (FEMA 440)*, Washington, DC.
- Freeman, S.A., (1978). Prediction of Response of Concrete Buildings to Severe Earthquake Motion, *Douglas McHenry International Symposium on Concrete and Concrete Structures, SP-55*, 589-605, American Concrete Institute, Detroit.
- Freeman S.A., (1998), The capacity spectrum method as a tool for seismic design, *Proc. 11th ECEE*, Paris
- Ghobarah, A. (2001). Performance-based design in earthquake engineering: state of development, *Engineering Structures*, 23(8), 878-884
- Goel, R.K. ve Chopra, A.K. (2004). Evaluation of modal and FEMA pushover analyses: SAC buildings. *Earthquake Spectra*, 20, 225-254.
- Gupta, B. ve Kunnath, S.K. (2000). Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures. *Earthquake Spectra*, 16(2), 367-391.
- Gülkan, P. ve Sözen M.A. (1974). Inelastic response of reinforced concrete structures on earthquake ground motions. *Journal of the American Concrete Institute*, 7, 601-609.
- Hernandez-Montes, E., Kwon, O.S. ve Aschheim, M.A. (2004). An energy based formulation for first and multiple-mode nonlinear static (pushover) analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, 8 (1), 69-88.
- Isaković ve Fischinger (2005). Higher modes in simplified inelastic seismic analysis of single column bent viaducts. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35, 95–114.
- İrtem, E. (1991), *Uzay Çubuk Sistemlerde İkinci Mertebe Limit Yükün Hesabı için Bir Yük Artımı Yöntemi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi

- Jan, T.S., Liu M.W. ve Kao, Y.C. (1999). An upper-bound pushover analysis procedure for estimating seismic demands of high-rise buildings. *Engineering Structures*, 26, 117–28
- Kalkan, E. ve Kunnath, S.K. (2006). Adaptive modal combination procedure for nonlinear static analysis of building structures. *Journal of Structural Engineering*, 132(11), 1721-131
- Kalkan, E., ve Kunnath, S.K. (2007). Assessment of current nonlinear static procedures for seismic evaluation of buildings. *Engineering Structures*, 29, 305-316.
- Kunnath, S.K. (2004). Identification of modal combinations for nonlinear static analysis of building structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 19, 246-259.
- Lee, D-G., Choi, W-H., Cheong, M-C. ve Kim, A-K. (2006). Evaluation of seismic performance of multistory building structures based on the equivalent responses. *Engineering Structures*, 28, 837-856.
- Lawson, R.S., Vance, V. ve Krawinkler, H. (1994). Nonlinear static push-over analysis-why, when, and how?. *Proceedings 5th US National Conference on Earthquake Engineering*, Chicago:IL.
- Matsumori, T., Otani, S., Shiohara, H. and Kabeyasawa, T., (1999), “Earthquake member deformation demands in reinforced concrete frame structures,” *Proceedings of the US-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for RC Building Structures*, PEER Center Report, UC Berkeley. pp.79-94.
- 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 İstanbul*, 40, 815

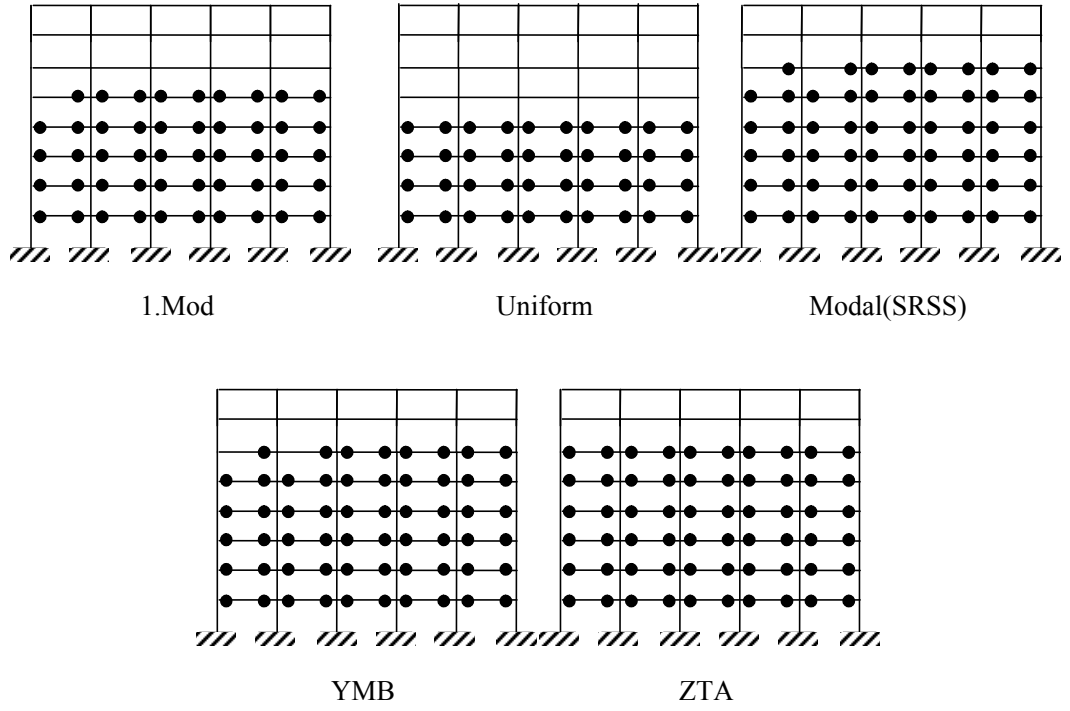
- Papanikolau, V.K. ve Elnashai, A.S. (2005). Evaluation of conventional and adaptive pushover analysis I: methodology. *Journal of Structural Engineering*, 9(6), 923-941.
- Papanikolau, V.K. ve Elnashai, A.S. (2006). Evaluation of conventional and adaptive pushover analysis II: comparative results. *Journal of Structural Engineering*, 10(1), 127-151.
- Poursha, M., Khoshnoudian, F. ve Moghadam, A.S. (2008). Assesment of modal pushover analysis and conventional nonlinear static procedure with load distributions of federal emergency management agency for high-rise buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, (Basımda), online yayın
- Poursha, M., Khoshnoudian, F. ve Moghadam, A.S. (2009). A consecutive modal pushover procedure for estimating the seismic demands of tall buildings. *Engineering Structures*, 31, 591–599
- SEAOC (1995), *Vision 2000: Performance based seismic engineering of buildings*, Structural Engineers Association of California, Sacramento
- Türker, K. (2005), *Yapıların Deprem Davranışlarının Belirlenmesi İçin Çok Modlu Uyarlamalı Yük Artımı Yöntemi*, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi
- Türk Standartları Enstitüsü, 2000, *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları-TS500*
- Uang,C-M ve Bertero, V.V. (1990); “Evaluation of Seismic Energy in Structures” ; *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 19, pp:77-90
- Ye, L. ve Otani, S. (1999). Maximum seismic displacement of inelastic systems based on energy concept. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 1483-1499.

EKLER

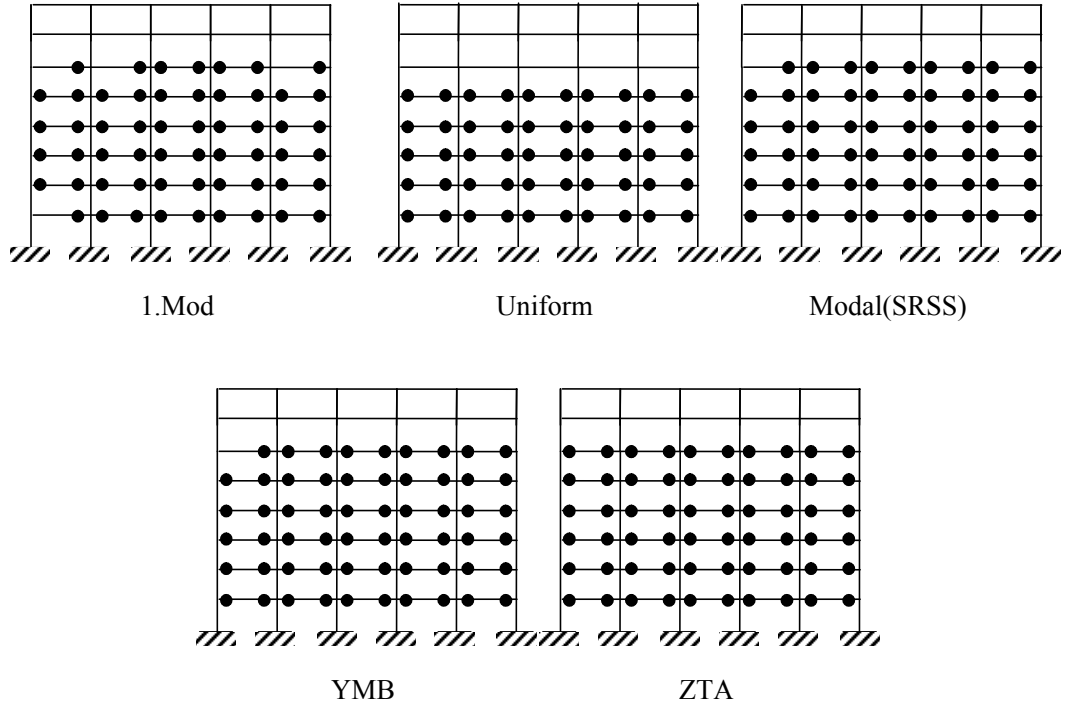
EK-1: Örnek Betonarme 8, 14 ve 20 Katlı Çerçevelerde Seçilen Deprem Kayıtları Altında Oluşan Plastik Mafsalların Dağılımı



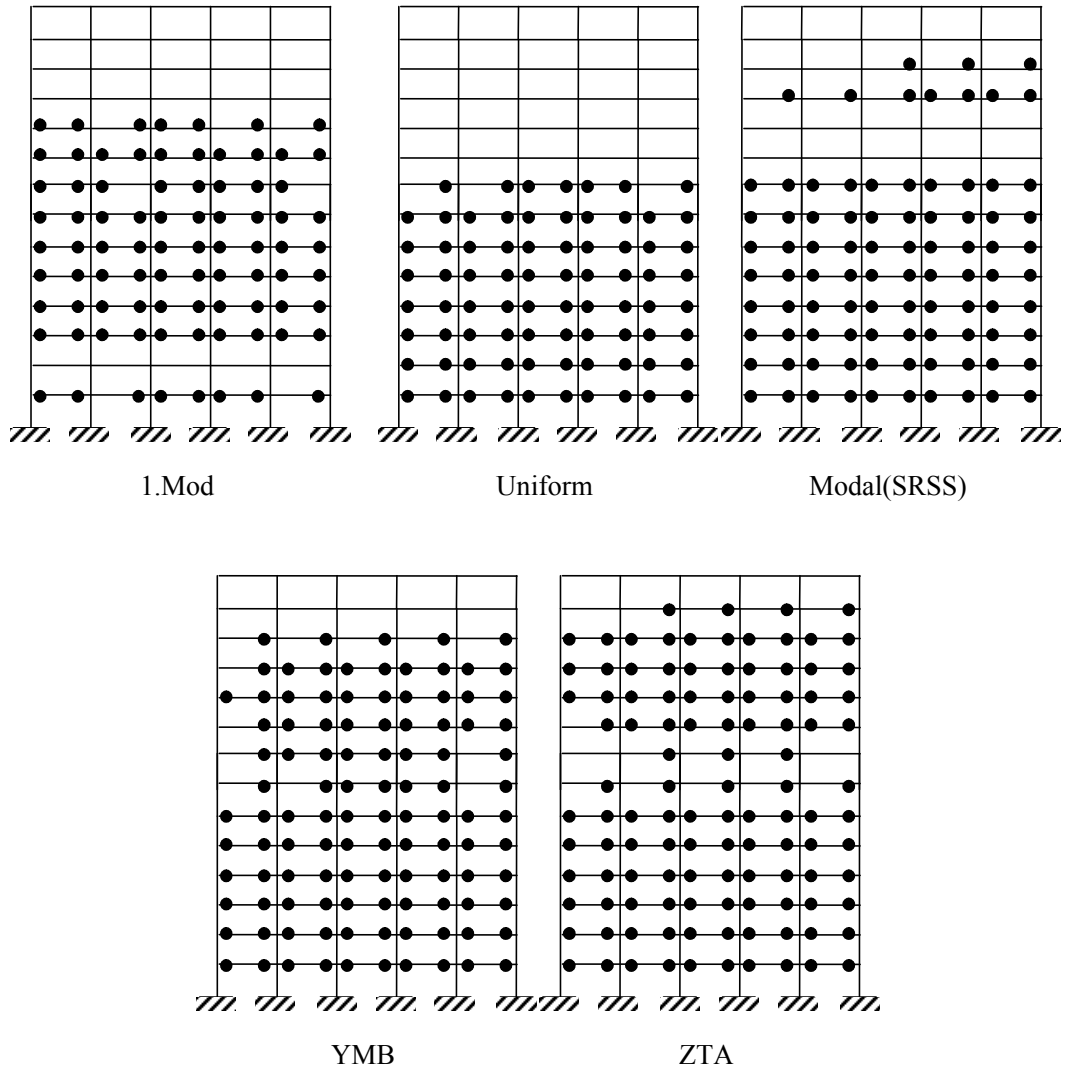
Şekil Ek1.1 1980 Victoria, Mexico depremi kaydına göre 8 katlı çerçevede oluşan plastik mafsalların dağılımı



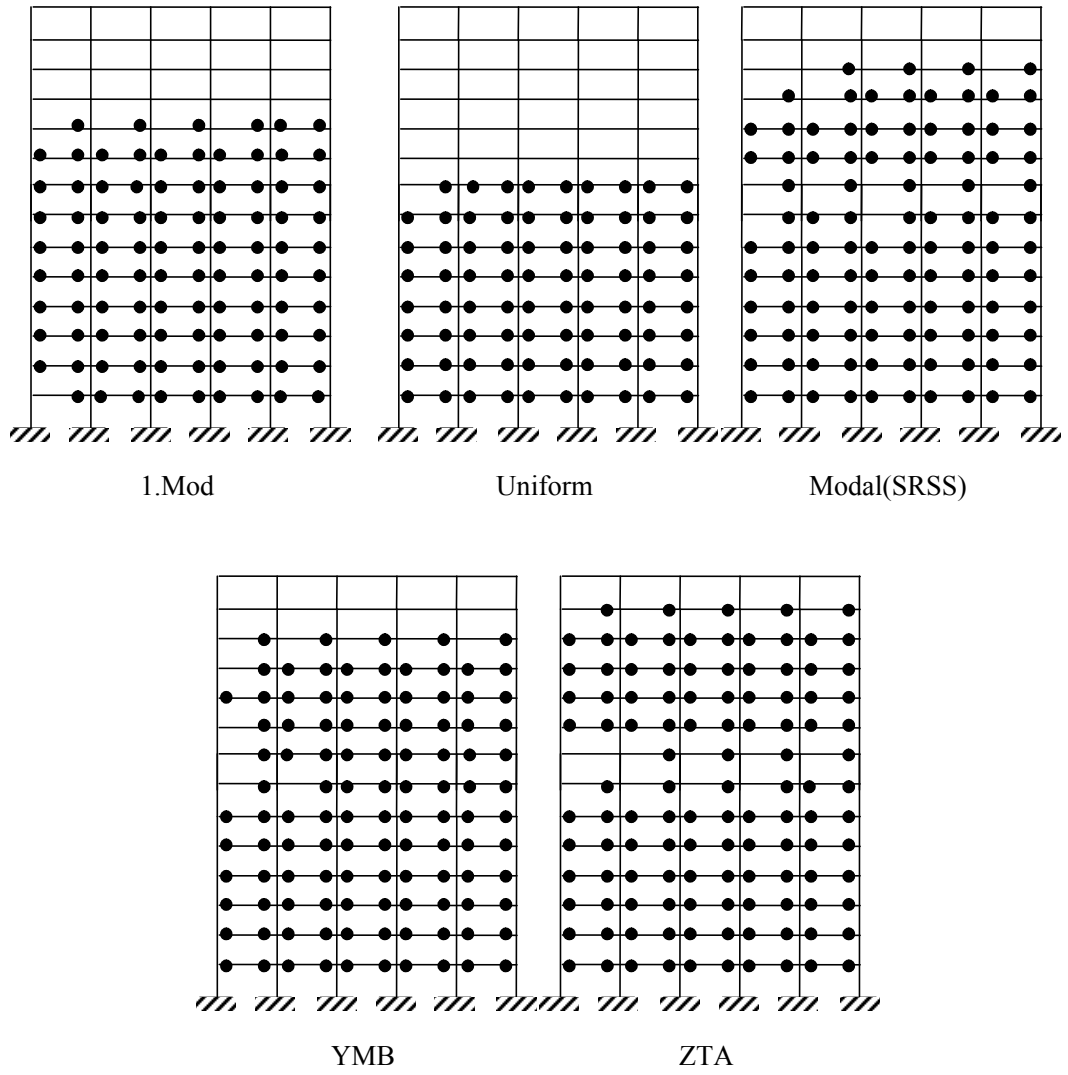
Şekil Ek1.2 1994 Northridge depremi kaydına göre 8 katlı çerçevede oluşan plastik mafsalların dağılımı



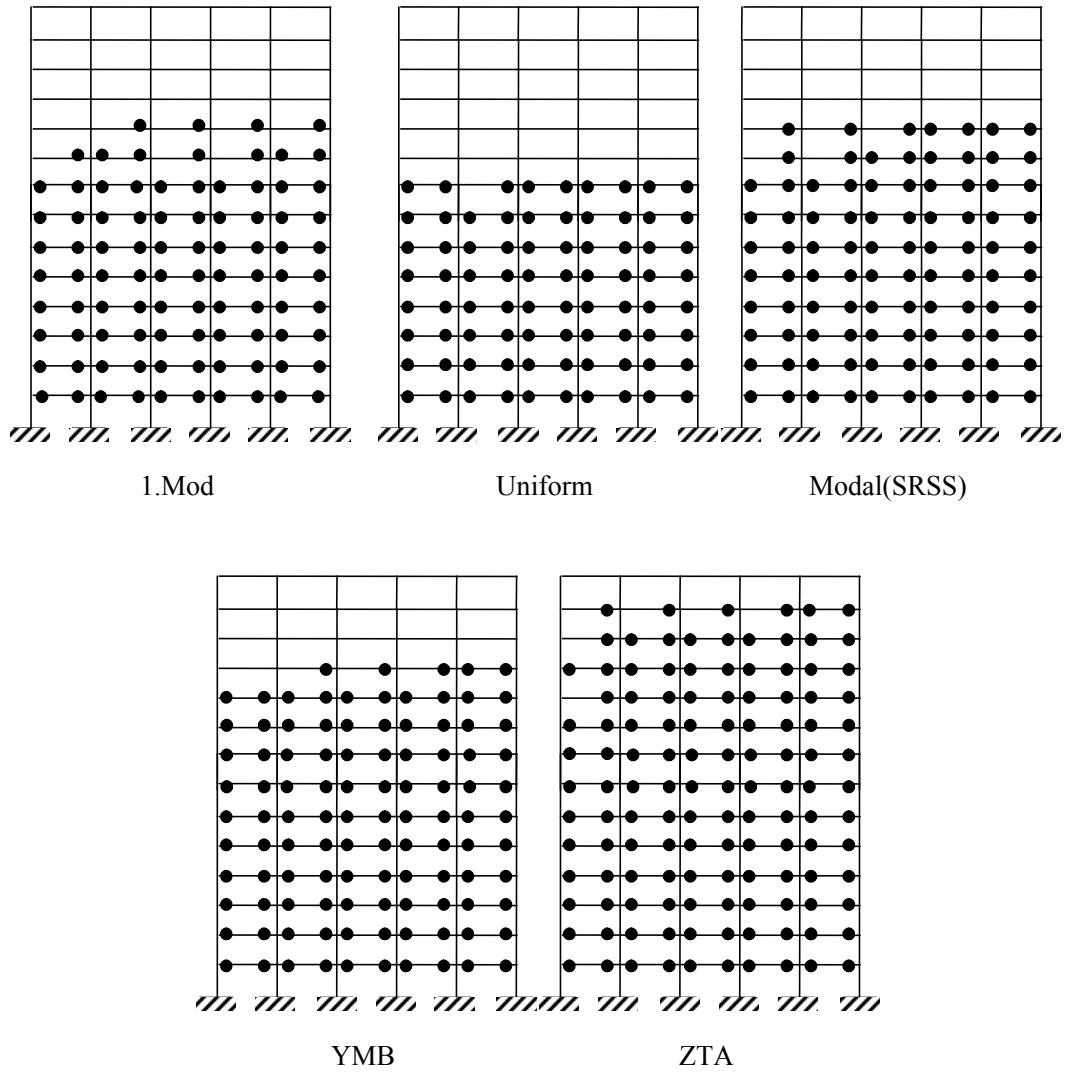
Şekil Ek1.3 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi kaydına göre 8 katlı çerçevede oluşan plastik mafsalların dağılımı



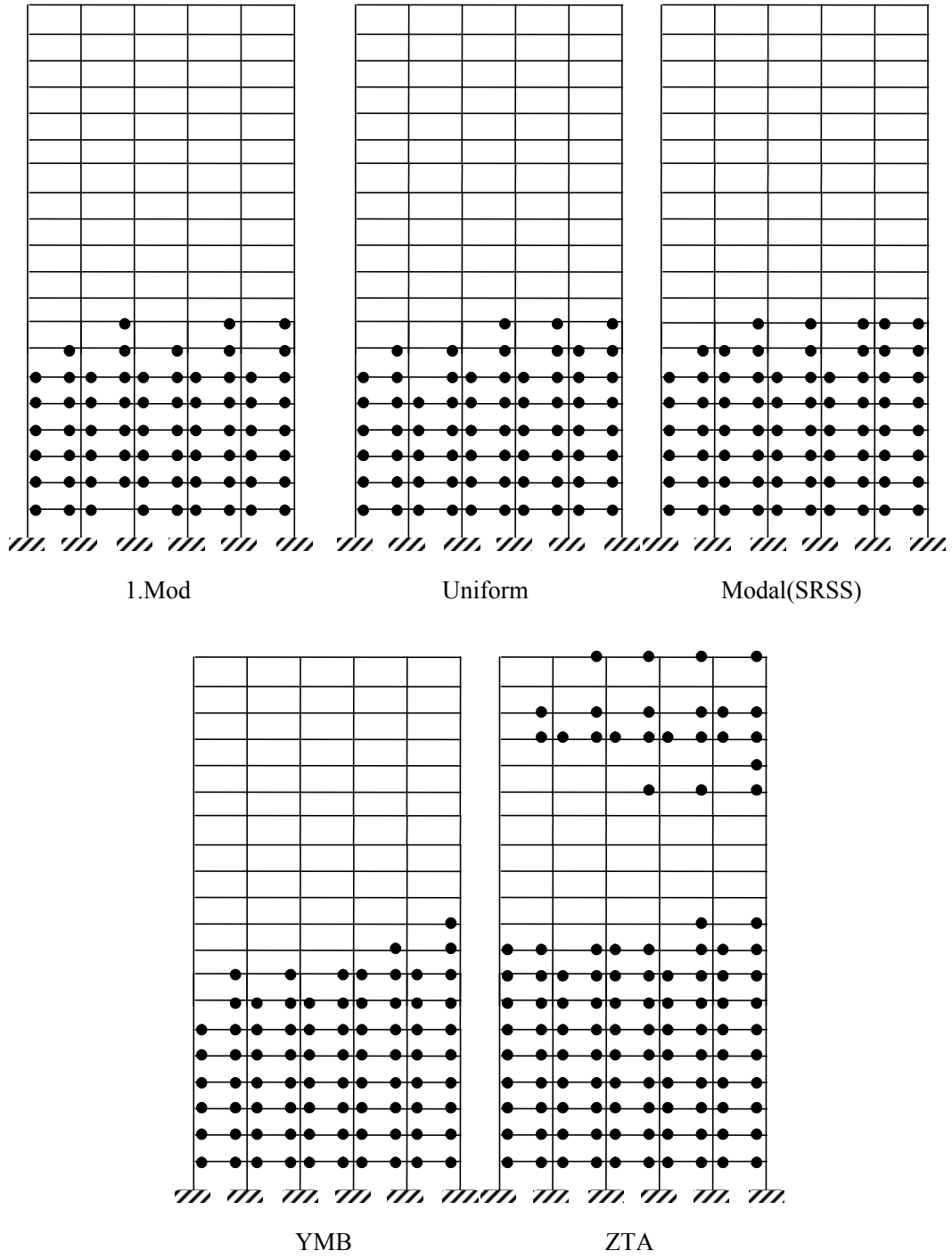
Şekil Ek1.4 1980 Victoria, Mexico depremi kaydına göre 14 katlı çerçevede oluşan plastik mafsalların dağılımı



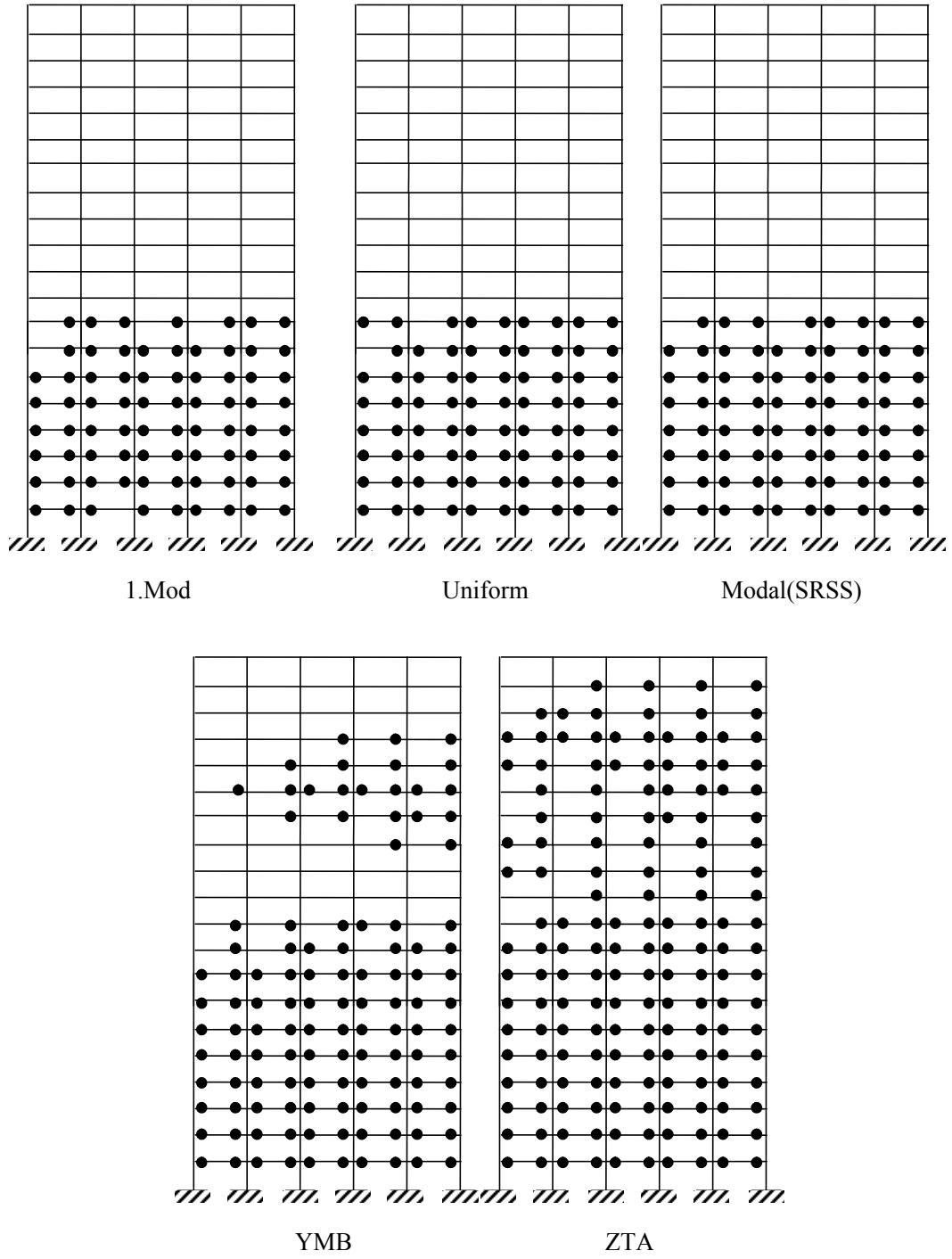
Şekil Ek1.5 1994 Northridge depremi kaydına göre 14 katlı çerçevede oluşan plastik mafsalların dağılımı



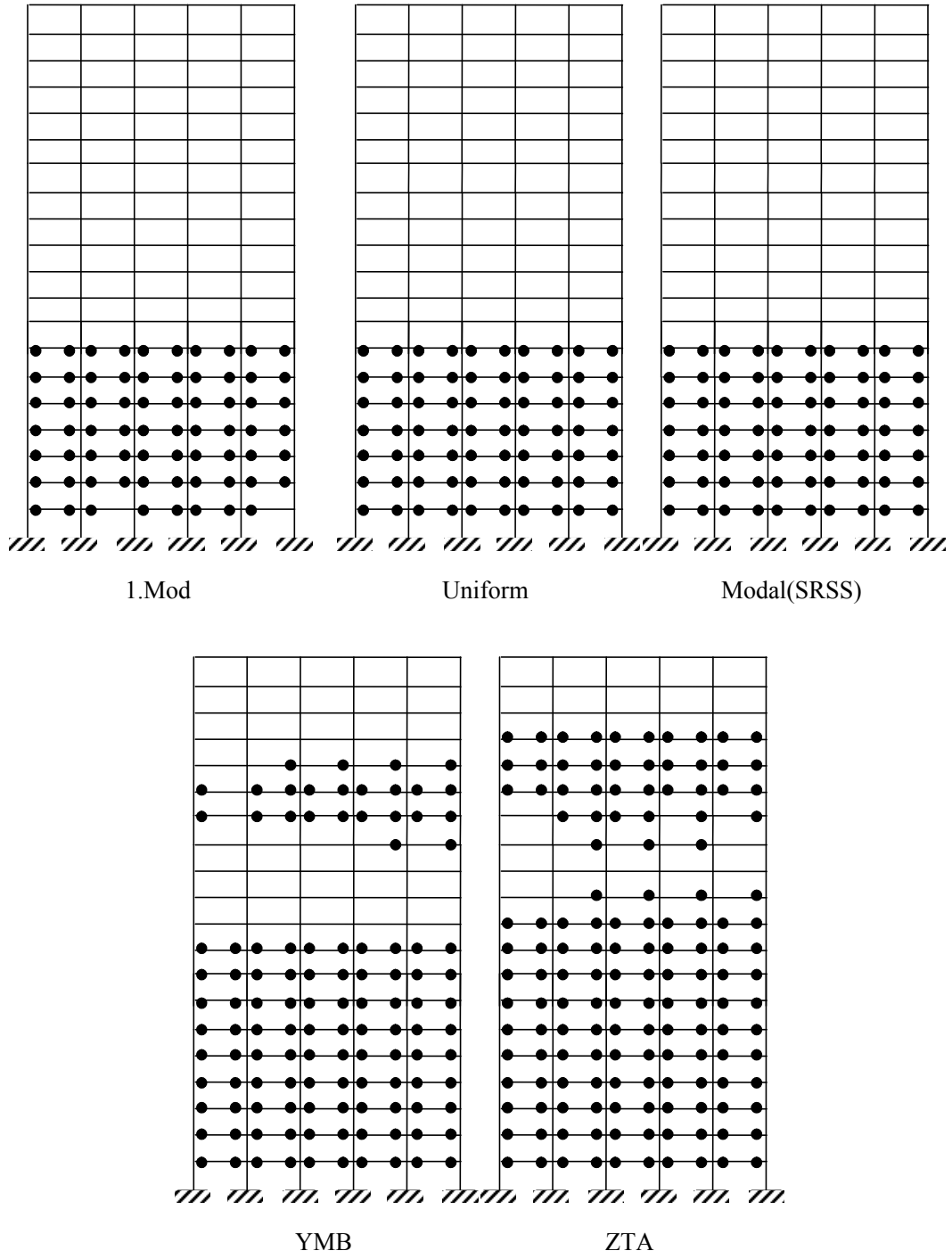
Şekil Ek1.6 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi kaydına göre 14 katlı çerçevede oluşan plastik mafsalların dağılımı



Şekil Ek1.7 1980 Victoria, Mexico depremi kaydına göre 20 katlı çerçevede oluşan plastik mafsalların dağılımı



Şekil Ek1.8 1994 Northridge depremi kaydına göre 20 katlı çerçevede oluşan plastik mafsalların dağılımı



Şekil Ek1.9 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi kaydına göre 20 katlı çerçevede oluşan plastik mafsalların dağılımı

EK-2: Örnek Betonarme 8, 14 ve 20 Katlı Çerçevelerde Karşılaştırması Yapılan Yapısal Büyüklüklerin Sayısal Değerleri

Tablo Ek2.1 1980 Victoria, Mexico depremi kaydına göre 8 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen kat yatay yerdeğiştirmesi değerleri

KAT	KAT YATAY YERDEĞİŞTİRMESİ (cm)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
8	17.97	17.97	17.97	17.40	17.97
7	17.08	17.34	17.42	17.08	16.50
6	15.38	16.25	15.69	15.38	14.50
5	11.62	13.61	11.86	11.62	11.00
4	7.12	9.72	7.27	7.30	7.00
3	4.41	6.71	4.49	4.56	4.00
2	2.35	3.84	2.40	2.40	2.10
1	0.76	1.31	0.77	0.75	0.89

Tablo Ek2.2 1980 Victoria, Mexico depremi kaydına göre 8 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî kat yatay yerdeğiştirmesi oranı değerleri

KAT	GÖRELİ KAT YERDEĞİŞTİRMESİ ORANI (%)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
8	0.30	0.21	0.18	0.11	0.49
7	0.57	0.36	0.58	0.57	0.67
6	0.94	0.66	0.96	0.94	0.88
5	1.13	0.97	1.15	1.08	1.01
4	0.91	1.00	0.92	0.91	1.00
3	0.69	0.96	0.70	0.72	0.63
2	0.53	0.84	0.54	0.55	0.40
1	0.25	0.44	0.26	0.25	0.30

Tablo Ek2.3 1980 Victoria, Mexico depremi kaydına göre 8 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî kat kesme kuvveti değerleri

KAT	KAT KESME KUVVETİ (kN)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
8	207.6	158.2	219.1	270.0	589.8
7	401.1	316.4	328.2	523.7	869.4
6	647.3	542.4	559.9	599.0	888.3
5	840.7	768.4	782.3	916.0	954.3
4	931.8	926.6	921.0	1017.2	1053.4
3	993.2	1084.8	1078.5	1076.6	1167.3
2	1044.0	1310.8	1292.3	1106.5	1312.8
1	1061.6	1536.8	1395.0	1115.3	1656.7

Tablo Ek2.4 1980 Victoria, Mexico depremi kaydına göre 8 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî en büyük kat plastik giriş dönmesi değerleri

KAT	EN BÜYÜK KAT PLASTİK KİRİŞ DÖNMESİ (rad)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0036	0.0005	0.0054	0.0052	0.0040
5	0.0075	0.0050	0.0095	0.0091	0.0085
4	0.0049	0.0047	0.0051	0.0051	0.0053
3	0.0029	0.0051	0.0032	0.0037	0.0035
2	0.0016	0.0048	0.0018	0.0019	0.0018
1	0.0003	0.0033	0.0003	0.0003	0.0010

Tablo Ek2.5 1994 Northridge depremi kaydına göre 8 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen kat yatay yerdeğiştirmesi değerleri

KAT	KAT YATAY YERDEĞİŞTİRMESİ (cm)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
8	12.03	12.03	12.03	11.43	12.03
7	11.36	11.45	11.26	10.70	11.25
6	10.19	10.54	10.23	9.72	10.07
5	7.80	8.85	8.45	8.03	7.95
4	4.94	6.55	6.10	5.80	5.28
3	3.23	4.71	4.29	4.07	3.48
2	1.86	2.83	2.52	2.39	1.98
1	0.64	1.02	0.87	0.82	0.68

Tablo Ek2.6 1994 Northridge depremi kaydına göre 8 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî kat yatay yerdeğiştirmesi oranı değerleri

KAT	GÖRELİ KAT YERDEĞİŞTİRMESİ ORANI (%)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
8	0.25	0.19	0.26	0.25	0.26
7	0.39	0.30	0.34	0.33	0.39
6	0.60	0.42	0.44	0.42	0.53
5	0.72	0.57	0.59	0.56	0.67
4	0.57	0.61	0.61	0.58	0.60
3	0.46	0.63	0.59	0.56	0.50
2	0.41	0.60	0.55	0.52	0.43
1	0.21	0.34	0.29	0.27	0.23

Tablo Ek2.7 1994 Northridge depremi kaydına göre 8 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen göreceli kat kesme kuvveti değerleri

KAT	KAT KESME KUVVETİ (kN)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
8	203.0	148.8	210.9	311.7	766.3
7	392.3	297.7	341.0	605.4	979.6
6	633.0	510.3	537.6	539.2	854.0
5	822.1	722.9	743.2	1058.8	806.9
4	911.2	871.7	885.4	1172.8	997.3
3	971.2	1020.5	1026.2	1237.4	1111.6
2	1020.9	1233.2	1196.0	1268.0	1488.9
1	1038.1	1445.8	1273.2	1276.3	1854.3

Tablo Ek2.8 1994 Northridge depremi kaydına göre 8 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen göreceli en büyük kat plastik giriş dönmesi değerleri

KAT	EN BÜYÜK KAT PLASTİK KİRİŞ DÖNMESİ (rad)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0025	0.0000	0.0031	0.0033	0.0029
5	0.0026	0.0000	0.0033	0.0034	0.0029
4	0.0026	0.0009	0.0033	0.0035	0.0029
3	0.0021	0.0021	0.0026	0.0027	0.0024
2	0.0021	0.0024	0.0025	0.0026	0.0023
1	0.0012	0.0020	0.0011	0.0014	0.0014

Tablo Ek2.9 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi kaydına göre 8 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen kat yatay yerdeğiştirmesi değerleri

KAT	KAT YATAY YERDEĞİŞTİRMESİ (cm)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
8	12.12	12.12	12.12	11.52	12.12
7	11.36	11.54	11.37	11.00	11.01
6	10.19	10.62	10.41	9.89	9.50
5	7.80	8.79	8.48	8.06	7.58
4	4.94	6.37	5.99	5.69	5.52
3	3.23	4.55	4.23	4.02	3.99
2	1.86	2.74	2.52	2.39	2.61
1	0.64	0.99	0.88	0.84	1.10

Tablo Ek2.10 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi kaydına göre 8 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî kat yatay yerdeğiştirmesi oranı değerleri

KAT	GÖRELİ KAT YERDEĞİŞTİRMESİ ORANI (%)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
8	0.25	0.19	0.25	0.17	0.33
7	0.39	0.31	0.32	0.37	0.50
6	0.60	0.46	0.48	0.46	0.48
5	0.72	0.61	0.62	0.59	0.52
4	0.57	0.61	0.59	0.56	0.51
3	0.46	0.60	0.57	0.54	0.46
2	0.41	0.58	0.55	0.52	0.50
1	0.21	0.33	0.29	0.28	0.37

Tablo Ek2.11 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi kaydına göre 8 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî kat kesme kuvveti değerleri

KAT	KAT KESME KUVVETİ (kN)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
8	192.0	146.9	207.2	227.9	501.6
7	371.1	293.8	299.1	329.1	608.3
6	598.6	503.7	524.5	577.0	712.0
5	777.5	713.6	726.7	799.4	806.9
4	861.8	860.6	851.6	936.8	997.3
3	918.5	1007.5	1003.9	1104.3	1111.6
2	965.5	1217.4	1208.8	1329.7	1488.9
1	981.8	1427.3	1305.7	1436.3	1854.3

Tablo Ek2.12 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi kaydına göre 8 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî en büyük kat plastik kiriş dönmesi değerleri

KAT	EN BÜYÜK KAT PLASTİK KİRİŞ DÖNMESİ (rad)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0038	0.0000	0.0061	0.0054	0.0022
5	0.0035	0.0019	0.0039	0.0036	0.0021
4	0.0016	0.0007	0.0019	0.0016	0.0023
3	0.0015	0.0014	0.0018	0.0015	0.0018
2	0.0008	0.0016	0.0012	0.0011	0.0017
1	0.0007	0.0014	0.0009	0.0008	0.0011

Tablo Ek2.13 1980 Victoria, Mexico depremi kaydına göre 14 katlı çerçeve de farklı yöntemlerden elde edilen kat yatay yerdeğıştirmesi değeri

KAT	KAT YATAY YERDEĞİŞTİRMESİ (cm)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
14	26.05	26.05	26.05	27.00	26.05
13	25.29	25.51	25.21	25.50	24.75
12	24.04	24.60	24.04	23.52	22.58
11	22.26	23.30	22.47	21.01	20.06
10	19.51	21.32	20.07	19.06	18.49
9	16.54	19.25	17.72	16.83	16.78
8	14.25	17.59	15.98	15.18	15.35
7	11.94	15.69	14.06	13.36	13.87
6	9.57	13.35	11.83	11.24	11.89
5	7.40	10.82	9.50	9.02	9.57
4	5.40	8.20	7.14	6.78	7.07
3	3.55	5.54	4.78	4.54	4.72
2	1.92	3.06	2.61	2.47	2.55
1	0.61	0.99	0.82	0.78	0.80

Tablo Ek2.14 1980 Victoria, Mexico depremi kaydına göre 14 katlı çerçeve de farklı yöntemlerden elde edilen göreli kat yatay yerdeğıştirmesi oranı değeri

KAT	GÖRELİ KAT YERDEĞİŞTİRMESİ ORANI (%)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
14	0.25	0.18	0.29	0.50	0.44
13	0.42	0.30	0.39	0.67	0.72
12	0.59	0.43	0.52	0.83	0.84
11	0.69	0.50	0.60	0.48	0.39
10	0.74	0.52	0.59	0.56	0.43
9	0.76	0.55	0.58	0.55	0.48
8	0.77	0.63	0.64	0.61	0.49
7	0.79	0.78	0.75	0.71	0.66
6	0.73	0.84	0.78	0.74	0.77
5	0.67	0.87	0.79	0.75	0.84
4	0.62	0.89	0.79	0.75	0.78
3	0.54	0.83	0.73	0.69	0.72
2	0.44	0.69	0.59	0.56	0.58
1	0.20	0.33	0.27	0.26	0.27

Tablo Ek2.15 1980 Victoria, Mexico depremi kaydına göre 14 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî kat kesme kuvveti değerleri

KAT	KAT KESME KUVVETİ (kN)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
14	138.9	97.3	167.4	175.7	409.8
13	304.6	217.5	281.7	295.8	856.0
12	460.8	337.7	400.1	420.1	965.5
11	603.6	457.9	576.7	605.5	1038.2
10	779.6	629.6	717.1	752.9	1081.1
9	928.4	801.3	832.0	873.6	1118.5
8	1019.3	921.5	947.5	994.8	1066.4
7	1097.7	1041.7	1053.1	1105.7	1083.7
6	1163.1	1161.8	1156.5	1214.4	1384.4
5	1215.5	1282.0	1267.7	1331.0	1556.6
4	1254.7	1402.2	1382.7	1451.8	1616.7
3	1292.0	1573.9	1528.1	1604.5	1620.1
2	1312.3	1745.6	1623.7	1704.8	1641.1
1	1318.8	1917.3	1658.1	1741.0	1748.3

Tablo Ek2.16 1980 Victoria, Mexico depremi kaydına göre 14 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî en büyük kat plastik kırış dönmesi değerleri

KAT	EN BÜYÜK KAT PLASTİK KİRİŞ DÖNMESİ (rad)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0008
12	0.0000	0.0000	0.0010	0.0040	0.0070
11	0.0000	0.0000	0.0020	0.0055	0.0080
10	0.0011	0.0000	0.0000	0.0050	0.0060
9	0.0019	0.0000	0.0001	0.0011	0.0037
8	0.0026	0.0008	0.0010	0.0011	0.0005
7	0.0029	0.0022	0.0020	0.0022	0.0011
6	0.0028	0.0035	0.0030	0.0033	0.0036
5	0.0018	0.0035	0.0027	0.0035	0.0039
4	0.0012	0.0038	0.0029	0.0032	0.0038
3	0.0004	0.0037	0.0025	0.0028	0.0029
2	0.0000	0.0028	0.0017	0.0020	0.0017
1	0.0006	0.0031	0.0022	0.0024	0.0022

Tablo Ek2.17 1994 Northridge depremi kaydına göre 14 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen kat yatay yerdeğiştirmesi değerleri

KAT	KAT YATAY YERDEĞİŞTİRMESİ (cm)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
14	26.05	26.05	26.05	27.69	26.05
13	25.29	25.51	24.20	26.62	24.75
12	24.04	24.60	22.77	25.05	22.58
11	22.26	23.30	20.84	22.93	20.06
10	19.51	21.32	18.03	19.83	18.49
9	16.54	19.25	15.34	16.88	16.78
8	14.25	17.59	13.45	14.79	15.35
7	11.94	15.69	11.52	12.67	13.87
6	9.57	13.35	9.43	10.38	11.89
5	7.40	10.82	7.42	8.16	9.57
4	5.40	8.20	5.48	6.03	7.07
3	3.55	5.54	3.63	3.99	4.72
2	1.92	3.06	1.97	2.17	2.55
1	0.61	0.99	0.62	0.68	0.80

Tablo Ek2.18 1994 Northridge depremi kaydına göre 14 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî kat yatay yerdeğiştirmesi oranı değerleri

KAT	GÖRELİ KAT YERDEĞİŞTİRMESİ ORANI (%)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
14	0.25	0.18	0.29	0.50	0.44
13	0.42	0.30	0.39	0.67	0.72
12	0.59	0.43	0.52	0.83	0.84
11	0.69	0.50	0.60	0.48	0.39
10	0.74	0.52	0.59	0.56	0.43
9	0.76	0.55	0.58	0.55	0.48
8	0.77	0.63	0.64	0.61	0.49
7	0.79	0.78	0.75	0.71	0.66
6	0.73	0.84	0.78	0.74	0.77
5	0.67	0.87	0.79	0.75	0.84
4	0.62	0.89	0.79	0.75	0.78
3	0.54	0.83	0.73	0.69	0.72
2	0.44	0.69	0.59	0.56	0.58
1	0.20	0.33	0.27	0.26	0.27

Tablo Ek2.19 1994 Northridge depremi kaydına göre 14 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî kat kesme kuvveti değerleri

KAT	KAT KESME KUVVETİ (kN)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
14	138.9	97.3	167.4	175.7	409.8
13	304.6	217.5	281.7	295.8	856.0
12	460.8	337.7	400.1	420.1	965.5
11	603.6	457.9	576.7	605.5	1038.2
10	779.6	629.6	717.1	752.9	1081.1
9	928.4	801.3	832.0	873.6	1118.5
8	1019.3	921.5	947.5	994.8	1066.4
7	1097.7	1041.7	1053.1	1105.7	1083.7
6	1163.1	1161.8	1156.5	1214.4	1384.4
5	1215.5	1282.0	1267.7	1331.0	1556.6
4	1254.7	1402.2	1382.7	1451.8	1616.7
3	1292.0	1573.9	1528.1	1604.5	1620.1
2	1312.3	1745.6	1623.7	1704.8	1641.1
1	1318.8	1917.3	1658.1	1741.0	1748.3

Tablo Ek2.20 1994 Northridge depremi kaydına göre 14 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî en büyük kat plastik kırış dönmesi değerleri

KAT	EN BÜYÜK KAT PLASTİK KIRIŞ DÖNMESİ (rad)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0008
12	0.0000	0.0000	0.0010	0.0040	0.0070
11	0.0000	0.0000	0.0020	0.0055	0.0080
10	0.0011	0.0000	0.0000	0.0050	0.0060
9	0.0019	0.0000	0.0001	0.0011	0.0037
8	0.0026	0.0008	0.0010	0.0011	0.0005
7	0.0029	0.0022	0.0020	0.0022	0.0011
6	0.0028	0.0035	0.0030	0.0033	0.0036
5	0.0018	0.0035	0.0027	0.0035	0.0039
4	0.0012	0.0038	0.0029	0.0032	0.0038
3	0.0004	0.0037	0.0025	0.0028	0.0029
2	0.0000	0.0028	0.0017	0.0020	0.0017
1	0.0006	0.0031	0.0022	0.0024	0.0022

Tablo Ek2.21 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi kaydına göre 14 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen kat yatay yerdeğiştirmesi değerleri

KAT	KAT YATAY YERDEĞİŞTİRMESİ (cm)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
14	29.09	29.09	29.09	27.36	29.09
13	28.32	28.54	28.23	26.54	27.50
12	27.03	27.61	27.17	25.54	25.02
11	25.19	26.28	25.60	24.07	23.21
10	22.16	24.25	22.95	21.57	20.32
9	18.70	22.08	20.13	18.92	18.38
8	15.98	20.22	17.90	16.82	16.93
7	13.24	17.95	15.48	14.56	15.32
6	10.49	15.18	12.85	12.08	13.44
5	8.00	12.21	10.23	9.62	11.27
4	5.75	9.16	7.65	7.19	8.83
3	3.73	6.12	5.12	4.81	6.14
2	2.00	3.34	2.78	2.61	3.46
1	0.63	1.07	0.87	0.82	1.15

Tablo Ek2.22 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi kaydına göre 14 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî kat yatay yerdeğiştirmesi oranı değerleri

KAT	GÖRELİ KAT YERDEĞİŞTİRMESİ ORANI (%)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
14	0.26	0.18	0.29	0.28	0.53
13	0.43	0.31	0.35	0.33	0.83
12	0.62	0.44	0.52	0.49	0.60
11	0.76	0.51	0.66	0.62	0.72
10	0.86	0.54	0.70	0.66	0.49
9	0.91	0.62	0.74	0.70	0.48
8	0.91	0.76	0.80	0.76	0.54
7	0.92	0.92	0.88	0.83	0.63
6	0.83	0.99	0.87	0.82	0.72
5	0.75	1.02	0.86	0.81	0.81
4	0.67	1.01	0.85	0.79	0.90
3	0.58	0.93	0.78	0.73	0.89
2	0.46	0.76	0.64	0.60	0.77
1	0.21	0.36	0.29	0.27	0.38

Tablo Ek2.23 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi kaydına göre 14 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî kat kesme kuvveti değerleri

KAT	KAT KESME KUVVETİ (kN)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
14	138.9	97.3	167.4	184.1	409.8
13	304.6	217.5	281.7	309.9	856.0
12	460.8	337.7	400.1	440.1	965.5
11	603.6	457.9	576.7	634.3	1038.2
10	779.6	629.6	717.1	788.8	1081.1
9	928.4	801.3	832.0	915.2	1118.5
8	1019.3	921.5	947.5	1042.2	1066.4
7	1097.7	1041.7	1053.1	1158.4	1083.7
6	1163.1	1161.8	1156.5	1272.2	1384.4
5	1215.5	1282.0	1267.7	1394.4	1556.6
4	1254.7	1402.2	1382.7	1521.0	1616.7
3	1292.0	1573.9	1528.1	1680.9	1620.1
2	1312.3	1745.6	1623.7	1786.0	1641.1
1	1318.8	1917.3	1658.1	1823.9	1748.3

Tablo Ek2.24 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi kaydına göre 14 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî en büyük kat plastik kırış dönmesi değerleri

KAT	EN BÜYÜK KAT PLASTİK KIRIŞ DÖNMESİ (rad)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0008
12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0048
11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0029
10	0.0021	0.0000	0.0007	0.0018	0.0023
9	0.0033	0.0000	0.0016	0.0023	0.0031
8	0.0041	0.0018	0.0027	0.0029	0.0036
7	0.0043	0.0036	0.0036	0.0039	0.0041
6	0.0040	0.0050	0.0041	0.0042	0.0044
5	0.0027	0.0050	0.0035	0.0036	0.0039
4	0.0020	0.0051	0.0035	0.0037	0.0041
3	0.0011	0.0048	0.0031	0.0035	0.0043
2	0.0010	0.0036	0.0022	0.0030	0.0037
1	0.0020	0.0036	0.0025	0.0025	0.0039

Tablo Ek2.25 1980 Victoria, Mexico depremi kaydına göre 20 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen kat yatay yerdeğiştirmesi değerleri

KAT	KAT YATAY YERDEĞİŞTİRMESİ (cm)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
20	24.72	24.72	24.72	25.96	24.72
19	24.32	24.44	24.30	25.51	24.49
18	23.68	23.99	23.72	24.91	23.51
17	22.99	23.50	23.11	24.27	22.52
16	21.82	22.67	22.08	23.18	21.50
15	20.44	21.65	20.89	21.93	20.48
14	19.39	20.86	20.01	21.01	19.54
13	18.33	20.02	19.12	20.07	18.81
12	17.20	19.11	18.16	19.07	18.22
11	15.98	18.09	17.11	17.97	17.47
10	14.69	16.95	15.96	16.76	16.46
9	13.36	15.73	14.74	15.48	15.22
8	11.98	14.38	13.43	14.10	13.95
7	10.45	12.78	11.90	12.49	12.37
6	8.63	10.75	9.97	10.47	10.54
5	6.62	8.40	7.76	8.15	8.27
4	4.62	6.00	5.51	5.79	6.09
3	2.83	3.76	3.42	3.59	4.01
2	1.38	1.88	1.69	1.77	2.18
1	0.39	0.54	0.47	0.50	0.81

Tablo Ek2.26 1980 Victoria, Mexico depremi kaydına göre 20 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî kat yatay yerdeğiştirmesi oranı değerleri

KAT	GÖRELİ KAT YERDEĞİŞTİRMESİ ORANI (%)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
20	0.12	0.09	0.14	0.15	0.07
19	0.21	0.15	0.19	0.20	0.33
18	0.23	0.16	0.20	0.21	0.33
17	0.29	0.21	0.26	0.27	0.25
16	0.35	0.25	0.30	0.31	0.25
15	0.35	0.26	0.29	0.31	0.33
14	0.35	0.28	0.30	0.31	0.23
13	0.38	0.31	0.32	0.34	0.20
12	0.40	0.34	0.35	0.37	0.24
11	0.43	0.38	0.38	0.40	0.34
10	0.44	0.41	0.41	0.43	0.42
9	0.46	0.45	0.44	0.46	0.42
8	0.51	0.53	0.51	0.54	0.53
7	0.61	0.68	0.64	0.67	0.61
6	0.67	0.78	0.74	0.77	0.76
5	0.66	0.80	0.75	0.79	0.73
4	0.60	0.75	0.70	0.73	0.70
3	0.48	0.63	0.58	0.61	0.61
2	0.33	0.45	0.41	0.43	0.46
1	0.13	0.18	0.16	0.17	0.27

Tablo Ek2.27 1980 Victoria, Mexico depremi kaydına göre 20 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî kat kesme kuvveti değerleri

KAT	KAT KESME KUVVETİ (kN)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
20	83.0	55.5	98.8	108.6	460.5
19	183.2	124.0	168.0	184.8	767.4
18	280.0	192.5	233.1	256.4	867.0
17	372.8	261.1	338.8	372.7	885.6
16	496.2	359.0	431.4	474.6	1101.6
15	608.5	456.9	496.3	546.0	1206.7
14	681.3	525.4	561.6	617.8	1154.5
13	748.2	594.0	622.8	685.0	1040.7
12	808.9	662.5	683.5	751.8	1126.2
11	862.9	731.0	748.5	823.3	1161.1
10	910.1	799.6	814.5	895.9	1192.8
9	950.9	868.1	876.4	964.0	1361.2
8	985.5	936.6	935.1	1028.6	1396.7
7	1014.6	1005.2	995.0	1094.5	1367.1
6	1038.4	1073.7	1059.4	1165.4	1367.4
5	1056.9	1142.2	1126.2	1238.8	1386.9
4	1070.5	1210.8	1189.3	1308.2	1422.4
3	1083.1	1308.7	1240.4	1364.4	1686.4
2	1089.7	1406.6	1285.0	1413.5	2256.7
1	1091.7	1504.5	1300.1	1430.1	3004.2

Tablo Ek2.28 1980 Victoria, Mexico depremi kaydına göre 20 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî en büyük kat plastik kırış dönmesi değerleri

KAT	EN BÜYÜK KAT PLASTİK KIRIŞ DÖNMESİ (rad)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0042
19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
18	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0009
17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0042
16	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001
15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004
14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0002
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0012
8	0.0017	0.0017	0.0015	0.0036	0.0040
7	0.0025	0.0029	0.0026	0.0043	0.0048
6	0.0055	0.0064	0.0061	0.0068	0.0076
5	0.0057	0.0069	0.0065	0.0068	0.0076
4	0.0053	0.0068	0.0063	0.0064	0.0071
3	0.0044	0.0059	0.0054	0.0054	0.0060
2	0.0031	0.0044	0.0039	0.0043	0.0047
1	0.0012	0.0022	0.0019	0.0024	0.0027

Tablo Ek2.29 1994 Northridge depremi kaydına göre 20 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen kat yatay yerdeğiştirmesi değerleri

KAT	KAT YATAY YERDEĞİŞTİRMESİ (cm)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
20	24.81	24.81	24.81	25.70	24.81
19	24.43	24.55	24.41	25.50	24.30
18	23.79	24.10	23.82	25.00	23.60
17	23.09	23.61	23.21	23.91	22.50
16	21.93	22.77	22.21	22.88	21.50
15	20.54	21.75	21.04	21.67	21.00
14	19.49	20.96	20.17	20.78	20.30
13	18.43	20.12	19.28	19.86	19.65
12	17.29	19.20	18.33	18.88	19.00
11	16.08	18.19	17.28	17.80	18.20
10	14.77	17.04	16.14	16.62	17.38
9	13.45	15.82	14.92	15.37	16.17
8	12.05	14.46	13.60	14.01	14.91
7	10.52	12.85	12.06	12.42	13.86
6	8.68	10.81	10.12	10.42	11.97
5	6.65	8.44	7.87	8.11	9.81
4	4.65	6.03	5.59	5.75	7.59
3	2.85	3.78	3.47	3.57	5.04
2	1.39	1.89	1.71	1.76	2.59
1	0.39	0.54	0.48	0.49	0.80

Tablo Ek2.30 1994 Northridge depremi kaydına göre 20 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî kat yatay yerdeğiştirmesi oranı değerleri

KAT	GÖRELİ KAT YERDEĞİŞTİRMESİ ORANI (%)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
20	0.12	0.09	0.14	0.07	0.17
19	0.21	0.15	0.19	0.17	0.23
18	0.23	0.16	0.20	0.36	0.37
17	0.29	0.21	0.25	0.26	0.25
16	0.35	0.26	0.29	0.30	0.13
15	0.35	0.27	0.29	0.30	0.23
14	0.35	0.28	0.30	0.30	0.22
13	0.38	0.31	0.32	0.33	0.22
12	0.41	0.34	0.35	0.36	0.27
11	0.43	0.38	0.38	0.39	0.27
10	0.44	0.41	0.40	0.42	0.40
9	0.46	0.45	0.44	0.45	0.42
8	0.51	0.54	0.51	0.53	0.35
7	0.61	0.68	0.65	0.67	0.63
6	0.68	0.79	0.75	0.77	0.72
5	0.67	0.80	0.76	0.79	0.74
4	0.60	0.75	0.71	0.73	0.85
3	0.49	0.63	0.59	0.60	0.82
2	0.33	0.45	0.41	0.42	0.60
1	0.13	0.18	0.16	0.16	0.27

Tablo Ek2.31 1994 Northridge depremi kaydına göre 20 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen göreceli kat kesme kuvveti değerleri

KAT	KAT KESME KUVVETİ (kN)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
20	83.1	55.6	99.2	109.1	547.6
19	183.6	124.3	174.6	192.0	918.0
18	280.6	192.9	232.2	255.4	1058.6
17	373.6	261.6	325.4	357.9	1066.0
16	497.2	359.7	422.8	465.1	1272.9
15	609.7	457.8	491.8	541.0	1182.0
14	682.7	526.5	559.0	614.9	1296.3
13	749.7	595.2	621.8	683.9	1442.5
12	810.5	663.8	682.6	750.8	1375.9
11	864.7	732.5	744.2	818.6	1308.1
10	912.0	801.2	805.9	886.5	1366.9
9	952.8	869.9	867.3	954.0	1420.0
8	987.5	938.5	931.0	1024.1	1299.9
7	1016.7	1007.2	998.6	1098.5	1436.7
6	1040.5	1075.9	1069.0	1175.9	1414.0
5	1059.1	1144.5	1138.2	1252.0	1488.2
4	1072.7	1213.2	1200.2	1320.2	1726.8
3	1085.3	1311.3	1248.5	1373.3	2149.0
2	1091.9	1409.4	1289.7	1418.7	2627.5
1	1093.9	1507.5	1303.5	1433.9	3065.1

Tablo Ek2.32 1994 Northridge depremi kaydına göre 20 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen göreceli en büyük kat plastik giriş dönmesi değerleri

KAT	EN BÜYÜK KAT PLASTİK KİRİŞ DÖNMESİ (rad)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0012
18	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0030
17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0018	0.0040
16	0.0000	0.0000	0.0000	0.0015	0.0024
15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0013	0.0017
14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0007	0.0012
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0017
12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0016
11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0009
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0020
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0026
8	0.0017	0.0018	0.0016	0.0025	0.0046
7	0.0025	0.0029	0.0027	0.0035	0.0050
6	0.0055	0.0065	0.0061	0.0073	0.0077
5	0.0057	0.0070	0.0066	0.0079	0.0081
4	0.0054	0.0068	0.0064	0.0077	0.0081
3	0.0044	0.0059	0.0054	0.0065	0.0075
2	0.0031	0.0045	0.0040	0.0048	0.0064
1	0.0012	0.0022	0.0019	0.0023	0.0037

Tablo Ek2.33 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi kaydına göre 20 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen kat yatay yerdeğiştirmesi değerleri

KAT	KAT YATAY YERDEĞİŞTİRMESİ (cm)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
20	27.05	27.05	27.05	28.70	27.05
19	26.66	26.78	26.63	28.23	26.55
18	25.99	26.31	26.08	27.64	26.08
17	25.26	25.80	25.45	26.70	25.88
16	24.05	24.93	24.35	25.81	25.53
15	22.60	23.87	23.07	24.48	24.98
14	21.51	23.04	22.13	23.90	24.38
13	20.40	22.17	21.17	23.11	23.58
12	19.22	21.21	20.13	22.13	22.58
11	17.94	20.14	19.01	21.00	21.43
10	16.56	18.92	17.76	19.68	20.09
9	15.12	17.59	16.41	18.17	18.54
8	13.56	16.07	14.91	16.38	16.71
7	11.80	14.24	13.15	14.24	14.53
6	9.71	11.93	10.98	11.74	11.98
5	7.42	9.30	8.53	9.02	9.20
4	5.17	6.62	6.04	6.36	6.49
3	3.16	4.14	3.75	3.92	4.00
2	1.53	2.06	1.85	1.95	1.99
1	0.43	0.59	0.52	0.55	0.56

Tablo Ek2.34 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi kaydına göre 20 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî kat yatay yerdeğiştirmesi oranı değerleri

KAT	GÖRELİ KAT YERDEĞİŞTİRMESİ ORANI (%)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
20	0.13	0.09	0.15	0.15	0.17
19	0.22	0.16	0.19	0.20	0.16
18	0.24	0.17	0.21	0.31	0.07
17	0.30	0.22	0.28	0.22	0.09
16	0.36	0.27	0.32	0.33	0.14
15	0.36	0.28	0.31	0.19	0.20
14	0.37	0.29	0.32	0.26	0.27
13	0.40	0.32	0.34	0.33	0.33
12	0.43	0.36	0.38	0.38	0.38
11	0.46	0.41	0.42	0.44	0.45
10	0.48	0.44	0.45	0.51	0.52
9	0.52	0.51	0.50	0.60	0.61
8	0.59	0.61	0.59	0.71	0.73
7	0.70	0.77	0.72	0.84	0.85
6	0.76	0.88	0.82	0.91	0.92
5	0.75	0.89	0.83	0.89	0.91
4	0.67	0.83	0.76	0.81	0.83
3	0.54	0.69	0.63	0.66	0.67
2	0.37	0.49	0.44	0.46	0.47
1	0.14	0.20	0.17	0.18	0.19

Tablo Ek2.35 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi kaydına göre 20 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî kat kesme kuvveti değerleri

KAT	KAT KESME KUVVETİ (kN)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
20	86.5	57.8	105.3	126.4	488.0
19	191.2	129.3	153.6	184.4	733.2
18	292.1	200.7	230.6	276.7	908.4
17	388.9	272.2	366.7	440.0	934.3
16	517.6	374.2	467.0	560.4	1075.5
15	634.8	476.3	534.5	641.4	1204.4
14	710.7	547.7	604.5	725.3	1153.6
13	780.5	619.2	666.7	800.0	1107.8
12	843.8	690.6	728.5	874.2	1059.1
11	900.2	762.1	799.9	959.9	1192.7
10	949.4	833.5	873.2	1047.8	1298.0
9	991.9	905.0	934.8	1121.8	1345.7
8	1028.1	976.4	981.3	1177.6	1469.8
7	1058.4	1047.9	1025.8	1230.9	1618.8
6	1083.2	1119.3	1084.0	1300.8	1609.6
5	1102.6	1190.7	1154.9	1385.9	1592.8
4	1116.7	1262.2	1228.5	1474.2	1727.7
3	1129.8	1364.3	1291.5	1549.8	2034.6
2	1136.7	1466.3	1348.2	1617.9	2383.0
1	1138.8	1568.4	1367.8	1641.4	2924.1

Tablo Ek2.36 1999 Chi-Chi, Taiwan depremi kaydına göre 20 katlı çerçevede farklı yöntemlerden elde edilen görelî en büyük kat plastik kırış dönmesi değerleri

KAT	EN BÜYÜK KAT PLASTİK KIRIŞ DÖNMESİ (rad)				
	1.MOD	UNİFORM	MODAL(SRSS)	YMB	ZTA
20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
18	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0053
16	0.0000	0.0000	0.0000	0.0018	0.0037
15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0015	0.0030
14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0009	0.0018
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0005
12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0014
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0029
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0019	0.0037
8	0.0024	0.0024	0.0023	0.0033	0.0066
7	0.0033	0.0037	0.0034	0.0055	0.0078
6	0.0064	0.0074	0.0069	0.0083	0.0094
5	0.0066	0.0079	0.0073	0.0087	0.0099
4	0.0061	0.0077	0.0070	0.0084	0.0092
3	0.0050	0.0066	0.0060	0.0072	0.0076
2	0.0036	0.0050	0.0044	0.0053	0.0054
1	0.0016	0.0025	0.0021	0.0026	0.0022