

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YAPILARIN DEPREM DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ İÇİN  
ÇOK MODLU UYARLAMALI YÜK ARTIMI YÖNTEMİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Yük. Müh. Kaan TÜRKER**

**Balıkesir, Haziran – 2005**

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YAPILARIN DEPREM DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ İÇİN  
ÇOK MODLU UYARLAMALI YÜK ARTIMI YÖNTEMİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Yük. Müh. Kaan TÜRKER**

**Balıkesir, Haziran – 2005**

**Bu çalışma Balıkesir Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri  
Birimi tarafından BAP 2003/34 nolu proje ile desteklenmiştir.**

T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAPILARIN DEPREM DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ İÇİN  
ÇOK MODLU UYARLAMALI YÜK ARTIMI YÖNTEMİ

DOKTORA TEZİ

İnş.Yük.Müh. Kaan TÜRKER

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Erdal İRTEM

Sınav Tarihi : 16.06.2005

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Erkan ÖZER

Prof. Dr. Gülay ALTAY

Prof. Dr. Şerif SAYLAN

Doç. Dr. Erdal İRTEM

Yrd. Doç. Dr. Konuralp GİRGİN

(İTÜ)

(BÜ)

(BAÜ)

(Danışman- BAÜ)

(İTÜ)

Balıkesir, Haziran - 2005

## ÖZET

### YAPILARIN DEPREM DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ İÇİN ÇOK MODLU UYARLAMALI YÜK ARTIMI YÖNTEMİ

**Kaan TÜRKER**

**Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**(Doktora Tezi / Tez Danışmanı : Doç. Dr. Erdal İRTEM)**

**Balıkesir, 2005**

Çalışmada, yüksek modların etkili olduğu binaların deprem etkileri altındaki lineer olmayan davranışının belirlenebilmesi amacıyla, etkin bir Çok Modlu Uyarlamalı Yük Artımı Yöntemi (ÇMUYAY) geliştirilmiştir. Yöntemde geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi ve malzemenin *elasto-plastik* davranışı gözönüne alınmaktadır. Plastik şekildeğişirmelerin plastik kesit adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde davranışın *lineer-elastik* olduğu varsayılmaktadır. ÇMUYAY’inde sistemin belirli sabit düşey yükler ve artan modal yatay yükler için hesabı yapılmaktadır. Yöntemde, sabit düşey yükler için hesap yapıldığından *ikinci mertebe* etkileri lineerleştirilebilmektedir. Ayrıca, akma koşulları da doğru parçalarından oluşacak şekilde lineerleştirilerek idealleştirilmektedir. Yöntemin bu özellikleri nedeniyle, plastik kesitlerin oluşumu arasındaki lineer davranış bölgelerinde yük artımı uygulanmasına gerek kalmadan, her plastik kesitin oluşumuna karşı gelen yatay yük artımı ve davranış büyüklükleri (kesit tesirleri, yerdeğişirmeler, plastik dönmeler vb.) doğrudan doğruya belirlenebilmektedir. Böylece bütün plastik kesitlerin oluşumu ve yapı davranışı ayrıntılı olarak izlenebilmektedir. Yöntemde yüksek mod etkilerini gözönüne almak amacıyla ardışık iki plastikleşen kesit arasındaki lineer davranış bölgesinde, *davranış spektrumu analizi* esaslarından yararlanılmaktadır. Buna göre, her plastik kesit oluşumundan sonra sistemin değişen modal özellikleri gözönüne alınarak belirlenen modal yatay yük dağılımları için analiz yapılmaktadır. Yöntemin betonarme binalar üzerindeki sayısal uygulamalarına olanak sağlamak üzere MEPARCS adı verilen bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem, Lineer Olmayan Dinamik Analiz (LODA), 1.mod esaslı Geleneksel Lineer Olmayan Statik Analiz (G-LOSA) ve FEMA 356’da önerilen üniform ve modal dağılımları için LOSA ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla, farklı deprem yer hareketi kayıtları için, çeşitli periyotlara sahip betonarme çerçeveler üzerinde sayısal uygulamalar yapılmıştır. Değerlendirmeler, kat yatay yerdeğişirmeleri, görelî kat ötelemeleri, maksimum giriş plastik dönme değerleri, kat kesme kuvvetleri, kapasite eğrileri ve sistemdeki plastikleşen kesit dağılımları incelenerek yapılmıştır. Buna göre, geliştirilen ÇMUYAY’nin diğer üç dağılımdan (G-LOSA, LOSA-üniform ve modal) elde edilen sonuçlara göre LODA’e daha yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Ayrıca, ÇMUYAY’nde spektral ölçeklemenin, mod sayısının ve *ikinci mertebe* etkilerinin analiz sonuçları üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER:** Çok modlu uyarlamalı yük artımı yöntemi / çok modlu uyarlamalı lineer olmayan statik analiz / malzemenin lineer olmayan davranışı / ikinci mertebe etkiler / deprem performansı değerlendirmesi / betonarme bina

## ABSTRACT

### MULTI MODAL ADAPTIVE LOAD INCREMENTS METHOD FOR DETERMINATION OF EARTHQUAKE RESPONSE OF STRUCTURES

Kaan TÜRKER

University of Balikesir, Institute of Science,  
Department of Civil Engineering

( Ph.D. Thesis / Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Erdal İRTEM )

Balikesir -Turkey, 2005

In this study, an effective Multi Modal Adaptive Load Increments Method (MMALIM) is developed for the determination of nonlinear behaviour of buildings affected by higher modes under earthquake loads. *Elastic-plastic* behaviour of material and *second-order* effects are considered in the method. It is assumed that plastic deformations are accumulated at certain sections defined as plastic sections and the other portions of the system remain *linear-elastic*. The system is analysed under factored constant gravity loads and increasing modal lateral loads in the method. The *second-order* effects can be linearized due to the fact that the structure is analyzed under factored constant gravity loads. In addition, yield conditions are idealized as compose of linear segments. By these properties of the developed method, load increment for the formation of each plastic section and response quantities (internal forces, displacements, plastic rotations etc.) are determined directly without additional load increments in the linear regions between plastic sections. Formation of all plastic sections and behaviour of the system are tracked in detail. In the method, higher mode effects are considered by using *response spectrum analysis* approach at linear region between the two successive plastic sections. Therefore, modal lateral loads obtained by using the modal properties of the system with plastic sections are used in the analysis. A computer program called MEPARCS is developed for analysis of reinforced concrete buildings by using MMALIM. The developed method is evaluated by comparing with Nonlinear Dynamic Analysis (NDA), Traditional Nonlinear Static Analysis (T-NSA) based on first mode and Nonlinear Static Analysis (NSA) proposed for uniform and modal distribution on FEMA 356. For this reason, reinforced concrete frames with different natural periods are analysed for different earthquake records. Floor lateral displacements, interstory drifts, maximum beam plastic rotations, story shears, capacity curves and distribution of plastic sections on the system are investigated in the evaluations. The results of the developed MMALIM are more closer to the results of NDA when compared with the results of other distributions (T-NSA, NSA-uniform and modal). Furthermore, effects of spectral scaling, number of modes and geometrical changes (second-order effects) on results of analysis are investigated in the developed MMALIM.

**KEY WORDS:** Multi modal adaptive load increments method / multi modal adaptive nonlinear static (pushover) analysis / nonlinear behavior of material / second order effects / seismic performance evaluation / reinforced concrete building

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET, ANAHTAR SÖZCÜKLER</b>	ii
<b>ABSTRACT, KEY WORDS</b>	iii
<b>İÇİNDEKİLER</b>	iv
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	vi
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	ix
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b>	xi
<b>ÖNSÖZ</b>	xiii
<b>1. GİRİŞ</b>	1
1.1 Konu	1
1.2 Konu ile İlgili Literatürün İncelenmesi	4
1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	16
<b>2. BİNALARIN DEPREM DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ İÇİN ETKİN BİR ÇOK MODLU UYARLAMALI YÜK ARTIMI YÖNTEMİ (ÇMUYAY)</b>	18
2.1 Varsayımlar	18
2.2 Yöntemin Esasları	20
2.3 Akma Koşulları ve Akma Vektörü	22
2.4 Yöntemin Matematik Formülasyonu	25
2.4.1 Sistemin Birim Yük Artımı için Lineer Olmayan Hesabı	26
2.4.1.1 Denge Denklemleri	27
2.4.1.2 Plastikleşen Kesitlerdeki Akma Koşulları	32
2.4.1.3 Denklem Takımının Genişletilmesi ve Çözümü	35
2.4.1.4 Çubuk Uç Kuvvetlerinin ve Diğer Kritik Kesit Tesirlerinin Hesabı	35
2.4.1.5 Plastikleşen Kesitin ve Yük Artımının Belirlenmesi	36
2.4.1.6 Yük Artımının Sonlandırılması	38
2.4.2 Serbest Titreşim Analizi	38
2.4.3 Modal Yatay Yük Dağılımlarının Hesabı	39
2.4.4 Birim Modal Davranış Büyüklüklerinin Birleştirilmesi	40
2.5 Çok Modlu Uyarlamalı Yük Artımı Yönteminin Hesap Adımları	41
<b>3. ÇMUYAY'NİN SAYISAL UYGULAMALARI İÇİN GELİŞTİRİLEN MEPARCS BİLGİSAYAR PROGRAMI</b>	43
3.1 Programın Amacı, Kapsamı ve Çalışma Düzeni	43
3.2 Programın Giriş Bilgileri	47
3.3 Programın Çıkış Bilgileri	49

<b>4. BETONARME ÇERÇEVELERDEN OLUŞAN BİNALAR ÜZERİNDE SAYISAL İNCELEMELER VE ÇMUYAY'NİN DEĞERLENDİRİLMESİ</b>	50
4.1 Sayısal İncelemelerde Yapılan Varsayımlar ve Betonarme Kesitlerin Davranışının İdealleştirilmesi	50
4.1.1 Basit ve Bileşik Eğilme Etkisindeki Betonarme Kesitlerde İç Kuvvet-Şekildeğiştirme Bağıntılarının İdealleştirilmesi	52
4.1.2 Bileşik Eğilme Etkisindeki Betonarme Kesitlerde Akma Koşullarının İdealleştirilmesi	53
4.2 Ayrıntılı Açıklama Örneği (Dört katlı Tek Açıklıklı Betonarme Çerçeve)	54
4.3 Analiz Sonuçlarına göre ÇMUYAY'nin Değerlendirilmesi	79
4.3.1 Örnek Betonarme Çerçeve Binaların ve Kullanılan Deprem Yeri Hareketi Kayıtlarının Özellikleri	80
4.3.2 Çerçevelerin Geliştirilen ÇMUYAY ile Analizi	86
4.3.3 Çerçevelerin Lineer Olmayan Dinamik Analizi (LODA)	86
4.3.4 Çerçevelerin Monoton Artan Farklı Yatay Yük Dağılımları için Lineer Olmayan Statik Analizi (LOSA)	87
4.3.5 Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi	90
4.4 ÇMUYAY'nde Spektral Ölçeklemenin Etkisinin İncelenmesi	117
4.5 ÇMUYAY'nde Mod Sayısının Etkisinin İncelenmesi	121
4.6 ÇMUYAY'nde <i>İkinci Mertebe</i> Etkilerinin Değerlendirilmesi	124
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b>	129
<b>KAYNAKLAR</b>	134

## SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Adı	Birimi
$a_1, a_2, b$	Akma vektörü şiddetinin birim olması durumunda lineerleştirilmiş akma koşulu katsayıları	
$A_1, A_2, B$	Lineerleştirilmiş akma koşulu katsayıları	
$A_0$	Etkin yer ivmesi katsayısı	
$[d]$	Düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri matrisi	
$\bar{d}(\theta, \Delta)$	Tek eksenli bileşik eğilme durumuna ait plastik şekildeğiştirme vektörü	
$D_i$	Çubuk uç yerdeğiştirmeleri	
$E_c$	Beton elastisite modülü	N/mm <sup>2</sup>
$E_s$	Beton çeliği elastisite modülü	N/mm <sup>2</sup>
$EF$	Uzama rijitliği	kN
$EI$	Eğilme rijitliği	kNm <sup>2</sup>
$f_{ck}$	Betonun karakteristik basınç dayanımı	N/mm <sup>2</sup>
$f_{yk}$	Beton çeliğinin karakteristik akma dayanımı	N/mm <sup>2</sup>
$F_{ij}$	Modal kat kuvveti	kN
$g$	Yerçekimi ivmesi	m/s <sup>2</sup>
$I$	Bina önem katsayısı	
$[k]_{ixix}, [k]_{ixjx}$	Sistem eksen takımında i ucuna ait çubuk rijitlik matrisleri	
$[k]_{jxix}, [k]_{jxjx}$	Sistem eksen takımında j ucuna ait çubuk rijitlik matrisleri	
$K(M,N) = 0$	Tek eksenli bileşik eğilme durumuna ait akma koşulu	
$L$	Çubuk uzunluğu	m
$m$	Kat kütlesi	kNs <sup>2</sup> /m
$\bar{m}$	Plastikleşen kesit sayısı	
$M$	Eğilme momenti	kNm
$M_d$	Betonarme kesitte dengeli kırılmaya karşılık gelen eğilme momenti	kNm
$M_0$	Kesitin basit eğilme etkisindeki taşıma gücü	kNm
$M_p$	Sabit normal kuvvet etkisindeki kesitin eğilme momenti taşıma gücü	kNm
$\bar{M}$	Gözönüne alınan mod sayısı	
$[m]$	Kütle matrisi	
$n$	Düğüm noktası sayısı	
$\bar{n}$	Kat adedi	
$N$	Normal kuvvet	kN
$N_d$	Betonarme kesitte dengeli kırılmaya karşılık gelen eksenel kuvvet	kN
$N_{ob}$	Simetrik donatılı kesitlerin taşıyabileceği en büyük eksenel basınç kuvveti	kN
$N_{oç}$	Simetrik donatılı kesitlerin taşıyabileceği en büyük eksenel çekme kuvveti	kN



<b>Sembol</b>	<b>Adı</b>	<b>Birimi</b>
$N_p$	Sabit eğilme momenti altındaki kesitin normal kuvvet taşıma gücü	kN
$P_i$	Çubuk uç kuvvetleri	
$P^k$	k nolu adıma ait yatay yük parametresi	
$[P]_i, [P]_j$	Çubuk eksen takımındaki uç kuvvetleri matrisleri	
$[P]_{ix}, [P]_{jx}$	Sistem eksen takımındaki uç kuvvetleri matrisleri	
$[P_o]_i, [P_o]_j$	Çubuk eksen takımındaki yükleme matrisleri	
$[P_o]_{ix}, [P_o]_{jx}$	Sistem eksen takımındaki yükleme matrisleri	
$[P_{\phi k}]_i, [P_{\phi k}]_j$	Plastikleşen kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametrelerinin birim değerinden oluşan çubuk eksen takımındaki uç kuvvetleri matrisleri	
$[P_{\phi k}]_{ix}, [P_{\phi k}]_{jx}$	Plastikleşen kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametrelerinin birim değerinden oluşan sistem eksen takımındaki uç kuvvetleri matrisleri	
$[q]$	Düğüm noktalarına etkiyen yük matrisi	
$R$	Davranış büyüklüğü genel adı	
$S_a$	Elastik spektral ivme	$m/s^2$
$[S]_D$	Dinamik rijitlik matrisi	
$[S]_G$	Plastikleşen kesitler nedeniyle genişletilmiş sistem rijitlik matrisi	
$[S_{dd}]$	Elastik sistem rijitlik matrisi	
$[S_{d\phi}]$	Plastik şekildeğiştirme parametrelerinin birim değerlerinden oluşan uç kuvvetlerinin denge denklemlerine katkısını ifade eden matris	
$[S_{\phi d}]$	Birim plastik şekildeğiştirmelerden oluşan iç kuvvet değişim matrisi	
$[S_{\phi\phi}]$	Plastikleşen kesitteki plastik şekildeğiştirme parametresinin birim değeri için tüm plastikleşen kesitlerdeki iç kuvvet değişimini ifade eden matris	
$T$	Kesme kuvveti	kN
$T_j$	Periyot	s
$T_A, T_B$	Spektrum karakteristik periyotları	s
$w_i$	Kat ağırlığı	kN
$\chi_y$	Betonarme kesitte akma noktasına karşılık gelen eğrilik	rad/m
$\chi_{max}$	Betonarme kesitte izin verilen maksimum eğrilik	rad/m
$\delta$	Kat yatay yerdeğiştirmesi	m
$\Delta$	Uzama şekildeğiştirmesini ifade eden plastik şekildeğiştirme bileşeni	m
$\Delta M$	Eğilme momenti değişimi	kNm
$\Delta M_C$	Modal birleştirme kuralı ile birleştirilmiş eğilme momenti değişimi	kNm
$\Delta N$	Normal kuvvet değişimi	kN
$\Delta N_C$	Modal birleştirme kuralı ile birleştirilmiş normal kuvvet değişimi	kN
$[\Delta d]$	Düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri değişimi matrisi	

<b>Sembol</b>	<b>Adı</b>	<b>Birimi</b>
$\Delta P^k$	k nolu adıma ait yatay yük artımı parametresi	
$\Delta R$	Davranış büyüklüğü artımının genel adı	
$\Delta R_C$	Modal birleştirme kuralı ile birleştirilmiş davranış büyüklüğü artımının genel adı	
$\epsilon_{cu}$	Betonda izin verilen en büyük birim kısalma	
$\epsilon_{co}$	Betonda plastik şekildeğiştirmelerin başlamasına karşı gelen birim kısalma	
$\epsilon_{su}$	Beton çeliğinde izin verilen en büyük birim uzama	
$\epsilon_{sy}$	Beton çeliğinde akmaya karşılık gelen birim uzama	
$\phi$	Plastik şekildeğiştirme parametresi	
$[\phi]$	Plastik şekildeğiştirme parametrelerinden oluşan kolon matris	
$\Phi_{ij}$	Özvektör bileşeni	
$\Gamma_j$	Modal katılım çarpanı	
$\theta$	Eğilme şekildeğiştirmesini ifade eden plastik şekildeğiştirme bileşeni	rad
$\rho_{ij}$	Çapraz korelasyon katsayısı	
$\omega$	Açısal frekans	rad/s
$\omega^2$	Özdeğer	rad <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
$\xi$	Sönüm oranı	
$\Psi$	Görelî kat ötelemesi	

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No	Adı	Sayfa
Şekil 1.1	Lineer olmayan statik analiz ile belirlenen kapasite eğrisi	2
Şekil 2.1	İdealleştirilmiş iç kuvvet-şekildeğiştirme bağıntısı	18
Şekil 2.2	Akma eğrisi ve plastik şekildeğiştirme vektörü	22
Şekil 2.3	Lineerleştirilmiş akma koşulu ve birim akma vektörü	25
Şekil 2.4	$[S_{dd}]$ sistem rijitlik matrisinin elde edilmesi	27
Şekil 2.5	$[S_{d\phi}]$ matrisinin elde edilmesi	29
Şekil 2.6	Plastik şekildeğiştirme parametresinin birim değerinden oluşan uç kuvvetleri	30
Şekil 2.7	Üzerinde plastikleşen kesit bulunan çubuk	33
Şekil 3.1	MEPARCS programının genel akış diyagramı	44
Şekil 4.1	Beton ve beton çeliğine ait gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları	51
Şekil 4.2	Betonarme çubuklarda iç kuvvet-şekildeğiştirme bağıntılarının idealleştirilmesi	52
Şekil 4.3	Akma koşullarının doğru parçaları ile idealleştirilmesi	53
Şekil 4.4	Dört katlı binanın geometrik özellikleri ve düşey yükleri	55
Şekil 4.5	Dört katlı çerçevedeki kolonların lineerleştirilmiş akma koşulları	56
Şekil 4.6	Dört katlı çerçevenin analizinde kullanılan % 5 sönümlü elastik ivme spektrumu	57
Şekil 4.7	Dört katlı çerçevenin hesap modelindeki çubuk ve düğüm noktası numaraları ile çubuk uç kuvvetlerinin ve uç yerdeğiştirmelerinin pozitif yönleri	57
Şekil 4.8	Dört katlı çerçevenin hesap modeline ait serbestlikler	58
Şekil 4.9	Dört katlı çerçevede ilk yük artımı adımına (elastik) ait birim modal yatay yük dağılımları	62
Şekil 4.10	Dört katlı çerçevenin kapasite eğrisi ve plastikleşen kesitlerin dağılımı	76
Şekil 4.11	Dört katlı çerçevede yük artımlarına ait kat yatay yerdeğiştirmeleri	78
Şekil 4.12	Dört katlı çerçevede yük artımlarına ait görelî kat ötelemeleri	78
Şekil 4.13	Dört katlı çerçevede yük artımlarına ait maksimum giriş plastik dönmeleri	79
Şekil 4.14	Binaların tipik kat planı ve çerçeve düşey enkesitleri	81
Şekil 4.15	Analizlerde kullanılan deprem yer hareketlerine ait ivme kayıtları	84
Şekil 4.16	Analizlerde kullanılan deprem yer hareketlerine ait elastik ivme spektrumları	85
Şekil 4.17	Analizlerde kullanılan <i>Moment-Plastik Dönme</i> ( $M-\theta_p$ ) bağıntılarına ait matematik modeller	87
Şekil 4.18	Yatay yük dağılımlarının şematik gösterimi	90
Şekil 4.19	5-katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ELC-180)	92
Şekil 4.20	5-katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ERZ-DB)	93

<b>Sekil No</b>	<b>Adı</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.21	5-katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması (SKR-090)	94
Şekil 4.22	5-katlı çerçevede kapasite eğrilerinin karşılaştırılması	95
Şekil 4.23	5-katlı çerçevede plastikleşen kesit dağılımlarının karşılaştırılması	96
Şekil 4.24	10-katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ELC-180)	98
Şekil 4.25	10-katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ERZ-DB)	99
Şekil 4.26	10-katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması (SKR-090)	100
Şekil 4.27	10-katlı çerçevede kapasite eğrilerinin karşılaştırılması	101
Şekil 4.28	10-katlı çerçevede plastikleşen kesit dağılımlarının karşılaştırılması	102
Şekil 4.29	15-katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ELC-180)	104
Şekil 4.30	15-katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ERZ-DB)	105
Şekil 4.31	15-katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması (SKR-090)	106
Şekil 4.32	15-katlı çerçevede kapasite eğrilerinin karşılaştırılması	107
Şekil 4.33	15-katlı çerçevede plastikleşen kesit dağılımlarının karşılaştırılması	108
Şekil 4.34	20-katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ELC-180)	111
Şekil 4.35	20-katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ERZ-DB)	112
Şekil 4.36	20-katlı çerçevede analiz sonuçlarının karşılaştırılması (SKR-090)	113
Şekil 4.37	20-katlı çerçevede kapasite eğrilerinin karşılaştırılması	114
Şekil 4.38	20-katlı çerçevede plastikleşen kesit dağılımlarının karşılaştırılması	115
Şekil 4.39	15-katlı çerçevede ilk dört mod için periyot ve spektral ivmenin plastikleşme ile değişimleri (ERZ-DB)	119
Şekil 4.40	15-katlı çerçevede ilk dört mod için modal yatay yük dağılımlarının plastikleşme ile değişimleri (ERZ-DB)	120
Şekil 4.41	20-katlı çerçevede gözönüne alınan mod sayısının analiz sonuçları üzerindeki etkileri (ERZ-DB)	122
Şekil 4.42	20-katlı çerçevede gözönüne alınan mod sayısının kapasite eğrisi üzerindeki etkisi (ERZ-DB)	123
Şekil 4.43	20-katlı çerçevede gözönüne alınan mod sayısının plastikleşen kesit dağılımları üzerindeki etkisi (ERZ-DB)	123
Şekil 4.44	10-katlı çerçevede <i>birinci</i> ve <i>ikinci mertebe elasto-plastik</i> analiz sonuçlarının karşılaştırılması	125
Şekil 4.45	20-katlı çerçevede <i>birinci</i> ve <i>ikinci mertebe elasto-plastik</i> analiz sonuçlarının karşılaştırılması	126
Şekil 4.46	10 ve 20-katlı çerçevelerde, <i>birinci</i> ve <i>ikinci mertebe elasto-plastik</i> analizlerden elde edilen kapasite eğrilerinin karşılaştırılması	127
Şekil 4.47	20-katlı çerçevenin <i>birinci</i> ve <i>ikinci mertebe elasto-plastik</i> analizlerinde periyodun plastikleşme ile değişimlerinin karşılaştırılması	128

## ÇİZELGE LİSTESİ

<b>Çizelge No</b>	<b>Adı</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.1	Dört katlı binanın malzeme özellikleri ve deprem hesabına ait parametreler	55
Çizelge 4.2	Dört katlı çerçevedeki kirişlerin donatıları, eğilme momenti taşıma kapasiteleri ve eğilme rijitlikleri	55
Çizelge 4.3	Dört katlı çerçevedeki kolonların donatıları, eğilme ve uzama rijitlikleri	56
Çizelge 4.4	Dört katlı çerçevenin sistem rijitlik matrisi (elastik)	59
Çizelge 4.5	Dört katlı çerçevede düşey hesap yüklerine ait uç kuvvetleri	60
Çizelge 4.6	Dört katlı çerçevede ilk yük artımı adımına (elastik) ait modal büyüklükler ve spektral ivmeler	61
Çizelge 4.7	Dört katlı çerçevede ilk yük artımı adımına (elastik) ait özvektörler ( $\Phi_{ij}$ )	62
Çizelge 4.8	Dört katlı çerçevede ilk yük artımı adımına (elastik) ait birim modal uç kuvvetleri	64
Çizelge 4.9	Dört katlı çerçevede ilk yük artımı adımına (elastik) ait birim modal kat yatay yerdeğiştirmeleri	64
Çizelge 4.10	Dört katlı çerçevede ilk yük artımı adımına (elastik) ait birim modal görel kat ötelemeleri	65
Çizelge 4.11	Dört katlı çerçevede $\Delta P^1=1$ yüklemesine ait uç kuvvetleri	65
Çizelge 4.12	Dört katlı çerçevede $\Delta P^1=1$ için kat yatay yerdeğiştirmeleri ve görel kat ötelemeleri	66
Çizelge 4.13	Dört katlı çerçevede ilk yük artımı sonundaki toplam uç kuvvetleri	68
Çizelge 4.14	Dört katlı çerçevede ilk yük artımı sonundaki kat yatay yerdeğiştirmeleri ve görel kat ötelemeleri	68
Çizelge 4.15	Dört katlı çerçevede ilk plastik kesit oluşumundan sonra genişletilmiş sistem rijitlik matrisi	72
Çizelge 4.16	Dört katlı çerçevede ikinci yük artımı adımına ait modal büyüklükler ve spektral ivmeler	73
Çizelge 4.17	Dört katlı çerçevede ikinci yük artımı adımına ait modal yatay yük dağılımları	73
Çizelge 4.18	Dört katlı çerçevede ilk plastik kesitteki plastik şekildeğiştirme parametresi ve plastik dönme değeri	74
Çizelge 4.19	Dört katlı çerçevede ikinci yük artımına ait kat yatay yerdeğiştirmeleri	75
Çizelge 4.20	Dört katlı çerçevede ikinci yük artımına ait görel kat ötelemeleri	75
Çizelge 4.21	Dört katlı çerçevede ikinci yük artımı sonundaki toplam uç kuvvetleri	75
Çizelge 4.22	Dört katlı çerçevede son yük artımına ait genişletilmiş sistem rijitlik matrisi	77

<b>Çizelge No</b>	<b>Adı</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.23	Binaların genel özellikleri ve deprem hesabında kullanılan parametreler	80
Çizelge 4.24	Örnek betonarme çerçevelerin kat kütleleri ve periyotları	81
Çizelge 4.25	Çerçevelerdeki kiriş enkesit boyutları ve donatıları	82
Çizelge 4.26	Çerçevelerdeki kolon enkesit boyutları ve donatıları	83
Çizelge 4.27	Analizlerde kullanılan depremlerin özellikleri	83

## ÖNSÖZ

Doktora tezi olarak sunulan bu çalışmada, yüksek modların etkili olduğu binaların deprem etkileri altındaki lineer olmayan davranışının etkin olarak belirlenebilmesi amacıyla, çok modlu uyarlamalı bir yük artımı yöntemi geliştirilmiştir.

Çalışmalarım sırasında çok değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan tez danışmanım Sayın Doç.Dr. Erdal İrtem'e, çok değerli bilgi ve yorumlarından faydalandığım Sayın Prof.Dr. Erkan Özer'e ve tezime katkılarından dolayı Sayın Y.Doç.Dr. Konuralp Girgin'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, tez çalışmalarım sırasında verdiği büyük destekten dolayı, çalışma arkadaşım Araş.Gör.Yük.Müh. Umut Hasgül başta olmak üzere, değerli arkadaşlarım Araş.Gör.Dr. Nuray Gedik'e, Araş.Gör.Dr. Altuğ Yavaş'a ve diğer araştırma görevlisi arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Her dönemde olduğu gibi bu tez çalışmam sırasında da bana çok büyük destek veren sevgili anneme babama ve ablama şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmalarım nedeniyle çok yoğun çalışma temposu ile geçen evliliğimin bu ilk yıllarında, büyük fedakarlık gösteren ve bana her yönden destek olan sevgili eşim Burcu Türker'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

**Balıkesir, 2005**

**Kaan TÜRKER**

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Konu

Son on yıl içinde performansa dayalı tasarım ve değerlendirme yaklaşımının ortaya konması ve yaygınlaşması ile, yapıların deprem etkileri altındaki lineer olmayan davranışını gözönüne alan ileri hesap yöntemleri üzerindeki çalışmalar hız ve önem kazanmıştır.

Performansa dayalı tasarım ve değerlendirme yaklaşımında, esas alınan bir deprem için yapının plastik şekildeğiştirme talebinin (isteminin) belirlenmesi ve bu talep gözönünde tutularak, hasar düzeyinin kontrol edilmesi öngörülmektedir. Böylece, farklı deprem tehlike (risk) seviyeleri için hedeflenen performans düzeyine sahip olan yapı tasarımı yapılabilen veya mevcut bir yapının performans düzeyi değerlendirilebilmektedir.

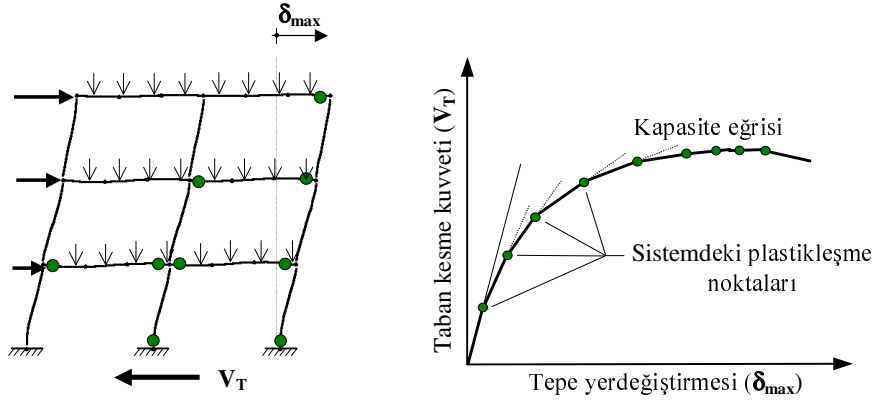
Yapıların deprem etkileri altındaki plastik şekildeğiştirmelerinin belirlenebilmesi için malzeme ve geometri değişimi bakımından lineer olmayan davranışın gözönüne alındığı dinamik veya statik analiz yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir.

Lineer olmayan dinamik analiz yöntemleri, yapıların deprem etkileri altındaki davranışının gerçeğe en yakın olarak belirlenebildiği yöntemlerdir. Bu yöntemler genel olarak, gözönüne alınan deprem yer hareketine ait ivme kaydı için atalet kuvvetleri değişimini ve sönümü de içererek yapının zaman tanım alanında hesabını esas almaktadır. Ancak bu yöntemler çok karmaşık, zaman alıcı, çok fazla yerel deprem yer hareketi kaydı ve deneyim gerektirdiğinden, günümüzde bilimsel araştırmalar dışında sadece çok özel yapılar için kullanılabilir.



Lineer olmayan dinamik analiz yöntemlerinin sınırlı kullanım alanı olması nedeniyle, bunlara göre daha basitleştirilmiş olan lineer olmayan statik analiz (pushover analiz) yöntemleri geniş kullanım alanı bulmaktadır. Lineer olmayan statik analiz, 1994 yılından itibaren bazı standartlarda (Japanese PRESSS [1], Eurocode 8 [2]) yer almaya başlamış, hatta Japonya’da belirli özellikteki betonarme yapıların tasarımı için ana yöntem olarak kabul edilmiştir. Ayrıca ABD’de, binaların performansa dayalı tasarımı ve değerlendirilmesi amacıyla hazırlanan çeşitli rapor ve ön standartlarda (VISION 2000 [3], ATC 40 [4,5], FEMA 273[6], FEMA 356 [7]) lineer olmayan statik analizi esas alan değerlendirme yöntemlerine önemli yer verilmiştir.

Lineer olmayan statik analiz yöntemleri genel olarak, belirli sabit düşey yükler ve deprem etkisini temsil eden artan yatay yükler altında malzeme ve geometri değişimi bakımından lineer olmayan teoriye göre yapının *yatay kuvvet-tepe yerdeğiştirmesi* bağıntısının belirlenmesini esas almaktadır (Şekil 1.1). Yapının yatay deprem yükü taşıma kapasitesini ifade eden bu bağıntı kapasite eğrisi (pushover eğrisi) olarak adlandırılmaktadır [8].



Şekil 1.1 Lineer olmayan statik analiz ile belirlenen kapasite eğrisi

Kapasite eğrisinin elde edilmesi ile her yük artımı için, yapıdaki elemanların dayanım ve şekildeğiştirme talepleri, yapının zayıf elemanları ve yerleri, olabilecek kısmi veya toptan göçme mekanizması durumları direkt olarak belirlenebilmektedir [8]. Ayrıca, kapasite eğrisi ile *davranış spektrum analizinin* birleştirilmesine dayanan

çeşitli yöntemler (Kapasite Spektrumu Yöntemi [4], Yerdeğiştirme Katsayıları Yöntemi [7], N2 Yöntemi [9], Akma Noktası Spektrumu Yöntemi [10] vb.) kullanılarak, gözönüne alınan deprem için yapının genel dayanım ve yerdeğiştirme talepleri belirlenebilmekte, böylece istenilen deprem seviyeleri için yapıların performans düzeyleri değerlendirilebilmektedir.

Lineer olmayan statik analiz yöntemlerinde (LOSA), deprem etkilerini temsil etmek üzere genel olarak, yapının birinci (temel) titreşim moduna karşılık gelen atalet kuvvetleri dağılımı veya yönetmeliklerde öngörülen eşdeğer deprem yükü dağılımı kullanılmaktadır. Bu dağılımdaki yükler, aralarındaki oran sabit kalacak şekilde (monoton olarak) arttırılarak analiz yapılmaktadır. Bu yük dağılımlarının monoton arttırılmasını esas alan Geleneksel Lineer Olmayan Statik Analiz (G-LOSA) yaklaşımlarının planda ve düşeyde düzensizliği bulunmayan az katlı yapılar için gerçek davranışa oldukça yakın sonuçlar verdiği bilinmektedir [11-16]. Buna karşılık, az katlı düzensiz ve çok katlı düzenli veya düzensiz yapılar üzerindeki araştırmalar söz konusu G-LOSA yaklaşımlarının gerçek davranışı belirlemede yetersiz kaldığını göstermektedir [11-16]. Bunun nedeni, esasen deprem sırasında oluşan atalet kuvvetlerinin (yatay yük dağılımının) deprem özelliklerine ve yapıdaki plastikleşmenin düzeyine (plastikleşen kesit sayısına) bağlı olarak sürekli değişim göstermesi ve temel mod dışındaki yüksek modların da davranışta etkin olmasıdır.

Bu nedenle, az katlı düzensiz ve çok katlı düzenli veya düzensiz yapıların deprem etkileri altındaki gerçek davranışının belirlenebilmesi için lineer olmayan statik analiz yöntemlerinde sistemin değişen dinamik özelliklerinin (yüksek mod etkilerinin, mod şekli değişiminin vb.) de gözönünde bulundurulması gerekmektedir. Bunun için analiz yöntemlerinde, sistemin dinamik özelliklerinin değişiminin izlenmesi ve buna bağlı olarak analiz boyunca farklı özelliklerdeki yeni yatay yük dağılımlarının kullanılması gerekmektedir. Bu durumda, lineer olmayan statik analiz yöntemlerindeki hesap zorlaşmakta ve hacmi çok büyük oranda artmaktadır. Özellikle, ardışık yaklaşımı veya adım-adım analizi esas alan yük artımı yöntemlerinde [17-20], istenilen hassasiyete de bağlı olarak hesap hacmi çok daha büyük oranda artmaktadır. Ayrıca bu yöntemlerde, yük artımı sırasında önceki

adımdaki yüklerden bağımsız yüklerin kullanılmasında bazı zorluklarla karşılaşıldığı bilinmektedir [11,21].

Sonuç olarak, yüksek mod etkilerini ve plastikleşmelerin neden olduğu yatay yük dağılımı değişimlerini gözönüne almak amacıyla, plastikleşen kesitlerin ayrıntılı olarak belirlenebildiği ve her yük artımında bağımsız yük dağılımı kullanımına olanak veren ve aynı zamanda etkin analiz yöntemlerine ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.

## 1.2 Konu ile İlgili Literatürün İncelenmesi

Bu bölümde, “Geleneksel Lineer Olmayan Statik Analiz (G-LOSA) yöntemleri, bu yöntemlerde kullanılan farklı yatay yük dağılımlarının analiz sonuçlarına etkileri, LOSA’i esas alan performans değerlendirme yöntemleri, çok modlu ve uyarlamalı (plastikleşmeler ile değişen yatay yük dağılımını esas alan) LOSA yöntemleri” konularını içeren literatür incelemesi özetlenmiştir.

Özer (1987), çelik düzlem çerçevelerde *ikinci mertebe limit yükün* hesabı için genel bir yük artımı yöntemi geliştirmiştir. Malzemenin elasto-plastik davranışının ve geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin gözönüne alındığı bu çalışmada, plastik mafsal hipotezi, bileşik iç kuvvet durumunu da kapsayacak şekilde genişletilmektedir. Yöntemde sabit düşey yükler ve artan yatay yükler altında hesap yapılarak, düşey yüklere bağlı olarak hesaplanan normal kuvvetler için *ikinci mertebe* etkileri lineerleştirilmektedir. Sistemde her plastik kesitin oluşumundan sonra o kesitteki plastik dönme yeni bir bilinmeyen olarak alınmakta ve plastikleşen kesitteki akma koşulunu ifade eden yeni bir denklem mevcut denklem takımına ilave edilmektedir. Böylece, her yük artımında (her plastik kesitin oluşumunda) denklem takımının yeniden kurulup çözülmesine gerek kalmadan, yeni bilinmeyene ait satır ve kolonun indirgenmesi suretiyle, plastikleşen kesitlerdeki plastik şekildeğişimleri de içeren çözüm elde edilmektedir. Çalışmada, plastikleşen kesitlerdeki iç kuvvet durumlarının yön değiştirerek akma eğrisinin iç bölgesine yönelmesi ve akma eğrisi üzerinde bölge (doğru) değiştirmesi gibi özel durumlarda yöntemin uygulama esasları

açıklanmıştır. Ayrıca geliştirilen yöntemden yararlanarak, yatay yükler ile birlikte düşey yüklerin de aynı oranda arttırıldığı orantılı yükleme durumuna ait çözümün yapılabilmesi için bir çözüm yolu önerilmiştir [22].

İrtem (1991), [22]'de esasları açıklanan yük artımı yönteminden yararlanarak uzay çubuk sistemlerin *ikinci mertebe limit yükünün* belirlenmesi amacıyla bir yük artımı yöntemi geliştirmiştir. Geliştirilen yöntemde sabit düşey yükler ve artan yatay yükler (deprem, rüzgar vb.) için hesap yapılmaktadır. Çalışmada akma koşulu olarak, bileşik eğik eğilme etkisindeki çelik kutu kesit ve benzeri kesitler için düzlemlerle lineerleştirilmiş üç boyutlu akma yüzeyleri önerilmiş ve geliştirilen yöntemin bu tip kesitlerden oluşan uzay çerçeveler üzerinde uygulaması yapılmıştır. Çalışmada, plastikleşen kesitlerdeki iç kuvvet durumlarının yön değiştirerek akma yüzeyinin iç bölgesine yönelmesi, akma yüzeyi üzerinde bölge (düzlem) değiştirmesi ve orantılı yükleme gibi özel durumlarda yöntemin uygulama esasları açıklanmıştır. Yöntemin sayısal uygulamalarına olanak sağlamak için otomatik bir bilgisayar programı da (İMEP-3D) geliştirilmiştir [23].

Girgin (1996), [22]'de esasları açıklanan yük artımı yönteminden yararlanarak betonarme uzay çubuk sistemlerin *ikinci mertebe limit yükünün* ve göçme güvenliğinin belirlenmesi amacıyla bir yük artımı yöntemi geliştirmiştir. Çalışmada, bileşik eğik eğilme etkisindeki betonarme çubuk elemanlar için lineer bölgelerden oluşan idealleştirilmiş üç boyutlu bir akma yüzeyi önerilmiş ve bu şekilde malzeme bakımından lineer olmayan betonarme sistemlerde akma koşullarının lineer denklemlere dönüştürülmesi sağlanmıştır. Lineer olmayan burulma şekildeğiştirmelerinin sistem davranışına etkisi de gözönüne alınmıştır. Çalışmada ayrıca, geliştirilen yöntemin çok katlı büyük betonarme yapı sistemlerinin *ikinci mertebe elasto-plastik* hesabına etkin olarak uygulanmasını sağlamak amacıyla, bilinmeyen sayısının azaltılmasını ve katsayılar matrisinin indirgenme işleminin hızlandırılmasını sağlayan bir algoritma önerilmiştir. Yöntemin sayısal uygulamalarına olanak sağlamak amacıyla üç adet bilgisayar programı (BEKE-3, PARCS, CHECK) hazırlanmıştır [24].

Kilar ve Fajfar (1997), asimetrik yapıların lineer olmayan statik analizi için bir yöntem geliştirmişlerdir. Üç boyutlu yapıların çeşitli düzlem makro elemanlarla (alt sistemlerle) temsil edildiği bu yöntemde yapıya ait kapasite eğrisinin basit bir şekilde elde edilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen yöntem ile simetrik ve asimetrik yapılar incelenmiş ve burulmanın yapı davranışı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir [25].

Moghadam ve Tso (1997), elastik dinamik analiz verilerinden yararlanarak üç boyutlu yapıların lineer olmayan statik analizinin yapıldığı bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntemde, yatay yük dağılımı ve hedef yerdeğişimesi değerleri elastik dinamik analizden elde edilmektedir. Bu yöntemden elde edilen sonuçlar lineer olmayan dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir [26].

Faella ve Kilar (1998), burulma düzensizliği bulunan yapıların deprem yükleri altındaki davranışının belirlenmesi için, üç boyutlu lineer olmayan statik analizin uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Bunun için, kütle merkezi kaydırılarak burulma düzensizliği oluşturulan dört katlı bir yapı ele alınmış ve yatay yüklerin planda farklı etkime noktaları için lineer olmayan statik analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar lineer olmayan dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir [27].

Penelis ve Kappos (2002), binaların burulma davranışının da gözönüne alındığı bir lineer olmayan statik analiz yöntemi geliştirmişlerdir. Yöntemde, kullanılan yatay yük dağılımı elastik spektral analiz kullanılarak belirlenmekte ve yapının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde, burulma ve öteleme modlarının birleştirildiği eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem yaklaşımı kullanılmaktadır. Geliştirilen yöntem tek katlı tek doğrultuda simetrik bir yapı üzerinde uygulanmış ve elde edilen sonuçlar lineer olmayan dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir [28].

Mwafy ve Elnashai (2001), Lineer Olmayan Statik Analizin (LOSA) doğruluğunu ve uygulanabilirliği araştırmışlardır. Bu amaçla farklı süneklik özelliklerine sahip düzenli ve düzensiz çerçeve yapılar ile düzenli perde-çerçeve

yapılar seçilmiş ve bu yapılar üzerinde deprem yükünü temsil eden farklı yatay yük dağılımları için (ters üçgen dağılım, üniform dağılım ve çok modlu dağılım) LOSA'ler yapılarak çok sayıda deprem yer hareketi için yapılan Lineer Olmayan Dinamik Analiz (LODA) sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapının yeterli doğrulukta modellenmesi, yatay yük dağılımının dikkatli seçilmesi ve sonuçların doğru yorumlanması durumunda, LOSA'in elastik ve elastik olmayan bölgedeki davranışlar hakkında önemli bilgiler verdiği belirtilmiştir. LOSA'in az katlı ve kısa periyotlu çerçeve yapılar için çok uygun olduğu belirlenmiştir. Özel ve uzun periyotlu yapılar için LOSA ve LODA'den elde edilen sonuçların birbirinden farklı olduğu belirlenmiş ve bunun nedeni, sabit yatay yük dağılımının elastik sonrası bölgede yüksek mod etkilerini gözönüne alamaması olarak açıklanmıştır. Bunu gidermek için birden fazla yatay yük dağılımı için ayrı ayrı analizler yapılarak kapasite ve taleplerin belirlenmesinin uygun olacağı belirtilmiştir. Ayrıca, yüksek mod etkilerini ve düzensiz yapı etkilerini gözönüne alabilecek spektrum esaslı etkin yeni yöntemlerin gerekliliği değerlendirilmiştir [11].

Lew ve Kunnath (2001), FEMA 273'de önerilen lineer olmayan statik analiz prosedürlerinin etkinliğini incelemiştir. Bunun için, Northridge depremine ait güçlü deprem yer hareketi kayıtları bulunan iki çelik ve iki betonarme bina kullanılmıştır. Binalardan deprem sırasında alınan ölçümlerden yararlanarak belirlenen yerdeğiştirme davranışı için lineer olmayan dinamik analiz yapılmış ve FEMA 273'de önerilen üç farklı yatay yük dağılımı için yapılan lineer olmayan statik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Plastikleşen kesitlerin sistem üzerindeki dağılımı ve görelî kat ötelemeleri için yapılan karşılaştırmalardan lineer olmayan statik analiz yöntemlerinin üst katlardaki plastikleşmeleri ve görelî kat ötelemesi taleplerini belirlemede yetersiz kaldıkları belirlenmiştir [29].

Freeman (1998), lineer olmayan statik analiz ile *davranış spektrum analizinin* birleştirilmesine dayanan *Kapasite Spektrum Yönteminin* esaslarını, gelişimini ve düzleştirilmiş spektrumlar ile gerçek deprem yer hareketi kayıtlarına ait spektrumlar için kullanımını açıklamıştır. Çalışmada ayrıca bu yöntem, benzer yöntemlerin esasları bakımından karşılaştırılmıştır [30].

Fajfar (2000), yapıların deprem yükleri altında analizi için, N2 olarak adlandırılan basit bir lineer olmayan analiz yöntemi geliştirmiştir. Yöntemde, çok serbestlik dereceli bir sistemin Lineer Olmayan Statik Analizi (LOSA), eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemin *davranış spektrum analizi* ile birleştirilmektedir. Yöntem, ivme yerdeğiştirme formatında formüle edilmiş böylece, deprem davranışını kontrol eden temel davranış büyüklüklerinin görsel değerlendirme yapılmasına olanak verilmiştir. Yöntemde *Kapasite Spektrumu Yönteminden* farklı olarak elastik spektrum yerine elastik olmayan spektrum kullanılmaktadır. Bu şekilde iterasyona gerek kalmadan gerekli talep büyüklükleri belirlenebilmektedir. Yöntem, dört katlı bir betonarme yapı üzerinde uygulanarak sonuçlar, aynı yapı için gerçekleştirilen deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Birinci modun etkin olduğu bu yapı için sonuçların yeteri kesinlikte olduğu belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca, geliştirilen yöntem, ATC 40 ve FEMA 273’de verilen LOSA esaslı değerlendirme yöntemleri ile karşılaştırılmıştır [9].

Aschheim ve Black (2000), yapıların deprem yükleri altındaki davranışını belirlemek ve değerlendirmek amacıyla, lineer olmayan statik analizi esas alan ve “*Akma Noktası Spektrumu*” olarak adlandırılan yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntemde, kapasite eğrisi iki doğru parçası ile idealleştirilerek tek serbestlik dereceli sisteme dönüştürülmekte ve gözönüne alınan deprem yer hareketine ait elastik olmayan ivme spektrumu (sabit süneklik oranlı) ile birlikte *akma dayanımı katsayısı-akma yerdeğiştirmesi* formatında aynı grafik üzerinde çizilmektedir. Daha sonra, farklı süneklik oranına sahip elastik olmayan ivme spektrumlarından, sistem akma noktasını kesen ivme spektrumuna ait süneklik oranı kullanılarak maksimum yerdeğiştirme talebi belirlenmektedir. Çalışmada ayrıca akma noktasının dayanım ve rijitlikle değişimi değerlendirilmiş ve geliştirilen yöntemin performansa dayalı tasarım ve değerlendirmede kullanımına ilişkin prosedürler anlatılmıştır [10].

Albanesi vd. (2002), lineer olmayan statik analizi esas alan değerlendirme yöntemlerinden Kapasite Spektrum Yöntemini, Yerdeğiştirme Katsayıları Yöntemini ve N2 yöntemini, yerdeğiştirme ve dayanım talepleri bakımından, *davranış spektrum analizi*, eşit enerji ve eşit yerdeğiştirme yaklaşımları ve lineer olmayan dinamik analiz ile karşılaştırarak değerlendirmişlerdir. Çalışmada yedi katlı betonarme yapı

üzerinde farklı yatay yük dağılımları (üniform, birleştirilmiş modal kat kesme kuvvetleri dağılımı ve modal uyarlamalı dağılım) için elde edilen kapasite eğrileri kullanılarak belirlenen davranış büyüklükleri değerlendirilmiştir. Yapılan karşılaştırmalardan, incelenen yöntemlerin yüksek modların etkin olduğu yüksek yapıda taban kesme kuvveti taleplerini oldukça düşük verdiğini göstermiştir. Farklı yatay yük dağılımlarının yerdeğiştirme davranışını değiştirmedeği ancak, taban kesme kuvvetindeki büyük farkları azalttığı görülmüştür [31].

Albanesi vd. (2002), enerji eşitliği ilkesine dayanan yeni bir lineer olmayan statik analiz yöntemi geliştirmişlerdir. Bu enerjiye dayalı yöntemde, dinamik analiz veya yarı-statik uyarlamalı analiz esas alınmaktadır. Geliştirilen yöntem Kapasite Spektrum Yöntemi, elastik *davranış spektrum analizi* ve dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir [32].

Reinhorn (1997), yapıların lineer olmayan statik analizinde kullanılmak üzere, yapının dinamik karakteristiklerinin ve depremin karakteristiklerinin gözönüne alındığı bir yatay yük dağılımı formülasyonu tanımlamıştır. “*Modal Uyarlamalı Dağılım*” olarak isimlendirilen dağılımda, plastikleşme (plastik kesitlerin oluşumu) ile değişen mod şekilleri, modal katılım çarpanları ve elastik spektral ivme değerleri gözönüne alınmaktadır. Ayrıca tanımlanan bu formülasyon IDARC-2D bilgisayar programına adapte edilerek sayısal uygulamalara olanak sağlanmıştır [17].

Bracci vd. (1997), az ve orta katlı yapıların deprem yükleri altındaki performansını belirlemek ve bundan yararlanarak yapıları güçlendirmek için bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntem, *Kapasite Spektrumu Yöntemi*’nden türetilmiştir. Yöntemde, yapının elastik aşamadan göçme aşamasına kadar olan bölgede dinamik karakteristiklerinin değişimini içeren kat talep eğrileri elde edilmektedir. Bu talepler bağımsız olarak Lineer Olmayan Statik Analiz (LOSA) ile belirlenen yatay kat kapasiteleri ile karşılaştırılmaktadır. LOSA’de kullanılan yatay yüklerin dağılımı rijitliğe bağlı artımsal kat kesme taleplerine dayanmaktadır. Geliştirilen yöntem 1/3 ölçekli bir yapı modeline uygulanmıştır. Bu model aynı zamanda laboratuvarda sarma tablası ile test edilmiştir. Yapı belirli düzeyde hasar gördükten sonra güçlendirilmiş ve tekrar test edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları ile test sonuçları



karşılaştırılarak prosedür değerlendirilmiştir. Çalışmada geliştirilen yöntemin yapıların deprem yükleri altındaki performansını belirlemede ve değerlendirmede kat talepleri ve buna karşılık gelen kat kapasiteleri için güvenilir değerler verdiği görülmüştür. Bazı yapısal düzensizlikler içeren az katlı yapıların deprem yükleri altındaki performansını belirlerken geleneksel (monoton artan yatay yük dağılımını esas alan) LOSA yerine yapının dinamik özelliklerinin önemli değişimler gösterdiği bölgelerde, bu değişimleri içeren yeni yatay yük dağılımlarının kullanılmasının yerinde olacağı belirtilmiştir [18].

Paret vd. (1996) ve Sasaki vd. (1998), yüksek modlar nedeniyle oluşan göçme mekanizmalarını belirleyebilmek için “*Çok-Modlu Pushover Analiz*” olarak adlandırılan bir Lineer Olmayan Statik Analiz (LOSA) yöntemi geliştirmişlerdir. Yöntemde geleneksel LOSA, basitliği korunarak yüksek mod etkilerini de gözönüne alacak şekilde genişletilmektedir. Geliştirilen prosedürün esası özel titreşim modları için yapının davranışını temsil eden kapasite eğrileri oluşturmaktır. Bu kapasite eğrilerinin belirlenmesinde ilgili moda ait elastik mod şekline dayanan yatay dağılım kullanılmakta ve her biri için ayrı ayrı geleneksel EÖSİA yapılmaktadır. Daha sonra her bir kapasite eğrisi *Kapasite Spektrumu Yöntemi* esasları kullanılarak ilgili talep spektrumu ile karşılaştırılmakta ve etkin olan diğer modlar da belirlenmektedir. Çeşitli depremlerin etkisiyle hasar görmüş farklı yapılar üzerinde prosedür uygulanmış elde edilen sonuçlar gözlenen hasarlar ile karşılaştırılarak yöntem değerlendirilmiştir. Geliştirilen yöntem ile yüksek modların etkili olduğu yapılarda güvenlik ve hasar kontrolünün geleneksel yöntemlere oranla daha gerçekçi olarak belirlenebildiği belirtilmiştir [33,34].

Valley ve Harris (1998), düşeyde ve planda düzensizliği nedeniyle yüksek modların etkin olduğu iki katlı bir betonarme binanın üzerinde modal uyarlamalı lineer olmayan statik analiz uygulamışlardır. Lineer-elastik analiz özelliklerine sahip program kullanılarak gerçekleştirilen analizde, elemanlarda plastikleşme meydana geldikçe rijitlikler değiştirilmekte veya ilgili eleman sistemden çıkarılmakta, daha sonra dinamik analiz ile yeni yük dağılımı belirlenmektedir. Bu analiz yapının ilgili itme adımındaki birleştirilmiş modal yerdeğiştirme değerine ulaşıncaya veya toptan göçme mekanizması oluşuncaya kadar sürdürülmüştür [35].

Moghadam (1998), yüksek mod etkilerini içeren “*Pushover Sonuçları Birleştirmesi*” isimli bir yöntem geliştirmiştir. Yöntem, elastik mod şekillerine dayanan yatay yük dağılımları için yapılan lineer olmayan statik analiz sonuçlarının önerilen bir kombinasyon ifadesi ile birleştirilmesine dayanmaktadır. Geliştirilen yöntem yirmi katlı bir düzlem çelik çerçeve yapıya uygulanarak maksimum yerdeğiştirmeler ve kat ötelemeleri bakımından lineer olmayan dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır [36].

Yang ve Wang (1998), yüksek mod etkilerini ve yapıda meydana gelen plastikleşmelerin etkisini içeren bir yatay yük dağılımının lineer olmayan statik analiz sonuçlarına etkisini incelemiştir. İncelenen dağılım bazı düzensizlikler içeren üç farklı düzlem betonarme çerçeve üzerinde uygulanmış ve sonuçlar lineer olmayan dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçlar FEMA 273’de önerilen ters üçgen yatay yük dağılımı ve modal dağılım kullanılarak yapılan lineer olmayan statik analiz sonuçları ile karşılaştırılmış ve önerilen dağılım değerlendirilmiştir [37].

Gupta ve Kunnath (1999, 2000), yapıda meydana gelen plastikleşmeler ile yatay yük dağılımındaki değişimi ve yüksek mod etkilerini içeren spektrum esaslı bir Lineer Olmayan Statik Analiz (LOSA) yöntemi geliştirmiştir. Yöntemde sadece malzemenin lineer olmayan davranışı gözönüne alınmıştır. Çalışmada öncelikle, deprem etkilerini ölçen aletler ile donatılmış çeşitli binaların 1994 Northridge depremi esnasındaki davranışları incelenmiştir. Bu incelemede, deprem sırasındaki kat yerdeğiştirmelerinden yararlanılarak atalet kuvvetlerinin değişimi belirlenmiştir. Az katlı yapılarda atalet kuvvetlerinin dağılımının birinci mod şekline uyduğu, ancak yapı yüksekliği arttıkça dağılımların ikinci mod şekillerine benzediği belirlenmiştir. Daha sonra bu davranışlardan yararlanarak geleneksel LOSA yöntemlerinin eksikliklerini giderecek yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntem, yapının dinamik özelliklerine ve gözönüne alınan deprem özelliklerine bağlı olarak her bir titreşim periyodu için hesaplanan modal kat kuvvetlerinin birbirinden bağımsız olarak sisteme etkilmesini ve elde edilen davranış büyüklüklerinin ilgili mod için uygun olan kombinasyon kuralı ile birleştirilmesini esas almaktadır. Analiz sırasında, her bir yük artımı için yapı elemanlarında meydana gelen rijitlik değişimlerinden

(çatlama, akma vb.) sonra sistemin modal özellikleri yeniden belirlenmekte ve belirli bir sınır değere ulaşıncaya kadar bu şekilde analize devam edilmektedir. Yöntemde, elemanların plastikleşme değerlerinin belirlenmesinde tüm modlardan meydana gelen kesit tesirleri kullanılarak modların etkileşimi gözönüne alınmaktadır. Modal kat kuvvetlerinin belirlenmesinde elastik spektral ivmeler kullanılmaktadır. Geliştirilen prosedür, az ve çok katlı ayrıca rijitlik ve dayanım düzensizliği bulunan düzlem çerçeve yapılar üzerinde uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, FEMA 273 modal yatay yük dağılımı ve üniform yatay yük dağılımı kullanılarak yapılan LOSA sonuçları ve Lineer Olmayan Dinamik Analiz sonuçları (LODA) ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, kapasite eğrileri, rölatif kat ötelenmeleri ve plastikleşen kesitlerin yapıdaki dağılımı bakımından, LODA sonuçlarına oldukça yakın bulunmuştur. Yüksek mod etkilerinin önemli olduğu ve dayanım ve rijitlik düzensizliği bulunan yapılarda geleneksel LOSA yerine geliştirilen yöntemin kullanılmasının uygun olacağı belirtilmiştir [19,38].

Lefort (2000), [17]'de geliştirilen *Modal Uyarlamalı Dağılım*'da anlık elastik spektral ivmeler ile ölçeklemenin etkisini incelemiştir. Ayrıca, yük artımı sırasında yatay yükleri ölçekleme şeklinin (sadece son yük artımını ölçekleme ve toplam yatay yükü ölçekleme) etkisini incelemiştir. Çalışmada, düzenli, rijitlik ve dayanım düzensizliği bulunan yapılar incelenmiştir. Lineer olmayan statik analiz (LOSA) sonucunda elde edilen kapasite eğrileri, üniform dağılım ve ters üçgen dağılım için yapılan LOSA ve artımsal dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir [39].

Chopra ve Goel (2001), sabit yatay yük dağılımını esas alan geleneksel yöntemlerin hesapsal ve kavramsal basitliğinin korunduğu, yapı dinamiği teorisine dayanan yeni bir Lineer Olmayan Statik Analiz (LOSA) yöntemi geliştirmişlerdir. "*Modal Pushover Analiz*" olarak adlandırılan yöntemde, her bir mod için atalet kuvveti dağılımı kullanılarak LOSA ile kapasite eğrileri belirlenmekte ve bu eğrilerden yararlanarak modlara ait deprem talepleri elde edilmektedir. Daha sonra bu modal talep değerleri uygun kombinasyon kuralı ile birleştirilerek lineer olmayan toplam deprem talebi belirlenmektedir. Yöntemde, her bir mod için bağımsız LOSA yapıldığından modların etkileşimi gözönüne alınmamaktadır. Geliştirilen yöntem,

dokuz katlı çelik düzlem bir çerçeve üzerinde uygulanmış ve sonuçlar Lineer Olmayan Dinamik Analiz (LODA) ile karşılaştırılmıştır. Yapının kat yerdeğiştirmeleri, kat ötelenmeleri ve plastik mafsalların dağılımı bakımından LODA ile uyumlu sonuçlar elde edilmiş ancak plastik mafsallardaki dönme değerlerinde büyük hatalar belirlenmiştir. Ayrıca geliştirilen yöntem, FEMA 273’de önerilen yatay yük dağılımları için yapılan LOSA ile de karşılaştırılmıştır. Geliştirilen yöntemin FEMA 273’de önerilen dağılımların tümünden daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Sonuçlara göre, geliştirilen yöntemin binaları değerlendirme ve dizayn etmede pratik uygulamalar için yeteri kadar kesin olduğu belirtilmiştir [40-42].

Elnashai (2001, 2002), mevcut geleneksel lineer olmayan statik analiz yöntemlerinin eksikliklerini ve çok-modlu uyarlamalı yeni yöntemleri değerlendirmiştir. Bu yeni yöntemlerde spektral ölçeklemenin etkisini ve itme analizi sırasında yük dağılımının artımsal ve toplam ölçeklenmesinin farklarını artımsal dinamik analiz (dinamik pushover prosedürü) ile karşılaştırmalar yaparak incelemiştir. Özellikle yüksek modların etkin olduğu yapılarda önemli olan deprem karakteristiklerinin gözönüne alınması için spektral ölçeklemenin gerekli olduğunu ve toplam ölçeklemenin artımsal ölçeklemeye oranla yapının deprem sırasındaki davranışını daha iyi yansıttığını göstermiştir [43,44].

Antoniou vd. (2002), depremi temsil eden yatay kuvvetlerin yapının modal özelliklerine bağılı olarak her hesap adımında değiştirildiği “*Tam Olarak Uyarlamalı Pushover Prosedürü*” isimli bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntemde, yapı elemanlarındaki her rijitlik değişiminden (çatlama, akma vb.) sonra, yapının dinamik özelliklerine göre modal kat kuvvetleri belirlenmekte ve o adım için uygun olan modal kombinasyon kuralı ile birleştirilen kat kuvvetleri yapıya etkilerek istenilen davranış büyüklükleri belirlenmektedir. Analiz istenilen bir sınır duruma kadar sürdürülmektedir. Geliştirilen yöntemde, modal kat kuvvetleri elastik spektral ivmeler ile ölçeklenmektedir. Ayrıca, modal özelliklerdeki değişime bağılı olarak hesaplanan yatay yükler artımsal ölçekleme veya toplam ölçekleme kullanılarak sisteme etkitilebilmektedir. Geliştirilen yöntem çeşitli süneklik düzeylerine sahip düzenli ve düzensiz çerçeve yapılar ve düzenli perde-çerçeve yapı üzerinde uygulanmış ve elde edilen kapasite eğrileri lineer olmayan dinamik analiz ile

karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, aynı yapılar için üniform ve üçgen dağılım kullanılarak geleneksel lineer olmayan statik analizler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Geliştirilen yöntemin geleneksel yöntemlere göre lineer olmayan dinamik analiz sonuçlarına daha yakın sonuçlar verdiği belirtilmiştir [20].

Aydinoğlu (2003), çok modlu davranışı gözönüne alabilen pratik ve aynı zamanda teorik tutarlılığı da olan yeni lineer olmayan statik analiz yöntemi geliştirmiştir. “*Artımsal Davranış Spektrum Analizi*” olarak adlandırılan yöntem modal kapasite diyagramları adı verilen diyagramların yaklaşık olarak elde edilmesine dayanmaktadır. Modal histeresis eğrilerinin iskelet eğrileri olarak tanımlanan bu diyagramlar çok modlu itme analizinin her adımında, gözönüne alınan deprem için hesaplanan lineer olmayan spektral yerdeğiştirmelere bağlı olarak elde edilmektedir. Böylece bu yöntem ile yapılan analiz sonucunda, gözönüne alınan deprem için tüm büyüklüklere ait talepler doğrudan doğruya (kapasite eğrisi kullanılmadan) belirlenebilmektedir. Yöntemde lineer olmayan spektral yerdeğiştirmelerin belirlenmesi için, her adımda modal kapasite diyagramlarının iki doğru parçası ile idealleştirilmesi ve buna ait özellikleri esas alan tek serbestlik dereceli sistemin dinamik hareket denkleminin çözülmesi öngörülmektedir. Çalışmada ayrıca, mühendislik uygulamalarında kullanılmak üzere, yönetmeliklerde tanımlanan standart davranış spektrumundan yararlanarak çok modlu performans değerlendirilmesi yapılabilmesi için *eşit deplasman kuralını* esas alan bir pratik versiyon geliştirilmiştir. Geliştirilen prosedür, sadece malzemenin lineer olmayan davranışının gözönüne alındığı dokuz katlı çelik bir çerçeve üzerinde uygulanarak elde edilen sonuçlar lineer olmayan dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Prosedürün, öteleme oranları, giriş plastik dönmeleri, kat kesme kuvvetleri ve devirme momentleri için yeterli kesinlikte sonuçlar verdiği gösterilmiştir [45].

İnel vd. (2003), pratikte lineer olmayan statik analiz yöntemlerinde kullanılan beş farklı yatay yük dağılımını (üniform dağılım, ters üçgen dağılım, FEMA 356 modal dağılımı, birinci mod dağılımı ve uyarlamalı birinci mod dağılımı) ve [40-42]’deki yöntemde bazı değişiklikler yaparak uyguladıkları “*Çok-Modlu Pushover Analiz*” yöntemini değerlendirmişlerdir. Bunun için, iki adet düzenli, iki adet zayıf katlı çelik çerçeve üzerinde lineer olmayan statik analizler yapılmış ve çok

sayıda deprem için yapılan lineer olmayan dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tüm dağılımların maksimum yerdeğiştirme davranışını kabul edilebilir kesinlikte verdiği ancak, görelî kat ötelemeleri ve kat kesme kuvvetlerindeki hataların çok büyük mertebede olduğu belirlenmiştir. “Çok-Modlu Pushover Analiz” den elde edilen sonuçların ise diğêr dağılımlara göre daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir [46].

Chopra ve Goel (2004), [21-24]’de esasları anlatılan “Modal Pushover Analiz” yöntemini üç boyutlu yapıları içerecek şekilde geliştirmişlerdir. Daha sonra prosedürü üç boyutlu, planda düzensizliğı bulunan ve bulunmayan yapı sistemlerine uygulamışlar ve lineer olmayan dinamik analiz ile karşılaştırmalar yaparak doğruluğunu değerlendirmişlerdir [47].

Jan vd. (2004), yüksek mod etkilerini gözönüne alan, basitleştirilmiş bir üst sınır Lineer Olmayan Statik Analiz (LOSA) yöntemi geliştirmişlerdir. Yöntemde, önerilen bir formülasyon ile her mod için, yüksek mod yerdeğiştirme katılım oranları hesaplanmakta ve bu oranlara bağılı olarak yine verilen bir formülasyon ile yatay yük dağılımı ve maksimum elastik olmayan yerdeğiştirme talebi hesaplanmaktadır. Bu yatay yük dağılımı kullanılarak hesaplanan hedef tepe yerdeğiştirmesi değerine ulaşıncaya kadar monoton artan dağılım ile analiz yapılmaktadır. Geliştirilen yöntem, beş farklı yapı üzerinde uygulanmış ve aynı yapılar için gerçekleştirilen üçgen dağılımlı LOSA, “modal pushover analiz” ve lineer olmayan dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Kat yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri ve plastik dönme değerleri için geliştirilen yöntemin az katlı yapılarda diğêr yöntemlere göre hatalı sonuçlar verdiği, çok katlı yapılarda ise diğêr tüm yöntemlere oranla iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir [48].

Aydinoğılu (2004), [45]’de esasları açıklanan “Artımsal Davranış Spektrum Analizi” yönteminin üç boyutlu ve ikinci mertebe etkileri içeren uygulamalarını yapmıştır. Bunun için dokuz katlı kütle eksantrikliğı nedeniyle burulma düzensizliğı bulunan çelik bir çerçeve ve ondört açıklığı bulunan bir viyadük sistemi incelemiştir. Çalışmada, geliştirilen yöntemin yüksek modların etkin olduğu burulma düzensizliğıne sahip binalar ve köprüler için kullanılabileceğı belirtilmiştir [49].

### 1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, yüksek modların etkili olduğu binaların deprem etkileri altındaki lineer olmayan davranışının belirlenebilmesi için, etkin bir Çok Modlu Uyarlamalı Yük Artımı Yöntemi (ÇMUYAY) geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen yöntem, Bölüm 2.1'de verilen koşulları sağlayan bütün yapı sistemlerine uygulanabilmektedir.

Geliştirilen yöntemde geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi ve malzemenin *elasto-plastik* davranışı gözönüne alınarak, sistemin belirli sabit düşey yükler ve artan modal yatay yükler için analizi yapılmaktadır. Plastik şekildeğişirmelerin *plastik kesit* adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde davranışın *lineer-elastik* olduğu varsayılmaktadır. Yöntemde, sabit düşey yükler için hesap yapılmasından yararlanarak *ikinci merteye* etkileri lineerleştirilmektedir. Ayrıca, akma koşullarını ifade eden eğriler de doğru parçaları ile idealleştirilerek lineerleştirilmektedir.

Yöntemin yukarıda kısaca ifade edilen özellikleri nedeniyle, plastikleşen kesitler arasındaki lineer davranış bölgelerinde yük artımı uygulanmasına gerek kalmadan, her plastik kesitin oluşumuna karşı gelen yatay yük artımı ve davranış büyüklükleri (kesit tesirleri, yerdeğişirmeler, plastik şekildeğişirmeler vb.) doğrudan doğruya belirlenebilmektedir. Böylece ÇMUYAY ile yapılan analizde plastik kesitlerin oluşumunun ve yapı davranışının ayrıntılı olarak izlenebilmesi sağlanmaktadır.

Geliştirilen yöntemde, her plastik kesitin oluşumundan sonra o kesitteki bir plastik şekildeğiştirme bileşeni yeni bir bilinmeyen olarak alınmakta ve plastikleşen kesitteki akma koşulunu ifade eden yeni bir lineer denklem bir önceki denklem takımına ilave edilmektedir. Böylece her yük artımında (her plastik kesitin oluşumunda), denklem takımının yeniden kurulup çözülmesine gerek kalmadan, yeni bilinmeyene ait satır ve kolonun indirgenmesi ile plastik şekildeğiştirme bileşenini de içeren çözüm etkin olarak elde edilmektedir. Ayrıca, iç kuvvet durumunun akma koşulunu sağladığını ifade eden ilave denklemlerin kullanılması ile bileşik eğilme

etkisindeki plastik kesitlerde eğilme ve uzama şekildeğiştirmeleri ve bunlar arasındaki etkileşim de gözönüne alınmış olmaktadır.

Yöntemde yüksek mod etkilerini gözönüne almak amacıyla ardışık iki plastikleşen kesit arasındaki lineer davranış bölgesinde, *davranış spektrumu analizi* esaslarından yararlanılmaktadır. Buna göre, her plastik kesitin oluşumundan sonra sistemin değişen modal özellikleri ve önceki adımdaki birim modal yatay yük dağılımları gözönünde bulundurularak belirlenen birim modal yatay yük dağılımları için hesap yapılmaktadır. Her adıma ait birim modal yatay yük dağılımları ilgili adımlara ait elastik spektral ivmeler ile ölçeklenmekte, böylece deprem özellikleri ve modların birbirine göre etkinliğinin plastikleşmeye (plastik kesitlerin oluşumuna) bağlı olarak değişimi de gözönüne alınabilmektedir.

Çalışmada, geliştirilen yöntemin betonarme binalar üzerindeki sayısal uygulamalarına olanak sağlamak üzere bir bilgisayar programı (MEPARCS) geliştirilmiştir.

Geliştirilen ÇMUYAY'nden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi amacıyla, üç değişik deprem yer hareketi kaydı için farklı periyot bölgelerini temsil etmek üzere örnek olarak ele alınan 5, 10, 15 ve 20-katlı betonarme çerçeveler üzerinde, ÇMUYAY ile LOSA, Lineer Olmayan Dinamik Analiz (LODA), 1. mod esaslı geleneksel LOSA, FEMA 356'da önerilen üniform ve modal dağılımları için LOSA yapılmıştır. LODA sonuçları kesin çözüm kabul edilerek karşılaştırmalar yapılmış ve ÇMUYAY değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler, kat yatay yerdeğiştirmeleri, görelilik kat ötelemeleri, maksimum kiriş plastik dönmeleri, kat kesme kuvvetleri, kapasite eğrileri ve sistemdeki plastikleşen kesit dağılımları incelenerek yapılmıştır.

Ayrıca geliştirilen yöntemde spektral ölçeklemenin, gözönüne alınan mod sayısının ve *ikinci merteye* etkilerinin analiz sonuçları üzerindeki etkileri de incelenmiştir.



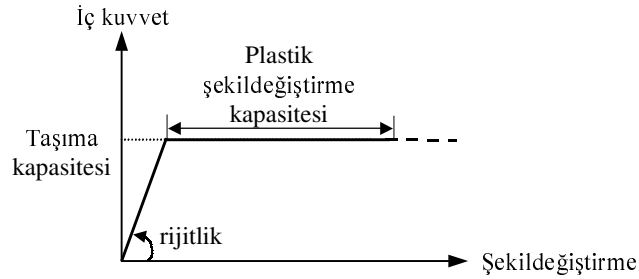
## 2. BİNALARIN DEPREM DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ İÇİN ETKİN BİR ÇOK MODLU UYARLAMALI YÜK ARTIMI YÖNTEMİ (ÇMUYAY)

Bu bölümde, yüksek modların etkili olduğu binaların deprem etkileri altındaki lineer olmayan davranışının belirlenmesi amacıyla geliştirilen Çok Modlu Uyarlamalı Yük Artımı Yönteminin (ÇMUYAY) varsayımları, esasları, matematik formülasyonu ve hesap adımları ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Geliştirilen ÇMUYAY, belirli sabit düşey yükler ve artan modal yatay yükler için sistemin *ikinci merteye elasto-plastik teoriye* göre hesabını esas almakta ve modal yatay yüklerin kullanılması nedeniyle *serbest titreşim analizini* de içermektedir.

### 2.1 Varsayımlar

Bu bölümde, yöntemin geliştirilmesinde yapılan varsayımlar verilmiştir.

- Sistem, düzlem çubuk sistemdir.
- Bernoulli-Navier hipotezi geçerlidir. Buna göre düzlem kesitler şekil değiştirdikten sonra da düzlem kalırlar.
- Eksenel kuvvet ve eğilme momenti etkisindeki çubuk elemanlarda iç kuvvet-şekil değiştirme bağıntılarının Şekil 2.1’de görüldüğü gibi iki doğru parçası ile idealleştirilebileceği varsayılmaktadır.



Şekil 2.1 İdealleştirilmiş iç kuvvet-şekil değiştirme bağıntısı

- Lineer olmayan eğilme ve uzama şekildeğişirmelerinin plastik kesit adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bu kesitler dışındaki bölgelerde ve kesme kuvveti etkisi altında sistemin lineer-elastik davrandığı varsayılmaktadır. Böylece, tek eksenli basit eğilme etkisindeki düzlem çubuk sistemlere uygulanabilen plastik mafsal hipotezi, bileşik iç kuvvet durumunu da içerecek şekilde genişletilmiş olmaktadır.
- Akma koşullarının eğilme momentine ve normal kuvvete bağlı olduğu, kesme kuvvetinin akma koşullarına etkisinin terk edilebileceği varsayılmaktadır. Bileşik eğilme etkisindeki elamanlara ait akma koşulları doğru parçalarından oluşacak şekilde idealleştirilmekte ve akma vektörünün akma yüzeyine dik olduğu varsayılmaktadır.
- Kolon elemanları için *ikinci mertebe teorisi*, normal kuvvetin küçük olduğu giriş elemanları için ise *birinci mertebe teorisi* uygulanmaktadır. *İkinci mertebe teorisinde* geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi gözönüne alınmakta, geometrik uygunluk koşullarına etkisi terk edilmektedir.
- Sistemin şekildeğişirmesi sırasında yüklerin doğrultularının değişmediği varsayılmaktadır.
- Sistemi oluşturan çubuklar doğru eksenli, sabit enkesitlidir ve normal kuvvet çubuk boyunca sabittir. Bu koşullara uymayan çubuklar yeter derecede küçük parçalara ayrılarak sözkonusu koşullar yaklaşık olarak sağlatılabilir.
- Yayılı yükler yeter sayıda statikçe eşdeğer tekil kuvvetlere dönüştürülerek hesap yapılmaktadır.
- Kayma şekildeğişirmelerinin etkisi ihmal edilmektedir.

Ayrıca, serbest titreşim analizinde yapılan varsayımlar aşağıda verilmiştir:

- Kütlelerin kat döşemeleri seviyesinde toplanabileceği varsayılmaktadır.
- Atalet kuvvetlerinin yatay öteleme bileşeni gözönüne alınmakta, düşey atalet kuvvetleri ile açısız atalet kuvvetleri terk edilmektedir.

## 2.2 Yöntemin Esasları

Geliştirilen Çok Modlu Uyarlamalı Yük Artımı Yöntemi (ÇMUYAY), belirli sabit düşey yükler ve artan modal yatay yükler için sistemin *ikinci mertebe elasto-plastik teoriye* göre hesabını esas almaktadır. Yöntemde yüksek mod etkilerini gözönüne almak amacıyla *davranış spektrumu analizinin* esaslarından yararlanılmaktadır.

Yöntemde sabit düşey yükler için hesap öngörüldüğünden, çubuklarda düşey yüklerden oluşan normal kuvvet değerleri esas alınarak, *ikinci mertebe teorisine* göre hesap lineerleştirilmektedir. Özellikle çok katlı yapılarda artan yatay yükler ile kolonlardaki normal kuvvetler önemli oranda değişim gösterebilmektedir. Bu durumda analiz sonunda bulunan normal kuvvetler için hesap tekrarlanabilir. Ancak katlardaki normal kuvvetlerin toplamı sabit kaldığı sürece, normal kuvvetlerdeki değişimin *ikinci mertebe* etkileri üzerindeki etkisi terk edilebilecek mertebede olmaktadır [22,23].

Kesitlerdeki akma koşullarını ifade eden akma eğrileri (karşılıklı etki diyagramları) de, gerçeğe yakın bir şekilde, doğru parçaları ile idealleştirilerek lineerleştirilmektedir. Bölüm 2.1'de yapılan varsayımlar altında, plastikleşen kesitlerin oluşumu arasındaki lineer davranış bölgelerinde yük artımı uygulanmasına gerek kalmadan, her plastik kesitin oluşumuna karşı gelen yatay yük artımı ve davranış büyüklükleri (kesit tesirleri, yerdeğiştirmeler, plastik dönmeler vb.) doğrudan doğruya belirlenebilmektedir. Böylece plastik kesitlerin oluşumu ve yapı davranışı ayrıntılı olarak izlenebilmektedir.

Sistemde her plastik kesitin oluşumundan sonra o kesitteki bir plastik şekildeğiştirme bileşeni yeni bir bilinmeyen olarak alınmakta ve plastikleşen kesitteki akma koşulunu ifade eden yeni bir lineerleştirilmiş denklem, mevcut denklem takımına ilave edilmektedir. Böylece, her yük artımında (her plastik kesitin oluşumunda) denklem takımının yeniden kurulup çözülmesine gerek kalmadan, yeni bilinmeyene ait satır ve kolonun indirgenmesiyle, plastik şekildeğiştirmeleri (plastik dönme vb.) de içeren çözüm etkin olarak elde edilmektedir. Ayrıca iç kuvvet

durumunun akma koşulunu sağladığını ifade eden ilave denklemlerin kullanılması ile bileşik eğilme etkisindeki plastik kesitlerde eğilme ve uzama şekildeğiştirmeleri ve bunlar arasındaki etkileşim de gözönüne alınmış olmaktadır.

Artan dış yükler altında plastikleşen kesitlerdeki iç kuvvetler akma koşullarını sağlayacak şekilde değişebilmekte, buna karşılık iç kuvvetler doğrultusunda sonlu plastik şekildeğiştirmeler meydana gelmektedir. Bileşik eğilme etkisindeki bir plastik kesitte oluşan eğilme ve uzama plastik şekildeğiştirmeleri akma vektörünün akma eğrisine dik olması özelliğinden yararlanarak, tek bir plastik şekildeğiştirme parametresine bağlı olarak ifade edilebilmektedirler. Böylece yöntemde, plastik şekildeğiştirmeleri ifade eden bilinmeyen sayısı minimum düzeyde tutulmaktadır.

Yöntemin özelliği nedeniyle sistemin lineer olmayan hesabı, her plastik kesitin oluşumundan sonra, plastikleşen kesitler içeren sistemin birim yük artımı için hesabına dönüştürülmüş olmaktadır. Bundan yararlanarak geliştirilen yöntemde, ardışık iki plastik kesitin oluşumu arasındaki lineer davranış bölgesinde, plastikleşen kesitler içeren sistemin modal özellikleri kullanılarak *davranış spektrumu analizi* esasları ile yüksek mod etkileri gözönüne alınmaktadır. Buna göre, hesabın başlangıcında ve her yük artımı sonunda *serbest titreşim analizi* yapılarak yeter sayıda mod için modal yatay yük dağılımları belirlenmektedir. Bunlar bir önceki adımdaki yüklere eklenerek ilgili adıma ait birim modal yük dağılımları elde edilmektedir. Bu yükler bağımsız olarak sisteme etkitilmekte ve her dağılım için yukarıda açıklandığı gibi çözüm yapılarak birim modal davranış büyüklükleri (kesit tesirleri, yerdeğiştirmeler, plastik dönmeler vb.) belirlenmektedir. Bu birim modal davranış büyüklükleri ilgili adıma ait uygun modal birleştirme kuralı ile birleştirilerek akma koşullarında kullanılmakta, böylece modların etkileşimi de gözönüne alınmaktadır. *Serbest titreşim analizi*, modal yatay yük dağılımlarının hesabı ve birim modal davranış büyüklüklerinin birleştirilmesi sırasıyla Bölüm 2.4.2, Bölüm 2.4.3 ve Bölüm 2.4.4' de açıklanmıştır.

Her plastik kesitin oluşumundan sonra, sisteme ait genişletilmiş *ikinci mertebe* rijitlik matrisi ilgili dinamik serbestlikler için yoğunlaştırılarak *serbest titreşim analizi* yapılmaktadır. Böylece, sistemin modal özelliklerinin belirlenmesinde de *ikinci mertebe* etkileri gözönüne alınmaktadır.

### 2.3 Akma Koşulları ve Akma Vektörü

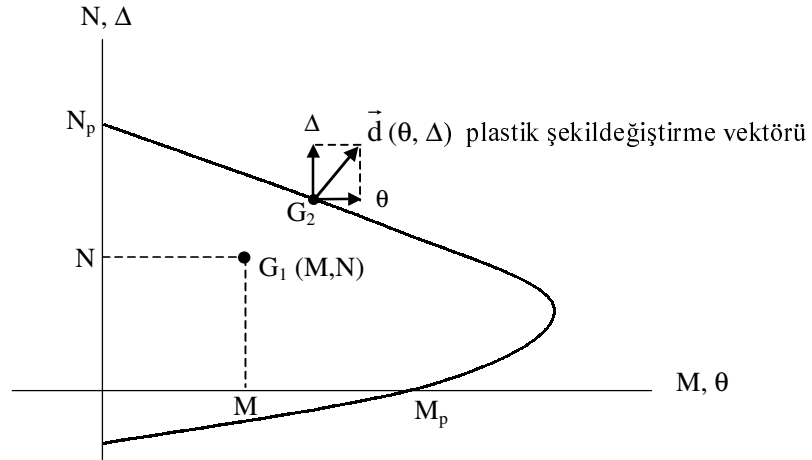
Bu bölümde, geliştirilen ÇMUYAY'nin matematik formülasyonunda önemli yer tutan akma koşulları ve akma vektörü ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Yeterli düzeyde süneklığe sahip olan yapı sistemlerinde, bir kesitteki iç kuvvetler artarak akma koşulunun belirlediği sınır duruma erişince kesitin taşıma gücü sona erer ve iç kuvvetler doğrultularında sonlu plastik şekil değiştirmeler meydana gelir.

Kesme kuvvetinin akma koşuluna etkisi ihmal edildiğinde, düzlem çubuk sistemlerdeki akma koşulu genel olarak,

$$K(M,N) = 0 \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu bağıntıda  $K(M,N)$  eğilme momenti  $M$  ve normal kuvvet  $N$ 'nin lineer olmayan bir fonksiyonunu göstermektedir. Akma koşulunun geometrik ifadesi Şekil 2.2'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Akma eğrisi ve plastik şekil değiştirme vektörü

Lineer olmayan şekil değiştirmelerin plastikleşen kesitlerde toplandığı ve bu kesitler dışında sistemin lineer-elastik davrandığı varsayıldığından, (2.1) akma koşulunun tanımladığı akma eğrisi içindeki bir iç kuvvet durumu ( $G_1$ ) için

şekildeğiştirmeler lineer-elastiktir. İç kuvvet durumunun akma eğrisi üzerinde ( $G_2$ ) bulunması halinde kesit plastikleşmekte ve iç kuvvetler doğrultularında sonlu plastik şekildeğiştirmeler oluşmaktadır. Artan dış yüklere bağlı olarak, bir plastikleşen kesitteki iç kuvvet durumu akma eğrisi üzerinde hareket edebilir veya akma eğrisinin içine doğru yönelebilir, ancak akma eğrisinin dışına çıkamaz.

İç kuvvet durumunun akma eğrisi üzerinde kalma özelliği

$$dK = \frac{\partial K}{\partial M} dM + \frac{\partial K}{\partial N} dN = 0 \quad (2.2)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Bu bağıntıda  $\frac{\partial K}{\partial M}$  ve  $\frac{\partial K}{\partial N}$   $K(M,N)$  fonksiyonunun M ve N'ye göre kısmi türevlerini göstermektedir.

Bileşik eğilme durumunda plastik kesitlerde toplandığı varsayılan plastik şekildeğiştirmeler  $\vec{d}(\theta, \Delta)$  akma vektörü ile tanımlanırlar. Akma vektörünün  $\theta$  ve  $\Delta$  bileşenleri sırasıyla M eğilme momenti ve N normal kuvveti doğrultularındaki sonlu plastik şekildeğiştirmeleri göstermektedir.

*İdeal elasto-plastik* malzemeden yapıldığı varsayılan homojen kesitlerde akma vektörünün akma eğrisine dik olduğu bilinmektedir [50,51]. Buna karşılık bir ve iki eksenli bileşik eğilme etkisindeki betonarme kesitlerde, diklik özelliği bazı koşullar altında ve yaklaşık olarak geçerli sayılabilir [52].

Akma vektörünün akma eğrisine dik olduğunun varsayılması halinde, iç kuvvetler doğrultularındaki plastik şekil değiştirme bileşenleri

$$\theta = \phi \frac{\partial K}{\partial M} \quad , \quad \Delta = \phi \frac{\partial K}{\partial N} \quad (2.3)$$

şeklinde tek bir  $\phi$  plastik şekil değiştirme parametresine bağlı olarak ifade edilebilirler.

Bu çalışmada, malzeme bakımından lineer olmayan davranışı lineerleştirmek amacıyla akma eğrisinin doğru parçalarından oluşacak şekilde idealleştirilmesi öngörülmektedir. Buna göre, akma koşulu için

$$K(M,N) \cong A_1 M + A_2 N + B = 0 \quad (2.4)$$

lineer bağıntısı yazılabilir. Burada  $A_1$ ,  $A_2$  ve  $B$  malzeme karakteristiklerine, enkesit özelliklerine, betonarme kesitlerde boyuna donatının miktarına ve yerleşim düzenine göre belirlenen katsayıları ve sabiti göstermektedir.

(2.4) bağıntısı ile verilen lineerleştirilmiş akma koşulu için iç kuvvet durumunun akma doğrusu üzerinde kalma özelliği

$$\Delta K = A_1 \Delta M + A_2 \Delta N = 0 \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada,  $\Delta M$  ve  $\Delta N$  yük artımına karşılık gelen eğilme momenti ve normal kuvvet artımlarıdır. Buna göre iç kuvvetler doğrultularında oluşan  $\theta$  ve  $\Delta$  plastik şekil değiştirme bileşenleri

$$\theta = \phi \frac{\partial K}{\partial M} = \phi A_1 \quad , \quad \Delta = \phi \frac{\partial K}{\partial N} = \phi A_2 \quad (2.6)$$

şeklinde tek bir  $\phi$  parametresine bağlı olarak ifade edilir.

Akma vektörünün  $|\vec{d}| = 1$  olacak şekilde normleştirilmesi halinde, bu birim vektörü tanımlayan  $a_1$ ,  $a_2$  katsayıları için

$$a_1 = \frac{A_1}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} \quad , \quad a_2 = \frac{A_2}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} \quad (2.7)$$

elde edilir. Bu durumda (2.4) akma koşulu

$$b = \frac{B}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} \quad (2.8)$$

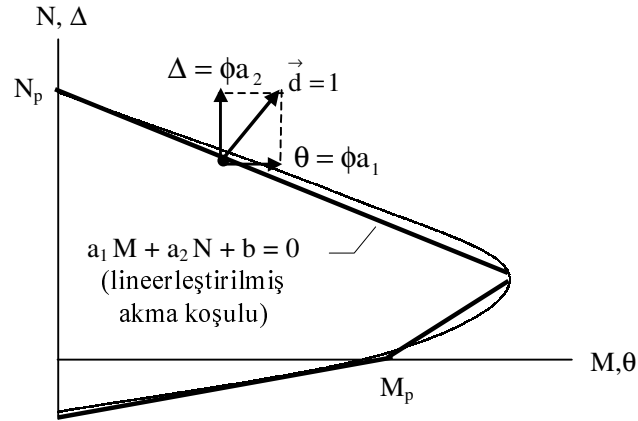
olmak üzere

$$K(M,N) \cong a_1 M + a_2 N + b = 0 \quad (2.9)$$

şeklini alır. Buna bağlı olarak plastik şekildeğiştirme bileşenleri

$$\theta = \phi a_1 \quad , \quad \Delta = \phi a_2 \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Lineerleştirilmiş akma koşulu ve birim akma vektörü

## 2.4 Yöntemin Matematik Formülasyonu

Geliştirilen Çok Modlu Uyarlamalı Yük Artımı Yöntemi (ÇMUYAY), belirli sabit düşey yükler ve artan yatay yükler için sistemin *ikinci mertebe elasto-plastik teoriye* göre hesabını esas almaktadır. Yöntemin özelliği ile, sistemin lineer olmayan hesabı her plastik kesitin oluşumundan sonra plastikleşen kesitler içeren sistemin birim yük artımı için hesabına dönüştürülmüş olmaktadır. Bundan yararlanarak geliştirilen yöntemde, ardışık iki plastik kesitin oluşumu arasındaki lineer davranış bölgesinde, plastikleşen kesitler içeren sistemin modal özellikleri kullanılarak *davranış spektrumu analizi* esasları ile yüksek mod etkileri gözönüne alınmaktadır.



Bu bölümde, sistemin birim yük artımı için lineer olmayan hesabına ve ardışık iki plastikleşen kesit arasında uygulanan *davranış spektrumu analizi* yaklaşımına ait matematik formülasyonlar açıklanmıştır.

#### 2.4.1 Sistemin Birim Yük Artımı için Lineer Olmayan Hesabı

Bu bölümde, üzerinde  $\bar{m}$  sayıda plastikleşen kesit bulunan sistemin birim yük artımı ( $\Delta P=1$ ) için hesabı açıklanmıştır. Birim yük artımı yatay yük veya düşey yük gruplarından oluşabilmektedir. Ancak bu çalışmada geliştirilen yöntemde, sabit düşey yükler altında artan modal yatay yük dağılımları için hesap öngörüldüğünden, birim yük artımı, modal yatay yük dağılımlarını ifade etmektedir. Gözönüne alınan düşey yükler altında plastik kesitin oluşması durumunda, yöntemin genel esasları çerçevesinde, önce öngörülen düşey yük seviyesine kadar düşey yük artımı uygulanarak hesap yapılabilmekte ve daha sonra yatay yük artımına başlanabilmektedir. Modal yatay yük dağılımlarının belirlenmesi ise Bölüm 2.4.3'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Üzerinde  $\bar{m}$  sayıda plastikleşen kesit bulunan sistemin birim yük artımı ( $\Delta P=1$ ) için hesabında, Matris Yerdeğiştirme Yönteminden [54] yararlanılmıştır. Bu yöntemde, plastikleşen kesitleri gözönüne almak üzere gerekli değişiklikler yapıldığında bilinmeyenler,

- a) düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri,
- b) plastikleşen kesitlerdeki  $\bar{m}$  adet  $\phi$  plastik şekildeğiştirme parametresi

olmak üzere iki grupta toplanmaktadır. Bu bilinmeyenleri belirlemek için kullanılan denklemler de

- a) düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri doğrultularında yazılan moment ve izdüşüm denge denklemleri
- b) plastikleşen kesitlerdeki iç kuvvet durumlarının akma koşullarını sağladığını ifade eden,  $\bar{m}$  sayıda akma koşulu denklemi

olmak üzere iki grupta toplanabilirler.

### 2.4.1.1 Denge Denklemleri

Düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri doğrultularında yazılan moment ve izdüşüm denge denklemlerinin sistem eksen takımındaki matris gösterilimi

$$[S_{dd}][d] + [S_{d\phi}] [\phi] + [P_o] = [q] \quad (2.11)$$

şeklinde. Bu denklemlerdeki matrislerin tanımları ve elde edilişleri aşağıda açıklanmıştır.

$[S_{dd}]$  : Sistemin elastik rijitlik matrisidir.  $n$  sayıda düğüm noktası içeren bir düzlem çubuk sistemde  $[S_{dd}]$  matrisi  $3n \times 3n$  boyutundadır. Lineer elastik malzemeden yapılmış sistemlerde, *Betti Karşılıklı Teoremi* uyarınca bu matris esas köşegenine göre simetriktir. Bu matrisin  $(S_{dd})_{\alpha\beta}$  sayılı elemanı, dış yükler ve diğer yerdeğiştirme bileşenleri sıfır iken,  $\beta$  sayılı yerdeğiştirme bileşeninin birim değerinden dolayı  $\alpha$  sayılı yerdeğiştirme bileşeni doğrultusunda oluşan uç kuvvetini göstermektedir.  $[S_{dd}]$  matrisi, sistemi oluşturan çubukların sistem eksen takımına dönüştürülmüş rijitlik matrislerinin ( $[k]_{ixix}$ ,  $[k]_{ixjx}$ ,  $[k]_{jxix}$ ,  $[k]_{jxjx}$ ) ilgili yerlere yazılması ve üst üste gelen alt matrislerin toplanması ile elde edilmektedir (Şekil 2.4). Çubuk rijitlik matrislerinin elde edilmesine ait detaylı bilgi [54]'de bulunabilir.

$$[S_{dd}] = \begin{array}{cccccc} \textcircled{1} & \cdot & \textcircled{i} & \cdot & \textcircled{j} & \cdot & \textcircled{n} \\ \hline & & & & & & \textcircled{1} \\ & & & & & & \cdot \\ & & \sum [k]_{ixix} & & [k]_{ixjx} & & \textcircled{i} \\ & & & & & & \cdot \\ & & [k]_{jxix} & & \sum [k]_{jxjx} & & \textcircled{j} \\ & & & & & & \cdot \\ & & & & & & \textcircled{n} \end{array}$$

Şekil 2.4  $[S_{dd}]$  sistem rijitlik matrisinin elde edilmesi

$[P_o]$  : Sistemde düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri sıfır iken, yalnız çubuklara etkiyen dış yüklerden dolayı sistem eksen takımında meydana gelen çubuk uç kuvvetlerini ifade eden  $3n$  boyutunda bir kolon matristir. Bu matris, üzerinde yük bulunan çubukların sistem eksen takımına dönüştürülmüş uç kuvvetleri matrislerinin ( $[P_o]_{ix}$  ,  $[P_o]_{jx}$  ) kendilerine ait yerlere yazılması ve üst üste gelen terimlerin toplanması ile elde edilir.

$$[P_o] = \begin{bmatrix} \cdot & \textcircled{1} \\ \cdot & \cdot \\ [P_o]_{ix} & \textcircled{i} \\ \cdot & \cdot \\ [P_o]_{jx} & \textcircled{j} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \textcircled{n} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

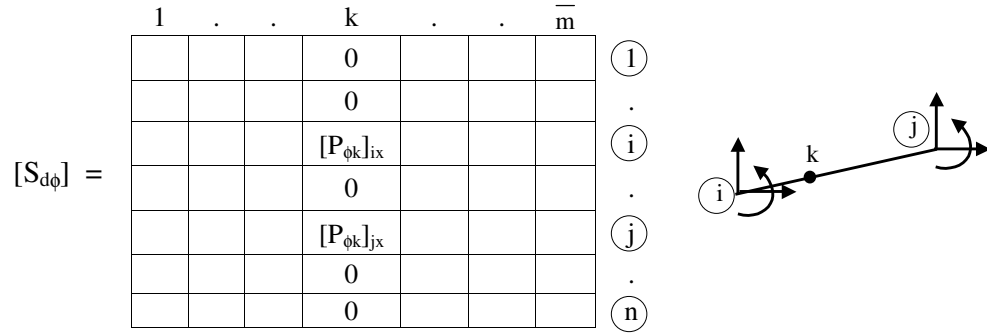
$[q]$  : Düğüm noktasına etkiyen dış yüklerin sistem eksen takımındaki bileşenlerine ait alt matrislerden ( $[q]_{ix}$ ) meydana gelen  $3n$  elemanlı bir kolon matristir.

$$[q] = \begin{bmatrix} [q]_{ix} & \textcircled{1} \\ \cdot & \cdot \\ [q]_{ix} & \textcircled{i} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ [q]_{ix} & \textcircled{n} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$[\phi]$  : Plastikleşen kesitlerdeki bilinmeyen plastik şekildeğiştirme parametrelerinden oluşan bir kolon matristir. Üzerinde  $\bar{m}$  adet plastikleşen kesit bulunan bir sistemde  $[\phi]$  matrisi aşağıdaki gibidir.

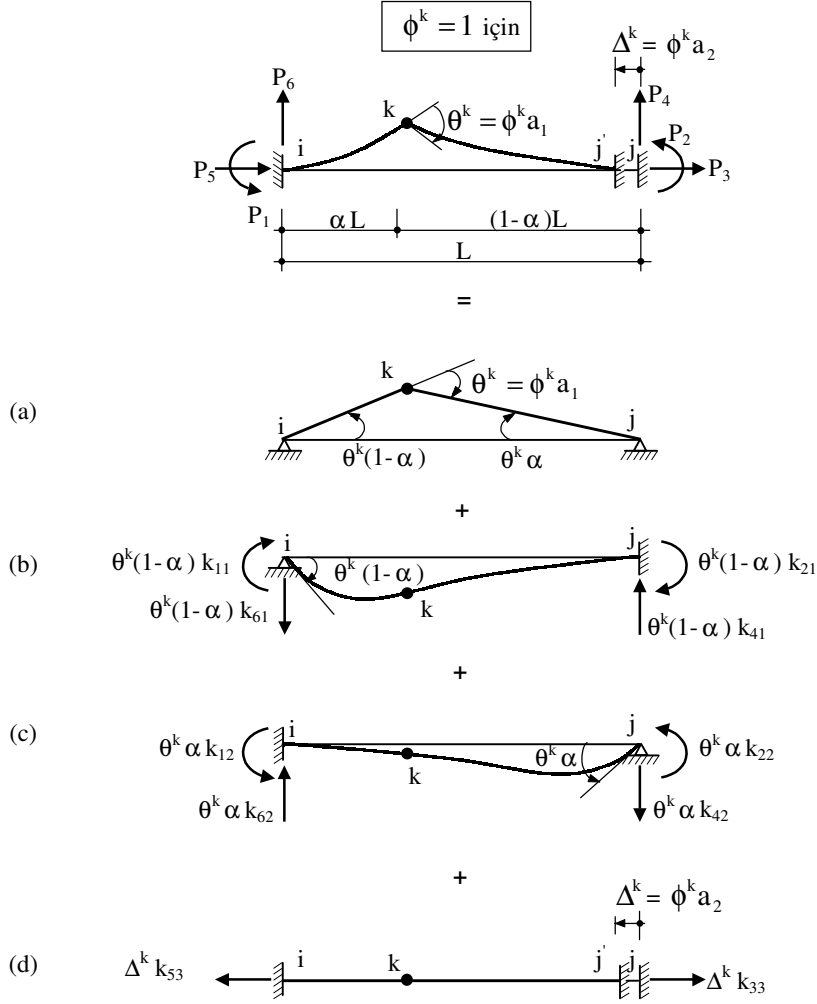
$$[\phi] = \begin{bmatrix} \phi^1 & 1 \\ \cdot & \cdot \\ \phi^k & k \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \phi^{\bar{m}} & \bar{m} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$[S_{d\phi}]$  : Plastikleşen kesitlerdeki birim plastik şekildeğiştirmelerin denge denklemlerine etkisini ifade eden bir matristir. Üzerinde  $\bar{m}$  sayıda plastikleşen kesit bulunan  $n$  düğüm noktalı bir düzlem çubuk sistemde bu matrisin boyutu  $3n \times \bar{m}$  dir.  $[S_{d\phi}]$  matrisinin  $k$  sayılı kolonu,  $k$  sayılı plastikleşen kesite ait plastik şekildeğiştirme parametresinin  $\phi^k = 1$  değeri için, diğer plastikleşen kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametreleri ve düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri sıfır iken, düğüm noktalarına etkiyen uç kuvvetlerinden oluşmaktadır. Bu matrisin  $k$  sayılı kolonu, üzerinde  $k$  sayılı plastikleşen kesit bulunan  $ij$  çubuğuna ait uç kuvvetleri matrislerinin  $([P_{\phi k}]_i, [P_{\phi k}]_j)$  sistem eksen takımına dönüştürüldükten sonra ilgili yerlere yazılması ile elde edilmektedir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5  $[S_{d\phi}]$  matrisinin elde edilmesi

$[P_{\phi k}]_i$  ve  $[P_{\phi k}]_j$  matrisleri üzerinde plastikleşen kesitler bulunan elemanlarda plastik şekildeğiştirme parametresinin  $(\phi^k)$  birim değerinden oluşan uç kuvvetleri Şekil 2.6'da gösterilen dört durumun süperpozisyonu ile elde edilebilmektedir. Uç kuvvetlerinin pozitif yönleri Şekil 2.6'da  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$  ile gösterilmiştir. Uç yerdeğiştirmelerinin pozitif yönleri de ilgili uç kuvvetleri ile aynı seçilmiştir. Plastik şekildeğiştirmelerin ise ilgili kesit tesirleri ile ters yönde oldukları durum pozitif olarak kabul edilmiştir.



$k_{\alpha\beta}$  :  $\beta$  sayılı yerdeğiştirme bileşeninin birim değerinden dolayı,  $\alpha$  sayılı yerdeğiştirme bileşeninin olduğu yer ve doğrultusunda oluşan uç kuvvetidir.

Şekil 2.6 Plastik şekildeğiştirme parametresinin birim değerinden oluşan uç kuvvetleri

Şekil 2.6'da gösterilen durumların süperpozisyonu ile elde edilen  $[P_{\phi^k}]_i$  ve  $[P_{\phi^k}]_j$  matrisleri aşağıda verilmiştir.

$$[P_{\phi^k}]_i = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^k [\alpha k_{12} - (1-\alpha)k_{11}] \\ -\Delta^k k_{53} \\ \theta^k [\alpha k_{62} - (1-\alpha)k_{61}] \end{bmatrix} \quad (2.15-a)$$

$$[P_{\phi^k}]_j = \begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^k [\alpha k_{22} - (1-\alpha)k_{21}] \\ \Delta^k k_{33} \\ \theta^k [(1-\alpha)k_{41} - \alpha k_{42}] \end{bmatrix} \quad (2.15-b)$$

Doğru eksenli prizmatik bir çubukta *birinci ve ikinci merteye* teorilerine ait  $[P_{\phi k}]_i$  ve  $[P_{\phi k}]_j$  matrisleri aşağıda verilmiştir.

*Birinci merteye* teorisine göre  $[P_{\phi k}]_i$  ve  $[P_{\phi k}]_j$  matrisleri (2.16-a) ve (2.16-b)'de verilmiştir.

$$[P_{\phi k}]_i = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^k [(6\alpha - 4)EI / L] \\ -\Delta^k EF / L \\ \theta^k [(12\alpha - 6)EI / L^2] \end{bmatrix} \quad (2.16-a)$$

$$[P_{\phi k}]_j = \begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^k [(6\alpha - 2)EI / L] \\ \Delta^k EF / L \\ -\theta^k [(12\alpha - 6)EI / L^2] \end{bmatrix} \quad (2.16-b)$$

*İkinci merteye* teorisine göre  $[P_{\phi k}]_i$  ve  $[P_{\phi k}]_j$  matrisleri (2.17-a) ve (2.17-b)'de verilmiştir.

$$[P_{\phi k}]_i = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\theta^k [-(1-\alpha) b_{11} + \alpha b_{12}] \\ -\Delta^k EF / L \\ \theta^k (2\alpha - 1) (b_{11} + b_{12}) / L \end{bmatrix} \quad (2.17-a)$$

$$[P_{\phi k}]_j = \begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^k [\alpha b_{11} - (1-\alpha) b_{12}] \\ \Delta^k EF / L \\ -\theta^k (2\alpha - 1) (b_{11} + b_{12}) / L \end{bmatrix} \quad (2.17-b)$$

(2.17) bağıntılarındaki  $b_{11}$ ,  $b_{12}$  ifadeleri (2.18)'de tanımlanmıştır.

$$b_{11} = \frac{EI}{L} \cdot \frac{\varphi \sin \varphi - \varphi^2 \cos \varphi}{2(1 - \cos \varphi) - \varphi \sin \varphi}, \quad b_{12} = \frac{EI}{L} \cdot \frac{\varphi^2 - \varphi \sin \varphi}{2(1 - \cos \varphi) - \varphi \sin \varphi} \quad (2.18)$$

Bu bağıntılardaki  $\varphi$  parametresi (2.19)'da tanımlanmıştır.

$$\varphi = L \sqrt{\frac{|N|}{EI}} \quad (2.19)$$

Burada,  $N$  çubuğun basınç olan normal kuvveti,  $EI$  çubuğun eğilme rijitliğidir.

### 2.4.1.2 Plastikleşen Kesitlerdeki Akma Koşulları

Plastikleşen kesitlerdeki akma koşulları  $\Delta P = 1$  yük artımı sırasında plastikleşen kesitlerdeki iç kuvvetlerin akma koşullarını sağladığını ifade eden denklemlerdir. Akma koşulları tüm sistem için matris formunda yazılırsa

$$[S_{\phi d}] [d] + [S_{\phi\phi}] [\phi] + [P_{\phi o}] = [0] \quad (2.20)$$

şeklini alır. Bu bağıntıda yer alan matrislerin tanımları ve elde edilişleri aşağıda açıklanmıştır.

$[S_{\phi d}]$  : Dış yüksüz sistemde plastik şekildeğiştirmeler sıfır iken, yalnız düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenlerinden dolayı plastikleşen kesitlerde oluşan iç kuvvetlerin akma koşuluna etkisini içeren bir matristir. Üzerinde  $\bar{m}$  sayıda plastikleşen kesit bulunan  $n$  düğüm noktalı bir düzlem çubuk sistemde bu matris ( $[S_{\phi d}]$  matrisi)  $\bar{m} \times 3n$  boyutundadır. Bu matrisin  $\beta$  sayılı kolonu, sistemdeki  $\beta$  sayılı yerdeğiştirme bileşeni değeri bir, diğerleri sıfır iken bileşik eğilme etkisindeki plastik kesitlerde

$$a_1 \Delta M + a_2 \Delta N \quad (2.21)$$

iç kuvvet değişimlerinin alt alta yazılması ile elde edilmektedir. Akma vektörünün akma yüzeyine dik olduğunun varsayılması durumunda *Betti Karşılık Teoremi* uyarınca,

$$[S_{\phi d}] = [S_{d\phi}]^T \quad (2.22)$$

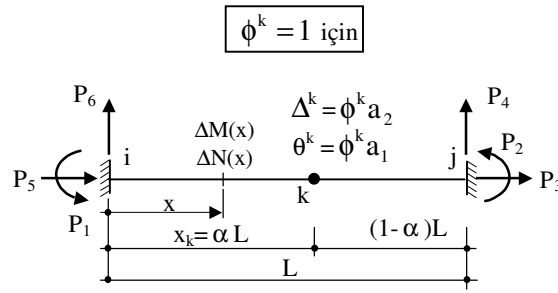
olduğundan,  $[S_{\phi d}]$  matrisinin ayrıca hesaplanmasına gerek olmamaktadır.

$[S_{\phi\phi}]$  :  $\bar{m} \times \bar{m}$  boyutunda bir kare matristir. Bu matrisin  $k$  sayılı kolonu, dış yüksüz sistemde düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri sıfır iken,  $k$  sayılı plastikleşen kesitteki plastik şekildeğiştirme parametresinin birim değeri için tüm plastikleşen kesitlerdeki

$$a_1 \Delta M + a_2 \Delta N \quad (2.23)$$

iç kuvvet değişimini göstermektedir. *Betti Karşılık Teoremine* göre  $[S_{\phi\phi}]$  matrisi esas köşegenine göre simetriktir. Sistemi oluşturan çubukların her birinde birden fazla plastikleşen kesit bulunmadığı sürece,  $[S_{\phi\phi}]$  matrisinin sadece esas köşegeni üzerindeki terimleri sıfırdan farklıdır.

Sol ucundan  $x_k$  uzaklığındaki bir noktada bileşik eğilme etkisindeki  $k$  sayılı plastikleşen kesiti içeren bir  $ij$  çubuğunda (Şekil 2.7), plastik şekildeğiştirme parametresinin birim değerinden dolayı, sol ucundan  $x$  uzaklığındaki herhangi bir kesitte meydana gelen  $\Delta M$  ve  $\Delta N$  iç kuvvetlerinin *birinci merteye* ve *ikinci merteye* teorilerine ait ifadeleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.7 Üzerinde plastikleşen kesit bulunan çubuk

*Birinci merteye teorisi için*  $\Delta M$  ve  $\Delta N$  iç kuvvetleri

$$\Delta M = \frac{x}{L} P_2 - \left(1 - \frac{x}{L}\right) P_1 \quad , \quad \Delta N = P_5 \quad (2.24)$$

şeklinde hesaplanırlar. Bu bağıntılarda  $L$  çubuk boyunu,  $P_1$ ,  $P_2$  ve  $P_5$  terimleri (2.15a-b)'de verilen  $[P_{\phi k}]_i$  ve  $[P_{\phi k}]_j$  uç kuvvetleri matrislerinin ilgili elemanlarını göstermektedir.



İkinci merteye teorisi için  $\Delta M$  ve  $\Delta N$  iç kuvvetleri

$$\begin{aligned}
 x \leq \alpha L \text{ için : } \Delta M(x) &= \frac{P_2 \cdot \sin(\varphi \cdot \frac{x}{L}) - P_1 \cdot \sin(\varphi \cdot (1 - \frac{x}{L}))}{\sin \varphi} - |N| \cdot (1 - \alpha) \cdot x \cdot \theta^k \\
 x > \alpha L \text{ için : } \Delta M(x) &= \frac{P_2 \cdot \sin(\varphi \cdot \frac{x}{L}) - P_1 \cdot \sin(\varphi \cdot (1 - \frac{x}{L}))}{\sin \varphi} - |N| \cdot (L - x) \cdot \alpha \cdot \theta^k \\
 0 \leq x \leq L \text{ için : } \Delta N(x) &= P_5
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

şeklinde hesaplanırlar. Bu bağıntılarda,  $N$  çubuktaki basınç kuvvetini göstermektedir ve  $\alpha$  ise

$$\alpha = \frac{x_k}{L} \tag{2.26}$$

olarak tanımlanmaktadır.

$[P_{\phi 0}]$  :  $\bar{m}$  elemandan oluşan bir kolon matristir. Bu matrisin elemanları, düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri ve plastikleşen kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme parametreleri sıfır iken, yalnız dış yüklerden dolayı plastikleşen kesitlerdeki

$$a_1 \Delta M + a_2 \Delta N \tag{2.27}$$

iç kuvvet değişimlerinden oluşmaktadır.

Yukarıda açıklanan denge denklemleri ve akma koşulları birlikte yazıldığında, sisteme ait genişletilmiş denklem takımı

$$\begin{bmatrix} [S_{dd}] & [S_{d\phi}] \\ [S_{\phi d}] & [S_{\phi\phi}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [d] \\ [\phi] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [P_o] \\ [P_{\phi 0}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [q] \\ [0] \end{bmatrix} \tag{2.28}$$

şeklinde elde edilir. Buradaki katsayılar matrisi  $(3n + \bar{m}) \times (3n + \bar{m})$  boyutundadır ve esas köşegenine göre simetriktir.

### 2.4.1.3 Denklem Takımının Genişletilmesi ve Çözümü

Geliştirilen ÇMUYAY'nde her plastik kesitin oluşumundan sonra sistemin değişen rijitliği, o kesitteki plastik şekildeğişirmeleri ifade eden bir  $\phi^k$  bilinmeyeni ile bu bilinmeyene ait yeni kolon ve satırın bir önceki indirgenmiş denklem takımına eklenmesiyle elde edilen genişletilmiş denklem takımı ile ifade edilmektedir. Böylece, herhangi bir adım sonunda sistemde k sayılı plastik kesitin oluşumundan sonra,  $\Delta P^{k+1} = 1$  yük artımı için yeni sisteme ait denklem takımının yeniden kurulup çözülmesine gerek kalmamaktadır. Önceki yük artımına ait çözüm elde edilirken denklem takımının katsayılar matrisi indirgenmiş olduğundan, sadece ilave kolon ile satırın ve sabitler matrisinin indirgenmesi yeterli olmaktadır. Daha sonra  $\Delta P^{k+1} = 1$  yük artımından meydana gelen, [d] düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri matrisi ve  $[\phi]$  plastik şekildeğiştirme parametresi elde edilmektedir.

### 2.4.1.4 Çubuk Uç Kuvvetlerinin ve Diğer Kritik Kesit Tesirlerinin Hesabı

$\Delta P^{k+1} = 1$  yük artımı için bilinmeyen [d] ve  $[\phi]$  matrisleri tayin edildikten sonra, üzerinde plastikleşen kesitler bulunan bir ij çubuğunun sistem eksen takımındaki çubuk uç kuvvetleri matrisleri

$$\begin{aligned} [P]_{ix} &= [k]_{ixix} [d]_{ix} + [k]_{ixjx} [d]_{jx} + [P_o]_{ix} + [P_\phi]_{ix} [\phi]_{ij} \\ [P]_{jx} &= [k]_{jxix} [d]_{ix} + [k]_{jxjx} [d]_{jx} + [P_o]_{jx} + [P_\phi]_{jx} [\phi]_{ij} \end{aligned} \quad (2.29-a)$$

bağıntıları yardımıyla hesaplanırlar. Bu bağıntılarda

$[P_\phi]_{ix}$  : ij çubuğunda oluşan plastik kesitlere ait  $[P_\phi]_{ix}$  kolon matrislerinin yanyana yazılması ile elde edilen dikdörtgen matrisi,

$[P_\phi]_{jx}$  : ij çubuğunda oluşan plastik kesitlere ait  $[P_\phi]_{jx}$  kolon matrislerinin yanyana yazılması ile elde edilen dikdörtgen matrisi,

$[\Phi]_{ij}$  : ij çubuğu üzerindeki plastikleşen kesitlere ait bilinmeyen  $\phi^k$  plastik şekildeğiştirme parametrelerinin alt alta yazılmasından oluşan bir kolon matrisi göstermektedir.

Üzerinde plastikleşen kesit bulunmayan çubuklarda ise  $[P_\phi]_{ix}$  ,  $[P_\phi]_{jx}$  ve  $[\Phi]_{ij}$  matrisleri olmayacağından, sistem eksen takımındaki çubuk uç kuvvetleri matrisleri geleneksel

$$\begin{aligned} [P]_{ix} &= [k]_{ixix} [d]_{ix} + [k]_{ixjx} [d]_{jx} + [P_o]_{ix} \\ [P]_{jx} &= [k]_{jxix} [d]_{ix} + [k]_{jxjx} [d]_{jx} + [P_o]_{jx} \end{aligned} \quad (2.29-b)$$

bağıntıları ile hesaplanırlar.

Sistem eksen takımındaki uç kuvvetleri matrisleri belirlendikten sonra ilgili dönüştürme matrisleri kullanılarak çubuk eksen takımındaki uç kuvvetleri elde edilirler.

Uç kuvvetleri hesaplandıktan sonra, çubuk üzerindeki yüklere bağlı olan, diğer kritik kesitlerdeki kesit tesirleri çubuk denge denklemleri ile hesaplanırlar.

#### **2.4.1.5 Plastikleşen Kesitin ve Yük Artımının Belirlenmesi**

Geliştirilen ÇMUYAY'nde, sabit düşey yükler altında artan modal yatay yük dağılımları için sistemin hesabı öngörüldüğünden, bu aşamaya kadar olan işlemler serbest titreşim analizi ile belirlenen yeter sayıda modal yatay yük dağılımı için tekrarlanır. Daha sonra elde edilen birim modal davranış büyüklükleri o adım için uygun olan modal birleştirme kuralı ile birleştirilerek  $\Delta P^k=1$  yük artımına karşılık gelen davranış büyüklükleri belirlenir. Birim modal davranış büyüklüklerinin birleştirilmesi Bölüm 2.4.4'de ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Sistemin bütün kritik kesitlerdeki kesit tesirleri hesaplandıktan sonra, k+1 sayılı yük artımına karşı gelen plastik kesitin olduğu yer ve bunu meydana getiren yük parametresi belirlenir. Bunun için, plastik kesit oluşabilecek kritik kesitlerdeki

akma koşulları kullanılır. Yalnız eğilme momenti etkisindeki kesitler için (2.30-a) bağıntısından,

$$M^k + \Delta P^{k+1} \Delta M_C^{k+1} = M_p \quad (2.30-a)$$

bileşik eğilme etkisindeki kesitler için (2.30-b) bağıntısından yararlanılır.

$$a_1 (M^k + \Delta P^{k+1} \Delta M_C^{k+1}) + a_2 (N^k + \Delta P^{k+1} \Delta N_C^{k+1}) + b = 0 \quad (2.30-b)$$

Bu bağıntılarda;

$M_p$  : Kesitin eğilme momenti taşıma kapasitesini,

$M^k, N^k$  : k sayılı plastik kesitin meydana geldiği  $P^k$  yükü altında kritik kesitlerdeki eğilme momentlerini ve normal kuvvetleri göstermektedir. İlk yük artımında bunlar düşey yüklerden oluşan eğilme momentlerine ve normal kuvvetlere karşılık gelmektedirler.

$\Delta M_C^{k+1}, \Delta N_C^{k+1}$  : her bir moda ait  $\Delta P^{k+1} = 1$  yük artımından dolayı kritik kesitlerde oluşan birim modal değerlerin birleştirilmesi ile elde edilen eğilme momentlerini ve normal kuvvetleri göstermektedir.

Bütün kritik kesitler için  $\Delta P^{k+1}$  yük artımları hesaplanarak en küçük yük artımı değeri belirlenir. Böylece,  $\Delta P^{k+1}$  yük artımı değeri ve buna karşı gelen plastikleşen kesit yeri belirlenmiş olur. Bu adım sonundaki toplam yük parametresi  $P^{k+1}$  ve toplam davranış büyüklükleri  $R^{k+1}$

$$P^{k+1} = P^k + \Delta P^{k+1} \quad (2.31)$$

$$R^{k+1} = R^k + \Delta P^{k+1} \Delta R_C^{k+1} \quad (2.32)$$

bağıntıları ile elde edilirler. Bu bağıntılarda,  $R^k$  (k) sayılı plastik kesitin oluşmasına karşılık gelen davranış büyüklüklerini,  $\Delta R_C^{k+1}$  her bir moda ait  $\Delta P^{k+1} = 1$  yük artımından oluşan birim modal davranış büyüklüklerinin birleştirilmesi ile elde

edilen birleştirilmiş birim davranış büyüklüklerini ve  $R^{k+1}$  ( $k+1$ ) sayılı plastik kesitin oluşmasına karşılık gelen davranış büyüklüklerini göstermektedir.

#### 2.4.1.6 Yük Artımının Sonlandırılması

Geliştirilen ÇMUYAY'nde, Bölüm 2.1'de yapılan varsayımlar altında toplam yük artımı değeri, meydana gelen plastik kesitler nedeniyle rijitlik kaybeden sistemin stabilite yetersizliğinden dolayı daha büyük yükleri taşıyamadığı bir sınır değere ulaşır. Bu durumda genişletilmiş sistemin rijitlik matrisinin determinant değeri  $\det [S]_G \leq 0$  olmaktadır.

Geliştirilen ÇMUYAY'nden yararlanarak binaların deprem etkileri altındaki davranışı yukarıda belirtilen sınır değere kadar izlenebilmekte ve her yük artımı sonunda plastik şekildeğişirmeleri de içeren davranış büyüklükleri elde edilmektedir. Böylece, binaların farklı seviyedeki deprem etkileri altında performans esaslı tasarımına ve değerlendirilmesine olanak sağlanmaktadır [4-7].

#### 2.4.2 Serbest Titreşim Analizi

Geliştirilen ÇMUYAY'nde, yüksek mod etkilerini gözönüne almak amacıyla, ardışık iki plastikleşen kesit arasındaki lineer davranış bölgesinde *davranış spektrumu analizinin* [53] esaslarından yararlanılmaktadır. Bu nedenle, her yük artımı sonunda (her plastik kesitin oluşumundan sonra) sistemin mevcut rijitliği ile *serbest titreşim analizi* yapılarak modal özellikleri belirlenmektedir.

Bölüm 2.1'de yapılan varsayımlar altında, *serbest titreşim analizini* kısaltmak amacıyla, her plastik kesitin oluşumundan sonra genişletilmiş sistem rijitlik matrisi, kütsüz serbestlikleri için yoğunlaştırma yapılarak sadece yatay öteleme serbestliklerine karşılık gelen dinamik rijitlik matrisi  $[S]_D$  elde edilmektedir. Bu çalışmada yoğunlaştırma için, sistem rijitlik matrisinde yatay öteleme serbestliklerine karşılık gelen satırlar ve kolonlar sırasıyla en alta ve en sağa toplanmakta ve daha

sonra yoğunlaştırılması istenen serbestliklere karşılık gelen satır ve kolonlara *Gauss İndirme Yöntemi* uygulanmaktadır [54].

Dinamik rijitlik matrisi  $[S]_D$  elde edildikten sonra, sisteme ait kütle matrisi  $[m]$  kullanılarak, sistemin sönümsüz serbest titreşimini ifade eden (2.33) bağıntısının çözümü ile ilgili yük artımı adımına ait özdeğerler ( $\omega^2$ ) ve özvektörler ( $\Phi$ ) belirlenmektedir. Bu çalışmada (2.33) bağıntısının çözümünde *Jacobi İterasyonu*'ndan yararlanılmıştır [55].

$$([S]_D - \omega^2 \cdot [m]) \Phi = 0 \quad (2.33)$$

#### 2.4.3 Modal Yatay Yük Dağılımlarının Hesabı

Geliştirilen ÇMUYAY'nde, yüksek mod etkilerini gözönüne almak amacıyla, ardışık iki plastik kesitin oluşumu arasındaki davranışın lineer olmasından yararlanarak, geleneksel *davranış spektrumu analizine* benzer bir yaklaşım kullanılmıştır. Bilindiği gibi *davranış spektrumu analizinde* modal yatay yükler (modal kat kuvvetleri) (2.34-a) bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Ancak, geliştirilen yöntemde her plastik kesitin oluşumundan sonra sistemin değişen modal özellikleri gözönünde bulundurularak, yeter sayıda mod için (2.34-b) bağıntısı ile hesaplanan birim modal yatay yük dağılımları kullanılmaktadır. Buna göre her adımdaki birim modal yükler, bir önceki adımdaki birim modal yüklere eklenerek ilgili adıma ait birim modal yük dağılımları elde edilmektedir. Geliştirilen ÇMUYAY'nde modal yatay yük dağılımları ilgili adıma ait elastik spektral ivmeler ile ölçeklenmekte, böylece deprem özellikleri ve modların birbirine göre etkinliğinin sistemdeki plastikleşen kesit sayısına bağlı olarak değişimi de gözönüne alınabilmektedir.

$$F_{ij} = \Gamma_j \cdot \Phi_{ij} \cdot m_i \cdot S a_j \quad (2.34-a)$$

$$F_{ij}^{k+1} = F_{ij}^k + (\Gamma_j^{k+1} \cdot \Phi_{ij}^{k+1} \cdot m_i \cdot S a_j^{k+1}) \quad (2.34-b)$$

Bu bağıntıda,  $k$  üst indisi yük artımı adımını,  $F_{ij}^k$   $j$  nolu modda  $i$  nolu kata ait kuvveti,  $m_i$   $i$  nolu katın kütleini,  $\Phi_{ij}^{k+1}$   $j$  nolu modda  $i$  nolu kata ait özvektör bileşenini,  $Sa_j^{k+1}$   $j$  nolu moda ait elastik spektral ivmeyi göstermektedir. Bu spektral ivme değeri, sönüm oranı  $\xi$  ve  $j$  nolu titreşim periyodu  $T_j$ ' ye bağlı olarak, gözönüne alınan deprem yer hareketine ait elastik ivme spektrumundan alınmaktadır.  $\Gamma_j^{k+1}$   $j$  nolu moda ait modal katılım çarpanıdır ve

$$\Gamma_j^{k+1} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{\bar{n}} (w_i \Phi_{ij}^{k+1}) / g}{\sum_{i=1}^{\bar{n}} (w_i (\Phi_{ij}^{k+1})^2 / g)} \right] \quad (2.35)$$

bağıntısı ile belirlenebilir. Burada,  $w_i$   $i$  nolu katın ağırlığını,  $g$  yerçekimi ivmesini,  $\bar{n}$  kat adedini göstermektedir.

#### 2.4.4 Birim Modal Davranış Büyüklüklerinin Birleştirilmesi

Geliştirilen yöntemde, birim yük artımına ( $\Delta P=1$ ) karşı gelen davranış büyüklüklerinin belirlenmesi amacıyla yeter sayıda modal yatay yük dağılımı için belirlenen birim modal davranış büyüklükleri, ilgili adıma ait modal kombinasyon kuralı ile birleştirilmektedir. Bunun için sistemin titreşim periyotları göz önünde bulundurularak uygun olan modal birleştirme kuralının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada modal birleştirme kuralının belirlenmesinde ABYYHY [56]'de tanımlanan kriter esas alınmıştır. Buna göre,  $T_i < T_j$  olmak üzere, herhangi iki titreşim moduna ait periyotlar

$$T_i/T_j < 0.80 \quad \text{ise} \quad \Delta R_C^{k+1} = \sqrt{\sum_{j=1}^{\bar{M}} (\Delta R_j^{k+1})^2} \quad (2.36-a)$$

$$T_i/T_j \geq 0.80 \quad \text{ise} \quad \Delta R_C^{k+1} = \sqrt{\sum_{i=1}^{\bar{M}} \sum_{j=1}^{\bar{M}} \rho_{ij} \Delta R_i^{k+1} \Delta R_j^{k+1}} \quad (2.36-b)$$

bağıntıları ile modal birleştirme yapılmaktadır. Bu bağıntılarda,  $\bar{M}$  gözönüne alınan mod sayısı,  $\Delta R_i^{k+1}$  ve  $\Delta R_j^{k+1}$  k+1 sayılı yük artımı adımında i ve j nolu moda ait birim davranış büyüklükleri ve  $\rho_{ij}$  çapraz korelasyon katsayısıdır ve

$$\rho_{ij} = \frac{8\xi^2(1+\beta_{ij})\beta_{ij}^{3/2}}{(1-\beta_{ij}^2)^2 + 4\xi^2\beta_{ij}(1+\beta_{ij})^2} \quad (2.37)$$

bağıntısı ile belirlenmektedir. Bu bağıntıda  $\beta_{ij} = \omega_i/\omega_j$  serbest titreşim frekanslarının oranını göstermektedir.

Modal davranış büyüklüklerinin işaretleri, birleştirme işlemi sonunda daima pozitif olmaktadır. Ancak akma koşulları kullanılarak plastikleşen kesitlerin belirlenebilmesi için kesit tesirlerinin işaretlerinin gözönüne alınması gerekmektedir. Bu çalışmada, modal davranış büyüklükleri birleştirildikten sonra etkin modun işareti gözönüne alınmaktadır.

## 2.5 Çok Modlu Uyarlamalı Yük Artımı Yönteminin Hesap Adımları

Geliştirilen Çok Modlu Uyarlamalı Yük Artımı Yönteminin (ÇMUYAY) hesap adımları aşağıda verilmiştir.

1 ) Düşey hesap yükleri için sistemin hesabı yapılarak gerekli davranış büyüklükleri (kesit tesirleri, yerdeğiştirmeler vb.) belirlenir. Bu yükler altında sistemde plastikleşen kesit oluşup oluşmadığı kontrol edilir. Plastikleşen kesit olması halinde 5. ve 6. adımlarda verilen işlemler her düşey yük artımı için, düşey hesap yüklerine ulaşıncaya kadar tekrarlanır ve daha sonra yatay yük artımı için hesaba başlanır.

2 ) Sistem rijitlik matrisi, ilgili dinamik serbestlikler için Bölüm 2.4.2’de belirtildiği gibi yoğunlaştırılarak dinamik rijitlik matrisi  $[S]_D$  belirlenir. Bu matris kullanılarak serbest titreşim analizi yapılır ve (2.34) bağıntısı ile yeter sayıda titreşim modu için modal yatay yük dağılımları belirlenir.



3 ) Her bir modal yatay yük dağılımına ait yükleme matrisi  $[q]$  oluşturulur ve daha önceki adıma ait indirgenmiş katsayılar matrisinden yararlanmak suretiyle indirgenir. Daha sonra (2.11) ile verilen denklem takımı çözülerek her bir dağılıma ait birim modal bilinmeyenler matrisi  $[d]$  belirlenir. Bu bilinmeyenler kullanılarak gerekli olan diğer birim modal davranış büyüklükleri (kesit tesirleri, görelî kat ötelemeleri vb.) hesaplanır.

4 ) Bütün modlara ait davranış büyüklükleri bu adım için uygun olan modal kombinasyon kuralı (2.36a-b) ile birleştirilerek  $\Delta P^k=1$  yüklemesine ait birim davranış büyüklükleri ( $\Delta R_C^k$ ) belirlenir. Elde edilen büyüklüklere akma koşullarında kullanılmak üzere etkin moda ait büyüklüklerin işareti verilir.

5 ) Kritik kesitlerdeki lineerleştirilmiş akma koşulları (2.30a-b) kullanılarak bir sonraki adıma ait plastikleşen kesitin yeri belirlenir. (2.31) bağıntısı ile buna karşılık gelen yük parametresi ( $P^k$ ) ve (2.32) bağıntısı ile gerekli davranış büyüklükleri ( $R^k$ ) belirlenir.

6 ) Yeni oluşan k sayılı plastik kesitteki  $\phi^k$  plastik şekildeğiştirme parametresi ilave bilinmeyen olarak alınır ve bu bilinmeyene bağılı olarak Bölüm 2.4.1.2'de belirtildiği gibi belirlenen bir satır ve bir kolon, bir önceki adıma ait indirgenmiş denklem takımına ilave edilerek genişletilmiş denklem takımı  $[S]_G$  elde edilir. Daha sonra sadece yeni eklenen satır ve kolon indirgenir.

7 ) Genişletilmiş denklem takımının katsayılar matrisinin determinant değeri  $\det [S]_G$  hesaplanarak kontrol edilir ve  $\det [S]_G \leq 0$  oluncaya kadar yük artımına devam edilir. Bunun için (2). hesap adımına dönülür ve genişletilmiş denklem takımı ile aynı işlemler tekrarlanır. İkinci ve daha sonraki yük artımlarında düğüm noktalarının yerdeğiştirme bileşenleri ile birlikte, plastikleşen kesitlerdeki plastik şekildeğiştirme bileşenleri (plastik dönme, plastik boy değışmesi) de doğrudan elde edilir.

### **3. ÇMUYAY'NİN SAYISAL UYGULAMALARI İÇİN GELİŞTİRİLEN MEPARCS BİLGİSAYAR PROGRAMI**

Geliştirilen Çok Modlu Uyarlamalı Yük Artımı Yönteminin (ÇMUYAY) sayısal uygulamalarına olanak sağlamak üzere, literatür [24]'de hazırlanan PARCS bilgisayar programı, alt program ilaveleri yapılarak yeniden düzenlenmiştir. Geliştirilen yeni program MEPARCS olarak adlandırılmıştır.

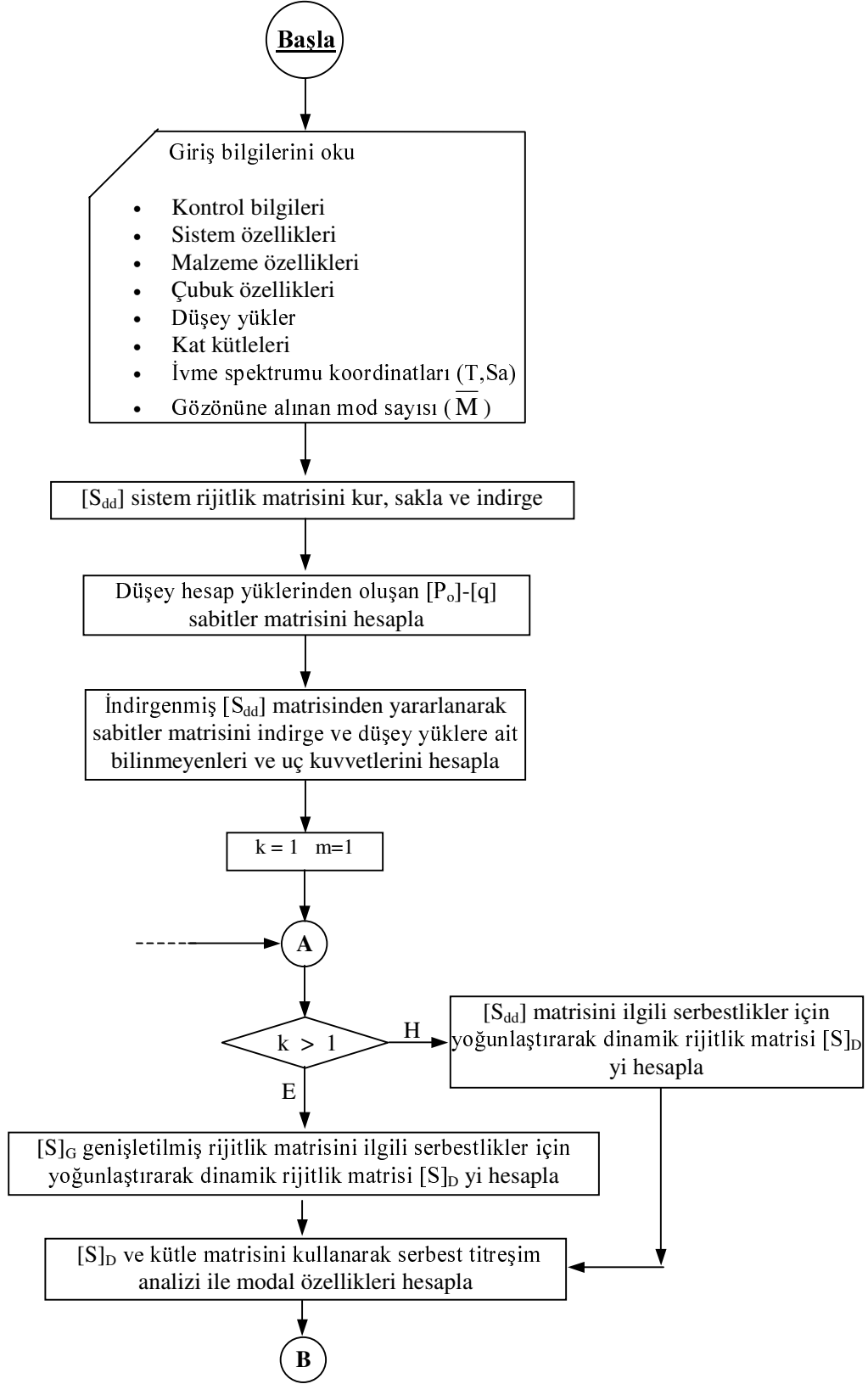
Bu bölümde, MEPARCS bilgisayar programının amacı, kapsamı, çalışma düzeni ile giriş ve çıkış bilgileri açıklanmıştır.

#### **3.1 Programın Amacı, Kapsamı ve Çalışma Düzeni**

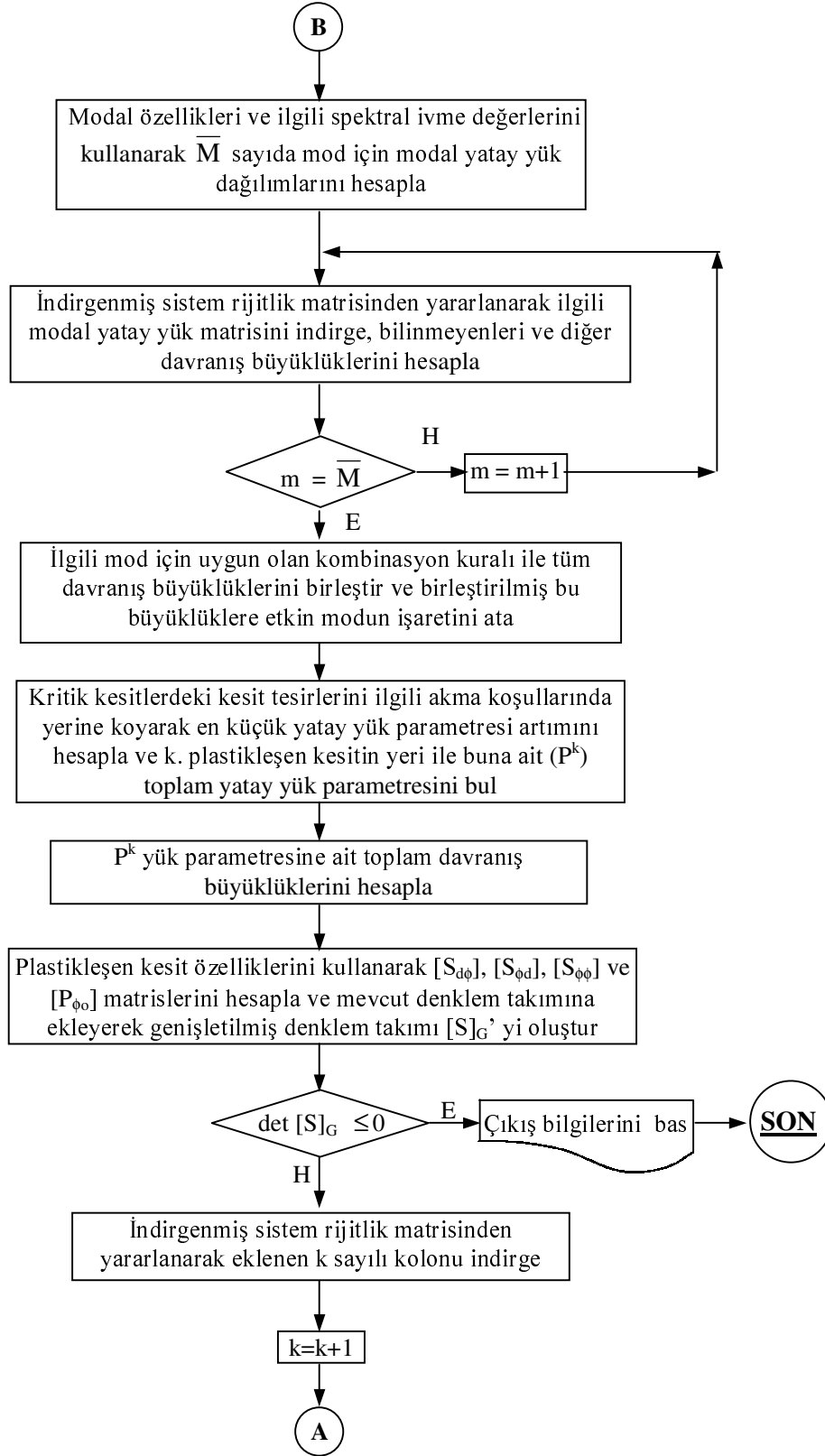
MEPARCS bilgisayar programı, betonarme binaların deprem etkileri altındaki lineer olmayan davranışını belirlemek amacıyla geliştirilen ÇMUYAY'nin sayısal uygulamalarına olanak sağlamak amacıyla hazırlanmıştır.

Bu program yardımıyla, Bölüm 2.1'de verilen koşulları sağlayan betonarme düzlem çerçeve ve perde-çerçeve sistemlerden oluşacak şekilde modellenen binaların, sabit düşey yükler ve artan modal yatay yükler altında, malzeme ve geometri değişimi bakımından lineer olmayan davranışı belirlenebilmektedir. Perde-çerçeve sistemlerdeki perde elemanları da çubuk eleman olarak idealleştirilmektedir. Programda yük artımı, sistem rijitlik matrisinin determinant değeri  $\det [S]_G \leq 0$  oluncaya kadar sürdürülmektedir.

MEPARCS bilgisayar programı, Şekil 3.1'de verilen genel akış şemasında belirtilen işlemleri yerine getiren bir ana program ve on adet alt programdan oluşmaktadır.



Şekil 3.1 MEPARCS programının genel akış diyagramı



Şekil 3.1'in devamı

KODMA: Programda kat döşemelerinin kendi düzlemleri içinde sonsuz rijit oldukları varsayıldığından, bilinmeyen sayısını azaltmak amacıyla, bilinmeyenler bağımlı ve bağımsız olmak üzere iki grupta belirlenmektedir. Bu alt program, düğüm noktalarının bağımlı ve bağımsız yerdeğiştirme bileşenlerini ayırt etmek amacıyla hazırlanmıştır. Yukarıda sözü edilen varsayıma göre, düğüm noktalarının düzlem içi yerdeğiştirme bileşenlerine aynı, düzlem dışı bileşenlerine ise farklı numaralar verilmektedir.

CUBUK: Çubuk eksen takımındaki çubuk rijitlik matrisi elemanlarını birinci veya ikinci merteye teorilerine göre hesaplamak amacıyla hazırlanmış alt programdır. Eğilme rijitliği değişken olan kirişlerde, çubuk rijitlik matrisi hesabı için GUSE alt programını çağırılmaktadır.

GUSE: Eğilme rijitliği açısından birbirinden farklı üç bölgesi bulunan kirişlerin rijitlik ve yükleme matrisi elemanlarını hesaplamak amacıyla hazırlanmış alt programdır.

TRCUBUK: Dönüştürme matrisi ile çubuk eksen takımındaki çubuk rijitlik matrislerini sistem eksen takımına dönüştürmek için hazırlanmış alt programdır. Ayrıca, rijit kat döşemesi içinde bulunmayan çubukların rijitlik matrisleri sistem eksen takımına dönüştürüldükten sonra, farklı bir dönüştürme matrisi yardımıyla seçilen bir referans noktasının koordinatlarına bağlı olarak ikinci bir dönüşüm uygulanmaktadır.

AKDUZ: Bileşik eğilme etkisindeki kesitlerde idealleştirilmiş akma koşulunu oluşturan doğruların denklemlerini, doğruları tanımlayan noktaların koordinatlarına bağlı olarak elde eden alt programdır.

PPFI: Lineer olmayan eğilme ve uzama şekildeğiştirmelerinin birim değerlerinden dolayı çubuk eksen takımında oluşan  $[P_\phi]_i$  ve  $[P_\phi]_j$  uç kuvvetleri matrislerini hesaplayan alt programdır.

TRPPFI: Çubuk eksen takımındaki  $[P_\phi]_i$  ve  $[P_\phi]_j$  plastik uç kuvvetleri matrislerini önce dönüştürme matrisleri ile sistem eksen takımına dönüştüren, daha sonra rijit kat döşemesi içinde bulunmayan çubuklara farklı bir dönüştürme matrisi ile ikinci bir dönüşüm uygulayan alt programdır.

SDINA: Sistem rijitlik matrisini Bölüm 2.1'de yapılan varsayımlar altında, ilgili dinamik serbestlik dereceleri için düzenleyen ve *Gauss İndirgeme Yöntemi* yardımıyla yoğunlaştırarak dinamik rijitlik matrisini hesaplayan alt programdır.

JACOBI: Dinamik rijitlik matrisini ve kütle matrisini kullanarak sönümsüz serbest titreşim analizi yapan, özdeğerleri, özvektörleri ve periyotları hesaplayan alt programdır.

MKK: Her moda ait modal özellikleri (periyotları, özvektörleri, modal katılım çarpanlarını) ve spektral ivme değerlerini kullanarak modal yatay yük dağılımlarını hesaplayan alt programdır.

### 3.2 Programın Giriş Bilgileri

MEPARCS programının giriş bilgileri aşağıda sıralanan gruptan oluşmaktadır.

- a ) kontrol bilgileri
- b ) malzeme karakteristikleri
- c ) enkesit özellikleri
- d ) sistem özellikleri
- e ) çubuk özellikleri
- f ) kütle ve yük bilgileri
- g ) ivme spektrumu koordinatları

#### **a ) Kontrol bilgileri**

Bu gruba ait değişkenler yardımıyla,

a-1) *birinci veya ikinci mertebe teorilerinden birine göre hesap yapılması*

- a-2) modal analizde gözönüne alınacak mod sayısının belirlenmesi
- a-3) istenilen yerdeğiştirme bileşenlerinin öngörülen sınır değerler ile karşılaştırılarak kontrol edilmesi
- a-4) kirişlerin eğilme rijitlikleri ve eğilme momenti taşıma kapasiteleri bakımından farklı olan bölgelerinin sınırlarının belirlenmesi sağlanabilmektedir.

***b ) Malzeme karakteristikleri***

Bu bilgi grubu, beton ve beton çeliğinin Bölüm 4.1'de gösterilen idealleştirilmiş  $\sigma - \varepsilon$  bağıntılarını tanımlayan büyüklüklerden oluşmaktadır (Şekil4.1).

***c ) Enkesit özellikleri***

Bu bilgi grubu, enkesit geometrisini tanımlayan büyüklükler ile enkesit donatı alanları ve koordinatlarından oluşmaktadır.

***d ) Sistem özellikleri***

Bu bilgi grubu, düğüm noktası sayısı, mesnetlerin sayısı, çubuk sayısı, yüklü düğüm noktası sayısı, yüklü çubuk sayısı ve düğüm noktalarının koordinatlarından oluşmaktadır.

***e ) Çubuk özellikleri***

Bu bilgi grubu, çubukların i ve j uçlarının düğüm noktası numaraları ile çubukların tipine bağlı olarak değişen aşağıdaki özelliklerden oluşmaktadır.

e-1) Fiktif çubuk için: Eğilme ve uzama rijitlikleri.

e-2) Kiriş için : Üç farklı bölgeye ait bölge sınırları, eğilme rijitlikleri, pozitif ve negatif eğilme momenti taşıma kapasiteleri.

e-3) Kolon ve perdeler için : Eğilme rijitlikleri ve Bölüm 4.1.2'de gösterilen idealleştirilmiş akma yüzeyini tanımlayan noktaların koordinatları ve ikinci mertebe teorisine göre hesap durumunda normal kuvvetlerin tahmin edilen değerleri.

***f ) Kütle ve yük bilgileri***

Bu bilgi grubu, toplam kat kütleleri ve yük bilgilerinden oluşmaktadır. Yük bilgileri düğüm noktası yükleri ve çubuk yükleri olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

DüŖey yüklerden oluŖan çubuk yükleri yeter sayıda statikçe eŖdeđer tekil kuvvet ile ifade edildiğinden, bu kuvvetlerin değerleri ve çubuk sol ucundan olan uzaklıkları giriŖ bilgisi olarak verilmektedir. Düğüm noktası yükleri ise sisteme etkileyen düŖey yük gruplarından oluŖmakta ve ilgili düğüm noktası numaraları ile birlikte giriŖ bilgisi olarak verilmektedir.

### **3.3 Programın ÇıkıŖ Bilgileri**

MEPARCS programının çıkıŖ bilgileri

a ) Yük artımının her adımına ait yük parametresi artımları, toplam yük parametreleri, düğüm noktalarının toplam yerdeđiŖtirme bileŖenleri ve kritik kesitlerdeki kesit tesirleri,

b ) Yük artımının her adımında sistemin modal özellikleri (özdeğerler, özvektörler, periyotlar, modal katılım çarpanları), birim modal yerdeđiŖtirmeler, göreli kat ötelemeleri, uç kuvvetleri ve plastik ŖekildeđiŖtirmeler (plastik dönme, plastik boy deđerıŖmesi),

c ) PlastikleŖen kesitlerin yerleri, oluŖtukları yük parametreleri, plastikleŖen kesitlerdeki iç kuvvet durumları ve plastik ŖekildeđiŖtirmeler (plastik dönme, plastik boy deđerıŖmesi)

değerlerinden oluŖmaktadır.



#### **4. BETONARME ÇERÇEVELERDEN OLUŞAN BİNALAR ÜZERİNDE SAYISAL İNCELEMELER VE ÇMUYAY'NİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

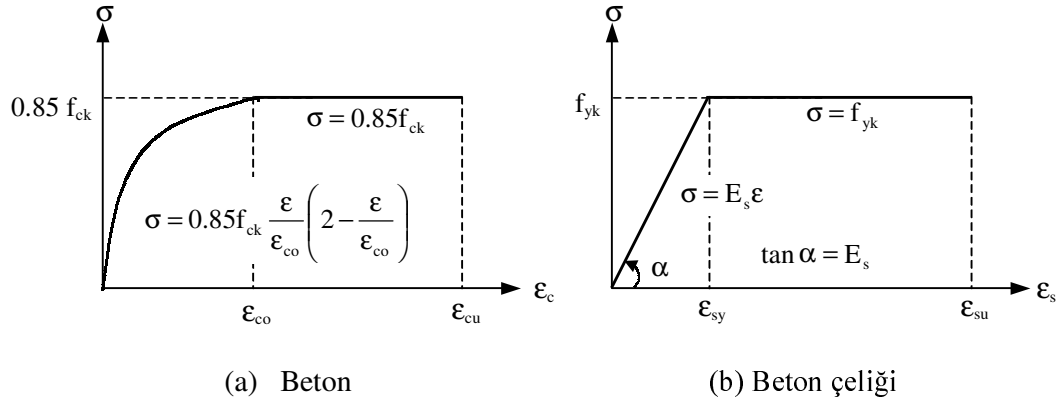
Bu bölümde öncelikle, geliştirilen Çok Modlu Uyarlamalı Yük Artımı Yönteminin (ÇMUYAY) betonarme binalara uygulanmasında yapılan varsayımlar ve idealleştirmeler açıklanmıştır. Daha sonra, yöntemin hesap adımlarının ayrıntılı olarak açıklanması ve yöntemden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi amacıyla yapılan sayısal uygulamalar ve incelemeler verilmiştir. Değerlendirmede binaların lineer olmayan dinamik analizi, monoton artan farklı yatay yük dağılımları için lineer olmayan statik analizleri yapılmış ve kat yatay yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri, maksimum kiriş plastik dönmeleri, kat kesme kuvvetleri, kapasite eğrileri ve sistemdeki plastikleşen kesit dağılımları incelenmiştir. Ayrıca, geliştirilen yöntemde spektral ölçeklemenin, gözönüne alınan mod sayısının ve *ikinci mertebe* etkilerinin analiz sonuçları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

##### **4.1 Sayısal İncelemelerde Yapılan Varsayımlar ve Betonarme Kesitlerin Davranışının İdealleştirilmesi**

Örnek olarak ele alınan betonarme binalar öncelikle Yönetmelik koşullarına göre boyutlandırılmış ve binalara ait düzlem çerçeveler üzerinde lineer olmayan analizler yapılmıştır. Çerçevelerin, geliştirilen ÇMUYAY ile analizi için betonarme kesitlerin davranışlarının Bölüm 2.1'de yapılan varsayımlara uygun olarak idealleştirilmeleri ve ayrıca lineer olmayan gerçek davranışın belirlenebilmesi için malzeme özelliklerine, enkesit boyutlarına, donatı miktarına, donatı yerleşim şekline ve normal kuvvet düzeyine bağlı olan gerçek eğilme ve uzama rijitliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla yapılan varsayımlar ve idealleştirmeler aşağıda verilmiştir.

- Analizler düzlem çerçeve üzerinde yapıldığından binada oluşan burulma etkileri gözönüne alınmamaktadır.
- Elemanların kesme kuvveti taşıma kapasitelerinin kesme kırılması oluşmayacak düzeyde olduğu kabul edilmektedir.
- Bileşik eğilme etkisindeki betonarme kesitlerde akma vektörünün akma yüzeyine dik olduğu varsayılmaktadır [52].
- Beton ve çelik arasında tam aderans vardır. Buna göre, beton ve çelik aralarında kayma meydana gelmeksizin, birlikte şekil değiştirmektedirler.
- Betonun çekme dayanımı ihmal edilmektedir.

Sayısal incelemelerde, betonarme kesitlerin iç kuvvet-şekil değiştirme bağıntılarının belirlenmesinde kullanılan beton ve beton çeliğine ait gerilme-şekil değiştirme bağıntılarının Şekil 4.1'deki gibi olduğu varsayılmıştır.



Şekil 4.1 Beton ve beton çeliğine ait gerilme-şekil değiştirme bağıntıları

Bu diyagramlarda,

$f_{ck}$ ,  $\epsilon_{co}$ ,  $\epsilon_{cu}$  sırasıyla betonun karakteristik basınç dayanımını, plastik şekil değiştirmelerin başlamasına karşılık gelen birim kısalmayı ve betonda izin verilen en büyük birim kısalmayı göstermektedir.

$f_{yk}$ ,  $\epsilon_{so}$ ,  $\epsilon_{su}$ ,  $E_s$  sırasıyla beton çeliğinin karakteristik akma dayanımını, plastik şekil değiştirmelerin başlamasına karşılık gelen birim uzamayı, beton çeliğinde izin verilen en büyük birim uzamayı ve beton çeliğinin elastisite modülünü göstermektedir.

Bu çalışmanın sayısal uygulamalarında, beton ve beton çeliği için aşağıdaki karakteristik şekildeğiştirme değerleri esas alınmıştır.

**Betona ait özellikler:**

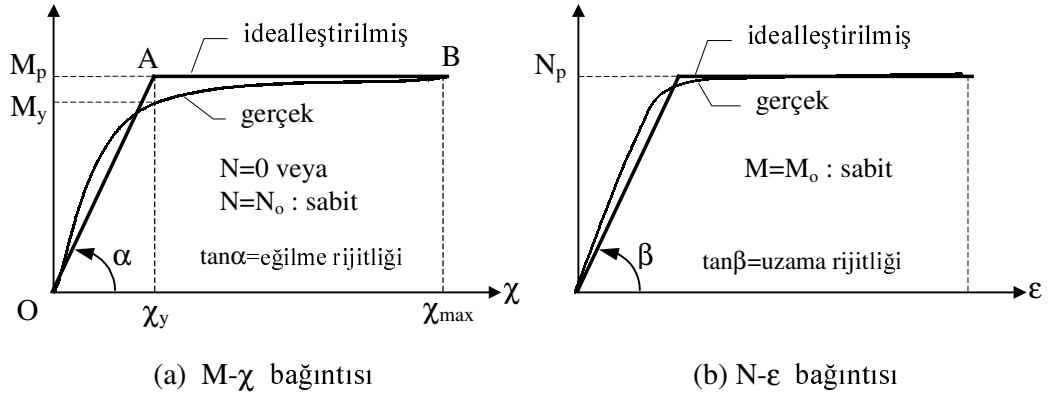
Plastik şekildeğiştirmenin başlamasına karşı gelen birim kısalma :  $\epsilon_{co}=0.0020$   
 İzin verilen en büyük birim kısalma :  $\epsilon_{cu}=0.0060$

**Beton çeliğine ait özellikler:**

Plastik şekildeğiştirmenin başlamasına karşı gelen birim uzama :  $\epsilon_{sy}=0.0021$   
 İzin verilen en büyük birim uzama :  $\epsilon_{su}=0.0100$

**4.1.1 Basit ve Bileşik Eğilme Etkisindeki Betonarme Kesitlerde İç Kuvvet-Şekildeğiştirme Bağıntılarının İdealleştirilmesi**

Bu çalışmada, kesit ve donatı özellikleri, beton ve beton çeliğine ait gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları kullanılarak belirlenen eğilme momenti-eğrilik ( $M-\chi$ ) ve normal kuvvet-birim boy değişmesi ( $N-\epsilon$ ) bağıntıları Şekil 4.2’de gösterildiği gibi iki doğru parçası ile idealleştirilmektedir.



Şekil 4.2 Betonarme çubuklarda iç kuvvet-şekildeğiştirme bağıntılarının idealleştirilmesi

İdealleştirilmiş  $M-\chi$  bağıntısında,

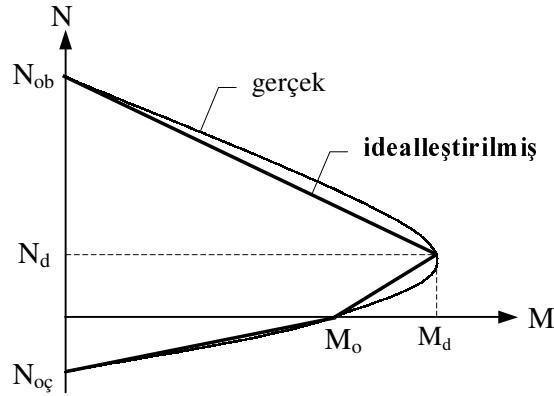
OA:  $0 \leq \chi \leq \chi_y$  için  $M = M_p \chi / \chi_y$

AB:  $\chi_y \leq \chi \leq \chi_{max}$  için  $M = M_p$

olmaktadır. Burada,  $M_p$  kesitin  $N=N_o$  aksenal kuvveti altındaki eğilme momenti taşıma kapasitesini,  $\chi_y$  ve  $\chi_{max}$  sırasıyla kesitte plastik şekildeğişirmelerin başladığı duruma ve kesitin kırılmasına karşı gelen eğrilikleri göstermektedir.

#### 4.1.2 Bileşik Eğilme Etkisindeki Betonarme Kesitlerde Akma Koşullarının İdealleştirilmesi

Geliştirilen ÇMUYAY'nde, akma koşullarının lineer parçalardan oluşacak şekilde idealleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, kesit ve donatı özellikleri gözönüne alınarak belirlenen gerçek akma koşulları, güvenli tarafta kalınacak şekilde Şekil 4.3'de gösterildiği gibi üç doğru parçası ile idealleştirilmektedir. Simetrik donatılı kesitlerde akma koşulları N eksenine göre simetrik olmaktadır.



Şekil 4.3 Akma koşullarının doğru parçaları ile idealleştirilmesi

Şekil 4.3'deki  $N_{oç}$ ,  $N_{ob}$  ve  $N_d$  sırasıyla eğilme momentinin sıfır olduğu durumdaki kesitin çekme kuvveti ve basınç kuvveti taşıma kapasitesi ile dengeli kırılmaya karşılık gelen normal kuvveti,  $M_o$  ve  $M_d$  sırasıyla kesitin basit eğilme halindeki eğilme momenti taşıma kapasitesini, dengeli kırılmaya karşılık gelen eğilme momentini göstermektedir.

Kirişlerin ve kolonların eğilme rijitliklerinin belirlenmesinde Bölüm 4.1.1'de verilen iç kuvvet-şekildeğişirme bağıntısından yararlanılmaktadır.

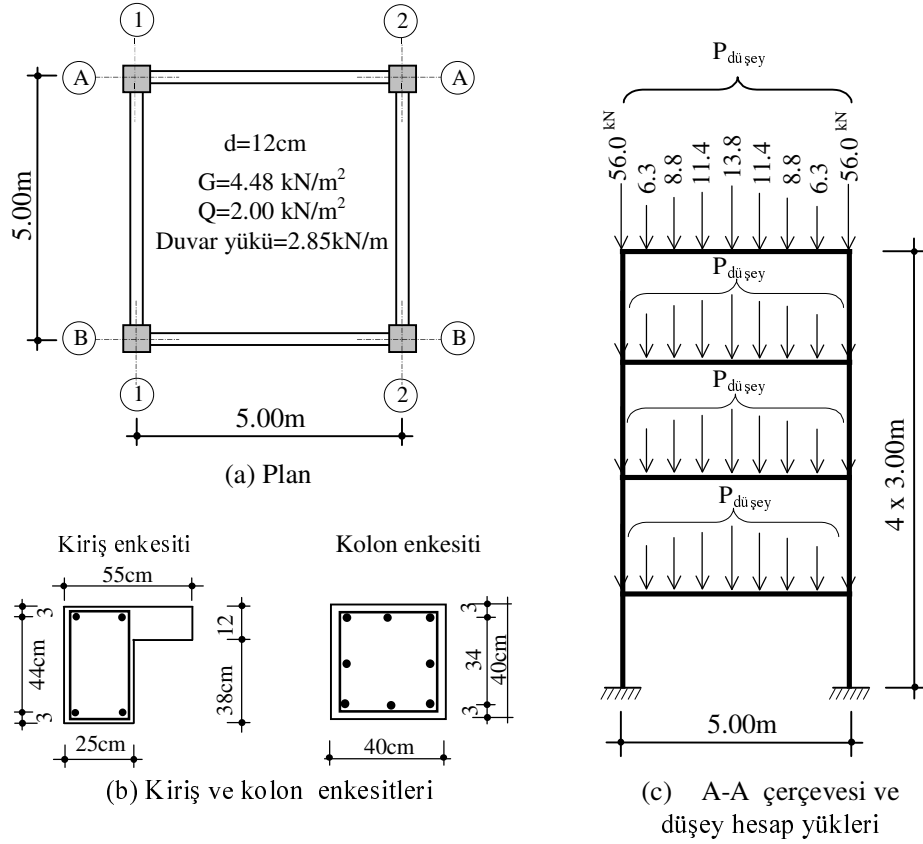
Kirişler, içindeki donatı yerleşimi gözönünde bulundurularak iki mesnet bölgesi ve bir açıklık bölgesi olmak üzere üç eşit uzunlukta bölgeye ayrılmıştır. Her bölgedeki eğilme rijitlikleri için, düşey işletme yükleri altında oluşan eğilme momentlerine karşılık gelen eğilme rijitlikleri kullanılmıştır. Her katta döşeme bulunduğu ve döşemelerin düzlemi içinde sonsuz rijit oldukları varsayılmakta bu nedenle hesaplarda kirişlerin uzama rijitlikleri kullanılmamaktadır. Buna bağlı olarak kirişlerde *birinci merteye teorisi* uygulanmaktadır.

Kolonların eğilme rijitliklerinin belirlenmesinde düşey işletme yüklerinden oluşan normal kuvvet düzeyleri esas alınmış artan yatay yükler ile değişen normal kuvvetlerin rijitliğe etkisi ihmal edilmiştir. Basınç etkisi altındaki kolonların uzama rijitliklerinin belirlenmesinde brüt beton enkesit alanı esas alınmıştır. Kolonlarda, Bölüm 2.1’de yapılan varsayımlar altında, *ikinci merteye teorisi* uygulanmaktadır.

#### **4.2 Ayrıntılı Açıklama Örneği (Dört Katlı Tek Açıklıklı Betonarme Çerçeve)**

Bu bölümde, geliştirilen Çok Modlu Uyarlamalı Yük Artımı Yönteminin (ÇMUYAY) hesap adımlarını ayrıntılı olarak göstermek amacıyla, bir örnek üzerinde uygulama yapılmıştır.

Örnek olarak, TS 500 [57] ve ABYYHY [56]’ne göre boyutlandırılan ve her iki doğrultuda birer açıklığı bulunan dört katlı betonarme binanın bir çerçevesi kullanılmıştır. Bina planı, enkesit boyutları, gözönüne alınan düşey yükler ve A-A çerçevesi Şekil 4.4’de, malzeme özellikleri ve deprem hesabında kullanılan parametreler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Ele alınan çerçevenin kat kütlesi  $m=13.261 \text{ kNs}^2/\text{m}$  olarak hesaplanmıştır. Döşeme ve duvar yükleri ile kiriş öz yükleri açıklıktaki plastikleşmeleri izleyebilmek amacıyla statikçe eşdeğer tekil yüklere dönüştürülmüştür (Şekil 4.4). Kiriş boyuna donatı miktarları, eğilme momenti taşıma kapasiteleri ve eğilme rijitlikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.4 Dört katlı binanın geometrik özellikleri ve düşey yükleri

Çizelge 4.1 Dört katlı binanın malzeme özellikleri ve deprem hesabına ait parametreler

Beton	C25 ( $f_{ck}=25 \text{ N/mm}^2$ )
Beton çeliği	S420a ( $f_{yk}=420 \text{ N/mm}^2$ )
Deprem bölgesi	1 ( $A_o=0.40$ )
Bina önem katsayısı	1 ( $I=1$ )
Zemin sınıfı	Z2 ( $T_A=0.15s$ $T_B=0.40s$ )
Süneklik düzeyi	Yüksek ( $R=8$ )

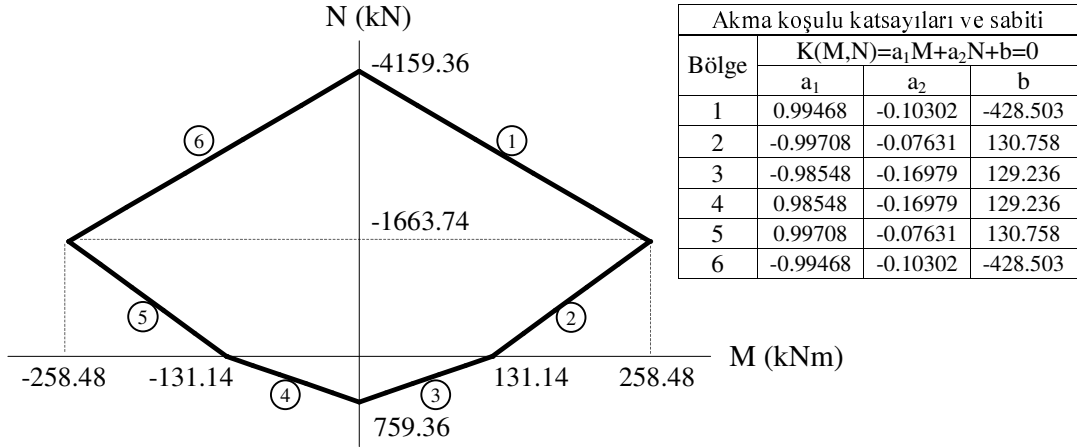
Çizelge 4.2 Dört katlı çerçevedeki kirişlerin donatıları, eğilme momenti taşıma kapasiteleri ve eğilme rijitlikleri

Eleman	Çubuk no (Şekil 4.7)	Yer	Donatı alanı ( $\text{cm}^2$ )		Moment taşıma kapasitesi ( $M_p$ ) (kNm)		Eğilme rijitliği (EI) ( $\text{kNm}^2$ )	
			mesnet	açıklık	mesnet	açıklık	mesnet	açıklık
Kiriş	1,2	üst	4.21	4.21	-79.85	-79.85	13900.99	15273.01
		alt	4.21	4.21	81.28	81.28		
	3,4	üst	6.28	4.21	-116.93	-79.85	19194.92	15273.01
		alt	4.21	4.21	81.28	81.28		

Çizelge 4.3’de kolon boyuna donatı miktarları ile eğilme ve uzama rijitlikleri ve Şekil 4.5’de ise kolonlara ait lineerleştirilmiş akma koşulları verilmiştir. Kolonlardaki donatı yerleşimi simetrik olduğundan akma koşulları da N eksenine göre simetrik olmaktadır.

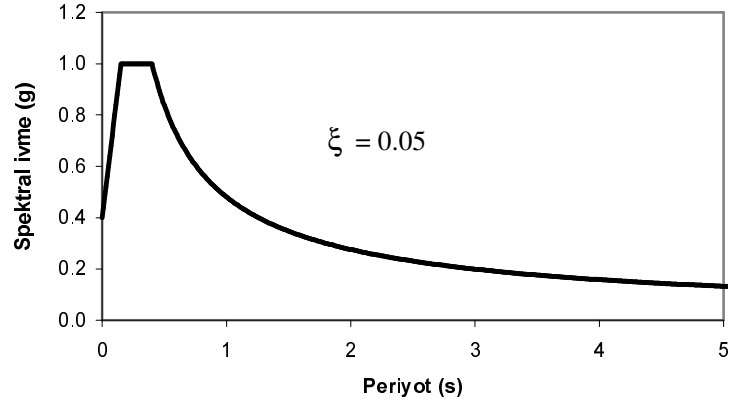
Çizelge 4.3 Dört katlı çerçevedeki kolonların donatıları, eğilme ve uzama rijitlikleri

Eleman	Çubuk no (Şekil 4.7)	Yer	Donatı alanı (cm <sup>2</sup> )	Eğilme rijitliği (EI) (kNm <sup>2</sup> )	Uzama rijitliği (EF) (kN)
Kolon	5 , 9	çubuk boyunca	18.08 (16Φ12)	19237.49	4840000
	6 , 10			18633.22	
	7 , 11			17830.78	
	8 , 12			16895.99	



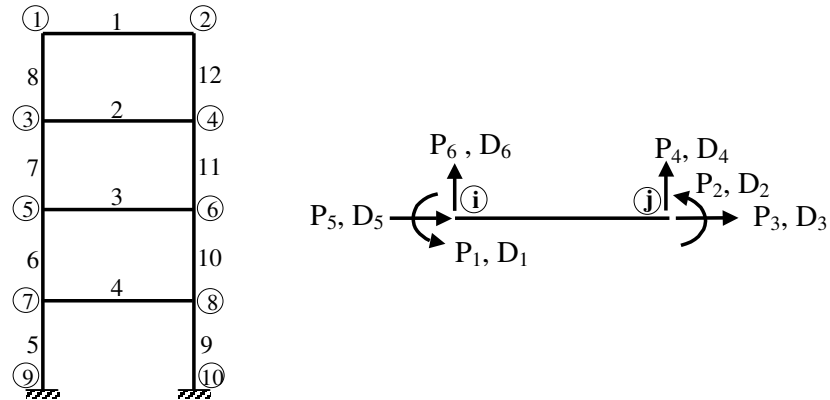
Şekil 4.5 Dört katlı çerçevedeki kolonların lineerleştirilmiş akma koşulları

Örnek olarak ele alınan çerçevenin geliştirilen ÇMUYAY ile analizinde binanın tasarımında esas alınan elastik ivme spektrumu (Şekil 4.6) kullanılmıştır.



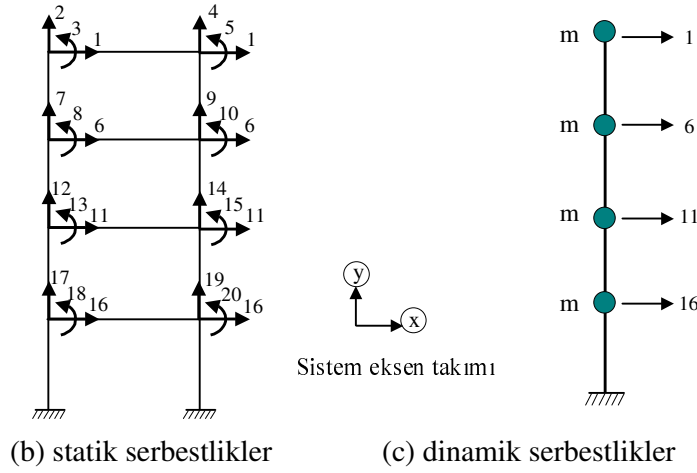
Şekil 4.6 Dört katlı çerçevenin analizinde kullanılan % 5 sönümlü elastik ivme spektrumu

Çerçevenin geliştirilen ÇMUYAY ile analizi için oluşturulan hesap modelinde çubuk ve düğüm noktası numaraları ile çubuk uç kuvvetlerinin ve uç yerdeğiştirmelerinin pozitif yönleri Şekil 4.7’de, gözönüne alınan statik ve dinamik serbestlikler Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Dört katlı çerçevenin hesap modelindeki çubuk ve düğüm noktası numaraları ile çubuk uç kuvvetlerinin ve uç yerdeğiştirmelerinin pozitif yönleri





Şekil 4.8 Dört katlı çerçevenin hesap modeline ait serbestlikler

### 1. Hesap adımı

İlk olarak sistemin düşey hesap yüklerine göre hesabı yapılmıştır. Bunun için öncelikle, *ikinci mertbe* teorisine göre hesapta kullanılmak üzere kolonlardaki normal kuvvetlerin tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla sistem *birinci mertbe* teorisine göre hesaplanarak kolonlardaki normal kuvvet değerleri belirlenmiş ve bu normal kuvvetler esas alınarak *ikinci mertbe* eleman rijitlik ve yükleme matrisleri elde edilmiştir. Daha sonra kolon ve kiriş elemanlarına ait rijitlik matrisleri Bölüm 2.4.1’de belirtildiği gibi ilgili yerlere yerleştirilerek sistem rijitlik matrisi belirlenmiştir (Çizelge 4.4). Çubuklara ve düğüm noktalarına etkiyen düşey yükler Bölüm 2.4.1’de belirtildiği gibi düzenlenerek düşey yüklere ait  $[q-P_0]^0$  yükleme matrisi elde edilmiştir. Daha sonra sistem rijitlik matrisi ve yükleme matrisi (2.11) denklem takımında yerine konarak düşey yüklere ait  $[d]^0$  bilinmeyenler matrisi hesaplanmıştır. Bu bilinmeyenler kullanılarak (2.29) bağıntıları ile çubuk uç kuvvetleri (Çizelge 4.5) ve çubuk denge denklemleri ile diğer kritik kesitlerdeki kesit tesirleri hesaplanmıştır. İlgili kesit tesirleri akma koşulları ile kontrol edilmiş ve düşey yükler altında sistemde plastik kesit oluşmadığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.4 Dört katlı çerçevenin sistem rijitlik matrisi (elastik)

	$d_{1x}$	$d_{2x}$	$d_{3x}$	$d_{4x}$	$d_{5x}$	$d_{6x}$	$d_{7x}$	$d_{8x}$	$d_{9x}$	$d_{10x}$	$d_{11x}$	$d_{12x}$	$d_{13x}$	$d_{14x}$	$d_{15x}$	$d_{16x}$	$d_{17x}$	$d_{18x}$	$d_{19x}$	$d_{20x}$
14947	0	11255	0	11255	-14947	0	11255	0	11255	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1614673	3348	-1339	3348	0	-1613333	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		33730	-3348	5502	-11255	0	11273	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			1614673	-3348	0	0	0	-1613333	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				33730	-11255	0	0	0	11273	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
					30654	0	614	0	614	-15707	0	11869	0	11869	0	0	0	0	0	0
						3228006	3348	-1339	3348	0	-1613333	0	0	0	0	0	0	0	0	0
							57433	-3348	5502	-11869	0	11905	0	0	0	0	0	0	0	0
								3228006	-3348	0	0	0	-1613333	0	0	0	0	0	0	0
									57433	-11869	0	0	0	11905	0	0	0	0	0	0
										32055	0	526	0	526	-16348	0	12395	0	12395	0
											3228491	4561	-1824	4561	0	-1613333	0	0	0	0
												63372	-4561	7871	-12395	0	12449	0	0	
													3228491	-4561	0	0	0	-1613333	0	
														63372	-12395	0	0	0	12449	
															33162	0	394	0	394	
																3228491	4561	-1824	4561	
																	65176	-4561	7871	
																		3228491	-4561	
																				65176

$$[q-P_0]^0 = \begin{bmatrix} 0.00 \\ 89.40 \\ 33.16 \\ 89.40 \\ -33.16 \\ 0.00 \\ 89.40 \\ 33.16 \\ 89.40 \\ -33.16 \\ 0.00 \\ 89.40 \\ 35.01 \\ 89.40 \\ -35.01 \\ 0.00 \\ 89.40 \\ 35.01 \\ 89.40 \\ -35.01 \end{bmatrix} \quad [d]^0 = \begin{bmatrix} d_{1x} \\ d_{2x} \\ d_{3x} \\ d_{4x} \\ d_{5x} \\ d_{6x} \\ d_{7x} \\ d_{8x} \\ d_{9x} \\ d_{10x} \\ d_{11x} \\ d_{12x} \\ d_{13x} \\ d_{14x} \\ d_{15x} \\ d_{16x} \\ d_{17x} \\ d_{18x} \\ d_{19x} \\ d_{20x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00000 \\ -0.00055 \\ -0.00105 \\ -0.00055 \\ 0.00105 \\ 0.00000 \\ -0.00050 \\ -0.00031 \\ -0.00050 \\ 0.00031 \\ 0.00000 \\ -0.00039 \\ -0.00045 \\ -0.00039 \\ 0.00045 \\ 0.00000 \\ -0.00022 \\ -0.00051 \\ -0.00022 \\ 0.00051 \end{bmatrix}$$

Çizelge 4.5 Dört katlı çerçevede düşey hesap yüklerine ait uç kuvvetleri

Çubuk no	Kritik kesit yeri	M° (kNm)	N° (kN)	T° (kN)
1	sol uç	-27.1	0.0	33.4
	sağ uç	-27.1	0.0	33.4
2	sol uç	-31.4	0.0	33.4
	sağ uç	-31.4	0.0	33.4
3	sol uç	-31.8	0.0	33.4
	sağ uç	-31.8	0.0	33.4
4	alt uç	-31.4	0.0	33.4
	üst uç	-31.4	0.0	33.4
5	alt uç	6.6	-357.6	-6.6
	üst uç	-13.1	-357.6	6.6
6	alt uç	18.3	-268.2	-11.9
	üst uç	-17.5	-268.2	11.9
7	alt uç	14.3	-178.8	-9.0
	üst uç	-12.6	-178.8	9.0
8	alt uç	18.8	-89.4	-15.3
	üst uç	-27.1	-89.4	15.3
9	alt uç	-6.6	-357.6	6.6
	üst uç	13.1	-357.6	-6.6
10	alt uç	-18.3	-268.2	11.9
	üst uç	17.5	-268.2	-11.9
11	alt uç	-14.3	-178.8	9.0
	üst uç	12.6	-178.8	-9.0
12	alt uç	-18.8	-89.4	15.3
	üst uç	27.1	-89.4	-15.3

## 2. Hesap adımı

Sistem rijitlik matrisi Şekil 4.8'de gösterilen dinamik serbestlikler için Bölüm 2.4.2'de belirtildiği gibi yoğunlaştırılarak dinamik rijitlik matrisi  $[S]_D$  belirlenmiştir.

$$[S]_D = \begin{bmatrix} d_1 & d_6 & d_{11} & d_{16} \\ 6231.7 & -8979.5 & 3229.8 & -589.8 \\ -8979.5 & 19997.6 & -14436.9 & 4144.7 \\ 3229.8 & -14436.9 & 23107.1 & -16190.8 \\ -589.8 & 4144.7 & -16190.8 & 28499.5 \end{bmatrix}$$

Dinamik rijitlik matrisi  $[S]_D$  ve sisteme ait kütle matrisi

$$[M] = \begin{bmatrix} 13.261 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 13.261 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 13.261 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 13.261 \end{bmatrix}$$

kullanılarak serbest titreşim analizi yapılmış ve henüz üzerinde plastikleşen kesit bulunmayan sisteme ait özdeğerler ( $\omega^2$ ), özvektörler ( $\Phi$ ), açılmalık frekanslar ( $\omega$ ), periyotlar (T) hesaplanmıştır. Bu modal özelliklerden yararlanarak her moda ait modal katılım çarpanları ( $\Gamma$ ), elastik spektral ivme değerleri ( $S_a$ ) ve özvektörler belirlenmiştir (Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7).

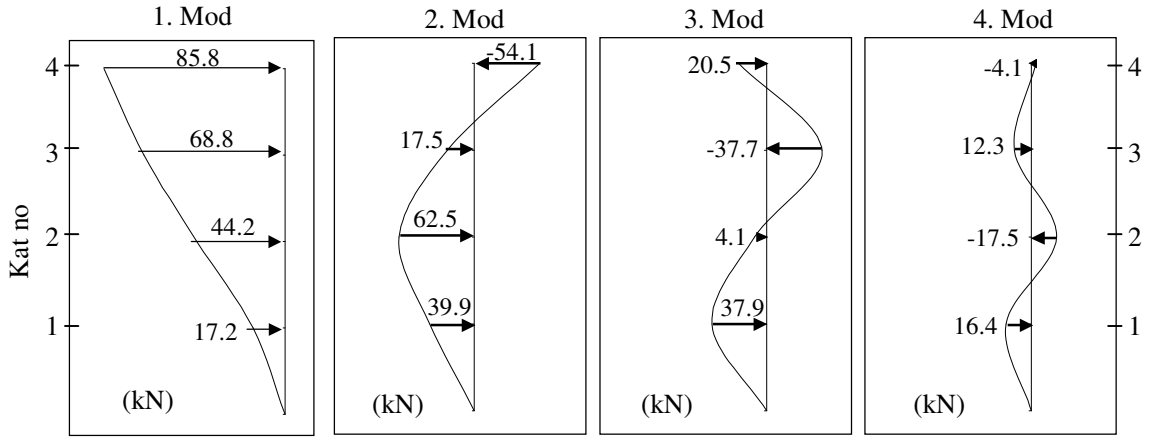
Çizelge 4.6 Dört katlı çerçevede ilk yük artımı adımına (elastik) ait modal büyüklükler ve spektral ivmeler

Mod no	$\omega^2$ (rad <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$\omega$ (rad/s)	T (s)	$\Gamma$	$S_a$ (g)
1	43.308	6.581	0.9548	207.654	0.501
2	441.843	21.02	0.2989	81.008	1.000
3	1681.321	41.004	0.1532	49.851	1.000
4	3703.072	60.853	0.1033	29.605	0.800

Çizelge 4.7 Dört katlı çerçevede ilk yük artımı adımına (elastik) ait özvektörler ( $\Phi_{ij}$ )

Kat no	İlk yük artımı adımına ait özvektörler ( $\Phi_{ij}$ )			
	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod
4	0.00622	-0.00503	0.00310	-0.00131
3	0.00499	0.00163	-0.00570	0.00392
2	0.00320	0.00580	0.00062	-0.00558
1	0.00125	0.00372	0.00573	0.00521

Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'deki değerler kullanılarak (2.34) bağıntısı ile dört titreşim modu için birim modal yatay yük dağılımları belirlenmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Dört katlı çerçevede ilk yük artımı adımına (elastik) ait birim modal yatay yük dağılımları

### 3. Hesap adımı

Her birim modal yatay yük dağılımına ait yükleme matrisi  $[q]^1$  oluşturulmuştur. Yükleme matrisleri  $[q]^1$  önceki adıma ait (düşey yükler için hesap) indirgenmiş katsayılar matrisinden yararlanmak suretiyle indirgenmiş ve (2.11) denklem takımı çözümlenerek her bir dağılıma ait birim modal yerdeğiştirmeler matrisleri  $[\Delta d]^1$  belirlenmiştir.

Birim modal yatay yük dağılımlarına ait yükleme matrisleri (kN)

$$[q]^1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1. \text{ Mod} & 2. \text{ Mod} & 3. \text{ Mod} & 4. \text{ Mod} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \left[ \begin{array}{c} -85.8 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -68.8 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -44.2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -17.2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right] & \left[ \begin{array}{c} 54.1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -17.5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -62.3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -39.9 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right] & \left[ \begin{array}{c} -20.1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 37.7 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -4.1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -37.9 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right] & \left[ \begin{array}{c} 4.1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -12.3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 17.5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -16.4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right] \end{matrix}$$

Birim modal yatay yük dağılımlarına ait yerdeğiştirme matrisleri (m, rad)

$$[\Delta d]^1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1. \text{ Mod} & 2. \text{ Mod} & 3. \text{ Mod} & 4. \text{ Mod} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \left[ \begin{array}{c} d_{1x} \\ d_{2x} \\ d_{3x} \\ d_{4x} \\ d_{5x} \\ d_{6x} \\ d_{7x} \\ d_{8x} \\ d_{9x} \\ d_{10x} \\ d_{11x} \\ d_{12x} \\ d_{13x} \\ d_{14x} \\ d_{15x} \\ d_{16x} \\ d_{17x} \\ d_{18x} \\ d_{19x} \\ d_{20x} \end{array} \right] & \left[ \begin{array}{c} 0.14947 \\ 0.00041 \\ -0.00563 \\ -0.00041 \\ -0.00563 \\ 0.11986 \\ 0.00039 \\ -0.01022 \\ -0.00039 \\ -0.01022 \\ 0.07689 \\ 0.00032 \\ -0.01170 \\ -0.00032 \\ -0.01170 \\ 0.02995 \\ 0.00019 \\ -0.01124 \\ -0.00019 \\ -0.01124 \end{array} \right] & \left[ \begin{array}{c} -0.00923 \\ -0.00008 \\ 0.00263 \\ 0.00008 \\ 0.00263 \\ 0.00299 \\ -0.00006 \\ 0.00308 \\ 0.00006 \\ 0.00308 \\ 0.01063 \\ -0.00004 \\ 0.00043 \\ 0.00004 \\ 0.00043 \\ 0.00681 \\ -0.00001 \\ -0.00191 \\ 0.00001 \\ -0.00191 \end{array} \right] & \left[ \begin{array}{c} 0.00092 \\ 0.00001 \\ -0.00072 \\ -0.00001 \\ -0.00072 \\ -0.00169 \\ 0.00000 \\ -0.00010 \\ 0.00000 \\ -0.00010 \\ 0.00019 \\ 0.00000 \\ 0.00062 \\ 0.00000 \\ 0.00062 \\ 0.00170 \\ 0.00000 \\ -0.00015 \\ 0.00000 \\ -0.00015 \end{array} \right] & \left[ \begin{array}{c} -0.00008 \\ 0.00000 \\ 0.00012 \\ 0.00000 \\ 0.00012 \\ 0.00025 \\ 0.00000 \\ -0.00008 \\ 0.00000 \\ -0.00008 \\ -0.00036 \\ 0.00000 \\ 0.00002 \\ 0.00000 \\ 0.00002 \\ 0.00033 \\ 0.00000 \\ 0.00005 \\ 0.00000 \\ 0.00005 \end{array} \right] \end{matrix}$$

Yerdeşiftirmeler (2.29-b) bağintılarında yerlerine koyularak birim modal uç kuvvetleri ( $\Delta M_j^1$ ,  $\Delta N_j^1$ ) (Çizelge 4.8) ve bunlardan yararlanarak çubuk denge denklemleri ile diğer kritik kesitlerdeki birim modal kesit tesirleri belirlenmiştir. Ayrıca her moda ait birim modal kat yatay yerdeşiftirmeleri ve görelî kat ötelemeleri de hesaplanarak Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.8 Dört katlı çerçeve de ilk yük artımı adımı na (elastik) ait birim modal uç kuvvetleri

Çubuk no	Kritik kesit yeri	Uç momentleri (kNm)				Uç normal kuvvetleri (kN)			
		$\Delta M_1^1$	$\Delta M_2^1$	$\Delta M_3^1$	$\Delta M_4^1$	$\Delta N_1^1$	$\Delta N_2^1$	$\Delta N_3^1$	$\Delta N_4^1$
1	sol uç	91.5	-43.6	12.0	-2.0	0	0	0.0	0.0
	sağ uç	-91.5	43.6	-12.0	2.0	0	0	0.0	0.0
2	sol uç	168.5	-51.1	1.7	1.4	0	0	0.0	0.0
	sağ uç	-168.5	51.1	-1.7	-1.4	0	0	0.0	0.0
3	sol uç	263.8	-9.5	-14.1	-0.5	0	0	0.0	0.0
	sağ uç	-263.8	9.5	14.1	0.5	0	0	0.0	0.0
4	alt uç	254.5	43.7	3.3	-1.2	0	0	0.0	0.0
	üst uç	-254.5	-43.7	-3.3	1.2	0	0	0.0	0.0
5	alt uç	-238.4	-62.5	-19.9	-5.0	311.3	-24.2	1.2	-1.0
	üst uç	96.3	38.3	18.0	5.7	311.3	-24.2	1.2	-1.0
6	alt uç	-158.2	-5.4	14.7	6.9	209.5	-41.7	-0.2	-0.5
	üst uç	152.6	34.2	-5.3	-7.3	209.5	-41.7	-0.2	-0.5
7	alt uç	-111.1	43.7	8.8	-6.8	104	-37.9	5.5	-0.3
	üst uç	128.6	-12.5	-17.3	5.6	104	-37.9	5.5	-0.3
8	alt uç	-39.9	38.6	-19.0	4.2	36.6	-17.4	4.8	-0.8
	üst uç	91.5	-43.6	12.0	-2.0	36.6	-17.4	4.8	-0.8
9	alt uç	-238.4	-62.5	-19.9	-5.0	-311.3	24.2	-1.2	1.0
	üst uç	96.3	38.3	18.0	5.7	-311.3	24.2	-1.2	1.0
10	alt uç	-158.2	-5.4	14.7	6.9	-209.5	41.7	0.2	0.5
	üst uç	152.6	34.2	-5.3	-7.3	-209.5	41.7	0.2	0.5
11	alt uç	-111.1	43.7	8.8	-6.8	-104	37.9	-5.5	0.3
	üst uç	128.6	-12.5	-17.3	5.6	-104	37.9	-5.5	0.3
12	alt uç	-39.9	38.6	-19.0	4.2	-36.6	17.4	-4.8	0.8
	üst uç	91.5	-43.6	12.0	-2.0	-36.6	17.4	-4.8	0.8

Çizelge 4.9 Dört katlı çerçeve de ilk yük artımı adımı na (elastik) ait birim modal kat yatay yerdeşiftirmeleri

Kat no	Kat yatay yerdeşiftirmeleri ( $\delta$ ) (m)			
	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod
4	0.14947	-0.00923	0.00092	-0.00008
3	0.11986	0.00299	-0.00169	0.00025
2	0.07689	0.01063	0.00019	-0.00036
1	0.02995	0.00681	0.00170	0.00033

Çizelge 4.10 Dört katlı çerçevede ilk yük artımı adımına (elastik) ait birim modal görelî kat ötelemeleri

Kat no	Birim modal görelî kat ötelemeleri ( $\Psi$ ) (%)			
	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod
4	0.987	-0.407	0.087	-0.011
3	1.432	-0.255	-0.063	-0.020
2	1.565	0.127	-0.051	-0.023
1	0.998	0.227	0.057	-0.011

#### 4. Hesap adımı

Birim modal davranış büyüklükleri bu adım için uygun olan modal kombinasyon kuralı kullanılarak birleştirilmiştir. Bütün modlara ait periyotlar daima  $T_i/T_j < 0.80$  şartını sağladığı için modal birleştirme *Karelerinin Toplamının Kare Kökü* (2.36-a) kuralı kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen birleştirilmiş büyüklüklere birinci moda ait ilgili büyüklüğün işareti verilmiştir. Böylece ilk birim yük artımına ( $\Delta P^1=1$ ) karşılık gelen davranış büyüklükleri ( $\Delta R_C^1$ ) belirlenmiştir (Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12).

Çizelge 4.11 Dört katlı çerçevede  $\Delta P^1=1$  yüklemesine ait uç kuvvetleri

Çubuk no	Kritik kesit yeri	$\Delta M_C^1$ (kNm)	$\Delta N_C^1$ (kN)	$\Delta T_C^1$ (kN)
1	sol uç	102.1	0	-40.8
	sağ uç	-102.1	0	40.8
2	sol uç	176.1	0	-70.4
	sağ uç	-176.1	0	70.4
3	sol uç	264.3	0	-105.7
	sağ uç	-264.3	0	105.7
4	alt uç	258.3	0	-103.3
	üst uç	-258.3	0	103.3
5	alt uç	-247.4	312.2	113.6
	üst uç	105.4	312.2	-113.6
6	alt uç	-159.1	213.6	100.6
	üst uç	156.7	213.6	-100.6
7	alt uç	-119.9	110.8	80
	üst uç	130.4	110.8	-80
8	alt uç	-58.9	40.8	51.8
	üst uç	102.1	40.8	-51.8
9	alt uç	-247.4	-312.2	113.6
	üst uç	105.4	-312.2	-113.6
10	alt uç	-159.1	-213.6	100.6
	üst uç	156.7	-213.6	-100.6
11	alt uç	-119.9	-110.8	80
	üst uç	130.4	-110.8	-80
12	alt uç	-58.9	-40.8	51.8
	üst uç	102.1	-40.8	-51.8



Çizelge 4.12 Dört katlı çerçevede  $\Delta P^1=1$  için kat yatay yerdeğiştirmeleri ve görelî kat ötelemeleri

Kat no	Kat yatay yerdeğiştirmeleri ( $\delta$ ) (m)	Görelî kat ötelemeleri ( $\Psi$ ) (%)
4	0.150	1.071
3	0.120	
2	0.078	1.456
1	0.031	1.571
		1.025

### 5. Hesap adımı

Sistemdeki kritik kesitlerde, düşey yüklere ait kesit tesirleri ( $M^0$  ,  $N^0$ ) ve  $\Delta P^1=1$  yüklemesinden oluşan kesit tesirleri ( $\Delta M_C^1$  ,  $\Delta N_C^1$ ) (2.30) bağıntıları ile ifade edilen lineerleştirilmiş akma koşullarında yerlerine koyularak, her bir kesitin plastikleşmesine sebep olacak yatay yük parametresi artımı ( $\Delta P^1$ ) hesaplanmıştır.

Örnek olarak seçilen bir kiriş ve bir kolon kesitinde yatay yük parametresi artımının hesabı aşağıda gösterilmiştir.

#### **(1) nolu çubukta $x=5.00$ m (kiriş sağ ucu) için hesap :**

Kirişlerde normal kuvvet  $N=0$  olduğundan (1) nolu çubuğun akma koşulu olarak

$$M^0 + \Delta P^1 \cdot \Delta M_C^1 = M_p$$

bağıntısı kullanılmıştır. Bu bağıntıda yer alan  $M^0$  ve  $\Delta M_C^1$  sırasıyla Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.11'den, kirişin sağ ucunun eğilme momenti taşıma kapasitesini ifade eden  $M_p$  ise Çizelge 4.2'den alınarak yerlerine koyulduğunda

$M^0 = -27.1$  kNm ,  $\Delta M_C^1 = -102.1$  kNm ,  $M_p = -79.9$  kNm için  $\Delta P^1=0.517$  olarak hesaplanmıştır.

**(5) nolu çubukta  $x=0.00$  m (kolon alt ucu) için hesap :**

Kolonlarda akma koşulu olarak

$$a_1.(M^0 + \Delta P^1 . \Delta M_C^1) + a_2.(N^0 + \Delta P^1 . \Delta N_C^1) + b = 0$$

bağıntısı kullanılmıştır. Bu bağıntıda, düşey yüklerden oluşan kesit tesirleri  $M^0$ ,  $N^0$  Çizelge 4.11'den, birim yatay yük artımından oluşan birleştirilmiş kesit tesirleri  $\Delta M_C^1$ ,  $\Delta N_C^1$  Çizelge 4.11'den alınır.

$$M^0 = 6.6 \text{ kNm} \quad N^0 = -357.6 \text{ kN}$$
$$\Delta M_C^1 = -247.4 \text{ kNm} \quad \Delta N_C^1 = 312.2 \text{ kN}$$

$a_1$ ,  $a_2$  ve  $b$  değerleri, kolon kesitlerine ait Şekil 4.5'de gösterilen lineerleştirilmiş akma koşullarından yararlanarak Bölüm 2.3'de belirtildiği gibi belirlenmektedir. Bu değerler akma koşulunun bölgelerine göre değişeceğinden her bölge için yatay yük artımı belirlenmesi ve en küçük yük artımının  $\Delta P^1$  olarak alınması gerekmektedir.

Şekil 4.5'de gösterilen akma koşulunun altı bölgesi için bu işlemler yapılmış, (5) nolu akma koşulu bölgesinde

$$a_1 = 0.99708 \quad , \quad a_2 = -0.07631 \quad , \quad b = 130.758$$

için en küçük yatay yük artımı  $\Delta P^1 = 0.6087$  olarak elde edilmiştir.

Sistemdeki bütün kritik kesitler için bu işlemler tekrarlanmış ve ilk plastik kesitin, sabit düşey yükler altında yatay yük artımının  $\Delta P^1 = 0.275$  değerinde, (2) nolu çubuğun sağ ucunda oluştuğu belirlenmiştir.

Bu ilk plastik kesitin oluşmasına karşılık gelen toplam yatay yük parametresi

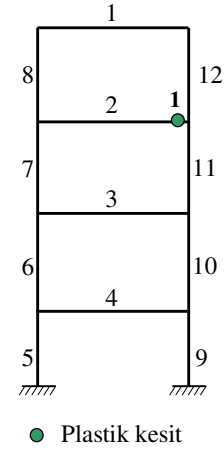
$$P^1 = \Delta P^1 = 0.2754$$

olarak elde edilmiştir. Bu yatay yük parametresine karşılık gelen kesit tesirleri,

yerdeşiftirmeler ve diğer davranış büyüklükleri de (2.32) bağıntısı ile hesaplanmış ve izelge 4.13, izelge 4.14’de verilmiştir.

Çizelge 4.13 Dört katlı ereve de ilk yük artımı sonundaki toplam uç kuvvetleri

ubuk no	Kritik kesit yeri	$P^1 = 0.275$ için		
		$M^1$ (kNm)	$N^1$ (kN)	$T^1$ (kN)
1	sol uç	1.0	0.0	22.2
	sağ uç	-55.2	0.0	44.6
2	sol uç	17.1	0.0	14.0
	sağ uç	-79.9	0.0	52.8
3	sol uç	40.9	0.0	4.3
	sağ uç	-104.6	0.0	62.5
4	alt uç	39.7	0.0	5.0
	üst uç	-102.5	0.0	61.8
5	alt uç	-61.5	-271.7	24.7
	üst uç	15.9	-271.7	-24.7
6	alt uç	-25.5	-209.4	15.7
	üst uç	25.6	-209.4	-15.7
7	alt uç	-18.7	-148.3	13.0
	üst uç	23.3	-148.3	-13.0
8	alt uç	2.6	-78.2	-1.0
	üst uç	1.0	-78.2	1.0
9	alt uç	-74.7	-443.5	37.8
	üst uç	42.1	-443.5	-37.8
10	alt uç	-62.1	-327.0	39.6
	üst uç	60.6	-327.0	-39.6
11	alt uç	-47.3	-209.3	31.0
	üst uç	48.5	-209.3	-31.0
12	alt uç	-35.0	-100.6	29.5
	üst uç	55.2	-100.6	-29.5



Çizelge 4.14 Dört katlı ereve de ilk yük artımı sonundaki kat yatay yerdeşiftirmeleri ve görel kat telemeleri

Kat no	$P^1 = 0.275$ için	
	Kat yatay yerdeşiftirmeleri ( $\delta$ ) (m)	Grel kat telemeleri ( $\Psi$ ) (%)
4	0.04121	
3	0.03300	0.295
2	0.02136	0.401
1	0.00846	0.432
		0.282

## 6. Hesap adımı

Oluşan ilk plastik kesitteki  $\phi^1$  plastik şekildeğiştirme parametresi ilave bilinmeyen olarak alınır ve bu bilinmeyenin çözüme etkisini ifade eden  $[S_{\phi d}]$ ,  $[S_{d\phi}]$ ,  $[S_{\phi\phi}]$  ve  $[P_{\phi o}]$  matrisleri Bölüm 2.4.1.2'de açıklandığı gibi belirlenerek indirgenmiş denklem takımına ilave edilir. Daha sonra sadece yeni eklenen bu ilave satır ve kolon, indirgenmiş denklem takımından yararlanarak indirgenir.  $[S_{\phi d}]$ ,  $[S_{d\phi}]$ ,  $[S_{\phi\phi}]$  ve  $[P_{\phi o}]$  matrislerinin elde edilişleri aşağıda ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

### **$[S_{d\phi}]$ ve $[S_{\phi d}]$ matrislerinin belirlenmesi**

$[S_{d\phi}]$  matrisini belirlemek için plastik kesitin meydana geldiği (2) çubuğunda plastik şekildeğiştirme bileşeninin ( $\phi^1$ ) birim değerinden oluşan çubuk uç kuvvetleri matrisleri  $[P_{\phi 1}]_3$  ve  $[P_{\phi 1}]_4$ 'ün hesaplanması gerekmektedir.

Buna göre,

$\phi^1 = 1$  için plastik kesitteki plastik şekildeğiştirme bileşenleri

$$\theta^1 = \phi^1 a_1 = a_1 = -1.000 \quad (M_p < 0)$$

$$\Delta^1 = \phi^1 a_2 = a_2 = 0.000 \quad (N = 0)$$

olarak elde edilmiştir. Plastik kesitin çubuk üzerindeki yerini tanımlayan  $\alpha$  parametresi

$$\alpha = x^1/L = 5.00/5.00 = 1.000$$

olarak elde edilmiştir. Normal kuvveti sıfır olan ve üç bölgeli sabit atalet momentine sahip (2) çubuğuna ait rijitlik ifadeleri ve yukarıda hesaplanan şekildeğiştirme bileşenleri, *birinci mertebe* teorisine ait (2.15) matrislerinde yerine koyularak

$$[P_{\phi 1}]_3 = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5502 \\ 0 \\ -3348 \end{bmatrix} \quad [P_{\phi 1}]_4 = \begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -11238 \\ 0 \\ 3348 \end{bmatrix}$$

elde edilmiştir. Bu matrisler sistem eksen takımına dönüştürülmüş ve Şekil 4.8’de verilen yerdeğiştirme bileşenlerine karşılık gelen terimler ilgili yerlere yazılarak  $[S_{d\phi}]$  matrisi

$$[S_{d\phi}]^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -3348 \ -5502 \ 3348 \ -11238 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

şeklinde elde edilmiştir.  $[S_{\phi d}]$  matrisi de Bölüm 2.4.1.2’de belirtildiği gibi  $[S_{d\phi}]$  matrisinden yararlanarak

$$[S_{\phi d}] = [S_{d\phi}]^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -3348 \ -5502 \ 3348 \ -11238 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

şeklinde belirlenmiştir.

### **$[S_{\phi\phi}]$ matrisinin belirlenmesi**

$\Delta P^1=1$  yük artımı için tek elemandan oluşan  $[S_{\phi\phi}]$  matrisinin  $S_{\phi\phi}(1,1)$  elemanı

$$\theta^1 = \phi^1 a_1 = a_1 = -1.000 \quad (M_p < 0)$$

$$\Delta^1 = \phi^1 a_2 = a_2 = 0.000 \quad (N = 0)$$

plastik şekildeğiştirme bileşenlerinden dolayı ilk plastik kesitteki

$$a_1 \Delta M + a_2 \Delta N$$

iç kuvvet değişiminden oluşmaktadır. Bu ifadedeki  $\Delta M$  ve  $\Delta N$  terimlerinin *birinci merteye teorisindeki* karşılıkları (2.24) bağıntıları ile

$x = L = 5.00$  m için

$$\Delta M = \frac{x}{L} P_2 - \left(1 - \frac{x}{L}\right) P_1 = P_2 = -11238 \quad , \quad \Delta N = P_5 = 0$$

şeklinde elde edilmiştir. Buna göre

$$[S_{\phi\phi}] = [11238]$$

olarak elde belirlenmiştir.

$\Delta P_y^1 = 1.00$  yüklemesinde, üzerinde plastikleşen kesit bulunan (2) nolu çubuğa dış yük etkilediğinden  $[P_{\phi o}]$  matrisinin  $\phi^1$  şekildeğiştirme parametresine karşılık gelen terimi sıfır olmaktadır.

Elde edilen  $[S_{\phi d}]$  ,  $[S_{d\phi}]$  ,  $[S_{\phi\phi}]$  ve  $[P_{\phi o}]$  matrisleri (2.28) bağıntısında belirtildiği gibi mevcut denklem takımına eklenerek genişletilmiş denklem takımı belirlenmiştir. Genişletilmiş sistem rijitlik matrisi  $[S]_G$ , Çizelge 4.15’de gösterilmiştir.

### **7. Hesap adımı**

Bu adımda, genişletilmiş denklem takımının katsayılar matrisinin determinant değeri  $\det [S]_G$ ’ nin kontrol edilmesi ve sınır değere ulaşıldığında yük artımına son verilmesi gerekmektedir. Buna göre ilk yük artımı sonunda genişletilmiş sistem rijitlik matrisinin determinant değeri

$$\det [S]_G = 0.735E+10 > 0$$

olarak hesaplanmıştır. Bunun üzerine 2. hesap adımına geri dönülerek ikinci yatay yük artımı için ( $\Delta P^2 = 1$ ) aynı işlemler tekrarlanmıştır.

Çizelge 4.15 Dört katlı çerçevede ilk plastik kesit oluşumundan sonra genişletilmiş sistem rijitlik matrisi

1. Plastik  
şekildeğiştirme  
parametresi



	$d_{1x}$	$d_{2x}$	$d_{3x}$	$d_{4x}$	$d_{5x}$	$d_{6x}$	$d_{7x}$	$d_{8x}$	$d_{9x}$	$d_{10x}$	$d_{11x}$	$d_{12x}$	$d_{13x}$	$d_{14x}$	$d_{15x}$	$d_{16x}$	$d_{17x}$	$d_{18x}$	$d_{19x}$	$d_{20x}$	$\phi^1$	
14947	0	11255	0	11255	-14947	0	11255	0	11255	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1614673	3348	-1339	3348	0	-1613333	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		33730	-3348	5502	-11255	0	11273	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			1614673	-3348	0	0	0	-1613333	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				33730	-11255	0	0	0	11273	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
					30654	0	614	0	614	-15707	0	11869	0	11869	0	0	0	0	0	0	0	0
						3228006	3348	-1339	3348	0	-1613333	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3348
							57433	-3348	5502	-11869	0	11905	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-5502
								3228006	-3348	0	0	0	-1613333	0	0	0	0	0	0	0	0	3348
									57433	-11869	0	0	0	11905	0	0	0	0	0	0	0	-11238
										32055	0	526	0	526	-16348	0	12395	0	12395	0	0	0
											3228491	4561	-1824	4561	0	-1613333	0	0	0	0	0	0
												63372	-4561	7871	-12395	0	12449	0	0	0	0	0
													3228491	-4561	0	0	0	-1613333	0	0	0	0
														63372	-12395	0	0	0	0	12449	0	0
															33162	0	394	0	394	0	0	0
																3228491	4561	-1824	4561	0	0	0
																	65176	-4561	7871	0	0	0
																		3228491	-4561	0	0	0
																				65176	0	0
																						11238

$[S]_G =$

### İkinci yatay yük artımı ( $\Delta P^2 = 1$ ) için hesap

Üzerinde bir plastikleşen kesit bulunan sisteme ait genişletilmiş sistem rijitlik matrisi ilgili dinamik serbestlikler için yoğunlaştırılarak ikinci yük artımı adımına ait dinamik rijitlik matrisi  $[S]_D^2$  belirlenmiştir. Bu matris ve kütle matrisi kullanılarak serbest titreşim analizi yapılmış ve ikinci yük artımı adımına ait modal özellikler ve spektral ivme değerleri elde edilmiştir (Çizelge 4.16).

$$[S]_D^2 = \begin{bmatrix} d_1 & d_6 & d_{11} & d_{16} \\ 5600.8 & -9125.5 & 4151.1 & -763.0 \\ -9125.5 & 19963.8 & -14223.7 & 4104.6 \\ 4151.1 & -14223.7 & 21761.8 & -15937.9 \\ -763.0 & 4104.6 & -15937.9 & 28452.0 \end{bmatrix}$$

Çizelge 4.16 Dört katlı çerçevede ikinci yük artımı adımına ait modal büyüklükler ve spektral ivmeler

Mod no	$\omega^2$ (rad <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$\omega$ (rad/s)	T (s)	$\Gamma$	Sa (g)
1	35.569	5.964	1.054	201.316	0.462
2	349.491	18.695	0.336	95.147	1.000
3	1677.736	40.960	0.153	50.637	1.000
4	3651.589	60.428	0.104	29.981	0.800

Bir önceki yük artımı adımına ait modal yatay yük değerleri ve bu adıma ait Çizelge 4.16'daki modal özellikler ile spektral ivme değerleri (2.34) bağıntısında yerlerine konarak ikinci yük artımı adımına ait birim modal yatay yük dağılımları belirlenmiştir (Çizelge 4.17).

Çizelge 4.17 Dört katlı çerçevede ikinci yük artımı adımına ait modal yatay yük dağılımları

Kat no	Modal yatay yük dağılımları (kN)			
	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod
4	167.1	-111.7	40.7	-8.8
3	128.7	42.8	-75.7	24.9
2	77.7	139.6	8.6	-35.0
1	29.7	85.4	77.0	33.1



Bir önceki adıma ait indirgenmiş sistem rijitlik matrisine ilave edilen satır ve kolonun indirgenmesi sırasında ayrıca, plastik kesitin oluşumu ile değişen sistem davranışı nedeniyle her bir mod için yeniden hesaplanan birim modal yatay yük dağılımlarından (Çizelge 4.17) oluşan  $[q]^2$  sabitler matrisi de indirgenmektedir. Böylece, her bir moda ait birim modal davranış büyüklükleri belirlenmiş olmaktadır. Bu adımda,  $\Delta P^2 = 0.021$ ' lik yatay yük artımı sonunda yük parametresinin  $P^2 = 0.297$  değerinde, (3) nolu çubuğun sağ ucunda ikinci plastik kesitin oluştuğu belirlenmiştir.

Bir önceki adımda plastikleşen (2) nolu çubuğun sağ ucundaki plastik şekildeğiştirme parametresi yeni bilinmeyen olarak denklem takımına ilave edildiğinden, bu yük artımı sonunda bu kesitte meydana gelen plastik şekildeğiştirme parametresi direkt olarak elde edilmektedir. Bu plastik şekildeğiştirme parametresinden yararlanarak da kesitteki plastik şekildeğiştirme bileşenleri (plastik dönme  $\theta^1$  ve plastik boy değişmesi  $\Delta^1$ ) belirlenmektedir. Buna göre,

$$a_1 = -1.000 \quad \text{için} \quad \theta^1 = a_1 \phi^1 = -\phi^1$$

$$a_2 = 0.000 \quad \text{için} \quad \Delta^1 = a_2 \phi^1 = 0$$

olarak elde edilmiştir. Buradan, plastik kesitteki şekildeğiştirme parametresinin ( $\phi^1$ ) ters işaretli kesitteki plastik dönmeye ( $\theta^1$ ) karşılık geldiği görülmektedir. Buna göre, ilgili plastik kesitte, ikinci yük artımı adımıyla oluşan modal, birleştirilmiş ve toplam plastik şekildeğiştirme parametresi değerleri ile toplam plastik dönme değeri Çizelge 4.18'de verilmiştir.

Çizelge 4.18 Dört katlı çerçevede ilk plastik kesitteki plastik şekildeğiştirme parametresi ve plastik dönme değeri

Plastik şekildeğiştirme parametresi ( $\phi$ )						Plastik dönme ( $\theta^1$ ) (rad)
1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	$\Delta P^2=1$ için $\Delta\phi_C^1$	$P^2=0.297$ için $\phi^1$	$P^2=0.297$ için $\theta^1$
-0.06011	0.01850	-0.00050	-0.00041	-0.06289	-0.00134984	0.00134984

İkinci yük artımı adımıyla ait modal, birleştirilmiş ve toplam kat yatay yerdeğiştirmeleri Çizelge 4.19'da, görelî kat ötelemesi değerleri Çizelge 4.20'de ve toplam çubuk uç kuvvetleri Çizelge 4.21'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.19 Dört katlı çerçevede ikinci yük artımına ait kat yatay yerdeğiştirmeleri

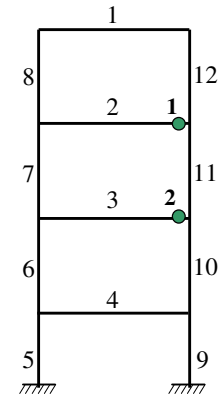
Kat no	Kat yatay yerdeğiştirmeleri ( $\delta$ ) (m)					
	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	$\Delta P^2=1$ için $\Delta \delta_C^2$	$P^2=0.297$ için $\delta^2$
4	0.36336	-0.03428	0.00224	0.00015	0.36498	0.04904
3	0.26902	0.00171	-0.00318	0.00069	0.26905	0.03877
2	0.15189	0.02614	0.00042	-0.00069	0.15412	0.02467
1	0.05706	0.01648	0.00346	0.00068	0.05950	0.00974

Çizelge 4.20 Dört katlı çerçevede ikinci yük artımına ait görelî kat ötelemeleri

Kat no	Görelî kat ötelemeleri ( $\psi$ ) (%)					
	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	$\Delta P^2=1$ için $\Delta \psi_C^2$	$P^2=0.297$ için $\psi^2$
4						
3	3.144	-1.200	0.181	-0.018	3.370	0.367
2	3.904	-0.814	-0.120	0.046	3.991	0.486
1	3.161	0.322	-0.101	-0.046	3.179	0.500
	1.902	0.549	0.115	0.023	1.983	0.325

Çizelge 4.21 Dört katlı çerçevede ikinci yük artımı sonundaki toplam uç kuvvetleri

Çubuk no	Kritik kesit yeri	$P^2=0.297$ için		
		$M^2$	$N^2$	$T^2$
1	sol uç	7.3	0.0	19.7
	sağ uç	-61.1	0.0	47.1
2	sol uç	23.8	0.0	12.7
	sağ uç	-79.9	0.0	54.1
3	sol uç	53.5	0.0	-0.7
	sağ uç	-116.9	0.0	67.5
4	alt uç	50.5	0.0	0.6
	üst uç	-113.3	0.0	66.2
5	alt uç	-71.7	-258.9	29.4
	üst uç	20.3	-258.9	-29.4
6	alt uç	-32.2	-200.8	19.7
	üst uç	31.3	-200.8	-19.7
7	alt uç	-26.4	-144.5	17.1
	üst uç	28.3	-144.5	-17.1
8	alt uç	0.2	-75.7	1.7
	üst uç	7.3	-75.7	-1.7
9	alt uç	-84.8	-456.3	42.5
	üst uç	46.3	-456.3	-42.5
10	alt uç	-69.1	-335.6	43.9
	üst uç	67.1	-335.6	-43.9
11	alt uç	-53.9	-213.1	33.5
	üst uç	50.4	-213.1	-33.5
12	alt uç	-33.1	-103.1	31.2
	üst uç	61.1	-103.1	-31.2

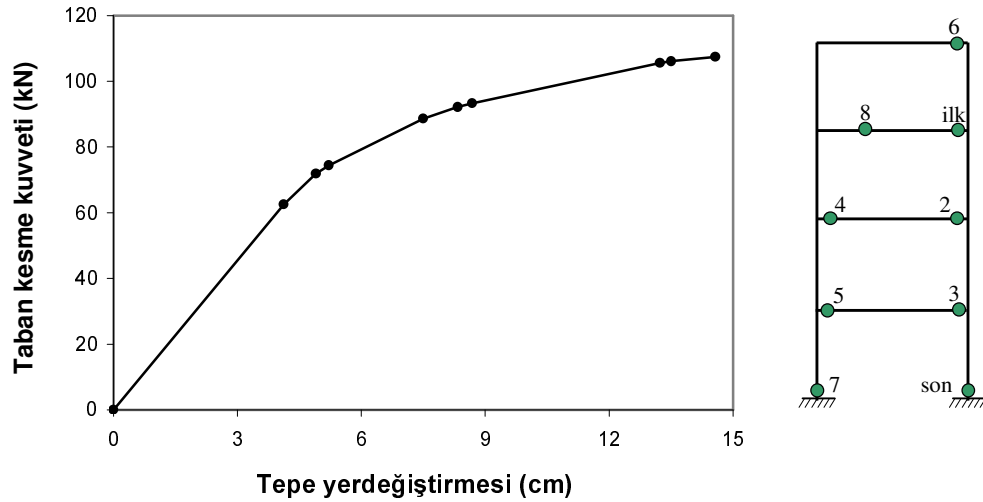


Benzer şekilde yapılan hesaplar ile 8. yük artımı sonunda, yatay yük parametresinin  $P^8 = 0.335$  değerinde 9. plastik kesitin meydana gelmesi sonucunda genişletilmiş sistem rijitlik matrisinin determinant değeri

$$\det[S]_G = -0.16624E+10 < 0$$

olarak hesaplanmış ve bu durum sistemin stabilite yetersizliği nedeniyle göçmesine karşı geldiğinden yük artımına son verilmiştir. 9. plastik kesiti de içeren genişletilmiş sistem rijitlik matrisi Çizelge 4.22'de gösterilmiştir.

Yük artımlarına karşılık gelen taban kesme kuvvetleri hesaplanmış ve bunlara ait tepe yerdeğıştirmeleri de kullanılarak sistemin kapasite eğrisi belirlenmiştir. Kapasite eğrisi ve sistemdeki plastikleşen kesitlerin dağılımı Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



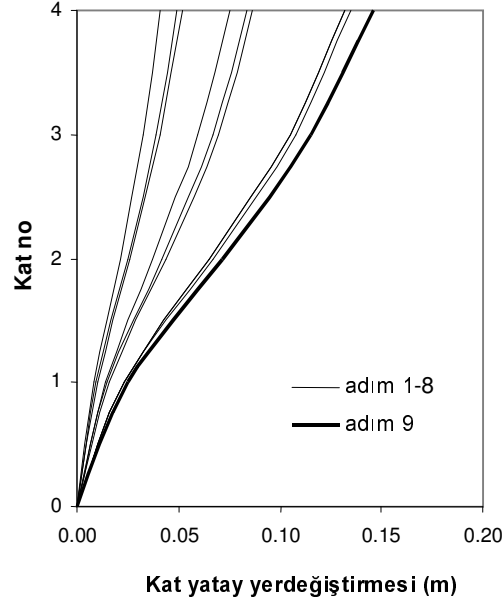
Şekil 4.10 Dört katlı çerçevenin kapasite eğrisi ve plastikleşen kesitlerin dağılımı

Çizelge 4.22 Dört katlı çerçevede son yük artımına ait genişletilmiş sistem rijitlik matrisi

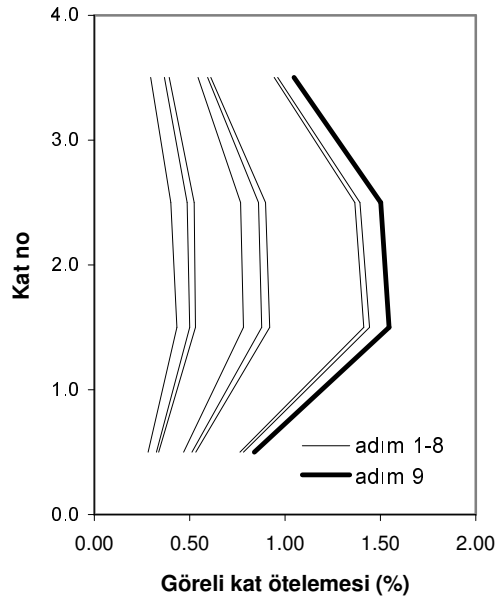
Plastik şekil değiştirme parametreleri

		$\phi^1$	$\phi^2$	$\phi^3$	$\phi^4$	$\phi^5$	$\phi^6$	$\phi^7$	$\phi^8$	$\phi^9$	
$[S]_G =$	$[S_{dd}]$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		0	0	0	0	0	-3348	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	-5502	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	3348	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	-11238	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		-3348	0	0	0	0	0	0	0	-2511	0
		-5502	0	0	0	0	0	0	0	-9145	0
		3348	0	0	0	0	0	0	0	2511	0
		-11238	0	0	0	0	0	0	0	-3410	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	-4561	0	-4561	0	0	0	0	0	0
		0	-7871	0	-14933	0	0	0	0	0	0
		0	4561	0	4561	0	0	0	0	0	0
		0	-14933	0	-7871	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	-12752	0	-12752
		0	0	-4561	0	-4561	0	-123119	0	0	0
		0	0	-7871	0	-14933	0	-12823	0	0	0
	0	0	4561	0	4561	0	0	0	0	-123119	
	0	0	-14933	0	-7871	0	0	0	0	-12823	
	$[S_{\phi d}]$	11238	0	0	0	0	0	0	3410	0	
			14933	0	7871	0	0	0	0	0	0
				14933	0	7871	0	0	0	0	0
					14933	0	0	0	0	0	0
						14933	0	0	0	0	0
							11238	0	0	0	0
							34754	0	0	0	
								7576	0	0	
									34754	0	

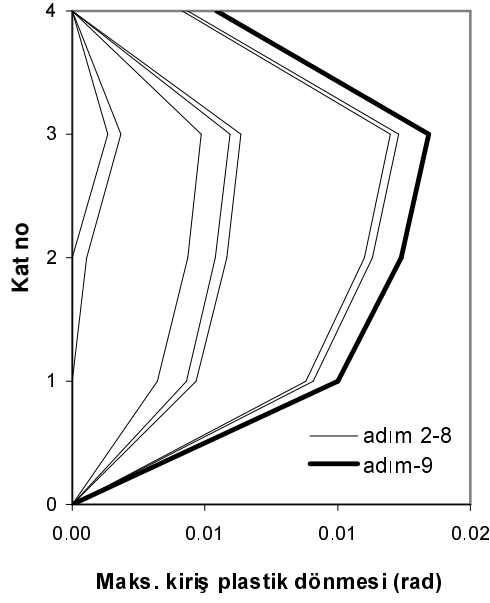
Her yük artımına ait kat yatay yerdeğıştirmeleri Şekil 4.11’de, görelî kat ötelemeleri Şekil 4.12’de, maksimum kiriş plastik dönmeleri Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Dört katlı çerçevde yük artımlarına ait kat yatay yerdeğıştirmeleri



Şekil 4.12 Dört katlı çerçevde yük artımlarına ait görelî kat ötelemeleri



Şekil 4.13 Dört katlı çerçevede yük artımlarına ait maksimum kiriş plastik dönmeleri

#### 4.3 Analiz Sonuçlarına göre ÇMUYAY'nin Değerlendirilmesi

Geliştirilen ÇMUYAY ile elde edilen sayısal sonuçların değerlendirilmesi amacıyla, üç farklı deprem yer hareketi kaydı için, çeşitli periyot bölgelerini temsil etmek üzere seçilen dört betonarme bina çerçevesi (5, 10, 15 ve 20-katlı) üzerinde sayısal uygulamalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, aynı binalar için yapılan Lineer Olmayan Dinamik Analiz (LODA), 1. mod esaslı Geleneksel Lineer Olmayan Statik Analiz (G-LOSA-1.mod) ve FEMA 356'da önerilen iki dağılım için yapılan lineer olmayan statik analiz sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler,

- kat yatay yerdeğiştirmeleri,
- görelî kat ötelemeleri,
- maksimum kiriş plastik dönmeleri,
- kat kesme kuvvetleri,
- kapasite eğrileri,
- sistemdeki plastikleşen kesit dağılımları

incelenerek yapılmıştır.

### 4.3.1 Örnek Betonarme Çerçeve Binaların ve Kullanılan Deprem Yer Hareketi Kayıtlarının Özellikleri

Farklı periyot bölgelerini temsil etmek üzere 5, 10, 15 ve 20-katlı betonarme binalar örnek olarak incelenmiştir. Genel özellikleri Çizelge 4.23’de, tipik kat kalıp planı Şekil 4.14’de verilen betonarme binalar TS500 ve ABYYHY’e göre boyutlandırıldıktan sonra, birer iç aks çerçevesi (B-B aksı) örnek olarak ele alınmıştır. Binanın düşey yükleri ve kütleleri yeterli yaklaşıklıkla paylaştırılarak çerçevelere ait düşey yükler ve kütleler belirlenmiştir. Çerçevelerin kat kütleleri ve periyotları Çizelge 4.24’de verilmiştir. Düşey yük olarak (1.0G+1.0Q) yüklemesi esas alınmış ve kiriş düşey yükleri Bölüm 4.2’de verilen örnekteki gibi eşdeğer tekil yükler ile idealleştirilmiştir. Çerçevelerdeki kiriş enkesit boyutları ve donatıları Çizelge 4.25’de, kolon enkesit boyutları ve donatıları Çizelge 4.26’da verilmiştir.

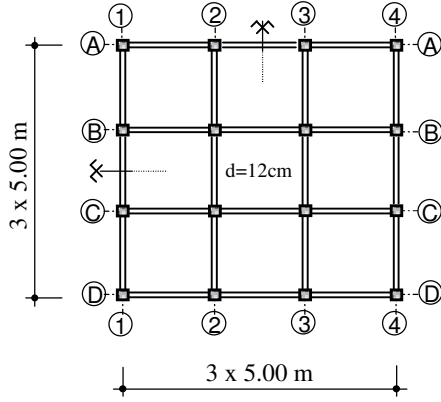
Çizelge 4.23 Binaların genel özellikleri ve deprem hesabında kullanılan parametreler

Beton	C25 ( $f_{ck}=25 \text{ N/mm}^2$ , $E_c = 30250 \text{ N/mm}^2$ )
Beton çeliği	S420a ( $f_{yk}=420 \text{ N/mm}^2$ , $E_s= 200000 \text{ N/mm}^2$ )
Sabit döşeme yükleri	$G = 4.78 \text{ kN/m}^2$ (Döşeme ağırlığı dahildir)
Hareketli döşeme yükleri	$Q = 2.00 \text{ kN/m}^2$
Duvar yükleri	2.84 kN/m (bütün kirişlerde mevcuttur)
Deprem bölgesi	1 ( $A_o=0.40$ )
Bina önem katsayısı	1 ( $I=1$ )
Zemin sınıfı	Z2 ( $T_A=0.15s$ $T_B=0.40s$ )
Süneklik düzeyi	Yüksek ( $R=8$ )

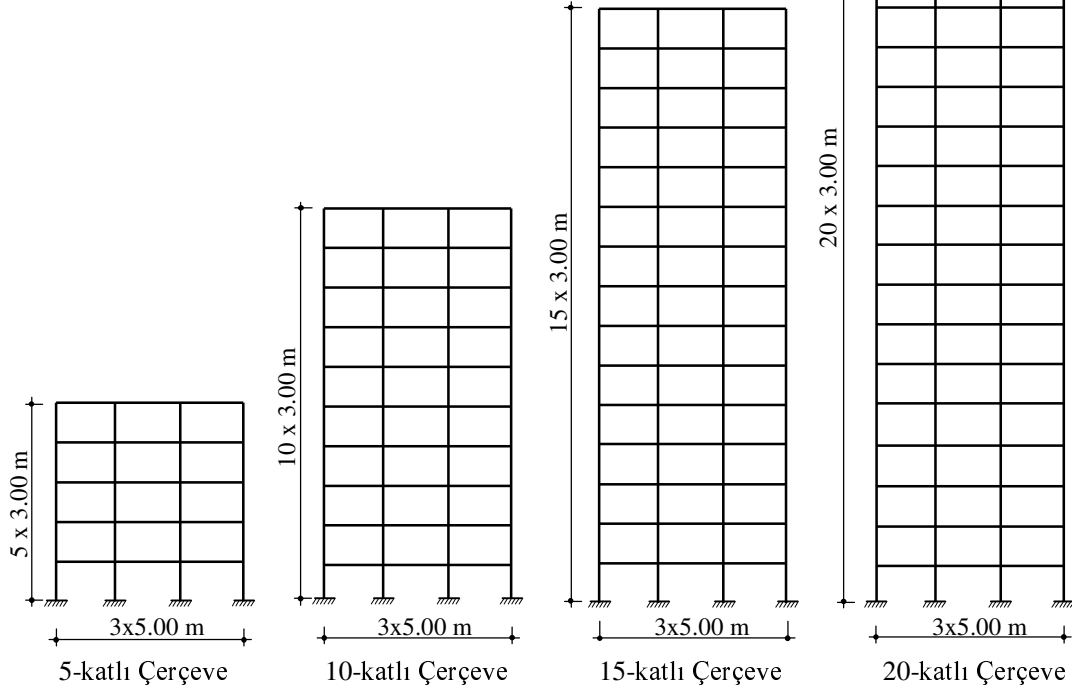
Geliştirilen yöntemin değerlendirilmesi için analizlerde kullanılan deprem yer hareketi kayıtlarına ait özellikler [58] Çizelge 4.27’de verilmiştir. Geliştirilen ÇMUYAY’nden elde edilen sonuçların Lineer Olmayan Dinamik Analiz (LODA) sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, geliştirilen yöntemle göre yapılan analizlerde, gözönüne alınan depremlere (Şekil 4.15) ait %5 sönümlü elastik ivme spektrumları (Şekil 4.16) kullanılmıştır. İvme spektrumlarının elde edilmesinde SeismoSignal [59] programından yararlanılmıştır.

Çizelge 4.24 Örnek betonarme çerçevelerin kat kütleleri ve periyotları

Çerçeve adı	Kat kütlesi ( $m_i$ ) ( $kNs^2/m$ )	Periyodu ( $T_1$ ) (s)	
		brüt kesitli	çatlamış kesitli
5-katlı	48.098	0.567	1.091
10-katlı	68.020	1.021	2.076
15-katlı	68.462	1.577	3.024
20-katlı	72.918	1.855	3.496



(a) Binalara ait tipik kat kalıp planı



(b) Çerçevelerin düşey enkesitleri

Şekil 4.14 Binaların tipik kat planı ve çerçeve düşey enkesitleri



Çizelge 4.25 Çerçeveslerdeki kiriş enkesit boyutları ve donatıları

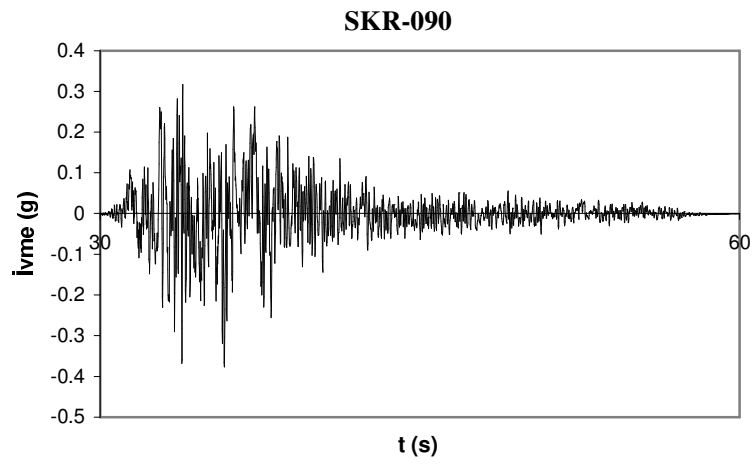
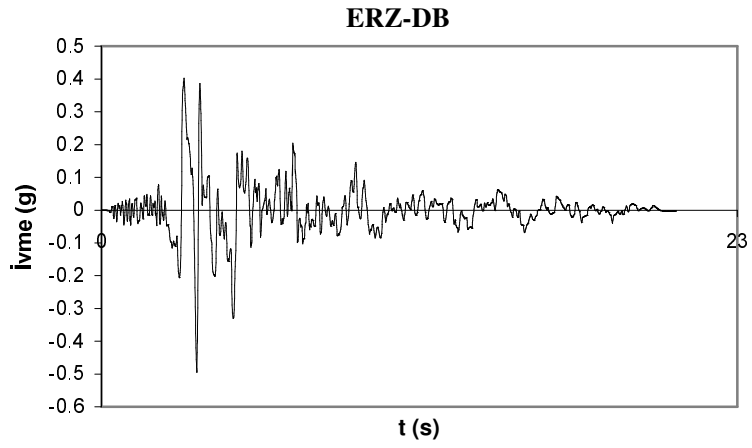
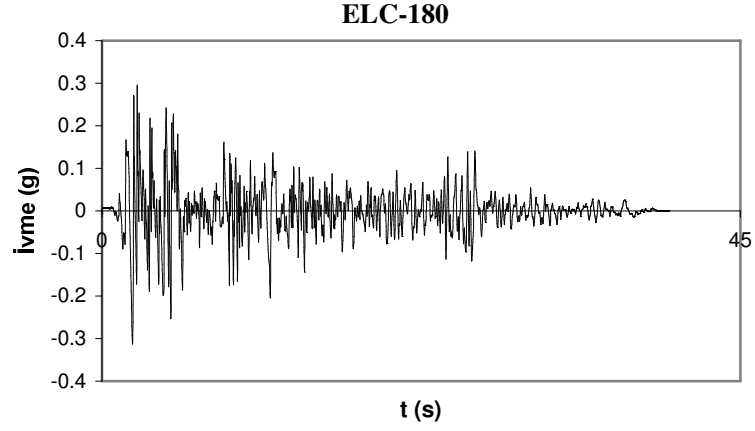
Çerçeve adı	Kat	Kiriş donatıları (cm <sup>2</sup> )					Kiriş boyutları (cm*cm)
		Yer	mesnet (1)	açıklık (1-2)	mesnet (2)	açıklık (2-3)	
5-katlı çerçeve	1-2	üst	12.57	6.28	12.57	6.28	25*50
		alt	6.28	6.28	6.28	6.28	
	3-4	üst	9.43	6.28	9.43	6.28	
		alt	6.28	6.28	6.28	6.28	
	5	üst	6.28	6.28	6.28	6.28	
		alt	6.28	6.28	6.28	6.28	
10-katlı çerçeve	1	üst	12.57	6.28	12.57	6.28	30*60
		alt	6.28	6.28	6.28	6.28	
	2-4	üst	12.57	6.28	12.57	6.28	
		alt	9.43	6.28	9.43	6.28	
	5-6	üst	12.57	6.28	12.57	6.28	30*60
		alt	6.28	6.28	6.28	6.28	
	7-9	üst	9.43	6.28	9.43	6.28	25*50
		alt	6.28	6.28	6.28	6.28	
	10	üst	6.28	6.28	6.28	6.28	
		alt	6.28	6.28	6.28	6.28	
15-katlı çerçeve	1	üst	12.57	6.28	12.57	6.28	30*60
		alt	9.43	6.28	9.43	6.28	
	2-4	üst	15.71	6.28	15.71	6.28	
		alt	9.43	6.28	9.43	6.28	
	5-6	üst	12.57	6.28	12.57	6.28	
		alt	9.43	6.28	9.43	6.28	
	7-9	üst	12.57	6.28	12.57	6.28	25*50
		alt	6.28	6.28	6.28	6.28	
	10-11	üst	12.57	6.28	12.57	6.28	25*50
		alt	6.28	6.28	6.28	6.28	
	12-14	üst	9.43	6.28	9.43	6.28	25*50
		alt	6.28	6.28	6.28	6.28	
	15	üst	6.28	6.28	6.28	6.28	25*50
		alt	6.28	6.28	6.28	6.28	
20-katlı çerçeve	1	üst	9.43	6.28	9.43	6.28	30*70
		alt	6.28	6.28	6.28	6.28	
	2-8	üst	12.57	6.28	12.57	6.28	
		alt	9.43	6.28	9.43	6.28	
	9-14	üst	12.57	6.28	12.57	6.28	30*60
		alt	9.43	6.28	9.43	6.28	
	15-16	üst	9.43	6.28	9.43	6.28	
		alt	6.28	6.28	6.28	6.28	
	17-19	üst	9.43	6.28	9.43	6.28	25*50
		alt	6.28	6.28	6.28	6.28	
	20	üst	6.28	6.28	6.28	6.28	
		alt	6.28	6.28	6.28	6.28	

Çizelge 4.26 Çerçevelerdeki kolon enkesit boyutları ve donatıları

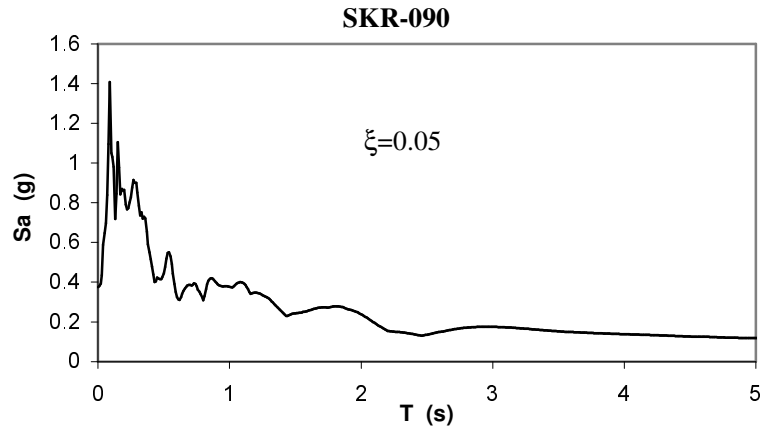
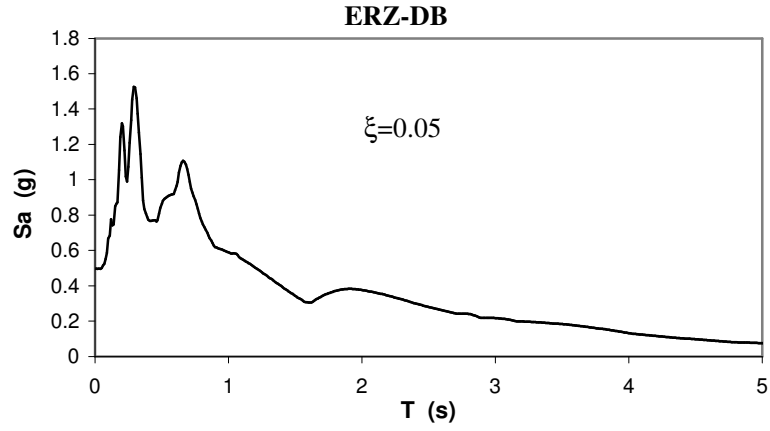
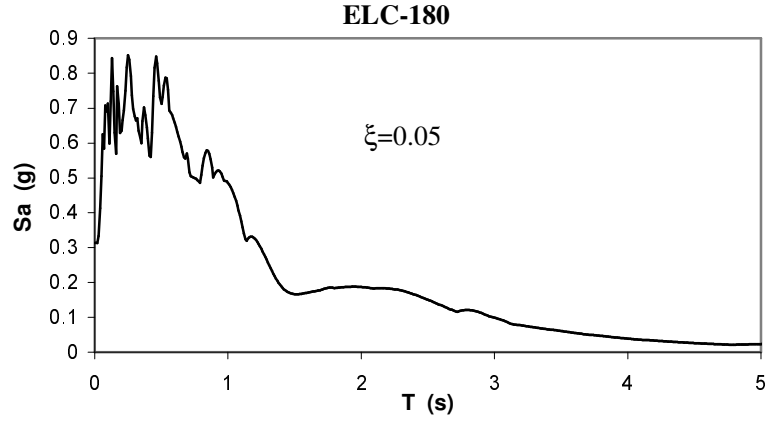
Çerçeve adı	Kat	Kolon adı	Kolon donatıları (cm <sup>2</sup> )	Kolon boyutları (cm*cm)
5-Katlı Çerçeve	1-3	B1,B4	24.12	45*45
		B2,B3	24.12	45*45
	4-5	B1,B4	16.08	35*35
		B2,B3	24.12	45*45
10-Katlı Çerçeve	1-3	B1,B4	25.12	50*50
		B2,B3	37.68	60*60
	4-6	B1,B4	24.12	45*45
		B2,B3	32.16	55*55
	7-8	B1,B4	18.48	40*40
		B2,B3	25.12	50*50
	9-10	B1,B4	13.56	35*35
		B2,B3	18.08	40*40
15-Katlı Çerçeve	1-3	B1,B4	25.12	50*50
		B2,B3	50.24	70*70
	4-6	B1,B4	20.32	50*50
		B2,B3	40.64	60*60
	7-10	B1,B4	24.12	45*45
		B2,B3	25.12	50*50
	11-13	B1,B4	16.08	40*40
		B2,B3	24.12	45*45
	14-15	B1,B4	24.12	35*35
		B2,B3	16.08	40*40
20-Katlı Çerçeve	1-4	B1,B4	54.24	70*70
		B2,B3	72.32	80*80
	5-8	B1,B4	37.68	60*60
		B2,B3	50.24	70*70
	9-12	B1,B4	25.12	50*50
		B2,B3	37.68	60*60
	13-16	B1,B4	18.48	40*40
		B2,B3	25.12	50*50
	17-20	B1,B4	13.56	35*35
		B2,B3	18.80	40*40

Çizelge 4.27 Analizlerde kullanılan depremlerin özellikleri

Deprem adı	Tarihi	Bileşeni	Büyüklüğü (M)	Maks. yer ivmesi (g)	Maks. yer hızı (cm/s)	Maks. yer değiştirmesi (cm)
İmperial Valley	1940	<b>ELC-180</b>	7.0	0.313	29.8	13.32
Erzincan-Türkiye	1992	<b>ERZ-DB</b>	6.9	0.496	64.3	22.78
Kocaeli-Türkiye	1999	<b>SKR-090</b>	7.4	0.376	79.5	70.52



Şekil 4.15 Analizlerde kullanılan deprem yer hareketlerine ait ivme kayıtları



Şekil 4.16 Analizlerde kullanılan deprem yer hareketlerine ait elastik ivme spektrumları

### 4.3.2 Çerçevesinin Geliştirilen ÇMUYAY ile Analizi

Örnek olarak ele alınan Şekil 4.14'deki binalara ait çerçevelerin, gözönüne alınan üç deprem yer hareketine ait ivme spektrumu için geliştirilen Çok Modlu Uyarlamalı Yük Artımı Yöntemi (ÇMUYAY) ile lineer olmayan statik analizleri yapılmıştır. Analizlerde, çerçevelere ait bütün titreşim modları gözönüne alınmış ve Bölüm 2.4.1.6'da belirtilen sınır değere ( $\det [S]_G \leq 0$ ) ulaşıncaya kadar yük artımı uygulanmıştır.

Çerçevelerin geliştirilen ÇMUYAY ile analizinde bu tez çalışmasında geliştirilen MEPARCS bilgisayar programı kullanılmıştır. Betonarme elemanların enkesit özelliklerinin (eğilme ve uzama rijitlikleri, moment taşıma kapasiteleri, karşılıklı etki diyagramları vb.) belirlenmesinde BEKE-3 [24] programından yararlanılmıştır.

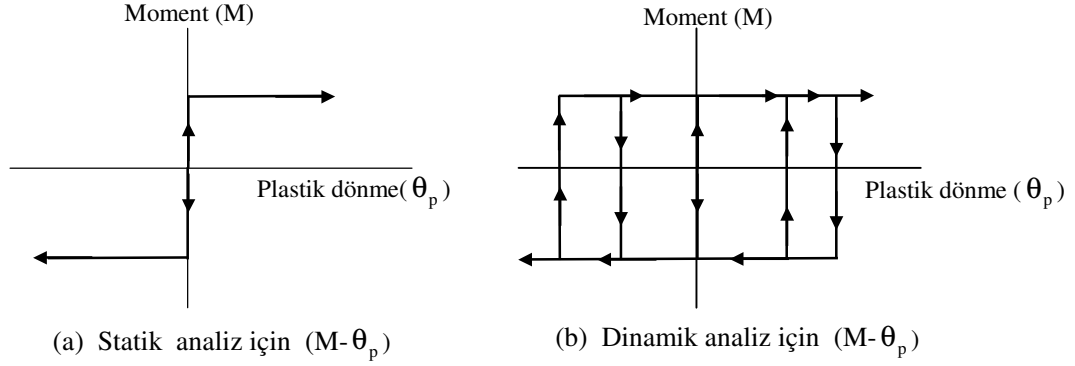
Analizler sonucunda elde edilen kat yatay yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri, maksimum kiriş plastik dönmeleri, kat kesme kuvvetleri, kapasite eğrileri ve sistemdeki plastikleşen kesit dağılımları, sonuçların karşılaştırılarak değerlendirildiği Bölüm 4.3.5'de verilmiştir (Şekil 4.19- 4.38).

### 4.3.3 Çerçevelerin Lineer Olmayan Dinamik Analizi (LODA)

Geliştirilen ÇMUYAY'nin değerlendirilmesi amacıyla, ele alınan çerçevelerin gözönüne alınan deprem yer hareketi kayıtları için LODA'î ve ÇMUYAY ile analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çerçevelerin LODA'inde *Newmark-Beta* sayısal integrasyon yöntemini esas alan RAM Perform-2D [60] programından yararlanılmıştır. Analizlerde sönümün rijitlikle orantılı olduğu kabul edilmiş ve %5'lik sönüm oranı ( $\xi$ ) esas alınmıştır. Kiriş ve kolon kesitlerinin *Moment-Plastik Dönme* bağıntılarına ait histeresis matematik model için, statik analiz ile uyumlu olacak şekilde *ideal-rijit-plastik* davranış kullanılmıştır (Şekil 4.17).

Analizler sonucunda elde edilen kat yatay yerdeşiştirmeleri, göreli kat ötelemeleri, maksimum kiriş plastik dönmeleri, kat kesme kuvvetleri, kapasite eğrileri ve sistemdeki plastikleşen kesit dağılımları, sonuçların karşılaştırılarak değerlendirildiği Bölüm 4.3.5’de verilmiştir (şekil 4.19- 4.38).



şekil 4.17 Analizlerde kullanılan *Moment-Plastik Dönme* (M- $\theta_p$ ) bağıntılarına ait matematik modeller

#### 4.3.4 Çerçevelerin Monoton Artan Farklı Yatay Yük Dağılımları için Lineer Olmayan Statik Analizi (LOSA)

Geliştirilen ÇMUYAY’nden elde edilen sonuçları değerlendirmek amacıyla, monoton artan yatay yük dağılımlarını esas alan mevcut LOSA yaklaşımları ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Bunun için, en yaygın yaklaşım olan 1. mod esaslı geleneksel LOSA ve FEMA 356’da ve son dönemde Eurocode 8 [61]’de de yer alan LOSA yaklaşımları kullanılmıştır.

FEMA 356 ve Eurocode 8’de yer alan yaklaşıma göre binaların lineer olmayan statik analiz ile değerlendirilmesinde, binanın modal özelliklerine göre belirlenen bir yük dağılımı ve ayrıca kat kütleleri ile orantılı bir üniform dağılımın kullanılması öngörülmektedir. Yüksek modların etkin olduğu binalarda modal dağılım olarak, yeter sayıda mod için elastik davranış spektrum analizinden elde edilen birleştirilmiş kat kesme kuvvetleri ile orantılı bir yük dağılımının kullanılması istenmektedir. Böylece, deprem esnasında atalet kuvveti dağılımdaki büyük değişimlerin etkisinin ve yüksek mod etkilerinin gözönüne alınması amaçlanmaktadır. FEMA 356’da ayrıca, üniform dağılıma alternatif olarak, yapıda

plastik kesitler oluştukça sistemin yerdeğiştirme profiline bağılı olarak sürekli değişen bir *uyarlamalı yük dağılımı* kullanılması önerilmektedir. Bu dağılımda, genel olarak plastik kesitler oluştukça değişen 1. mod şekli ile orantılı bir yük dağılımı, yine değişen modal özellikler ile belirlenen yeter sayıda mod için birleştirilmiş modal kat kuvvetleri ile orantılı dağılım vb. yaklaşımlar kullanılmaktadır [17,18]. Bu uyarlamalı dağılımın kullanılması ile oldukça iyi sonuçlar elde edilebildiği, ancak analizin büyük ölçüde zorlaştığı ve hesap hacminin arttığı bilinmektedir [7]. Geliştirilen ÇMUYAY’nde özel bir durum olarak sadece 1. modun gözönüne alınması ile yapılan analiz 1. mod esaslı *uyarlamalı* analize karşılık gelmektedir. Böylece, geliştirilen ÇMUYAY ile bu uyarlamalı analiz de etkin bir şekilde yapılabilmektedir.

Bu çalışmada, ÇMUYAY’nden elde edilen sonuçları karşılaştırarak değerlendirmek amacıyla çerçevelerin;

- 1. mod atalet kuvveti dağılımı için Geleneksel LOSA’i (G-LOSA-1.mod),
- FEMA 356’da önerilen birleştirilmiş modal kat kesme kuvvetleri ile orantılı dağılım için LOSA’i (FEMA-modal),
- FEMA 356’da önerilen üniform dağılım için LOSA’i (FEMA-üniform)

yapılmıştır. Bu analizlerde kullanılan dağılımlardaki kat kuvvetlerinin hesabı aşağıda açıklanmıştır.

#### a) 1. mod atalet kuvveti dağılımı

Bu dağılımdaki  $F_i$  kat kuvvetleri, 1. moduna ait elastik modal özelliklerinden yararlanılarak (4.1) bağıntısı ile hesaplanan atalet kuvvetlerine eşittir. Esasen bu dağılım 1. moda ait mod şekli ile orantılı dağılıma karşılık gelmektedir.

$$F_i = \omega_1^2 m_i \Phi_{i1} \quad \text{veya} \quad F_i = m_i \Phi_{i1} \quad (4.1)$$

Burada,  $\omega_1^2$  1. moda ait özdeğeri,  $m_i$  i nolu kattaki kütle,  $\Phi_{i1}$  1. moda ait i nolu kattaki özvektörü göstermektedir.

**b) FEMA 356'daki birleştirilmiş modal kat kesme kuvvetleri ile orantılı dağılım**

Bu dağılımda, gözönüne alınan davranış spektrumuna ait elastik spektral ivmeler kullanılarak belirlenen birleştirilmiş modal kat kesme kuvvetlerinden elde edilen kat kuvvetleri esas alınmaktadır. Modal kütle katılım oranları toplamı en az %90 olacak sayıda modun gözönüne alınması istenmektedir [7]. Bu dağılıma ait kat kuvvetlerinin ( $F_i$ ) hesabında izlenen yol aşağıda açıklanmıştır.

1) Yeter sayıda mod için katlara etkiyen modal kat kuvvetleri ( $F_{ij}$ ) (4.2) bağıntısı ile belirlenir.

$$F_{ij} = \Gamma_j \cdot m_i \cdot \Phi_{ij} \cdot S_{a_j} \quad (4.2)$$

2) Bu yatay kuvvetler ( $F_{ij}$ ) kullanılarak (4.3) bağıntısı ile  $V_{ij}$  modal kat kesme kuvvetleri belirlenir.

$$V_{ij} = \sum_{k=i}^{\bar{n}} F_{kj} \quad (\bar{n} : \text{kat adedi}) \quad (4.3)$$

3) Bu modal kat kesme kuvvetleri uygun birleştirme kuralı ile birleştirilir. Örneğin “Karelerinin Toplamının Kare Kökü” kuralı için (4.4) bağıntısı kullanılır.

$$V_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{\bar{M}} (V_{ij})^2} \quad (\bar{M} : \text{gözönüne alınan mod sayısı}) \quad (4.4)$$

4) Birleştirilmiş kat kesme kuvvetlerine ( $V_i$ ) karşılık gelen  $F_i$  kat kuvvetleri yatay denge denklemleri ile belirlenir.

FEMA-modal dağılımındaki modal kat kuvvetlerinin hesabında spektral ivme ( $S_a$ ) değerleri ilgili deprem yer hareketi ivme kaydına ait %5 sönümlü elastik ivme spektrumundan alınmıştır. Modal kütle katılım oranları toplamı en az %90 olacak şekilde 5-katlı ve 10-katlı çerçevelerde ilk üç mod, 15 katlı ve 20-katlı çerçevelerde ilk 5 mod gözönüne alınmıştır.

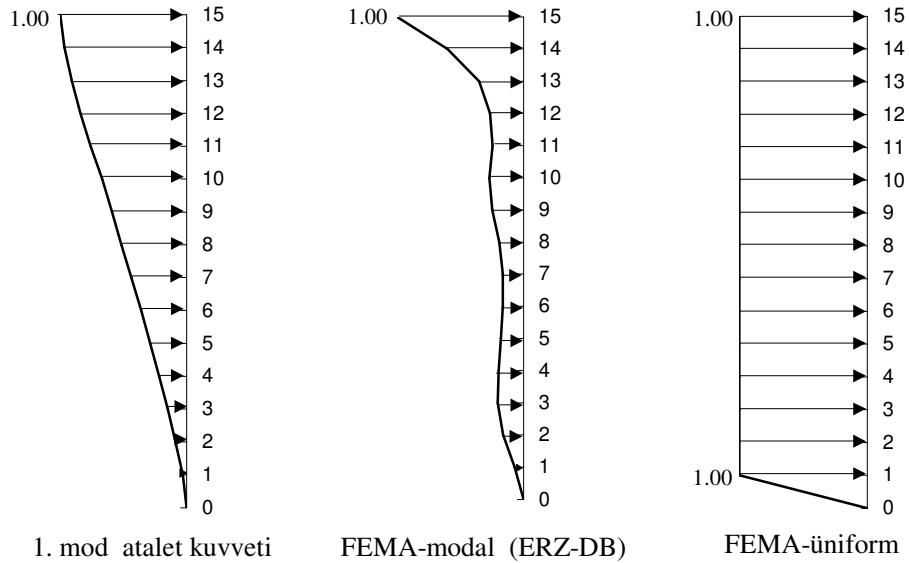


### c) FEMA 356'daki üniform dağılım

Bu yatay yük dağılımında katlara etkiyen  $F_i$  kuvvetleri ilgili kattaki kütleyle eşit olarak alınır (4.5) [7].

$$F_i = m_i \quad (4.5)$$

Örnek olmak üzere 15-katlı çerçeve için yukarıda açıklanan üç farklı dağılıma ait şematik gösterim Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18 Yatay yük dağılımlarının şematik gösterimi

Analizler sonucunda elde edilen kat yatay yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri, maksimum kiriş plastik dönmeleri, kat kesme kuvvetleri, kapasite eğrileri ve sistemdeki plastikleşen kesit dağılımları, sonuçların karşılaştırılarak değerlendirildiği Bölüm 4.3.5'de verilmiştir (Şekil 4.19- 4.38).

### 4.3.5 Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Bu bölümde, geliştirilen ÇMUYAY'den elde edilen sonuçlar, LODA ve monoton artan yatay yük dağılımları için yapılan LOSA sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler, kat yatay yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri, maksimum kiriş plastik dönmeleri, kat kesme kuvvetleri, kapasite eğrileri ve sistemdeki plastikleşen kesit dağılımları incelenerek yapılmıştır.

- LOSA'ler (ÇMUYAY, G-LOSA-1. mod, FEMA-modal ve FEMA-üniform için LOSA) ile LODA sonuçlarının karşılaştırılmasında çerçeve tepe yerdeğiştirmelerinin eşitliği esas alınmış ve karşılaştırma Bölüm 2.4.1.6'da belirtilen sınır değere ( $\det [S]_G \leq 0$ ) ait davranış büyüklükleri için yapılmıştır. Buna göre, yapılan LODA'lerde ivme kaydı ÇMUYAY'inden elde edilen maksimum tepe yerdeğiştirmesine göre ölçeklenerek davranış büyüklükleri elde edilmiştir.

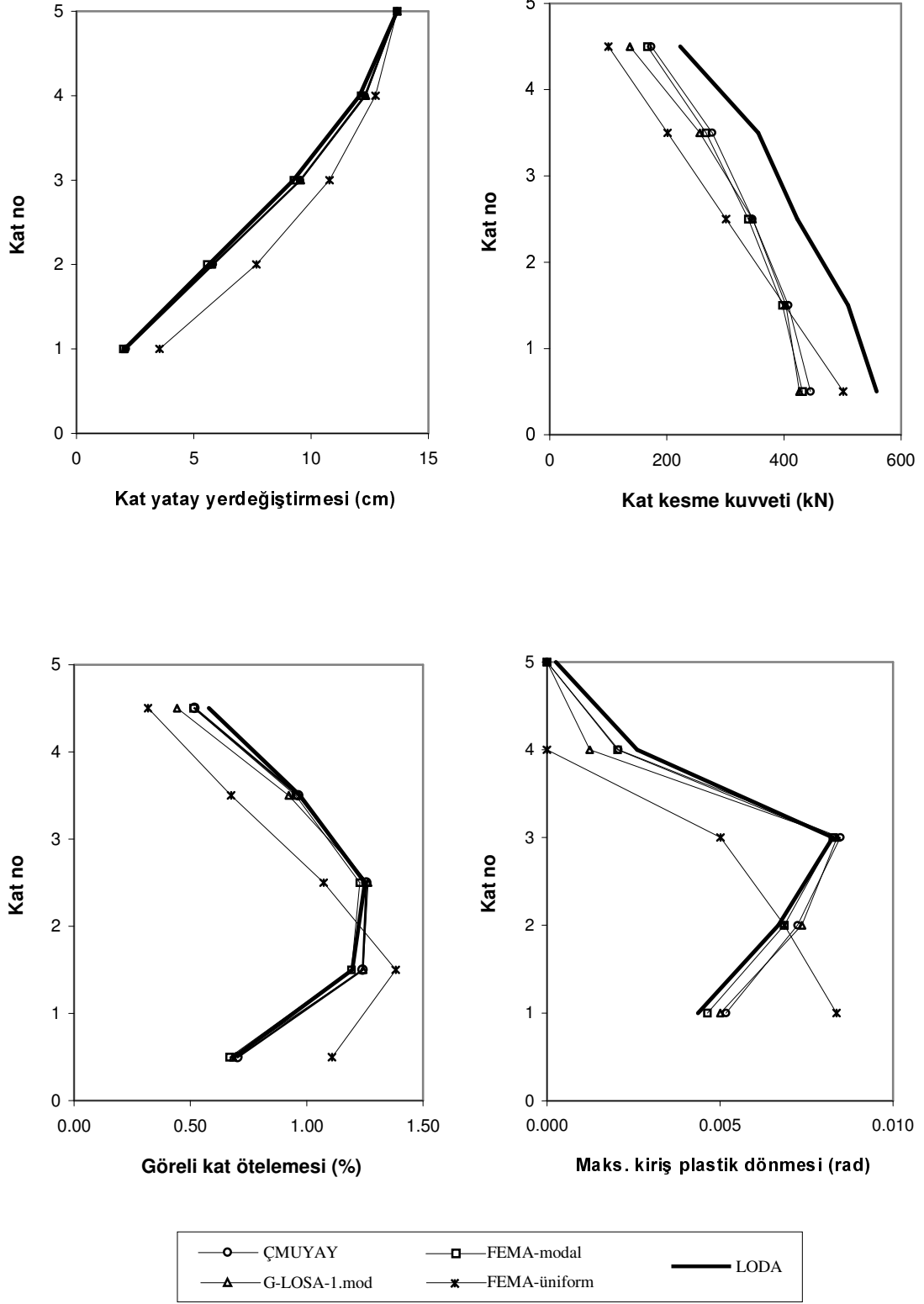
- LODA'e ait kat yatay yerdeğiştirmelerinin, görelî kat ötelemelerinin, maksimum kiriş plastik dönmelerinin ve kat kesme kuvvetlerinin belirlenmesinde, en elverişsiz durumu gösteren zarf elde edecek şekilde, deprem süresince elde edilen maksimum değerler esas alınmıştır.

- LOSA'lerden (ÇMUYAY, G-LOSA-1. mod, FEMA-modal ve FEMA-üniform için LOSA) elde edilen kapasite eğrilerini değerlendirmek amacıyla "Dinamik Pushover Analiz" yaklaşımı kullanılmıştır [11,21,39]. Buna göre, ölçekleme ile arttırılan ivme kayıtları için yeter sayıda LODA yapılarak her bir durum için maksimum tepe yerdeğiştirmesi ve maksimum taban kesme kuvveti değerleri belirlenmiştir. Elde edilen bu değerler kapasite eğrisi diyagramlarında noktalar ile belirtilerek diğer analiz sonuçları buna göre değerlendirilmiştir.

- LOSA'lerden (ÇMUYAY, G-LOSA-1. mod, FEMA-modal ve FEMA-üniform için LOSA) elde edilen plastikleşen kesit dağılımlarını LODA ile karşılaştırabilmek amacıyla, LODA'de her iki yönde oluşan maksimum tepe yerdeğiştirmeleri için ayrı ayrı olmak üzere her iki yönde LOSA'ler yapılmış ve elde edilen plastikleşen kesit dağılımları sistem üzerinde birlikte gösterilmiştir.

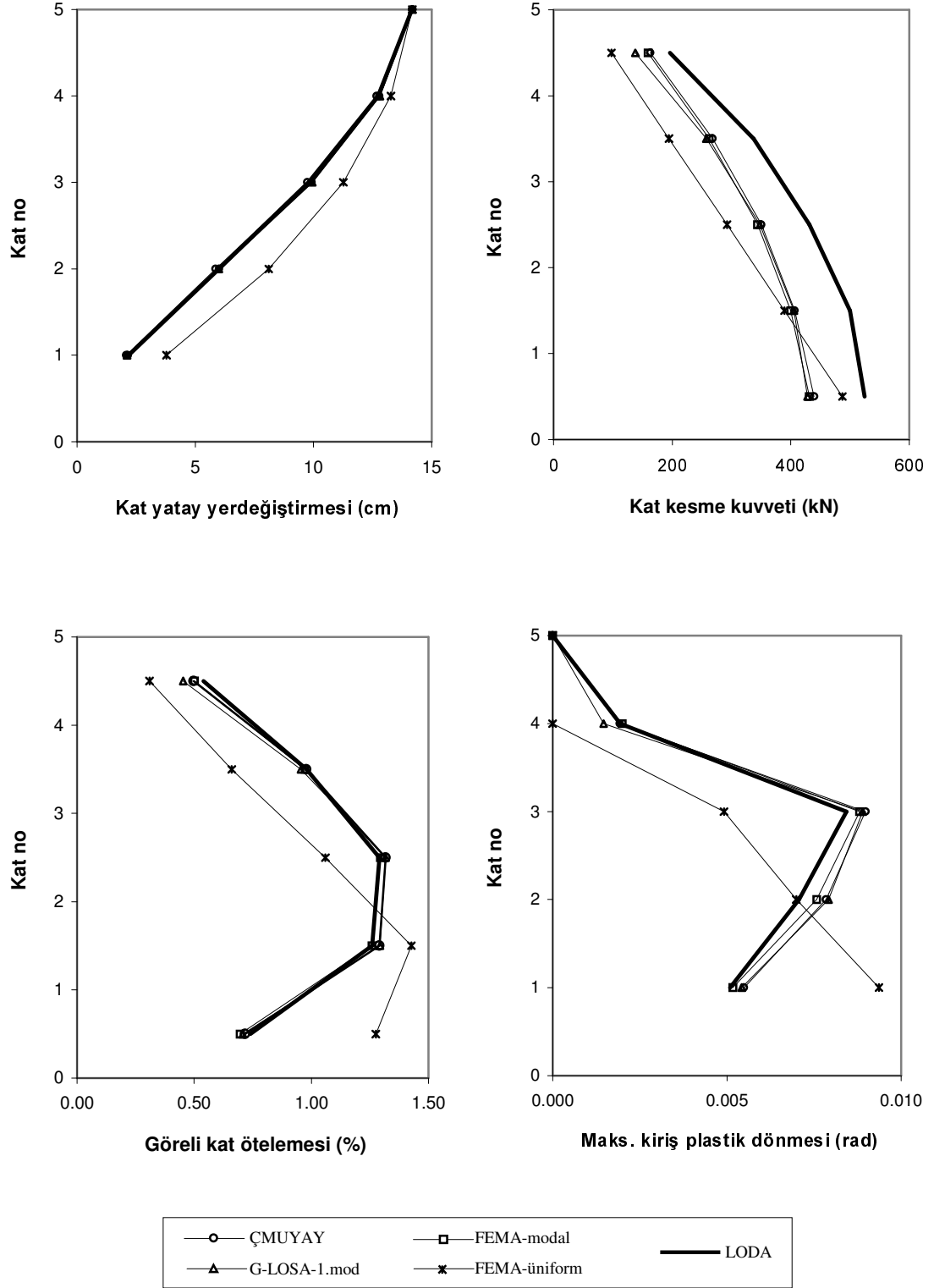
Her bir çerçeve için, analizlerden elde edilen sonuçlara göre, gözönüne alınan üç deprem için, öncelikle kat yatay yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri, maksimum kiriş plastik dönmeleri, ve kat kesme kuvvetlerine ait grafikler verilmiş, daha sonra kapasite eğrileri sunulmuş, son olarak ise plastikleşen kesit dağılımları verilmiştir. Buna göre 5 katlı çerçeveye ait sonuçlar Şekil 4.19-4.23'de, 10-katlı çerçeveye ait sonuçlar Şekil 4.24-4.28'de, 15-katlı çerçeveye ait sonuçlar Şekil 4.29-4.33'de, 20-katlı çerçeveye ait sonuçlar Şekil 4.34-4.38'de verilerek karşılaştırılmış ve değerlendirmeler yapılmıştır.

ELC-180



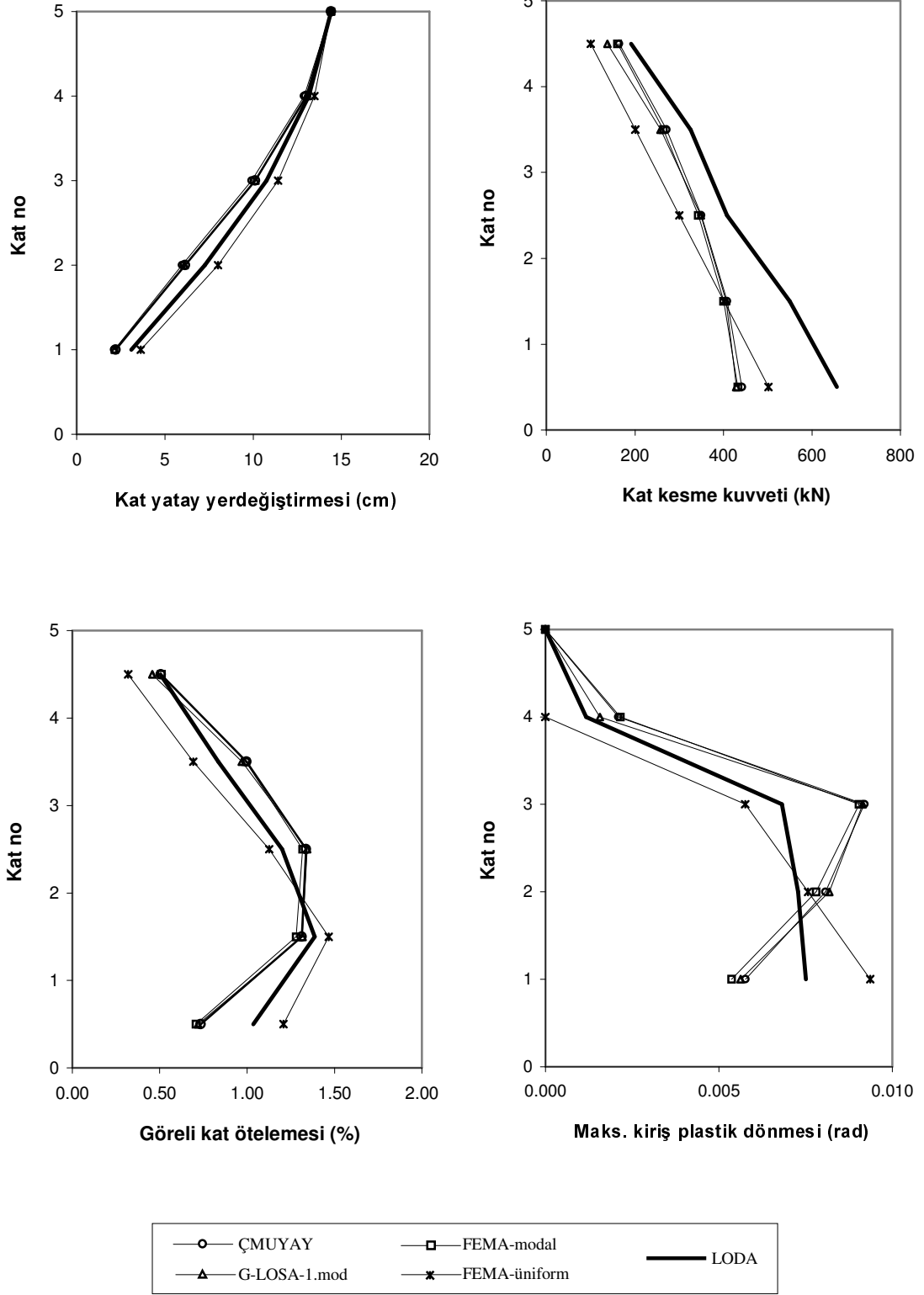
şekil 4.19 5-katlı çerçevde analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ELC-180)

### ERZ-DB

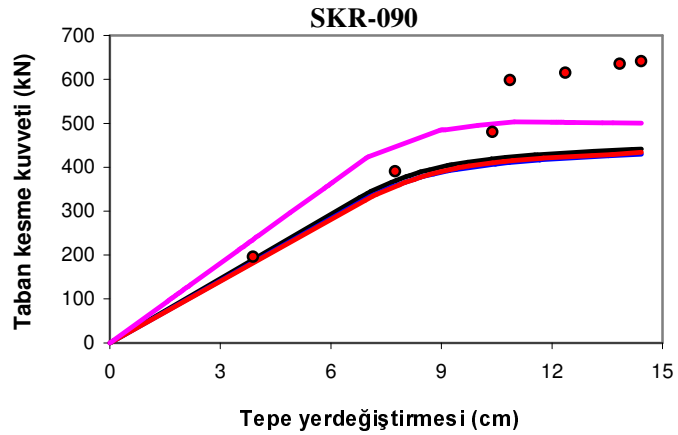
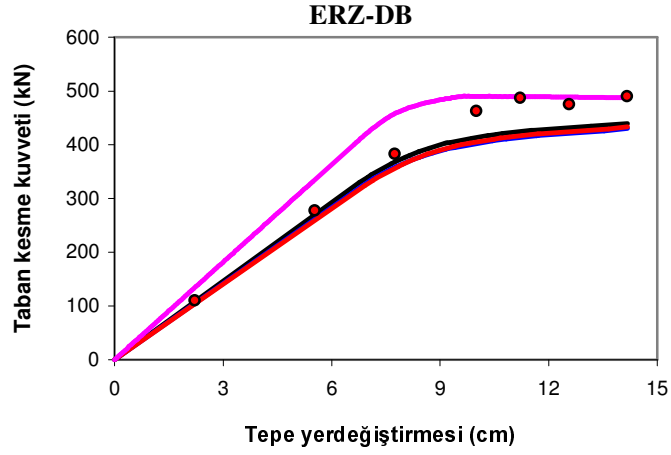
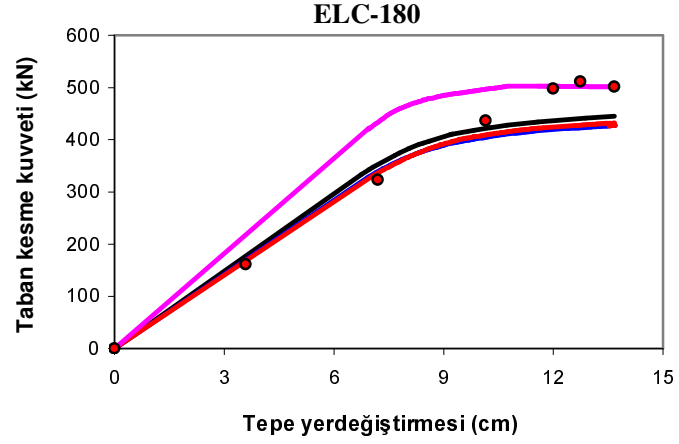


Şekil 4.20 5-katlı çerçevde analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ERZ-DB)

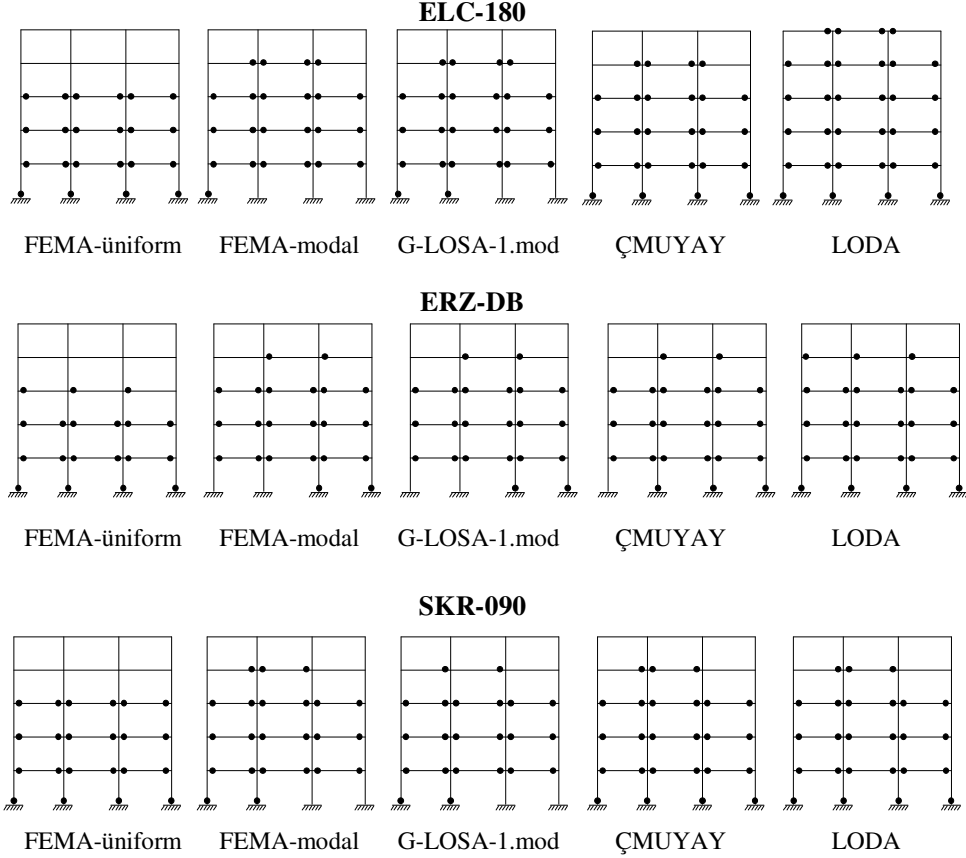
SKR-090



şekil 4.21 5-katlı çerçeve analiz sonuçlarının karşılaştırılması (SKR-090)



Şekil 4.22 5-katlı çerçeve de kapasite eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 4.23 5-katlı çerçevede plastikleşen kesit dağılımlarının karşılaştırılması

### 5-katlı çerçeveye ait sonuçların karşılaştırılması ve değerlendirilmesi;

Değerlendirmelerin kolaylıkla anlaşılmasını sağlamak amacıyla bu bölümde “Çok Modlu Uyarlamalı Yük Artımı Yöntemi ile analiz” kısaca ÇMUYAY ile ifade edilecektir.

Gözönüne alınan tüm depremler (ELC-180, ERZ-DB ve SKR-090) için yapılan analiz sonuçlarına göre;

- Şekil 4.19-4.21’deki kat yatay yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri, maksimum kiriş plastik dönmeleri ve Şekil 4.23’deki plastikleşen kesit dağılımları incelendiğinde; ÇMUYAY, G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal sonuçlarının genel olarak birbiriyle ve LODA ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

- Şekil 4.19-4.21’deki kat kesme kuvvetleri incelendiğinde; ÇMUYAY, G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal sonuçlarının bütün katlarda LODA’e göre daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir.

- Şekil 4.22'deki kapasite eğrileri incelendiğinde; ÇMUYAY, G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal sonuçlarının, yaklaşık %0.6'lık tepe ötelemesi değerlerine kadar LODA ile uyumlu olduğu, ancak daha büyük ötelemelerdeki taban kesme kuvvetlerinin LODA'ye göre daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir.

FEMA-üniform, deprem özelliklerinden ve uygulandığı sistemin modal özelliklerinden bağımsızdır ve bu analizde kullanılan yük dağılımının özelliği nedeniyle, ÇMUYAY, G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal sonuçlarından çok farklı karakterde sonuçlar vermektedir. Bu nedenle FEMA-üniform'a ait sonuçlar ayrıca ele alınarak değerlendirilmiştir. Buna göre FEMA-üniform sonuçlarından elde edilen;

- Şekil 4.19-4.21'deki kat yatay yerdeğiştirmeleri incelendiğinde; bütün katlarda LODA, ÇMUYAY, G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal sonuçlarına göre daha büyük olduğu görülmektedir. (Analizler çerçevelerin tepe yerdeğiştirmeleri eşitlenerek yapıldığından, değerlendirmeler en üst kat dışındaki katlarda yapılmıştır)

- Şekil 4.19-4.21'deki görelî kat ötelemeleri ve maksimum kiriş plastik dönmeleri incelendiğinde; üst katlarda LODA ile ÇMUYAY, G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal sonuçlarına göre oldukça küçük, alt katlarda ise oldukça büyük olduğu görülmektedir.

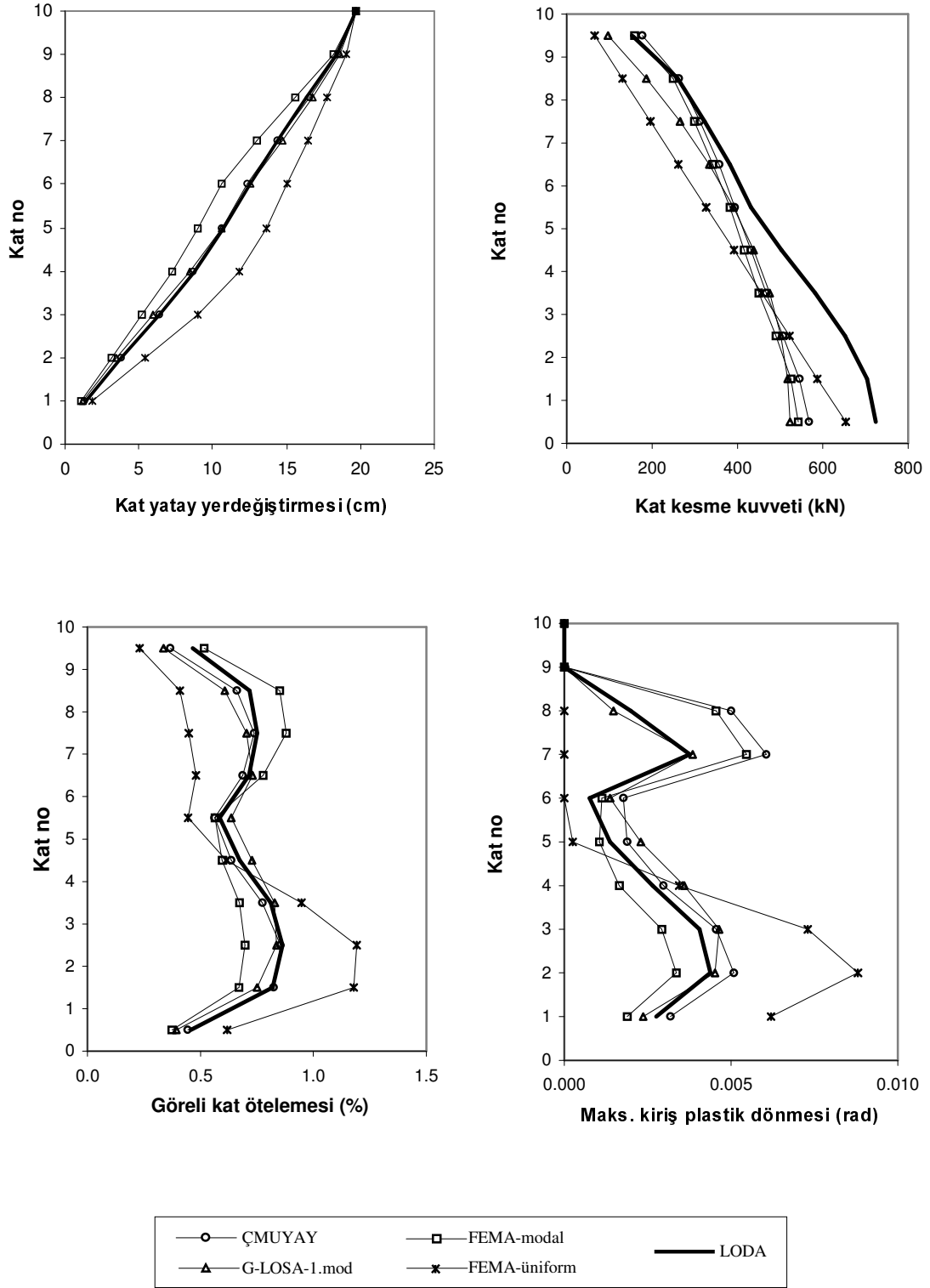
- Şekil 4.19-4.21'deki kat kesme kuvvetleri incelendiğinde; LODA, ÇMUYAY, G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal sonuçlarına göre oldukça düşük değerlerde olduğu, ancak sadece en alt kattaki (taban) kesme kuvveti değerinin ÇMUYAY, G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal'e göre LODA'ye daha yakın olduğu görülmektedir.

- Şekil 4.22'deki kapasite eğrileri incelendiğinde; taban kesme kuvveti değerlerinin yaklaşık %0.6'lık tepe ötelemesi değerlerine kadar LODA'ye göre oldukça büyük olduğu, daha büyük ötelemelerde ise, ÇMUYAY, G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal sonuçlarına oranla LODA'ye daha yakın olduğu görülmektedir.

- Şekil 4.23'deki plastikleşen kesit dağılımları incelendiğinde; LODA'de üst katlarda oluşan plastik kesitleri ÇMUYAY, G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal daha iyi belirlerken, bu analizde üst katlarda oluşan plastik kesitlerin belirlenemediği görülmektedir.

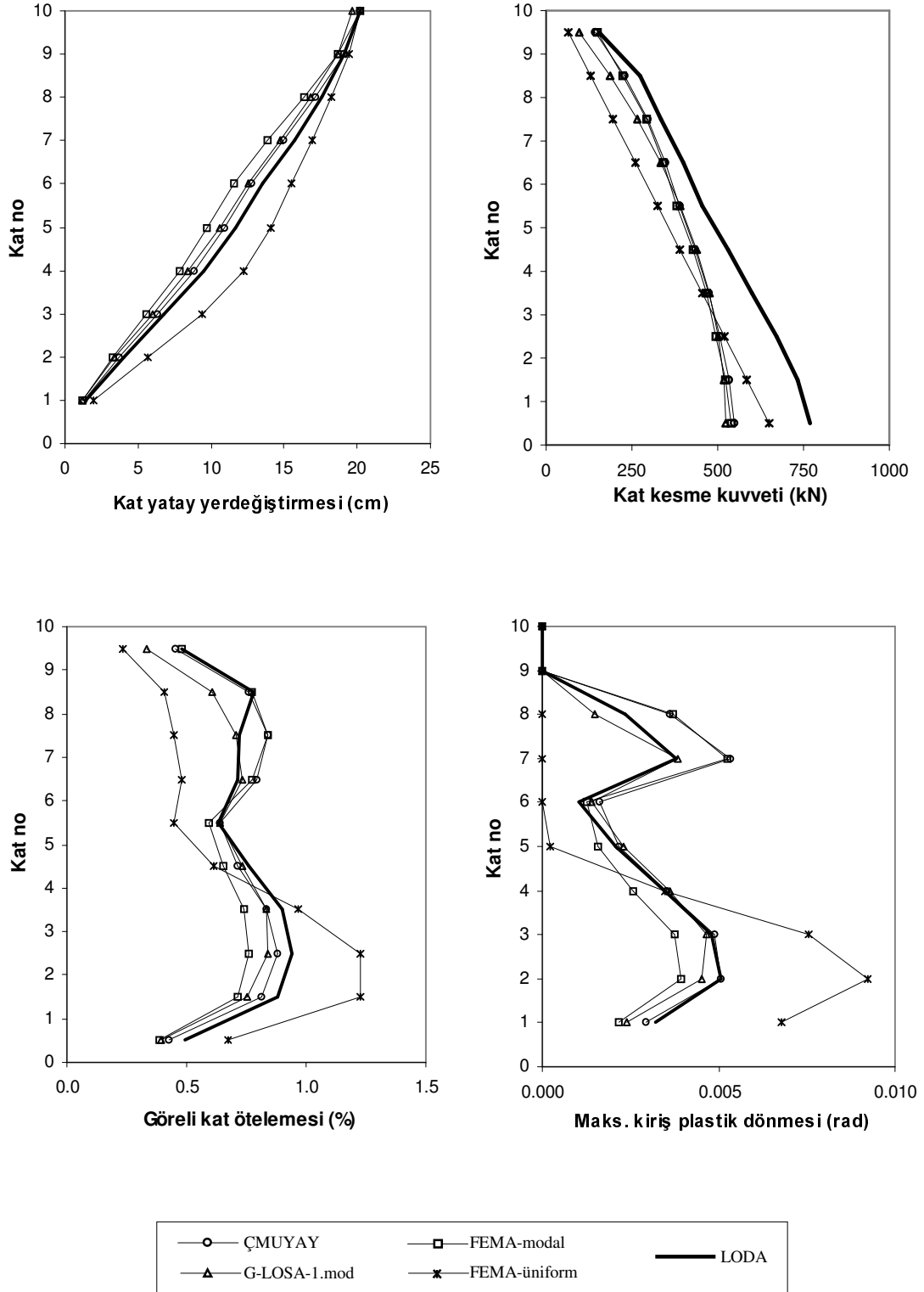


### ELC-180



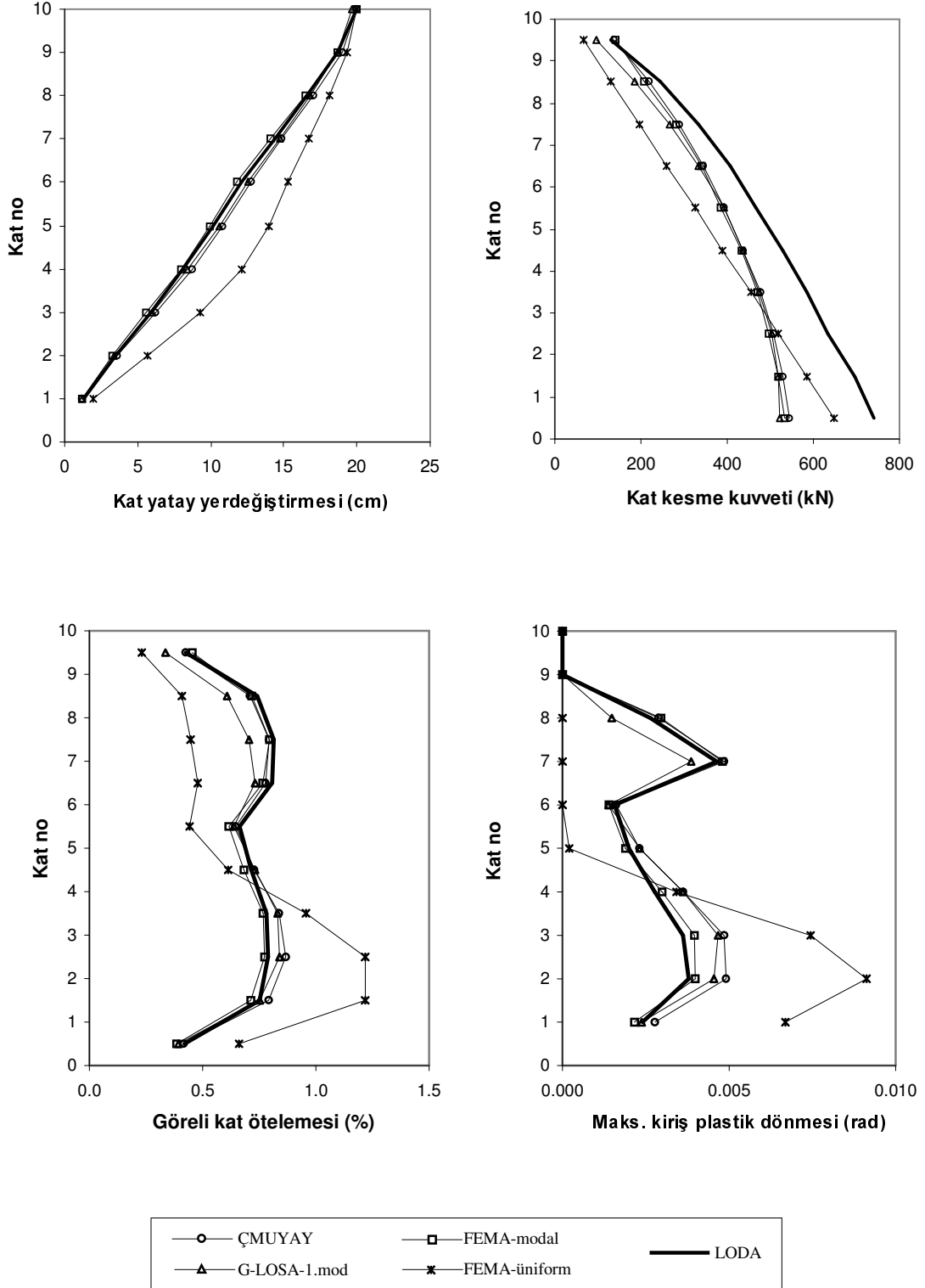
Şekil 4.24 10-katlı çerçevde analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ELC-180)

ERZ-DB

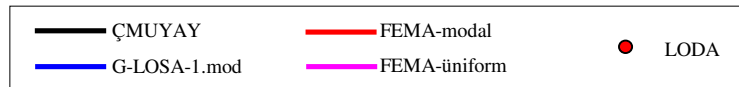
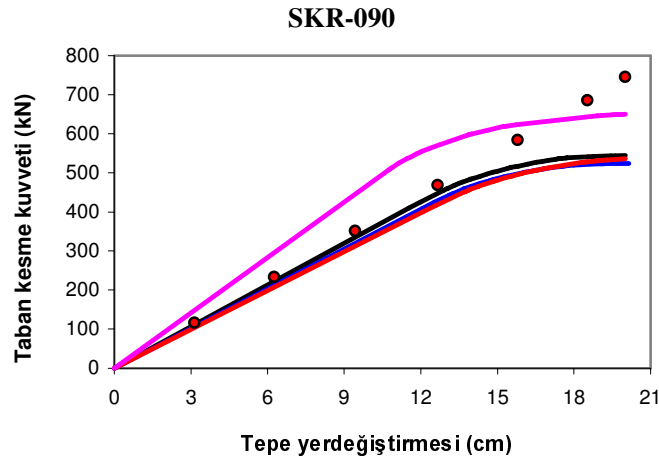
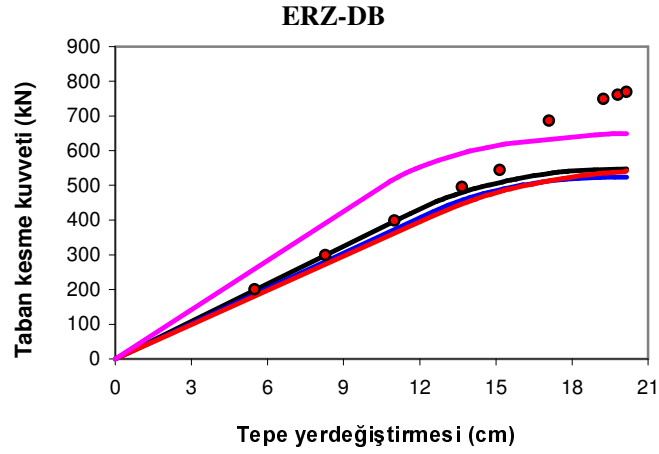
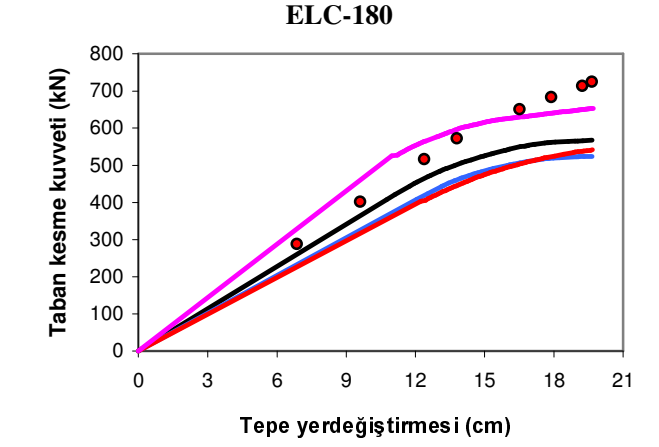


şekil 4.25 10-katlı çerçeve analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ERZ-DB)

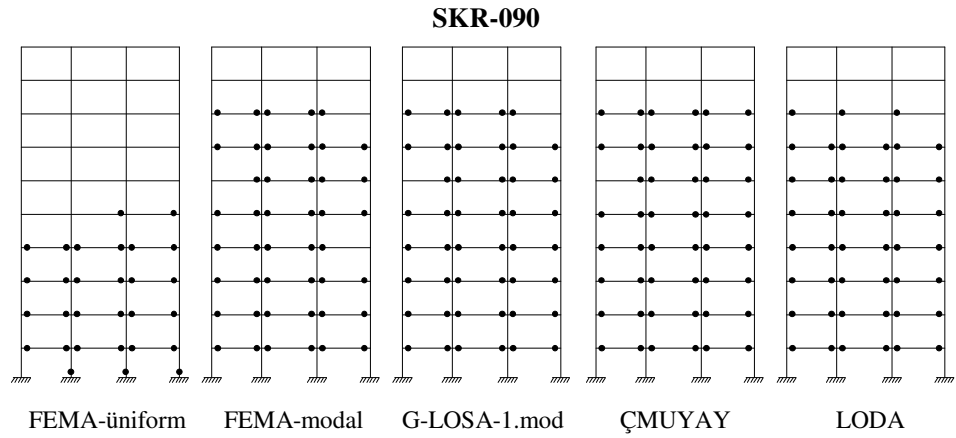
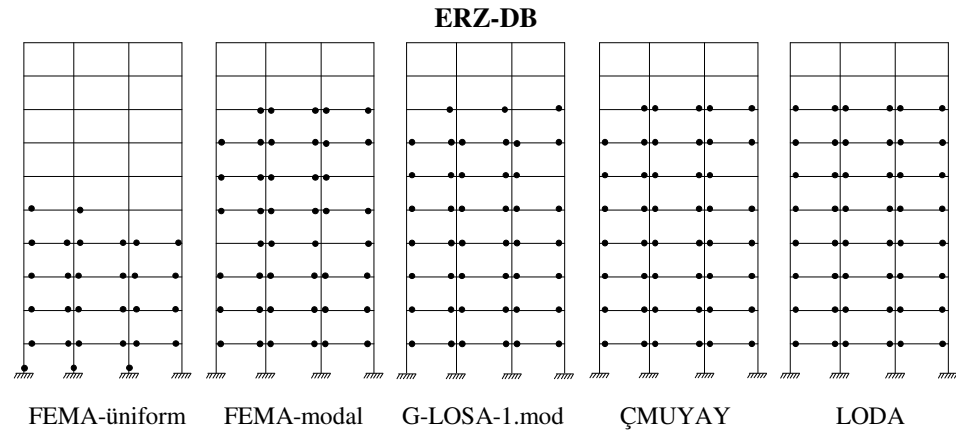
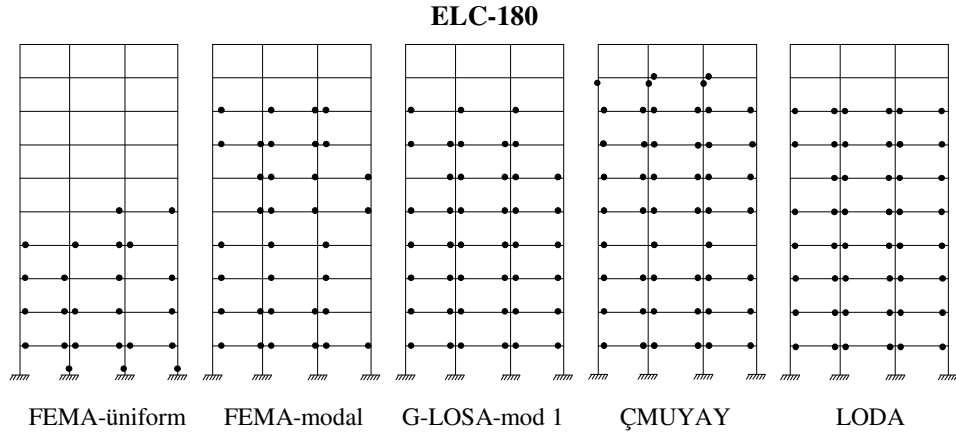
### SKR-090



şekil 4.26 10-katlı çerçevde analiz sonuçlarının karşılaştırılması (SKR-090)



Şekil 4.27 10-katlı çerçeve de kapasite eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 4.28 10-katlı çerçevede plastikleşen kesit dağılımlarının karşılaştırılması

## **10-katlı çerçeveye ait sonuçların karşılaştırılması ve değerlendirilmesi;**

ELC-180 ve ERZ-DB depremleri için yapılan analiz sonuçlarına göre;

- Şekil 4.24-4.25'deki kat yatay yerdeğiştirmeleri incelendiğinde; ÇMUYAY, G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal sonuçlarının genel olarak LODA ile uyumlu olduğu, ancak FEMA-modal sonuçlarının ÇMUYAY, G-LOSA-1.mod sonuçlarına oranla LODA'e daha uzak olduğu görölmektedir.

- Şekil 4.24-4.25'deki görelî kat ötelemeleri ve maksimum kiriş plastik dönmeleri ile Şekil 4.28'daki plastikleşen kesit dağılımları incelendiğinde; ÇMUYAY, G-LOSA-1.mod FEMA-modal sonuçlarının genel olarak LODA ile uyumlu olduğu, ancak FEMA-modal'in özellikle alt katlarda LODA'e göre güvensiz tarafta kaldığı görölmektedir.

- Şekil 4.24-4.25'deki kat kesme kuvvetleri incelendiğinde; ÇMUYAY ve FEMA-modal'in genel olarak G-LOSA-1.mod'e oranla LODA'e daha yakın sonuçlar verdiği görölmektedir.

- Şekil 4.27'deki kapasite eğrileri incelendiğinde; 5-katlı çerçevedekine benzer sonuçlar elde edildiği, ancak geliştirilen ÇMUYAY sonuçlarının diğerlerine oranla LODA'e daha yakın olduğu görölmektedir.

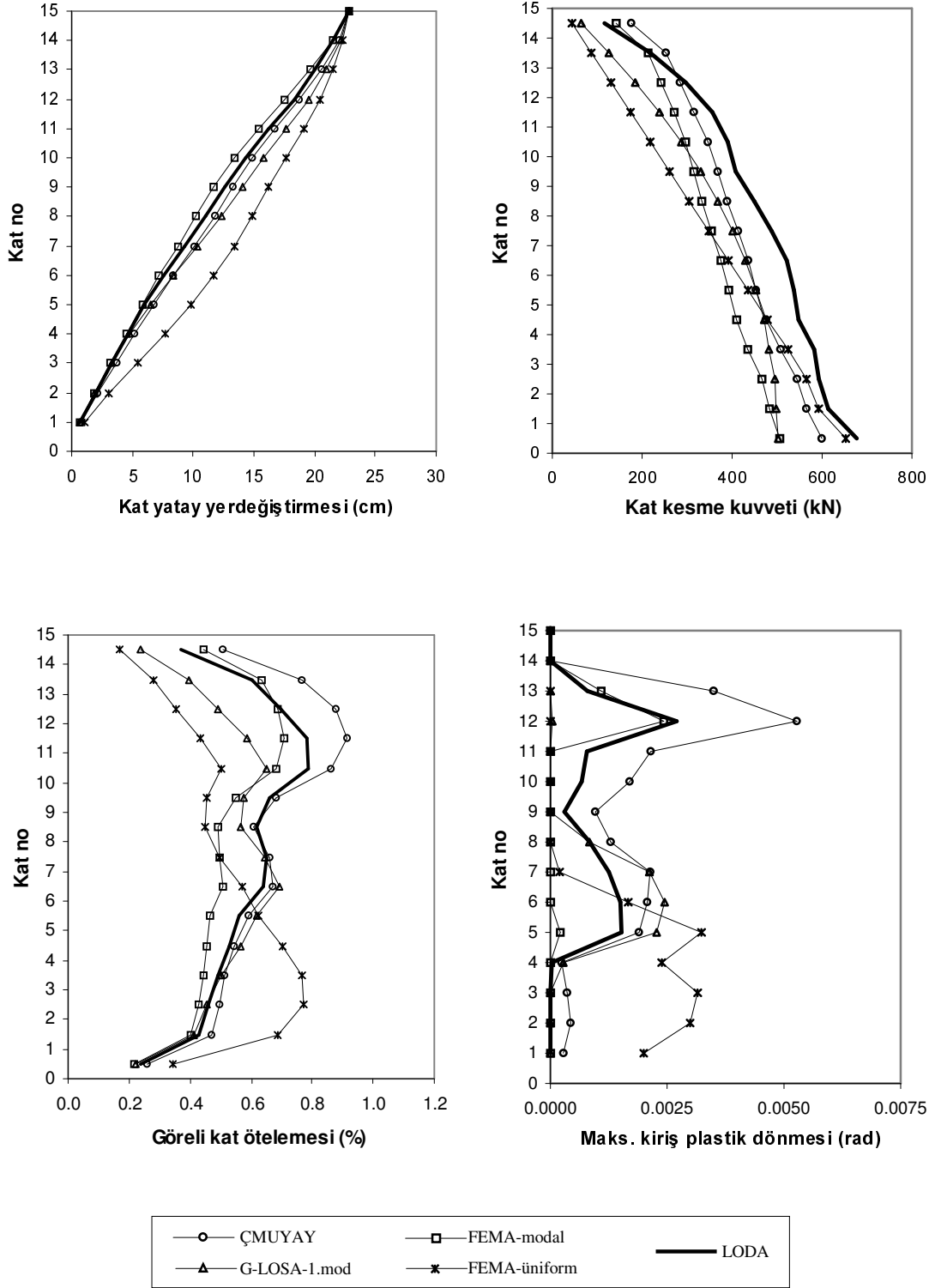
SKR-090 depremi için yapılan analiz sonuçlarına göre;

- Şekil 4.26'daki kat yatay yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri, maksimum kiriş plastik dönmeleri ve plastikleşen kesit dağılımları incelendiğinde; ÇMUYAY, G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal sonuçlarının birbiriyle ve LODA ile oldukça uyumlu olduğu görölmektedir.

- Şekil 4.26'daki kat kesme kuvvetleri ve Şekil 4.27'deki kapasite eğrileri incelendiğinde; 5-katlı çerçevedekine benzer sonuçlar elde edildiği, ancak geliştirilen ÇMUYAY sonuçlarının diğerlerine oranla LODA'e daha yakın olduğu görölmektedir.

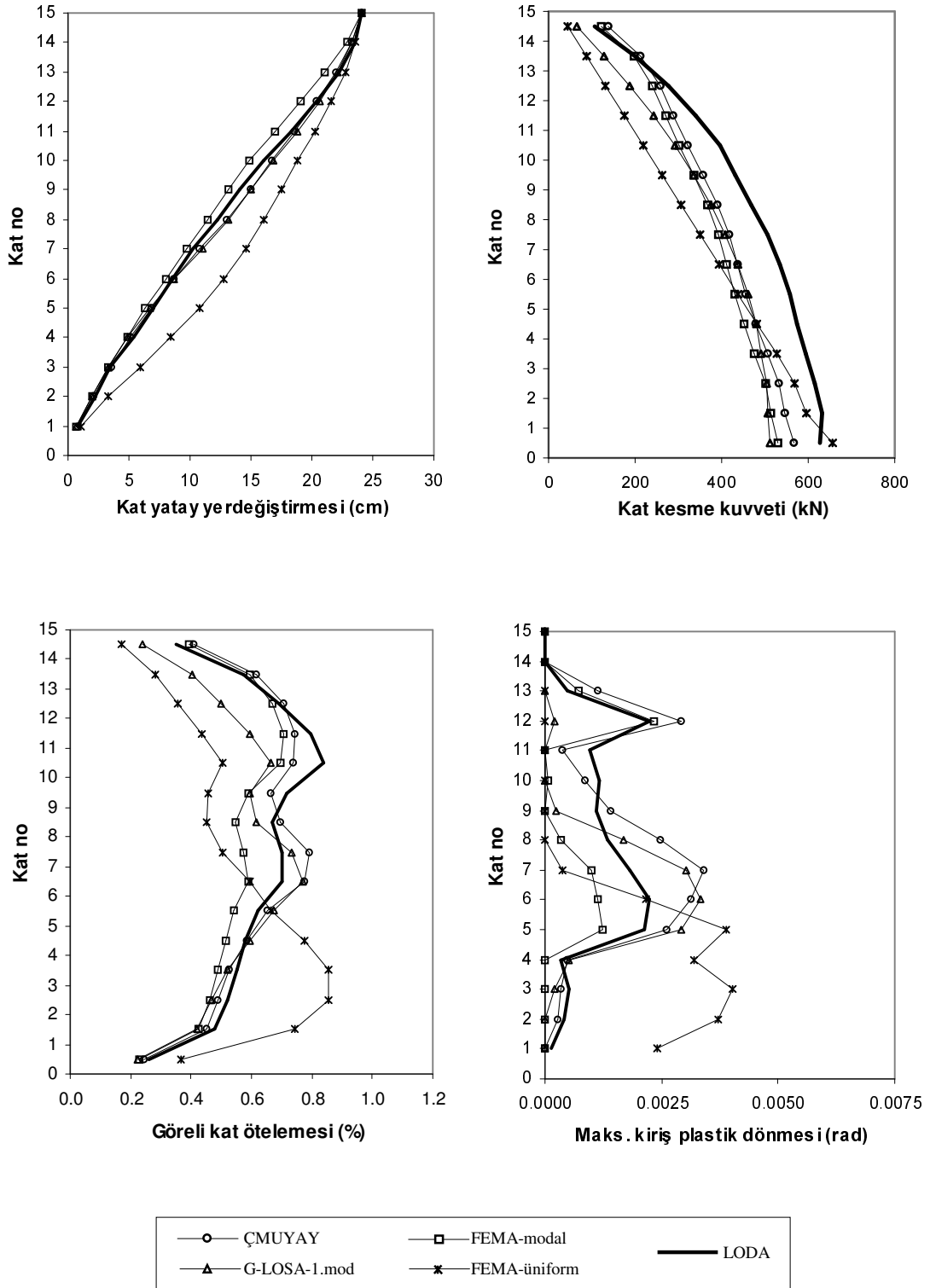
Şekil 4.26-4.28'deki FEMA-üniform sonuçları incelendiğinde; 5-katlı çerçevedekine çok benzer sonuçlar elde edildiği (bkz. syf. 97), ancak bütün davranış büyüklüklerinin LODA sonuçlarından daha da uzaklaştığı görölmektedir.

### ELC-180



Şekil 4.29 15-katlı çerçevde analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ELC-180)

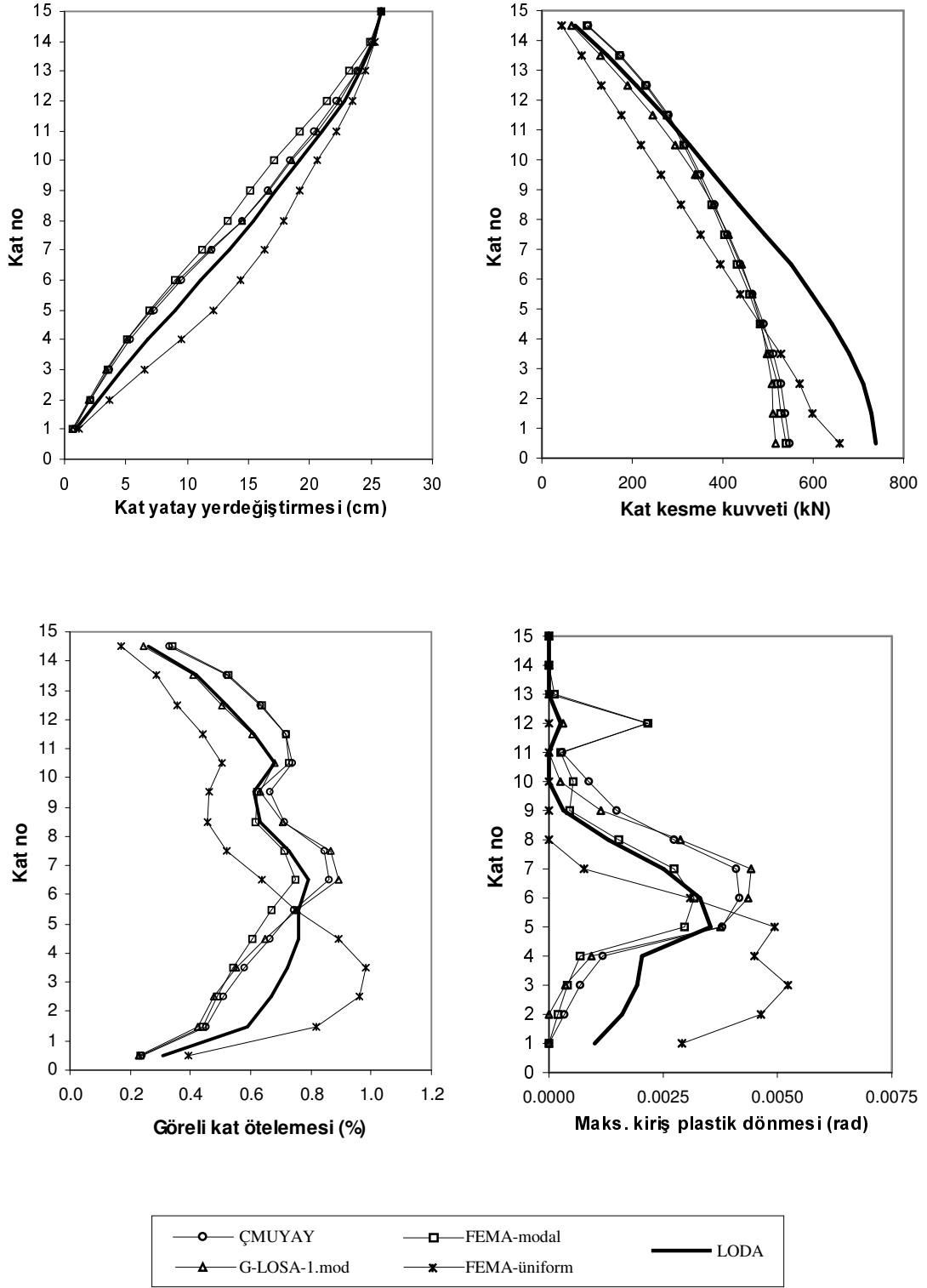
### ERZ-DB



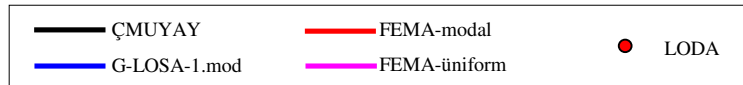
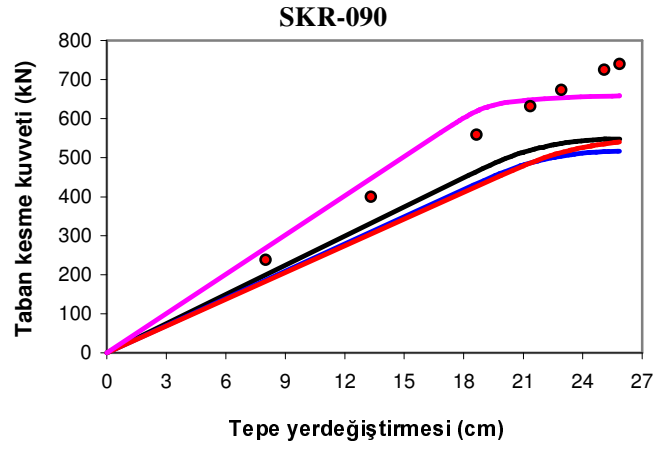
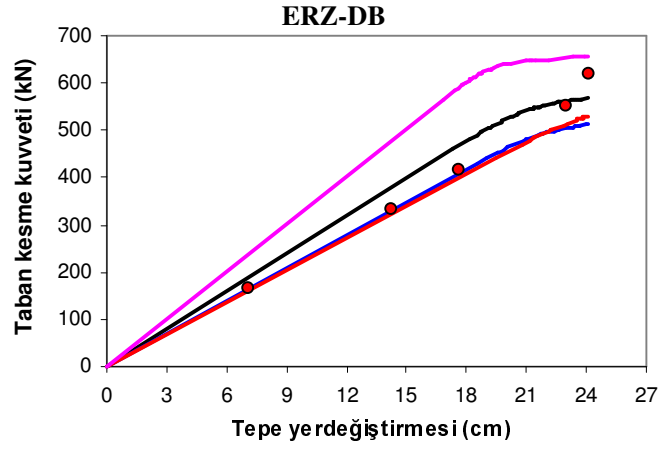
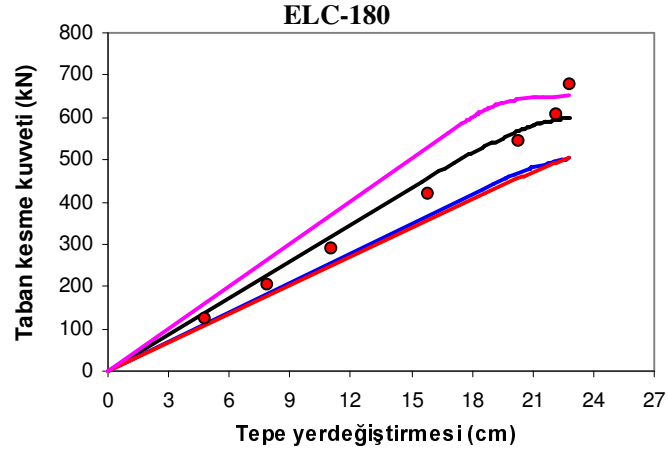
şekil 4.30 15-katlı çerçevde analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ERZ-DB)



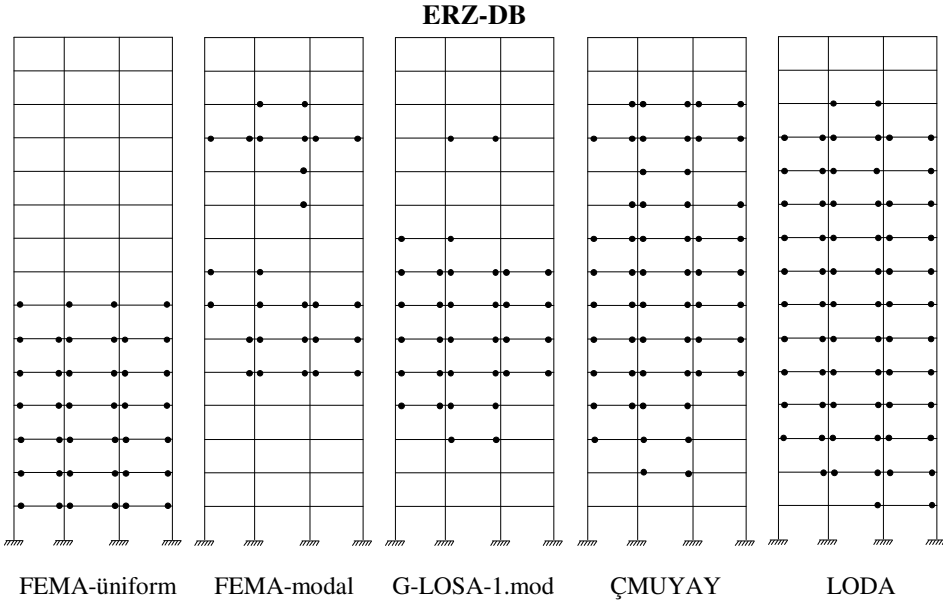
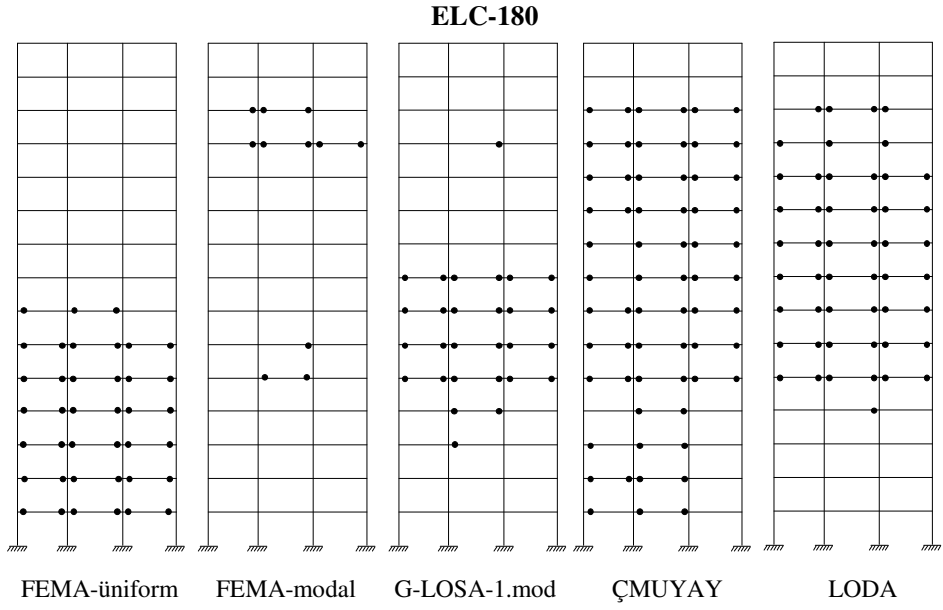
SKR-090



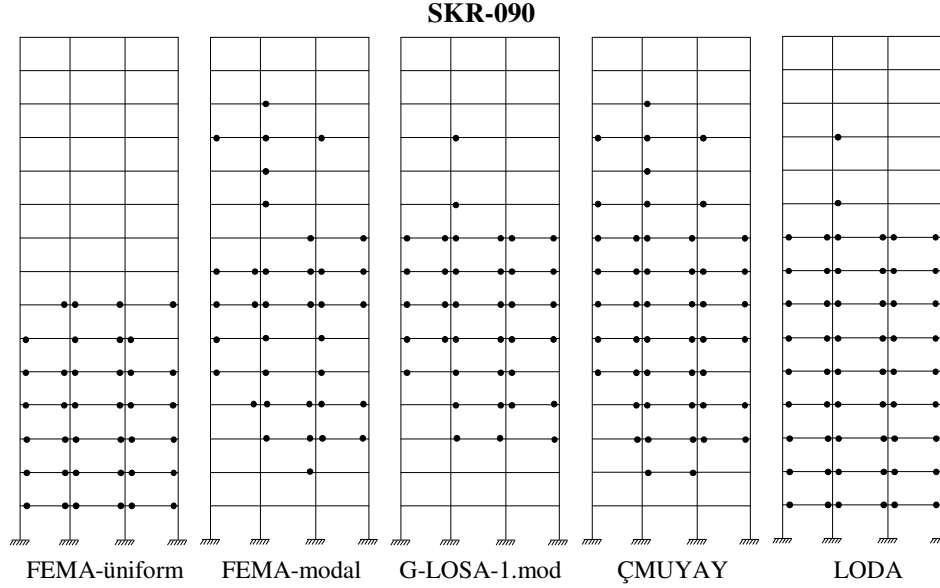
Şekil 4.31 15-katlı çerçevde analiz sonuçlarının karşılaştırılması (SKR-090)



Şekil 4.32 15-katlı çerçeve de kapasite eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 4.33 15-katlı çerçevede plastikleşen kesit dağılımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.33'ün devamı

### 15-katlı çerçeveye ait sonuçların karşılaştırılması ve değerlendirilmesi;

ELC-180 ve ERZ-DB depremleri için yapılan analiz sonuçlarına göre;

- Şekil 4.29-4.30'daki kat yatay yerdeğiştirmeleri incelendiğinde; ÇMUYAY, G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal sonuçlarının LODA ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.
- Şekil 4.29-4.30'daki görel kat ötelemeleri ve maksimum kiriş plastik dönmeleri ile Şekil 4.33'deki plastikleşen kesit dağılımları incelendiğinde; ÇMUYAY sonuçlarının genel olarak LODA ile oldukça uyumlu olduğu, G-LOSA-1.mod'in üst katlarda ve FEMA-modal'in ise alt katlarda LODA'e göre önemli oranda düşük değerler vererek, güvensiz tarafta kaldığı görülmektedir.
- Şekil 4.29-4.30'daki kat kesme kuvvetleri ile Şekil 4.32'deki kapasite eğrileri incelendiğinde; geliştirilen ÇMUYAY sonuçlarının G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal'e göre LODA'e daha yakın olduğu görülmektedir.

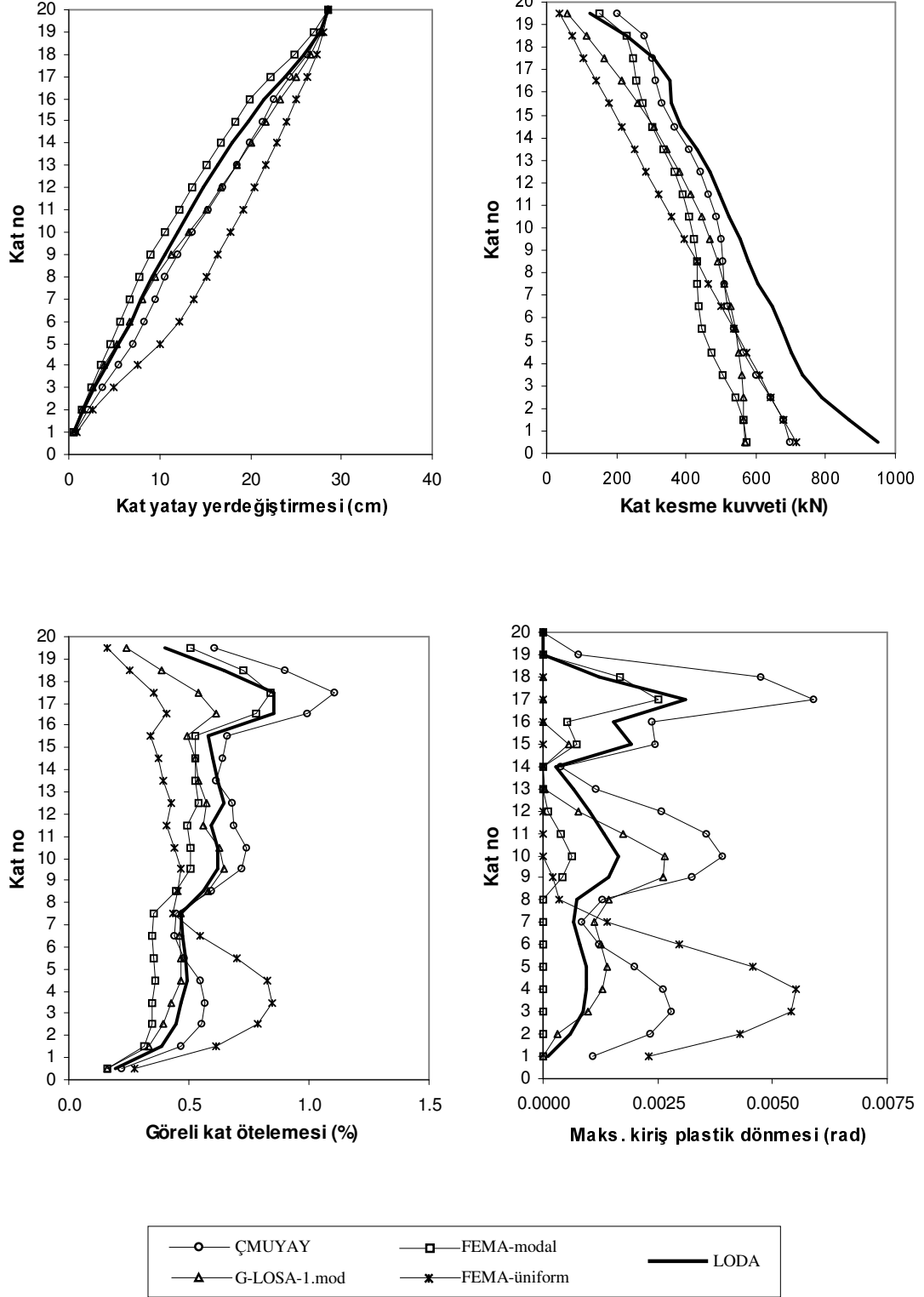
SKR-090 depremi için yapılan analiz sonuçlarına göre;

- Şekil 4.31'deki kat yatay yerdeğiştirmeleri, görelı kat ötelemeleri, maksimum kiriş plastik dönmeleri ve kat kesme kuvvetleri incelendiğinde; ÇMUYAY, G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal sonuçlarının, çerçevenin üst katlarında genel olarak LODA uyumlu olduğu, ancak alt katlarda belirli oranda güvensiz sonuçlar verdiği görölmektedir.

- Şekil 4.32'deki kapasite eğrileri ve Şekil 4.33'deki plastikleşen kesit dağılımları incelendiğinde; 5-katlı ve 10-katlı çerçevdekiilere benzer sonuçlar elde edildiği, ancak ÇMUYAY sonuçlarının G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal'e göre LODA'e daha yakın olduğu görölmektedir.

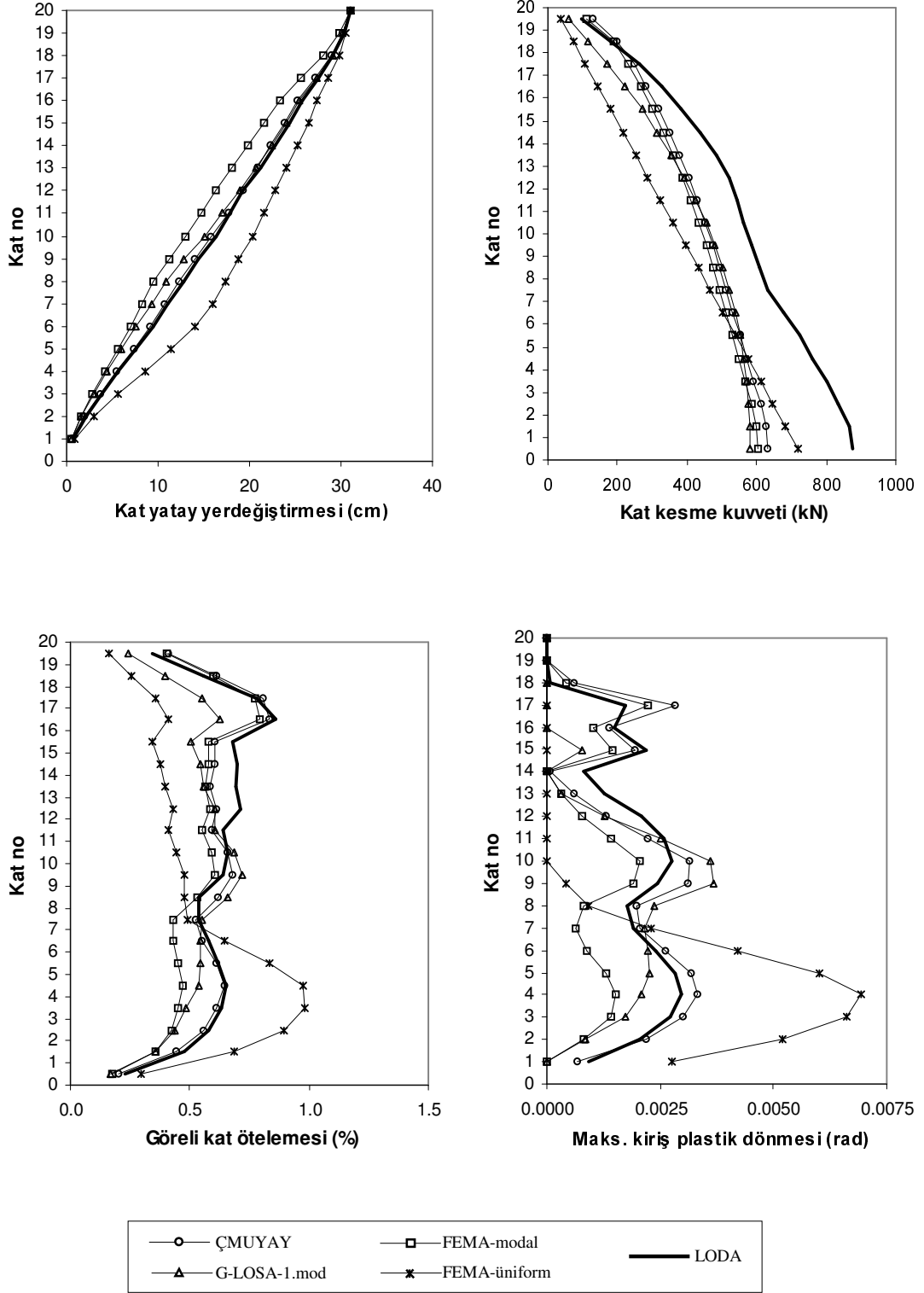
Şekil 4.29-4.33'deki FEMA-üniform sonuçları incelendiğinde; 5-katlı ve 10-katlı çerçevdekiilere çok benzer sonuçlar elde edildiği görölmektedir (bkz. syf. 97).

ELC-180



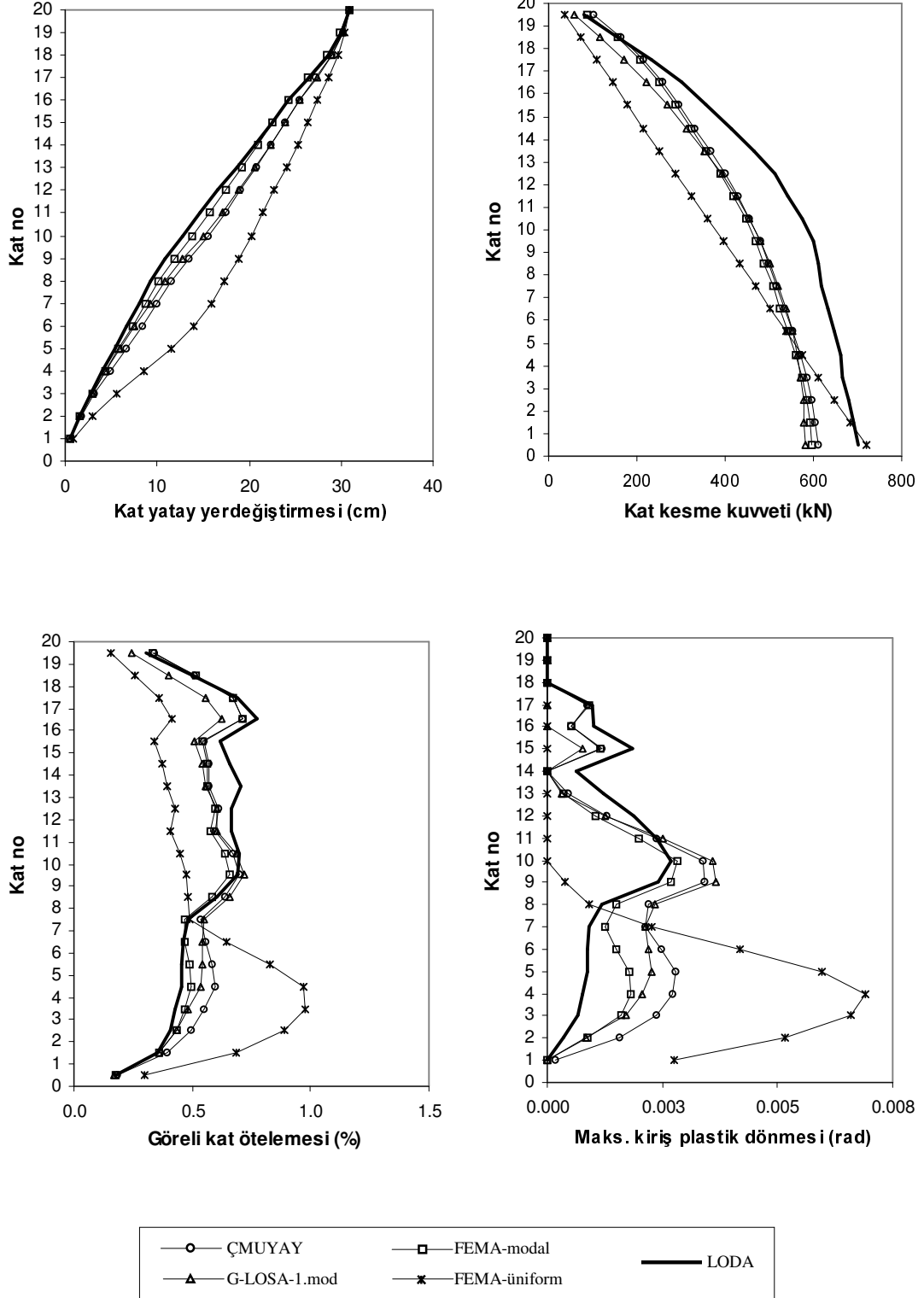
şekil 4.34 20-katlı çerçevde analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ELC-180)

### ERZ-DB



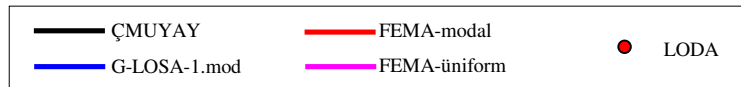
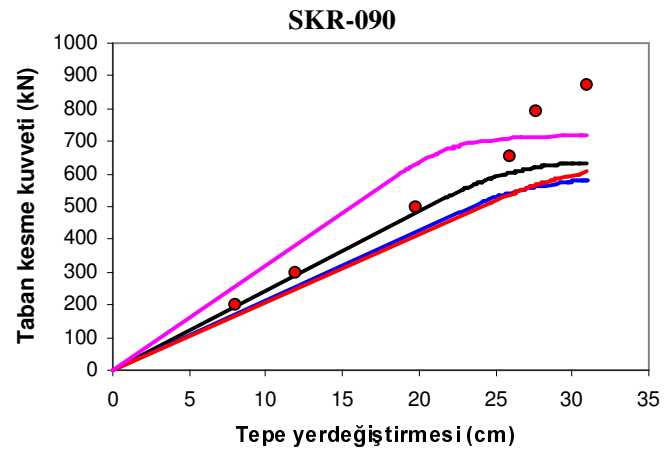
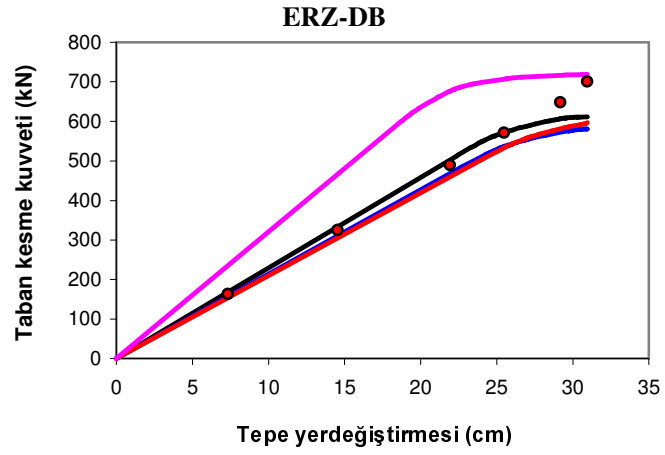
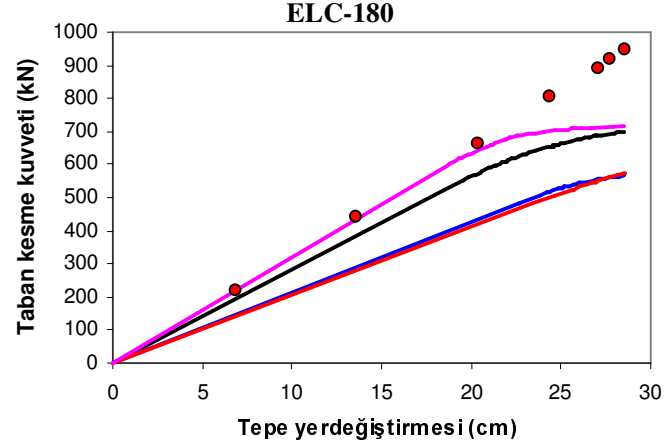
şekil 4.35 20-katlı çerçevde analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ERZ-DB)

SKR-090

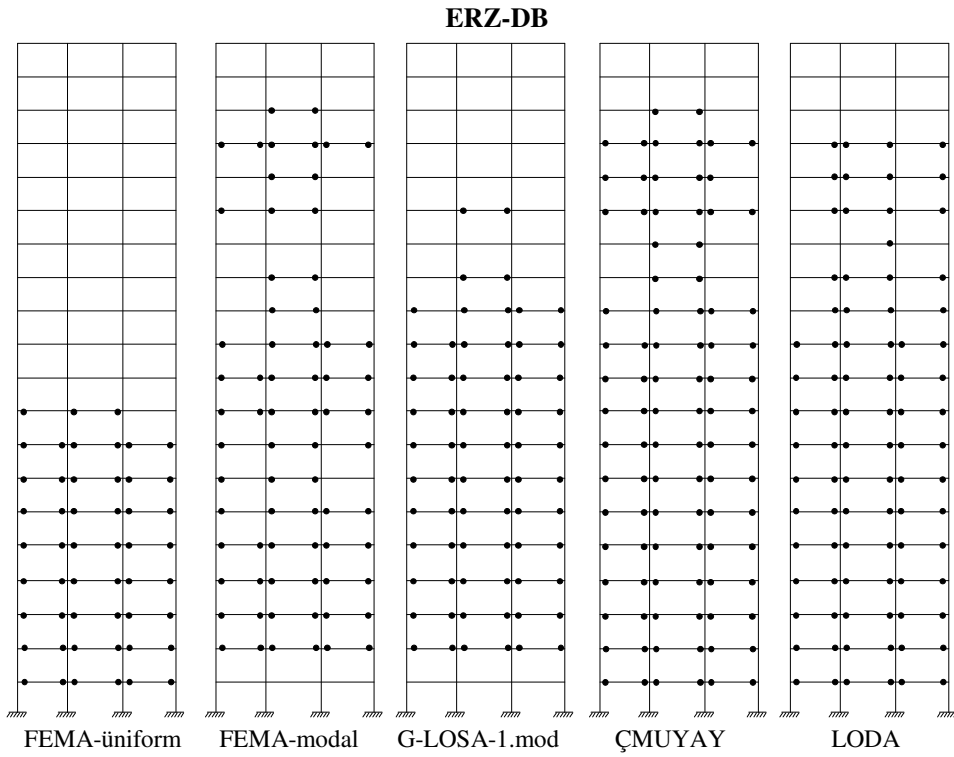
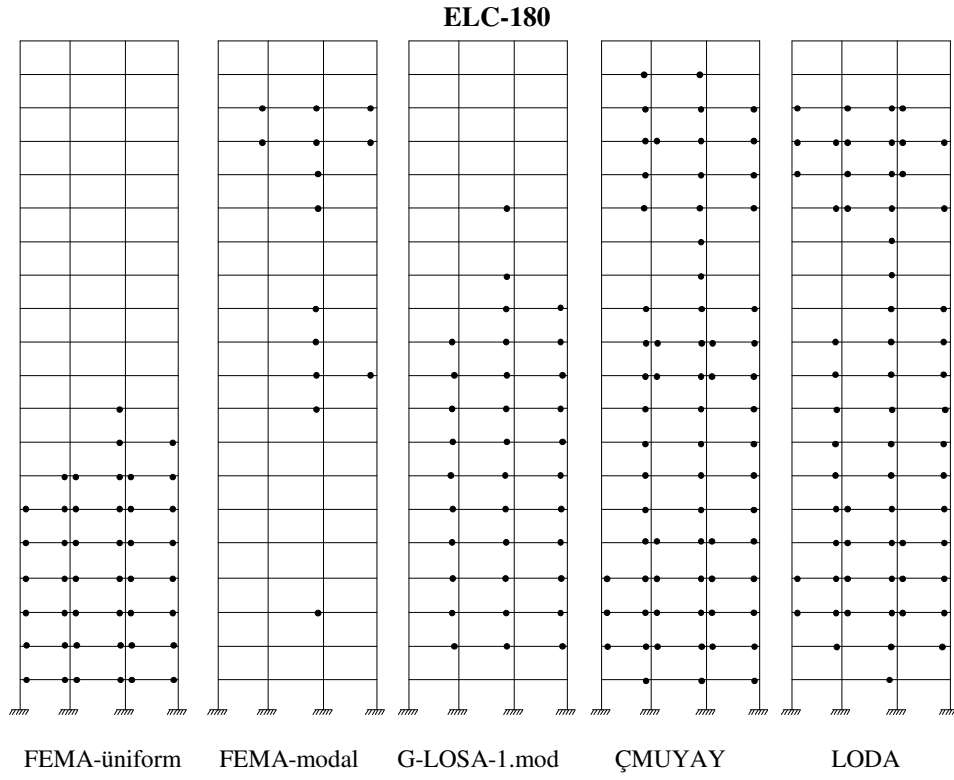


şekil 4.36 20-katlı çerçevde analiz sonuçlarının karşılaştırılması (SKR-090)

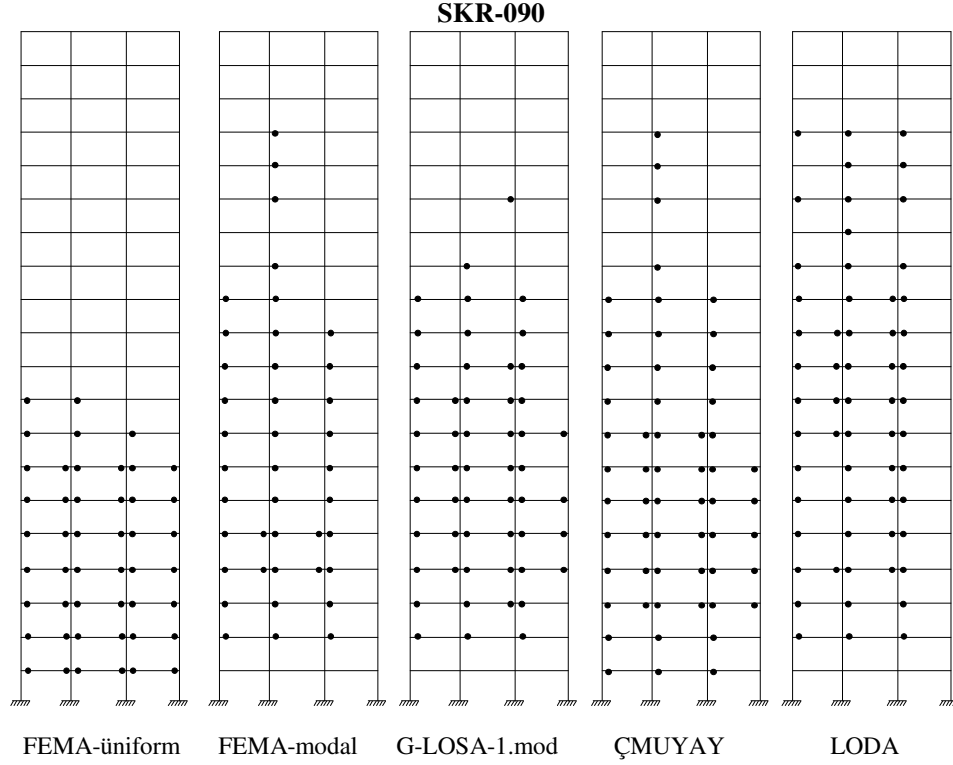




Şekil 4.37 20-katlı çerçeve de kapasite eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 4.38 20-katlı çerçevede plastikleşen kesit dağılımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.38'in devamı

### 20-katlı çerçeveye ait sonuçların karşılaştırılması ve değerlendirilmesi;

ELC-180 ve ERZ-DB depremleri için yapılan analiz sonuçlarına göre;

- Şekil 4.34-4.35'deki kat yerdeğiştirmeleri incelendiğinde; ÇMUYAY, G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal sonuçlarının LODA ile uyumlu olduğu görülmektedir.

- Şekil 4.34-4.35'deki görelî kat ötelemeleri ve maksimum kiriş plastik dönmeleri ile Şekil 4.38'deki plastikleşen kesit dağılımları incelendiğinde; G-LOSA-1.mod'in üst katlarda, FEMA-modal'in ise alt katlarda LODA'e göre önemli oranda düşük değerler vererek güvensiz tarafta kaldığı görülmektedir. ÇMUYAY sonuçlarının ise genel olarak LODA ile oldukça uyumlu olduğu, sadece ELC-180 depreminde bazı plastik dönmeleri LODA'e göre daha büyük verdiği, ancak sonuçların güvenli tarafta olduğu görülmektedir.

- Şekil 4.34-4.35'deki kat kesme kuvvetleri ve Şekil 4.37'deki kapasite eğrileri incelendiğinde; ÇMUYAY sonuçlarının G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal'e göre LODA'e daha yakın olduğu görülmektedir.

SKR-090 depremi için yapılan analiz sonuçlarına göre;

- Şekil 4.36'daki kat yatay deplasmanları, görelî kat ötelemeleri, maksimum kiriş plastik dönmeleri ve kat kesme kuvvetleri incelendiğinde; ÇMUYAY, G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal sonuçlarının, çerçevenin üst katlarında genel olarak LODA uyumlu olduğu ancak, alt katlarda maksimum kiriş plastik dönmelerinin LODA'e göre daha büyük, kat kesme kuvvetlerinin ise daha düşük olduğu görülmektedir.

- Şekil 4.36'daki kat kesme kuvvetleri, Şekil 4.37'deki kapasite eğrileri ve Şekil 4.33'deki plastikleşen kesit dağılımları incelendiğinde; diğer çerçevedekilere (5, 10, 15-katlı) çok benzer sonuçlar elde edildiği, ancak genel olarak ÇMUYAY sonuçlarının G-LOSA-1.mod ve FEMA-modal'e göre LODA'e daha yakın olduğu görülmektedir.

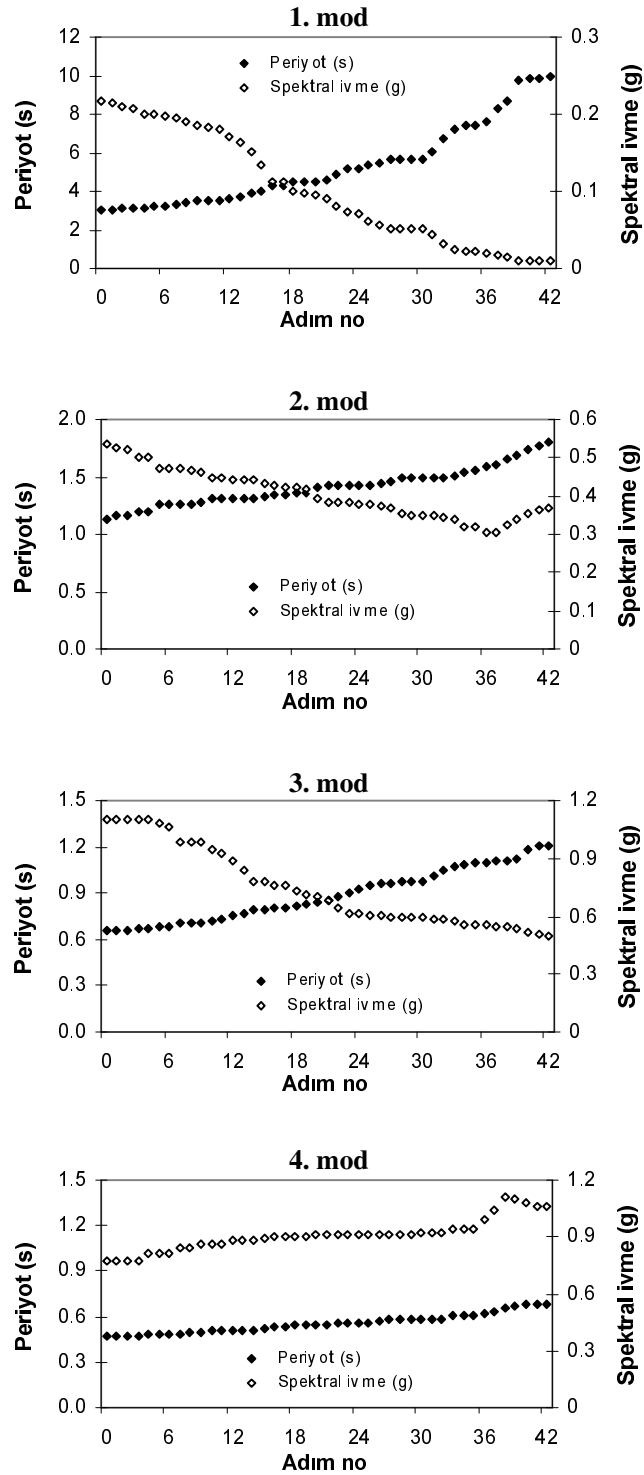
Şekil 4.34-4.38'deki FEMA-üniform sonuçları incelendiğinde; diğer çerçevedekilere (5, 10, 15-katlı) çok benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir (bkz. syf. 97).

#### **4.4 ÇMUYAY'nde Spektral Ölçeklemenin Etkisinin İncelenmesi**

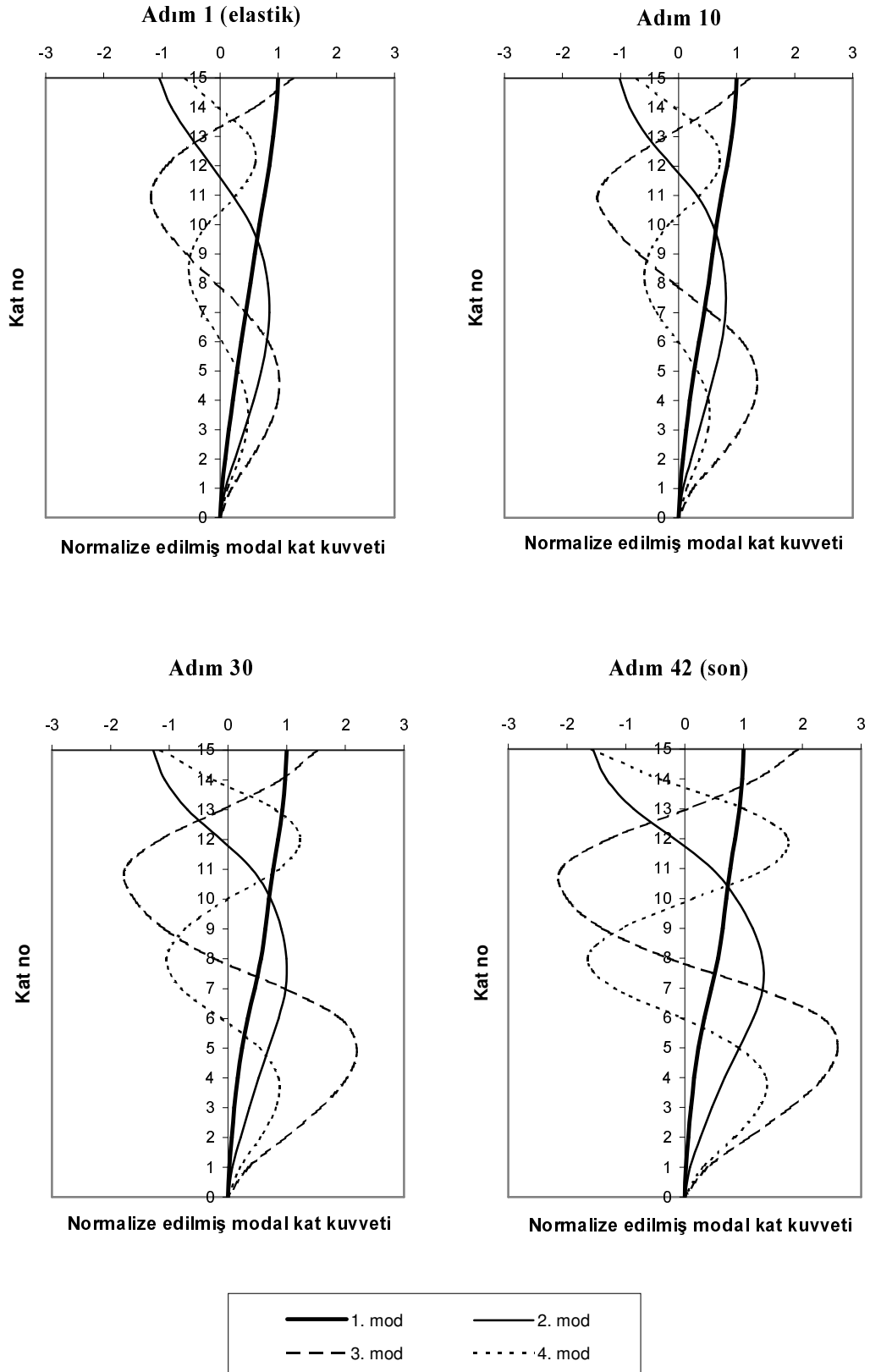
Geliştirilen Çok Modlu Uyarlamalı Yük Artımı Yönteminde (ÇMUYAY) modal yatay yük dağılımları, ilgili adıma ait elastik spektral ivmeler ile ölçeklenmekte, böylece deprem özellikleri ve modların birbirine göre etkinliğinin plastikleşme (plastik kesit oluşumu) ile değişimi gözönüne alınmaktadır. Modal etkinliğin değişiminin mertebesini belirlemek amacıyla, spektral ivmeler ile ölçeklemenin modal yatay yük dağılımları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bunun için örnek olmak üzere, 15-katlı çerçeve üzerinde, plastikleşen kesit sayısının artması ile

periyodun ve buna karşılık gelen spektral ivmenin ve ayrıca ilk dört moda ait modal yatay yük dağılımlarının değişimleri belirlenmiştir (Şekil 4.39, 4.40). Bu modal dağılımlardaki yatay yükler, karşılaştırabilmek amacıyla, birinci moda ait tepe kuvvetine göre normalize edilerek gösterilmiştir (Şekil 4.40).

Şekil 4.39 incelendiğinde; sistemdeki plastikleşen kesit sayısı arttıkça tüm modlara ait periyotların büyüdüğü, ancak en büyük değişimin birinci modda olduğu görülmektedir. Bu periyotlara karşılık gelen spektral ivme değerlerinin de ilk üç modda küçüldüğü, dördüncü modda ise deprem özellikleri nedeniyle arttığı görülmektedir. Ancak en büyük değişimin (azalmanın) yine birinci modda meydana geldiği, diğer modlardaki değişimin birinci moda oranla çok küçük kaldığı görülmektedir. Buna bağlı olarak Şekil 4.40'dan da görüldüğü gibi, başlangıçta etkin olan birinci mod, sistemdeki plastikleşen kesit sayısı arttıkça etkinliğini kaybetmekte ve yüksek modların sistem davranışındaki etkinliği artmaktadır.



Şekil 4.39 15-katlı çerçevede ilk dört mod için periyot ve spektral ivmenin plastikleşme ile değişimleri (ERZ-DB)



Şekil 4.40 15-katlı çerçevede ilk dört mod için modal yatay yük dağılımlarının plastikleşme ile değişimleri (ERZ-DB)

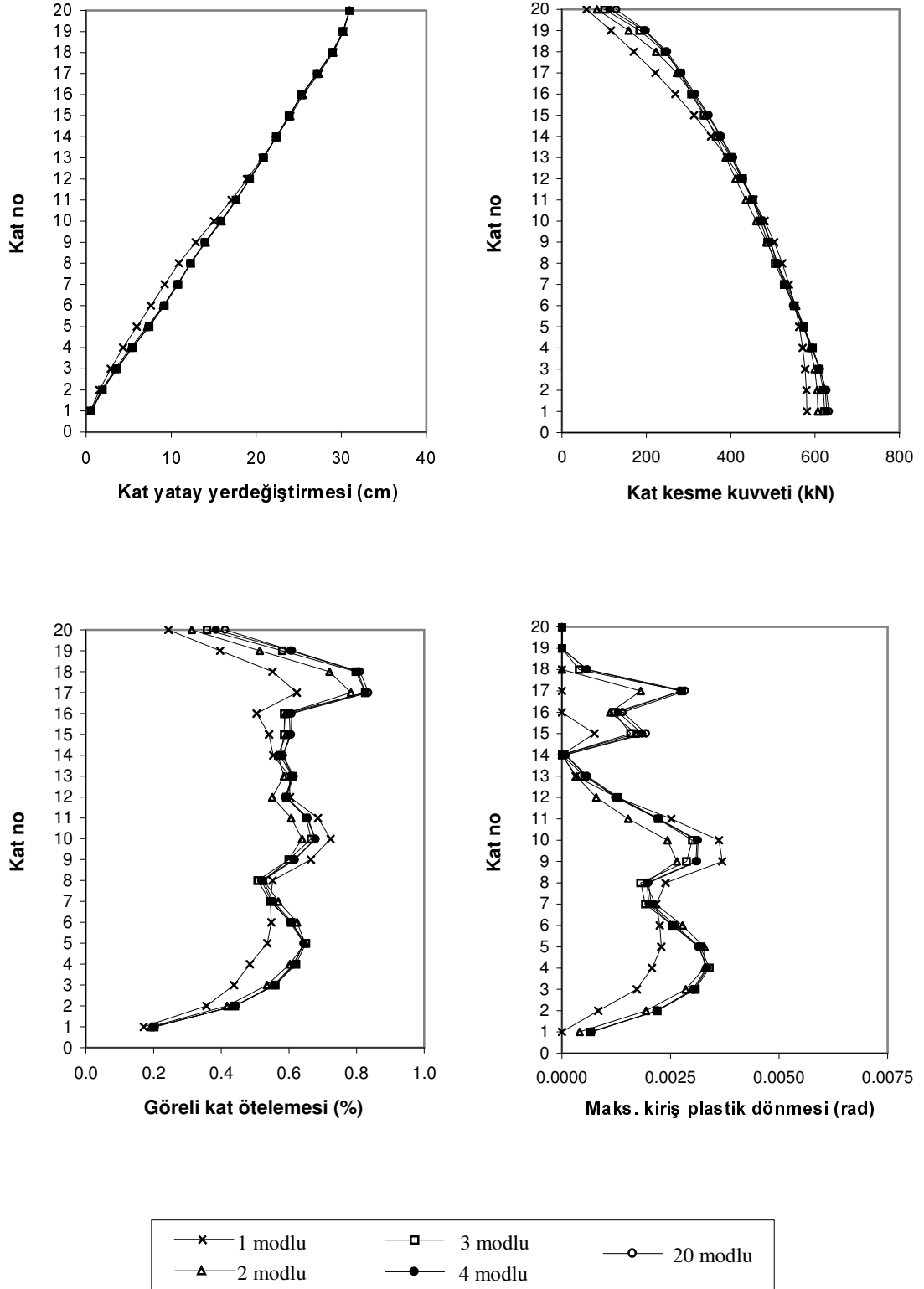
#### 4.5 ÇMUYAY’nde Mod Sayısının Etkisinin İncelenmesi

Geliştirilen Çok Modlu Uyarlamalı Yük Artımı Yönteminde (ÇMUYAY) gözönüne alınan mod sayısının davranış büyüklükleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, daha önce ele alınan çerçevelerde (5, 10, 15 ve 20-katlı) üç deprem için, ayrı ayrı 1, 2, 3, 4 mod ve tüm modları gözönüne alınarak analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çerçevelere tepe yerdeğiştirmeleri eşit olacak şekilde yük artımı uygulanmıştır. Bu çalışmada, örnek olmak üzere yüksek modların en belirgin olduğu 20-katlı çerçevenin ERZ-DB spektrumuna ait sonuçları verilmiştir (Şekil 4.41-4.43). Elde edilen kat yatay yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri, maksimum kiriş plastik dönmeleri ve kat kesme kuvvetleri Şekil 4.41’de, kapasite eğrileri Şekil 4.42’de, sistemdeki plastikleşen kesit dağılımları Şekil 4.43’de gösterilmiştir.

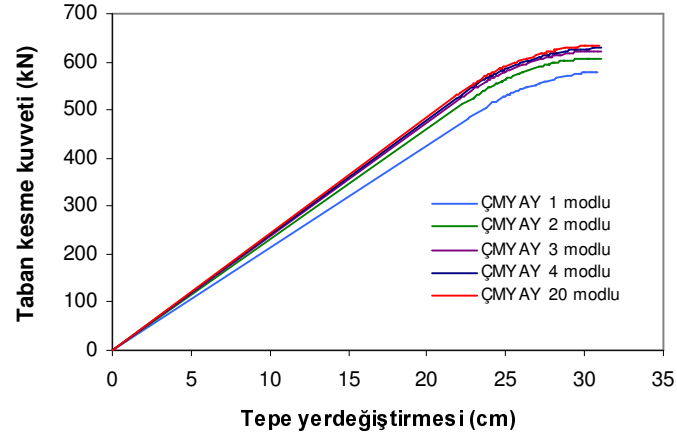
Farklı sayıda mod gözönüne alınarak elde edilen davranış büyüklüklerine ait grafikler incelendiğinde; bütün davranış büyüklükleri için, tek modlu analiz sonuçlarının belirgin olarak diğerlerinden ayrıldığı, ikinci modun gözönüne alınması ile sonuçların önemli oranda değiştiği görülmektedir. Üçüncü modun gözönüne alınması ile sonuçlar bir miktar daha değişmekte, ancak dördüncü modun ve diğer tüm modların gözönüne alındığı analizlerde ise üç modlu analizdeki sonuçlara çok yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Buna göre, 20-katlı çerçeve için ilk üç modun gözönüne alınmasının yeterli olduğu, diğer yüksek modların etkisinin ihmal edilebilecek mertebede olduğu söylenebilir.

Benzer şekilde yapılan analizler sonucunda; 5 ve 10-katlı çerçeve için ilk iki modun, 15-katlı çerçeve için ise ilk üç modun gözönüne alınmasının yeterli olduğu, diğer modların etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu belirlenmiştir.

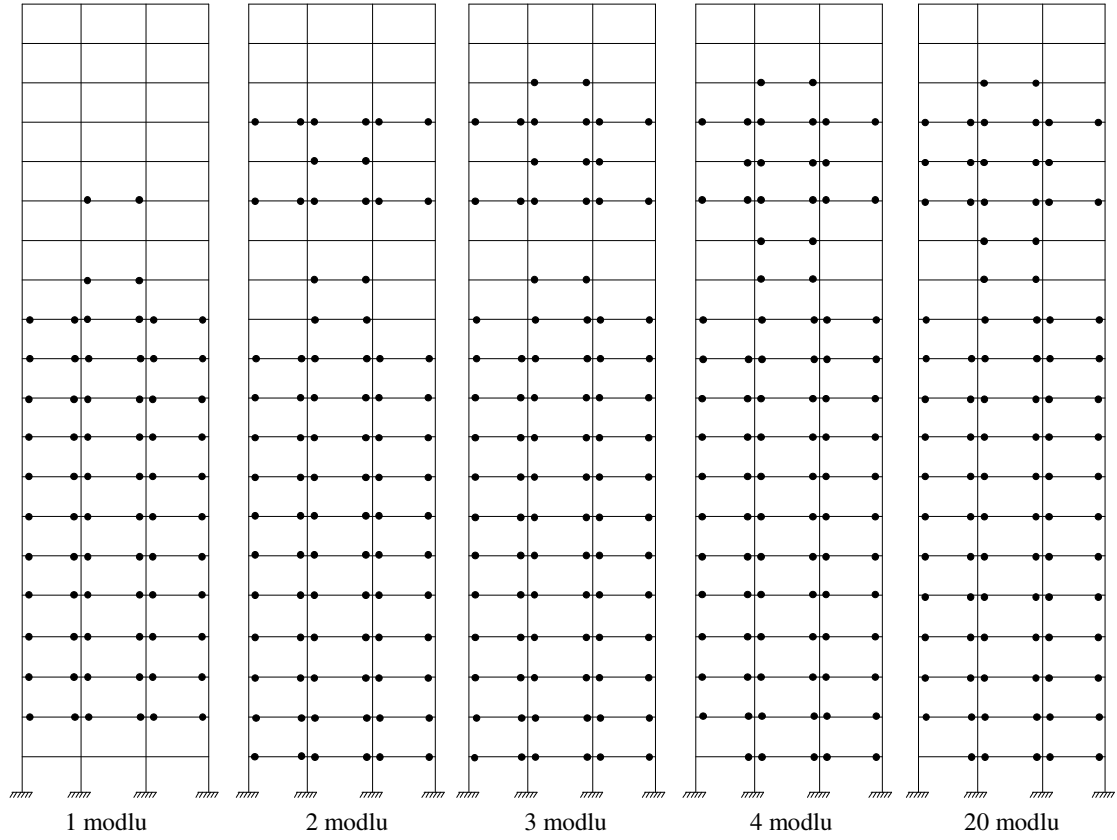




şekil 4.41 20-katlı çerçeve de gözönüne alınan mod sayısının analiz sonuçları üzerideki etkileri (ERZ-DB)



Şekil 4.42 20- katlı çerçeve de gözönüne alınan mod sayısının kapasite eğrisi üzerindeki etkisi (ERZ-DB)



Şekil 4.43 20- katlı çerçeve de gözönüne alınan mod sayısının plastikleşen kesit dağılımları üzerindeki etkisi (ERZ-DB)

#### 4.6 ÇMUYAY’nde İkinci Mertebe Etkilerinin Değerlendirilmesi

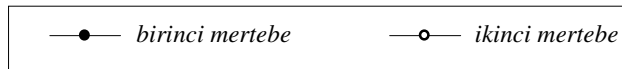
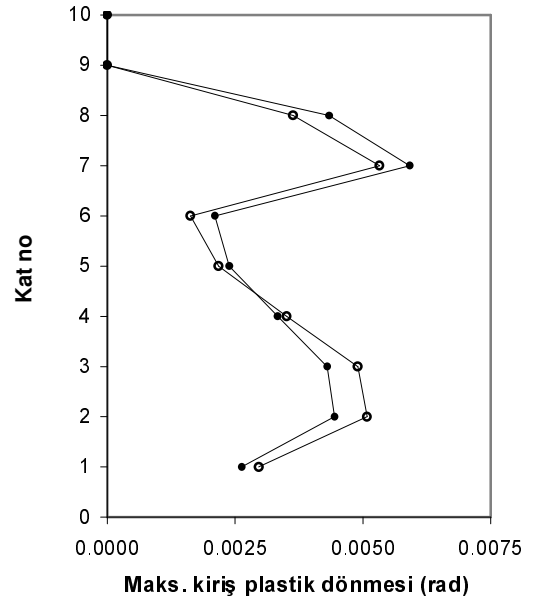
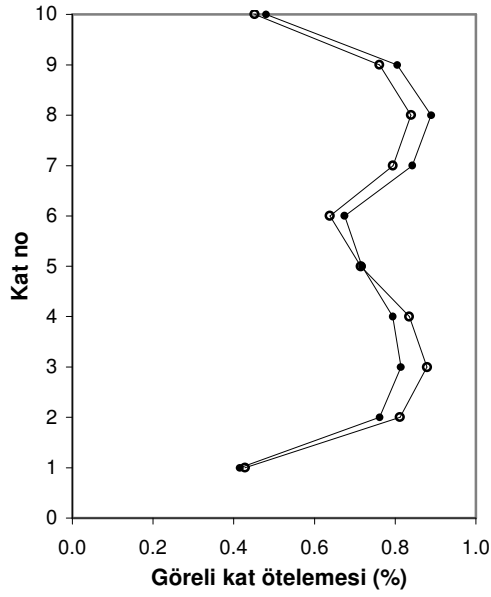
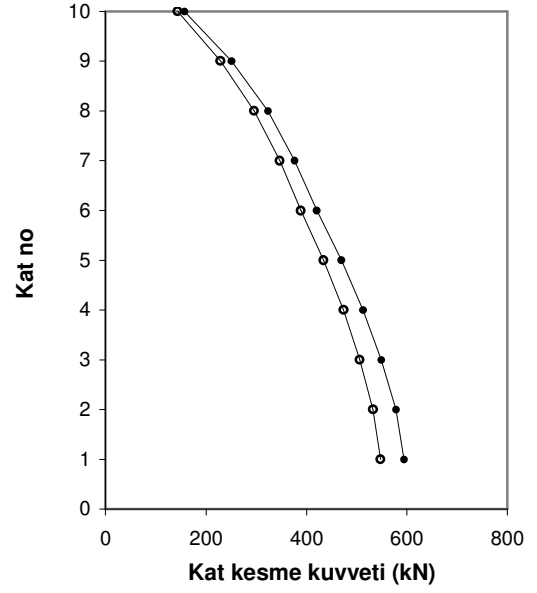
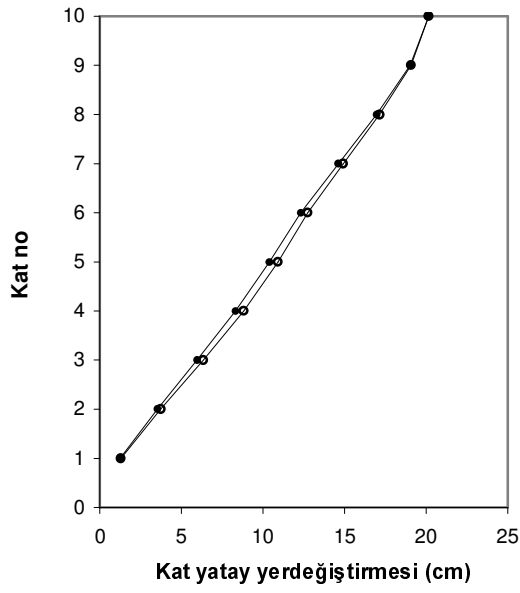
Bu bölümde, *ikinci mertebe* etkilerin kat yatay yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri, maksimum kiriş plastik dönmeleri, kat kesme kuvvetleri, kapasite eğrileri, sistemdeki plastikleşen kesit dağılımları ve sistem periyotları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, geliştirilen Çok Modlu Uyarlamalı Yük Artımı Yöntemi (ÇMUYAY) ile daha önce ele alınan çerçeveler (5, 10, 15 ve 20-katlı) için, *ikinci mertebe* etkiler ihmal edilerek *birinci mertebe elasto-plastik analiz* yapılmış ve *ikinci mertebe elasto-plastik* analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. *Birinci mertebe elasto-plastik* analizlerde, ÇMUYAY’dan elde edilen sınır değere ulaşıldığındaki ( $\det[S]_G \leq 0$ ) tepe yerdeğiştirmesi değerlerine kadar yük artımı uygulanmıştır. Elde edilen sonuçların bütün çerçeveler için benzer özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Bu nedenle çalışmada, örnek olmak üzere sadece 10-katlı ve 20-katlı çerçevelere ait sonuçlar verilmiştir (Şekil 4.44 - 4.46).

Şekil 4.44 - 4.45’deki kat yatay yerdeğiştirmeleri incelendiğinde; *ikinci mertebe* etkilerin çok küçük düzeyde olduğu görülmektedir.

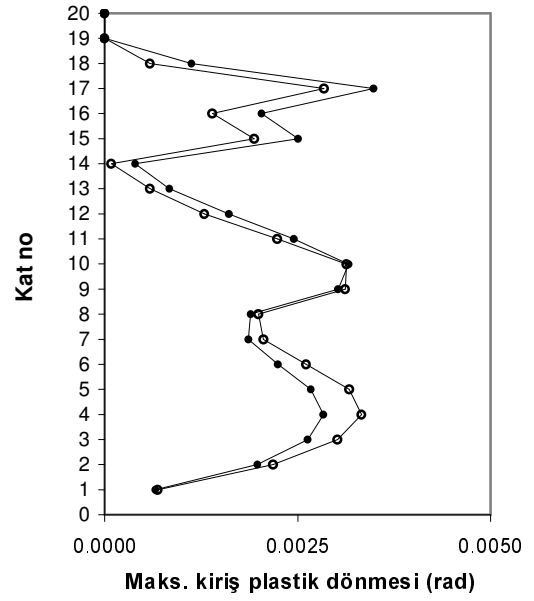
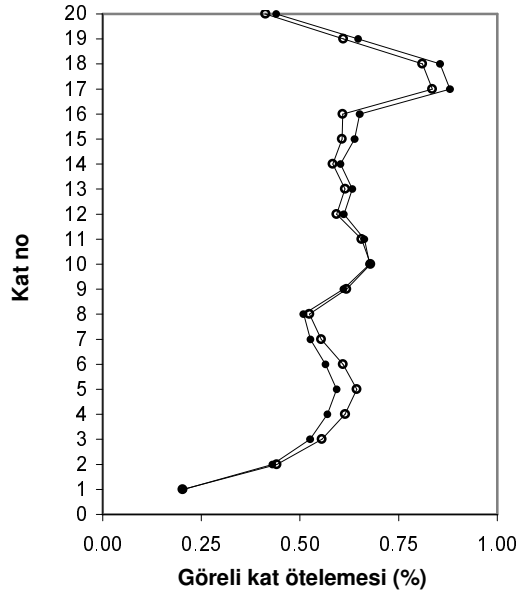
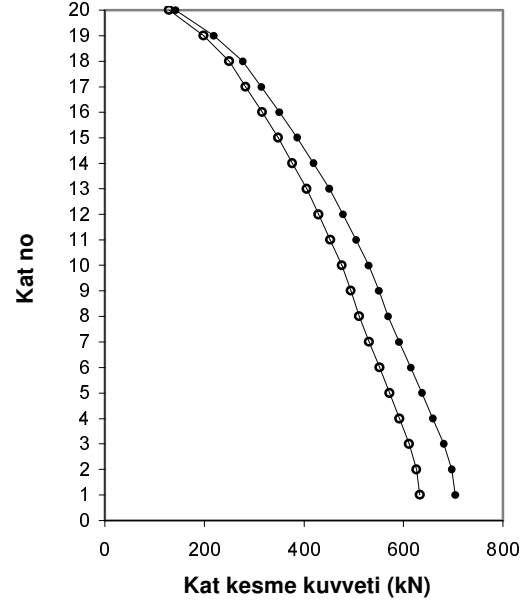
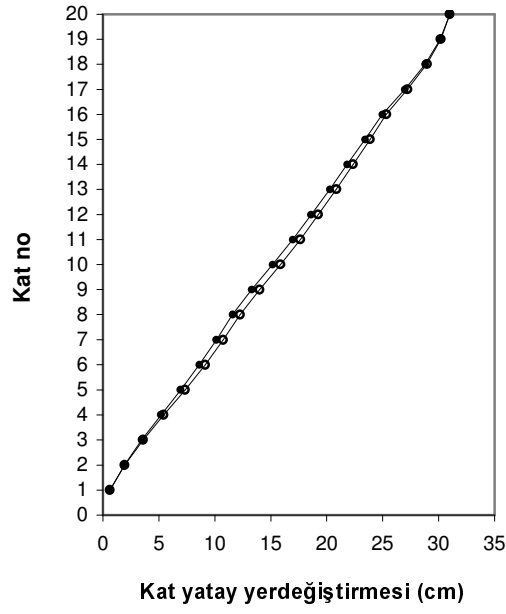
Şekil 4.44 - 4.45’deki görelî kat ötelemeleri ve maksimum kiriş plastik dönmeleri incelendiğinde; *ikinci mertebe* etkilerin gözönüne alınması ile bu büyüklüklere ait değerlerin alt katlarda arttığı, üst katlarda azaldığı görülmektedir.

Şekil 4.44 - 4.45’deki kat kesme kuvvetleri incelendiğinde; *ikinci mertebe* etkilerin gözönüne alınması ile bütün katlarda azalma meydana geldiği görülmektedir.

*İkinci mertebe* etkilerin gözönüne alınması ile plastik kesitlerin oluşum sırasında bazı farklar meydana geldiği, ancak plastikleşen kesit dağılımlarındaki ve sayısındaki değişimin çok küçük düzeyde olduğu belirlenmiştir.



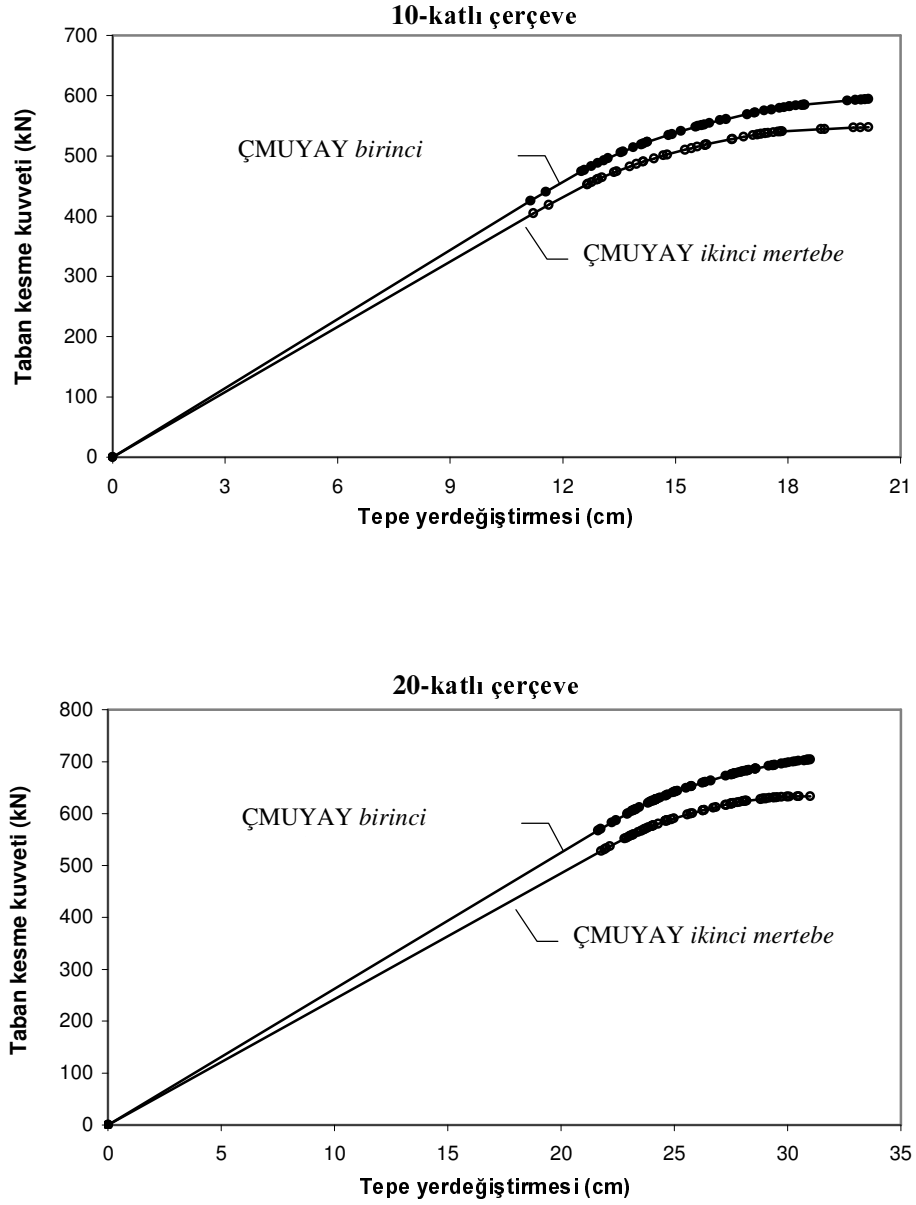
Şekil 4.44 10-katlı çerçevede *birinci ve ikinci mertebe elasto-plastik analiz sonuçlarının karşılaştırılması*



—●— birinci mertebe      —○— ikinci mertebe

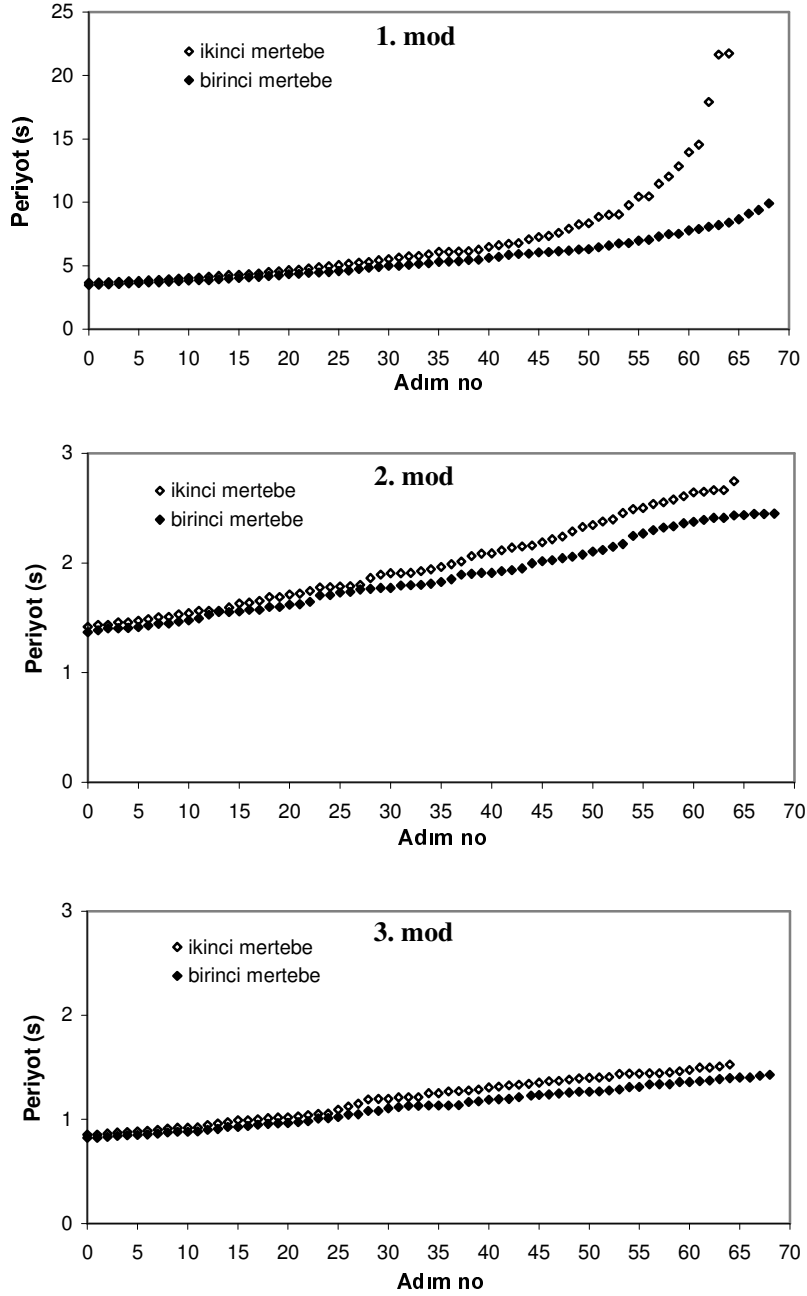
Şekil 4.45 20-katlı çerçeve de birinci ve ikinci mertebe elasto-plastik analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Kapasite eğrileri incelendiğinde; *ikinci mertebe* etkilerin gözönüne alınması ile beklendiği gibi, çerçevelerin yatay kuvvet taşıma kapasitelerinde azalma olduğu görülmüştür (Şekil 4.46).



Şekil 4.46 10 ve 20-katlı çerçevelerde, *birinci ve ikinci mertebe elasto-plastik* analizlerden elde edilen kapasite eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 4.47'deki modal periyotların sistemdeki plastikleşme ile değişimleri incelendiğinde; *ikinci mertebe* etkilerin gözönüne alınması ile beklendiği gibi, bütün periyotların büyüdüğü görülmüştür. Sistemde plastikleşen kesit sayısı arttıkça *ikinci mertebe* etkiler de artmakta ve özellikle birinci moda ait periyotta önemli mertebede artışlar gözlenmektedir.



Şekil 4.47 20-katlı çerçevenin *birinci ve ikinci mertebe elasto-plastik* analizlerinde periyodun plastikleşme ile değişimlerinin karşılaştırılması

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, yüksek modların etkili olduğu binaların deprem yükleri altındaki lineer olmayan davranışının belirlenebilmesi amacıyla, etkin bir Çok Modlu Uyarlamalı Yük Artımı Yöntemi (ÇMUYAY) geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem, Bölüm 2.1’de verilen koşulları sağlayan bütün yapı sistemlerine uygulanabilmektedir.

Geliştirilen yöntemde geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi ve malzemenin *elasto-plastik* davranışı gözönüne alınarak, sistemin belirli sabit düşey yükler ve artan modal yatay yükler için analizi yapılmaktadır. Plastik şekildeğişirmelerin *plastik kesit* adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde davranışın *lineer-elastik* olduğu varsayılmaktadır. Yöntemde, sabit düşey yükler için hesap yapılmasından yararlanarak *ikinci mertebe* etkileri lineerleştirilmektedir. Akma koşullarını ifade eden eğriler de doğru parçaları ile idealleştirilerek lineerleştirilmektedir.

Yöntemin yukarıda kısaca ifade edilen özellikleri nedeniyle, plastik kesitlerin oluşumu arasındaki lineer davranış bölgelerinde yük artımı uygulanmasına gerek kalmadan, her plastik kesitin oluşumuna karşı gelen yatay yük artımı ve davranış büyüklükleri (kesit tesirleri, yerdeğişirmeler, plastik şekildeğişirmeler vb.) doğrudan doğruya belirlenebilmektedir. Böylece ÇMUYAY ile yapılan analizde plastik kesitlerin oluşumunun ve yapı davranışının detaylı olarak izlenebilmesi sağlanmaktadır.

Geliştirilen yöntemde, her plastik kesit oluşumundan sonra o kesitteki bir plastik şekildeğişirme bileşeni yeni bir bilinmeyen olarak alınmakta ve plastikleşen kesitteki akma koşulunu ifade eden yeni bir lineer denklem mevcut denklem takımına ilave edilmektedir. Böylece her yük artımında (her plastik kesit oluşumunda) denklem takımının yeniden kurulup çözülmesine gerek kalmadan, yeni bilinmeyene ait satır ve kolonun indirgenmesi ile plastik şekildeğişirme bileşenini de içeren



çözüm etkin olarak elde edilmektedir. Ayrıca iç kuvvet durumunun akma koşulunu sağladığını ifade eden ilave denklemlerin kullanılması ile bileşik eğilme etkisindeki plastik kesitlerde eğilme ve uzama şekildeğiştirmeleri ve bunlar arasındaki etkileşim de gözönüne alınmış olmaktadır.

Yöntemde yüksek mod etkilerini gözönüne almak amacıyla ardışık iki plastikleşen kesit arasındaki lineer davranış bölgesinde, *davranış spektrumu analizi* esaslarından yararlanılmaktadır. Buna göre, her plastik kesit oluşumundan sonra sistemin değişen modal özellikleri ve önceki adımdaki birim modal yatay yük dağılımları gözönünde bulundurularak belirlenen birim modal yatay yük dağılımları için hesap yapılmaktadır. Her adıma ait birim modal yatay yük dağılımları ilgili adımlara ait elastik spektral ivmeler ile ölçeklenmekte, böylece deprem özellikleri ve modların birbirine göre etkinliğinin plastikleşmeye (plastik kesit oluşumuna) bağlı olarak değişimi de gözönüne alınabilmektedir.

Çalışmada, geliştirilen yöntemin betonarme binalar üzerindeki sayısal uygulamalarına olanak sağlamak üzere MEPARCS adı verilen bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu program ile düzlem betonarme çerçevelerin ÇMUYAY ile lineer olmayan statik analizi etkin bir şekilde yapılabilmektedir.

Geliştirilen ÇMUYAY'nden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi amacıyla, üç değişik deprem yer hareketi kaydı için farklı periyot bölgelerini temsil etmek üzere, örnek olarak ele alınan 5, 10, 15 ve 20-katlı betonarme çerçeveler üzerinde, ÇMUYAY ile LOSA, Lineer Olmayan Dinamik Analiz (LODA), 1. mod esaslı geleneksel LOSA, FEMA 356'da önerilen üniform ve modal dağılımları için LOSA yapılmıştır. LODA sonuçları kesin çözüm kabul edilerek karşılaştırmalar yapılmış ve ÇMUYAY değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler, kat yatay yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri, maksimum kiriş plastik dönmeleri, kat kesme kuvvetleri, kapasite eğrileri ve sistemdeki plastikleşen kesit dağılımları incelenerek yapılmıştır.

Çalışmada ayrıca, geliştirilen yöntemde spektral ölçeklemenin, mod sayısının ve *ikinci mertbe* etkilerinin analiz sonuçları üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

Çalışmada incelenen binaların analiz sonuçlarına göre yapılan genel değerlendirmeleri aşağıda verilmiştir.

İncelenen 5 ve 10-katlı çerçevelerde yapı davranışında 1. modun etkin olması nedeniyle, ÇMUYAY ve diğer monoton artan dağılımlar için yapılan LOSA sonuçlarının birbiriyle ve LODA ile oldukça uyumlu olduğu, ancak yüksek modların etkili olduğu 15 ve 20-katlı çerçevelerde deprem özelliklerine de bağlı olarak sonuçların önemli oranda farklılaştığı görülmüştür.

1. mod atalet kuvveti dağılımının genel olarak yüksek modların etkin olduğu binalarda (15 ve 20 katlı), alt katlarda iyi sonuçlar verdiği, üst katlardaki görelî kat ötelemelerini, maksimum kiriş plastik dönmelerini ve plastikleşen kesit dağılımlarını belirlemede yetersiz kaldığı görülmüştür.

FEMA 356'da yüksek mod etkilerini gözönüne almak amacıyla önerilen birleştirilmiş modal kat kesme kuvvetleri ile orantılı dağılımın yüksek modların etkili olduğu binalarda (15 ve 20 katlı), üst katlarda oldukça iyi sonuçlar verdiği, ancak alt katlardaki görelî kat ötelemelerini, maksimum kiriş plastik dönmelerini ve sistemdeki plastikleşen kesit dağılımlarını belirlemede çok yetersiz kalabildiği görülmüştür.

FEMA 356'da önerilen üniform dağılımının bütün binalarda, üst katlardaki görelî kat ötelemelerini, maksimum kiriş plastik dönmelerini, kat kesme kuvvetlerini ve plastikleşen kesit dağılımlarını belirlemede yetersiz kaldığı, alt katlarda ise kat kesme kuvvetleri dışındaki büyüklükleri olduğundan çok yüksek verdiği görülmüştür. Ancak, FEMA 356'da üniform dağılımın ve modal dağılımın sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi gerektiği belirtilmektedir. Buna göre, her iki dağılımdan elde edilen en elverişsiz durumlar birlikte değerlendirildiğinde, üst katlarda modal dağılım, alt katlarda ise üniform dağılım etkili olmaktadır. Buna bağlı olarak, FEMA 356'daki dağılımların kullanılması ile üst katlarda iyi sonuçlar elde edilirken, alt katlarda olduğundan çok büyük sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Bu tez çalışmasında geliştirilen ÇMUYAY'nin kat yatay yerdeğiştirmelerini, görelî kat ötelemelerini, maksimum kiriş plastik dönmelerini ve sistemdeki

plastikleşen kesit dağılımlarını, monoton artan diğer üç dağılımdan elde edilen sonuçlara göre oldukça iyi belirleyebildiği görülmüştür.

ÇMUYAY ve diğer monoton artan dağılımlar için yapılan LOSA'ler kat kesme kuvvetlerini ve kapasite eğrilerini belirlemede genel olarak yetersiz kalmaktadır. Ancak, geliştirilen ÇMUYAY'nde yüksek modların katkısı nedeniyle daha iyi sonuçlar elde edilmektedir.

Geliştirilen ÇMUYAY'nde modal yatay yük dağılımları ilgili adıma ait elastik spektral ivmeler ile ölçeklenmekte, böylece deprem özellikleri ve modların birbirine göre etkinliğinin plastikleşen kesit sayısındaki artım ile değişimi gözönüne alınabilmektedir. Çalışmada ele alınan örneklerde sözkonusu modal etkinliğin değişimi incelenmiştir. Buna göre, sistemdeki plastikleşen kesit sayısı arttıkça 1. moda ait periyot ve spektral ivme, diğer modlara oranla çok büyük değişim göstermektedir. Bu nedenle sistemdeki plastikleşen kesit sayısına bağlı olarak birinci modun etkinliği azalmakta ve yüksek modların sistem davranışındaki etkinliği artmaktadır.

Geliştirilen ÇMUYAY'nde, gözönüne alınan mod sayısının davranış büyüklükleri üzerindeki etkisi incelenerek analizde kullanılması gereken mod sayısı belirlenmiştir. Buna göre, geliştirilen ÇMUYAY ile düzenli çerçeve yapıların lineer olmayan statik analizinde en fazla ilk üç modun gözönüne alınmasının yeterli olduğu, diğer yüksek modların etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde kaldığı belirlenmiştir.

Geliştirilen ÇMUYAY ile *ikinci mertebe* etkilerinin yukarıda belirtilen davranış büyüklükleri ve sistemin periyotları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Buna göre, görelî kat ötelemeleri ve maksimum kiriş plastik dönmelerinin *ikinci mertebe* etkilerinin gözönüne alınması ile alt katlarda arttığı, üst katlarda azaldığı, kat kesme kuvvetlerinin de beklendiği gibi bütün katlarda azaldığı görülmüştür. Ayrıca, sistemdeki plastikleşen kesit sayısı arttıkça *ikinci mertebe* etkileri de artmakta ve birinci moda ait periyotta önemli mertebede artışlar gözlenmektedir. Bu nedenle, davranış büyüklüklerinin ve modal özelliklerin belirlenmesinde *ikinci mertebe* etkilerinin gözönüne alınması gerekmektedir.

Geliştirilen ÇMUYAY ile yüksek mod etkileri ve plastikleşen kesitlerin neden olduğu yatay yük dağılımı değişimleri gözönüne alınmakta, ayrıca analiz boyunca tüm plastik kesitlerin oluşumu ayrıntılı bir şekilde izlenerek her yük artımında önceki adımlardan bağımsız yük dağılımı kullanımına ve bu yükün istenilen şekilde ölçeklenmesine olanak verilmektedir. ÇMUYAY ile yapı davranışında yüksek modların etkisinin de gözönüne alındığı, malzeme ve geometri değişimleri bakımından lineer olmayan sistemlerin *ikinci mertebe elasto-plastik* hesabı, plastik şekil değiştirme bileşenlerini de içeren tek bir genişletilmiş denklem sisteminin kurulmasına ve bu denklem sistemi ile alt sistemlerinin çözümüne indirgenmiş olmaktadır. Böylece bu tez çalışmasında geliştirilen yöntemde, yüksek modların etkili olduğu binaların deprem etkileri altındaki lineer olmayan davranışı etkin bir şekilde belirlenebilmektedir.

*ÇMUYAY'nin geliştirilmesi ile ilgili öneriler aşağıda verilmiştir:*

Geliştirilen yöntemde her plastik oluşumundan sonra birim yük artımı için hesap yapılmakta, böylece her yük artımında önceki yüklerden bağımsız yük dağılımı kullanılmasına ve bu yüklerin istenilen şekilde ölçeklenmesine olanak verilmektedir. Yöntemde modal davranış büyüklüklerinin belirlenmesinde esas alınan spektral ölçekleme konusunda daha kapsamlı çalışmalar yapılması ve elastik olmayan *davranış spektrumu* kullanımı vb. yaklaşımların araştırılmasının yararlı olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen ÇMUYAY düzlem sistemleri içermektedir. Ancak yöntemin esasları genel olup üç boyutlu sistemleri de içerecek şekilde geliştirilebilir. Yöntemin bu yönde geliştirilmesi ile burulma etkisindeki binaların da etkin bir şekilde çok modlu uyarlamalı lineer olmayan statik analizine olanak sağlanabilecektir.

ÇMUYAY ile büyük şekil değiştirmeler yapan sistemlerin analizinin de yapılabilmesi amacıyla pekleşmeli ve gevşemeli iç kuvvet-şekil değiştirme bağıntılarını da içerecek şekilde geliştirilmesi önerilmektedir.

ÇMUYAY'nin, gözönüne alınan deprem için yapının genel yer değiştirme ve dayanım taleplerini belirleyecek yönde geliştirilmesi önerilmektedir. Bu amaçla, ÇMUYAY'nden elde edilen çok modlu kapasite eğrisinden veya her bir moda ait kapasite eğrilerinden yararlanabileceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Otani, S., Japanese PRESSS Design guidelines for reinforced concrete buildings, Proceedings of 4<sup>th</sup> meeting of U.S-Japanese Coordinated PRESSS, Tsukuba, Japan, (1994).
- [2] European Standard Norme (Eurocode 8), Part 1: European Prestandart ENV1998, CEN, Brussels, (1994).
- [3] SEAOC, Performance based seismic engineering of buildings, VISION 2000, Structural Engineers Association of California, Washington, DC., USA, (1995).
- [4] ATC, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, ATC 40, Vol. 1., Applied Technology Council, Washington, DC., USA, (1996).
- [5] ATC, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, ATC 40, Vol. 2. Appendices, Applied Technology Council, Washington, DC., USA, (1996).
- [6] FEMA, NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA 273, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC., USA, (1997).
- [7] FEMA, Prestandart and commentary for the seismic rehabilitation of buildings FEMA 356, American Society of Civil Engineers, Virginia, USA, (2000).
- [8] Beskos, D.E. and Anagnostopoulos, S.A., Computer analysis and design of earthquake resistant structures a handbook, CMP, (1997).
- [9] Fajfar, P., “A nonlinear analysis method for performance-based seismic design”, *Earthquake Spectra*, (2000) **16**, p.573.
- [10] Aschheim, M. and Black, E. F., “Yield point spectra for seismic design and rehabilitation”, *Earthquake Spectra*, (2000) **16**, p. 317.
- [11] Mwafy, A.M. and Elnashai, A.S., “Static pushover versus dynamic collapse analysis of RC buildings”, *Engineering Structures*, (2001) **23**, p.407.
- [12] Krawinkler, H. and Seneviratna, G.D.P.K., “Pross and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation”, *Engineering Structures*, (1998), p.452.
- [13] Lawson, R.S., Vance, V. and Krawinkler, H., “Nonlinear static push-over analysis –why, when, and how?”, Proceedings of Fifth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, (1994) **1**, p.283.

- [14] Kim, S. and D' Amore, E., "Push-over analysis procedure in earthquake engineering", *Earthquake Spectra*, (1999) **15**, p.417.
- [15] Comartin C.D., "ATC55: Evaluation and improvement of inelastic seismic analysis procedures", 10<sup>th</sup> US-Japan Workshop on Improvement of Structural Design and Construction Practices, Hawaii, (2003), p.227.
- [16] FEMA, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, FEMA 440 (ATC-55 project), Federal Emergency Management Agency, Washington, DC., USA, (2004).
- [17] Reinhorn, A.M., "Inelastic analysis techniques in seismic evaluations", Proceedings of the International Workshop on Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes, Slovenia, (1997), p.277.
- [18] Bracci, J., Kunnath, A.K. and Reinhorn, A.M., "Seismic performance and retrofit evaluation of RC structures", *Journal of Structural Engineering*, (1997), p.3.
- [19] Gupta, B. and Kunnath, S.K., "Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures", *Earthquake Spectra*, (2000) **16**, p.367.
- [20] Antoniou, S., Rovithakis, A. and Pinho, R., "Development and verification of a fully adaptive pushover procedure", 12th European Conference on Earthquake Engineering, No.822, London, UK, (2002).
- [21] Rovithakis, A., Verification of adaptive pushover analysis procedures, M.Sc. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, UK., (2001).
- [22] Özer, E., "Determination of the second-order limit load by a method of load increments", *Bulletins of the Technical University of Istanbul*, (1987) **40**, p.815.
- [23] İrtəm, E., Uzay çubuk sistemlerde ikinci mertebe limit yükün hesabı için bir yük artımı yöntemi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (1991).
- [24] Girgin, K., Betonarme yapı sistemlerinde ikinci mertebe limit yükün ve geçme güvenliğinin belirlenmesi için bir yük artımı yöntemi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (1996).
- [25] Kilar, V. and Fajfar, P., "Simple pushover analysis of asymmetric buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (1997) **26**, p.233.
- [26] Moghadam, A.S. and Tso, W.K., "Seismic response of asymmetrical buildings using pushover analysis", Proceedings of the International Workshop on Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes, Slovenia, (1997), p.311.

- [27] Faella, G. and Kilar, V., “Asymmetric multistory R/C frame structures: Pushover versus nonlinear dynamic analysis”, 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, France, Balkema, Rotterdam, (1998).
- [28] Penelis, G. and Kappos, A.J., “3D pushover analysis: The issue of torsion”, 12th European Conference on Earthquake Engineering, No.15, London, UK, (2002).
- [29] Lew, H.S. and Kunnath, K.K., “Evaluation of nonlinear static procedures for seismic design of buildings”, 33rd Joint Meeting of the UJNR Panel on Wind and Seismic Effects, Tsukuba, Japan, (2001).
- [30] Freeman, S., “Development and use of capacity spectrum method”, Proceedings of Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, Washington, USA, (1998).
- [31] Albanesi, T., Nuti, C. and Vanzi, I., “State of the art review for non-linear static methods”, 12th European Conference on Earthquake Engineering, No.602, London, UK, (2002).
- [32] Albanesi, T., Biondi, S. and Petrangeli, M., “Pushover analysis: An energy based approach”, 12th European Conference on Earthquake Engineering, No.605, London, UK, (2002).
- [33] Paret, T. F., Sasaki, K.K., Eilbeck, D.H. and Freeman, S.A., “Approximate inelastic procedures to identify failure mechanisms from higher mode effects”, Proceedings of Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, No.966, Acapulco, Mexico, (1996).
- [34] Sasaki, K.K., Freeman, S.A. and Paret, T. F., “Multi-mode pushover procedure (MMP)- a method to identify the effects of higher modes in a pushover analysis”, Proceedings of Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, Washington, USA, (1998).
- [35] Valley, M. T. and Harris, J. R., “Application of modal techniques in a pushover analysis”, Proceedings of Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, Washington, USA, (1998).
- [36] Moghadam, A.,S., “A pushover procedure for tall buildings”, Proceedings of 12th European Conference on Earthquake Engineering, No.395, Balkema, Rotterdam, London, UK, (1998).
- [37] Yang, P. and Wang, Y., “A study on improvement of pushover analysis”, Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, No.1940, Auckland, New Zealand, (1998).
- [38] Kunnath, S.K. and Gupta, B., “Spectra-compatible pushover analysis of structures”, Proceedings, US-Japan Workshop on Performance-Based Design Methodology for Reinforced Concrete Building Structures, Maui, (1999), p.69.

- [39] Lefort, T., Advanced pushover analysis of RC multi-story building, M.Sc. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, UK., (2000).
- [40] Chopra, A. K. and Goel, R.K., “A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: Theory and preliminary evaluation”, PEER Report 2001/03, University of California Berkeley, California, USA, (2001).
- [41] Chopra, A. K. and Goel, R.K., “A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (2001) **31**, p.561.
- [42] Chopra, A. K. and Goel, R.K., “Modal pushover seismic analysis of SAC buildings excluding gravity loads”, 12th European Conference on Earthquake Engineering, No.522, London, UK, (2002).
- [43] Elnashai, A.S., “Advanced inelastic static (pushover) analysis for earthquake applications”, *Structural Engineering and Mechanics*, (2001) **12**, p.51.
- [44] Elnashai, A.S., “Do we really need inelastic dynamic analysis”, *Journal of Earthquake Engineering*, (2002), **6**, S11, p.123.
- [45] Aydınoğlu, M.N., “An incremental response spectrum analysis procedure based on inelastic spectral displacements for multi-mode seismic performance evaluation”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, (2003) **1**, p.3.
- [46] İnel, M., Tjhin, T. and Aschheim, M.A., “The significance of lateral load pattern in pushover analysis”, Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, No. AE: 009, İstanbul, (2003).
- [47] Chopra, A. K. and Goel, R.K., “Modal pushover analysis: symmetric and asymmetric plan buildings”, International Workshop on Performance Based Seismic Design, Bled, Slovenia, (2004).
- [48] Jan, T.S., Liu, M., W. and Kao, Y.C., “An upper-bound pushover analysis procedure for estimating the seismic demands of high-rise buildings”, *Engineering Structures*, (2004) **26**, p.117.
- [49] Aydınoğlu, M.N., “An improved pushover procedure for engineering practice: incremental response spectrum analysis (IRSA)”, International Workshop on Performance Based Seismic Design, Bled, Slovenia, (2004).
- [50] Hodge, P.G., Plastic analysis of structures, Mc. Graw Hill, (1959).
- [51] Çakıroğlu, A. ve Özer, E., Malzeme ve geometri değişimi bakımından lineer olmayan sistemler, Cilt-1, İ.T.Ü. Kütüphanesi, İstanbul, (1980).



- [52] Çakıroğlu, A., Özer, E. ve Girgin, K., “Yield conditions and yield vector for combined biaxial bending of rectangular reinforced concrete sections”, Proceedings of the Uğur Ersoy Symposium on Structural Engineering, Ankara, Turkey, (1999), p.121.
- [53] Chopra K.A., Dynamics of structures, Second Edition, Prentice Hall, New Jersey, (2001).
- [54] Çakıroğlu A., Özden E. ve Özmen G., Yapı sistemlerinin hesabı için matris metotları ve elektronik hesap makinası programları, Cilt: 2, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, (1992).
- [55] Bathe J.K., Finite Element Procedures, Prentice Hall, Englewood Cliffs New Jersey, (1996).
- [56] Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY), Ankara, (1998).
- [57] Türk Standartları Enstitüsü, Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, TS 500, Ankara, (2000).
- [58] Pasific Earthquake Engineering Research Center (PEER), Strong Motion Database, <http://www.peer.berkeley.edu>, (2005).
- [59] SeismoSoft, Manual and program description of the program seismosignal, <http://www.seismosoft.com>, (2003).
- [60] RAM International, User guide and element descriptions RAM Perform-2D Ver.1.30, <http://www.ramint.com>, (2004).
- [61] European Standard Norme (Eurocode 8), Design of structures for Earthquake Resistance, Part 3 : Assessment and retrofitting of buildings, (2004).