

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

93691

**BETONARME BİNALARDA SİSTEM SÜNEKLİĞİNİN
BELİRLENMESİ**

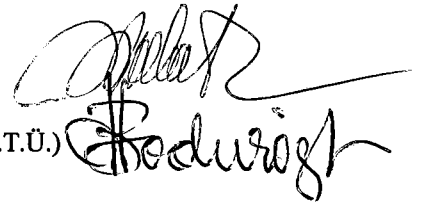
İnş. Y. Müh. İsa YÜKSEL



**F.B.E İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 05/07/2000
Tez Danışmanı : Prof. Zekeriya POLAT (Y.T.Ü.)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hasan BODUROĞLU (İ.T.Ü.)
: Prof. Dr. Tuncer ÇELİK (İ.Ü.)



**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

İSTANBUL, 2000

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	i
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖNSÖZ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ	1
2. SÜNEKLİK TANIM VE ÇEŞİTLERİ.....	4
3. SARGILI BETON DAVRANIŞI İLE SÜNEKLİK İLİŞKİSİ	10
3.1 Süneklik Kuşatma İlişkileri.....	10
3.2 Pasif Kuşatma	10
3.3 Kuşatılmış (Sargılı) Beton Davranış Modelleri	13
4. BETONARME ÇERÇEVE ELEMANLARINDA SÜNEKLİK	16
4.1 Kiriş Kesitlerinde Süneklik	16
4.2 Kolon Kesitlerinde Süneklik	21
5. BETONARME BİNA SİSTEMLERİNDE SÜNEKLİK	23
5.1 Deplasman Sünekliği İhtiyacı	23
5.2 Eğrilik Sünekliği İhtiyacı	29
5.3 Göçme Mekanizmaları İle Eğrilik Sünekliğinin Belirlenmesi	31
5.4 Göçme Mekanizmalarının İrdelenmesi	41
5.5 Eğrilik Sünekliğinin Doğrusal Olmayan Dinamik Analizle Belirlenmesi	43
5.6 Sistem Sünekliğine Etki Eden Faktörler	45
5.6.1 Tersinir Yükleme Etkisi	46
5.6.2 İki Eksenli Yükleme Etkisi.....	47
5.6.3 Perde ve Dolgu Duvarların Etkisi.....	47
5.7 Eleman-Sistem Sünekliği İlişkisi	49
5.8 Sistem Akma Yer Değiştirmesi Hesabında Mevcut Yöntemler	53
5.9 Sistem Akma Yer Değiştirmesi İçin Önerilen Yöntem	57

6.	STATİK İTME ANALİZİ	61
6.1	Statik İtme Analizi Tanımı	61
6.2	Analizden Sistem Responsunun Çıkarılması	64
7.	UYGULAMA	66
7.1	Çerçevelerin Seçimi	66
7.2	5 Katlı Çerçeve Sistemin Statik İtme Analizi (Pushover Analizi)	66
7.3	10 Katlı Perdeli Sistemin Statik İtme Analizi (Pushover Analizi)	69
7.4	Kapasite Eğrilerinin Çizilmesi	72
7.5	Sistemde Akma Ve Göçme Başlangıcının Tespiti.....	73
7.6	Sistem Sünekliği Hesabı	79
7.7	Sistemin Bütünü ve Eleman Bazında İrdeleme	81
7.8	Periyot Eksenli Kapasite Eğrisi	88
7.9	Kapasite Spektrumunun Çizilmesi ve Performans Noktası Tayini	89
8.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	93
	KAYNAKLAR	99
	EKLER	105
	Ek 1.a. 5 katlı örnek bina taşıyıcı sistemi ve tasarım kriterleri	105
	Ek 1.b. 10 katlı örnek perdeli bina taşıyıcı sistemi ve tasarım kriterleri	106
	Ek 2 IDARC-2D Bilgisayar Programı	107
	Ek 3.1 5 katlı binanın X yönündeki statik itme analizine ait kapasite eğrisi ile eğri üzerinde “klasik yöntem” ve “ilk dikkate değer eleman akması” yaklaşımıyla sistem akma başlangıcının belirlenmesi	109
	Ek 3.2 5 katlı binanın Y yönündeki statik itme analizine ait kapasite eğrisi ile eğri üzerinde “klasik yöntem” ve “ilk dikkate değer eleman akması” yaklaşımıyla sistem akma başlangıcının belirlenmesi	110
	Ek 3.3 10 katlı perdeli binanın X yönündeki statik itme analizine ait kapasite eğrisi ve çeşitli yollardan sistem akma deplasmanının bulunması	111
	Ek 3.4 10 katlı perdeli binanın Y yönündeki statik itme analizine ait kapasite eğrisi ve çeşitli yollardan sistem akma deplasmanının bulunması	112
	Ek 4.1 5 katlı binanın X yönünde statik itme analizinde ilk dikkate değer eleman akmasının olduğu andaki durum	113
	Ek 4.2 5 katlı binanın X yönünde statik itme analizinde sistemin göçtüğü andaki durum	114
	Ek 4.3 5 katlı binanın Y yönünde statik itme analizinde ilk dikkate değer eleman akmasının olduğu andaki durum	115
	Ek 4.4 5 katlı binanın Y yönünde statik itme analizinde sistemin göçtüğü andaki durum	117
	Ek 4.5 10 katlı binanın X yönünde statik itme analizinde sistemin akmaya başladığı andaki durum	119

Ek 4.6 10 katlı binanın Y yönünde statik itme analizinde sistemin akmaya başladığı andaki durum	121
Ek 4.7 10 katlı binanın X yönünde statik itme analizinde sistemin göçtüğü andaki durum	124
Ek 4.8 10 katlı binanın Y yönünde statik itme analizinde sistemin göçtüğü andaki durum	126
Ek 5.1 5 katlı binanın X yönünde statik itme analizinde periyot eksenli kapasite eğrisi ve ilk dikkate değer eleman akmasının tespiti	129
Ek 5.2 5 katlı binanın Y yönünde statik itme analizinde periyot eksenli kapasite eğrisi ve ilk dikkate değer eleman akmasının tespiti	130
Ek 5.3 10 katlı perdeli binanın X yönünde statik itme analizinde periyot eksenli kapasite eğrisi ve ilk dikkate değer eleman akmasının tespiti	131
Ek 5.4 10 katlı perdeli binanın Y yönünde statik itme analizinde periyot eksenli kapasite eğrisi ve ilk dikkate değer eleman akmasının tespiti	132
Ek 6.1 5 katlı binanın X yönünde statik itme analizinde 33 numaralı kolonun alt ucunda “moment-eğrilik” diyagramı	133
Ek 6.2 5 katlı binanın Y yönünde statik itme analizinde 22 numaralı kolonun alt ucunda “moment-eğrilik” diyagramı	134
Ek 6.3 10 katlı perdeli binanın X yönünde statik itme analizinde 1 numaralı perdenin alt ucunda “moment-eğrilik” diyagramı	135
Ek 6.4 10 katlı perdeli binanın Y yönünde statik itme analizinde 1 numaralı perdenin alt ucunda “moment-eğrilik” diyagramı	136
Ek 7.1 5 katlı binanın X yönünde kapasite spektrumu yöntemiyle performans noktasının tespiti	137
Ek 7.2 5 katlı binanın Y yönünde kapasite spektrumu yöntemiyle performans noktasının tespiti	138
Ek 7.3 10 katlı perdeli binanın X yönünde kapasite spektrumu yöntemiyle performans noktasının tespiti	139
Ek 7.4 10 katlı perdeli binanın Y yönünde kapasite spektrumu yöntemiyle performans noktasının tespiti	140
Ek 8.1 5 katlı binanın X yönünde statik itme analizinde “i.d.d.e.a” nın periyot ve deplasman eksenli olarak gösterilmesi	141
Ek 8.2 5 katlı binanın Y yönünde statik itme analizinde “i.d.d.e.a” nın periyot ve deplasman eksenli olarak gösterilmesi	142
Ek 8.3 10 katlı perdeli binanın X yönünde statik itme analizinde “i.d.d.e.a” nın periyot ve deplasman eksenli olarak gösterilmesi	143
Ek 8.4 10 katlı perdeli binanın Y yönünde statik itme analizinde “i.d.d.e.a” nın periyot ve deplasman eksenli olarak gösterilmesi	144
ÖZGEÇMİŞ	145

SİMGE LİSTESİ

a	İvme, dikdörtgene dönüştürülen basınç gerilme bloğu derinliği
A_0	Etkin yer ivmesi katsayısı
A_c	Kolonda brüt enkesit alanı
A_s	Çekme donatısı
A_s'	Basınç donatısı
A_{st}	Kolon boyuna donatısı
b	Kirişte kesit genişliği, kolon enkesitinde eğilme yönüne dik boyut
c	Tarafsız eksen derinliği
d	Kesit etkili derinliği
D	Perde duvar uzunluğu
d'	Beton basınç yüzünden basınç donatısı ağırlık merkezine olan uzaklık
E	Elastisite modülü
E_c	Beton elastisite modülü
EI	Eğilme rijitliği
E_s	Donatı çeliği elastisite modülü
F	Binaya yatay yönde etkiyen dış yük
f_c	Beton basınç dayanımı
f'_{co}	Elemanda sargısız (kuşatılmamış) beton basınç dayanımı
f_{cc}	Kuşatılmış (sargılı) beton basınç dayanımı
f_{ck}	Beton karakteristik basınç dayanımı
f_{cu}	Kırılma durumu için beton basınç dayanımı
F_i^{old}	Bir önceki adımda i. kattaki yatay kuvvet
f_s'	Basınç donatısındaki gerilme
f_y	Donatı akma mukavemeti
g	Yerçekimi ivmesi
h	Kat yüksekliği , kolon enkesitinde eğilme yönündeki boyut
h_{wi}	i. perde duvarın yüksekliği
H	Bina yüksekliği
I	Bina önem katsayısı
J	Moment kolu katsayısı
k	Tarafsız eksen derinliğinin kesit etkin derinliğine oranı
k_{eff}	Sistemin efektif rijitliği
k_1	1. elemanın rijitliği

k_1	Ortalama basınç gerilmesinin maksimum gerilmeye oranı
K_e	Betonda kuşatma etkisi katsayısı
K_k	Davranış etkeni
k_z	Moment kolu katsayısı
L	Açıklık, eleman uzunluğu
L_b	Kirişte ardışık iki plastik mafsalsal arası mesafe
L_c	Kat yüksekliği
L_p	Plastik mafsalsal uzunluğu
L_{pc}	Kolon alt ucunda eşdeğer plastik mafsalsal uzunluğu
L'_{pc}	Kolon üst ucunda eşdeğer plastik mafsalsal uzunluğu
L_w	Perde duvar uzunluğu
m	Birim kütle
M	Eğilme momenti
M_u	Limit durum momenti
M_y	Akma momenti
N	Kolonda eksenel yük, binada kat adedi
n	Modüler oran, gevrek halka sayısı
N_0	Kolonda (dengeli durum) eksenel yükü
p	Duvar endeksi
P	Yük
P_0	Kolonda dengeli eksenel yük
P_u	Maksimum yük
P_y	Akma anındaki yük değeri
Q_b	Taban kesme kuvveti
r	Deplasmanın ölçüldüğü katın üzerinde kalan kat sayısı
R	Taşıyıcı sistem davranış katsayısı, Yük azaltma faktörü
R_A	Deprem yükü azaltma katsayısı
s	Etriye aralığı
$S(T)$	Spektrum katsayısı
S_a	Spektral ivme
S_d	Tasarım spektrum katsayısı, spektral deplasman
S_i	İdeal mukavemet
S_o	Maksimum mukavemet
S_y	İdeal akma mukavemeti
SR_A	Spektral azaltma katsayısı (sabit ivme bölgesinde)

SR_v	Spektral azaltma katsayısı (sabit hız bölgesinde)
T	Bina doğal titreşim periyodu
T_0	Maksimum ivmeye karşılık gelen bina doğal titreşim periyodu
T_1	Sistemin 1. doğal titreşim periyodu
T_A	Spektrum karakteristik periyodu
T_b	Akma başlangıcında sistemin 1. doğal titreşim periyodu
T_g	Göçme başlangıcında sistemin 1. doğal titreşim periyodu
u_i	i. kat yanal deplasmanı
U_{max}	Maksimum deplasman
U_y	Akma deplasmanı
V	Taban kesme kuvveti
V_{n2}	2. elemanın nominal mukavemeti
w	Düzgün yayılı yük şiddeti
W	Yapı ağırlığı
α	1. perde duvarın kütle merkezine uzaklığını belirten katsayı
β	2. perde duvarın kütle merkezine uzaklığını belirten katsayı
β_1	Gerilme bloğu katsayısı
δ	Yer değiştirme
$\delta_{uç}$	Eleman ucunda yer değiştirme
Δ	Deplasman
Δ_d	(Hesap için) yanal deplasman
Δ_e	Elastik deplasman
Δ_{ep}	Elasto-plastik deplasman
ΔF_i	i. kata etkiyen yatay kuvvetteki artım
Δ_m	Elemanda limit durumdaki yanal deplasman, sistemin limit durumdaki yanal deplasmanı
Δ_p	Plastik deplasman
Δ_{top}	Bina en üst katının yanal deplasmanı
Δ_u	Limit durum yer değiştirmesi
ΔV_b	Bina taban kesme kuvvetindeki artım
Δ_y	Elemanda ilk akma başlangıcındaki yanal deplasman, sistemin akma başlangıcındaki yanal deplasmanı
Δ_{yi}	i. elemanın referans akma deplasmanı
Δ_{y1}	1. elemanın akma deplasmanı
Δ_{y2}	2. elemanın akma deplasmanı

Δ_i	1. elemanın deplasmanı
ϵ	Birim boy değişimi, şekil değiştirme
ϵ_c	Betonda birim boy değişimi
ϵ_{cu}	Betonda en büyük birim boy değişimi
ϵ_s	Çekme donatısındaki birim boy değişimi
ϵ'_s	Basınç donatısındaki birim boy değişimi
ϵ_u	Limit durumunda birim boy değişimi
ϵ_y	Akma birim boy değişimi
ϵ_{01}	Kuşatılmamış (sargısız) betonda maksimum gerilmeye karşılık şekil değiştirme
ϵ_1	Maksimum gerilmeye karşılık gelen birim boy değişimi
ϵ_{85}	Elemanda maksimum şekil değiştirmenin %85'i
η	Eşdeğer statik yatay kuvvetlerin dağılımını gösteren bir katsayı
θ	Eleman uçlarında dönme açısı
θ_p	Eleman uçlarında plastik dönme
θ_{pb}	Negatif moment plastik mafsalında plastik dönme
θ_{pc}	Kolon mafsalında izin verilen plastik dönme açısı
θ_u	Limit durumunda dönme miktarı
θ_{uc}	Limit durumunda toplam uç dönmesi
θ_y	Eleman uçlarında elastik dönme
μ	Süneklik, süneklik oranı
μ_Δ	Deplasman sünekliği, global süneklik, sistem sünekliği
$\mu_{\Delta i}$	i. elemanın deplasman sünekliği
μ_Δ^{pp}	Performans noktasında gerçekleşen deplasman sünekliği oranı (performans sünekliği)
$\mu_{\Delta j \max}$	j. elemanın maksimum deplasman sünekliği
μ_θ	Dönme süneklik oranı
μ_ϕ	Eğrilik sünekliği
μ_2	Düktil halkada süneklik oranı
ρ	Çekme donatısı oranı
ρ'	Basınç donatısı oranı
σ	Gerilme
σ_c	Beton basınç gerilmesi
σ'_s	Basınç donatısındaki gerilme
ϕ	Birim dönme açısı
ϕ_d	Hesap için dikkate alınan birim dönme açısı

Φ_{ij}	i. katta j. mod değeri
ϕ_u	Kırılma anındaki birim dönme açısı
ϕ_y	Akma anındaki birim dönme açısı
φ	Eğrilik
φ_d	(Hesap için) Eğrilik
φ_u	Limit durum eğriliği
φ_{uci}	i. kat kolonu alt ucunda limit eğrilik
φ'_{uci}	i. kat kolonu üst ucunda limit eğrilik
φ_y	Kesit akma eğriliği
φ_{yci}	i. kat kolonu alt ucunda akma eğriliği
φ'_{yci}	i. kat kolonu üst ucunda akma eğriliği
φ_{ycr}	r. kat kolonunda akma eğriliği
φ_{yi}	i. elemanın referans akma eğriliği
Ψ	Geometrik sistem parametresi

KISALTMA LİSTESİ

ABYYHY	Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
ACI	American Concrete Institute
ASCE	American Society of Civil Engineers
ATC	Applied Technology Council
CEB	Comite Euro-International du Beton
CM	Centre of Mass
EC	Eurocode
EERC	Earthquake Engineering Research Center
FEMA	Federal Emergency Management Agency
IDARC	Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings
NEHRP	National Earthquake Hazards Reduction Program
SEAOC	Structural Engineers' Association of California
TS	Türk Standartları
UBC	Uniform Building Code
WCEE	World Conference on Earthquake Engineering



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Kapasite eğrisinin modeller vasıtasıyla temsili ve deplasman sünegliği tanımı	4
Şekil 2.2 Sünelik çeşitleri	6
Şekil 2.3 Donatı oranına göre moment eğrilik değişimi	7
Şekil 2.4 Tipik iki farklı yapı için enerji tüketme güçleri	8
Şekil 2.5 Tipik özellikleri olan yük-deplasman eğrileri	9
Şekil 3.1 Beton için önerilen bazı gerilme-şekil değiştirme modelleri	13
Şekil 4.1 Eğilme etkisinde çift donatılı dikdörtgen kesitte akma ve kırılma hali	16
Şekil 5.1 Osilatörün depreme karşı mukabelesi	24
Şekil 5.2 Elastik ve elastoplastik yapıda yük deplasman ilişkisi	27
Şekil 5.3 Tasarım ivme spektrumu üzerinde yaklaşımlar	29
Şekil 5.4 Limit durumda yatay yüke maruz konsol	30
Şekil 5.5 Düşey ve yatay yüke maruz çerçeve	32
Şekil 5.6 Bir çerçeve kolonunda ilk akma anında eğrilik dağılımı	33
Şekil 5.7 i. kat kolonunda eğrilik dağılımı	33
Şekil 5.8 i. katta kolon mekanizması durumu	35
Şekil 5.9 Çerçeve ilk akma başladığı anda bir kata ait kolonda eğrilik dağılımı	36
Şekil 5.10 Kiriş mekanizması durumu	37
Şekil 5.11 Kiriş mekanizması durumunda bir kirişteki plastik deformasyonlar	38
Şekil 5.12 Simetrik çift eğrilikli eleman	44
Şekil 5.13 Global sünegliğin duvar oranına göre değişimi	49
Şekil 5.14 Düktil (sünek) zincirde mukavemet limitleri	50
Şekil 5.15 Eleman-sistem sünegliği ilişkisi için örnek portal çerçeve	52

Şekil 5.16	Perdeli bir çerçeve planı ve yük-deplasman eğrileri	57
Şekil 5.17	Kapasite eğrileri üzerinde ilk dikkate değer eleman akmasının tespiti	58
Şekil 5.18	Önerilen yöntemle sistem akma deplasmanı hesabında olarak işlem sırasının şematik olarak gösterilmesi	59
Şekil 6.1	Şematik olarak statik itme analizi	63
Şekil 7.1	5 katlı binaya ait X ve Y yönü çerçeveleri	67
Şekil 7.2	Çerçeve sistemin analizinde kullanılan beton ve çeliğe ait davranış modeli	68
Şekil 7.3	Perdeli çerçeve sistemin analizinde kullanılan beton ve çeliğe ait davranış modeli	71
Şekil 7.4	10 katlı binaya ait X yönündeki çerçeveler.....	71
Şekil 7.5	10 katlı binaya ait Y yönündeki çerçeveler.....	72



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 5.1 Farklı R değerleri için Bağıntı (5.1) ve (5.2)'deki μ_s tanımlarıyla sünekliğin değişimi	26
Çizelge 5.2 Taşıyıcı sistemi yalnız çerçeveden oluşan yapılar için CEB tarafından verilen K_k değerleri	26
Çizelge 5.3 Taşıyıcı sistemi perde ve perde-çerçeveden oluşan yapılar için CEB tarafından verilen K_k değerleri	26
Çizelge 5.4 İç kuvvetlerin karşılaştırılması	28
Çizelge 5.5 $\mu_\Delta=4$ için bağıntı (5.3)'den hesaplanan eğrilik sünekliği değerleri .	30
Çizelge 7.1 5 katlı binada X yönünde analizde önemli olaylar	75
Çizelge 7.2 5 katlı binada Y yönünde analizde önemli olaylar	76
Çizelge 7.3 10 katlı perdeli binada X yönünde analizde önemli olaylar	77
Çizelge 7.4 10 katlı perdeli binada Y yönünde analizde önemli olaylar	77
Çizelge 7.5 Farklı akma kriterleri için sistem süneklik hesabı (model üzerinden)	80
Çizelge 7.6 Farklı akma kriterleri için sistem süneklik hesabı (eğri üzerinden)	80
Çizelge 7.7 Süneklik oranlarının karşılaştırılması	81
Çizelge 7.8 İlk dikkate değer eleman akması olduğu anda plastik mafsallarda dağılımı	82
Çizelge 7.9 Akma başlangıcında çatlama ve akma oluşan eleman kesitleri yönünden karşılaştırma	85
Çizelge 7.10 Göçme sırasında katların yanal deplasman ve kat arası ötelenmeleri	87
Çizelge 7.11 Efektif rijitlik ve periyot değişiminin karşılaştırılması (ilk dikkate değer eleman akması yaklaşımı ile)	89
Çizelge 7.12 Performans noktalarına ait spektral değerler ve performans noktasında gerçekleşmekte olan süneklik oranları	91

ÖNSÖZ

Son yıllarda, hemen tüm önemli deprem yönetmeliklerinde, bina sistemlerinin sünek davranışı üzerine yönlendirmeler mevcuttur. Süneklik ve enerji kriterleri ile betonarme bina sistemlerinin yer hareketine cevabı daha açık bir şekilde ortaya konulmaktadır. Bu kapsamda sistem sünekliğine somut bir tanımlama getirilmesi, süneklik oranının çeşitli yönleriyle ortaya konulması ihtiyacı doğmuştur. Bu çalışma böyle bir ihtiyacın giderilmesine yardımcı olmak amacıyla yapılmıştır. Süneklik kavramı, önce bu konuda mevcut bilgi birikimi ışığında incelenmiş, sonra da, planda simetrik örnek bina çözümleri yapılarak bunların sistem süneklik oranları belirlenmiştir. Süneklik oranlarının hesaplanmasında sistem akma deplasmanlarının belirlenmesi için mevcut yöntemlerle yeni önerilen yöntem arasında kıyaslama yapılmıştır.

Bu çalışmanın başlangıcından itibaren, göstermiş oldukları sonsuz ilgi ve desteklerinden dolayı başta tez danışmanı Sayın Profesör Zekeriya Polat'a; bu çalışmanın başlangıç aşamasında danışmanlık ve diğer katkılarından dolayı Profesör H. İlhan Berktaş'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, halen görev yapmakta olduğum Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Alaplı Meslek Yüksek Okulu Teknik Programlar Bölüm Başkanlığı'na da çeşitli yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

ÖZET

Depreme dayanıklı betonarme binaların tasarımında sistem süneklik kapasitesi önemli bir parametredir. Deprem etkisi altındaki bir yapıdan beklenen elastik olmayan deformasyon düzeyi çoğunlukla davranış endeksi olarak çok kullanılan yük-deplasman eğrisinin mekanizma oluşmadan hemen önceki maksimum deplasmanın akma deplasmanına oranı olarak tanımlanan deplasman sünekliği oranıyla ifade edilir. Öncelikle, kesit sünekliğinden sistem sünekliğine kadar geçmişte yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Sonra, tipik iki örnek betonarme binanın tasarımı ve statik itme analizi yapılmıştır. Tasarımda, yürürlükteki Türk Deprem Yönetmeliğine uyulmuştur. Örnek binalar sırasıyla beş ve onar katlı olup planda her iki asal eksene göre simetriktir. Birinci bina taşıyıcı sistemi salt kolon ve kirişlerden oluşmaktadır. İkinci binanın taşıyıcı sistemi kolon, kiriş ve perdelerden meydana gelmiştir. Analizde betonarme yapılar için geliştirilmiş IDARC-2D bilgisayar programı kullanılmıştır. Sistem süneklik kapasitesi, eleman-sistem sünekliği ilişkileri ve sistem sünekliğinin yapısal davranışa etkisi araştırılmıştır. Program çıktıları kullanılarak, binaların asal eksenleri doğrultusunda “yatay kuvvet-deplasman” eğrileri çizilmiştir. Kapasite eğrileri de denilen bu eğriler yapının mukavemet ve deplasman kapasitesini göstermektedir. Bu eğriler üzerinde üç ayrı yöntemle sistem akma deplasmanı belirlenmiştir. Bu yöntemler, sistem akma deplasmanının geleneksel tanımı, “ilk dikkate değer eleman akması” denilen yeni bir yaklaşım ve perde duvarlı binalar için yeni tanımlanmış “akma deplasmanı kriteri”dir. Benzer şekilde sistemin maksimum kuvvete karşı gelen deplasmanı da (maximum response’s displacement) tanımlanmıştır. Bulunan sonuçlar, potansiyel plastik mafsallardaki eğrilik sünekliği kapasitesinin sistem süneklik kapasitesini yönlendirdiğini göstermektedir. Sistem sünekliği, bir kesit özelliği olan akma deplasmanına bağımlı olduğundan, yapı elemanlarının ve bir bütün olarak yapının deformasyon özelliklerinin gerçekçi tanımlanmasına ayrı bir önem verilmelidir. Elemanlarında sağlanacak süneklik oranlarına bağlı olarak yapının sistem sünekliği kapasitesi tahmin edilebilir. Spektral kapasite ve talepler karşılaştırılarak performans değerlendirmesi yapılabilir.

Anahtar Sözcükler: akma, betonarme çerçeve, deplasman, doğrusal olmayan çözümleme, eğrilik, göçme, itme analizi, kapasite eğrisi, plastik mafsal, süneklik

ABSTRACT

System ductility capacity is an important parameter for earthquake resistant design of reinforced concrete buildings. The level of inelastic deformation expected in a structure under the earthquake action is often characterized by a displacement ductility factor that is defined as the ratio of maximum response displacement to the yield displacement of the structure. At first, summary of some of the recent studies about sectional, member and system ductility are given. Then, pushover analyses have been carried out on two typical example reinforced concrete building structures. These example buildings have been designed following the current Turkish Earthquake Code (1997). The first five-story example building has a bearing system consisting of reinforced concrete beam and columns. The second ten-story building has a bearing system consisting of beam, column and shear walls. In order to conduct static pushover analysis the program IDARC-2D is used. System ductility capacity, element-system ductility relationships and effect of system ductility on structural behavior were assessed. By using of the output of the program lateral force-displacement curves were drawn in direction of each principal axes of buildings. These curves which are also called “capacity curves” show strength and displacement capacity of structures. System yield displacement was described on these curves with three different methods. These methods are traditional definition of system yield, a new approach which is termed “first significant member yield” and newly defined yield displacement criteria for buildings only with shear walls. Likely, system maximum response displacement was also defined. The obtained results point out the fact that curvature ductility capacities at potential plastic hinges govern system ductility capacity. Since the system ductility depends on yield displacement that is a sectional property, particular attention should be paid to realistic definition of deformability characteristics of the structural elements and the structure as a whole. Depending on displacement ductility capacity of elements the corresponding system ductility demand can be estimated. Then, comparing spectral demand and capacity spectrum of concrete buildings could make system performance evaluation.

Key Words: capacity curve, curvature, displacement, ductility, failure, frame, plastic hinge, pushover, nonlinear analysis, yield.

1- GİRİŞ

Dinamik analizler, betonarme yapıların orta veya şiddetli depremlere dayanmasının ancak elastik ötesi deformasyon yaparak enerji tüketmeleri ile mümkün olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, depreme dayanıklı yapıların plastik şekil değiştirmeler sırasında hesap mukavemetini önemli bir kayıp olmaksızın koruyabilmesi gerekir. Pek çok deprem yönetmeliği de şiddetli depremlerde yapının elastik sınırlar içinde kalamayacağı düşünülerek düzenlenmiştir. Bu konudaki temel felsefe şöyle özetlenebilir.

- Gerçekleşme olasılığı yüksek, hafif depremlerde; yapı elemanları taşıyıcı olsun ya da olmasın hasar görmemelidir.
- Gerçekleşme olasılığı düşük, orta şiddetli depremlerde yapı taşıyıcı sisteminde ağır hasar olmamalıdır, taşıyıcı olmayan elemanlar hasar görebilir.
- Gerçekleşme olasılığı çok düşük, şiddetli depremlerde yapı taşıyıcı sisteminde hasar olabilir. Yapının doğrusal elastik olmayan bir davranış göstereceği kabul edilir. Yapının toptan göçerek can kaybına sebebiyet vermemesi beklenir.

Bu ilkelere uygun olarak tasarlanıp inşa edilen yapılar yeterli mukavemet ve sünekliği haiz olmalı, yanal ötelenmeler de belirli bir sınırı aşmamalıdır [24].

Taşıyıcı sistemin veya tekil olarak taşıyıcı elemanların sünekliği, dinamik yükler etkisi altında önem kazanır. Şiddetli deprem etkilerinin elastik ve plastik şekil değiştirmelerle karşılanması öngörüldüğünden, yapının elastik sınır aşıldıktan sonraki davranışı önemlidir. Bu safhada, kesit zorlarında önemli artışlar olmadan şekil değiştirmesi arzu edilir. Böylece depremin dinamik etkisi ısı enerjisine dönüşerek yutulmakta ve sönümlenmektedir. Sünme bölgesinin uzun olması şekil değiştirmeleri ve sönümü artırır. Bu özelliğe sahip yapıların sünek olduğu kabul edilmektedir[16].

Depreme dayanıklı yapı tasarımında sünekliğin sağlanması zorunlu bir koşuldur. Çünkü yönetmeliklerde verilen yatay yük katsayıları yeterli sünekliğin sağlanacağı varsayımı ile belirlenmiştir [24]. Elastik ötesi evrede sünek davranışın gerçekleşebilmesi için sünek olmayan

deformasyonların engellenmesi şarttır. Örneğin, kesme dayanımı eğilme dayanımından yüksek olmalıdır. Aksi halde gevrek kırılma olur, ideal eğilme mukavemetine ulaşamaz. Benzer şekilde donatı ile beton arasında yeterli aderans sağlanmış olmalıdır. Sünek olmayan şekil değiştirmelerle arzu edilen sünek şekil değiştirmelerin başlangıçları arasında yeterli aralığın bulunması gereklidir. Kapasite tasarımının temeli budur[51].

Lineer ve lineer olmayan sistemler için yapısal davranışı betimleyen respons (tepki, cevap, davranış) parametreleri maksimum deplasman sünekliği, maksimum respons deplasmanı ve enerji indisleridir. Bunlardan maksimum deplasman sünekliği oranı yapıların elastik ötesi performanslarını değerlendirmek için son yıllarda yaygın olarak kabul görmüş bir yapısal davranış parametresidir. Bu oran 1'den küçük ise elastik davranış; 1'den büyükse doğrusal elastik olmayan davranış ifade eder. Diğer taraftan, deplasman süneklik faktörünün de kuvvetli deprem etkisine maruz yapılarda deformasyon kapasitesini bulmada yalnız başına kullanılamayacağı belirtilmektedir[3]. Çünkü yapının gerçek deformasyon kapasitesinin, histeretik davranışın neden olduğu yığışimli (kümülatif) hasar oluşumu nedeniyle azalmakta olduğu ifade edilmektedir. Yığışimli hasar ise; sistemin akma mukavemeti ve yük-şekil değiştirme özellikleri, yer hareketinin yoğunluk ve etki süresi gibi etkenlere bağlıdır[17]. Son yıllarda yapılan bazı araştırmalarla (Zahrah ve Hall 1983; Akiyama 1985; Uang ve Bertero 1988; Fajfar ve Fischinger 1990) depremden yapıya geçen enerji parametresi sünekliğe dayalı sismik tasarıma alternatif gösterilmektedir [4,29,62,67].

Bu çalışmanın 2-5. bölümlerinde, sargılı beton süneklik ilişkileri, eleman ve sistem düzeyinde süneklik konularında mevcut bilgi birikiminin özetlenmesi uygun görülmüştür. Altıncı bölümde, bu çalışmanın önemli bir kısmını oluşturan statik itme analizi hakkında açıklamalar yapılmıştır. Uygulama kısmında, sistem süneklik kapasitesinin yeterliği, eleman-sistem sünekliği ilişkileri örnek bina çözümlemeleriyle araştırılmıştır. Ayrıca, kapasite eğrisi üzerinde akma deplasmanının farklı yollardan tespiti yapılmaktadır.

Bina taşıyıcı sisteminde global süneklik talebinin mevcut süneklik kapasitesiyle, yerel taleplerin de yerel eğrilik kapasiteleriyle karşılanması gerekir. Ayrıca bina sisteminin sonsuz büyüklükte sünekliği değil kısıtlı ancak yeterli sünekliği olması gerektiği düşünülmektedir. Bu bağlamda, uygun göçme kabulleri yapılarak lokal ve global talep-kapasite değerleri belirlenmesi amaçlanmaktadır. Böylece yönetmeliklerde verilen taşıyıcı

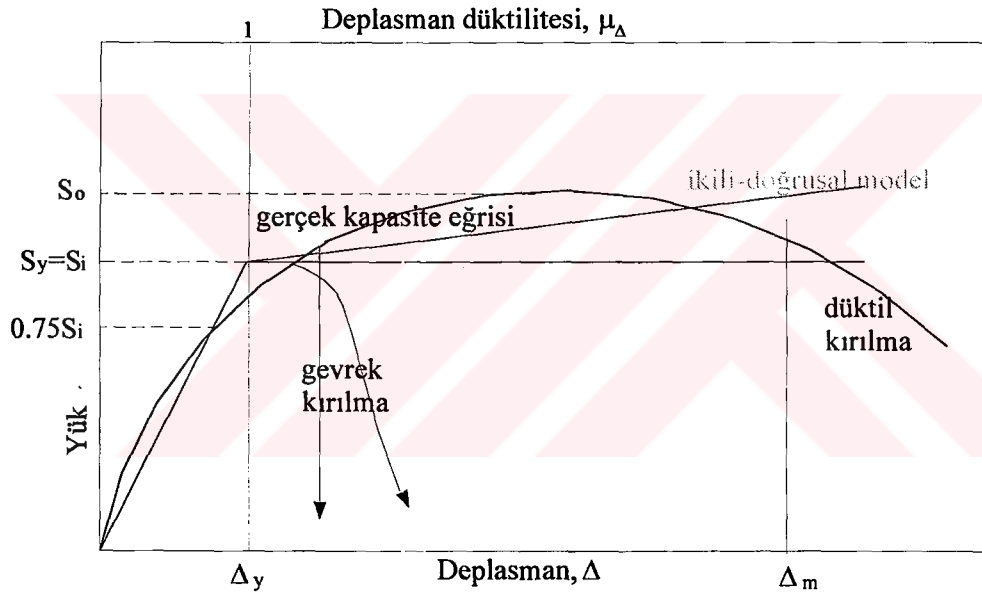
sistem davranış katsayılarının lineer olmayan davranışı dikkate almada yeterliliğinin ortaya çıkacağı düşünülmektedir.

Yeterli eğrilik sünekliğine sahip olarak tasarlanan potansiyel plastik mafsallar sistem davranışını yönlendirmektedir. Öyleyse, bir çerçeve sisteme, yeterli deplasman sünekliği kapasitesine sahip olmak koşuluyla, bir göçme şekli empoze edilebilir. Kısıtlı, ancak yeterli sistem sünekliğini haiz çerçeve sistemlerin beklenen göçme şekline uygun davranacağı düşünülmektedir.

Öte yandan, betonarme binalarda sistemin yatay yük-deplasman eğrisinin elastik bölgeden plastik bölgeye geçişi doğrusal olmadığından akma noktaları ilk bakışta açıkça görülmemektedir. Bu nedenle, sistem akma deplasmanının belirlenmesinde belirsizlik vardır. Sistem akma deplasmanının hassas bir şekilde belirlenmesi süneklik oranının doğruluğunu belirleyen bir etkidir. Halen en çok kullanılan klasik yöntem ile sistem akma deplasmanının gerçek değerinden düşük hesaplandığı belirtilmektedir[48]. Bu çalışmada, sistem akma deplasmanının hesabı için kullanılan mevcut yöntemlere ilaveten yeni bir akma kriteri önerilmektedir. Öneriyi irdelemek için, statik itme analizi (pushover analizi) ile seçilen iki betonarme binanın Türk Deprem Yönetmeliğine (ABYYHY)[1] uygun olarak tasarımı yapıldıktan sonra, her iki binanın asal eksenleri doğrultusunda kuvvet kontrollü statik itme analizi yapılmıştır. Analizde betonarme yapılar için geliştirilmiş dinamik ve statik itme analizi yapabilen IDARC-2D[33] bilgisayar programı kullanılmıştır. Programa veri olarak binaların tasarım parametreleri verilmiştir. Böylece sanal ortamda, bir binanın tasarım değerlerinin geriye dönük analiz yoluyla uygunluğu araştırılmaktadır. Analizden elde edilen sonuçlar incelenerek bina sisteminin gerçekleşeceği düşünülen davranışa ne ölçüde uyduğu da araştırılacaktır.

2. SÜNEKLİK TANIM VE ÇEŞİTLERİ

Genel olarak süneklik; yapı dayanımında önemli bir azalma ile kararsız denge olmaksızın deprem sırasında açığa çıkan enerjinin büyük bir kısmını, elasto-plastik davranışla ve tersinir, dönüşümlü büyük şekil değiştirmelerle yutma yeteneği olarak tanımlanmaktadır[31]. Deprem mühendisliğinde ise süneklik, elemanın tekrarlanan tersinir yükler altında elastik olmayan deformasyonlarla enerji tüketme yeteneği olarak tanımlanmaktadır[24].



Şekil 2.1. Kapasite eğrisinin modellerle temsili ve deplasman sünekliği tanımı[46]

Betonarme bir yapı sisteminde süneklik, sistemi limit duruma getiren yanal yükün akma başladığı andaki yanal yüke oranı olarak ifade edilmektedir[37]. Sistem sünekliği ise deplasman sünekliğiyle tanımlanır. Bir yapının bütünü için deplasman sünekliği; yapının belli bir noktasındaki en büyük yatay yer değiştirmesinin akma başlangıcındaki yer değiştirmesine oranıdır. Bu orana “sistem sünekliği” denir. Şekil 2.1’de yük-deplasman kapasite eğrisinin model vasıtasıyla temsili ve buna bağlı olarak deplasman sünekliği tanımı verilmiştir[46].

Burada deplasman sünekliği $\mu_{\Delta} = \Delta_m / \Delta_y$ olup Δ_m limit durumdaki maksimum yanal öteleme; Δ_y ise ilk akmanın başladığı andaki maksimum yanal ötelemedir. Tekrarlı yüklemeler altında Δ_y ilk akmanın başladığı yük tekrarında oluşan maksimum yer değiştirir. Betonarme yapılarda kapasite eğrisinin elastik bölgeden plastik bölgeye geçişi lineer olmadığı için sistemin akma başlangıcını tanımlamak güçtür. Bu güçlüğü yenmek için bazı kabuller yapmak gerekir. Kapasite eğrisi elasto-plastik bir modelle temsil edilerek basitleştirilebilir.

Yapı elemanları için süneklik oranı, maksimum eğriliğin (birim dönme açısı, d^2y/dx^2) ilk akma anındaki eğriliğe oranıdır. Bir kata ait taban ve tavan döşemeleri arasındaki limit durum yanal ötelemesinin ilk akma başlangıcındaki yanal ötelemesine oranına kat deplasman sünekliği denir[14]. İdeal bir çerçevede, her katta ve sistemin genelinde gerçekleşen süneklik oranı ile tasarımda öngörülen süneklik oranı birbiri ile çakışmalıdır. Kat süneklik oranları tek başına yapı performansını belirlemek için yeterli bir gösterge değildir. Aynı zamanda, plastik mafsallarda oluşacak elastik olmayan dönmelerinin o mafsaldaki dönme kapasitesini aşp aşmadığına da bakılmalıdır. Buradan; yapıların kritik kesitlerinde eğrilik sünekliğinin de yeteri kadar sağlanmış olması gerektiği anlaşılmaktadır.

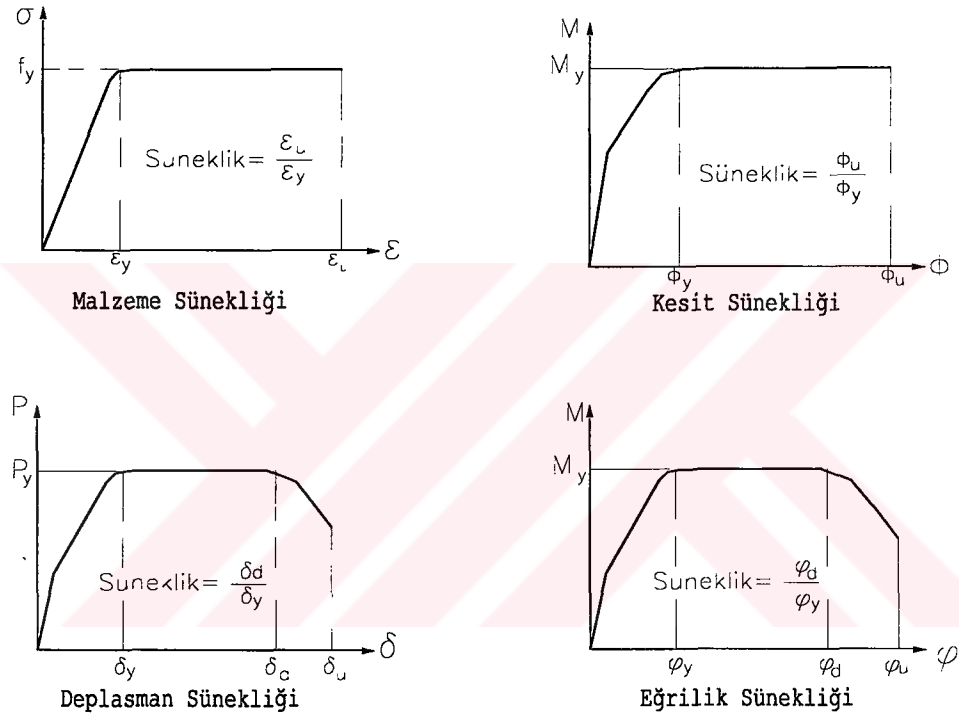
Süneklik sözcüğü genellikle aşağıdaki süneklik çeşitlerinden biri ile birlikte kullanılır [25].

Bunlar:

- a) Malzeme Sünekliği (Şekil 2.2.a)
- b) Kesit Sünekliği (Şekil 2.2.b)
- c) Deplasman Sünekliği (Şekil 2.2.c)
- d) Eğrilik Sünekliği (Şekil 2.2.d)

Bu dört farklı süneklik türü Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Yapılarda bu süneklik çeşitlerine olan ihtiyaç daima aynı düzeyde değildir. Örneğin, bir yapının deplasman sünekliği ihtiyacı ile plastik mafsallardaki eğrilik sünekliği ihtiyacı farklıdır. Ancak, bir yapı sisteminde bu dört çeşit süneklik yeterince sağlanmış olmalıdır.

Yapıların olası en büyük depremi hasarsız atlatacak şekilde projelendirilerek inşa edilmesi ekonomik değildir. Yönetmeliklerin amacı, ekonomik ömrü boyunca gerçekleşme olasılığı bir kereden fazla olan depremlerde, yapının elastoplastik davranış göstermesini sağlamaktır. Bunun için, yapı elemanlarının elastik ötesi deformasyonlar yoluyla enerji tüketecek kadar sünek olması gerekir[44].



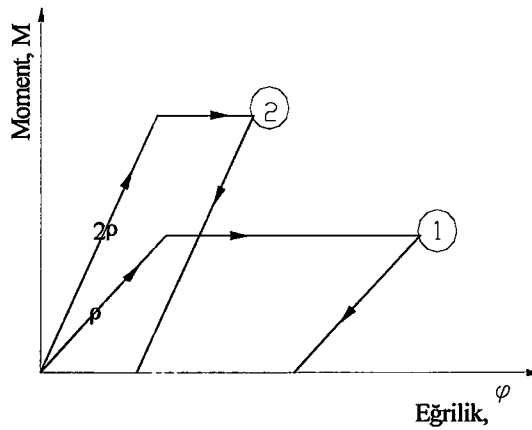
Şekil 2.2. Süneklik çeşitleri [25]

Günümüzde, bir yapının sismik analizini yapmak için davranış spektrumuna dayalı modal analiz en pratik yaklaşım olarak genel kabul görmektedir. Belirli bir süneklik seviyesinde; doğrusal davranış analizi ile bulunan yapısal responslar, yapının sergileyeceği tahmin edilen süneklik düzeyine bağlı olarak belirlenen düzeltme katsayıları uygulanarak doğrusal olmayan muhtemel davranışa dönüştürülür[6]. Doğrusal olmayan davranış çözümlerinin güvenilirliği yukarıda sözü geçen düzeltme (yapı davranış, R) katsayılarının doğru yaklaşımlarla belirlenmesine bağlıdır.

Sünekliğin gereği olan plastikleşme bölgelerinin meydana gelebilmesi için sistemin yüksek mertebeden hiperstatik (çok bağlı) olması gerekir. Statikçe belirli (izostatik) sistemlerde sünek şekil değiştirmeye izin verilmez. Çünkü; bu takdirde sistem birden bire mekanizma durumuna geçer. Deprem yüküne maruz kalmadan önce hiperstatiklik mertebesi yüksek olan bir yapıda; plastik mafsall oluşumu ile birlikte hiperstatiklik mertebesi düşer. Bu nedenle göçme olmaması için oluşacak mafsall sayısı ve dağılımı buna bağlı olarak da yapı sünekliği sınırlandırılmalıdır.

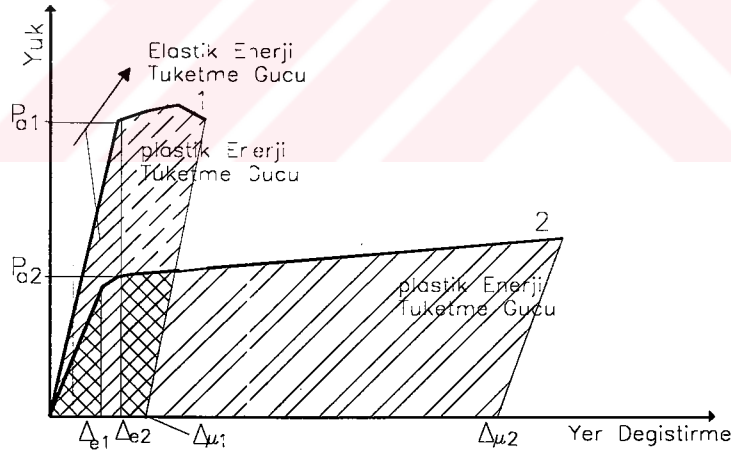
Depremselliği yüksek bölgelerde, yapı elemanlarının enerji tüketebilme yeteneği en az mukavemeti kadar önemlidir. Bir “yük–yer değiştirme” eğrisinin altındaki alanın büyüklüğü de enerji tüketme gücünü gösterir[9]. Deprem etkisi altındaki betonarme bir kesitte, özellikle de çerçeve elemanları için, enerji yutmanın ölçüsü moment-dönme eğrisinin altındaki alandır. Çünkü, sistemin yaptığı işin en büyük göstergesi, yapının düğümlerinin deplasmanlarıdır.

Herhangi bir kesitte donatı oranı artırılarak moment taşıma gücü artırılabilir. Ancak eğrilik aynı oranda artmaz. Şekil 2.3’ deki $M-\phi$ diyagramında bu durum görülmektedir. 1. eğri ρ donatı oranı için, 2. eğri 2ρ donatı oranı için çizilmiş olup, her iki durumda kesit denge-altı donatılı durumdadır. Diğer parametreler sabit tutulur donatı oranı iki katına çıkarılırsa moment taşıma gücü iki kattan daha az artmakta, fakat eğrilik yaklaşık iki kat azalmaktadır.



Şekil 2.3. Donatı oranına göre moment-eğrilik değişimi [10]

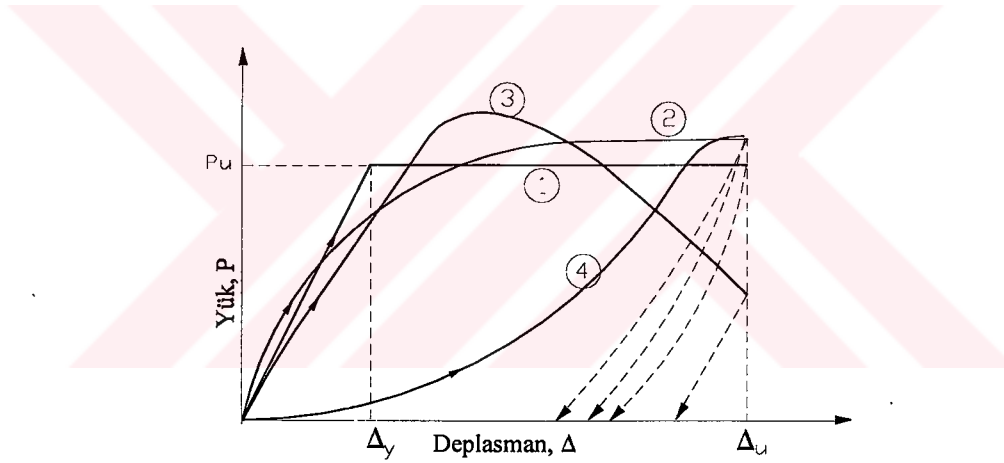
Bir yapı elemanının yeterli sünekliği haiz olması; her zaman yeterli enerji yutma kapasitesi olduğu anlamına gelmez. Şekil 2.4'de iki farklı eğri ile yük-yer değiştirme ifadesi verilmiştir. 1 numaralı eğri büyük bir yük altında elastik bölgede kalabilen bir yapıyı temsil etmektedir. Bu şekildeki yapılar büyük yükleri çatlamadan taşıyabilmektedir. Elastik enerji depolama gücü, bağıl olarak yüksek ancak, plastik enerji tüketme gücü nispeten düşüktür. 2 numaralı eğri plastik enerji yutma gücü yüksek bir yapıyı temsil etmektedir. Enerji tüketimi kalıcı ve büyük şekil değiştirmelerle birlikte olmakta; yapıda hasar bırakmaktadır. Depolanan ve tüketilen toplam enerjinin daha yüksek olması yanında kalıcı şekil değiştirmeler de büyüktür. Şekil 2.4'den de görüldüğü gibi, depolanan toplam enerji aynı bile olsa; enerji tüketiminin önemli bir kısmının elastik ya da plastik bölgede oluşuna göre süneklik oranı değişir. Yapıların daima elastik kalmasını istemek, başka bir deyişle, kalıcı şekil değiştirme olmamasını talep etmek, ekonomik olmayan kesitler kullanılmasına neden olur.



Şekil 2.4. Tipik iki farklı yapı için enerji tüketme güçleri [32]

Aynı süneklik oranını haiz sistemlerin enerji tüketim kapasiteleri de daima eşit değildir. Bu bağlamda, sünekliğin enerji yutma kapasitesinin bir ölçüsü olduğu söylenemez. Ancak ideal elasto-plastik davranışa sahip veya yük-deplasman eğrisi buna çok yakın olan

sistemlerde, süneklik ile enerji tüketimi arasında bir paralellik kurulabilir. Bu ilişki şematik olarak Şekil 2.5.de görülmektedir[63]. 1 numaralı eğri ideal elasto-plastik davranışa aittir. Buna göre süneklik enerji yutma kapasitesinin bir ölçüsü olabilir. 2 numaralı eğri ise betonarme bir elemanın gerçek davranışına daha uygundur; bu eğrinin sünekliği de enerji yutma kapasitesinin bir ölçüsü olabilir. 3 numaralı eğride, taşıma gücünde büyük bir düşüş olmaktadır ve kabul edilebilir bir davranış biçimi değildir; enerji yutma kapasitesi diğerlerinden daha düşük ve fakat aynı sünekliği haizdir. 4 numaralı eğride ise, daha yük düşük seviyelerde iken rijitlik kaybı büyüktür. Fakat yine de süneklik düzeyi diğerleri ile aynıdır. Oysa, eğri altındaki alan diğerlerinden oldukça azdır. Görülüyor ki, süneklik ile enerji tüketim kapasitesi arasında ilişki kurarken kapasite eğrisinin biçimine çok dikkat etmek gerekmektedir.



Şekil 2.5 Tipik özellikleri olan yük-deplasman eğrileri[63]

3. SARGILI BETON DAVRANIŞI İLE SÜNEKLİK İLİŞKİSİ

3.1. Süneklik Kuşatma İlişkileri

Betonarme elemanların (kiriş ve kolonların) sünekliği ile bu elemanlardaki beton basınç bölgesinin şekil değiştirmelerinin engellenmesi arasında oldukça anlamlı ilişkiler bulunmaktadır. Bu nedenle betonarme bir yapıda süneklik açıklanırken konuya kuşatılmış ve kuşatılmamış betonda ulaşılabilen limit şekil değiştirmelerin öncelikle bahis konusu edilmesi anlamlı olmaktadır. Bu nedenle; bu bölümde kuşatılmış kesitlerde süneklik açıklandıktan sonra, betonarme kolon ve kirişlerde süneklik ilişkilerinin açıklanması uygun görülmüştür.

3.2. Pasif Kuşatma

Yapılan birçok deneysel araştırma, üç eksenli basınca maruz betonda mukavemet ve sünekliğin önemli ölçüde arttığını ve betonarme yapı elemanlarında da bu artışın yanıl deplasmanı engelleyen donatı ile sağlanabileceğini göstermiştir.

Betonarme kolonlarda, betondaki basınç gerilmelerinin düşük olduğu evrede yanıl donatı hemen hiç gerilme almadığından kuşattığı çekirdek betonun davranışını etkilemez. Gerilmeler artarak betonun tek eksenli basınç mukavemetine yaklaştıkça, meydana gelen mikro çatlaklar betonun hacmini artırır ve beton yanıl donatıya yaslanır. Bu aşamada, yanıl donatı betonun genişlemesine karşı koyar. Bu olguya “pasif kuşatma” (passive confining) denir[31].

Betonda pasif kuşatmayla sağlanan mukavemet ve süneklik artışı, genellikle; sargı donatısının biçimine, konumuna, miktarına, akma mukavemetine ve gerilme-şekil değiştirme davranışına bağlı olarak değişir. Spiral ya da dairesel halka donatılarla oluşturulan kuşatma, dikdörtgen halkalarla oluşturulandan daha etkindir. Çünkü, dairesel yanıl donatılar biçimlerinden dolayı yalnızca çekme kuvveti alırlar. Oysa dikdörtgen halkalarla oluşturulan kuşatmada; halka kolları çekirdek betonun uyguladığı basınç nedeniyle dışa doğru genişlemeye çalışırken eksenel çekme

ve eğilme etkisinde kalarak önce dairesel biçim almaya çalışırlar; dolayısıyla daha az etkindirler.

Betonarme kolonlarda enine donatılar basınç altındaki betonu sararak boyuna donatıların erken burkulmasını önlemekte ve kayma donatısı olarak görev yapmaktadırlar. Büyük deprem yükleri altında yanal donatı miktarı kolonun sünek davranışını sağlayacak kadar çok olmalıdır. Depreme dayanıklı çerçeve sistem tasarımında “kuvvetli kolon-zayıf kiriş” yaklaşımı kullanılarak deprem sırasında mafsallaşmanın kolonlarda olması önlenebilir [65]. Potansiyel plastik mafsal bölgelerinin yeterli sünekliği haiz olması için dikkatli donatılması gerekir. Öte yandan, moment yeniden dağılımının (moment redistribution) olabilmesi için de betonarme çerçeve elemanlarının yeterli sünekliği göstermesi gereklidir. Boyuna donatıların burkulmasını ve kesme kırılmasını önlemek için spiral sargı, halka veya çeşitli formlarda etriyelerle plastik mafsal bölgelerinin sarılmasıyla sünek davranış sağlanması önemli bir tasarım kriteridir. Bu arada, donatı bağlarının tam olması gerekir.

Uygun yanal donatı ile kuşatılmış betonarme elemanlarda yapılan deneyler, kuşatılmış betonun mukavemet ve sünekliğinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Sargılı betonun gerilme - şekil değiştirme eğrisinin azalan ikinci bölümünün eğimi betonarme kolonların mukavemet ve sünekliği üzerinde çok etkilidir. Bir kolonun yüksek oranda dönme kapasitesiyle birlikte eğilme mukavemetini kaybetmemesi için çekirdek betonun çok iyi sarılması gerekir. Genel olarak kolonda eksenel yük arttıkça sünek davranışı sağlamak için gerekli sargı donatısı miktarı da artar. Çünkü büyük eksenel yük büyük tarafsız eksen derinliği demektir; yani kolon eğilme kapasitesi betondaki basınç gerilmesi dağılımına çok bağlıdır.

Kolonlarda enine donatı düzenlemesi ile süneklik ilişkisinin araştırılması için gerçekçi moment-eğrilik analizinin yapılması gerekir. Mander ve diğerleri (1984)[42], Scott (1982)[59], Sheikh ve Üzümeri (1980)[60] ve Vallenas ve diğerleri (1977)[64] gibi pek çok araştırmacı çok sayıda bire bir ölçekli numunelerle yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda, kuşatma etkisinin aşağıdaki faktörlerle geliştirildiğini göstermişlerdir [41]:

- Enine donatılar sık yerleştirilmeli;
- Etriyeler, ilave çirozlar ile desteklenmeli;
- Kesit üzerinde kolon boyuna donatıları uygun dağıtılmış olmalı;

- Enine donatı hacminin çekirdek beton hacmine oranı, ya da enine donatı akma mukavemeti yüksek olmalı;
- Spiral sargı veya dairesel halka şeklindeki yanal donatılar dikdörtgen veya çiroz etriyelere tercih edilmeli.

Dikdörtgen etriyelerle kuşatılmış beton için Kent ve Park gerilme-birim boy değişimi modeli (1971)[36] de Roy ve Sözen (1964)[55] tarafından yapılmış deneylere ve o zaman mevcut olan diğer deney sonuçlarına dayanmaktadır. Scott ve diğerleri (1982)[59], Park ve diğerleri (1982)[45] yaklaşık birebir ölçekli deney elemanlarıyla yapmış oldukları deneylerle 1971'de Kent ve Park tarafından verilen gerilme - birim boy değişimi denklemini, betondaki kuşatmadan ötürü oluşan mukavemet ve süneklik artışı ve yükleme hızı etkisini de dikkate alarak geliştirmişlerdir. Spiral sargılarla kuşatılmış beton için gerilme - birim boy değişimi denklemi de Park ve Leslie (1977)[43], Desayi ve diğerleri (1978)[20], Ahmad ve Shah (1982,1985)[2] ve Dilger ve diğerleri (1984)[22] tarafından geliştirilerek önerilmiştir [41].

Bu gerilme-birim boy değişimi (σ - ϵ) denklemleriyle hesaplanan sarılmış betonarme kesitlerin eğilme mukavemeti ve sünekliği birbirinden farklılıklar göstermektedir. Esas itibariyle bu denklemler, dikdörtgen etriyelerle kuşatılmış ve spiral sargı ya da dairesel halkalarla kuşatılmış betonlar için olmak üzere, ikiye ayrılmaktadır.

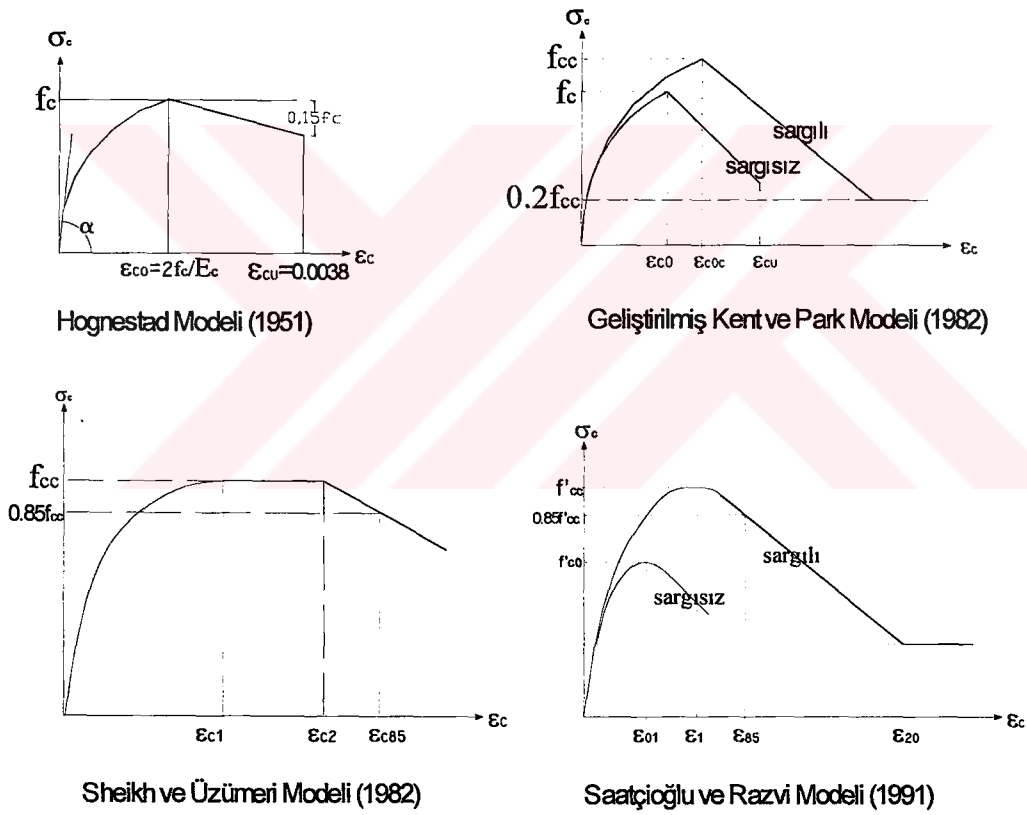
Sonuç olarak; tek eksenli basınç altında donatısız beton oldukça gevrek bir davranış sergiler. Kuşatma ile betonun şekil değiştirme kapasitesi gelişmektedir. Kuşatılmış beton maksimum yük altında büyük şekil değiştirme yapabilmektedir. Maksimum gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirme sağlanan kuşatmanın verimliliğine bağlıdır.

Betonun maksimum gerilmeden sonraki şekil değiştirme kabiliyeti boyuna donatı davranışından önemli ölçüde etkilenmektedir. Örtü beton dökülünceye kadar boyuna donatıları burkulmaya karşı korur. Ancak, maksimum gerilmeye ulaşıldığında örtü beton döküldüğünden boyuna donatılar da burkulmaya müsait bir hal alır. Bu yük altında, yanal donatı tarafından sağlanacak mesnetlenme önem kazanmaktadır. Eğer yeterince yanal donatı varsa boyuna donatıların düzgün duruşu sağlanmış olur. Bu yüzden, yanal donatı miktarı gerilme-şekil değiştirme eğrisinin azalan ikinci bölümünün eğimi üzerinde etkindir.

3.3. Kuşatılmış (Sargılı) Beton Davranış Modelleri

Malzeme davranış modellerinin gerçek davranışa uygunluğu, çözülen problemlerin ne kadar gerçekçi olduğunun bir göstergesidir. Betonun gerilme-birim boy değişimi eğrisi pek çok değişkene bağlıdır. Bu yüzden, tek bir gerilme-birim boy değişimi eğrisi tanımlanamaz.

Günümüze kadar yapılan çeşitli araştırmalar sonucunda, beton için pek çok $\sigma - \epsilon$ modeli geliştirilmiştir; bunlardan bazıları Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Beton için önerilen bazı gerilme-şekil değiştirme modelleri

Dikdörtgen etriyelerle kuşatılan ve monotonik yüklenen betondaki mukavemet artışını dikkate alan modellerden bazıları Hognestad, Kent ve Park, Soliman ve Yu, Sheikh ve

Üzümeri modelleridir. Bunlardan, Kent ve Park modeli tasarımda kullanılmaya en elverişlisi olarak görülmektedir.

Saatcioğlu ve Razvi (1992)[56] tarafından kuşatılmış beton için Şekil 3.1’de görülen model önerilmektedir. Bu model iki kısımdan ibarettir. Birinci kısım bir parabol olup yükselen kısım; ikinci kısım azalan bir doğrudur. %20 mukavemet seviyesinde ise “artık” bir mukavemet kabul edilir. Verilen analitik ilişki pek çok deneysel veri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu deneysel ve analitik sonuçlar arasında iyi bir ilişki olduğu görülmüştür.

Kuşatılmış betonun gerilme-şekil değiştirme davranışını ortaya koymak için yapılan deneysel çalışmalardan biri de Mander, Priestley ve Park tarafından 1984’ten bu yana yapılan çalışmalardır. Bu çalışma, 1/3 ve 1/1 ölçekli dairesel, dikdörtgen ve kare en-kesitli, farklı donatı yerleşimine sahip monotonik ve devresel olarak uygulanmış statik ve dinamik eksenel basınç etkisinde kuşatılmış kolonlarla yapılmıştır. Uygulanan eksenel basınç birim boy değişimi oranı “0.0167/s”ye kadar yükseltilebilmiştir. Burada “s” sargı donatısı aralığını ifade etmektedir. Kuşatılmış betonun gerilme-şekil değiştirme davranışı mevcut analitik model ile hesaplanmış ve elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Varılan sonuçlar şöyle özetlenmiştir [40]:

1. Dikdörtgen ve dairesel kolonlar için gerilme-şekil değiştirme eğrisini etkileyen en önemli parametre kuşatma donatısı miktarıdır. Kuşatma donatısı hacimsel oranı arttıkça mukavemet artmakta ve eğrinin azalan ikinci bölümünün eğimi düşmektedir. Bu durum analitik model ile çok iyi uyushmaktadır.
2. Yanal donatının konfigürasyonunun etkisi, “kuşatma etki katsayısı”, K_e ile belirlenebilir. K_e dikdörtgen perde duvar kesitleri için 0.40-0.70; dairesel kolonlar için 0.89-1.00 arasında değişmektedir.
3. Analitik olarak da belirlendiği gibi, spiral donatı ile kuşatılmış dairesel kolonların performansı, dikdörtgen veya kare kesitli kolonlara kıyasla daha iyidir. Bu olgu, kuşatma donatısı hacimsel oranı belli kesitler için hem mukavemet artışı yönünden hem de betonun maksimum birim kısalması yönünden oldukça belirgindir.

4. Önerilen analitik model ile çeşitli kuşatma donatısı oranlarında dairesel, kare veya dikdörtgen kolonların davranışı gerçeğe oldukça yakın tahmin edilebilmektedir. Enerji dengesi yaklaşımı ile kuşatılmış betonda süneklik artışı da açıklanabilir.

Yukarıda verilen deneysel çalışma sonuçlarının bir benzeri Sheikh ve Üzümeri (1980) [60] tarafından da rapor edilmiştir. Dikdörtgen etriyeli kolonlarda yapılan deneysel çalışma ve kuşatılmış betonun gerilme-şekil değiştirme davranışını tahmin etmek için geliştirilen analitik bir model verilmiştir. Her iki çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada araştırılan değişkenler etriye yerleşim şekli ve etriye aralığıdır. Ulaşılan sonuçlar kısaca şöyle özetlenebilir[63]:

1. Dikdörtgen kuşatma donatıları elemanın mukavemetini ve sünekliğini artırmaktadır; deneysel çalışmada %70 oranında mukavemet artışı rapor edilmektedir.
2. Kesit üzerine iyi dağıtılmış boyuna donatılar ve bunu saran yanal donatılar çekirdek betonun mukavemet ve sünekliğini arttırmaktadır.
3. Yanal donatıda aynı hacimsel donatı oranını korumak koşuluyla, etriye aralıkları düşürüldükçe betonda mukavemet ve süneklik artar.

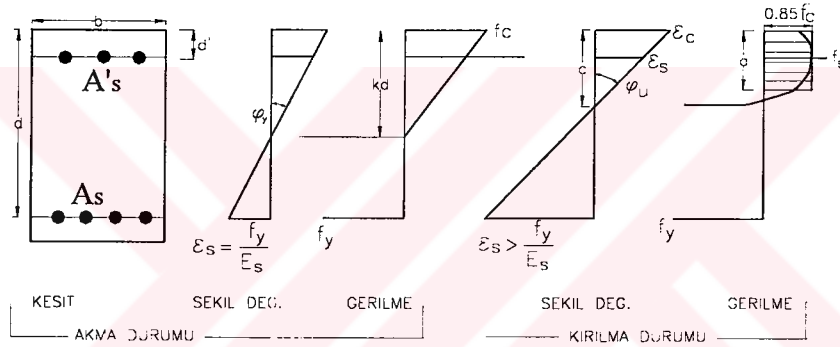
Ayrıca kuşatma etkisi ile betondaki mukavemet artışını belirlemek için, kuşatılmış betonun mukavemetinin kuşatılmamış betonun mukavemetine oranı olarak ifade edilen K_s katsayısı, analitik olarak da tanımlanmıştır.

Çeşitli yanal donatı oranlarına sahip kolonların sünekliği üzerine yapılan deneysel çalışmalardan biri de Weng Yi-Jun ve Ma Bao-Min (1984) [66] tarafından yapılmıştır. 14 adet çeşitli çift etriyeli kolon tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuştur. Kolon sünekliğini hesaplamak için ampirik bir formül önerilmiştir. Sonuç olarak dikdörtgen kesitlerde çift etriyelerin kolon sünekliğini daha çok artırdığı; önerilen ampirik formül ile yapılan süneklik hesabından elde edilen sonuçlar ile deneylerden elde edilen sonuçların uyum gösterdiği belirtilmektedir.

4. BETONARME ÇERÇEVE ELEMANLARINDA SÜNEKLİK

4.1. Kiriş Kesitlerinde Süneklilik

Limit tasarımıda, bir elemanın sünekliliği, elemanın yaptığı en büyük deformasyonun akmanın ilk başladığı andaki deformasyona oranı olarak tanımlanır. Şekil 4.1’de çift donatılı dikdörtgen bir kesitin çekme donatısının akma başlangıcı ve betonun maksimum birim kısalmaya ulaştığı andaki durumu görülmektedir.



Şekil 4.1. Eğilme etkisinde çift donatılı dikdörtgen kesitte akma ve kırılma hali [49]

Beton için gerilme-birim boy değışimi eğrisi beton basınç mukavemetinin yaklaşık %70'ine ulaşana kadar doğrusal olup tarafsız eksen derinliği elastik teori formülleriyle hesaplanabilir. Tarafsız eksenin derinliği bir kere bulunduktan sonra betonda ve donatıdaki kuvvetler hesaplanabilir. Buna göre akma eğriliği ve akma momenti bağıntıları şu şekilde yazılabilir.

$$\phi = \frac{\epsilon}{kd} = \frac{\epsilon_s}{d(1-k)} = \frac{\epsilon_s + \epsilon_c}{d} \quad (4.1. a)$$

Burada

$$k = \left[(\rho + \rho')^2 * n^2 + 2(\rho + \rho' * d' / d) * n \right]^{1/2} - (\rho + \rho') * n \quad (4.1. b)$$

$$M_y = A_s f_y k_z d \quad (4.2)$$

$$\phi_y = \frac{f_y / E_s}{d(1-k)} \quad (4.3)$$

Betonarme problemlerinin çözümünde malzeme davranışının gerçekçi modellenmesi, problemlerin doğru çözülmesi için zorunlu görülmektedir. Beton için basınç dayanımı önemli olduğundan basınç altındaki betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi önemlidir. Fakat beton için tek ve kesin bir $\sigma_c - \epsilon_c$ eğrisi tanımlanamaz. Betonun yaşı, yükleme hızı, kuşatma durumu gibi etkenlere bağlı olarak değişik eğriler elde etmek mümkündür. Şu halde, malzeme özellikleri biliniyorsa betonarme kesitlerin davranışı iyi bir şekilde tahmin edilebilir. Deneysel ve analitik çalışmalar sonucu beton ve çeliğe ait analitik modeller geliştirilmiştir. Bunlardan en çok Kent ve Park (1971)[40] modeli kullanılmaktadır.

Çift donatılı bir kesitin son limit eğriliği basınç donatısının akması halinde aşağıdaki bağıntılar yardımı ile bulunabilir.

$$a = \frac{A_s f_y - A'_s f_y}{0.85 f'_c b} \quad (4.4)$$

$$M_u = 0.85 f'_c a b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d') \quad (4.5)$$

$$\phi_u = \frac{\epsilon_c}{c} = \frac{\epsilon_c \beta_1}{a} \quad (4.6)$$

Basınç donatısının akıp akmadığının kontrolü yapılmalıdır; aşağıdaki şart gerçekleşiyorsa basınç donatısı akmış demektir.

$$\varepsilon_c \left[1 - k_1 d' ((0.85 f'_c b) / (A_s f_y - A'_s f_y)) \right] \geq \frac{f_y}{E_s} \quad (4.7)$$

Basınç donatısının akmaması halinde, bu donatılardaki basınç gerilmesi akma gerilmesi yerine konarak eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğunun derinliği bulunduğundan sonra kesitin limit momenti Denklem 4.8 ile bulunur.

$$M_u = 0.85 f'_c a b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s E_s \varepsilon_c \frac{a - k_1 d'}{a} (d - d') \quad (4.8)$$

Limit moment hesabında betonun maksimum birim kısalmasının 0.004 alınması uygundur [7]. Bununla beraber, tasarımda $\varepsilon_{cu}=0.003$ veya $\varepsilon_{cu}=0.0035$ alınabilir.

Akmadan sonraki eğilme momenti artış oranı M_u / M_y oranı ile belirlenir. Bu oran basit donatılı kesitler için nispeten düşük; çift donatılı kesitlerde daha yüksektir. Bir kesitin eğrilik sünekliği φ_u / φ_y ifadesi ile verilmektedir. Denklem (4.9) çift donatılı kesitler için genel bir süneklik ifadesidir. Denklem (4.7)'de verilen şart gerçekleşiyorsa basınç donatısı akmaktadır ve eğrilik sünekliği Denklem (4.10)'da verilmiştir. Basınç donatısının akmaması halinde eğrilik sünekliği Denklem (4.11)'de verilen ifade ile hesaplanır.

$$\frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \frac{\varepsilon_c}{f_y / E_s} \frac{d(1 - k)}{a / \beta_1} \quad (4.9)$$

$$\frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \frac{0.85 k_1 E_s \varepsilon_c f'_c}{f_y^2 (\rho - \rho')} \left[1 + ((\rho + \rho') n - ((\rho + \rho')^2 + 2(\rho + \rho' d' / d) n)^{1/2} \right] \quad (\sigma'_s = f_y \text{ için}) \quad (4.10)$$

$$\frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \frac{k_1 E_s \varepsilon_c}{f_y} \frac{1 + (\rho + \rho') n - \left[(\rho + \rho')^2 n^2 + 2(\rho + \rho' d' / d) n \right]^{1/2}}{\left(\frac{\rho' E_s - \rho f_y}{1.7 f'_c} \right)^2 + \frac{\rho' E_s k_1 d'}{0.85 f'_c d} - \frac{\rho' E_s - \rho f_y}{1.7 f'_c}} \quad (\sigma'_s < f_y \text{ için}) \quad (4.11)$$

Kiriş kesitlerinde sünekliği etkileyen pek çok etken vardır. Bunlardan bazıları şöyle sıralanabilir:

- donatı oranı , bağ ve ankraj durumu,
- beton dayanımı,
- donatı akma mukavemeti,
- basınç donatısı miktarı,
- donatıda pekleşme,
- kayma gerilmeleri,
- tersinir yükleme durumu
- yanal donatı miktarı ve yerleşim şekli.

Bu parametrelerin kiriş şekil değiştirme kabiliyeti üzerine etkisi günümüze kadar yapılmış deneysel çalışmalar üzerinden araştırılmıştır.

Donatı oranı kirişlerin sünekliğine etki eden en büyük faktördür. Sünek davranışın gerçekleşmesi için kirişin denge-altı donatılı olması şarttır. Beton için belirli bir akma noktası olmayıp betonun yapacağı limit deformasyon akma noktası olarak alınır. Örneğin Türk Standartları TS-500(1984) [65] ve ACI-318(1995) [14] bu değeri 0.003 olarak kabul eder. Kanada Betonarme Yapılar Standardında(1994) [16] beton için maksimum birim kısalma 0.0035 olarak verilmiştir. Ayrıca TS-500(1984)'de dengeli kırılma donatı yüzdesinin %85'inden daha fazla donatı kullanılamayacağı hükmü vardır. Benzer şekilde, bu oran ACI-318 'de %75 olarak verilmektedir.

Donatı oranı ve cinsi sabit kalıp beton dayanımı arttıkça, süneklik artmaktadır. Yüksek mukavemetli betonlarda kuşatma etkisi olmadığı takdirde göçme normal betona kıyasla daha gevrek olmaktadır. Yanal kuşatma basıncı da yüksek olmalıdır. Bu basıncı sağlamak için donatı akma mukavemeti ve hacimsel donatı oranı yüksek olmalıdır. Akma mukavemeti 792 Mpa olan yanal donatı ile kuşatılmış, basınç mukavemeti 86-116 Mpa arasında değişen deney elemanları %4.4 hacimsel donatı oranı ile kuşatıldığında süneklik

oranı %250 mertebesinde artış göstermiştir. Ayrıca yanal deplasman oranı da eleman boyunun %3'ünü aşmaktadır [58].

Yapının düşey ve yatay yükleri taşıma işlevini yitirmeden, kararlılığını koruyarak kalıcı şekil değiştirmeler ile enerji tüketmesi kiriş uçlarında mafsallaşma olmasıyla sağlanabilmektedir. Oysa kolon kiriş birleşim yerleri aynı zamanda kesme kuvvetlerinin de büyük olduğu yerlerdir. Ani kesme kırılmaları olmaması için kiriş kesme kuvveti taşıma gücünün moment taşıma gücünden yüksek olması gereklidir. Pratikte betonarme kirişlerin büyük bir bölümü yeterli kesme açıklığına sahiptir. Bundan dolayı eğilme etkisi baskın davranış gösterirler. Eğilme etkisi baskın kirişlerin süneklik ve enerji yutma kapasiteleri çok yüksek olabilir[62]. Bertero ve diğerleri(1977)[12] tarafından yapılan kritik bölgeleri yön değiştiren pür eğilme momentine maruz kiriş deneylerinde, deplasman süneklik oranları 10'dan büyük çıkmıştır. Çelebi ve Penzien (1973)[20] tarafından yapılan deneylerde eğilme ve kesme kuvvetine maruz diğer kirişlerde de sünek davranış görülmüştür. Bu kiriş deneylerinde kesme kırılma gerilmesi aralıkları $0.13 \sqrt{f_c'}$ ile $0.31 \sqrt{f_c'}$ (MPa) arasında olup süneklik oranları 4 ila 6 arasında değişmektedir .

Deprem yüklerinin tersinir yükler olmasından ötürü kiriş kesitinin her iki yüzünde çekme ve basınç gerilmeleri birbirini takip ederek oluşmaktadır. Tersinir yükleme ile meydana gelen mafsallarda betonun parçalanıp ezilmesiyle kesme kuvveti taşıma gücü düşmektedir. Deneyler göstermiştir ki; çok yüksek kesme kuvveti altında bile tam bağlı etriyeler ve özel kesme donatıları ile süneklik arttırılabilir. Yüksek kesme gerilmelerine rağmen özel gövde donatıları sayesinde süneklik oranının 5-6 mertebelerine çıktığı rapor edilmiştir (Ma ve diğerleri, 1976) [43]. Kirişlerin şekil değiştirme kabiliyeti donatıların bağ ve ankraj özelliklerinden de etkilenmektedir. Bertero ve Popov (1977) donatının sıyrılmasından dolayı rijitlik azalması gözlemlemişlerdir. Denenen kirişlerin %20-50'sinde sıyrılarak kayma gözlenmiştir. Kolon kiriş ek yerlerinde sık etriyelerin ve boyuna donatıların yeterli ankraj boylarında yerleştirilmesi gerekir.

Basınç donatısı oranının kiriş sünekliğini arttırıcı etkisi büyüktür. Kirişlerin olası plastik mafsallık bölgelerinde basınç donatısı bulundurulması zorunludur. Bu donatının miktarı

çekme donatısına bağlı olarak ifade edilmektedir[27]. Kirişlerde sünekliği arttırmak amacıyla A.B.Y.Y.H.Y(1997)[1]'de birinci ve ikinci deprem bölgelerinde kiriş mesnedindeki basınç donatısı aynı mesnetteki çekme donatısının %50'si kadar olması koşulu getirilmiştir. Üçüncü ve dördüncü deprem bölgelerinde bu oran %30'a indirilmektedir.

4.2. Kolon Kesitlerinde Süneklik

Bir kesite etkiyen eksenel yük düzeyi artarken eleman süneklik düzeyinde azalma beklenmelidir[27]. Kolon kesitlerinde eksenel yükten dolayı kirişlerin aksine tek bir moment - eğrilik bağıntısı yoktur. Ancak "M-N" etkileşim diyagramı çizilebilir. Basınç kırılması bölgesinde donatı akma noktasına gelmeden beton ezilerek kırılacağından akma noktası yoktur. Bu nedenle kolonlarda basınç kırılması durumunda gevrek kırılma söz konusudur. Çekme kırılması bölgesinde donatı akıp beton kırılncaya kadar oluşan büyük şekil değiştirmelerle deprem enerjisi yutulur. Kuşatılmamış betonun düşük eksenel yük seviyelerinde bile gevrek davranışı nedeniyle ACI-318(1983)[14] deprem bölgelerindeki sünek çerçevelerde kolon uçlarının eksenel yükün dengeli kırılma yükünün %40'dan büyük olduğu durumlarda enine donatıyla sıkı bir şekilde sarılmasını önermektedir. Yeni Türk Deprem Yönetmeliğinde de kolonların eksenel yük düzeylerine $N \leq 0.5f_{ck}A_c$ üst sınırı getirilmiştir[1].

Kolon kesitlerinde sünekliği etkileyen önemli etkenler şöyle sıralanabilir:

- eksenel yük düzeyi,
- boyuna donatı miktarı ve donatı sınıfı,
- beton dayanımı,
- yanal donatı miktarı ve yerleşim şekli,
- kesme kuvveti düzeyi.

Eğilme etkisi baskın elemanlar genellikle sünek davranış gösterirler. Eksenel basınç ve kesme kuvveti sünekliği azaltır. Eğilme kapasitesinden yüksek kesme mukavemetine sahip elemanlar (kapalı etriyeli ve boyuna donatıların yanal hareketi önlenmiş halde) yüksek basınç ve kesme kuvveti karşısında bile sünek davranış gösterirler.

Artan eksenel yük ve kesme kuvvetleri ile süneklik düşer. Fakat betonun kuşatılması ile süneklik önemli oranda artar (Atalay ve Penzien, 1975)[7]. Saatçioğlu ve diğerleri (1989) [62], yüksek kesme gerilmesine maruz($0.47\sqrt{f_c}$ - $0.62\sqrt{f_c}$ MPa) kolon deneyleri neticesinde gevrek kırılma tespit etmişlerdir. Aynı deney programında, boyuna donatısı iyi yerleştirilmiş ve çiroz etriyelerle takviyeli ve birinci grup ile aynı miktarda kuşatma donatısına haiz kolonlar çok iyi davranış göstermiş ve sünekliği 6 çıkmıştır[62]. Bu deneylerde bütün kolonlar tersinir yüklemeye tabi tutulmuştur. Üçü hariç bütün kolonlar eksenel basınç altında test edilmiştir.

Park ve diğerleri (1982) [50] aynı düzeyde kesme gerilmesine ($0.44\sqrt{f_c}$ - $0.58\sqrt{f_c}$) (MPa) maruz ve yüksek eksenel basınç altında kolon deneyleri yapmışlardır. Eksenel basınç düzeyi dengeli yükün %82' si ile %92' si civarında değişmektedir ve kolonlar çok iyi kuşatılmıştır. Ulaşılan sonuç; 5 ve 5'den büyük süneklik oranları ile sünek davranıştır.

Jagajeski ve diğerleri (1978)[39], $0.66\sqrt{f_c}$ - $0.74\sqrt{f_c}$ (MPa) oranlarında yüksek kesme gerilmesi altında kolonları denemişlerdir. Kolonlarda boyuna donatı iyi yerleştirilmiş ancak yanal donatı depreme dayanıklı yapılar için öngörülen yanal donatının yarısı kadardır. Kolonların süneklik oranları dengeli yükün %83'ünde 5; dengeli yükün %60 'nda 5'ten büyük çıkmıştır. Eksenel basınç dengeli yüke eşit olduğunda süneklik oranı 3 bulunmuştur.

Beton dayanımının da kolon sünekliği üzerinde etkisi vardır. Beton basınç dayanımının artması ile aynı N/N_0 oranlarında moment taşıma kapasitesi artmaktadır. Benzer şekilde kolonun dengeli kırılma yükü de artmaktadır. Dengeli yükü ve moment taşıma gücü artınca kolon daha çok yatay yük alabilir.

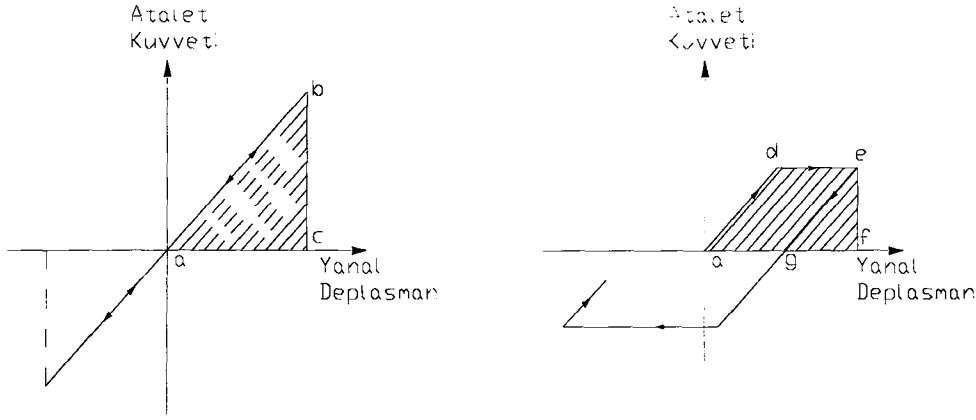
Donatı miktarının artması ile çekme kırılması bölgesi küçülmekte çekme kırılması için gerekli eksenel yük ve süneklik azalmaktadır.

5. BETONARME BİNA SİSTEMLERİNDE SÜNEKLİK

5.1. Deplasman Sünekliği İhtiyacı

Depreme dayanıklı yapı tasarımında üzerinde dikkatle durulacak hususların başında, yapının elastik ötesi evrede yön değiştiren deprem yükleri altında sünek davranış gösterebilmesidir. Yapının deprem hareketine mukabelesinde doğrusal olmayan davranış etkisi tek serbestlik dereceli bir osilatör (salıngaç) yardımıyla görülebilir.

Şekil 5.1.(a)'da elastik davranan bir osilatörün “yük-yer değiştirme” ilişkisi üzerinde B noktası, maksimum yük altında maksimum yanal ötelemeye karşılık gelmektedir. Eğrinin altındaki ABC alanı maksimum yanal ötelenmenin olduğu anda depolanan enerjiyi temsil etmektedir. Kütle, başlangıç noktasına geri geldiğinde bu enerji kinetik enerjiye dönüşmektedir. Eğer osilatör atalet yüklerini elastik olarak taşıyabilecek kadar güçlü değilse, elasto-plastik özellikte plastik mafsallı olarak yük-deplasman eğrisi Şekil 5.1.(b)'deki duruma dönüşür. Plastik mafsallı kapasitesine ulaşıldığında yük sabit kalırken yanal öteleme artarak “DE çizgisi” boyunca gider ve E noktası maksimum deplasman durumundaki atalet yükünü ifade eder. Maksimum deplasman durumunda depolanan potansiyel enerji bu durumda “ADEF eğrisi” altındaki alandır. Bu aşamada, yapıya etkiyen atalet kuvvetinin plastik mafsallı kapasitesini aşmadığını ifade etmek gerekir. Kütle sıfır pozisyonuna geldiğinde “ADEC alanı” ile temsil edilen enerji, plastik mafsallı tarafından, ısı enerjisine dönüşerek veya benzeri başka bir geri dönüşümsüz şekilde yutulmaktadır. Bu yüzden, elastik yapılarda depolanan enerji her bir tekrarda hıza dönüşerek geri dönerken; elasto-plastik yapılarda depolanan enerjinin yalnızca bir kısmı aynı şekilde geri dönmektedir. Böylece, elasto-plastik yapılarda depolanan enerjinin bir bölümü her yük tekrarında sönümlenmektedir.



Şekil 5.1. Osilatörün depreme karşı mukabelesi (responsu): (a)Elastik mukabele, (b) Elasto-plastik mukabele[50]

Yapıların deprem yükü altında elasto-plastik davranışla yaptığı en büyük yer değiştirme (kontrollü yer değiştirme), yapının, aynı yükler altında elastik bölgede kalarak yaptığı en büyük yer değiştirmeye eşittir. Buna “eşdeğerli öteleme karşılıkları durumu” ya da “deplasman eşitliği yaklaşımı” denir. Statik tasarım yükünün elastik davranış atalet yüküne oranı yük azaltma faktörü (R) ile gösterilir[36]. μ süneklik olmak üzere, eşdeğer öteleme ölçütü ile R katsayısı:

$$R = \frac{1}{\mu} \quad (5.1)$$

olmaktadır. Şekil 5.2.(a)’da A noktası doğrusal elastik olarak ölçülen en büyük iç kuvveti gösterirken; B noktası doğrusal olmayan en büyük iç kuvveti göstermektedir. Şu halde A/B oranı, elastik en büyük yükün, deprem yönetmeliklerinin öngördüğü en büyük yüke oranı olup “davranış etkeni” (K_k) adını alır. Davranış etkeni yük azaltma katsayısının tersi olup her iki parametre de süneklik oranı (μ) ile doğrudan ilişkilidir. Dinamik analizler nispeten kısa periyotlu yapılarda “eşdeğerli öteleme karşılıkları” yerine “eşdeğerli potansiyel enerji karşılıkları”nın daha iyi bir yaklaşım sağladığını göstermiştir. Blume[11] yük azaltma katsayısının olası üst limiti olarak :

$$R = \frac{1}{\sqrt{2\mu - 1}} \quad (5.2)$$

değerini vermiştir. Bağntı (5.1) ve (5.2)'den elde edilen μ değerleri farklı R değerleri için Çizelge 5.1'de verilmiştir. Bağntı (5.2) eşdeğer enerji ölçütüne dayanmaktadır. Enerji eşitliği ölçütü şöyle ifade edilebilir: “Yapının deprem etkisi altında elasto-plastik davranışla depoladığı maksimum potansiyel enerji, aynı yükler altında elastik bölgede kalarak depolayacağı maksimum potansiyel enerjiye eşittir.” Matematiksel olarak Şekil 5.2b'de “OCD alanı” “OEFG alanı”na eşittir. Şekil 5.2'den şu sonuç çıkarılabilir:

- Elasto-plastik davranan bir yapı sisteminin doğrusal elastik davranan bir sistemle aynı deplasmanı gösterebilmesi veya eşit enerji tüketebilmesi için belirli bir sünekliğe gereksinme vardır. Eğer sistem, süneklik katsayısı ile belirlenen sünekliğe haiz ise, yükün A 'dan B 'ye indirilmesine izin verilebilir. Yürürlükte bulunan deprem yönetmeliğinde, taşıyıcı sistem davranış katsayıları gerekli sünekliğin sağlandığı varsayılarak, yükü A 'dan B 'ye indirgeyecek şekilde saptanmıştır. Bu nedenle, sünek olmayan bir yapı sistemi oluşturulacaksa yönetmelikteki tasarım yükleri süneklik katsayıları ile çarpılmalıdır[25].

Çizelge 5.2'de K_k davranış etkeni Avrupa Beton Komitesi (CEB) tarafından tavsiye edilmektedir. Bu çizelgede deplasman süneklik katsayıları hem eşdeğer öteleme ölçütüne hem de eşdeğer enerji ölçütüne bağlı olarak ifade edilmektedir. Eşdeğer enerji ölçütü kullanıldığında K_k ile μ_Δ arasındaki ilişki $K_k = \sqrt{2\mu_\Delta - 1}$ ile ifade edilirken eşdeğer öteleme ölçütü kullanıldığında ise $K_k = \mu_\Delta$ olarak ifade edilmektedir. Çizelge 5.3' de ise üç süneklik düzeyinde perdeli yapılar için davranış katsayıları verilmektedir. Çizelge 5.3' de K_k değerleri her iki doğrultuda da yatay yüklerin en az %50 sinin bağlantılı perdeler tarafından alınacağı esasına göredir. Eğer bu koşul sağlanamazsa K_k değerleri %70 azaltılarak alınmalıdır[36].

Çizelge 5.1. Farklı R değerleri için bağıntı (5.1) ve (5.2)'deki μ_Δ tanımlarıyla sünekliğin değişimi[49]

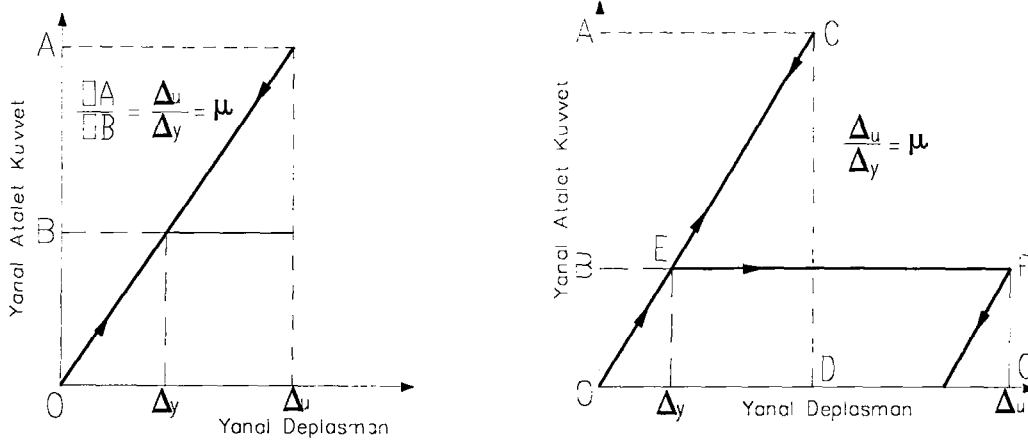
$R = \frac{\text{Tasarım yükü}}{\text{Elastik Davranış Yüğü}}$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
$\mu_\Delta = 1/R$ ifadesi ile $\mu_\Delta =$	5.0	2.5	1.67	1.25	1.0
$\mu_\Delta = 1/(1/2 + 1/2R^2)$ ifadesi ile $\mu_\Delta =$	13.0	3.63	1.89	1.28	1.0

Çizelge 5.2. Taşıyıcı sistemi yalnız çerçeveden oluşan yapılar için CEB tarafından verilen K_k değerleri [36]

Taşıyıcı Sistemi Salt Çerçeveden Oluşan Yapılarda			
S ÜNEKLİK DÜZEYİ	I	II	III
K_k Davranış etkeni	2.0	3.5	5.0
$\mu_\Delta =$ (Eşdeğer yer değiştirme ölçütü ile)	2.0	3.5	5.0
$\mu_\Delta =$ (Eşdeğer Enerji ölçütü ile)	2.5	6.6	13.0

Çizelge 5.3. Taşıyıcı sistemi perde ve perde-çerçeve yapılar için CEB tarafından verilen K_k değerleri[36]

Taşıyıcı Sistemi Perde ve Perdeli-Çerçeve Yapılar İçin			
S ÜNEKLİK DÜZEYİ	I	II	III
K_k Davranış Etkeni	2.0	3.0	4.0
$\mu_\Delta =$ (Eşdeğer yer değiştirme ölçütü ile)	2.0	3.0	4.0
$\mu_\Delta =$ (Eşdeğer Enerji ölçütü ile)	2.5	5.0	8.5



Şekil 5.2. Elastik ve elastoplastik yapıda yük deplasman ilişkisi (a)Eşdeğer maksimum deplasman yaklaşımı (b) Eşdeğer maksimum potansiyel enerji yaklaşımı [35]

Bazı dinamik analiz sonuçları eşdeğer öteleme ölçütü ile güvensiz tarafta kalılabileceğini göstermiştir. Newmark[47] tarafından El Centro (1940) depremi kuzey-güney bileşeni kayıtları ile elastik ve elasto-plastik hesapların karşılaştırılmasından esas periyodu $T < 0.125$ saniye olan yapılar için ivmelerin eşit olduğunu ve dolayısıyla elastoplastik davranışa ait gerçek iç kuvvetleri bulmak için elastik davranışa ait iç kuvvetlerde herhangi bir azaltma yapılmaması gerektiğini belirtmektedir. Doğal titreşim periyodu $0.125 \text{ s} < T < 0.5$ saniye arasında olan yapılar için, her iki durumda hız eşitliği olduğunu ve dolayısıyla enerjilerin eşit yapılabileceğini belirtmektedir. Bu durumda R yük azaltma katsayısı $1/\mu$ olmaktadır. Doğal periyodu 0.5 saniyeden büyük yapılar için yer değiştirmeler eşittir ve doğrudan doğruya $R=1/\mu_{\Delta}$ olmaktadır. Bu açıklamalar Çizelge 5.4’de özetlenmiştir. Priestley [57] tarafından mevcut betonarme yapıların dayanımlarının araştırılması amacıyla geliştirilen deplasmana dayalı sismik araştırma için kullanılan tasarım ivme spektrumu periyot düzeyine bağlı olarak hangi yaklaşımın daha uygun olacağını ortaya koymaktadır. Buna göre, periyodun çok küçük değerleri için ($T < 0.7 T_0$) ivme eşitliği ($R=1$); bundan sonra maksimum ivmeye karşılık gelen periyoda (T_0) ulaşıncaya kadar enerji eşitliği; T_0 ile $1.5T_0$ aralığında ise deplasman eşitliği uygundur (Şekil 5.3). Ancak bu yaklaşımın da zayıf

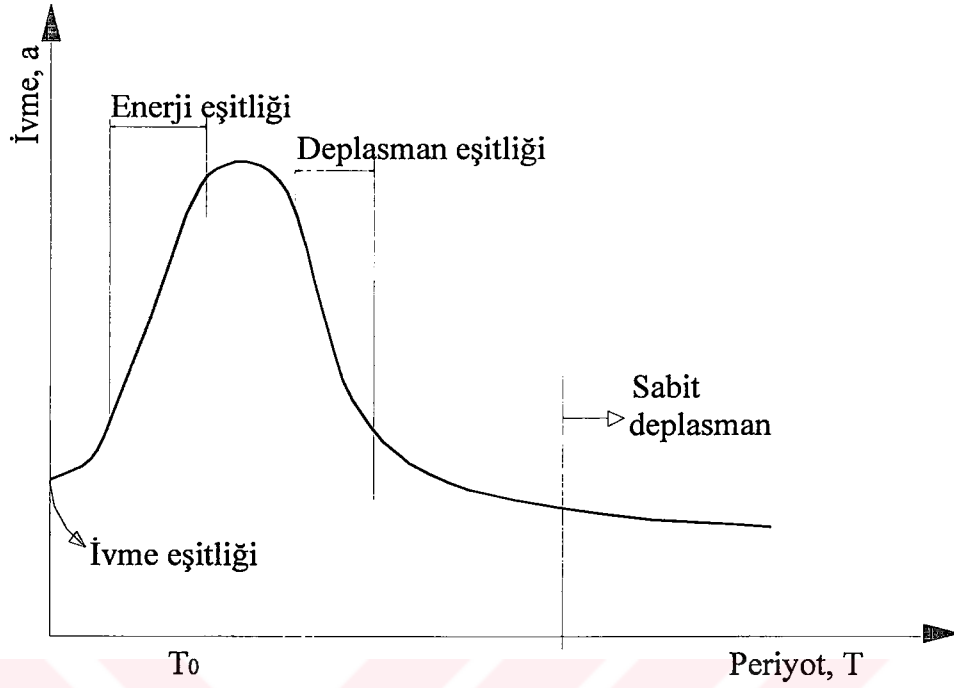
tarafları vardır. Şöyle ki, sünek ve elastik respons arasındaki ilişkilerde varsayımlar vardır. Ayrıca histeretik enerjinin tüketilmesine ait özelliklerin dikkate alınması hali eksiktir.

Görülüyor ki, elasto-plastik sistem, elastik sistem kadar enerji depolarsa düşük mukavemet seviyelerinde büyük deplasman olmaktadır. Ayrıca R 'nin düşük değerleri için Bağntı (5.1) ile (5.2)'nin farkı önemli olmaktadır. Sürtünme kuvvetleriyle ilgili olan sönüm oranıyla, μ_{Δ} süneklik oranının yeter derecede büyük olması halinde hafif ve orta şiddetli depremler altında rijit bir davranış gösteren yapıya büyük şiddetteki depremler halinde, etkiyen yatay yükler çok büyük değerler alamayacak ve taşıyıcı sistem bu depremleri onarılabılır hasar ile karşılayabilecektir [19].

Çizelge 5.4 .İç kuvvetlerin karşılaştırılması

Periyot Aralığı	Davranış Etkeni (K_K)	Her İki Halde
$T \leq 0.125$ s	1.0	İvme Eşitliği
$0.125 < T < 0.50$ s	$(2\mu_{\Delta} - 1)^{0.5}$	Enerji Eşitliği
$T \geq 0.5$ s	μ_{Δ}	Yer Değiştirme Eşitliği

Tasarımcı, Bağntı (5.1) veya (5.2) 'yi ve tasarım spektrumu kullanarak statik yatay yükler ve deplasman sünekliği arasında yaklaşık olarak ilişki kurabilir. Çok katlı bir yapı için, deplasman sünekliği ölçümünde verilen Δ_y ve Δ_u deplasmanları yapının üst kat döşeme üstü gibi uygun bir noktada ölçülür. Böyle çerçevelerde plastik mafsallar yapının kritik kesitlerinde ortaya çıkar ve daima aynı yük altında oluşmazlar. Yatay yük deplasman ilişkisi çeşitli yük seviyelerinde plastik mafsal oluşumu ile rijitlik azalması olduğundan dolayı eğrisel bir hal alır. Böyle bir durumda deplasman süneklik faktörünü araştırmak için yaklaşık bir yatay yük deplasman eğrisi kabul edilebilir. Bu kabulde, ilk akma başlangıcı anındaki deplasman çerçevenin elastik sınırı olarak dikkate alınır.

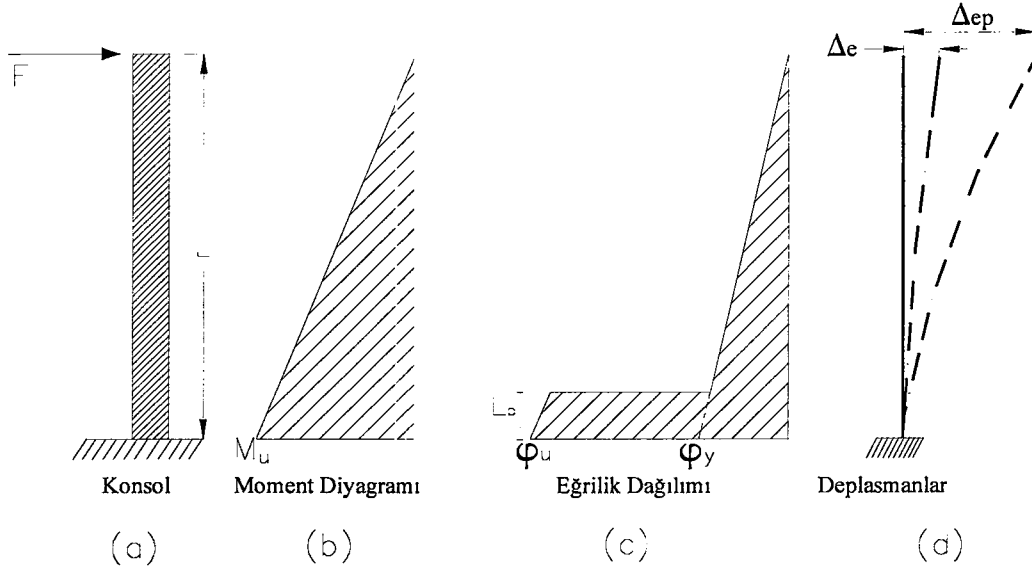


Şekil 5.3. Tasarım ivme spektrumu üzerinde yaklaşımlar [57]

5.2. Eğrilik Sünekliği İhtiyacı

Betonarme eleman kesitlerinde süneklik, eğrilik sünekliği oranı cinsinden ifade edilmektedir. Eğrilik sünekliği oranı $u_{\phi} = \phi_u / \phi_y$ olup; burada ϕ_u son limit durumdaki eğrilik; ϕ_y ise kesitte akmanın başladığı andaki eğriliktir. Bu tanımlamada eğilmenin baskın davranış olacağı öngörülmektedir. Genellikle, deplasman sünekliği oranı olarak 3 değeri normal kabul edilir. Bu aşamada, deplasman sünekliği oranı ile eğrilik sünekliği oranı arasındaki farkı belirlemek çok önemlidir. Çünkü, bir çerçevede akma başladıktan sonra deformasyonlar plastik mafsallarda toplanır, ve herhangi bir plastik mafsalda gerekli ϕ_u / ϕ_y oranı Δ_u / Δ_y oranından büyük olabilir. Eğrilik sünekliği ile deplasman sünekliği arasındaki ilişki basit bir konsol için Şekil 5.4’de gösterilmiştir.

Şekil 5.4.’de görülen konsolun serbest ucundaki yanal yer değiştirme, eğrilik diyagramının kolon serbest ucuna göre momenti alınarak bulunabilir. Konsolda maksimum momente ulaşıldığında serbest uçtaki yanal deplasman Δ_u değerini almaktadır (Denklemler 5.3.a).



Şekil 5.4. Limit durumda yatay yüke maruz konsol, (a) Konsol (b)Eğilme momenti diyagramı, (c)Konsol boyunca eğrilik dağılımı, (d)Elastik ve elasto-plastik deformasyonlar

$$\Delta_u = \left(\frac{\varphi_y * L * 2L}{6} \right) + (\varphi_u - \varphi_y) * L_p * (L - 0,5 * L_p) \quad (5.3.a)$$

$$\Delta_y = \frac{\varphi_y L}{2} \frac{2L}{3} \quad (5.3.b)$$

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = 1 + \left(\frac{\varphi_u - \varphi_y}{\varphi_y} \right) \frac{L_p (L - 0,5L_p)}{L^{2/3}} \quad (5.3.c)$$

$$\frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \frac{L^2 (\mu_\Delta - 1)}{3L_p (L - 0,5L_p)} \quad (5.3.d)$$

Örneğin, $\mu_\Delta=4$ için gerekli $\mu_\varphi=\varphi_u/\varphi_y$ değerleri Denklem (5.3)'den hesaplanmış ve Çizelge 5.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.5. $\mu_\Delta=4$ için Denklem (5.3)'den hesaplanan eğrilik sünekliği (μ_φ) değerleri[49]

L_p / L	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
μ_φ	20,5	13,85	10,5	8,53	7,2	5,6	4,6	3,9	3,5	3,125

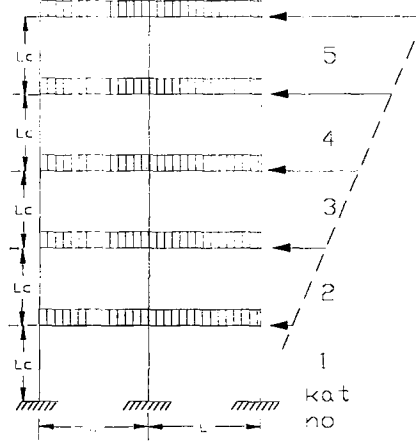
Plastik mafsal eşdeğer uzunluğu (L_p) eleman derinliğinin 0,5-1 katı arasında değiştiğinden bir konsol kiriş için genellikle gerekli μ_ϕ oranı μ_Δ oranından büyüktür. Eşdeğer plastik mafsal uzunluğunun eleman boyuna oranı azaldıkça μ_ϕ oranı yükselmektedir. Çok katlı çerçeveler için, eğrilik sünekliği ve deplasman sünekliği arasındaki ilişki karmaşık bir hal alır. Çünkü aynı yük altında kritik kesitlerde aynı anda akma olmayacağı gibi atalet yüklerin dağılımı da yönetmeliklerce öngörülen eşdeğer statik yatay yüklerin dağılımından daha karmaşıktır. Bununla beraber, bir genelleme yapmak gerekirse deplasman sünekliği cinsinden ifade edilen süneklik kesite dönme cinsinden ifade edilen süneklikten daha küçüktür. Eğrilik sünekliği ise her ikisinden de büyüktür. Her elemanın dönme veya eğrilik sünekliği kapasitesi elemanın geometrik özelliklerine (açıklık, enkesit), donatısına, malzeme kalitesine ve eksenel yük düzeyine bağlıdır[55].

5.3. Göçme Mekanizmaları İle Eğrilik Sünekliğinin Belirlenmesi

Göçme mekanizmaları ile eğrilik sünekliği ilişkilerini araştırmadan önce, hesap kolaylığı için, düşey ve yatay yüklere maruz Şekil 5.5'deki gibi bir çerçevede şöyle varsayımlar yapılabilir:

- Çerçeve kesitlerinde moment-eğrilik bağıntısı ikili-doğrusaldır.
- Hesapta, yalnızca eğilmeden ileri gelen şekil değiştirmeler dikkate alınmaktadır.
- Çerçevede akma başlayıncaya kadar yükleme yapılırsa, mekanizma oluşması için, aynı yük altında yeter sayıda kritik kesitte akma başlar.

Yapılan bu kabullerden sonra çerçeve sistemde akma başladığı andaki yanal yer değiştirme tanımlanmalıdır. Şekil 5.6'da yanal yükler çerçevede akma oluşturacak kadar arttığı anda, bir kolona ait eğrilik dağılımı görülmektedir. Bu eğrilik dağılımı şekil itibariyle eğilme momenti diyagramına benzemektedir. Bu aşamada momentler hâlâ moment eğrilik ilişkisinin başlangıç bölümündeki doğrusal kısmındadır. Kolonlardaki eğrilikler kattan kata değişmektedir. Çünkü her kattaki kolon eksenel yükleri ve kesit özellikleri farklıdır. Kolonların kolon tabanına göre bağlı ötelenmesi kolonun bulunduğu kata ait eğrilik diyagramının altındaki alanın kolon taban seviyesine göre momenti alınarak hesaplanabilir.

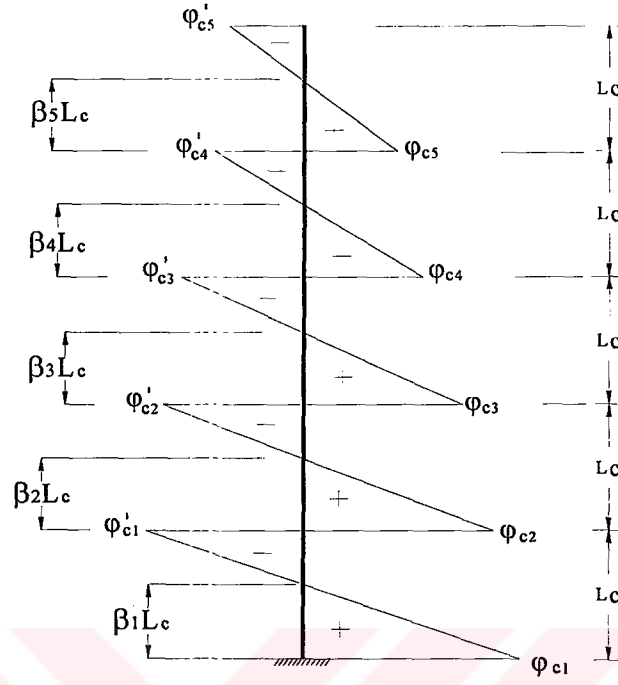


Şekil 5.5. Düşey ve yatay yüke maruz çerçeve

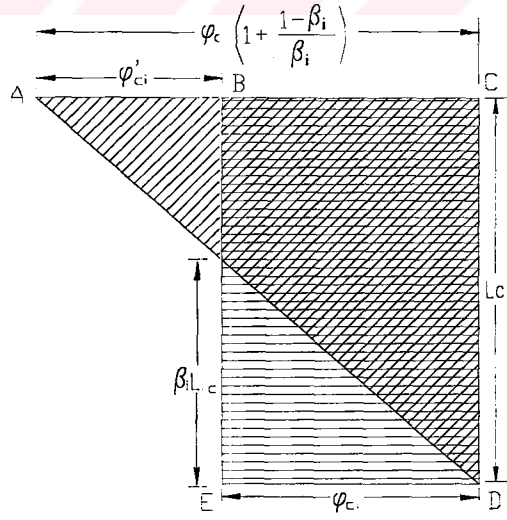
Çerçevedeki katlar temelden itibaren 1,2,3,...,i,...,r, şeklinde numaralandırılırsa, ilk akma anında r. katın üzerindeki döşeme hizasında yanal deplasman, kolon tabanına göre, bağlı olarak şöyledir:

$$\begin{aligned}
 \Delta_y &= \varphi_{c1} L_c \left(r L_c - \frac{L_c}{2} \right) - \varphi_{c1} \left(1 + \frac{1-\beta_1}{\beta_1} \right) \frac{L_c}{2} \left(r L_c - \frac{2L_c}{3} \right) + \varphi_{c2} L_c \left(r L_c - \frac{3L_c}{2} \right) - \varphi_{c1} \left(1 + \frac{1-\beta_2}{\beta_2} \right) \frac{L_c}{2} \left(r L_c - \frac{5L_c}{3} \right) + \dots \\
 &\dots + \varphi_{ci} L_c \left[r L_c \left(i - \frac{1}{2} \right) L_c \right] - \varphi_{ci} \left(1 + \frac{1-\beta_i}{\beta_i} \right) \frac{L_c}{2} \left[r L_c - \left(i - \frac{1}{3} \right) L_c \right] + \dots + \varphi_{cr} \frac{L_c^2}{2} - \varphi_{cr} \left(1 + \frac{1-\beta_r}{\beta_r} \right) \frac{L_c^2}{6} \\
 &= \frac{L_c^2}{6} \sum_{i=1,2,\dots,r} \frac{\varphi_{ci}}{\beta_i} [6\beta_i(r-i+0.5) - 3(r-i) - 1] \quad (5.4)
 \end{aligned}$$

Burada $\varphi_{c1}, \varphi_{c2}, \dots, \varphi_{ci}, \dots, \varphi_{cr}$ çerçeve ilk akmaya başladığı anda 1.,2., ...i., ... ve r. kat taban hizasında kolon eğrilikleridir. $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i, \dots, \beta_r$ söz konusu katlarda momentin işaret değiştirdiği noktanın konumunu belirten katsayılarıdır. Denklem (5.4)'ü elde etmek için eğrilik diyagramının momenti alınırken her kattaki eğrilik dağılımı Şekil 5.7'de görüldüğü gibi bir dikdörtgen blok ve bir üçgenden ibaretmiş gibi düşünülür. Kat deplasmanı "BCDE alanı" eksi "ACD üçgeninin r. kat döşeme seviyesine göre momenti"ne eşittir.



Şekil 5.6. Bir çerçeve kolonunda ilk akma anında eğrilik dağılımı[49]



Şekil 5.7 . i. kat kolonunda eğrilik dağılımı [49]

Eğer en alt katta kolon momenti işaret değişimi kat yüksekliğinin tabandan 0.6, diğer katlarda da 0.5 katı kadar yüksekinde ($\beta_1=0.6$ ve $\beta_2=\beta_3=....\beta_r=0.5$) olursa, Denklem (5.4):

$$\Delta_y = \frac{I_c^2}{6} [\varphi_{c1}(r + \frac{1}{3}) + \varphi_{c2} + \varphi_{c3} + + \varphi_{cr}] \quad (5.5)$$

haline gelir. Bu, r. katın ilk akma başladığı anda yapı temel seviyesine göre yaptığı göreceli deplasmandır. Akma başladıktan sonra iki çeşit veya bu ikisinin karması göçme mekanizması oluşabilir. Bu mekanizmalar aşağıdaki bölümlerde irdelenmektedir.

a) Kolon Mekanizması (Kat Mekanizması) Durumu

Sistemde, kirişler akma eğrilğine ulaşmadan, kolon kesitlerinde akma başlarsa Denklem (5.4)'de $\varphi_{c1}=\varphi_{yc1}$, $\varphi_{c2}=\varphi_{yc2}$,.... $\varphi_{cr}=\varphi_{ycr}$ olur. Burada φ_{yc1} , φ_{ycr} 1.....r. kolonlarda akma eğrilikleridir. Bu durumda sabit yatay yük altında kolon kritik kesitlerindeki deformasyon daha fazla olacaktır. En kötü durum ise diğer katların kolonlarının daha güçlü olması sebebiyle bu deplasmanların yalnızca bir kata ait kolonlarda toplanarak o katta bir mekanizma durumu yaratmasıdır.

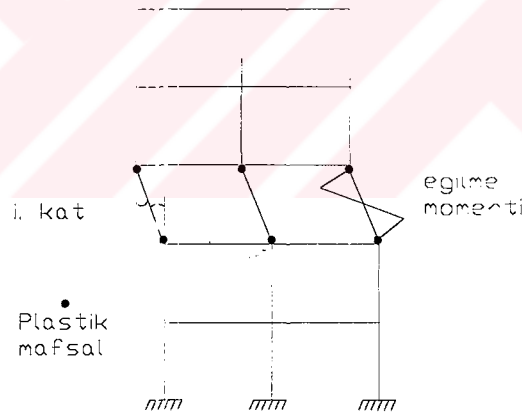
Şekil 5.8'de i. katta mekanizma yaratan plastik deformasyonlar görülmektedir. Kolonlarda plastik mafsallardan ötürü elasto-plastik deformasyonlar olmaktadır. Şekil 5.9'da kolonun her iki ucundaki mafsalda limit eğrilğe ulaşılmışken tipik bir eğrilik dağılımı gösterilmiştir. Genel olarak kolon mafsalında izin verilen plastik dönme θ_{pc} olmak üzere; θ_{pc} olarak $(\varphi'_{uci}-\varphi'_{yci})L'_{pc}$ veya $(\varphi_{uci}-\varphi_{yci})L_{pc}$ den küçüğü alınır. Burada φ'_{uci} ve φ_{uci} i. kat kolonunun üst ve alt ucundaki limit eğrilikleridir. φ'_{yci} ve φ_{yci} ise i. kat kolonunun üst ve alt uçlarındaki akma eğrilikleridir. L'_{pc} ve L_{pc} eşdeğer plastik mafsallarıdır. r. kat üst ucunun yanal deplasmanı limit eğrilik durumunda i. kat kolonunda bu mekanizma için:

$$\Delta_u = \Delta_y + \theta_{pc} [L_c - 0,5(L_{pc} + L'_{pc})] \quad (5.6)$$

Deplasman duktilitite faktörü ise:

$$\mu_\Delta = 1 + \frac{\theta_{pc}}{\Delta_y} [L_c - 0,5(L_{pc} + L'_{pc})] \quad (5.7)$$

Burada; Δ_y Denklem (5.3)'de verilmiş olup θ_{pc} ise $(\phi'_{uci} - \phi'_{yci}) L'_{pc}$ veya $(\phi_{uci} - \phi_{yci}) L_{pc}$ den hangisi küçükse o alınır. Örneğin, istenen süneklik oranı $\mu_\Delta = 4$ ve $L_{pc} = L'_{pc} = 0,7h$ (h =kolonun eğilme yönündeki boyutu) için: $L_c = 8h$ $\beta_1 = 0,6$ $\beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_i = \dots = \beta_r = 0,5$ ve $\phi_{yc1} = \phi_{yc2} = \dots = \phi_{yci} = \dots = \phi_{ycr}$ olmaktadır



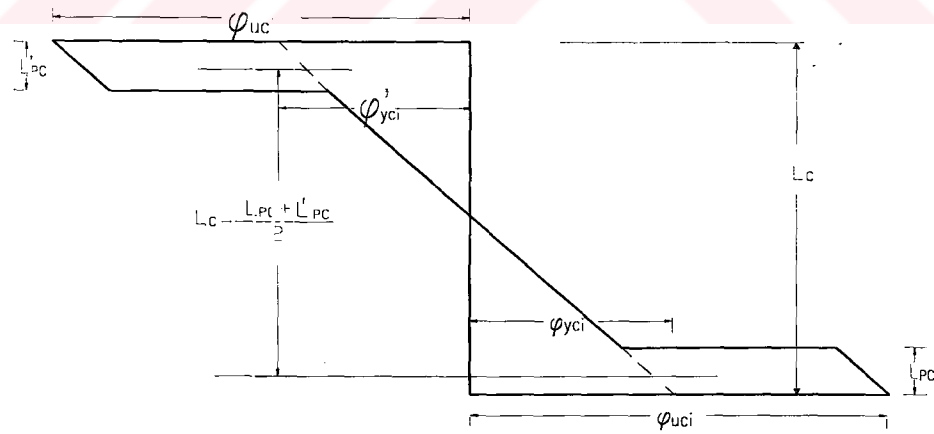
Şekil 5.8. i. katta kolon mekanizması durumu

Bağıntı (5.7)'ye göre $\frac{\phi_{uci}}{\phi_{yci}} = 12,54r - 3,2$ dir. Burada r , deplasmanın ölçüldüğü katın

üzerindeki kat adedidir. Özellikle yüksek yapılarda, bu şekilde süneklik hesabı yapıldığında ortaya çok büyük eğrilik sünekliği ihtiyacı çıkacağı açıktır. Yukarıdaki örnekte $r=3$ için kolon eğrilik sünekliği $\phi_{uci}/\phi_{yci} = 34$ olur. Ayrıca, aynı örnek için ϕ'_{uci}/ϕ'_{yci}

değeri mekanizma 1. kat kolonlarında olursa ϕ_{uci}/ϕ_{yci} değerinden daha büyük çıkar. Eğer mekanizma diğer katlarda oluşursa $\phi'_{uci}/\phi'_{yci} = \phi_{uci}/\phi_{yci}$ olmaktadır. Bağntı (5.7)'de deplasman süneklik oranı (μ_Δ) limit durum deplasmanının akma anındaki deplasmana oranı olarak alınmıştır. Şayet son kat için $\mu_\Delta=4$ kabul edilirse Bağntı (5.7)'ye göre en üst katın altında fakat plastik mafsallın üstündeki diğer katlar için μ_Δ değerinin ortalama 4 olması istenirse ve ayrıca plastik mafsallar en alt kat kolonlarında oluşursa gerekli eğrilik sünekliği faktörünü bulmak için Bağntı (5.7)'de $r=0,512$ değeri konulmalıdır. Çünkü yapının kütle merkezi yüksekliğin yarısının altında olacaktır. ve μ_Δ değeri bina yüksekliği yarısı civarında 4 olur. Böylece sistem deplasman sünekliği oranı yeter yaklaşıklıkla bulunmuş olur. Eğer plastik mafsallar daha üst kolonlarda oluşuyorsa eğrilik sünekliği oranı daha da büyük olacaktır.

Görüldüğü üzere; çok katlı çerçevelerde kolon kesitlerindeki eğrilik sünekliği oranı, kolon mekanizması olması durumunda, kolon için ihtiyaç duyulan eğrilik sünekliği oranından genellikle düşüktür.

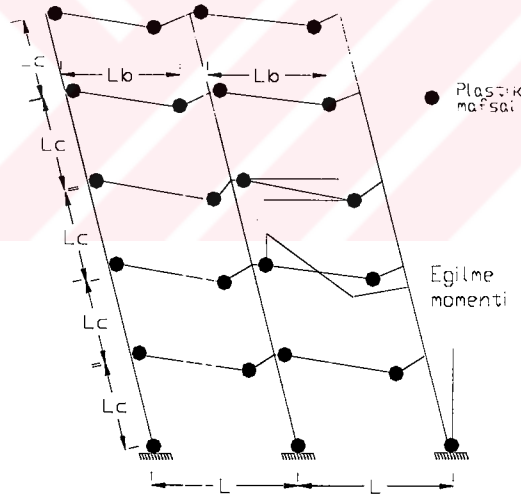


Şekil 5.9. Çerçeve ilk akma başladığı anda bir kata ait kolonda eğrilik dağılımı [49]

b) Kiriş Mekanizması Durumu

Eğer kolon kesitleri akma eğriliğine ulaşmadan kiriş kritik kesitlerinde akma başlarsa bu durumu takip eden yanal şekil değiştirmeler, kirişlerdeki plastik mafsallarda sabit yatay yük altında plastik şekil değiştirmeler şeklinde olur. Ayrıca her kolonun tabanında da bir plastik mafsall oluşması gerekir. Fakat kolonun diğer kısımları elastik kalmalıdır. Şekil 5.10'da kiriş mekanizması durumunda yalnızca plastik deformasyonlar görülmektedir. Şekil 5.10'a göre her kolonun tabanındaki plastik dönme:

$$\theta_{pc} \cong \frac{\Delta_u - \Delta_y}{rL_c} \quad (5.8)$$

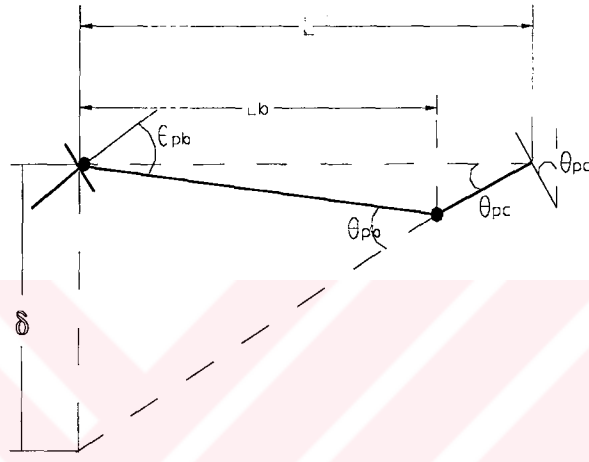


Şekil 5.10. Kiriş mekanizması durumu [49]

Şekil 5.11'de kiriş ve kolondaki plastik şekil değiştirmelerin geometrisi görülüyor. Bu şekil değiştirmeler küçük olduğundan kirişlerdeki ve kolon uçlarındaki plastik dönmeler arasında şu şekilde ilişki kurulabilir. $\delta = L\theta_{pc} = L_b\theta_{pb}$ ve Bağıntı (4.8)'de θ_{pc} yerine yazılmak suretiyle:

$$\theta_{pb} = \theta_{pc} \frac{L}{L_b} = \frac{\Delta_u - \Delta_y}{rL_c} \frac{L}{L_b} \quad (5.9)$$

haline gelir.



Şekil 5.11. Kiriş mekanizması durumunda bir kirişteki plastik deformasyonlar [49]

Bağıntı (5.8) ve (5.9)'da yanal deplasmanlar r . kat üst döşeme hizasından temel seviyesine göre göreceli olarak ölçülmüştür. Ayrıca, bu iki denklemde rL_c yaklaşık olarak $rL_c - 0,5L_{pc}$ yerine yazılmıştır. Çünkü L_{pc} rL_c 'ye kıyasla çok küçüktür. Bağıntı (5.9) yeniden düzenlenerek r . kat üst kotundaki yanal deplasman limit eğrilik durumunda bina tabanına rölatif olarak kiriş mafsallarındaki dönmeler cinsinden yazılırsa :

$$\Delta_u = \Delta_y + \frac{rL_c L_b}{L} \theta_{pb} \quad (5.10)$$

şeklinde olur. Burada θ_{pb} , $(\varphi'_{ub} - \varphi'_{yb}) \sum L'_{pb}$ veya $(\varphi_{ub} - \varphi_{yb}) L_{pb}$ değerlerinden küçüğüne eşittir.

Plastik mafsallarda pozitif momentler nispeten seyrek olarak kritik olur. Çünkü toplam plastik mafsal uzunluğu daha büyüktür ve kesit döşeme katkısından dolayı (tabla varlığı nedeniyle) daha sünektir. Buradaki toplam plastik mafsal uzunluğu kritik kesitin her iki yanındaki plastik mafsal uzunluğu toplamıdır. Bu nedenle negatif moment plastik mafsallarıyla sınırlandırılmıştır. Öte yandan kolon tabanlarındaki plastik mafsallarda:

$$\Delta_u = \Delta_y + rL_c \theta_{pc} \quad (5.11.a)$$

$$\theta_{pc} = (\varphi_{ucL} - \varphi_{ycL})L_{pc} \quad (5.11.b)$$

$\mu_\Delta = \Delta_u / \Delta_y$ ve Denklem (4.10)' dan kiriş mafsalları cinsinden deplasman süneklik oranı:

$$\mu_\Delta = 1 + \frac{rL_c L_b}{L} \frac{\theta_{pb}}{\Delta_y} \quad (5.12)$$

bulunur. Denklem (5.12)'deki Δ_y ifadesi, Denklem (5.4)'de verilmiştir. θ_{pb} genellikle negatif moment plastik mafsalındaki dönme $[(\varphi_{ub} - \varphi_{yb})L_{pb}]$ değeridir. Örneğin, gerekli deplasman sünekliği $\mu = 4$ ve $L_{pc} = 0.7h$ için: $L_c = 8h$, $L_b = 2/3L$, $L_{pb} = 0.7h$, $\beta_1 = 0.6$, $\beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_r = 0.5$ ve $\alpha\varphi_{yb} = \varphi_{c1} = \varphi_{c2} = \dots = \varphi_{cr}$ olur. Burada h kiriş derinliği, α ise kiriş akma eğriliği ile kolon eğriliğini ilişkilendiren bir katsayıdır. Denklem (5.12)'ye göre $\alpha = 1$ durumunda kirişteki eğrilik sünekliği ($\mu_\varphi = \varphi_{ub} / \varphi_{yb}$) ihtiyacı $r = 3$ için 16.2; $r = 10$ için 17.6 olmaktadır. Şu halde, kiriş kesitlerinde ihtiyaç duyulan eğrilik sünekliği ihtiyacı hesaplanabilir. Gerekli eğrilik sünekliği ihtiyacı binadaki kat adedi ile çok fazla değişmemektedir. Derin kirişler olması halinde ve kolonlar akmaya yakın iken akma kirişlerde başlarsa $\alpha > 1$ dir. $\alpha = 3$ ise gerekli eğrilik süneklik faktörü (μ_φ) bir önceki örnekte $r = 3$ için 46.7 ve $r = 10$ için 50.7 dir. Buradan da anlaşılıyor ki; akma ilk olarak kirişlerde başlasa bile kolonların kirişlerden daha fazla esnek olma tehlikesi $\varphi_{ub} / \varphi_{yb}$ için olduğu kadar büyük olmayacaktır. Çünkü pozitif moment mafsallarında plastik mafsal uzunluğu daha

büyüktür. Ayrıca Denklem (5.11)'den deplasman sünekliliği oranı kolon tabanındaki mafsallar cinsinden :

$$\mu_{\Delta} = 1 + r L_c \frac{\theta_{pc}}{\Delta_y} \quad (5.13)$$

yazılabilir. Denklem (5.13)'deki Δ_y değeri Denklem (5.4)'de verilmiş olup $\theta_{pc} = (\varphi_{uc1} - \varphi_{yc1})L_{pc}$ dir. Örneğin gerekli deplasman sünekliliği ihtiyacı 4 ve $L_{pc} = 0.7h$ için: $L_c = 8h$, $\beta_1 = 0.6$, $\beta_2 = \beta_3 = \dots \dots \dots \beta_r = 0.5$ ve $\varphi_{yc1} = \varphi_{c1} = \varphi_{c2} = \dots \dots \dots = \varphi_{cr}$ olur. Burada h kolonun çalışma yönündeki boyutudur.

Denklem (5.13)'den görülüyor ki, eğrilik sünekliliği oranı ihtiyacı kolon tabanında $r=3$ için $\varphi_{uc1}/\varphi_{yc1} = 11.2$, $r=10$ için $\varphi_{uc1}/\varphi_{yc1} = 12.1$ olmaktadır. Sonuç olarak kolon tabanında gerekli eğrilik sünekliliği ihtiyacı kolon mekanizması olması halinde gerekli olan kadar büyük değildir. Denklemler (5.7), (5.12) ve (5.13), verilen bir deplasman sünekliliği ihtiyacını gerçekleştirmek için gerekli eğrilik sünekliliği oranının mertebesini göstermektedir. Özellikleri verilen bir çerçevede bu denklemler tasarımın yeterliliğini araştırmak için kullanılabilir.

Türetilen bağıntılar çerçevenin bütün plastik mafsallarda eşzamanlı olarak akmaya ulaştığı kabulünün basitleştirilmesi temeline dayanmaktadır. Ayrıca çeşitli deprem yönetmeliklerinin önerdiği eşdeğer yatay yüklemeden elde edilen eğilme momenti biçimi (kalıbı) varlığı kabul edilmiştir. Deprem yönetmeliğinin verdiği eşdeğer statik yatay yükleme (Şekil 5.5) titreşimin 1. moduna karşılık gelmektedir. Yüksek yapılar için, titreşimin diğer modları da önemli etkiye sahiptir ve eğilme momenti biçimi üzerinde köklü değişikliğe sebep olabilir. Bu durumda az sayıda plastik mafsallarda eşzamanlı olarak oluşur. Bundan ötürü, eşdeğer statik yatay yükleme yaklaşımı sadece bir yol gösterici olarak alınabilir.

5.4. Göçme Mekanizmalarının İrdelenmesi

Plastik mafsallardaki dönmelerinin en küçük olduğu mekanizma şekli enerji tüketmede en uygun mekanizma durumudur. Benzer şekilde, plastik mafsalların yapı sistemi üzerindeki dağılımı da aynı derecede önemlidir. Kapasite tasarımının birinci amacı zayıf kat oluşumunu önlemektir. Çerçeve içinde kolonlar kirişlere kıyasla daha mukavemetli yapıldığı takdirde bu sonuca ulaşılabilir[51]. Mümkün olduğunca kolon mafsallaşmasından kaçınmak için kolonlar kirişlere kıyasla kuvvetli yapılmalıdır. Çünkü kiriş mafsallarında enerji tüketilmesi daha verimli olmaktadır. Eleman bazında bakıldığında, kolon eksenel basıncının büyük olması halinde bile, sargı donatıları sayesinde büyük dönme sünekliğine ulaşılabilir. Fakat sistem bütünlüğü içinde, kolon mekanizması oluşması durumunda, elastik olmayan büyük kat ötelenmeleri yüzünden P- Δ etkisi önemli mertebelere ulaşır. Bu takdirde kolonlarda yatay yük taşıma kapasitesi düşer.

Çerçeve sistemlerin süneklik ihtiyaçlarının belirlenmesi için yapılan analitik çalışmalar sistem sünekliğine etki eden faktörlere ışık tutmaktadır. Diaz, Mendoza ve Estava [22] tarafından 7 ve 14 katlı iki yapı üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada sistem özellikleri şöyledir:

- her iki yapıda yükseklik/genişlik oranı 2.5’den büyüktür,
- bina yüksekliği boyunca yanal rijitlik değişimi ve kütle dağılımı yaklaşık üniiformdur.

Sistemler,

- a) Elasto-plastik kolon kiriş davranışı,
- b) Elasto-plastik kolon kiriş davranışı ve yapı-zemin etkileşimi,
- c) Elasto-plastik kolon kiriş davranışı, yapı-zemin etkileşimi ve P- Δ etkisi,
- d) Elasto-plastik kolonlar, rijitliği azaltılmış kirişler,yapı-zemin etkileşimi ve P- Δ etkisi,

olmak üzere 4 kategoride rijit ve kayma çerçevesi şeklinde iki ayrı model üzerinden incelenmiştir.

Sonuç olarak, 7 katlı yapıda; ortalama maksimum kat süneklikleri 5. kata kadar hemen hemen aynı, son iki katta gittikçe azalmaktadır. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alındığında sağlanması gerekli süneklik ortalamaları %20 artmaktadır. P- Δ etkisi de davranışı oldukça fazla etkilemiştir. Rijit çerçeve modelinde, süneklik ihtiyacı yapı yüksekliği boyunca düzgün dağılırken; kayma çerçevesi modelinde süneklik ihtiyacının özellikle alt katlarda bariz bir şekilde yoğunlaştığı gözlenmiştir.

14 katlı yapı için; elasto-plastik kolon davranışı, yapı-zemin etkileşimi ve P- Δ etkisi altında 1. katta süneklik ihtiyacı 3-4 mertebesinde, üst katlarda giderek azalmakta ve 1'e kadar düşmektedir. Kayma çerçevesi modelinde ise 1. katta çok büyük, 2-11 katlarda nispeten düşük ve birbirine çok yakın, 11-14 katlarda ise yine büyük süneklik ihtiyacı görülmektedir. P- Δ etkisi bu yapıda özellikle 1. katta süneklik ihtiyacını çok artırmaktadır.

Genel olarak kayma çerçevesi ve rijit çerçeve arasında süneklik ihtiyacı bakımından farklılık görülmüştür. Her iki modelde de 1. katlarda süneklik ihtiyacı büyük olurken ara katlarda kayma çerçevesi modelinde süneklik ihtiyacı hem rijit çerçeveden hem de kayma çerçevesinin 1. katında hesaplanandan daha düşüktür. Özellikle 14 katlı yapı için bu olgu açıkça görülmektedir.

“Güçlü kolon-zayıf kiriş” tasarım ilkesinin dikkatli uygulanmasıyla süneklik ihtiyacının belirli katlarda yoğunlaşması önlenabilmektedir[22]. Şekil 5.8’de görülen kolon mekanizması tehlikelidir. Çünkü plastik deformasyonlar yalnızca bir kata ait kolonlarda olmaktadır. Büyük depremlere maruz yüksek yapılarda bu mekanizmada yeterli sünekliğin sağlanması olası değildir. Şekil 5.10’daki kiriş mekanizmasının bağıl olarak daha iyi olduğu açıktır. Çünkü kiriş kesitinde gerekli süneklik daha kolay sağlanabilir. Kiriş mekanizmasının gerçekleşmesinden emin olmak için kolonlar plastik mafsallı olmayacak kadar yeterince mukavemetli olmalıdır. Kolon uçlarında donatı detayına dikkat edilmelidir.

Plastik dönmelerin oluşabilmesi için etriye veya spiral şeklinde enine donatılar bu detaylar için kullanılabilir.

Göçme şekli olarak kiriş mekanizması kolon mekanizmasına tercih edilmeli, enerji tüketimi öncelikle kiriş plastik mafsallarında olmalıdır. Bu bağlamda bir genelleme yapılacak olursa, kiriş plastik mafsallarında eğrilik sünekliği sistem için gerekli deplasman sünekliğinden 4 kat büyük olmalıdır ($\mu_\varphi \geq 4\mu_\Delta$)[49].

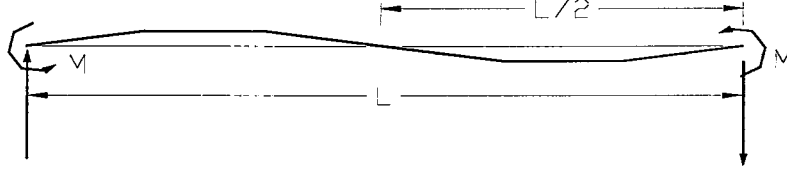
5.5. Eğrilik Sünekliğinin Doğrusal Olmayan Dinamik Analizle Belirlenmesi

Deprem hareketine responsu doğrusal elastik olmayan çok katlı karmaşık çerçevelerde statik göçme mekanizmasına dayalı yaklaşık metotlar gerekli eğrilik sünekliği oranını belirlemekte yeterli olmayabilir. Çok katlı yapıların doğrusal olmayan davranışlarına etki eden pek çok değişken olduğundan çerçeve dinamik analizlerinden genel bir sonuç çıkarmak da güçtür. Örneğin, yer hareketinin cinsi önemli bir etkidir. Bir yapı, elemanlarında düzgün veya düzgüne yakın eğrilik sünekliği olacak şekilde projelendirilmiş olsa bile; farklı bir yer hareketi karşısında bazı elemanlarda beklenenden çok farklı eğrilik sünekliği ihtiyacı ortaya çıkabilir. Görülüyor ki, çok katlı çerçevelerde gerekli eğrilik sünekliğinin ne mertebede olduğunu belirlemek için farklı özelliklerde sanal yer hareketleri ile çok sayıda doğrusal olmayan dinamik analiz yapılmalıdır. Bu analiz sonuçlarından çıkarılan bazı sonuçlar şöyle ifade edilebilir[49].

Bir çerçevenin deplasman sünekliği, elastik davranış yüklemesi ile tasarlanmış tek serbestlik dereceli ve bu çerçeve ile aynı kuvvet-deplasman özelliklerine sahip bir çerçeve ile aynı mertebededir. Elemanın dönme süneklik oranı, maksimum respons durumunda eleman ucundaki dönme miktarının ilk akma başlangıcı anındaki dönme miktarına oranıdır. Gerekli eğrilik sünekliği oranı ise, önceden kabul edilen belirli bir plastik mafsallardaki eğrilik dağılımından bulunabilir. Örneğin bir elemanın uçlarındaki momentler aynı şiddette fakat ters

işaretli ise, ve eleman boyunca eleman eksenine dik dış yükleme yoksa, elastik teoriye göre

eleman uçlarındaki dönme $\theta = \frac{ML}{6EI}$ şeklindedir.



Şekil 5.12. Simetrik çift eğrilikli eleman

Şekil 5.12’de; L, eleman boyu; EI, kesit eğilme rijitliği; M_y ise ilk akma momentidir. Akma eğriliği $\varphi_y = M_y/EI$ dir. Buradan $\theta_y = \varphi_y L/6$ yazılabilir. Eleman uçlarında bu aşamadan sonra oluşacak dönmeler (θ_p) plastik dönmelerdir. $\theta_p = (\varphi_u - \varphi_y)L_p$ olup toplam uç dönmeleri:

$$\theta_u = \theta_y + \theta_p \quad (5.14.a)$$

$$\frac{\theta_u}{\theta_y} = 1 + \frac{\theta_p}{\theta_y} = 1 + 6 \frac{L_p}{L} (\frac{\varphi_u}{\varphi_y} - 1) \quad (5.14.b)$$

$$\frac{\varphi_u}{\varphi_y} = 1 + \frac{L}{6L_p} (\frac{\theta_u}{\theta_y} - 1) \quad (5.14.c)$$

Burada φ_u eleman ucunda elastik ötesi evredeki eğrilik ve L_p ise eşdeğer plastik mafsal uzunluğudur. Örneğin $\theta_u/\theta_y=8$ ve $L_p/L=0.1$ olması halinde Denklem (5.14)’e göre $\mu_\varphi=12.7$ olmaktadır. μ_φ değeri L_p/L oranı düştükçe yükselir. Eleman eksenine dik yükleme olması durumunda θ_y ’nin tanımı daha zorlaşacaktır. Ne var ki, verilen moment şekli ve plastik deformasyonlar için gerekli φ_u / φ_y değeri bulunabilir. Açıktır ki; eğrilik süneklik oranı

(ϕ_u/ϕ_y) eleman için dönme süneklik oranından daha anlamlı bir endekstir. Çünkü θ_y eleman özellikleri ve yükleme durumuna bağlı olup θ_y için daima geçerli belirli bir ifade yazmak mümkün değildir.

Şekil 5.12’de verilen simetrik deformasyon durumu için çerçeve dinamik analizleri sıklıkla dönme sünekliği faktörü (θ_u/θ_y) elemanları iyi düzenlenmiş çerçevede hesaplanan deplasman sünekliği faktörünün iki katıdır. Ancak çerçevede yumuşak kat varsa bu takdirde dönme sünekliği ihtiyacı bu katlar için çok daha büyüktür.

Süneklik ihtiyacının yapının yumuşak kısımlarında yoğunlaşması sismik tasarımda önemli bir noktaya işaret eder. Klasik tasarımda, statik yükler için yapıda aşırı mukavemetli bölümlerin bulunması mukavemeti düşürmez. Sismik tasarımda ise, enerji yutumu plastik mafsallarda olacağından, yapıda aşırı mukavemetli kısımların bulunması, eğrilik sünekliği ihtiyacının lokal olarak yoğunlaşması sonucunu doğurur ve yapı bu sebepten hasara uğrayabilir. Çünkü bu noktalar çok yüksek elasto-plastik deformasyon yapmaya zorlanırlar. Öyleyse yapıda, yumuşak bir kısmın olması adeta bir sigorta gibidir. O noktanın mukavemetine ulaşıldığında çerçevenin geri kalan kısmı elastik bölgede kalacaktır. Bir yapının yumuşak kısımları bulunması, ya o kısmın zayıf olmasından ya da diğer kısımların görece olarak aşırı mukavemetli olmasındandır. Bu nedenle sismik tasarımda hem gereğinden düşük, hem de gereğinden yüksek mukavemetli elemanlar tehlikelidir.

5.6. Sistem Sünekliğine Etki Eden Faktörler

Betonarme yapılarda sistem sünekliğini etkileyen birçok etken vardır. Kiriş ve kolonlarda sünekliği etkileyen faktörler doğrudan veya dolaylı olarak sistem sünekliğine de etki ederler. Bir yapıda ulaşılabilecek süneklik oranı; yapı elemanlarında kullanılan malzemeye, yapı taşıyıcı sistemine ve geometrisine, yükleme hızına, yapı elemanlarının bağlantı durumlarına ve meydana gelebilecek lokal gerilme yoğunlaşmalarına, yapı-zemin

etkileşimine, dolgu ve perde duvarların etkisine, deprem hareketinin karakteristik özelliklerine, yapıda bulunması olası (planda ve düşey doğrultuda) düzensizliklere, tersinir yükleme etkisine ve iki eksenli yükleme etkisine bağlıdır[24]. Bu etkenlerden bazıları aşağıda irdelenmektedir.

5.6.1. Tersinir Yükleme Etkisi

Şiddetli deprem etkisindeki yapılarda elastik olmayan şekil değiştirmeler görülür. Deprem hareketinde meydana gelen yön değiştirmeden dolayı malzeme gerilme-şekil değiştirme eğrisi çevrimsel bir davranış gösterir. Bu türün en basit modeli ideal elasto-plastik malzeme davranışdır[17]. Gerçekte betonarme elemanların davranışı buna benzemekle birlikte biraz farklıdır. Özellikle tersinir yükleme altında önemli bir rijitlik kaybı olur. Rijitlik kaybı ile birlikte eğilme mukavemetine ulaşıldığında büyük deformasyonlar meydana gelir. Rijitlik kaybı oldukça yapının titreşim periyodu büyür. Mukavemet ve rijitlik kaybının önemli bir sebebi de kesme kuvvetinin tümünün donatı tarafından karşılanmasına neden olan kesitteki çatlaklardır. Çatlakların açılıp kapanması ve donatıdaki Bauschinger etkisi^{*} nin moment-eğrilik diyagramına etkisi döngünün kısılması ve eğrinin yuvarlaklaşması biçiminde olur. Böylece eğri altındaki alan ideal elasto-plastik davranışta olduğundan daha küçük olmakta ve dolayısıyla daha az enerji yutulmaktadır. Bu durum doğrudan çerçevenin deprem hareketine tepkisini etkilemekte sistemin sünekliğini düşürmektedir. Rijitlik kaybı periyodun büyümesine neden olmaktadır. Periyodu büyük yapılarda davranış ivmesi küçülmekte; periyodu küçük yapılarda ise davranış ivmesi büyümektedir. Düşük periyotlu ($T=0.3$ s) yapılarda, rijitlik kaybı olmasıyla, eşdeğer elastik yapıya kıyasla daha büyük deplasman sünekliğine ihtiyaç vardır. Çerçevelerde yük-deplasman histerezis döngüsünün şekli kayma deformasyonlarından ve kolon-kiriş düğüm noktalarında donatının yeterince bağlanmamasından da etkilenir. Tersinir yanal yük düğüm noktasında var olan yüksek kesme gerilmesinin yönünü ters çevireceğinden diyagonal çekme çatlaklarının açılıp kapanmasıyla kesme mukavemeti azalır. Böyle düğüm noktalarının yanal donatılarla sarılması gerekir.

* Tersinir yükleme durumunda; birinci tekrarda akmaya ulaşıldıktan sonra yük yön değiştirdiğinde, ikinci kere akmaya ulaşılmadan önce gerilme-şekil değiştirme eğrisinin doğrusallığı bozulmaktadır. Buna Bauschinger etkisi denilmektedir.

5.6.2. İki Eksenli Yükleme Etkisi

Uygulamada sismik yüklerin yapının asal eksenleri doğrultusunda olduğu, aynı anda bu eksenlerden yalnız birinin doğrultusunda etki ettiği kabul edilir. Oysa deprem yükleri herhangi bir yönden etki edebilir ve bu yön yapı asal eksen doğrultuları ile genellikle çakışmaz. Eşzamanlı iki eksenli yükleme durumunun çerçeveler üzerindeki etkisi şöyle ifade edilebilir[35].

- Kolonlarda iki eksenli eğilme kolon eğilme mukavemetini düşürür. Kirişlerden kolonlara uygulanan bileşke moment büyür. Böylece plastik mafsalların kirişlerden önce kolonlarda olma ihtimali artar.
- Akma anında kolonlara etkiyen kesme kuvveti tek eksenli yüklemedeki kesme kuvvetinden daha büyük olur.
- Kolon-kiriş düğüm noktaları da benzer şekilde yüksek kesme kuvvetlerine maruz kalır. Plastik mafsallın her iki yönde birden olmasıyla düğüm noktasındaki sargı etkisi azalır.

Bu nedenlerden dolayı yapı global süneklik ihtiyacı artmaktadır.

5.6.3. Perde ve Dolgu Duvarların Etkisi

Deprem tehlikesine maruz yapıların hesabında veya mevcut yapıların güvenlik tahkiklerinde kuvvet yerine yer değiştirmelerin kontrol edilmesi gerektiği düşüncesi yayılmaktadır.[34,57]. Son yıllarda meydana gelen bazı depremlerden (Erzincan,1992, Northridge,1994, Kobe,1995) sonra yapılan gözlemler, yalnızca davranış spektrumu yardımıyla yapılan yer değiştirme hesaplarının gerçek süneklik talebini tahmin etmede yetersiz kalabildiğini ispat etmektedir. Özellikle zemin katta ortaya çıkan süneklik talebi, yanal atıma sahip fayların doğurduğu yakın mesafedeki yer hareketinin içerdiği uzun periyotlu yer değiştirme sinyali yardımıyla izah edilebilmektedir (Iwan,1996)[38].

Erzincan'da hasar değerlendirmesine tabi tutulan 46 resmi binanın veri tabanı olarak kullanıldığı bir araştırma yapılmıştır(Gülkan, v.d. 1997) [34]. Binalarda gözlenen hasar kolon ve duvar endekslerine çevrildiği zaman azalan endekslerin artan hasar anlamına geldiği görülmektedir. Kolon veya perde duvar alanlarının plan alanına oranı olan bu endekslerin ortaya çıkacak süneklik taleplerini kontrol ettiği görülmektedir. Örneğin Erzincan(1992) depremi D-B bileşeni için düzgün bir kayma kirişinde rölatif kat yer değiştirmesi oranı %5 sönüm için her zaman %1 'in üzerinde olmaktadır. Bu da gösteriyor ki süneklik talebi çok büyüktür. Oysa bir konsol gibi çalışan perde duvarın yatay yüklerin tamamını karşıladığı düşünülürse periyot Denklem (5.15)'deki gibi yazılabilir.

$$T = 1,78 H^2 \sqrt{\frac{m}{EI}} \quad (5.15)$$

Burada, H bina yüksekliği, m birim kütle, EI eğilme rijitliğidir. Süneklik oranının 4-5 mertebesini aşmadığı durumlar için elasto-plastik sistemlerin mutlak yer değiştirmeleri fazla değişiklik göstermez[34]. Sönüm oranı %5, konsol ucundaki yer değiştirme $1.5S_d$, p duvar yüzdesi, $S_d = 0.105T$, $A_0 = 0.4$ alınırsa Denklem (5.15):

$$\frac{\delta_{u\phi}}{H} = 1.85 \frac{H}{D} \sqrt{\frac{w}{E_p g h}} \quad (5.16)$$

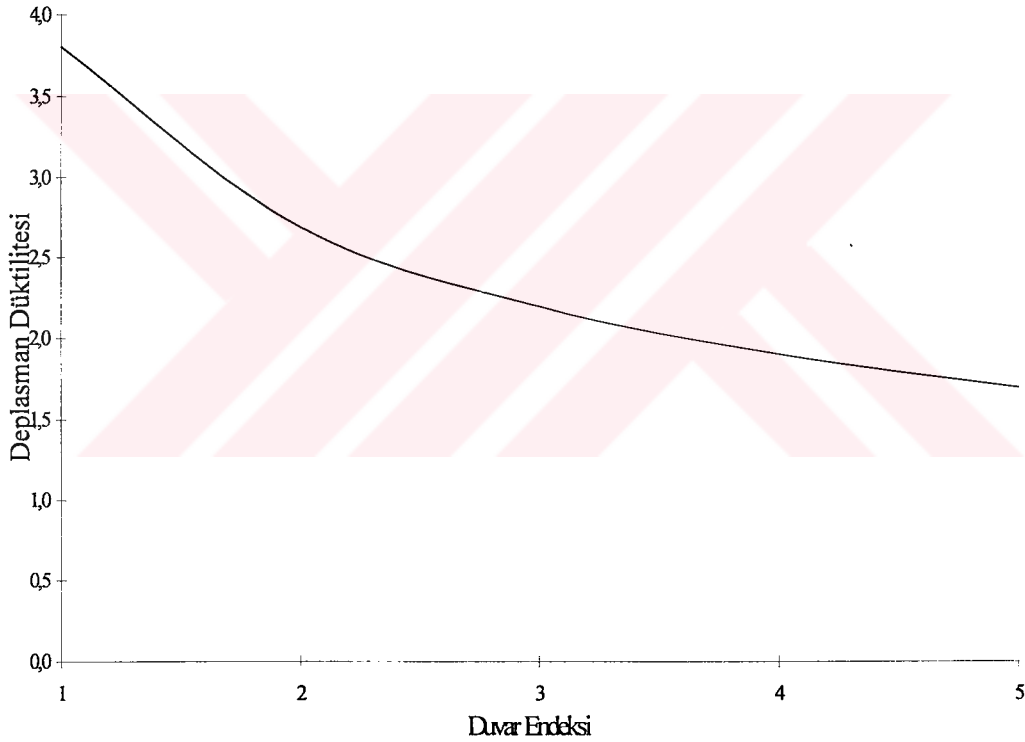
durumuna gelir. Bu ifadede tipik değerler yerine konulursa ($w=10$ kPa, $h=$ kat yüksekliği=2.8 m, $E=20000$ Mpa, $g=9.81$ m/s²) ve betonarme davranışının akma başlayıncaya kadar yaklaşık doğrusal olduğundan hareketle, bir konsol için akma eğriliği

$\phi_y = 0.002 / D$ ve akma uç yer değiştirmesi $\delta_y = 0.33\phi_y H^2$ ifadeleri yerine konulursa:

$$\frac{\delta_{u\phi}}{\delta_y} = 0.38 \sqrt{\frac{1}{p}} \quad (5.17)$$

bulunur. Bu denklemin grafiği Şekil 5.13'de görülmektedir. Duvar endeksi arttıkça deplasman sünekliğinin azaldığı görülmektedir. Yapıda perde duvar alanının artması ile rijitlik artmakta, süneklik talebi azalmaktadır.

Dolgu duvarları için de yukarıdakine benzer bir sonuç çıkarılabilir. Erzincan'da hasar gören 46 binada yapılan hasar gözlemlerinde duvar endeksi ve kolon endeksinin artmasıyla orantılı olarak azalan hasar tespit edilmiştir[34].



Şekil 5.13. Global sünekliğin duvar yüzdesi ile değişimi [34]

5.7. Eleman-Sistem Sünekliği İlişkisi

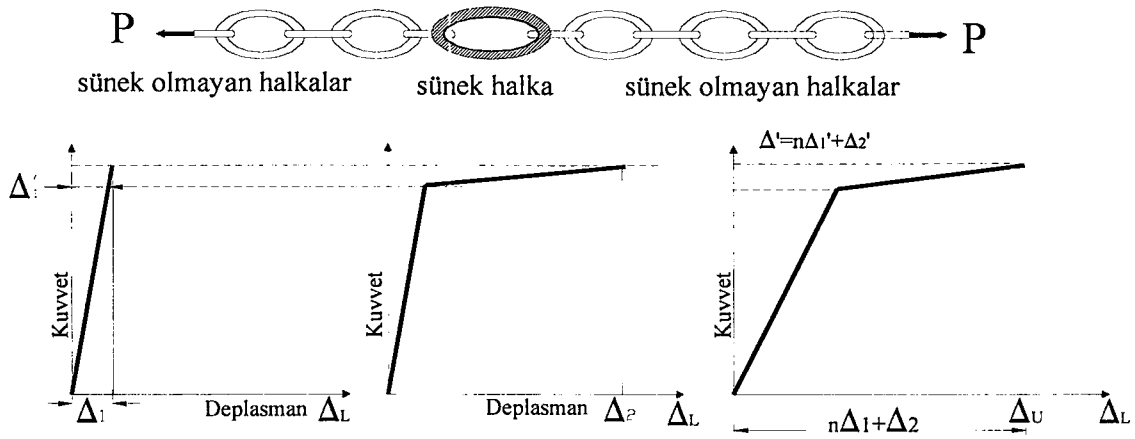
Yapı sisteminin bütünü için elastik olmayan davranışı temsil etmek üzere global bir süneklik oranı bulunabilir. Elemanların boyutlandırılmasında verilen boyutlama ve donatı

ile ilgili sınırlandırmalara uyulması koşulu ile ortalama bir süneklik ihtiyacı oranı ile elastik olmayan deformasyonlar elastik analizle kontrol edilebilir[59].

Kolon mafsallaşmasının sismik performans üzerindeki etkilerini araştırmak için küçük ölçekli güçlü kiriş zayıf kolon çerçeve modeli benzeştirilmiş deprem hareketi altında test edilmiştir. 1. kat yüksekliği diğer katlardan biri az daha yüksek tutulmuştur. 0.35g-1.4g arasında değişen ivmelerde depreme maruz çerçevelerin analizinden şu sonuca varılmıştır[59].

- Yapının en üst katının maksimum yatay yer değiştirmesi ile yer ivmesi arasında doğrusal bir ilişki gözlenmiştir. Buna dayanarak en son katın yanal ötelenmesi yapı davranışını temsil edebilecek bir parametre olarak alınabilir.

En son katın yanal ötelenmesi yapı yüksekliğinin %1'ini geçmeyecek tarzda boyutlandırılmış yapılarda en son kat yanal ötelenmesi yapı yüksekliğinin %1-%1.2 'si arasında çıkmıştır[6].



Şekil 5.14. Düktil (Sünek) zincirde mukavemet limitleri [51]

Şekil 5.14’de belirli bir sünekliğe sahip zincir analojisi görülmektedir. Zincir halkalarından yalnız biri sünektir. Sünek olmayan diğer halkaların mukavemeti sünek halkanın mukavemetinden yüksek olduğu takdirde potansiyel göçme noktası sünek halka olacaktır. Zincir, depremin neden olduğu P çekme kuvvetine maruz olsun. Sünek halkanın mukavemeti zincirin mukavemetini belirler. Şekil 5.14’de verilen örnek, sistem düktilitesi ile yerel süneklik talebi arasındaki ilişkiyi de ortaya koymaktadır. Genellikle bu iki süneklik birbirinin aynı imiş gibi düşünülür

$$\mu = \frac{n + \mu_2}{n + 1} \quad (5.18)$$

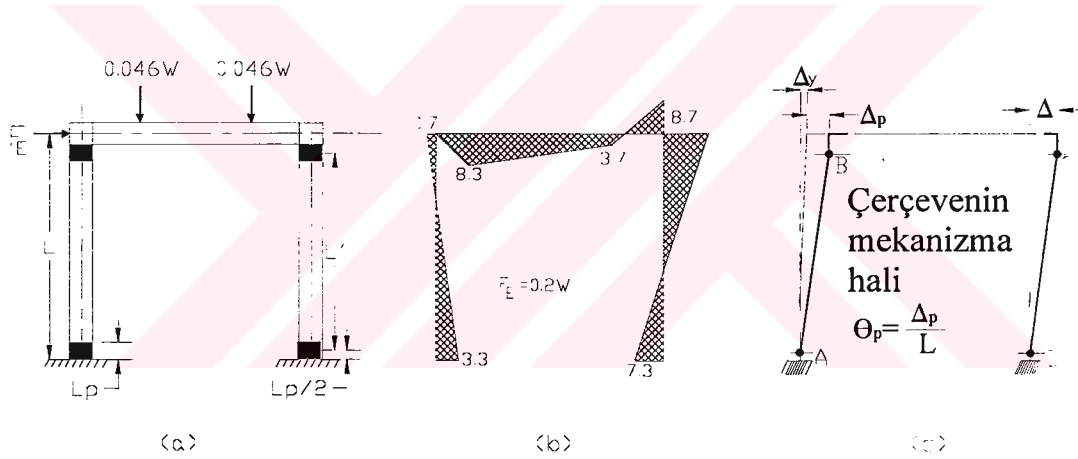
Burada μ zincir sisteminin sünekliği, μ_2 sünek halkanın sünekliği ve n sünek olmayan halka sayısıdır. Örneğin sünek halkadaki kopma uzaması akma uzamasının 10 katı ise ve 8 adet kuvvetli halka varsa zincirin bütünü için süneklik kapasitesi bağıntı (5.18)’den $\mu=2$ bulunur. Bu basit örnekten görüldüğü gibi bazı yapılarda depreme mukabeleyi belirleyen sistem sünekliği zincir sistemindeki en kritik sünek halkanın süneklik kapasitesi ile sınırlandırılmış olmaktadır[51]. Yukarıdaki örnekte sünek halkanın yapıdaki plastik mafsalları temsil ettiği düşünülebilir.

Çok katlı yapılarda eleman-sistem sünekliği ilişkisi çok karmaşık bir hal alır. Bu ilişkinin üç önemli özelliğinden bahsedilebilir. Bunlar:

- a) Plastik mafsall oluşumunun ardışık olması
- b) Kinematik ilişkiler
- c) Akma ve plastik deplasmanın kaynağı

Basit bir portal çerçeve üzerinde bu üç özellik kısaca şöyle açıklanabilir. Örnek çerçevede plastik mafsallar kolonlarda oluşmak için gerekli koşullar sağlanmış olsun. Çerçeve yükün yön değiştirme özelliği de dikkate alınarak simetrik donatılmış olsun. Şekil 5.15(a)’da örnek portal çerçeve, 5.15(b)’de moment diyagramı, 5.15(c)’de plastik mafsallar görülmektedir. Akma ilk

olarak C mafsasında başlamış, bunu D mafsalı takip etmiştir. F_e sismik kuvveti giderek artırıldığında plastik mafsallar A ve B mafsalları sırayla oluşmaktadır. C noktasında plastik mafsall oluşumu için ulaşılması gereken momentin %75'ini yaratacak kadar F_e yükü uygulandığında sistem hala elastik olup, elastik analiz yapılabilir. Eşdeğer elasto-plastik responsun anlamı eşdeğer deplasman $0.75F_e$ yükü altında oluşan elastik deplasmanın 1.33 katıdır. Gittikçe artan F_e yükü altında potansiyel plastik mafsall kapasitesine ard arda farklı zamanlarda ulaşıldığı için her mafsalda deplasman süneklik faktörü ve dönme eğriliği farklı olacaktır. Sistemin sabit bir deplasman sünekliği için; bu mafsallarda eğrilik sünekliği talebi, ilk önce akmaya başlayan mafsalda en büyük; en son akmaya ulaşan mafsalda ise minimum olacaktır[54].



Şekil 5.15. Eleman - Sistem sünekliği ilişkisi için örnek portal çerçeve (a)Çerçeve (b)Eğilme Momenti Diyagramı (c)Mekanizma durumu [54]

Plastik mafsallardaki dönme miktarı ile yanal deplasman ilişkisi eleman uçlarının mesnetlenme biçimi ile değişmektedir. Şöyle ki, Şekil 5.4'de görüldüğü gibi bir konsolun serbest ucundaki toplam yanal deplasmanın çoğu akmadan önce gerçekleşmekteyken Şekil 5.15'deki bir kolonda ise toplam yanal deplasmanın çoğu plastik mafsall dönmesi vasıtasıyla gerçekleşmektedir. Bir düğüm noktasından uzaklaştığı nispette, çerçeve yanal ötelenmesi plastik mafsallardaki dönmeden daha çok etkilenmektedir. Kirişlerdeki plastik mafsallar da açıklık ortasına yaklaştıkça birim dönmeye karşılık gelen deplasman daha büyük olmaktadır.

Şekil 5.15’de verilen çerçeve akma deplasmanları elastik analizle elde edilmiş olup bu elastik akma deformasyonları kirişin, kolonun ve düğüm noktasının fleksibilitelerinden, temeldeki olası yatay deplasman ve temelin dönmesinden ileri gelebilir. Ayrıca elastik kolon deplasmanı eğilme ve kayma deformasyonları olmak üzere iki ayrı etkenden kaynaklanabilir. Sonsuz rijit kiriş, düğüm noktası ve temeller için akma yanal ötelenmesi sıfır kabul edilebilir. Ayrıca kolonlarda kayma deformasyonları ihmal edilebilir ve $L = L'$ olur. Yanal ötelenme yalnızca eğilmeden ileri gelir. Oysa, kolon, kiriş, düğüm noktası ve temeller elastik olduğunda kolonlardaki süneklik talebi önemli ölçüde artar.

Şu halde, bir sistemde mafsalların hangi sıraya göre oluştuğu, elemanların mesnetlenme biçimi, akma deplasmanlarının kaynağı bilinirse en büyük eğrilik sünekliği ihtiyacı duyulan eleman kendiliğinden ortaya çıkar. Şekil 5.15’deki gibi bir çerçeve sistemin elemanları arasındaki süneklik ilişkisi Şekil 5.14’de görülen bir zincirin halkaları arasındaki ilişkiye benzer. Potansiyel plastik mafsallarında eğrilik sünekliği kapasiteleri bilinen bir sistemin deplasman sünekliği plastik mafsalların eğrilik sünekliği cinsinden yazılabilir. Ya da, belirli bir sistem süneklik değeri için, elemanlarda gerekli eğrilik sünekliği tespit edilerek buna uygun kesit hesabı ve boyutlandırmaya gidilebilir.

5.8. Sistem Akma Yer Değiştirmesi Hesabında Mevcut Yöntemler

Sistem sünekliği hesabında tanım gereği iki noktayı çok iyi belirlemek gerekir. Bunlardan biri sistemin akmaya başladığı yanal yük düzeyi veya buna karşılık gelen deplasman değeridir. Diğeri ise, sistemin göçme noktasına ait deplasman veya yanal yük düzeyidir. Bu iki noktanın bulunmasında belirsizlikler vardır. Çünkü, sistemin bir bütün olarak, elastik bölgeden plastik bölgeye geçişi elemanların yük-yer değiştirme eğrilerinde olduğu gibi açık olmadığından sistem kapasite eğrisi üzerinde akma deplasmanı doğrudan görülmemektedir. Sistem akma deplasmanının bulunması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir[46,49,51,54]. Bunlardan ilki bu çalışmada “klasik yöntem” olarak

adlandırılan yöntemdir. Bu yöntemde; sistemin, nominal mukavemetinin yaklaşık olarak %75' i düzeyinde akmaya ulaştığı kabul edilir[46,49]. Bu klasik yaklaşıma göre nominal mukavemetin %75'ine ulaşılan nokta ile başlangıç noktası arasında çizilecek bir doğru sistemin elastik bölümünü temsil etmektedir. Plastik bölüm ise seçilen modele (elasto-plastik, ikili-doğrusal, vs.) göre belirlenmektedir. Bu şekilde çizilen iki doğrunun kesiştiği noktaya tekabül eden deplasman değeri akma deplasmanıdır. Ancak, bu yaklaşımda, akma deplasmanı olduğundan daha az bulunmakta; dolayısıyla hesaplanan sistem süneklik kapasiteleri de çok büyük değerler alabilmektedir[48].

Son yıllarda yapılan çalışmalarla perdeli çerçeveler için yeni bir akma deplasmanı kriteri daha geliştirilmiştir(Paulay, 1998)[52,53]. Burada, perdeli sistemlerde sistem akma deplasmanı eleman akma deplasmanlarından hareketle hesaplanmaktadır. Sistem akma deplasmanı hesabı aşağıda kısaca açıklandığı şekilde yapılmaktadır.

Taşıyıcı sistemi oluşturan perdeler için referans akma eğriliği (ϕ_{yi}), ya da referans akma deplasmanı (Δ_{yi}) tanımlanır. Bir elemanın deplasman süneklik kapasitesi ($\mu_{\Delta max}$), elemanın son limit deplasmanının referans akma deplasmanına oranıdır. Eleman deplasmanları eleman eğriliğinin entegrasyonu ile hesaplandığından referans akma eğriliğine önem vermek gerekir. Moment-eğrilik analizlerinde donatı miktarı, malzeme özellikleri ve eksenel basınç dikkörtgen enkesitli betonarme perde duvarlarda referans akma eğriliğini çok etkilememektedir. Şu halde, $L_w \phi_{yi} = 2\epsilon_y$ yazılabilir. Burada ϵ_y donatı akma şekil değiştirmesidir. Perde duvar boyunca eğriliğin dış yük tesiriyle oluşan momente bağlı olduğu kabul edilirse elemanın referans akma deplasmanı:

$$\Delta_{yi} = \frac{\phi_{yi} h_{wi}^2}{\eta} \approx \left(\frac{2\epsilon_y h_{wi}^2}{\eta} \right) \frac{1}{L_{wi}} \quad (5.19)$$

Burada η , tasarımda kullanılan yatay statik denk kuvvetlerin dağılım biçimine bağlı bir katsayı; h_{wi} ise i. perde duvarın yüksekliği, ϵ_y donatı akma şekil değiştirmesidir. η katsayısı prizmatik konsol perde duvar rijitliği için yazılan Bağıntı (5.20) yardımıyla bulunabilir. Burada V_{Ei} konsol için elastik taban kesme kuvveti, Δ_i konsol perdenin ucundaki yanal deplasman, h_w perde yüksekliği, k ise perde rijitliğidir.

$$k_i = \frac{V_{Ei}}{D_i} = h \frac{E_c I_c}{h_{wi}^3} \quad (5.20)$$

Bir binada bir dizi perde duvar için, Bağıntı (5.19)'da parantez içindeki değerler aynı kalır. Böylece akma deplasmanının eleman uzunluğu ile ters orantılı olduğu ortaya çıkar. Buna dayanarak deplasman sünekliği oranları için bağıl akma deplasmanlarını kullanmak yeterlidir. Bağıl akma deplasmanı perde duvar uzunluğu ile ters orantılıdır. Matematiksel ifade ile (Bağıntı 5.21) :

$$\Delta_{yi} \propto \frac{1}{L_{wi}} \quad (5.21)$$

yazılabilir. Bu bağıntıya dayanılarak akma deplasmanının elemanın dayanımından bağımsız olduğu söylenebilir. Öte yandan, farklı uzunluktaki elemanlar eşzamanlı olarak akmaya ulaşamazlar. Katta burulma olmadığı takdirde, bir sistem için yanal deplasman kapasitesi, plandaki en uzun perde duvarın yanal deplasman kapasitesi ile sınırlandırılmaktadır.

Şekil 5.16'da örnek bir perdeli bina planı ve buna ait yük-deplasman eğrileri görülmektedir. Yük-deplasman ilişkisinin tam elastik-plastik olduğu varsayılmıştır. 2 numaralı perde duvar nominal mukavemetine (V_{n2}) ulaştığında 1 numaralı perde duvardaki kuvvet $V_1 = (\beta/\alpha)V_{n2}$ olacaktır. Bu kuvvet 1 numaralı elemanın nominal mukavemetinden düşük olduğu için 1 numaralı eleman 2 numaralı eleman elastik ötesi deformasyonlar yapmadıkça akmaya ulaşamaz. Bu aşamada 1 numaralı elemandaki deplasman Bağıntı (5.22) ile ifade edilebilir.

$$\Delta_1 = \frac{V_1}{k_1} = \frac{\beta V_{n2}}{\alpha k_1} \approx \Delta_{y1} \quad (5.22)$$

2 numaralı elemanın deplasman sünekliği kapasitesi aşılmadıkça sistem deplasman sünekliği talebi Bağntı (5.23) ile sınırlıdır. Burada sistemin kütle merkezinin akma deplasmanı (Δ_y) Bağntı (5.24) ile verilmektedir.

$$\mu_{\Delta} \leq \beta \frac{\Delta_{y1}}{\Delta_y} + \alpha \mu_{\Delta 2 \max} \frac{\Delta_{y2}}{\Delta_y} \quad (5.23)$$

$$\Delta_y = \beta \Delta_{y1} + \alpha \Delta_{y2} \quad (5.24)$$

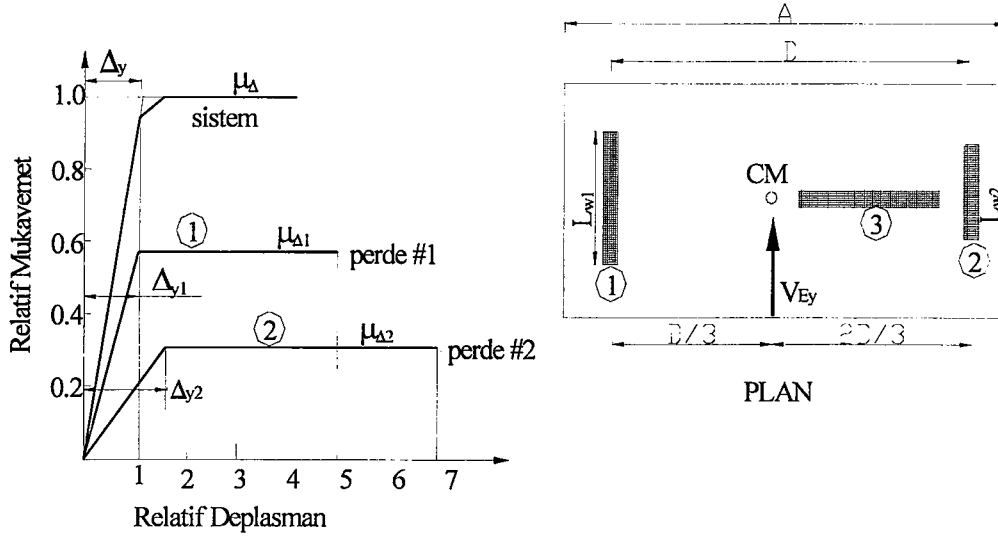
Bağntı (5.23), geometrik sistem parametresi $\Psi = \alpha \Delta_{y2} / \beta \Delta_{y1} = \alpha L_{w1} / \beta L_{w2}$ şeklinde tanımlanarak sadeleştirilebilir (5.25).

$$\mu_{\Delta} \leq \frac{\mu_{\Delta 2 \max} + 1}{1 + \Psi} \quad (5.25)$$

Sistemde 1 numaralı eleman 2 numaralı elemandan önce akmaya ulaştığında 1 numaralı elemanı aşırı deplasman talebinden korumak için sistemin deplasman sünekliği sınırlandırılmalıdır. Bağntı (5.26) bu sınırı göstermektedir. Bağntı (5.25) ile Bağntı (5.26)'dan bulunan değerlerin küçüğü makbuldür.

$$\mu_{\Delta} \leq \frac{\mu_{\Delta 1 \max} + \Psi}{1 + \Psi} \quad (5.26)$$

Bir sistemde elemanların süneklik kapasitelerinden hareketle sistem süneklik talebi yaklaşık olarak bulunabilmektedir. Ya da, belirli bir sistem sünekliğinin sağlanması için, sistemi teşkil eden elemanlarda sağlanması gerekli minimum deplasman sünekliği değerleri bulunabilir.



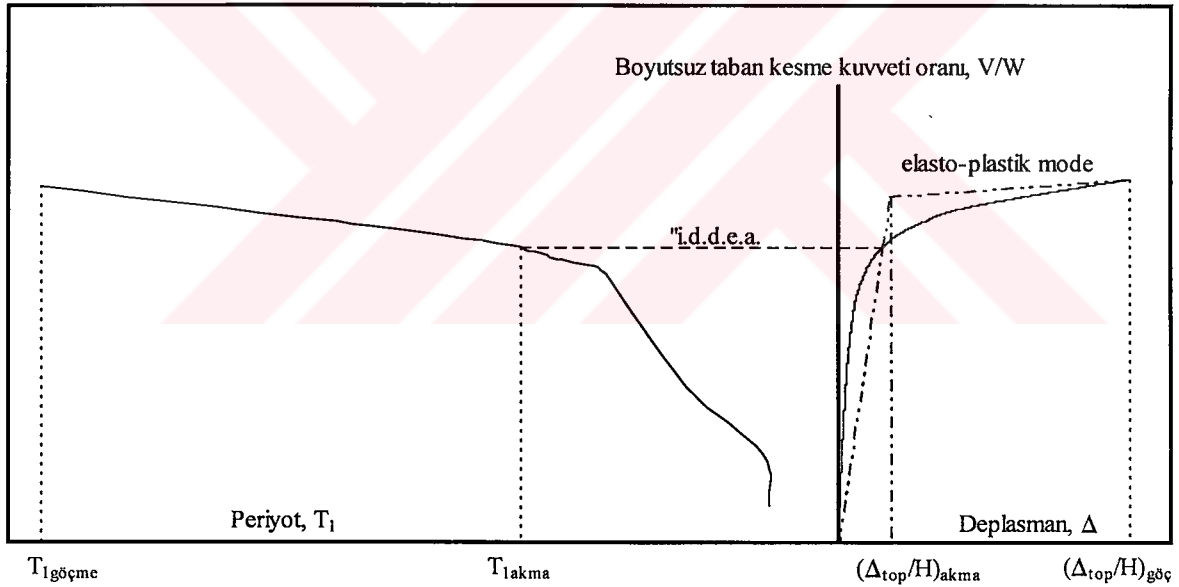
Şekil 5.16. Perdeli bir çerçeve planı ve yük-deplasman eğrileri [53]

5.9. Sistem Akma Yer Değiştirmesi İçin Önerilen Yöntem

Bu çalışmanın ana ögesi olarak sistem akma deplasmanının bulunması için yeni bir yöntem önerilmektedir. Bu yöntem “ilk dikkate değer eleman akması (i.d.d.e.a.)” adı verilmiştir. Bir bina taşıyıcı sisteminde, akma başladığı andan itibaren sistemin temel periyodunun sıçrama yaparak büyümesi, buna karşın taban kesme kuvvetinin sabit kalması veya az miktarda artış göstermesi yöntemin dayanak noktasını oluşturmaktadır.

Bir sistemde akma başlamadan evvel bazı elemanlarda oluşmuş birçok plastik mafsallık olması gerekir. Sistem bir bütün olarak akmaya başladığı andan itibaren taban kesme kuvveti düzeyinde bariz bir değişim olmadığı halde birinci moda karşılık gelen T_1 esas periyodu belirgin biçimde (%100’den fazla) büyümektedir. Bu durum “taban kesme kuvveti (V/W) – birinci periyot (T_1)” grafiği (periyot eksenli kapasite eğrisi) üzerinde görülebilir(Şekil 5.17) Şekil 5.17’de görüldüğü gibi bina birinci periyodundaki sıçramanın başladığı periyot ve taban kesme kuvveti kolaylıkla tespit edilebilir. Bu periyot ve taban kesme kuvveti aynı zamanda özel bir plastik mafsallık oluştuğu ana karşılık

gelmektedir. Başka bir deyişle sitemde öyle bir plastik mafsall oluşmaktadır ki bu andan itibaren bina birinci periyodu sıçrama yapmaktadır. Bu plastik mafsallın oluşumu sistemde ilk dikkate değer eleman akmasıdır. Bundan evvel oluşan plastik mafsallar sistemi akmaya ulaştırmak için gerekli, fakat sonucu itibariyle ilk dikkate değer eleman akmasından çok farklıdır. Periyot eksenli kapasite eğrisinden okunan ilk dikkate değer eleman akmasına ait taban kesme kuvveti deplasman eksenli kapasite eğrisi üzerinde işaretlenerek tespit edilir. Deplasman eksenli kapasite eğrisi üzerinde “ilk dikkate değer eleman akması”nın olduğu nokta ile başlangıç noktası arasındaki doğru davranışı temsil eden modelin elastik bölgesini ifade eden kısımdır. Böylece, ilk dikkate değer eleman akması oluncaya kadar sistemin doğrusal elastik davranış gösterdiği kabul edilmektedir.



Şekil 5.17. Kapasite eğrileri üzerinde ilk dikkate değer eleman akmasının tespiti

Sistem göçme noktasından başlayıp kapasite eğrisini takip ederek birinci doğru ile kesiştirilirse elasto-plastik bir model ortaya çıkar. Modeli oluşturan iki doğrunun kesişim yerine isabet eden yer değiştirme sistem akma yer değiştirmesidir. İkinci doğrunun çiziminde model ile gerçek kapasite eğrisi altındaki alanların eşitliği sağlanmalıdır. Bunun için ikinci doğrunun çiziminde deneme-yanılma yoluyla alanların eşitliği sağlanabilir.

- a) Periyot eksenli kapasite eğrisi ($V/W-T_1$ grafiği) çizilir.
- b) Akma işareti sayılan periyottaki sıçrama noktası ve buna karşılık gelen taban kesme kuvveti tespit edilir. Bu nokta ilk dikkate değer eleman akmasının olduğu andır.
- c) Deplasman eksenli kapasite eğrisi üzerinde ilk dikkate değer eleman akmasının olduğu yer işaretlenir.
- d) Başlangıç noktası ile ilk dikkate değer eleman akması olan nokta arasında bir doğru çizilir.
- e) Bu doğruyu kesen ve göçme noktasından geçen bir deneme doğrusu çizilir. Eğri ve model altındaki alanların eşitliği sağlanıncaya kadar deneme doğruları çizilir. Eşitliği sağlayan deneme doğrusu muteberdir.
- f) Sistem davranışını temsil eden modeli oluşturan bu iki doğrunun kesişme noktasına karşılık gelen deplasman değeri sistem akma deplasmanıdır.

6. STATİK İTME ANALİZİ

6.1. Statik İtme Analizi Tanımı

Yapıların depreme mukabelesini araştırmak için yapılan analiz çeşitlerinden biri de statik itme (pushover) analizidir . Son yıllarda gittikçe ilgi gören bu analizle, potansiyel süneklilik kapasitesi, yapının yatay yüklere dayanımının yeterliliği, elemanların ne zaman ve hangi sıra ile akma ve göçmeye ulaştığı belirlenebilir. Statik itme analizi iki türlü yapılabilir. Birincisi, kuvvet kontrollü itme analizi, ikincisi deplasman kontrollü itme analizidir.

Deplasman kontrollü itme analizinde; yapının, önceden bir göçme deplasman profili belirlenir. Sonuçta bu deplasman profili oluşacak şekilde gerekli yatay kuvvetler hesaplanır. Her adımda belirlenmiş deplasmanlar sabit artımlarla arttırılarak bu adıma ait yatay kuvvetler hesaplanır. Ancak çok serbestlik dereceli bir bina sisteminin göçme deformasyon profili daima aynı olmayıp önceden bilinemez. Göçme için kabul edilecek her deplasman profili için birbirinden farklı kapasite eğrileri elde edilmekte; bu ise kapasiteleri karşılaştırmada güçlük yaratmaktadır Bu yüzden deplasman kontrollü itme analizi çok tercih edilmemektedir.

Kuvvet kontrollü itme analizinde ise birbirleri arasındaki oran sabit olan bir yatay kuvvetler grubu adım adım etki ettirilir. Her adımda bu kuvvetlerin doğurduğu deplasmanlar hesaplanır. Sisteme etkiyen yatay kuvvetler genellikle eşdeğer statik deprem yüklerinin etkime biçimindedir [37]. Analiz, sistem bu kuvvetler grubu altında göçmeye ulaşınca kadar devam eder. İstenilen aşamada sistemin çeşitli karakteristikleri hesaplanabilir.

Kuvvet kontrollü statik itme analizinde maksimum yatay kuvvet dağılımı belirlenmelidir. Çoğunlukla bu dağılım düzgün yayılı, ters üçgensel veya yapının modlarına uyarlanmış biçimde verilmektedir. Ters üçgensel dağılım biçimi pek çok deprem yönetmeliğinin eşdeğer statik yatay yük olarak önerdiği bir dağılım biçimidir. Bu dağılımda yapının yüksekliği ile orantılı olarak yer ivmesinin doğrusal dağılımını öngörmektedir. Her adımda 'i' kata etki eden kuvvet Bağıntısı (6.1) ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta F_i = \frac{W_i h_i}{\sum_{L=1}^N W_L h_L} \Delta V_b \quad (6.1)$$

Burada W_i , i.kat ağırlığını; h_i , i.katın tabandan yüksekliğini; ΔV_b ise bina taban kesme kuvvetindeki artımı göstermektedir. Düzgün dağılımda ise yatay yük kat ağırlıklarından bağımsız olarak binanın tüm katlarına eşit şiddette dağıtılır. Bir katta sabit oranda artan kuvvet Bağıntısı (6.2) ile bulunur.

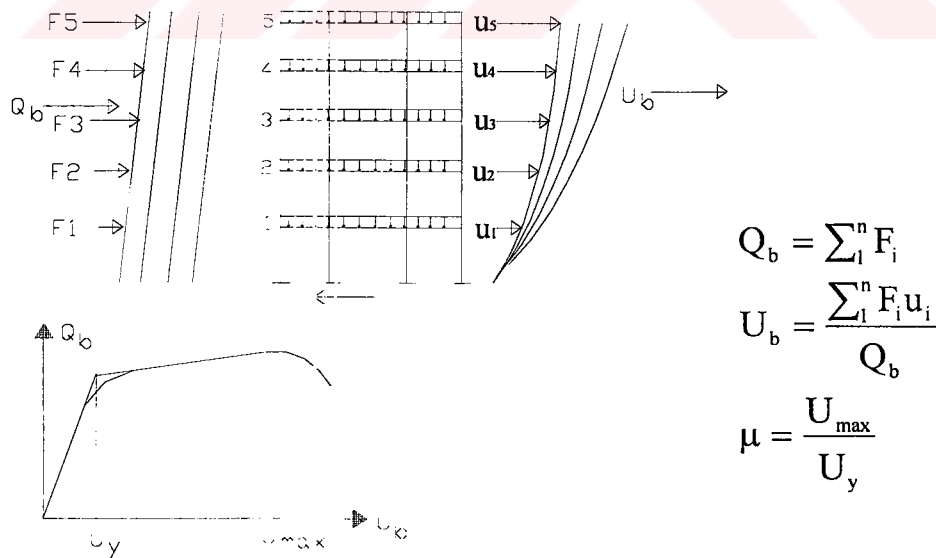
$$\Delta F_i = \frac{\Delta V_b}{N} \quad (6.2)$$

Burada, N binadaki kat adedi, ΔV_b ise taban kesme kuvvetindeki artımdır. Modlara uyarlanmış dağılım biçimi diğerlerinden biraz farklıdır. Burada katlara gelen artımlı kuvvetlerin artım oranları sabit değildir. Yapı elastik sınırı aşıldıktan sonra kuvvetlerin elastik dağılım biçimi artık geçerli olamaz. Modlara uyarlanmış dağılım yanal yük dağılımındaki değişimi yakalamak için geliştirilmiştir. Elastik sınır aşıldıktan sonra rijitlik matrisi değiştiği için mod şekilleri de bundan etkilenmektedir. Böylece mod şekillerindeki değişimle rijitlik değişimleri de dikkate alınmış olur. Eğer sadece birinci mod göz önüne alınırsa kuvvet dağılımındaki artım aşağıdaki Bağıntısı (6.3) ile belirlenir.

$$\Delta F_i = \frac{W_i \Phi_{i1}}{\sum_{l=1}^N W_l \Phi_{l1}} V_b - F_i^{\text{old}} \quad (6.3)$$

Statik itme analizi çok kullanışlı ve yararlı bir analiz biçimi olmakla birlikte dinamik analizlerin yerini tutamaz. Çünkü itme analizinde kullanılan statik yatay kuvvetler deprem den ileri gelecek kat atalet kuvvetlerini tam olarak temsil edemez.

Taban kesme kuvvetinin son kat yanal ötelenmesine göre grafiği çizilir. Bu eğri “kapasite eğrisi” adını alır. Kapasite eğrisini çizerken boyutsuz değerlerle çalışmak yararlı olur. Yatay yük taşıma kapasitesi yapı ağırlığına bölünerek; üst kat yatay ötelenmesi de yapı yüksekliğine bölünerek boyutsuz hale getirilebilir. Şekil 6.1’de statik itme analizi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Şematik olarak statik itme analizi[5]

Doğrusal olmayan statik itme analizinde kullanılan program vasıtasıyla çözülen denklem sistemi şu şekildedir [37].

$$[K_t] \{ \Delta u \} = \{ \Delta F \} - \{ \Delta P_v \} - \{ \Delta P_{FR} \} - \{ \Delta P_{HY} \} - \{ \Delta P_{IW} \} + c_{corr} \{ \Delta F_{err} \} \quad (6.4)$$

Burada $[K_t]$: sistem rijitlik matrisi

$\{ \Delta u \}$: yatay deplasman vektörü sabit artımı

$\{ \Delta F \}$: yatay kuvvetler sabit artımı vektörü

$\{ \Delta P_v \}$: viskoz sönüm kuvvetleri sabit artımı vektörü

$\{ \Delta P_{FR} \}$: sürtünme sönüm kuvvetleri sabit artımı vektörü

$\{ \Delta P_{HY} \}$: histeretik sönüm kuvvetleri sabit artımı vektörü

$\{ \Delta P_{IW} \}$: dolgu duvarları kuvvetleri sabit artımı vektörü

c_{corr} : düzeltme katsayısı (genellikle 1 alınır)

$\{ \Delta F_{err} \}$: yapıdaki dengelenmemiş kuvvetler sabit artımı vektörü

6.2. Analizden Sistem Responsunun Çıkarılması

Kapasite eğrisi incelendiğinde, sistemin özellikle akma deplasmanını doğrudan görmek mümkün değildir. Çünkü kapasite eğrisinin elastik bölgeden plastik bölgeye geçişi lineer değildir. Bu nedenle sistemin akma başlangıcını belirlemek için birtakım kabuller yapmak

gereklidir. Bu konuda, literatürde bazı yaklaşımlar mevcut olup Bölüm 5.8’de açıklanmıştır. Öte yandan, bu çalışmanın özünü oluşturan akma deplasmanı için hesap önerisi de Bölüm 5.9 ‘da açıklanmıştır. Ayrıca Bölüm 7’de örnek bina çözümlemeleri ile hem mevcut hem de önerilen yöntem uygulamalarla desteklenmiştir.

Akma ve göçme deplasmanlarının tespitine ait yöntem belli olduktan sonra statik itme analizi sonuçları değerlendirmeye alınabilir. Bu değerlendirmede, sistem sünekliği, kritik elemanların sünekliği ayrı ayrı hesaplanır, sistem ve elemanların kapasite eğrisi çizilir, sistem performans noktası tespit edilir. Performans noktası, akma ve göçme noktası gibi özel noktalarda ve hatta analizin herhangi bir aşamasında sistemin o anki durumu görüntülenerek bütün bunlara ait çeşitli parametreler hesaplanır.

Yapılan değerlendirme sonucunda, yapı sisteminin depreme dayanımı konusunda önemli sayılabilecek bir fikir ortaya çıkar. Tasarımda kullanılmış olan yük azaltma katsayılarının ne düzeyde gerçekleştiği de görülebilir. Ulaşılan sonuçlar yapının bir bütün olarak işlevini güvenliyle yerine getirip getiremeyeceğini gösterir. Sistemin yürürlükteki deprem yönetmeliğine uygun olup olmadığı anlaşılır. Böylece; statik itme analizi mevcut yapıların dayanım düzeylerinin belirlenmesine ve depreme dayanıklı yapı sistemlerinin tasarlanmasına yardımcı olur.

7- UYGULAMA

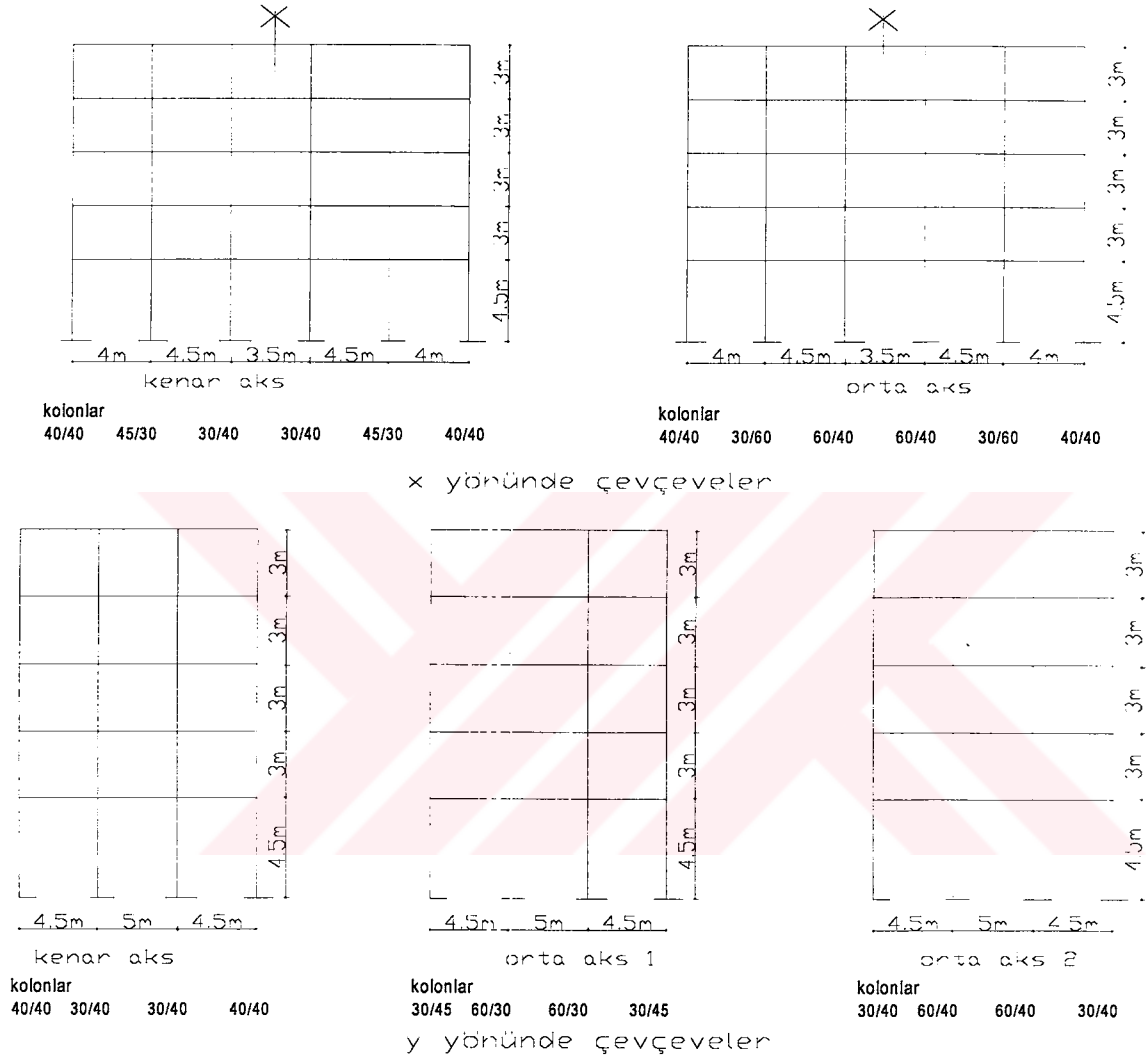
7.1. Çerçevelerin Seçimi

Betonarme bina taşıyıcı sistemleri, deprem yüklerini taşıma şekillerine göre birbirinden farklı dört tipten oluşabilir. Bunlar kolon ve kirişlerden ibaret salt çerçeveler, boşluklu perdeler, boşluksuz perdeler ve boşluklu/boşluksuz perdeli çerçevelerdir. Bu çalışmada, uygulamada en çok karşılaşılan ve mevcut binaların büyük çoğunluğunu oluşturan salt çerçeveler ve perdeli çerçeveler seçilmiştir. Böylece az katlı binaları temsilen 5 katlı salt çerçeve taşıyıcı sistemli bir bina tasarımı yapılmıştır. Çok katlı binaları temsilen de 10 katlı ve perdeli bir bina tasarımı yapılmıştır. Her iki bina planda birbirinin aynı dikdörtgen şeklinde olup asal eksenlerine göre simetriktir. Binaların konut veya işyeri olarak kullanılacağı düşünülmüştür. Tasarımda, çerçevelerin çözümlenmesi için SAP-90 [63] genel analiz programı kullanılmıştır. Binalara ait bazı teknik detaylar Ek 1’de verilmiştir. Her iki bina da TS-500 (1984) ve Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (1997)’e uygun olarak boyutlandırılmıştır. Binaların üzerine oturduğu zemin, aynı yönetmelikte Z3 yerel zemin sınıfı olarak tarif edilen zemin kabul edilmiştir. Binaların önem katsayısı 1 ve birinci derece deprem bölgesinde olacağı kabul edilmiştir. Böylece uygulamada sık karşılaşılan iki tip binanın sünekliğinin bulunması için tasarımı tamamlanan sistemlerin statik itme analizlerine geçilmiştir.

7.2. 5 Katlı Çerçeve Sistemin Statik İtme Analizi (Pushover Analizi)

Statik betonarme ve deprem hesapları tamamlanan bina taşıyıcı sisteminin IDARC-2D analiz programı kullanılarak her iki asal eksen doğrultusunda statik itme analizi yapılmıştır. Programla ilgili ilave açıklamalar Ek 2’de verilmiştir. Analizde programın P- Δ

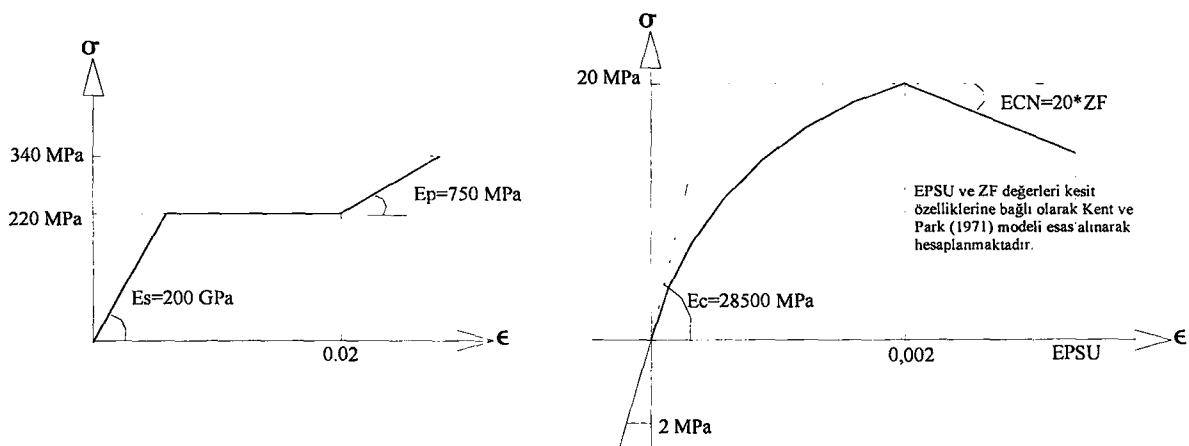
etkisini dikkate aldığı seçenek kullanılmıştır. Bu şekilde ikinci merteye etkilerinin hesaba dahil olması amaçlanmıştır. Bina x ve y yönlerinde ayrı ayrı iki boyutlu çerçevelere



Şekil 7.1 5 katlı binaya ait x ve y yönü çerçeveleri

ayrılmış ve her çerçeve programa tanıtılmıştır. Şekil 7.1 de veri olarak kullanılan çerçeveler gösterilmiştir. Analizde bölme duvarlarının etkisi dikkate alınmamıştır. Yalnızca çerçeve elemanlarından kolon ve kiriş kesitleri programa tanıtılmıştır. Çözüm iki boyutlu olduğundan çerçevelere dik doğrultudaki etkenler analize dahil değildir. Hesap yüklerinden kolon alan paylarına düşen yükler kolon-kiriş düğüm noktalarında bir kütle

olarak kabul edilmektedir. Beton ve donatı çeliğine ait karakteristik özellikler şu şekilde verilmiştir. Beton karakteristik basınç mukavemeti 20 Mpa, karakteristik çekme mukavemeti 2 Mpa, birim boy kısalması %0.2 olup betona ait diğer parametreler Kent ve Park (1971) modelinden alınmıştır. Donatı çeliği için pekleşme etkisini dikkate alan bir model kullanılmıştır. Donatı cinsi BÇ-I olup pekleşme başlangıcında birim deformasyon %2 alınmıştır. Şekil 7.2’de statik itme analizinde kullanılan beton ve çeliğe ait gerilme-şekil değiştirme modelleri görülmektedir. Taşıyıcı elemanların histeretik davranış modeli doğrusal elastik olmayan analizlerin önemli bir ögesidir. Sistemdeki kolon ve kirişlerin histeretik davranışı için üç parametrelili Park histeretik davranış modeli (1987) kullanılmıştır. Bu model rijitlik kaybı, mukavemet azalması ve donatı sıyrılmasına ait kontrol parametreleri vasıtasıyla histeretik davranışı ifade etmektedir. Analizde bu parametrelere değerler verilerek taşıyıcı elemanların histeretik davranışı modellenmektedir. Burada kolon ve kirişlerde donatı sıyrılması olmadığı, bağların tam olduğu, mukavemet azalmasının az miktarda ve rijitlik kaybının orta düzeyde olduğunu kabul eden bir histeretik davranış modeli öngörülmüştür. Programda dikkate alınan elemanın cinsine göre seçilebilecek diğer modeller de mevcuttur.



Şekil 7.2. Çerçeve sistemin analizinde kullanılan çelik ve beton davranış modelleri

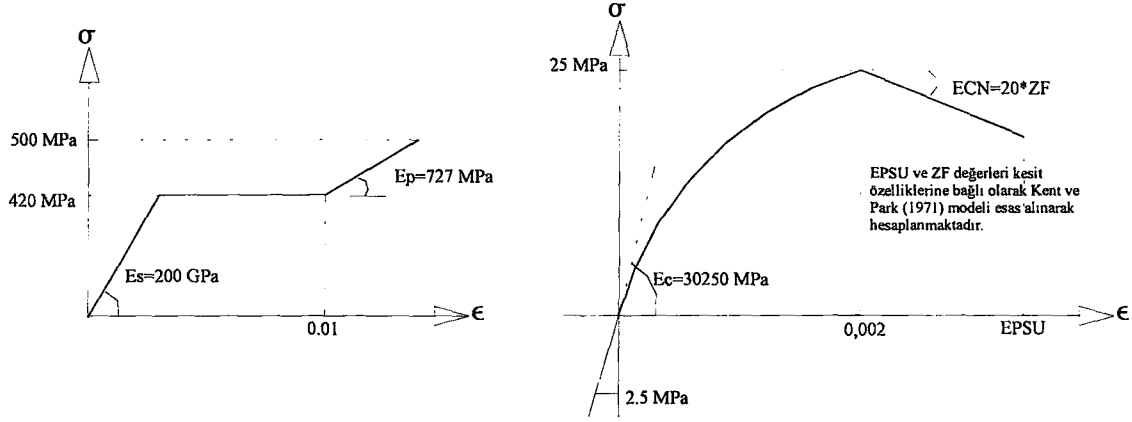
Binanın her iki yön için hazırlanan çerçeve modelleri üzerinde yatay yükler sabit aralıklarla artırılarak kuvvet kontrollü statik itme analizi yapılmıştır. Yatay yüklerin etkime tarzı binanın birinci titreşim moduna uygun olarak verilmiştir. Adım adım devam eden analiz sistem maksimum responsa ulaşınca kadar devam etmektedir. Öte yandan, analizin sona erdirilmesi için iki tane kontrol parametresi vardır. Bunlardan biri en büyük taban kesme kuvveti parametresi, diğeri ise son katın yapabileceği en büyük yanal deplasmandır. Adımlardan herhangi birinde bu kriterlerden biri aşıldığında analiz sona ermektedir. Eğer bu kriterler aşılmadan sistem mekanizma durumuna gelirse bu takdirde analiz mekanizma durumuna ulaşılan adımda kendiliğinden durmaktadır. Sistemin maksimum responsunu görmek için bu parametrelerin göçme haline karşılık gelen değerlerden biraz büyük olması gerekir. Böylece daha küçük adım aralıkları ile çalışarak hassasiyet artırılır. Dolayısıyla, başlangıçta bu parametreler için uygun değerler tahmin edilmiştir. Tahmini değerler sistemin göçme hali ortaya çıkıncaya kadar değiştirilerek analize yeniden başlanmıştır. Böylece, analizi hassasiyet düzeyi yükseltilmiş olarak gerçekleştirmek için uygun değerler elde edilmiştir. X-yönünde analizde en büyük taban kesme kuvveti yapı ağırlığının %15'i, son katın yanal deplasman sınırı yapı yüksekliğinin %5'i, adım sayısı da 500 olarak seçilmiş; sistem maksimum responsa ulaştığında bu değerler sırasıyla %13,6, 3,50 ve 452 olarak gerçekleşmiştir. Y-yönünde analizde de en büyük taban kesme kuvveti yapı ağırlığının %12'si, son katın yanal deplasman sınırı yapı yüksekliğinin %4,5'i, adım sayısı da 500 olarak seçilmiş; sistem maksimum responsa ulaştığında bu değerler sırasıyla %11,2, 4,19 ve 468 olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca, arzu edilen her adımda sistemin ve elemanlarının durumunu görmek için kontrol noktaları mevcuttur. Böylece akma başlangıcı, göçme gibi önemli anlarda sistemin o anki aranan değerlerini görmek mümkün olmaktadır.

7.3. 10 Katlı Perdeli Sistemin Statik İtme Analizi (Pushover Analizi)

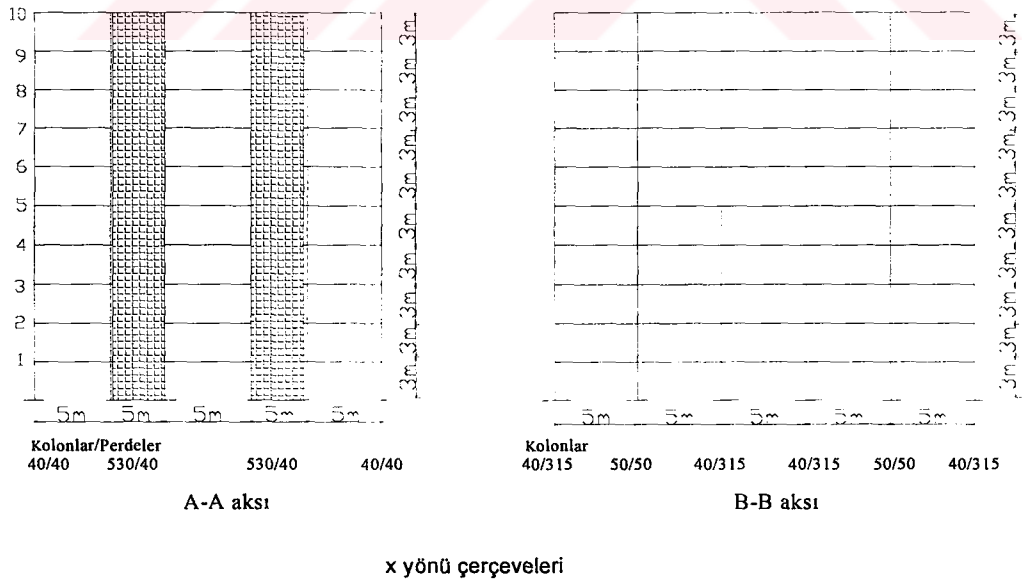
Perdeli çerçeve sistemin de IDARC-2D (Ek 2) doğrusal elastik olmayan analiz programı kullanılarak her iki doğrultuda statik itme analizi yapılmıştır. Analizde ikinci mertebe (P- Δ) etkileri dikkate alınmıştır. Bina x ve y yönlerinde salt çerçeve sistem gibi ayrı ayrı

iki boyutlu çerçevelere ayrılmış ve her çerçeve geometrik özellikleriyle programa tanıtılmıştır. Şekil 7.4 ve 7.5’de sırasıyla x ve y yönündeki çerçeveler gösterilmiştir.

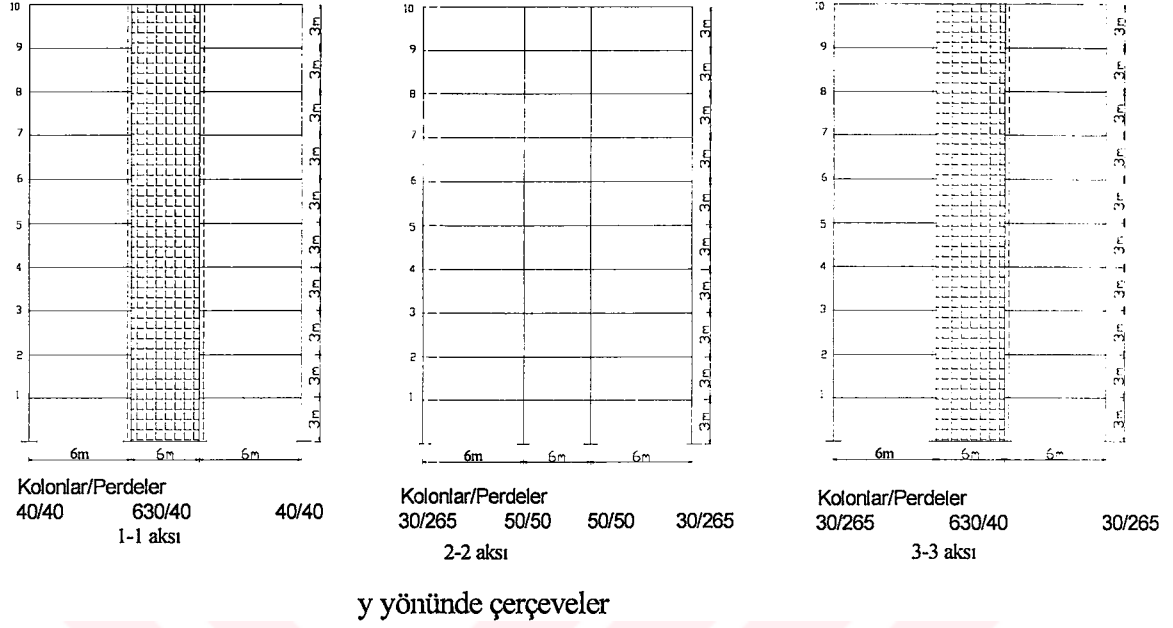
Analizde binadaki bölme duvarlarının etkisi dikkate alınmamıştır. Yalnızca çerçeve elemanlarından perde, kolon ve kirişlerin plan ve kesit özellikleri programa tanıtılmıştır. Çözüm iki boyutlu olduğundan çerçevelere dik doğrultudaki kiriş etkileri analize dahil değildir. Hesapta, işletme yüklerinden kolon ve perde alan paylarına düşen yükler ilgili düğüm noktalarında bir kütle olarak kabul edilmektedir. Beton ve donatı çeliğine ait karakteristik özellikler şu şekilde verilmiştir: Beton karakteristik basınç mukavemeti 25 Mpa, karakteristik çekme mukavemeti 2.5 Mpa, birim boy kısalması %0.2 olup diğer parametreler beş katlı yapıda olduğu gibi Kent ve Park (1971) modelinden alınmıştır. Donatı çeliği için pekleşme etkisini dikkate alan bir model kullanılmıştır. Donatı cinsi BÇ-III olup pekleşme başlangıcında birim deformasyon %1 alınmıştır. Şekil 7.3’de perdeli sistemin analizinde kullanılan beton ve çelik davranış modelleri görülmektedir. Taşıyıcı elemanların histeretik davranış modeli olarak üç parametrelilik Park modeli (1987) kullanılmıştır. Modeldeki üç parametre rijitlik kaybı, mukavemet azalması ve donatı sıyrılmasına ait parametrelerdir. Bu parametrelere perde ve kolon-kirişler için olmak üzere iki ayrı tipte değerler verilerek perdeler ve kolonlar için farklı modeller oluşturulmuştur. Birinci model kolon ve kirişler için olup; bu elemanlarda donatı sıyrılması olmadığı, mukavemet kaybının çok az, rijitlik kaybının ise orta düzeyde olduğu kabul edilmektedir. İkinci model perdeler için olup; az miktarda donatı sıyrılması olabileceği, donatıların bağlarının mükemmel olmadığı, az miktarda mukavemet ve rijitlik kaybının olduğu kabul edilmektedir. Analizin sona erdirilmesini kontrol eden parametreler Bölüm 7.2’de olduğu seçilmiştir. X-yönünde analizde en büyük taban kesme kuvveti yapı ağırlığının %18’i, son katın yanal deplasman sınırı yapı yüksekliğinin %5.5’i, adım sayısı da 500 olarak seçilmiş; sistem maksimum responsa ulaştığında bu değerler sırasıyla %17.8, 5,01 ve 496 olarak gerçekleşmiştir. Y-yönünde analizde de en büyük taban kesme kuvveti yapı ağırlığının %25’i, son katın yanal deplasman sınırı yapı yüksekliğinin %5’i, adım sayısı da 500 olarak seçilmiş; sistem maksimum responsa ulaştığında bu değerler sırasıyla %23.57, 3.65 ve 472 olarak gerçekleşmiştir. Bu şekilde adım aralıkları olabildiğince küçük tutulmaya çalışılmıştır.



Şekil 7.3. Perdeli çerçeve sistemin analizinde kullanılan beton ve çeliğe ait davranış modeli



Şekil 7.4. 10 katlı binaya ait X yönündeki çerçeveler



Şekil 7.5. 10 katlı binaya ait y yönündeki çerçeveler

7.4. Kapasite Eğrilerinin Çizilmesi

Statik itme analizi tamamlandıktan sonra alınan çıktılarından her bina için x ve y yönlerinde taban kesme kuvveti ve bunlara karşılık gelen üst kat yanal deplasman değerleri elde edilmiştir. Taban kesme kuvvetleri toplam yapı ağırlığına bölünerek yanal yük kapasitesi boyutsuz hale getirilmiştir. Benzer şekilde en üst kat (çatı) yanal ötelenmeleri yapı yüksekliğine bölünerek boyutsuz hale getirilmiştir. Boyutsuz kapasiteler kullanılarak x ve y yönleri için ayrı ayrı “taban kesme kuvveti kapasitesi –üst kat yatay yer değiştirme kapasitesi” eğrileri çizilmiştir. Bu eğrilere “kapasite eğrisi” denilmesi uygun görülmüştür. Çünkü, bu eğriler bir anlamda binanın mukavemet ve deplasman kapasitesini göstermektedir. Kapasite eğrisi her ne kadar analiz sırasındaki yatay yük dağılımının biçimine bağımlı olsa da, farklı dağılım biçimlerinden elde edilen kapasite eğrilerinin birbirlerine benzer olduğu önceki bölümlerde ifade edilmişti. Bu çalışmada da farklı yatay yük dağılım şekillerine ait kapasite eğrileri çizdirilmiş ve bunlar arasında önemli bir ayrılık olmadığı görülmüştür. Bu yüzden yatay yük dağılımının eşdeğer statik yatay yük şeklinde

olduğu duruma ait kapasite eğrileri esas alınmıştır. Ek 3’de her iki binaya ait x ve y yönleri için deplasman eksenli kapasite eğrileri, Ek 5’de periyot eksenli kapasite eğrileri ve Ek 8’de deplasman ve periyot eksenleri bileşik olarak kapasite eğrileri görülmektedir.

7.5. Sistemde Akma ve Göçme Başlangıcının Tespiti

Sistem sünekliğini hesap etmek için sistemin akmaya ve göçmeye başladığı andaki deplasman değerlerinin bulunması gereklidir. Ancak, sistemin akmaya başladığı nokta “yük-deplasman” eğrileri üzerinde açıkça görülmemektedir. Bu nedenle akma başlangıcına karşılık gelen deplasmanı doğrudan eğri üzerinden okumak mümkün değildir. Şu halde, sistem akma başlangıç noktasını belirlemek için birtakım basitleştirici kabuller yapılmasına gerek vardır. Kapasite eğrisini bir modelle temsil ederek daha basit hale getirmek mümkündür. Bu çalışmada, sistem akma başlangıcı üç ayrı yoldan belirlenmiştir. Bunlar:

a) Akma deplasmanının klasik tanımı: Kapasite eğrisinin biçiminden hareketle ikili-doğrusal bir modelle basitleştirilebileceği görülmektedir. Gerçek eğri ile model arasındaki bağlantı eğri altında kalan alanların eşitliğinden yola çıkılarak kurulmuştur. Bölüm 5.8’de açıklandığı gibi kapasite eğrisinde ulaşılan maksimum yatay yükün %75’ine karşılık gelen yük değeri tespit edilmiştir. Eğrinin bu değere ulaştığı nokta ile başlangıç noktası arasında bir doğru parçası çizilmiştir. Çizilen doğru parçası eğrinin altında ve üstünde kalan alanların eşitliği ilkesiyle belirlenen ideal mukavemet düzeyine kadar uzatılmıştır. Buradan deplasman eksenine dik inildiğinde bulunan deplasman değeri sistemin akma deplasmanı olarak alınmıştır. Belirlenen akma deplasmanları Ek 3’de “A1” adıyla görülmektedir.

b) İlk dikkate değer eleman akması yaklaşımı: Bu yaklaşım, sistem akma deplasmanının bulunması için bu çalışmada önerilen yaklaşımdır. Bir bina sisteminde, akma başladığı andan itibaren sistemin temel periyodunun büyümeye başlaması beklenir. Sistemde akma başlamadan evvel bazı elemanlarda oluşmuş birçok plastik mafsallı olması gerekir. Örnek çözümleme sonuçları da bu düşüncüyü desteklemektedir. Çözümleme sonuçları üzerinde şöyle bir gözlem yapılmıştır. Sistem akmaya başladığı andan itibaren taban kesme

kuvvetinde bariz bir değişim olmadığı halde birinci moda karşılık gelen T_1 esas periyodu belirgin biçimde (%100'den fazla) büyümektedir. Bu durumun sayısal olarak ortaya konması için “taban kesme kuvveti (V/W) – birinci periyot (T_1)” grafikleri çizilmiştir(Ek 5). Çizilen grafikler üzerinde yukarıdaki değişime uyan periyot aralıkları tespit edilmiştir. Bu aralıkların başladığı ana karşılık gelen periyot, boyutsuz taban kesme kuvveti ve üst kat yanal deplasmanı sistemin akma başlangıcı parametreleri olarak alınmıştır. Sistem akma başlangıcını belirlemek için önerilen bu yaklaşıma “ilk dikkate değer eleman akması (first significant member yield)” yaklaşımı adı verilmiştir. Buna göre, kapasite eğrisi üzerinde “ilk dikkate değer eleman akması” nın olduğu nokta ile başlangıç noktası arasında çizilecek bir doğru davranışı temsil eden modelin elastik bölgesini ifade eden ilk basamağıdır. Göçme noktasından başlayarak sistemin plastik bölgesinde kapasite eğrisini takip eden doğrunun birinci doğru ile kesiştiği nokta sistemin model üzerinde akma başlangıç noktasıdır. Bu yaklaşımda da model ile gerçek eğri altında kalan alanların eşitliği ilkesi sağlanmıştır. Akma başlangıcına karşılık gelen üst kat yanal deplasmanı sistemin akma deplasmanı olmaktadır. Ek 3.1 ve Ek 3.2’de kapasite eğrisi üzerinde “ilk dikkate değer eleman akması” kriterine göre sistem akma başlangıcının belirlenmesi “A2” adıyla görölmektedir. İlk dikkate değer eleman akmasının daha açık bir şekilde görölmesi için Ek 8’de taban kesme kuvvetinin deplasman ve bina temel periyoduna göre değişimini gösteren grafikler çizilmiştir. Periyot eksenli kapasite eğrisinde birinci periyotta sıçramanın başladığı taban kesme kuvveti deplasman eksenli kapasite eğrisi üzerinde işaretlendiğinde ilk dikkate değer eleman akmasına karşılık gelmektedir. Bu şekilde sistemin akma deplasmanı ve akma başlangıcına ait taban kesme kuvveti periyot eksenli kapasite eğrisi vasıtasıyla kolayca bulunabilmektedir.

Salt kolon ve kirişlerden kurulmuş taşıyıcı sistemlerde, kolonların herhangi birinde meydana gelecek ilk akma sistemin akma noktası olmamakla beraber önemli bir dönüm noktasıdır. Bundan sonra diğer kolonlarda da kısa aralıklarla akmalar başlamakta ve kapasite eğrisinde yukarıda belirtilen değişimler olmaktadır. Sistem rijitliğinde bu andan itibaren önemli kayıplar olmakta, yapı temel periyodu birden büyümeye başlamakta, kapasite eğrisinin eğimi düşmekte ve yatay bir seyir izlemektedir. Ayrıca Ek 5’de görülen ilk dikkate değer eleman akması ve onu takip eden akma sahanlığı da bu değişimlerin

maksimum olduğu taban kesme kuvvetine karşılık gelmektedir. Bu göstergeler de sistemde akmanın başladığına işaret eder.

Çizelge 7.1. 5 katlı binada X yönünde analizde önemli olaylar

X YÖNÜNDE STATİK İTME ANALİZİ		
V/W	T ₁ (s)	OLAY
0.0138	0.83	İlk kiriş çatlaması
0.0333	0.90	İlk kiriş akması
0.0585	1.84	İlk kolon çatlaması
0.1001	2.80	İlk kolon akması
0.1101	3.84	İlk dikkate değer eleman akması
0.1176	5.65	İlk kiriş kırılması
0.1329	9.61	İlk kolon kırılması
0.1356	Sistemin göçmesi	

Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2 incelendiğinde; çerçeve sistemde davranışın sünek olduğuna ilişkin işaretler vardır. İlk önce kirişler çatlamış ve akmaya başlamıştır. Sonra kolonlarda çatlama ve akma gerçekleşmiştir. Bu sırada kirişlerde dönmeler büyük değerler almış ve sırasıyla kiriş ve kolon kırılmaları başlamıştır. İlk dikkate değer eleman akması ile sistemin göçmesi arasında taban kesme kuvvetindeki artış %20 seviyesinde kalırken bina birinci serbest titreşim periyodundaki artış %150 olarak gerçekleşmiştir. Oysa, ilk dikkate değer eleman akması oluncaya kadar hem taban kesme kuvvetinde hem de esas periyottaki artış oranları birbirine yakındır. Kolonlardan birinde ilk akma başlaması ile ilk dikkate değer eleman akmasının gerçekleşmesi arasında ise bir ara bölgeden söz edilebilir. Bu bölgede taban kesme kuvvetindeki artış %10 civarında seyrederken esas periyottaki büyüme oranı %25-%35 civarında olmaktadır. İlk dikkate değer eleman akması, ilk kolon akması ile ilk kiriş kırılması arasında gerçekleşmiştir. Kolonlardan bir kısmında akma başladıktan sonra kirişlerde kırılmalar başlamaktadır. Sünek davranışı sağlamak için kolonların kirişlerden daha güçlü olmasının bunda rolü vardır. Salt çerçevelerde davranışa büyük ölçüde kolonlar hakim görünmektedir.

Çizelge 7.2. 5 katlı binada Y yönünde analizde önemli olaylar

Y YÖNÜNDE STATİK İTME ANALİZİ		
V/W	T ₁ (s)	OLAY
0.0139	0.76	İlk kiriş çatlaması
0.0370	1.01	İlk kiriş akması
0.0523	1.33	İlk kolon çatlaması
0.0854	3.08	İlk kolon akması
0.0942	3.88	İlk dikkate değer eleman akması
0.1054	9.34	İlk kiriş kırılması
0.1128	9.69	İlk kolon kırılması
0.1130	Sistemin göçmesi	

Perdeli çerçeve bina sistemlerinde perdeler davranışa çok büyük oranda hakimdir. Bu nedenle kiriş ve kolonlarda oluşan plastik mafsallar kapasite eğrisinin gidişatını çok etkilememektedir. Oysa, perdede meydana gelen herhangi bir plastik mafsal oluşumu ile birlikte kapasite eğrisinin eğimi düşmekte, sistemin periyodunda ani büyüme görülmektedir. Ancak bir kata ait kirişlerin ya da kolonların tamamında plastik mafsalların oluşması da perdede bir plastik mafsal oluşumuna benzer etki yapmaktadır. Çözümlenen örnek sistemlerde bir kata ait kirişlerin tamamında plastik mafsal oluşumunun tamamlanması ilk dikkate değer eleman akmasının hemen öncesine rastlamaktadır. Ek 3.3 ve Ek 3.4’de verilen kapasite eğrileri üzerinde ilk dikkate değer eleman akması yaklaşımıyla sistem akma başlangıcı “A2” adıyla görülmektedir. Çizelge 7.3 ve 7.4’de perdeli binalara ait boyutsuz taban kesme kuvveti, esas periyot değişimi ve sistemdeki önemli olaylar görülmektedir.

Çizelge 7.3 ve Çizelge 7.4 incelendiğinde kiriş ve kolonlarda çatlama ve akma olduğu halde hem boyutsuz taban kesme kuvveti hem de esas periyotta artış devam etmektedir. Buradan davranışa perdelerin hakim olduğu söylenebilir. Bir katta kirişlerin tamamı mafsallaştığı halde sistemin akmaya başladığı kabul edilebilir. Bu anda pek çok kolonda da akma başlamıştır. Ya da sistemin tamamen akmaya başlaması için perde duvarlardan birinin akmaya başlaması beklenebilir. Çünkü bu durumda da taban kesme kuvvetindeki

artış yavaşlamakta ve esas periyottaki artış hızlanmaktadır. Bu çalışmada, perde duvarlardan herhangi birinde meydana gelen ilk akma “ilk dikkate değer eleman akması” olarak alınmıştır. Ancak ilk dikkate değer eleman akmasının olduğu andaki yanal ötelenme sistemin akma anındaki yanal ötelenmeye eşit veya ondan küçük olabilir. Çünkü, sistemin davranışı gerçek kapasite eğrisi yerine daha basitçe ifade edilebilen bir model yardımıyla temsil edildiğinde modele ait akma deplasmanı sistem akma deplasmanından büyük olmaktadır. Bu durum Ek 3’de verilen grafik üzerinde de görülmektedir.

Çizelge 7.3. 10 katlı perdeli binada X yönünde analizde önemli olaylar

V/W	T ₁ (s)	OLAY
0.0396	0.98	İlk kiriş çatlaması
0.0756	1.18	İlk kolon çatlaması
0.0788	1.19	İlk perde duvar çatlaması
0.0940	1.43	İlk kiriş akması
0.1228	3.10	İlk kolon akması
0.1319	4.01	İlk perde duvar akması
0.1705	9.51	İlk perde duvar kırılması
0.1732	9.42	İlk kiriş kırılması
0.1786	Sistemin göçmesi	

Çizelge 7.4. 10 katlı perdeli binada Y yönünde analizde önemli olaylar

V/W	T ₁ (s)	OLAY
0.0505	0.85	İlk kiriş çatlaması
0.0945	0.92	İlk kolon çatlaması
0.1037	0.94	İlk perde duvar çatlaması
0.1345	1.38	İlk kiriş akması
0.1600	1.96	İlk kolon akması
0.1800	2.75	4. kat kirişlerinin tamamında mafsallaşma tamamlandı
0.1864	3.19	İlk perde duvar akması
0.2270	7.53	İlk perde duvar kırılması
0.2357	Sistemin göçmesi	

c) Yeni tanımlanmış akma deplasmanı kriteri: Bu yaklaşım perdeli bina sistemleri için Paulay [52] tarafından geliştirilmiştir. Perdeli bina sistemlerinde akma deplasmanı perde akma deplasmanlarından hareketle hesaplanmıştır. Bağntı (6.5)'den her perde için referans akma deplasmanları hesaplanmıştır. Bağlı akma deplasmanları ilgili perdenin geometrik özellikleri ile gerçek değerine dönüştürülmüştür. X yönündeki analiz için 237,70 mm; Y yönündeki analiz için 199,97 mm olarak hesaplanan akma deplasmanı doğrudan sistem akma deplasmanıdır ve Ek 3.3 ve Ek 3.4'deki grafik üzerinde "A3" adıyla görülmektedir. Bağlı akma deplasmanının hesabında eşdeğer yatay kuvvetlerin dağılım biçimine bağlı olarak saptanan η katsayısı her iki perde için Bağntı (6.5) yardımıyla 3.00 olarak hesaplanmıştır.

Sistemin göçme anı olarak bazı kabuller yapılabilir. Bunların başında tıpkı akma başlangıcı tespitinde olduğu gibi ilk dikkate değer eleman kırılmasından söz edilebilir. Salt kolon ve kirişten ibaret taşıyıcı sistem için dikkate değer eleman kırılması kolon alt veya üst ucunda oluşacak kırılmalardır. Ya da, bir kata ait kirişlerin tüm uçlarında kırılma meydana geldiği andır. Bu açıdan yaklaşıldığında, analizi yapılan 5 katlı çerçeve sistemin (x yönünde) göçme anı, kolon uçlarında meydana gelen ilk kırılma anı, olarak alınabilir. Diğer taraftan, 5 katlı çerçeve sistemin x yönündeki analizinde kolonda ilk kırılma (30 numaralı kolonun alt ucunda) olduktan sonra sistemin taban kesme kuvvetinde düşme olmamıştır. Kolon bir ucunda kırılma olduktan sonra da üst kat yatay deplasmanı artmaya devam etmiştir. Kolonda eksenel yükün varlığı bu durumun sebebi olarak düşünülmektedir. Aynı kolonun diğer ucunda da kırılma olduktan sonra ancak taban kesme kuvveti düşmeye başlamıştır. Öyleyse, sistem göçme başlangıcı için "bir kolonun her iki ucunda birden kırılma olması" durumu da alınabilir. Kaldı ki, bir kolonun her iki ucunda kırılma olduktan sonra diğer kolonlarda da kırılmalar birbirini takip etmektedir. Kolonların herhangi birinde her iki uça kırılma olmadan önce, herhangi bir kata ait kirişlerin tamamında her iki uça kırılma meydana gelmesi de bir göçme biçimi olabilir. Bu çalışmada; her iki binada da sistemin maksimum responsa ulaşmasıyla analiz sona ermekte, sistemin bu noktada göçtüğü kabul edilmektedir. Ek 4.1 ve Ek 4.2'de salt çerçeve bina için; Ek 4.3 ve Ek 4.4'de perdeli çerçevelerin akma ve göçme başlangıcı anındaki durumları görülmektedir. Özellikle, 5 katlı çerçeveler için, göçme başlangıcı olarak, herhangi bir kolonun her iki ucunda birden

kırılma olması durumu ve bir kata ait kirişlerin tüm uçlarında kırılma olması durumlarından önce gerçekleşenin dikkate alınması nispeten ihtiyatlı bir yaklaşımdır. Göçme noktası kabulü için de akma noktası tespitinde olduğu gibi çeşitli yaklaşımlar ortaya konulabilir. Betonarme binalar için, hemen tüm önemli deprem yönetmeliklerince, binanın üst kat yanal ötelenmesi ve kat arası ötelenmeler veya bir kısmında her ikisi birden sınırlandırılmıştır. Bu sınırlandırmalarda kullanılabilirlik limit durumu göz önüne alınmaktadır. Bir binanın, mekanizma oluşumunun yanında, onarılamayacak kadar hasar görmesi ya da aşırı yanal ötelenmeler olması halinde de göçmüş olduğu kabul edilebilir. Bu bağlamda, hasar indeksleri veya yönetmeliklerin getirdiği yanal deplasman sınırları göçme noktası kabulü için birer parametre olarak düşünülebilir.

7.6. Sistem Sünekliği Hesabı

Sistem akma deplasmanları üç ayrı yaklaşımla hesaplandıktan sonra göçme deplasmanı akma deplasmanına bölünmek suretiyle sistem sünekliği hesabı yapılmıştır. Akma deplasmanları kapasite eğrisinin ikili-doğrusal modeli üzerinden ve doğrudan kapasite eğrisinin üzerinden olmak üzere iki ayrı yoldan bulunmuştur. Eğri üzerinden yapılan akma deplasmanı tespitinde ilk dikkate değer eleman akması yaklaşımında ilk dikkate değer eleman akmasının olduğu an sistemin de akmaya başladığı an olarak kabul edilmiştir. Klasik yoldan hesap yapıldığında ise ideal mukavemetin %75'ine ulaşıldığı anda sistem de akmaya başlamış kabul edilmektedir. Çizelge 7.5'de model esas alınmak suretiyle; Çizelge 7.6'da ise bizzat kapasite eğrisinin kendisi esas alınmak suretiyle her üç yaklaşımla hesaplanmış akma deplasmanları ile bunlara ait sistem sünekliği oranları görülmektedir. Çizelge 7.7'de ise hesaplanan süneklik oranlarının birbirleriyle karşılaştırılması görülmektedir.

Çizelge 7.5 ve Çizelge 7.6'da birinci yaklaşım olarak verilen kriter klasik akma tanımıdır. Sistemin, en büyük taban kesme kuvvetinin %75'ine ulaşıldığında akmaya başladığı kabulüne dayanır. İkinci yaklaşım ise ilk dikkate değer akması esasına dayanmaktadır.

Üçüncü yaklaşım nispeten yeni bir tanımlamadır. Perdeli sistemin akma deplasmanının eleman mukavemetinden bağımsız; ancak hesap yönündeki perdelerin plandaki uzunluğu ile ters orantılı olduğu esasına dayanmaktadır.

Çizelge 7.5. Farklı akma kriterleri için sistem süneklik hesabı (model üzerinden)

BİNA HESAP YÖNÜ	1. yaklaşım (klasik akma tanımı)			2. yaklaşım** (ilk dikkate değer eleman akması)			3. yaklaşım (yeni perde akma deplasmanı)		
	Δ_{y1}	Δ_u	$\mu_{\Delta 1}$	Δ_{y2}	Δ_u	$\mu_{\Delta 2}$	Δ_{y3}	Δ_u	$\mu_{\Delta 3}$
5-Kat X Yönü	0.413	3.498	8.47	0.628	3.498	5.57	*	*	*
5-Kat Y Yönü	0.481	4.193	8.72	0.763	4.193	5.50	*	*	*
10-Kat X Yönü	0.558	5.010	8.98	0.664	5.010	7.55	0,79	5.010	6.34
10-Kat Y Yönü	0.540	3.650	6.76	0.676	3.650	5.40	0,667	3.650	5.47
* 3. yaklaşım yalnız perdeli sistemler için tanımlanmıştır.									
** Bu çalışmada önerilen yaklaşım.									

Çizelge 7.6. Farklı akma kriterleri için sistem süneklik hesabı (eğri üzerinden)

BİNA HESAP YÖNÜ	1. yaklaşım (klasik akma tanımı)			2. yaklaşım** (ilk dikkate değer eleman akması)			3. yaklaşım (yeni perde akma deplasmanı)		
	Δ_{y1}	Δ_u	$\mu_{\Delta 1}$	Δ_{y2}	Δ_u	$\mu_{\Delta 2}$	Δ_{y3}	Δ_u	$\mu_{\Delta 3}$
5-Kat X Yönü	0.344	3.498	10.17	0.536	3.498	6.53	*	*	*
5-Kat Y Yönü	0.407	4.193	10.30	0.669	4.193	6.27	*	*	*
10-Kat X Yönü	0.477	5.010	10.50	0.570	5.010	8.79	0,79	5.010	6.34
10-Kat Y Yönü	0.461	3.650	7.92	0.603	3.650	6.05	0,667	3.650	5.47
* 3. yaklaşım yalnız perdeli sistemler için tanımlanmıştır.									
** Bu çalışmada önerilen yaklaşım.									

Çizelge 7.7. Süneklik oranlarının karşılaştırılması

Bina Hesap Yönü	Model üzerinden			Eğri üzerinden		
	$\mu_{\Delta 2}/\mu_{\Delta 1}$	$\mu_{\Delta 3}/\mu_{\Delta 1}$	$\mu_{\Delta 3}/\mu_{\Delta 2}$	$\mu_{\Delta 2}/\mu_{\Delta 1}$	$\mu_{\Delta 3}/\mu_{\Delta 1}$	$\mu_{\Delta 3}/\mu_{\Delta 2}$
5-Kat X Yönü	0.66	*	*	0.64	*	*
5-Kat Y Yönü	0.63	*	*	0.61	*	*
10-Kat X Yönü	0.84	0.71	0.84	0.84	0.60	0.72
10-Kat Y Yönü	0.80	0.81	1.01	0.76	0.69	0.90

7.7. Sistemin Bütünü Üzerinde ve Eleman Bazında İrdeleme

Her dört çerçevenin akma ve göçme noktaları belirlendikten sonra sistem davranışı çeşitli açılardan incelenmiştir. Bu incelemenin iki ayrı tip bina için ayrı başlıklar altında yapılması uygun görülmüştür.

a) 5 katlı çerçeve sistemli binada:

Çizelge 7.8’de ilk dikkate değer eleman akması yaklaşımıyla sistemde akma başladığı anda kiriş ve kolonlarda meydana gelmiş olan plastik mafsalları görülmektedir. Sistemde akma başlamadan önce plastik mafsallar öncelikle kiriş uçlarında meydana gelmiştir. Bu plastik mafsallar sayesinde kirişlerde büyük miktarda enerji tüketimi olmaktadır. Bu aşamada sistem davranışının kolon davranışına çok bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Kolon kesitlerine kıyasla kiriş kesitlerinde yüksek süneklik oranlarına ulaşmak daha kolay olduğundan akma başlangıcı olarak gözlenen davranış şekli oldukça uygun bir davranış biçimidir. Burada ilk dikkate değer eleman akmasının hangi elemanda olduğundan çok, ilk dikkate değer eleman akması gerçekleşinceye kadar olan gelişmeler önem kazanmaktadır.

Çizelge 7.8. İlk dikkate değer eleman akması olduğu anda plastik mafsall dağılımı

5 katlı çerçeve	Kiriş	Kolon
X yönü	40 adet (%80)	12 adet (%20)
Y yönü	43 adet (%96)	12 adet (%27)

Kirişlerde oluşan plastik mafsallar sistem rijitliğini önemli ölçüde düşürmediğinden kapasite eğrisi doğrusallığının bu aşamadan önce fazla bozulmadığı; fakat kolonlarda meydana gelen plastik mafsalların yük-deplasman eğrisinde dönüm (eğrilik süresizliği) noktalarına karşı geldiği açıkça görülmektedir. Kolonlarda plastik mafsall oluşumu başladıktan sonra sistemin plastik davranışı önem kazanmakta, kapasite eğrisinin doğrusallığı iyice bozulmaktadır; üst kat yatay yer değiştirmesi hızla büyümekte, buna karşın taban kesme kuvveti yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Çözümlemeye örnek bina sisteminde akma başladığı sırada x yönünde 12, y yönünde 16 adet kolon kesitinde akmaya ulaşılmıştır. Ayrıca, kolonlarda plastik mafsall oluşumu başlayıncaya kadar kirişlerin büyük bir çoğunluğunda mafsallaşma olduğu, plastik mafsall olmayanlarda da çatlama olduğu görülmektedir. Böylece, sistem arzu edildiği biçimde sünek davranış göstermiştir.

Kolonlardaki plastik mafsalların, davranışı önemli ölçüde etkilemesinden dolayı, ilk dikkate değer eleman akmasının kolonlardan birinde gerçekleşmesini beklemek uygun olur. Bu düşüncüyü destekleyici bir oluşum da Ek 5’de verilen “bina temel titreşim periyodu-taban kesme kuvveti” grafiğidir. Grafik incelendiğinde ilk dikkate değer eleman akmasının olduğu kabul edilen anda sistemin esas periyodunda aniden artış olurken taban kesme kuvveti hemen hemen sabit kalmaktadır. Bu demektir ki, aynı taban kesme kuvveti düzeyinde periyot büyümekte, sistem gittikçe daha yavaş salınım yapmaktadır. Kaldı ki, bu düzey taban kesme kuvveti göçme anına kadar nispeten sabit kalmaktadır. Şu halde, bu taban kesme kuvveti, sistemin yatay yük taşıma kapasitesi için bir üst sınır olmaktadır.

Sistem göçmeye ulaşmadan önce zemin kat kolonlarının tümünün alt uçlarında mafsalların oluştuğu görülmektedir. Bu durum kiriş mekanizmasına işaret etmektedir. Analizin sonuna

gelindiğinde sistem rijitliği çok büyük ölçüde azalmış ve temel periyot büyük ölçüde artarak sistem iyice yumuşamıştır.

Plastik mafsallar katlar arasında dengeli dağılmıştır. belirli bir katta yığılma olmamış, ancak alt katlarda üst katlara nazaran daha çok sayıda gerçekleşmiştir. Sistem akma anında x yönündeki analizde ilk üç katta 40, dördüncü katta 12 adet plastik mafsall görülürken, beşinci katta sadece çatlamlar mevcuttur. Y yönündeki analizde ise ilk dört katta 24'er adet, beşinci katta ise 10 adet plastik mafsall oluşmuştur. Plastik mafsalların katlara göre dağılımına bakıldığında çatlamaadaki sıraya uygun olduğu görülmektedir. Yani, diğerlerinden önce çatlayan eleman yine diğerlerinden daha önce akmaya ulaşmaktadır.

Kat arası ötelenmeler de tıpkı üst kat ötelenmesi gibi büyük değerler almaktadır. En büyük kat arası ötelenmenin alt katta, en küçük kat arası ötelenmenin son katta olması tipik çerçeve yatay ötelenme profilinin gerçekleştiğine işaret etmektedir.

Tekil olarak, akma ve göçme oluşan plastik mafsall kesitlerinde “moment-eğrilik” ilişkileri incelenmiştir; bunlardan bazılarının moment-eğrilik diyagramları örnek olmak üzere Ek 6'da görülmektedir. Bu diyagramlardan görüleceği üzere davranış ikili-doğrusal modele çok uygundur. Bu diyagramlardan eğrilik sünekliği kapasitelerinin hesaplanması da oldukça kolaydır. Çünkü, elemanın çatlama, akma ve kırılma noktaları diyagram üzerinde açıkça görülmektedir. Ulaşılan eğrilik sünekliği kapasiteleri (8-15 arasında) çok büyük değerler almaktadır. Kolon plastik mafsall kesitlerinde çizilen $M-\phi$ diyagramları “trilineer” modele daha yakındır. Çatlama, akma ve kırılma noktaları açıkça görülmektedir. Akmadan sonraki plastik bölgede eğrilik hızla artarken moment kapasitesi kısmen artmaktadır.

Bir elemanda plastik mafsall oluşumu ile birlikte deformasyon değerleri hızla büyümektedir. Çerçevadaki histerezis enerjisinin kolon ve kirişler arasındaki dağılımı farklı olmakla birlikte kirişlere gelen enerjinin %100'e yakın bölümü; kolonlara gelen enerjinin %90'a yakın bölümü plastik mafsallarda tüketilmiştir. Kesitler üzerinde eğrilik sünekliği “talep/kapasite” oranına bakıldığında kirişlerdeki oranın kolonlardakinden 5-7

kat büyük olduğu görülmektedir. Bunlardan hareketle, sistemdeki enerjinin öncelikle kirişlerdeki olmak üzere plastik mafsallar tarafından tüketildiği söylenebilir.

Sistemin göçme anında; x yönünde, 45 adet kiriş ve 2 adet kolon kesitinde kırılma olmakta, 37 adet kolon ve 56 adet kiriş kesitinde akmaya ulaşılmaktadır. Y yönünde 2 adet kolon ve 73 adet kiriş kesitinde kırılma olmakta, 21 adet kolon ve 12 adet kiriş kesitinde akmaya ulaşılmaktadır. Sistemin göçmesi için pek çok sayıda plastik mafsal oluşumu ve de bazı kesitlerde kırılma olması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Bu safhaya ulaşılması için, sünek olmayan kırılma türlerinin engellenmesi, büyük plastik şekil değiştirmelerin olması, sistem süneklik oranının tasarımıda öngörüldüğü derecede gerçekleşmesi gereklidir.

b) 10 katlı perdeli çerçeve sistemde:

Perdeli çerçevelerde durum salt kolon kirişten ibaret taşıyıcı sistemlere benzemekle beraber farklılık gösteren birçok yanı da vardır. Süneklik açısından, salt kolon-kirişten ibaret taşıyıcı sistemde kolonların üstlendiği rolü burada perdeler üstlenmiş gibi görünmektedir. Perdede meydana gelen rijitlik kayıpları sistem üzerinde kendini hemen hissettirirken kiriş ve kolonlardaki çatlama ve hatta kırılmalar hissedilmemektedir. Buradan, davranışa çok büyük ölçüde perdelerin hakim olduğu söylenebilir.

Perdelerde plastik mafsal oluşumuyla birlikte üst kat yatay yer değiştirmesi aniden artmaya başladığı için, kapasite eğrisi de bükülmeye başlamaktadır. Davranışa artık plastik deformasyonlar hakimdir. Bu esnada taban kesme kuvveti, ya aynı düzeyde kalmakta ya da kısmi artış göstermektedir. Bu durum sistem göçmeye başlayıncaya kadar devam etmektedir.

X yönünde analizde sistem akma başlangıcında, üç yöntemde de kirişlerin tamamında M/M_u oranı %75'in üzerindedir. Buna karşılık perdelerin %10'unda, kolonların ise %5'inde bu oran %75'in üzerindedir. Benzer şekilde Y yönündeki analizde de aynı sonuca ulaşılmıştır. Eğrilik "talep/kapasite" oranlarına bakıldığında kiriş kesitlerindeki en büyük

değerler perde kesitlerindeki en büyük değerlerden 2 kat, kolon kesitlerindeki en büyük değerlerden 3 kat büyüktür. Bu da gösteriyor ki, akma başlamadan önce, kirişlerin mevcut süneklik kapasiteleri büyük bir oranda kullanılmıştır. Ayrıca, sistem akma başlangıcında meydana gelen plastik mafsalların dağılımına göre ilk dikkate değer eleman akması yaklaşımı ile üçüncü yaklaşım birbirine oldukça yakındır. Çizelge 7.9'da sistem akma başlangıcında kiriş, kolon ve perde kesitlerinde oluşan çatlama ve akma sayıları görülmektedir. Buna göre klasik yaklaşımdaki akma kabulünde perdelerden hiç birinde akma olmadan sistemin aktığı kabul edilmektedir. Bu çok ihtiyatlı bir akma kabulü olarak görülmektedir. Oysa, bu çalışmada önerilen yaklaşımda ve üçüncü yaklaşım olarak nitelendirilen yöntemde sistem akmaya ulaştığında zemin kattaki perdelerin alt uçlarından en az birinde akma başlamıştır. Bu yönüyle önerilen yaklaşım klasik yaklaşımdan ayrılmaktadır. Kiriş ve kolonlar açısından ise her üç yöntem birbiriyle uyumlu görünmektedir.

Çizelge 7.9. Akma başlangıcında çatlama ve akma oluşan eleman kesitleri yönünden karşılaştırma

10 katlı Perdeli çerçeve sistem		KİRİŞ		KOLON		PERDE	
		Çatlama	Akma	Çatlama	Akma	Çatlama	Akma
X yönünde analiz	1. yaklaşım	6	152	7	3	14	-----
	2. yaklaşım	5	155	7	3	13	2
	3. yaklaşım	5	154	7	3	6	2
Y yönünde analiz	1. yaklaşım	18	122	9	3	16	-----
	2. yaklaşım	10	130	10	4	14	2
	3. yaklaşım	14	124	10	4	15	1

İlk dikkate değer eleman akması yaklaşımında perdeli çerçevenin akma başlangıcında kolon ve perdelerde oluşan plastik mafsalların toplam içindeki payı %4'ü geçmemektedir. Buradan görülüyor ki, perdeli sistemlerde de enerji tüketimi açısından ağırlık kirişler üzerindedir. Bu dağılıma katlar itibariyle bakıldığında bütün katlarda ortalama olarak eşit sayıda olduğu görülür.

Perdeli çerçeve sistemde ilk dikkate değer akmanın tanımında daha dikkatli olmak gerekir. İlk dikkate değer akma, çoğu zaman perdelerden birindeki ilk akmadır. Ne var ki, perdelerden birinde akma gerçekleşmeden önce, herhangi bir kattaki kirişlerin tümünde plastik mafsall oluşumunun tamamlanması veya kattaki kolonların her iki ucunda birden plastik mafsalların meydana gelmesi de ilk dikkate değer akma kabul edilebilir. Çünkü bir kattaki kirişlerin tümünde plastik mafsall oluşması durumu yalnız başına gerçekleşmemektedir. Diğer katlarda da çok sayıda kirişte ve kolonda plastik mafsall oluşmuş, henüz plastik mafsall durumuna gelmeyenlerin de hemen tümünde ise çatlama görülmüştür. Bu haliyle sistem nispeten yumuşamıştır. Hala, perdeler davranışa önemli ölçüde hakimdir. Yumuşamış bir sistemde davranışın salt perde davranışına doğru kayması kolaylaşmaktadır. Bu ise özellikle üst katlarda büyük yanal deplasman demektir. Üst katlarda büyük yanal deplasmanlar sistemi mekanizma durumuna gelmeden de göçmüş kabul etmeye sebep olabilir. Çünkü sınırsız üst kat yanal deplasmanına ve sınırsız kat arası ötelenmelere izin verilemez. Şu halde, perdeli sistemde akma ve göçme tanımı yaparken, sistemin bu açıdan da irdelenmesi gerekir. Birçok deprem yönetmeliğinde binanın izin verilen üst kat yatay ötelenmesi ve katların birbirlerine göre bağıl ötelenmelerine sınırlama getirilmiştir. Bunlara örnek olarak UBC-91, SEAOC-90, NEHRP-85, ATC-3-06, yönetmelikleri sayılabilir.

Perdeli sistemlerde perde rijitliğinin sistem davranışına etkisi çok açıktır. Perdelerde çatlama ile beraber rijitlik azalmaya başlamakta; bu ise kapasite eğrisinin biçimini hemen değiştirmektedir. Akma halindeyse rijitlik daha da azalmakta buna karşılık periyottaki büyüme birden hızlanmaktadır. Bu nedenle perdede meydana gelecek ilk plastik mafsall ile sistemin akma kabulü arasındaki zaman aralığı çok kısadır.

Perdeli sistemde analiz sonunda göçmeye başlayan perdelerde gözlenen eğrilik sünekliği kapasitesi 7-8 arasında değişmektedir. Oysa kirişlerde bu oranlar 31-32 mertebesinde. Perdeli sistemlerde, perde süneklik kapasitesinin sistem süneklik kapasitesi üzerinde daha etkin olduğu gözlenmektedir.

Bu çalışmada çözümlenen örnek sistemlerde sünek davranış olabilmesi için gerekli sistem süneklik oranı Bağıntı (6.10) ve Bağıntı (6.11)'den $\mu_{\Delta max}=7$ için 4.00 ve $\mu_{\Delta max}=8$ için 4.50 bulunmaktadır. Sistem süneklik kapasitesinin en düşük değeri Çizelge 7.5'de 5.40 olarak hesaplanmıştır. Buradan, çözümlenen perdeli binanın sünek davranış gösterebilmesi için yeterli kapasiteye sahip olduğu ortaya çıkmaktadır.

Çözümlemelerde üst kat yatay yer değiştirmesi bina yüksekliğinin % 3-5'ine kadar ulaşabilmektedir. Bu demektir ki; göçmeye ulaşmadan önce sistemde çok büyük deformasyonlar olmaktadır. Kat arası ötelenmeler de benzer şekilde çok büyüktür. Çizelge 7.10'da göçme anında katlara göre sistemin yaptığı yatay yer değiştirmeler görülmektedir. Kat arası ötelenmelerin alt katlardan üst katlara doğru gidildikçe arttığı; ancak 5. kattan sonra sabit kaldığı görülmektedir. Göçme sırasında en büyük kat arası ötelenme kat yüksekliğinin %6'sına karşılık gelmektedir.

Çizelge 7.10. Göçme sırasında katların yanal deplasman ve kat arası ötelenmeleri

X yönünde			Y yönünde		
Kat	Deplasman (mm)	Kat arası ötelenme (mm)	Kat	Deplasman (mm)	Kat arası ötelenme (mm)
10	1494	180	10	1095	126
9	1314	180	9	969	125
8	1134	181	8	844	126
7	953	180	7	718	125
6	773	180	6	593	125
5	593	169	5	468	123
4	424	146	4	345	119
3	278	133	3	226	105
2	145	102	2	121	80
1	44		1	41	

7.8. Periyot Eksenli Kapasite Eğrisi

Sünek davranan yapı sistemlerinde göçme, mevcut süneklik kapasitesine ulaşılmasıyla başlar. Bu nedenle, deplasman talebini deplasman kapasitesi ile karşılaştırmak daha anlamlıdır. Davranışı deplasmanlar cinsinden değerlendirirken, sistemin göçme anındaki rijitliği akma başlangıcındaki rijitliğinden farklı olacaktır. Akma anındaki rijitlik değeri efektif rijitlikle ifade edilebilir. Bir bina sisteminin birinci serbest titreşim periyodu binanın tümü için tek bir değer olup fiziksel anlamı olan bir çokluktur. Oysa rijitlik elemanlar, çerçeveler ve bina için ayrı ayrı tanımlanmakta olup matris boyutunda bir büyüklüktür. Sistemin bütünü için bir sistem rijitlik matrisi yazılırken birinci periyot için tek bir skaler değer hesaplanır. Periyot ile efektif rijitlik arasında Bağntı (7.1)' de görülen ilişkiden bahsedilebilir[57].

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k_{\text{eff}}}} \quad (7.1)$$

$$\frac{T_g}{T_b} = \sqrt{\frac{k_{\text{eff}}^b}{k_{\text{eff}}^g}} \quad (7.2)$$

Bağntı (7.1) akma ve göçme anları için ayrı ayrı yazılır ve düzenlenirse Bağntı (7.2) elde edilir. Buna göre, sistemin göçme anındaki periyodunun akma başlangıcındaki periyoduna oranının karekökü akma başlangıcındaki efektif rijitliğin göçme anındaki rijitliğe oranını verir. Çözümlenen örnek binalarda rijitlik değişimi Çizelge 7.11'de verilmiştir.

Çizelge 7.11'de görüldüğü üzere, akma ve göçme halleri arasında sistemin birinci periyodundaki artış oranı ile akma anındaki efektif rijitliğin göçme anındaki efektif rijitliğe oranının karekökündeki düşüş oranı arasındaki fark %10'un altında kalmıştır. Süneklik

düzeyi yüksek burulmasız perdeli sistemlerde, birinci serbest titreşim periyodundaki değişimin efektif rijitlikteki değişimi bir ölçüde temsil ettiği söylenebilir. Böylece, sistem kapasite eğrisi taban kesme kuvvetinin bina birinci serbest titreşim periyoduna göre çizilen grafiği (periyot eksenli kapasite eğrisi) ile daha anlamlı hale gelmektedir.

Çizelge 7.11. Efektif rijitlik ve periyot değişiminin karşılaştırılması (ilk dikkate değer eleman akması yaklaşımı ile)

Bina	Hesap Yönü	Efektif Sistem Rijitliği		Periyot, T_1 (s)		Karşılaştırma			Fark %
		Akma k_{eff}^b	Göçme k_{eff}^g	T_1^b	T_1^g	k_{eff}^b / k_{eff}^g	$\sqrt{k_{eff}^b / k_{eff}^g}$	T_1^g / T_1^b	
Salt çerçeve	X	0.205	0.039	3.84	9.61	5.28	2.30	2.50	8.9
	Y	0.141	0.027	3.88	9.69	5.22	2.29	2.50	9.3
Perdeli çerçeve	X	0.232	0.036	4.01	9.51	6.50	2.55	2.37	7.0
	Y	.314	0.065	3.19	7.53	4.86	2.20	2.36	7.1

7.9. Kapasite Spektrumunun Çizilmesi ve Performans Noktası Tayini

Deprem sonrası yapıların hasar tespiti ve performans değerlendirmelerinin yapılabilmesi için kapasite hesaplarına gerek duyulur. Statik itme analizi gibi doğrusal olmayan yöntemler yapıların “yük-deplasman” kapasitesini belirlemek için kullanılabilir. Özellikleri bilinen, mevcut veya tasarım aşamasında olan bir yapının, tasarım depremi altındaki maksimum respons deplasmanı, yapının deplasman talebini temsil eder. Kapasite eğrisi ve deplasman talebi bir kere belirlendikten sonra performans kontrolü yapılabilir. Performans kontrolü ile, yapı elemanlarının performans kriterlerinin öngördüğü kabul edilebilir sınırların ötesinde hasar görüp görmediği kontrol edilebilmektedir. Performans kontrolü için kapasite spektrumu ve deplasman katsayıları metodu gibi doğrusal olmayan

yöntemler mevcuttur. Bu çalışmada kapasite spektrumu metodu kullanılarak performans noktası tespiti yapılmıştır. Bu metotta, spektral deplasman talebi ve kapasite spektrumu belirli bir noktada kesişmektedir. Bu kesişim noktası performans noktası olarak tanımlanmaktadır[8,31]. Bu noktada; yapının sismik kapasitesi ile, tasarım depremi altında, yapıdan beklenen deplasman talebi çıkarılır.

Bu çalışmada tasarımı ve statik itme analizi yapılan örnek binaların kapasite spektrumları çizilmiştir. Bunun için ATC-40 [8] tarafından önerilen “kapasite spektrumu-prosedür A” yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin işlem basamakları kısaca şöyledir:

- a) Sistem kapasite eğrisi, modal analiz sonuçlarından yararlanılarak kapasite spektrumuna dönüştürülmüştür.
- b) Yerel zemin koşullarına ve bina doğal periyoduna bağlı olarak %5 sönüm oranı için elastik tasarım ivme spektrumu çizilmiştir.
- c) Kapasite spektrumu ile elastik tasarım spektrumunun kesiştiği nokta kapasite spektrumunun plastik bölgesinde ise spektral azaltma katsayıları hesap edilmiş ve bu katsayılar uygulanarak tasarım spektrumu düzeltilmiştir. Düzeltilmiş bu tasarım spektrumuna elastik olmayan tasarım spektrumu (demand spektrum) adı verilmektedir. Eğer kapasite spektrumu ile elastik tasarım spektrumunun kesiştiği nokta kapasite spektrumunun elastik bölgesinde ise spektral azaltma katsayılarına gerek yoktur.
- d) Kapasite spektrumu üzerinde başlangıç performans noktası olarak, “eşdeğer deplasman” ilkesiyle bulunan ilk performans noktası kabul edilmiştir.
- e) Kabul edilen performans noktası ile düzeltilmiş tasarım spektrumu kesişmelidir. Eğer kesişmiyorsa deneme-yanılma yolu ile $\pm\%5$ toleransla kesişene kadar bu işleme devam edilmiştir.
- f) Düzeltilmiş tasarım spektrumu ile kapasite spektrumunun kesişme yeri olan performans noktasına ait spektral deplasman, spektral ivme, periyot, taban kesme kuvveti oranı ve üst kat deplasmanı değerleri tespit edilmiştir.

Çizelge 7.12. Performans noktalarına ait spektral değerler ve performans noktasında gerçekleşmekte olan süneklik oranları

Bina ve hesap yönü	5 katlı salt çerçeve		10 katlı perdeli çerçeve	
	X yönü	Y yönü	X yönü	Y yönü
Δ_y/H (%)	0.628	0.76	0.664	0.676
Δ_{pp}/H (%)	0.927	0.840	0.493	0.568
μ_{Δ}^{pp}	1.48	1.10	0.74	0.84
S_d (mm)	100	115	62	58
S_a (g)	0.123	0.110	0.179	0.238
T (s)	5.67	6.42	3.69	3.10
V/W (%)	11.77	9.70	12.80	18.50
Davranış	Elasto-plastik	Elasto-plastik	Elastik	Elastik

Performans noktası deplasmanı, tasarım depremi altında yapıdan beklenen maksimum deplasmanı ifade etmektedir. Performans noktasında gerçekleşen deplasman sünekliği oranı “performans sünekliği” (μ_{Δ}^{pp}) olarak tanımlanabilir. Ek 7’de kapasite spektrumu ve performans noktası tespiti görülmektedir. Çizelge 7.12’de performans noktasına ait spektral değerler ve performans noktasında gerçekleşmekte olan süneklik oranları görülmektedir. Buna göre, salt çerçeve sistemli 5 katlı yapı performans noktasına ulaşıldığında elasto-plastik davranış gösterirken; 10 katlı perdeli sistemin performans süneklik oranları 1’in altında kalmıştır. Performans noktası deplasmanı; salt çerçeve sistemde, göçme deplasmanının x ve y yönleri için sırasıyla 3.78 ve 4.99 kat altında çıkmıştır. Yapı göçmeye ulaşmadan çok önce performans noktasına ulaşmaktadır. Perdeli sistemde de benzer durum söz konusudur. Ancak yapı performans noktasına sistem akma anından önce ulaşıldığından tasarım depremi altındaki davranışı elastik düzeyde kalmıştır. Süneklik düzeyi yüksek olarak tasarlanan bir yapının, tasarım depreminde elastik davranması, bir terslik gibi görünebilir. Sistem akma noktası tanımından ileri gelen bu

durum gerçekte bir terslik değildir. Sistem akmaya ulaşmadan önce birçok elemanında akmaya ulaşılmış olması tanım gereğidir.

Performans noktasındaki spektral büyüklükler yapının fonksiyonuna göre öngörülen performans hedefleriyle karşılaştırılarak sistem davranışı kontrol edilebilir. Bu kontrol iki ana grupta yapılır. Bunlardan birincisi, yapının düşey ve yatay yük taşıma kapasitesi ile kat arası ötelenmelerinin kontrolüdür. İkincisi, eleman düzeyindeki deformasyon kontrolleridir. Bir yapıda; taşıyıcı elemanların ve kolon-kiriş birleşim bölgelerinin yeterli elastik ötesi performans göstermesi; eleman süneklik oranlarının, performans kriterlerinin gerektirdiği düzeyde olmasına bağlıdır. Bu cümleden hareketle, yapı performansı ile eleman süneklik oranları arasında bir bağ kurularak, belirli performans düzeyleri için minimum eleman süneklik oranları tanımlanabilir.

8- SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Betonarme binaların sistem kapasite eğrisinde elastik bölgeden plastik bölgeye geçiş açıkça görülmediğinden akma deplasmanının bulunmasında belirsizlik vardır. Oysa süneklik oranının doğruluğu büyük ölçüde akma deplasmanının hassasiyetine bağlıdır. Bu çalışmada süneklik hesabı yanında, sistem akma deplasmanının hesabı için yeni bir akma kriteri önerilmektedir. Ayrıca, mevcut diğer yöntemler ile önerilen kriter çeşitli yönlerden karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şöyle ifade edilebilir:

a) Sonuçlar

1. Bu çalışmanın bir özelliği olarak, bina birinci doğal titreşim periyodunun taban kesme kuvvetine göre değişimi akma başlangıcını belirlemede önemli bir gösterge olarak değerlendirilmiştir. Sistemde dikkate değer ilk akma başladıktan sonra sistem rijitliği azalmaktadır. Doğal olarak bunu izleyen bina birinci doğal titreşim periyodu birden sıçrama yaparak büyümekte, buna karşın yatay yük taşıma kapasitesi nispeten sabit kalmaktadır. Bu durum periyot eksenli kapasite eğrileri üzerinde açık olarak görülmektedir (Ek 5, Ek 8).
2. Önerilen akma kriterine göre sistem akmaya başladığı anda davranışı etkileyen özel bir plastik mafsall oluşumu görülmektedir. Bu özel oluşuma “ilk dikkate değer eleman akması” adı verilmiştir. İlk dikkate değer eleman akmasının tespitinde birinci periyottaki tipik artış bir endeks olarak alınmaya çok elverişli görülmüştür. Sistem kapasite eğrisinin periyot eksenli çizilmesiyle ($V/W-T_1$), akma başlangıcı deplasman eksenli kapasite eğrisine kıyasla daha açık bir şekilde görülmektedir.
3. Çözümlemesi yapılan örnek bina sistemlerinde, üç farklı yoldan akma deplasmanı hesap edilmiştir. Bunlardan ilki olan klasik yaklaşımda sistemin akma deplasmanı taban kesme kuvvetinin bir fonksiyonu olarak belirlenir. Buna karşın, önerilen akma kriteri ile taban kesme kuvveti düzeyinin yanında sistemdeki mafsall oluşum sırası ve yeri de dikkate alınmaktadır.

4. Sistem akma deplasmanı sünekliği doğrudan etkilemektedir. Bir sistemin arzu edilen sünekliğe sahip olması için sistem (global) sünekliğinin en az 4-5 civarında olması gerektiği genel kabul gören bir sonuçtur[31,32,33]. Çözümlenen binalar bu kabul ışığında incelendiğinde, ulaşılan süneklik değerleri her üç yöntemle de 4'den büyük bulunmuştur. Bu değerler, yeni A.B.Y.Y.H.Y. (1998) dikkate alınarak tasarlanmış olan bu çalışmadaki örnek binaların yeterince sünek davrandığını göstermektedir.
5. Önerilen yaklaşımla diğer yöntemlerden elde edilen akma deplasmanları karşılaştırıldığında; önerilen yöntem, klasik yaklaşımla Paulay[52,53] tarafından ortaya konulan yöntem arasında kalmakta veya onunla çalışmaktadır. Özellikle salt çerçeve sistemlerin süneklik hesabında önerilen yöntem daha anlamlı gözükmemektedir. Klasik yöntemle bulunan sistem sünekliği oranı akma deplasmanının nispeten küçük tanımlanması nedeniyle oldukça büyük bulunmaktadır.
6. Önerilen yöntemle bulunan akma deplasman değerleri klasik yaklaşımdan bulunan değerlerden salt çerçeve sistemler için ortalama %55; perdeli sistemler için ortalama %22 oranında büyük bulunmuştur. Perdeli binalar için tanımlanmış yeni akma kriteri ile bulunan sistem akma deplasmanları, önerilen akma kriteri ile bulunan akma deplasmanları ile karşılaştırıldığında; aralarında en fazla %20 fark görülmektedir. Klasik yaklaşımla akma deplasmanının gerçek değerinden düşük hesaplandığı görüşü dikkate alındığında, önerilen yaklaşımın özellikle klasik yaklaşıma göre daha gerçekçi görülmektedir.
7. Sistem akma deplasmanını belirlemek için kullanılan üç ayrı yoldan ilk ikisinde (klasik, ilk dikkate değer eleman akması) davranışı temsil için seçilen modele göre sistem akma deplasmanı az da olsa değişmektedir. Oysa perdeli sistemler için yeni tanımlanan yaklaşımda[48] sistem akma deplasmanı modelden bağımsız olarak doğrudan belirlenmektedir. Sistem sünekliği akma deplasmanının bir fonksiyonu olduğundan bu fark önem kazanmaktadır.
8. Bir bina taşıyıcı sisteminin akmaya başlaması için, sistem üzerinde tek bir plastik mafsallın oluşması yeterli değildir. Çerçeve davranışı belirgin bir şekilde değiştirecek kadar çok plastik mafsallın oluşması gerekir. İlk dikkate değer eleman akmasının olduğu an ile sistem akma başlangıcı eşit kabul edildiğinde bulunan süneklik oranları gerçekçi gözükmemektedir.

9. Plastik mafsallar, üzerinde oluştuğu eleman türü ve yeri itibariyle değerlendirilmelidir. Kiriş kesitlerinde oluşan plastik mafsallar sisteme ait kapasite eğrisinin biçimini pek değiştirmemektedir. Oysa bu esnada plastik mafsallarda enerji tüketilirken sistemin yatay yük taşıma kapasitesi de artmaktadır. Eksenel yük taşıyan kolon ve perde duvarlarda ise, plastik mafsal oluşumu ile birlikte kapasite eğrisinin biçimi değişerek yatay bir seyir izlemeye zorlanmaktadır. Böylece taban kesme kuvvetindeki artış azalmaktadır. Salt çerçevelerde, sistem akma başlangıcının kolonlardaki dönme kapasitesine bağlı olduğu söylenebilir. İlk dikkate değer eleman akmasının da kolonlarda oluşacağı açıktır.
10. Perde, kolon ve kirişlerden meydana gelen bir sistemde ise ilk dikkate değer eleman akması çoğunlukla perdelerin herhangi birinde oluşacak ilk plastik mafsaldır. Yatay yüklerin büyük bir kısmını taşıyan perdelerden herhangi birinde meydana gelen ilk plastik mafsal perdenin yanal ötelenmesini kolaylaştırmaktadır. Öte yandan, bir kata ait kirişlerin tamamında plastik mafsal oluştuğu halde kolon veya perdelerde henüz plastik mafsal oluşmamış olsa bile, sistem davranışı bu durumdan önemli ölçüde etkilenmektedir. Öyleyse, bu oluşumu tamamlayan son akma da yine “ilk dikkate değer eleman akması” sayılabilir.
11. Bir bina taşıyıcı sisteminin sünek davranış göstermesi için elemanların ve kullanılan malzemenin de sünek olması gerekli, ancak bu tek başına yeterli değildir. Sistemi sünek olmayan kırılma türlerinden arındırmak gereklidir. Bunun için, kesme, aderans yetersizliği, zımbalama veya kenetlenme problemlerinden ileri gelen g   tükenmeleri önlenmeli, donatılar burkulmaya karşı iyice sarılmalıdır. Önerilen yaklaşımın geçerliliği sistemin mutlak surette sünek davranmasına bağlıdır.
12. Plastik mafsal kesitlerindeki eğrilik sünekliği kapasitesi ile sistem sünekliği kapasitesi arasında bir ilişki olduğu da gözlenmektedir. Çok katlı yapılarda eğrilik sünekliği ile sistem sünekliği arasındaki ilişkinin analitik olarak ortaya konulması oldukça zordur. Ancak, genel olarak sistem sünekliğinin davranışı yönlendiren elemanlarda mevcut eğrilik sünekliği kapasitesinin 0.25-0.35 katı civarında gerçekleştiği gözlenmiştir.
13. Potansiyel plastik mafsal kesitlerinde akma başladıktan sonra eğrilik “talep/kapasite” oranı hızla büyümektedir. Bir kesitteki eğrilik talebi mevcut eğrilik sünekliği

kapasitesine ulaşıncaya kadar kesit dönmeye devam etmektedir. Sistem henüz göçmediği halde aşırı zorlanan elemanlarda eğrilik “talep/kapasite” oranı 1’den büyük değerler almaktadır. Bu oran 1’e eşit olduğuunda teorik olarak kesit kırılmaktadır. Söz konusu kesitlerde gerekli eğrilik talebi karşılandığı takdirde, sistemin yatay yük taşıma gücü düşürölmeden daha çok yanal deplasman yapması sağlanabilir.

14. Statik itme analizi ile çözümlemesi yapılan örnek binalar, süneklik düzeyi yüksek çerçeve olarak tasarlanmıştır. Sistem, beklendiği şekilde sünek davranış sergilemiştir. Tasarımda kullanılan taşıyıcı sistem davranış katsayısı doğal titreşim periyodu 0.7 s’ den büyük sistemler için sistem sünekliğine eşit kabul edilmektedir[49]. Analizi yapılan sistemler bu kabul ışığında incelendiğinde mevcut süneklik kapasitesi ihtiyaç duyulan süneklik oranından büyük bulunmaktadır.
15. Genelde, katlarda eğrilik sünekliği talebinin yüksek olduğu gözlenmiştir. Bina yüksekliği boyunca alt katlardan üst katlara doğru gittikçe eğrilik sünekliği talebinde bir azalma eğilimi gözlenmiştir. Bu eğilim perdeli binalarda davranışın konsol davranışına doğru kaydığı şeklinde yorumlanmaktadır.
16. Perdeli sistemlerde; akma ve göçme halleri, ya doğrudan perdeler tarafından belirlenmekte, ya da perdelerin bu oluşum üzerinde hissedilir düzeyde ağırlığı olduğu görölmektedir, perdelerde plastik mafsall oluşumu ile birlikte kapasite eğrisinin eğimi birden değişmektedir. Böylece, bina davranışını yönlendiren en etkili eleman perde olmaktadır. Perdelerin süneklik kapasitesi kesit eğilme rijitliğinden bağımsız görölmektedir. Perdede sünekliği yönlendiren unsurlardan biri de perdenin plandaki uzunluğu olduğundan[52], sistem süneklik kapasitesinin yükseltilmesi için kuşatma (sargı) olgusu tek başına yeterli görölmemektedir.
17. Performans noktasında; süneklik düzeyi yüksek olarak tasarlanan salt çerçevesel sistemde; spektral deplasman büyük, spektral ivme küçük kalmıştır. Buna karşın, süneklik düzeyi yüksek perdeli ve çok katlı bir binada; spektral deplasman nispi olarak daha küçük, spektral ivme daha büyüktür.

b) Öneriler

Bu çalışmada elde edilen sonuçların bir kısmı çalışmanın kapsamı ile sınırlıdır. Bu sonuçların daha genelleştirilebilmesi için aşağıdaki türden çalışmaların sürdürülmesi yararlı olur.

1. Düzlemsel burulmanın da sistem sünekliği üzerinde etkin olduğu bilinmektedir [53]. Fakat bu çalışma kapsamındaki analizler planda simetrik sistemler üzerinde yapıldığından burulma etkisi dikkate alınmamıştır. Burulma etkisini de dikkate alacak şekilde düzensiz binalar için benzer analizler yapılmalıdır. Çok sayıda ve çeşitli yapı türleri üzerinde yapılacak araştırmalar, ilk dikkate değer eleman akması yaklaşımının düzensiz binalara da uygulanabilirliğini ortaya çıkaracaktır. Örneğin, planda ve düşey düzlemde düzensizlikler içeren binalar için ve değişik yükleme durumları için benzer çalışmalar yapılmalıdır.
2. Eleman ve sistem sünekliği arasındaki ilişki açısından, çözümlemesi yapılan binalar önemli ipuçları vermektedir. Fakat özellikle çok serbestlik dereceli sistemler için, sistem sünekliği ile eğrilik sünekliği arasındaki ilişkinin daha ayrıntılı olarak ortaya konması için daha kapsamlı araştırmalar yapılmalıdır. Sonuçlar kısmında 12. maddede belirtilen eğilimin daha ayrıntılı olarak ortaya konulmasıyla eleman sünekliği ile sistem sünekliği arasında analitik ilişkiler kurulabilecektir.
3. Örnek bina çözümlemelerinde dolgu duvarlarının sistem davranışına etkisi ihmal edilmişti. Dolgu duvarlarının sistem rijitliğini etkilediği bilinmektedir[55]. Bu nedenle dolgu duvarlarının etkisini dikkate alan benzer analizler yapılmalıdır.
4. Bu çalışmada göçme hali için lokal veya toptan göçme durumları esas alınmıştır. Göçme hali hasar indeksleri ile de ilişkilendirilebilir. Hasar indeksi ile göçmeyi tanımlayan çalışmalar yapılabilir.
5. Statik itme analizleri gerçek bir depremden kaynaklanan yükleri tam anlamıyla temsil edemez. Bu bakımdan, önemli deprem kayıtları esas alınarak yapılacak dinamik analizlerle sonuçların karşılaştırılması faydalı olacaktır.
6. Sünek davranmaya zorlanan bir sistemde, plastik mafsallarda kesitlerinde büyük eğrilik sünekliği kapasitesi sağlanmış olmalıdır. Ancak bunu eksenel yüklü elemanlarda

sağlamak daha güç olduğundan, eğrilik sünekliği talebinin öncelikle kirişlerde ortaya çıkması için, sisteme kiriş mekanizması empoze edilmelidir. Nitekim modern yönetmelik yaklaşımlarında buna ağırlık verildiği görülmektedir. Tasarım aşamasında süneklikle ilgili hususlara ayrıca önem verilmelidir. Benzer şekilde, perdelerin donatı düzenlemesinde de titiz davranılmalıdır. Perdede bina yüksekliği boyunca ani süneklik kapasitesi değişimlerinden kaçınılmalı, enine donatılar da en az boyuna donatılar kadar irdelenmelidir.

7. Statik itme analizleri, yapıdan beklenen performans öngörülerek yapılan modern tasarım yaklaşımlarının çok önemli bir aracıdır. Tasarımcılar hızla bu kavrama alıştırılmalıdır.
8. Performans değerlendirmelerinde; eleman süneklik oranlarından da faydalanılabilir. Bunun için, yapı performansı ile eleman süneklik oranları arasında bağ kurmaya yönelik çalışmalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, 1997, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü. Ankara.
- [2] Ahmad, S.M., Shah, S.P., (1982), "Stress-Strain Curves Of Concrete Confined By Spiral Reinforcement", Journal Of ACI, 79:484-490.
- [3] Akbaş, B., (1997), Energy-Based Earthquake-Resistant Design Of Steel Moment Resisting Frames, PhD. Dissertation, Illionis Institute Of Technology, Chicago, Illionis.
- [4] Akiyama, H., (1985), Earthquake-Resistant Limit State Design For Buildings, University of Tokyo Press, Tokyo.
- [5] Anagnostopoulos, S. A., (1997), "Structural Analysis And Design Of Buildings For Earthquake Actions", Dördüncü Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 17-19 Eylül 1997, Ankara.
- [6] Arturo, E., S., (1990), "Experiments On Seismic Performance Of RC Frames With Hinging Columns", ASCE Journal of Structural Engineering Div., 116: 125-145.
- [7] Atalay, M.B., Penzien, J., (1975), "The Seismic Behavior Of Critical Regions Of R/C Components As Influenced By Moment, Shear and Axial Force", Report No: EERC75-19, EERC, Berkeley CA.
- [8] ATC-40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Volume 1, (1996), Applied Technology Council Report No: SSC 96-01, California
- [9] Aydemir G., (1995), Nonlinear Earthquake Response Of Reinforced Concrete Frames, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Deprem Araştırma Enstitüsü (yayımlanmamış).
- [10] Bayülke, N., (1989), Depremler ve Depreme Dayanıklı Betonarme Yapılar, Teknik Yayınevi, Ankara.
- [11] Berktaş, İ., (1988), Kırılma Çizgileri Teorisi Ve Uygulamaları, Yıldız Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi-İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- [12] Bertero, V.V., Popov, E. P., Wang, T.Y., (1974), "Hysteretic Behavior Of R/C Flexural Members With Special Web Reinforcement", Report No:EERC 74-9, EERC, University of California, Berkeley.

- [13] Blume, J. A., Newmark, N. M., Corning, L. H., (1961), Design of Multi-storey Reinforced Concrete Buildings For Earthquake Motions, Portland Cement Association, Chicago.
- [14] Building Code Requirements For Reinforced Concrete And Commentary, (1983), ACI-318-83, American Concrete Institute, Detroit.
- [15] Burdette, E., G., Goodpasture, D., W., Bernal, D., (1984), "Design Of Reinforced Concrete Frames Using Inelastic Response Spectra", Proceedings of 8th. WCCE, San Francisco. V: 499-606.
- [16] Canadian Standard-A23-3-94, (1994), Design of Concrete Structures, Canadian Standards Association, Ontario, Canada.
- [17] Celep, Z., Kumbasar, N., (1993), Deprem Mühendisliğine Giriş Ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Sema Matbaacılık, İstanbul.
- [18] Chai, Y. A., Fajfar, P., Romstad, K. M., (1998), "Formulation of Duration-Dependent Inelastic Seismic Design Spectrum", ASCE Journal of Structural Engineering Div., 124:913-921.
- [19] Çakıroğlu, A., (1989), Yatay Yükleri Taşıyan Yapı Elemanları, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul.
- [20] Çelebi, M., Penzien J., (1973), "Experimental Investigation Into The Seismic Behavior Of Critical Regions Of R/C Components As Influenced By Moment And Shear", Report No: EERC 73-4, EERC, University Of California, Berkeley.
- [21] Desayi, P., Iyengar, K.T.S.A., Reddy, T.S., (1978), "Equations Of Stress-Strain Curves Of Concrete Confined In Circular Steel Spiral", Journal Of Materials & Structural Research And Testing, Paris.,11:339-345.
- [22] Diaz, O., Mendoza, E., Esteva, L., (1994), "Seismic Ductility Demands Predicted By Alternate Models Of Building Frames", Earthquake Spectra, 10: 465-487.
- [23] Dilger, W. H., Koch, R., Kowalezyk, M.J., (1984), "Ductility Of Plain And Confined Concrete Under Different Strain Rates", Journal of ACI, 81:73-81.
- [24] Erdik, M., Yüzügül, Ö., (1980), Deprem Mühendisliği Açısından Yapı Dinamiğine Giriş, İmar Ve İskan Bakanlığı Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- [25] Ersoy, U., (1987), "Betonarme Yapılarda Deprem Dayanımının Sağlanması", 3. Yapı Mekaniği Semineri, ODTÜ-AÜ, Eskişehir: 113-142.

- [26] Ersoy, U., Aktan, E., Tankut, T., (1980), "Earthquake Resistant Prestressed Concrete Structures", 7.th. W.C.C.E. İstanbul: 296-302
- [27] Ersoy. U., Özcebe G., (1998), "Sarılmış Betonarme Kesitlerde Moment-Eğrilik İlişkisi Analitik Bir İrdeleme", TMMOB Teknik Dergi, 9: 1799-1828.
- [28] Fajfar P., (1997). "A Simplified Nonlinear Method For Seismic Damage Assesment", ", Dördüncü Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 17-19 Eylül 1997, Ankara.
- [29] Fajfar P., Gašperšič P., (1996), "The N2 Method For The Seismic Damage Analysis Of RC Buildings", Earthquake Engineering And Structural Dynamics, 25: 31-46.
- [30] Fajfar, P., Fischinger, M., (1990), "Earthquake Design Spectra Considering Duration of Ground Motion", Proceedings of 4'th. U. S. National Conference on Earthquake Engineering, 2:15-24.
- [31] FEMA-273 NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, (1997), Federal Emergency Management Agency, California.
- [32] FEMA-306 Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings- Basic Procedures Manual, (1998), Federal Emergency Management Agency, California.
- [33] FEMA-307 Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings- Technical Resources, (1998), Federal Emergency Management Agency, California.
- [34] Gülkan, P., Sözen, M., A., (1997), "Binaların Deprem Hesabında Yer Değiştirme Kriterinin Uygulanması", Dördüncü Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 17-19 Eylül 1997, Ankara..
- [35] Gündüz, A., (1991), "Yüksek ve Normal Mukavemetli Betonların Davranışının Yanal Donatı İle Yetkinleştirilmesi", 2. Ulusal Beton Kongresi, İ.M.O. İstanbul : 147-158.
- [36] Hasgür, Z., Gündüz, A. N., (1996), Betonarme Çok Katlı Yapılar, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul.
- [37] IDARC-2D V4.0 Computer Program, "Inelastic Damage Analysis Of RC Building Structures", (1996). Developed By Park. Y. J., Reinhorn A. M., Kunnath S. K., State University Of New York.
- [38] Iwan, W. D., (1996), "The Drift Demand Spectrum And Its Application To Structural Design And Analysis", Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Paper no:1116, Acapulco, Mexico.

- [39] Jagajeski, S. W., Bertero, V. V., Bouwkamp, J. G., (1978). Hysteretic Behavior Of R/C Columns Subjected To High Axial And Cyclic Shear Forces, EERC, Report Number:UCB/EERC-78/05, Berkeley CA.
- [40] Kent, D.C., and Park, R., (1971), "Flexural Members With Confined Concrete", ASCE Journal of Structural Division, 97: 1969-1990.
- [41] Kırac, N., (1990), Betonarme Çerçeve Sistemlerin Yatay Yük Altında Düktilitelerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (yayımlanmamış).
- [42] Lam, N., Wilson, J., Hutchinson, G., (1998), "The Ductility Reduction Factor In The Seismic Design Of Buildings", Journal of Earthquake Engineering And Structural Dynamics, 27:749-769.
- [43] Ma, S.Y.M., Popov, E.P., Bertero, V.V., (1976), "Experimental And Analytical Studies On the hysteretic Behavior Of R/C Rectangular And T-Beams", Report No:EERC 76-2, EERC, University Of California, Berkeley.
- [44] Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R., (1988), "Observed Stress-Strain Behavior Of Confined Concrete", ASCE Journal Of Structural Engineering Div., 114: 1827-1849.
- [45] Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R., (1988), "Theoretical Stress-Strain Model For Confined Concrete", ASCE Journal Of Structural Engineering Div., 114: 1804-1825.
- [46] Mander, J. B., Priestley, M.J. N. Park, R., (1984), "Seismic Design Of Bridge Piers", Research Report No:84-2, University of Canterbury, New Zealand.
- [47] Newmark N. M., Rosenblueth E., (1971), Fundamentals of Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Englewood Cliffs. USA.
- [48] Park, R., Leslie, P.D., (1977), "Curvature Ductility Of Circular Reinforced Concrete Columns Confined By The ACI Spiral", 6'th Australian Conference On The Mech. Of Struct. And Mater., 1:342-349.
- [49] Park, R., Paulay, J., (1975), Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons Interscience Publication, Canada.
- [50] Park, R., Priestley, M. J. N., Gill, W., (1982), "Ductility Of Squared Confined Concrete Columns", ASCE Journal Of Structural Engineering Div., 108: 929-950.
- [51] Paulay, T., (1993), Simplicity And Confidence In Seismic Design, John Wiley & Sons Interscience Publication, West Sussex.

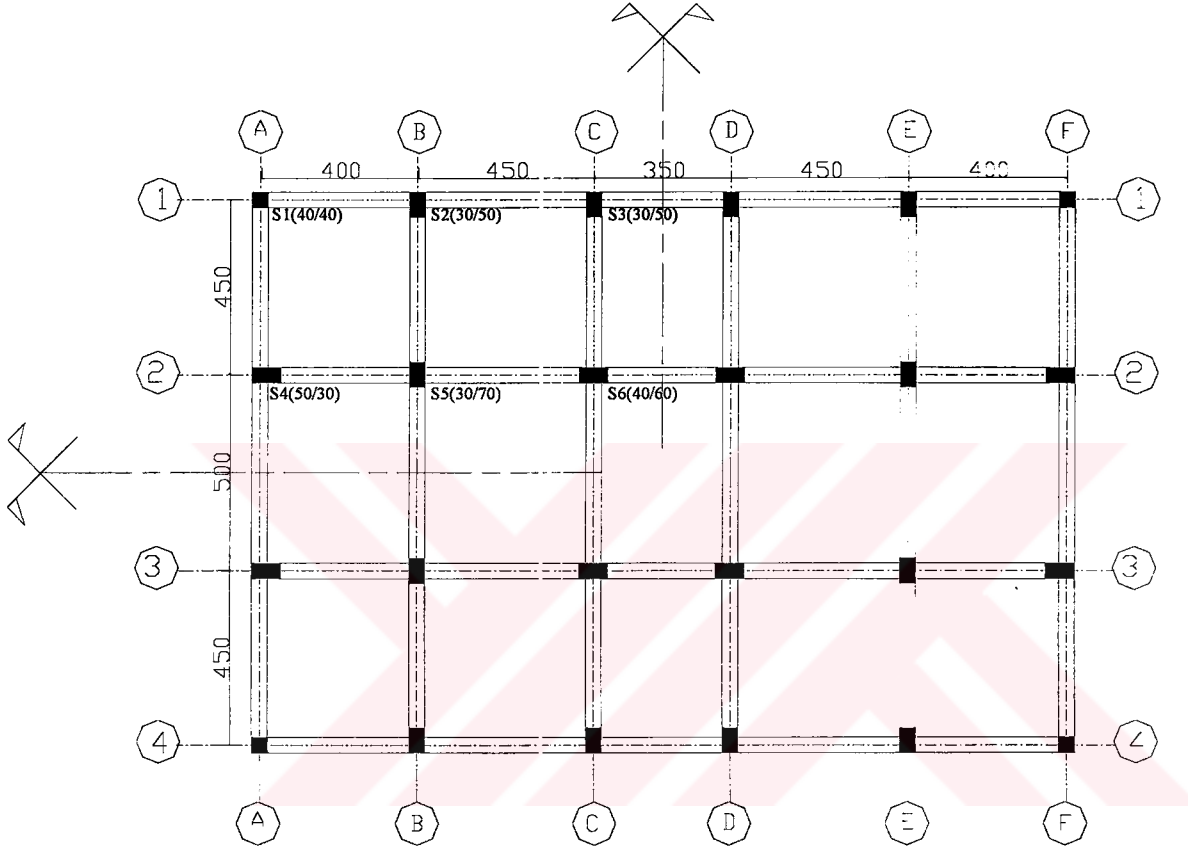
- [52] Paulay, T., (1997), "Seismic Torsional Effects On Ductile Structural Wall Systems", *Journal of Earthquake Engineering* , 1:721-745.
- [53] Paulay, T., (1998), "Torsional Mechanism In Ductile Building Systems", *Journal of Earthquake Engineering And Structural Dynamics*, 27:1101-1121.
- [54] Paulay, T., Priestley, M.,J., N., (1992). *Seismic Design Of Reinforced Concrete And Masonry Buildings*, John Wiley & Sons Interscience Publication, New York.
- [55] Penelis, G. G., Kappos, A. J., (1997). *Earthquake-Resistant Concrete Structures*, E& FN SPON An Imprint of Chapman &Hall, London.
- [56] Priestley, M. J. N., Seible,F., Calvi, G. M.. (1996), *Seismic Design And Retrofit Of Bridges*, John Wiley & Sons Interscience Publication, New York.
- [57] Priestley, M., J., N., (1997), "Displacement-Based Seismic Assessment Of Reinforced Concrete Buildings", *Journal Of Earthquake Engineering*, 1: 157-197.
- [58] Razvi, S., Saatçioğlu, M., (1994), "Strength And Deformability Of Confined High Strength Concrete Columns", *ACI Journal Of Structural Engineering Div.* 91: 678-684.
- [59] Rega, G., Vestroni, F., Vulcano, A., (1984), "On The Relationship Between Overall And Local Ductility Demand For Plane Frames Subjected To Earthquakes", *Proceedings of 8'th.WCCE*, Prentice Hall Inc., San Francisco, IV: 575-582.
- [60] Roy, H.E.H., Sözen, M.A., (1964), "Ductility Of Concrete", *ASCE Proceedings Of Int. Symp. On The Flexural Mech. Of Reinforced Concrete*, 1:213-227.
- [61] Saatçioğlu, M., Razvi, S., (1992), "Strength and Ductility Of Confined Concrete", *ASCE Journal Of Structural Engineering Div.*, 118: 1590-1607.
- [62] Saatçioğlu, M., Wood, S. L., French, C. W., (1989), "Deformability of Reinforced Concrete Members", In: *Seismic Engineering, Research and Practice.*, Charles A. Kircher and Anil K. Chopra.(Editors), *Proceedings of sessions Related To Seismic Engineering At Structural Congress'89*.
- [63] SAP90 Structural Analysis Program. Version 5.4., Developed By Edward Wilson, Computers And Structures Incompany, Berkeley.
- [64] Scott, B. D., Park, R., Priestley, M.J.N., (1982), "Stress-Strain Behavior of Concrete Confined By Overlapping Hoops At Low And High Strain Rates",

Journal Of American Concrete Institute, 79:13-17

- [65] Sheikh, S., Üzümeri, S.M., (1980), "Mechanism Of Confinement In Tied Columns", Proceedings of 7'th.WCCE, Prentice Hall Inc., İstanbul, 7:71-78.
- [66] TS-500, (1984), "Betonarme Yapıların Hesap Ve Yapım Kuralları", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [67] Uang, C. M., Bertero, V.V., (1988), "Use of Energy As a Design Criterion in Earthquake-Resistant Design", Rep. No:UCB/EERC-88/18, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [68] Üzümeri Ş. M., (1997), "Use And Abuse Of Ductility Concept", First Japan Turkey Workshop On Earthquake Engineering, March, 1997, İstanbul, 1: 69-82.
- [69] Vallenas, J., Bertero, V.V., Popov, E.P., (1977), "Concrete Confined By Rectangular Hoops Subjected To Axial Loads", Report no:77/13, EERC, University Of California, Berkeley.
- [70] Watson, S. F., Zahn, A., Park, R., (1994), "Confining Reinforcement For Concrete Columns", ASCE Journal Of Structural Engineering Div., 120: 1798-1823.
- [71] Weng, Y. J., Bao-Min, M.,(1984), "Ductility of R/C Columns With Various Types Of Ties And Stirrup Ratios", Proceedings of 8'th.WCCE, Prentice Hall Inc., San Francisco, 5: 837-844.
- [72] Zahrah, T.F., Hall, W. J., (1983), "Earthquake Energy Absorbsion in SDOF Structures", ASCE Journal of Structural Engineering Div., 110:1757-1772.

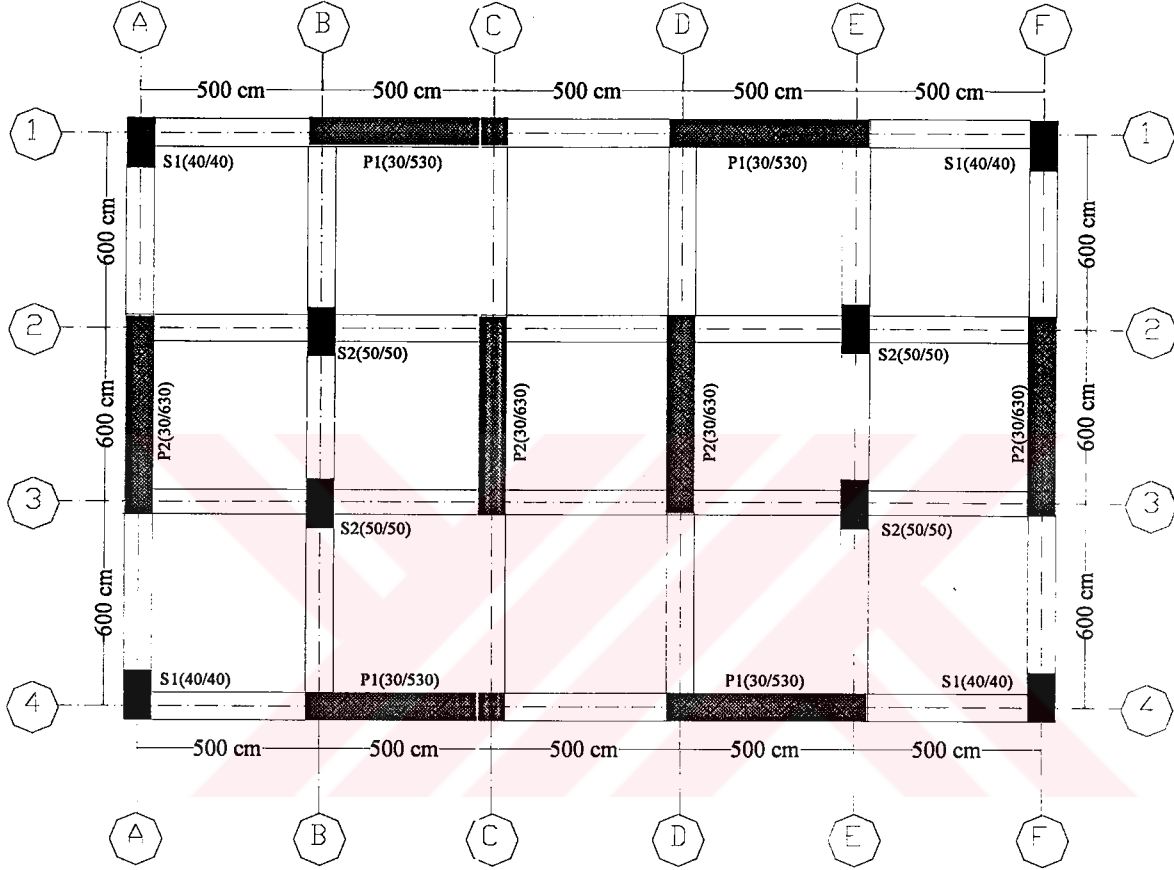
EKLER

Ek 1a. 5 katlı bina taşıyıcı sistemi ve tasarım kriterleri



Malzeme : BS 20 / BÇ- I (TS-500, 1984)	Kat Adedi : 5
Zemin Kat yüksekliği : 4.5 m	Normal Kat yüksekliği : 3 m
Döşeme : 10 cm	Kullanım Amacı : İşyeri, konut
Bina önem katsayısı $I=1.0$	1. derece deprem bölgesi
$T_1 = 0.07 \cdot (16.5)^{3/4} = 0.573$ s	Etkin yer ivmesi katsayısı $A_0=0.40$
$A(T)=A_0 \cdot I \cdot S(T) = 0.40 \cdot 1 \cdot 2.5=1.0$	$T_A=0.15$ s , $T_B=0.60$ s (Z3 sınıfı zemin)
Süneklik düzeyi yüksek sistem $R=8$	$S_T=2.5$ ($T_A > T_1 > T_B$)
$W=17418$ kN	$R_A(T_1)=R=8$ ($T_1 > T_A$)
$V_T=W \cdot A(T) / R_A(T_1) \geq 0.10 \cdot A_0 \cdot I \cdot W$	$V_T=17418 \cdot 1/8 = 2177$ kN (taban kesme kuvveti)

Ek 1b. 10 katlı perdeli bina taşıyıcı sistemi ve tasarım kriterleri



İki doğrultuda simetrik, perdeli, süreklilik düzeyi yüksek sistem

Malzeme : BS 25 / BÇ- III (TS-500, 1984)	Kat Adedi : 10
Kat Yüksekliği : 3 m; Döşeme: 15 cm	Kullanım Amacı : İşyeri
Deprem bölgesi : I; $A_0=0.40$	Bina önem katsayısı: $I=1.0$
$T_A=0.15$ s , $T_B=0.60$ s (Z3 sınıfı zemin)	$S(T)=2.5(0.60/0.765)^{0.8}=2.06$
$A_t=1.578$ m ² ; $C_t=0.0597$	$A(T)=A_0 \cdot I \cdot S(T) = 0.40 \cdot 1 \cdot 2.06=0.824$
$T_1= 0.765$ s	$R_A(T_1)=R=7$ ($T>T_A$)
$V_{Tmin}=0.10 \cdot A_0 \cdot I \cdot W=2048$ kN	$W=51200$ kN
$V_T=W \cdot A(T) / R_A(T_1) =6030$ kN (taban kesme kuvveti)	

Ek 2. IDARC-2D V4.0 Bilgisayar Programı

Bu çalışmada kullanılan program Andrei M. Reinhorn (State University of New York at Buffalo) ve Sashi K. Kunnath (University of Central Florida) tarafından betonarme binalar için 1996'da geliştirilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen birikimlerden ve pek çok analitik çalışma sonuçlarından yararlanılarak yatay ve düşey yükler altında doğrusal elastik olmayan analiz yapmaktadır. Analizi yapılacak binanın programa tanıtılması için iki boyutlu olarak modellenmiş olması gerekir. Modele ait parametreler veri olarak kullanılır. Sistemi tanıtmaya, dinamik analiz ve hasar analizi olmak üzere ilk versiyonlarında üç ana bölümden meydana gelen programa daha sonra kolon, kiriş ve perde duvarların mukavemet zarf eğrilerini otomatik hesaplayan modüller, ikinci mertebe etkilerini dikkate alan opsiyonlar yarı dinamik analiz ve itme analizi modülleri eklenmiştir.

Program bina sisteminin içinde bulunduğu durumu ve bu duruma ait parametreleri hesaplayabilmektedir. Kullanıcı isteğine bağlı olarak analizin herhangi bir aşamasına ait durum gözlenebilmekte, bu duruma ilişkin sonuçlar görüntülenebilmektedir. Bu nedenle binadaki hasar, süneklik, modal değerler gibi davranışı belirleyen parametreler kolayca incelenebilmektedir.

Programın işlem sırasında kullandığı model ve kabuller şöyledir:

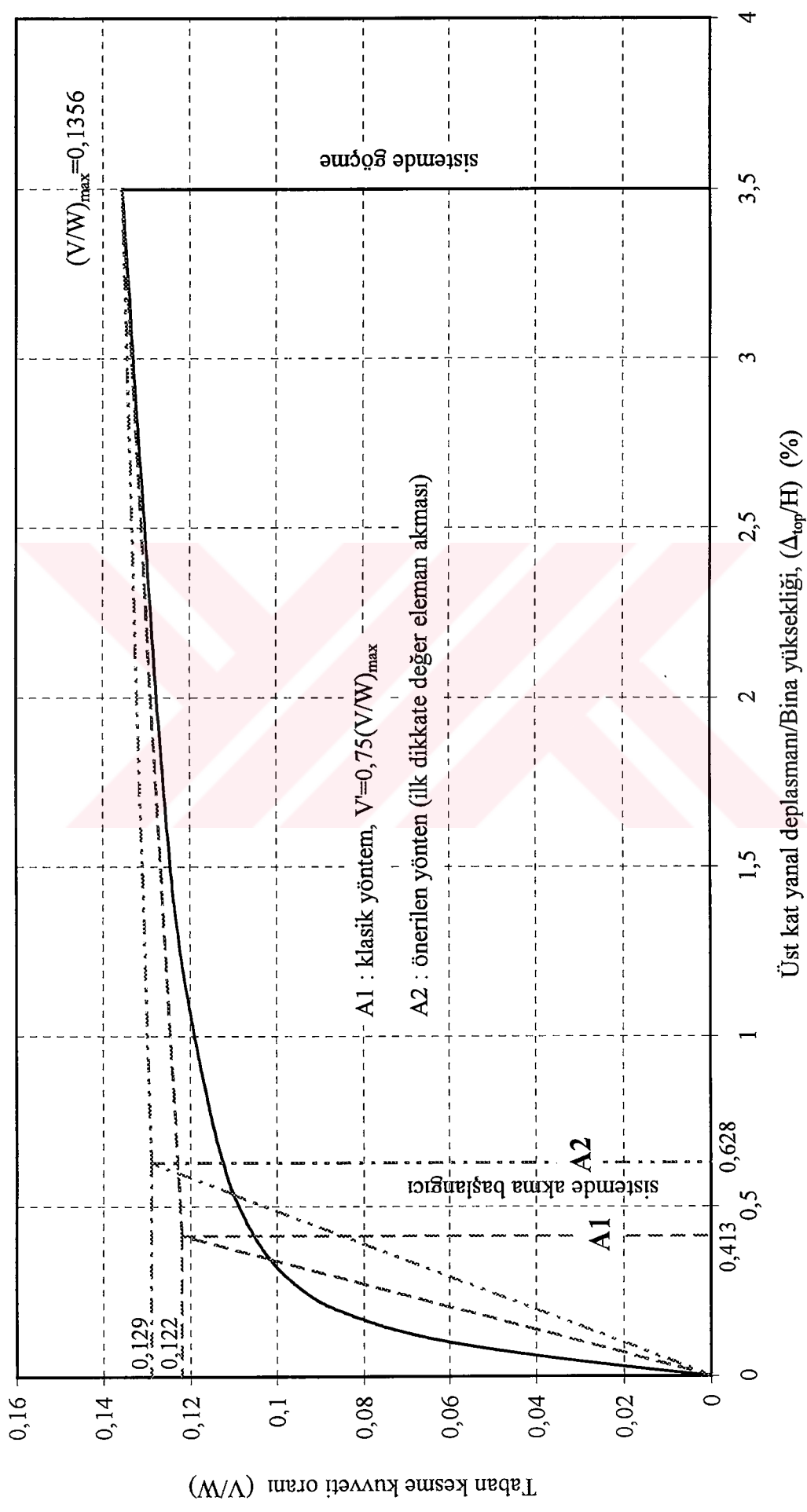
- Her katta rijit diyafram kabulü ile yalnız bir serbestlik derecesi vardır.
- Beton için Kent ve Park modeli kullanılmaktadır.
- İkinci mertebe etkileri şiddetçe devrilme momentine eşdeğer ilave yatay yükler şeklinde hesaba katılmaktadır.
- Park ve Ang hasar indeksi kullanılmaktadır.

- Hesabı yapılan çerçeve düzlemine dik diğer taşıyıcı elemanların davranışa etkisi bir ölçüde dikkate alınabilmektedir.
- Dolgu duvarları etkisi dikkate alınmaktadır.
- Eğilmeden önce düzlem olan kesitlerin eğilmeden sonra düzlem kaldığı kabul edilmektedir.
- Betonun çatladıktan sonra çekme dayanımı ihmal edilmektedir.
- Histeretik davranış modellerinden üç-parametrelili Park modeli, bilineer histeretik model, Kelvin modeli, Maxwell modeli gibi modeller kullanılabilmektedir.

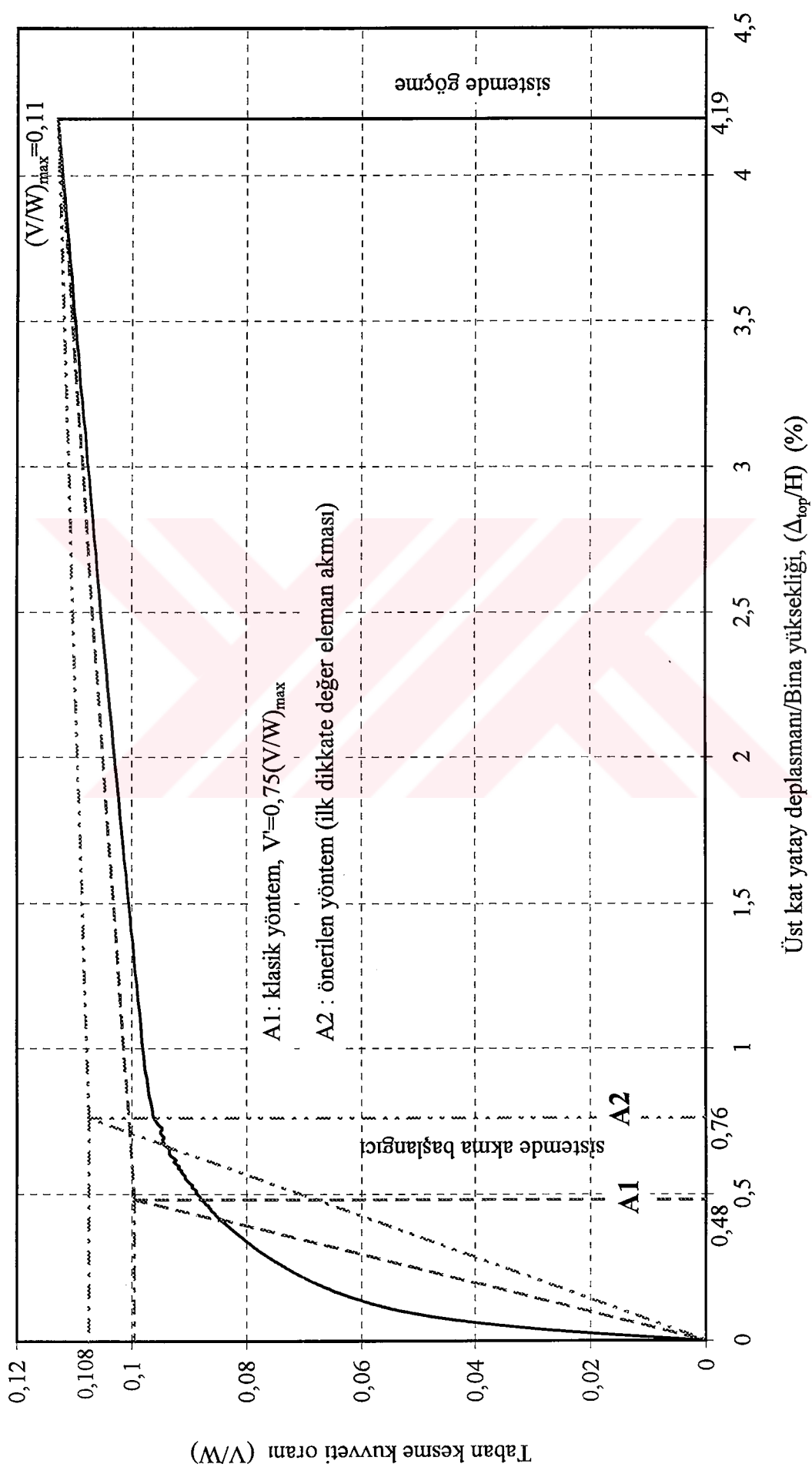
Kullanıcı programa sırasıyla aşağıdaki başlıklarda ifade edilen verileri girmektedir.

1. Sistemi tanıtıcı genel bilgiler (eleman çeşit sayıları, birimler, özdeş çerçeve sayıları, plan bilgileri vs.)
2. Malzeme özellikleri (beton ve donatı mekanik özellikleri)
3. Histeretik model özellikleri
4. Kolon, kiriş, perde duvar, dolgu duvarı gibi elemanların geometrik özellikleri
5. Elemanların birbirleriyle bağları
6. Analizin özellikleri (yükler, analizin tipi, analiz kontrol parametreleri vs.)
7. Çıktıları kontrol edecek parametreler

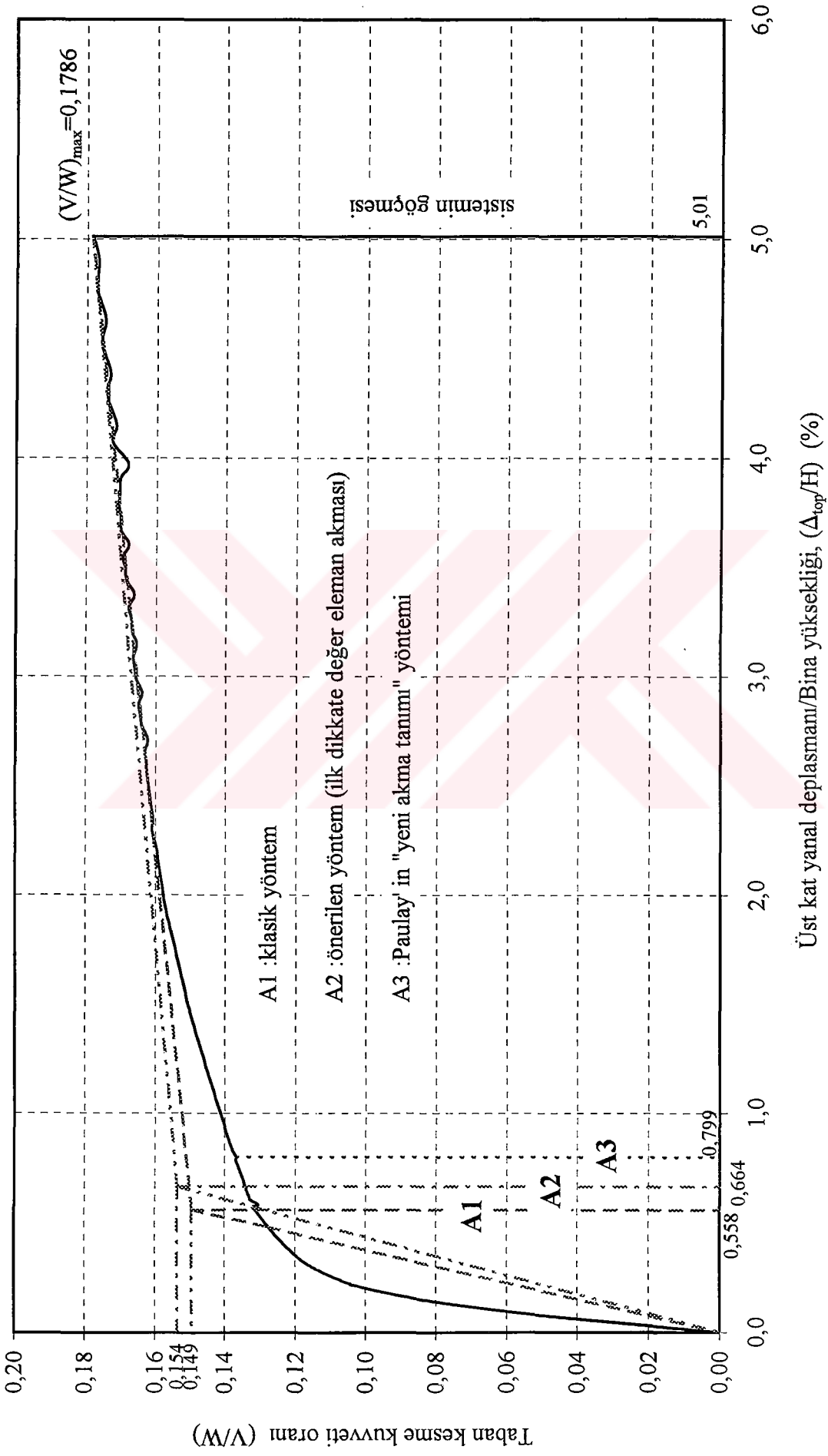
Ek 3.1 5 katlı binanın X yönündeki statik itme analizine ait kapasite eğrisi ile eğri üzerinde “klasik yöntem” ve “ilk dikkate değer eleman akması” yaklaşımıyla sistem akma başlangıcının belirlenmesi



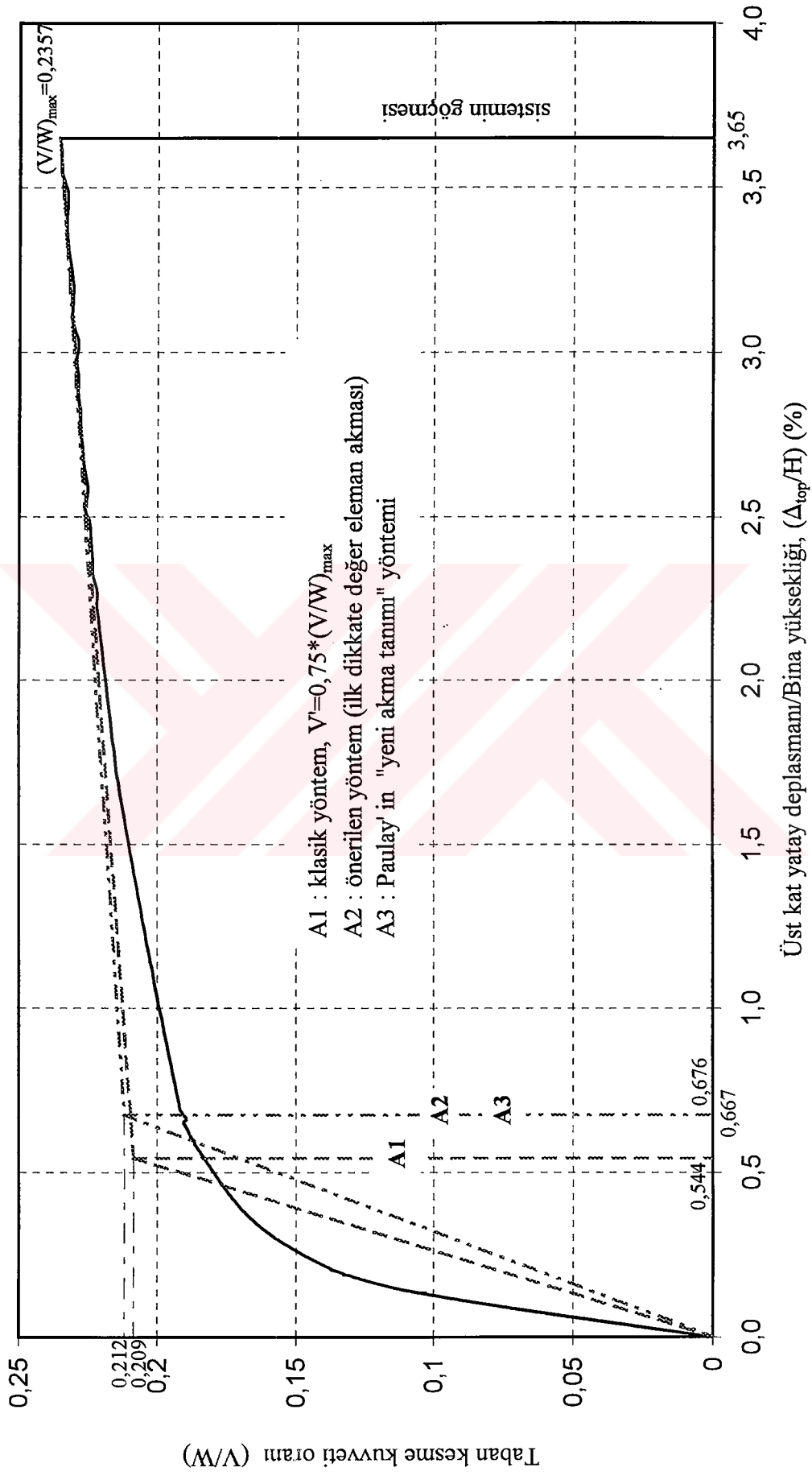
Ek 3.2. 5 katlı binanın Y yönündeki statik itme analizine ait kapasite eğrisi ile "klasik yöntem" ve "ilk dikkate değer eleman akması" yaklaşımıyla sistem akma başlangıcının belirlenmesi



Ek 3.3. 10 katlı perdeli binanın X yönündeki statik itme analizine ait kapasite eğrisi ve çeşitli yollardan sistem akma deplasmanının bulunması



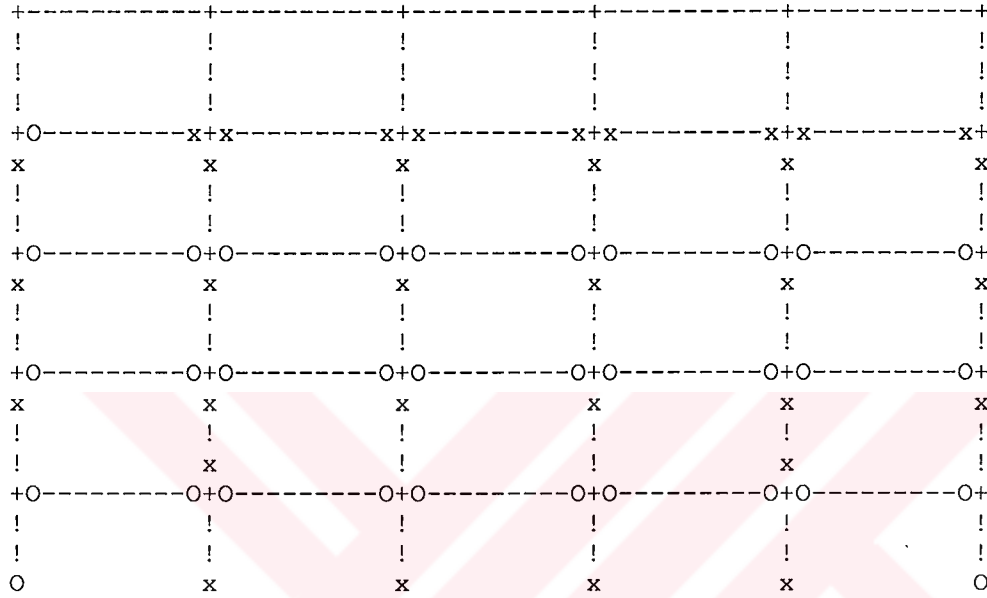
Ek 3.4. 10 katlı perdeli binanın Y yönündeki statik itme analizine ait kapasite eğrisi ve çeşitli yollardan sistem akma deplasmanının belirlenmesi



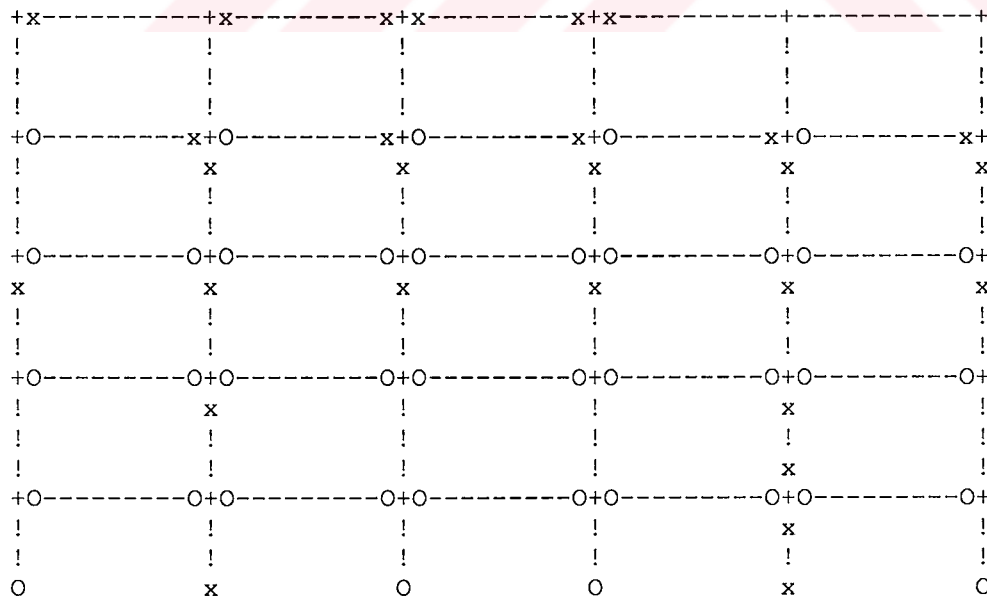
Ek 4.1. 5 katlı binanın X yönünde statik itme analizinde ilk dikkate değer eleman akmasının olduğu andaki durum

($V/W=0.1101$, $U_{TOP}/H=0.0054$)

1 numaralı çerçeve (1-1 aksı)

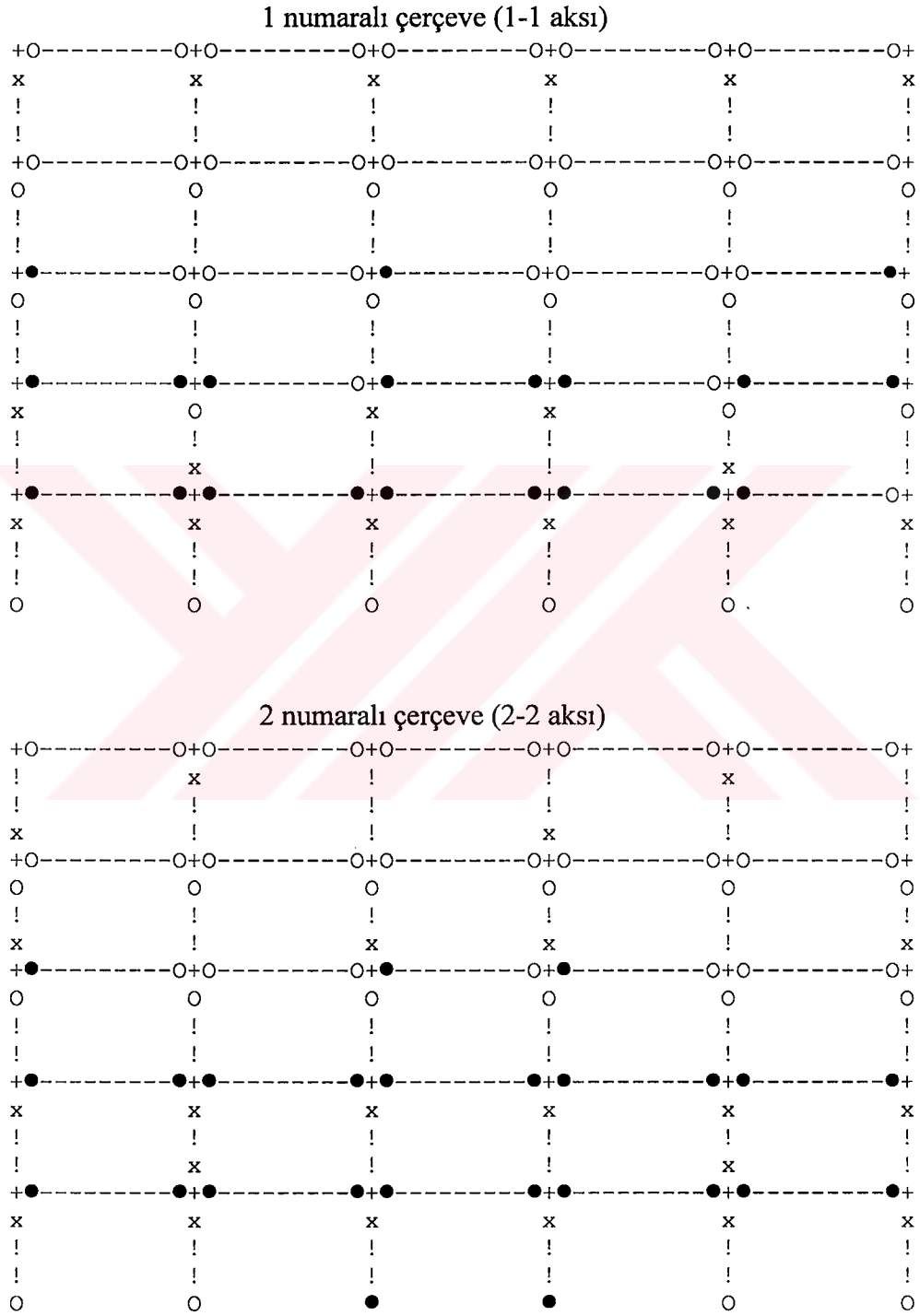


2 numaralı çerçeve (2-2 aksı)



İşaretler: --- =kiriş ! =kolon X =çatlama O =akma • =göçme

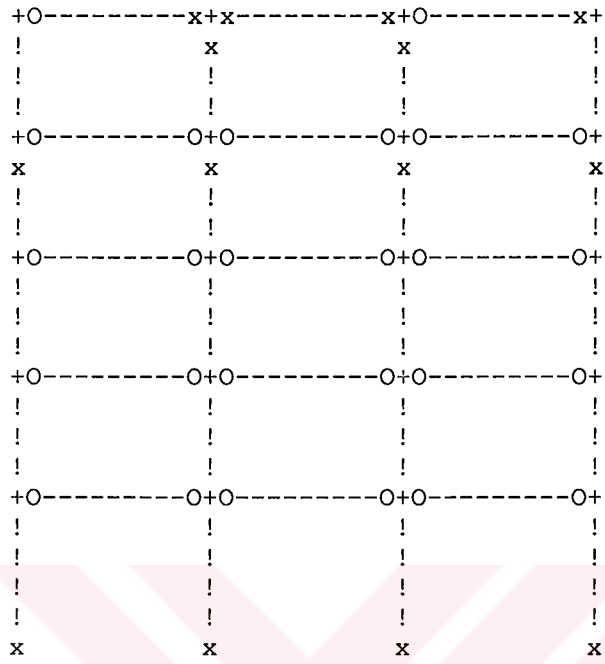
Ek 4.2. 5 katlı binanın X yönünde statik itme analizinde sistemin göçtüğü andaki durum



İşaretler: --- =kiriş ! =kolon X =çatlama O =akma • =göçme

İşaretler: --- =kiriş !=kolon X=çatlama O =akma ● =göçme

3 numaralı çerçeve (C-C aksı)

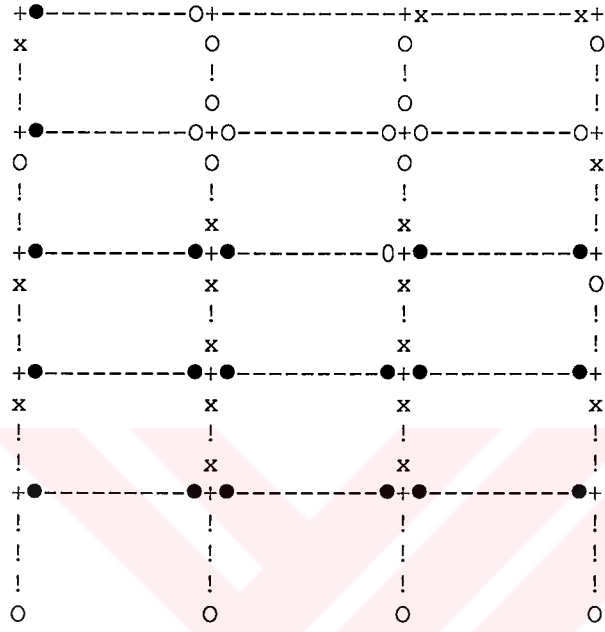


İşaretler: --- =kiriş ! =kolon X =çatlama O =akma • =göçme

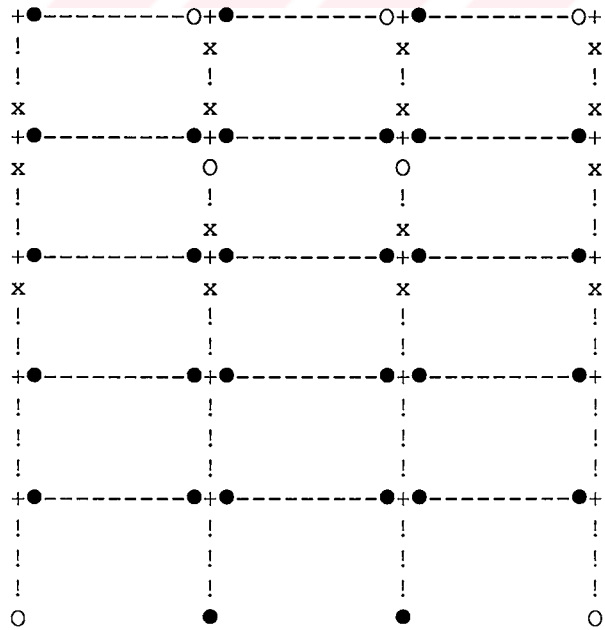
Ek 4.4. 5 katlı binanın Y yönünde statik itme analizinde sistemin göçtüğü andaki durum

(Adım no 471, $V/W=0,1130$)

1 numaralı çerçeve (A-A aksı)

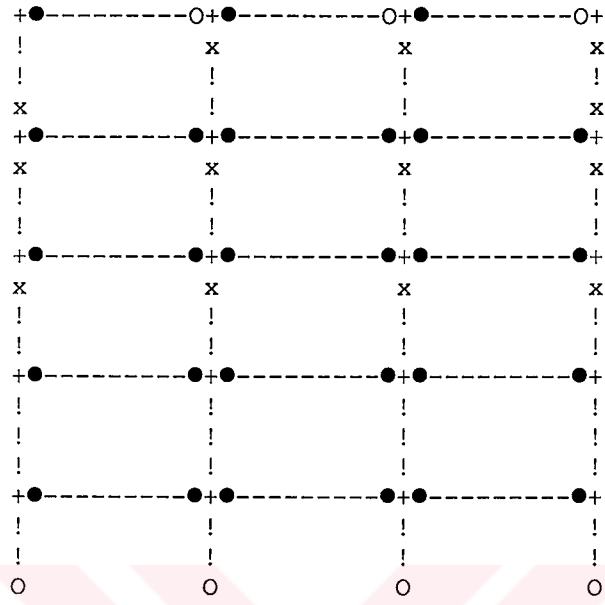


2 numaralı çerçeve (B-B aksı)



İşaretler: --- =kiriş ! =kolon X =çatlama O =akma • =göçme

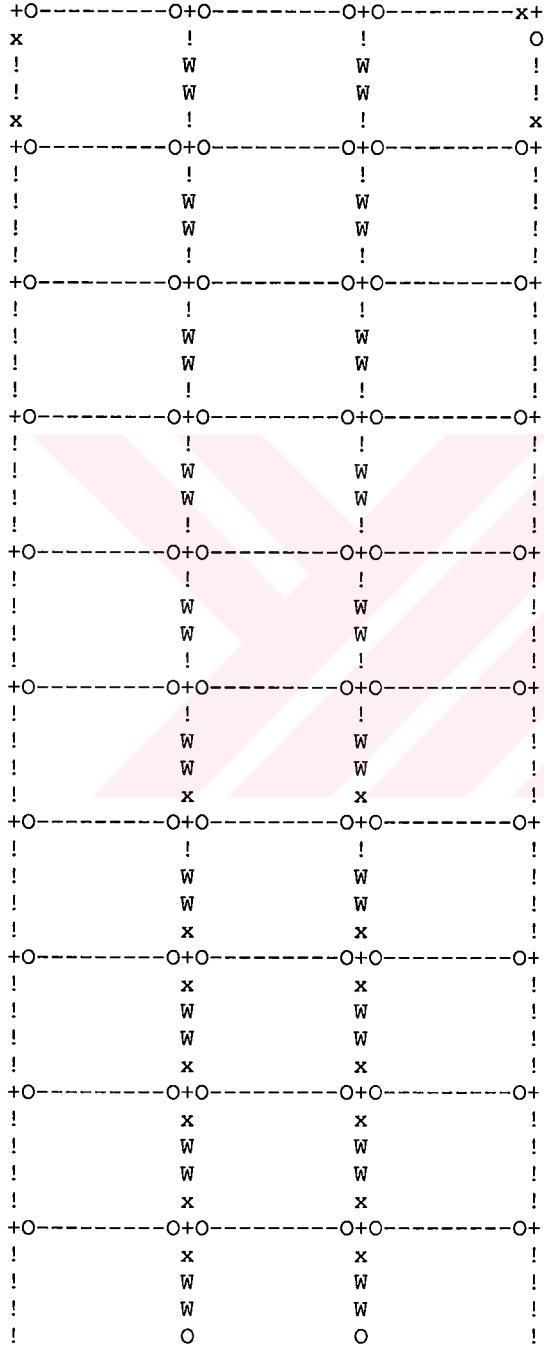
3 numaralı çerçeve (C-C aksı)



İşaretler: --- =kiriş ! =kolon X =çatlama O =akma • =göçme

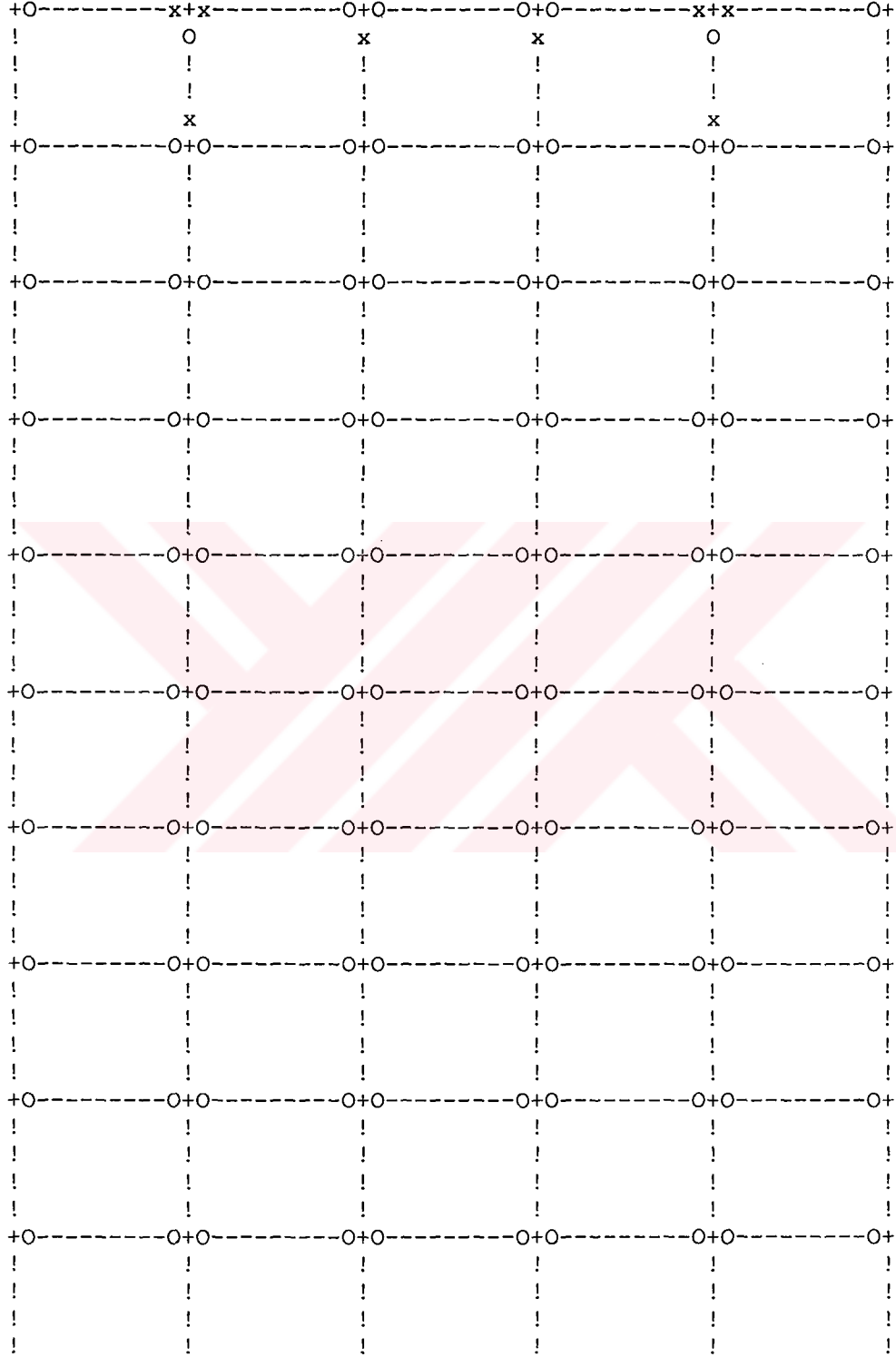
Ek 4.5. 10 katlı binanın X yönünde statik itme analizinde sistemin akmaya başladığı andaki durum

1 numaralı çerçeve (1-1 aksı)



İşaretler: ---=Kiriş ! = Kolon W =Perde X = Çatlama O = Akma

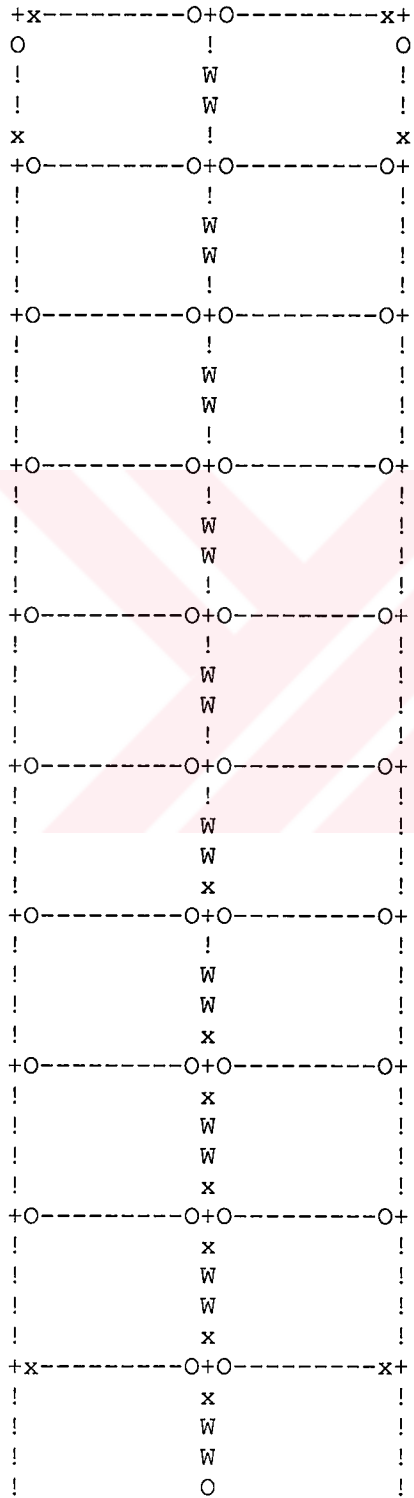
2 numaralı çerçeve (2-2 aksı)



İşaretler: --- =Kiriş ! = Kolon X = Çatlama O = Akma

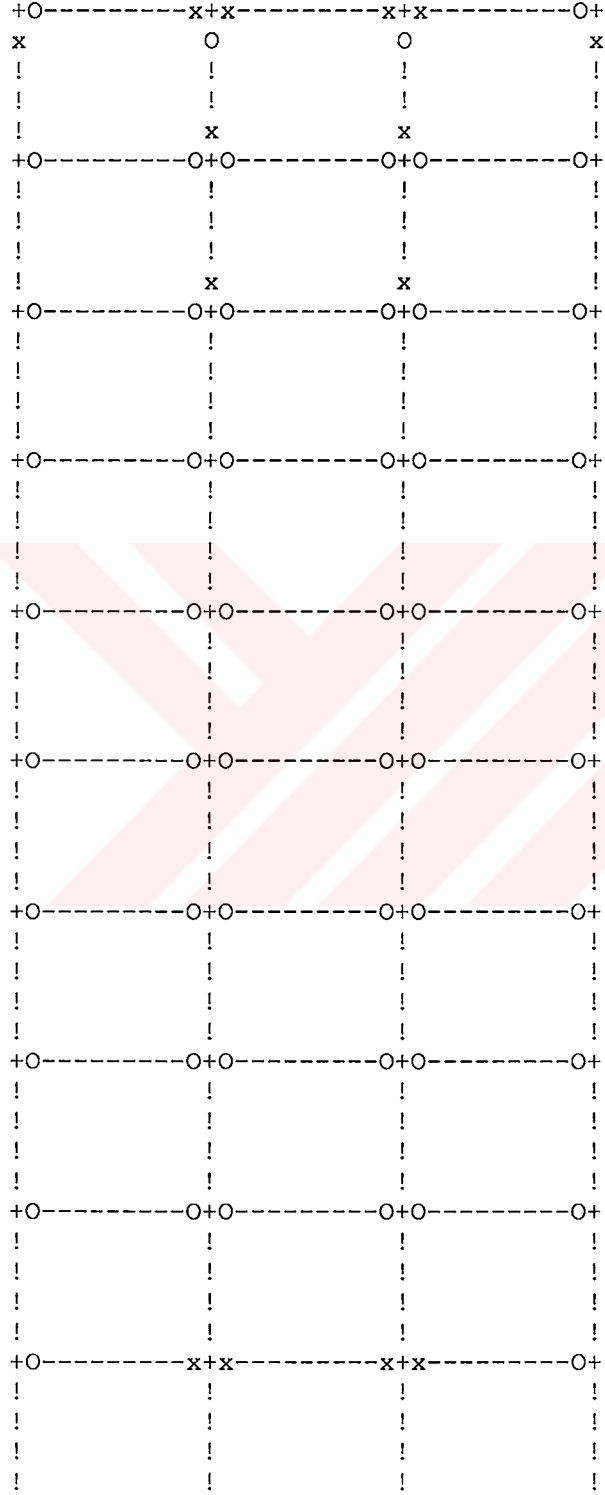
Ek 4.6. 10 katlı binanın Y yönünde statik itme analizinde sistemin akmaya başladığı andaki durum

1 numaralı çerçeve (A-A aksı)



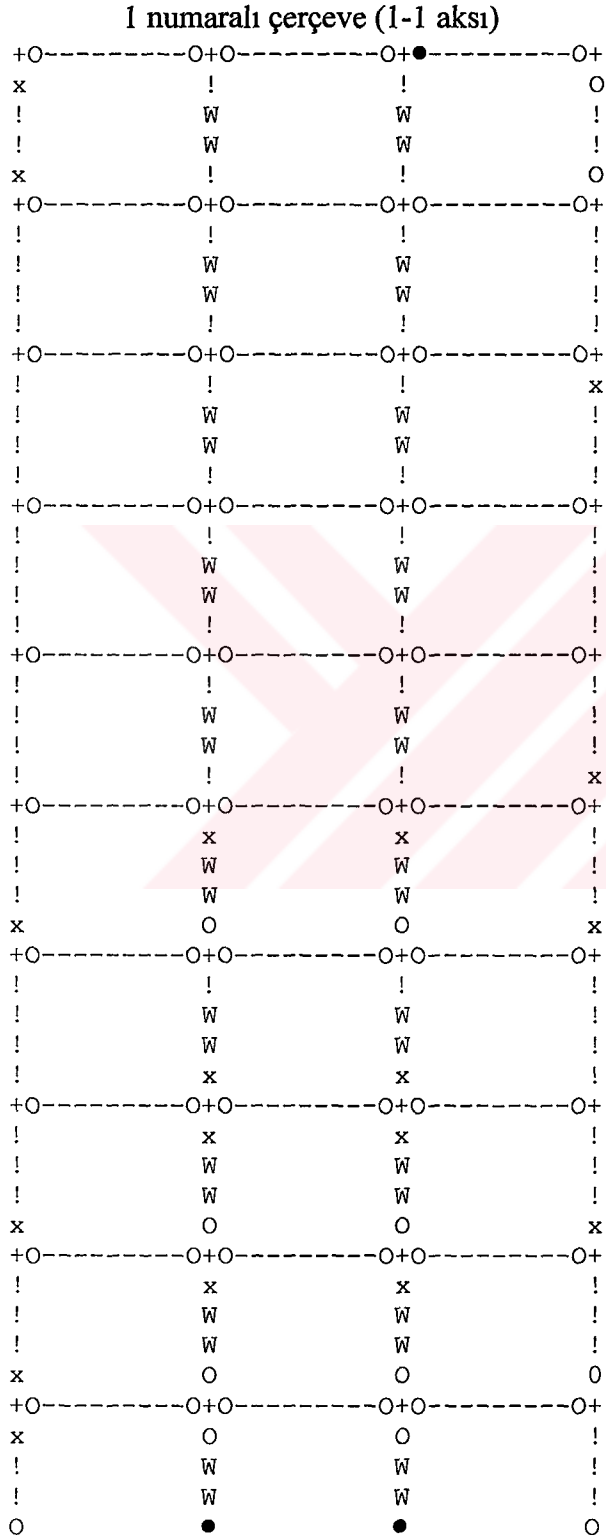
İşaretler: --- =Kiriş ! = Kolon W =Perde X = Çatlama O = Akma

2 numaralı çerçeve (B-B aksı)



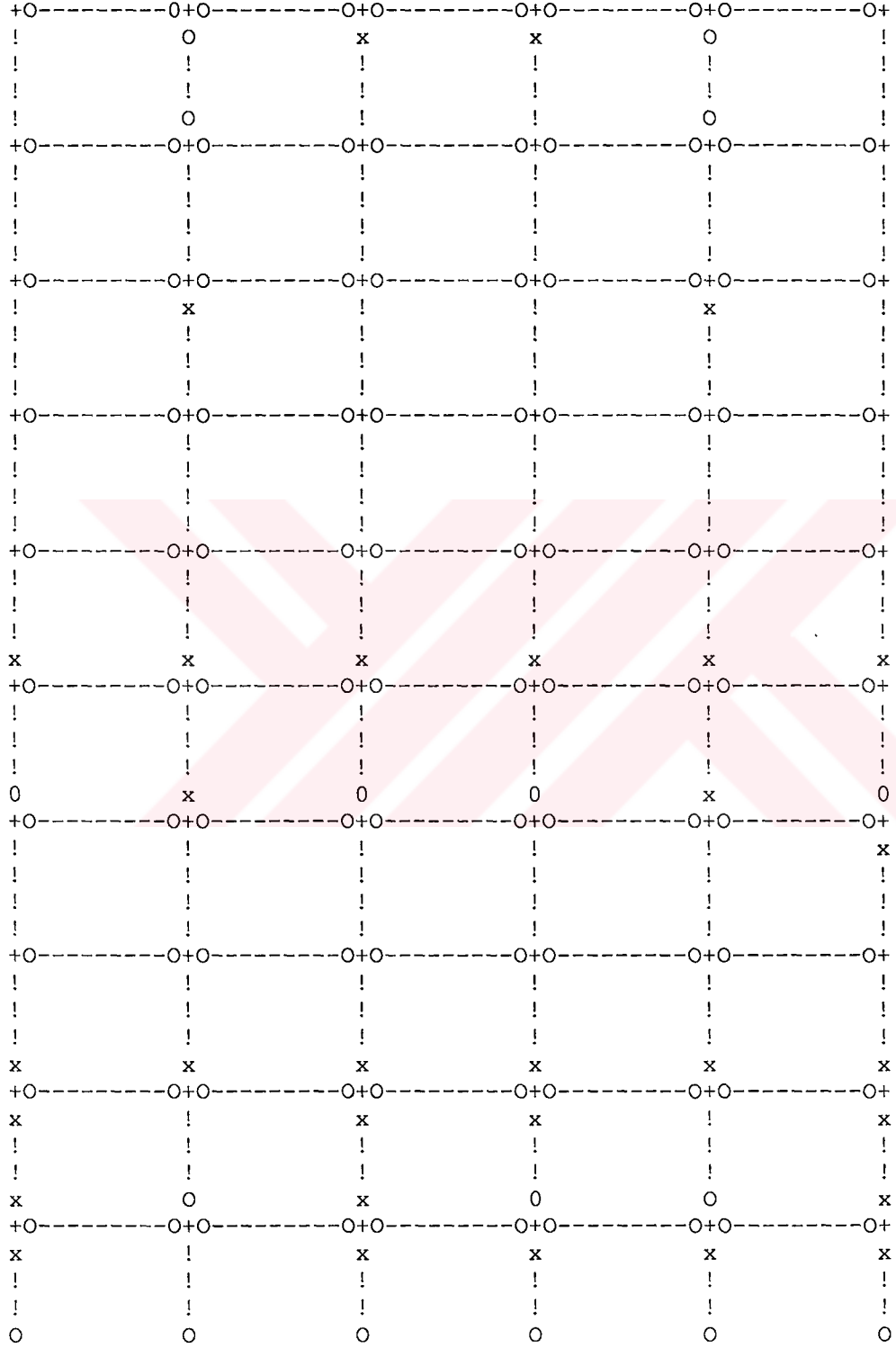
İşaretler: --- =Kiriş ! = Kolon X = Çatlama O = Akma

Ek 4.7. 10 katlı perdeli binanın X yönünde statik itme analizinde sistemin göçtüğü andaki durum



İşaretler: --- =kiriş ! =kolon X =çatlama O =akma W =perde • =göçme

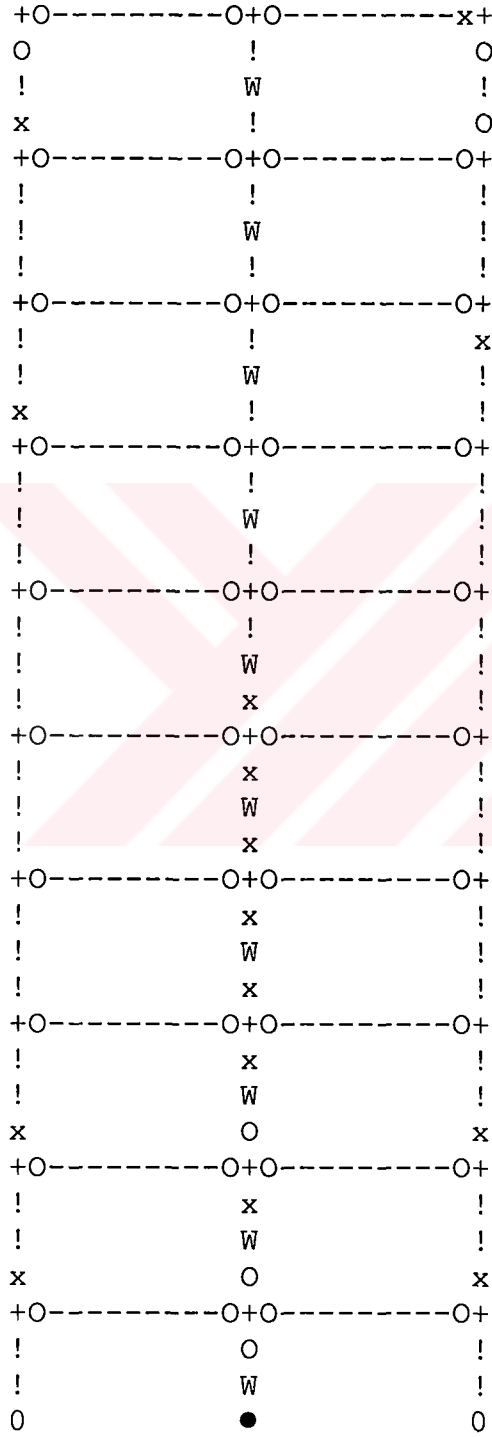
2 numaralı çerçeve (2-2 aksı)



İşaretler: -- =kiriş ! =kolon X =çatlama O =akma • =göçme

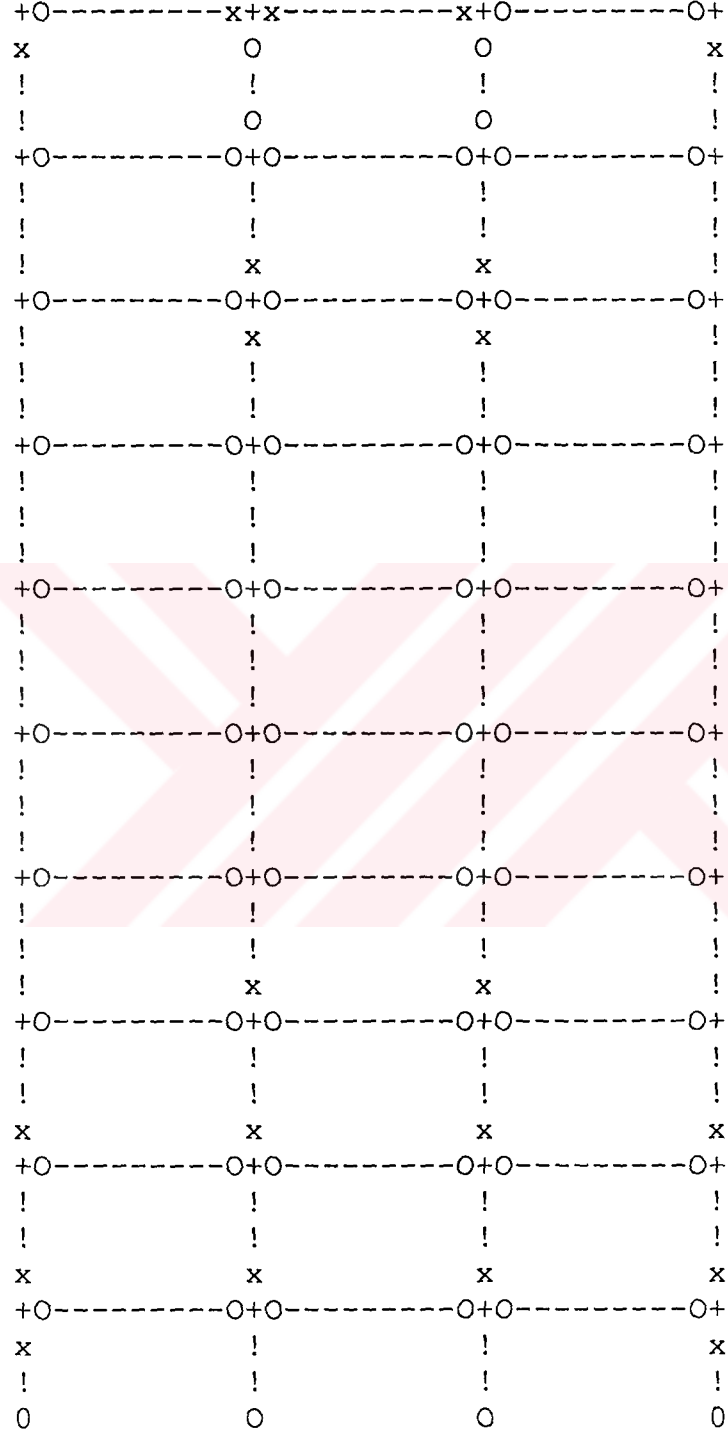
Ek 4.8. 10 katlı perdeli binanın Y yönünde statik itme analizinde sistemin göçtüğü andaki durum

1 numaralı çerçeve (A-A aksı)



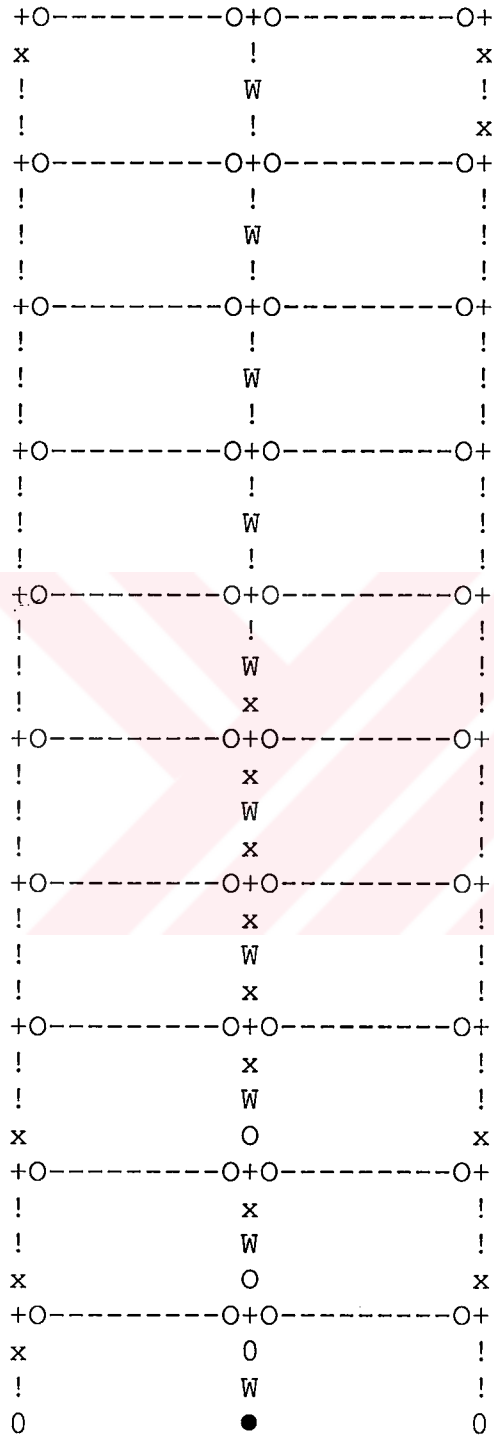
İşaretler: --- =kiriş ! =kolon W =perde X =çatlama O =akma • =göçme

2 numaralı çerçeve (B-B aksı)



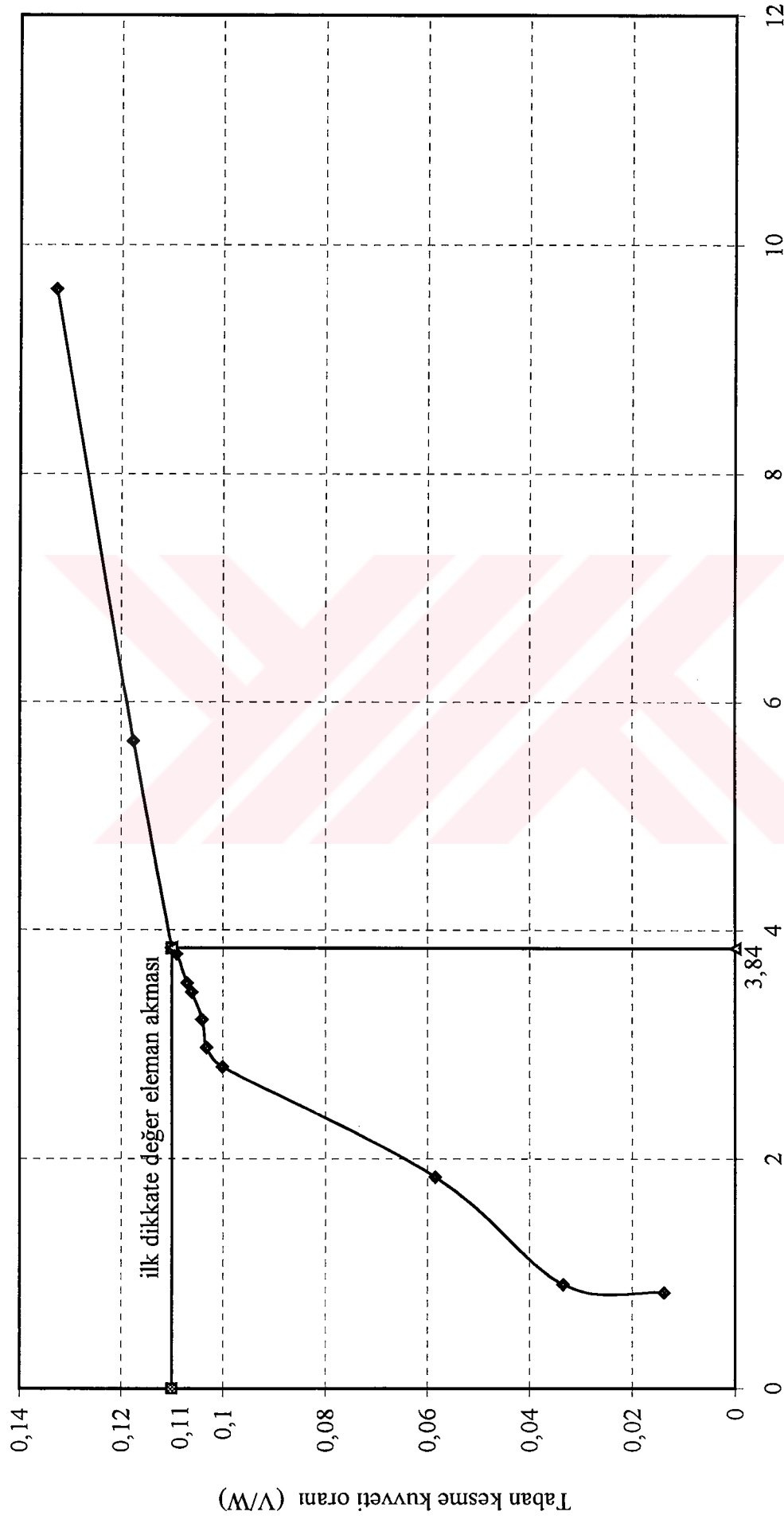
İşaretler: --- =kiriş ! =kolon W=perde X=çatlama O=akma • =göçme

3 numaralı çerçeve (C-C aksı)



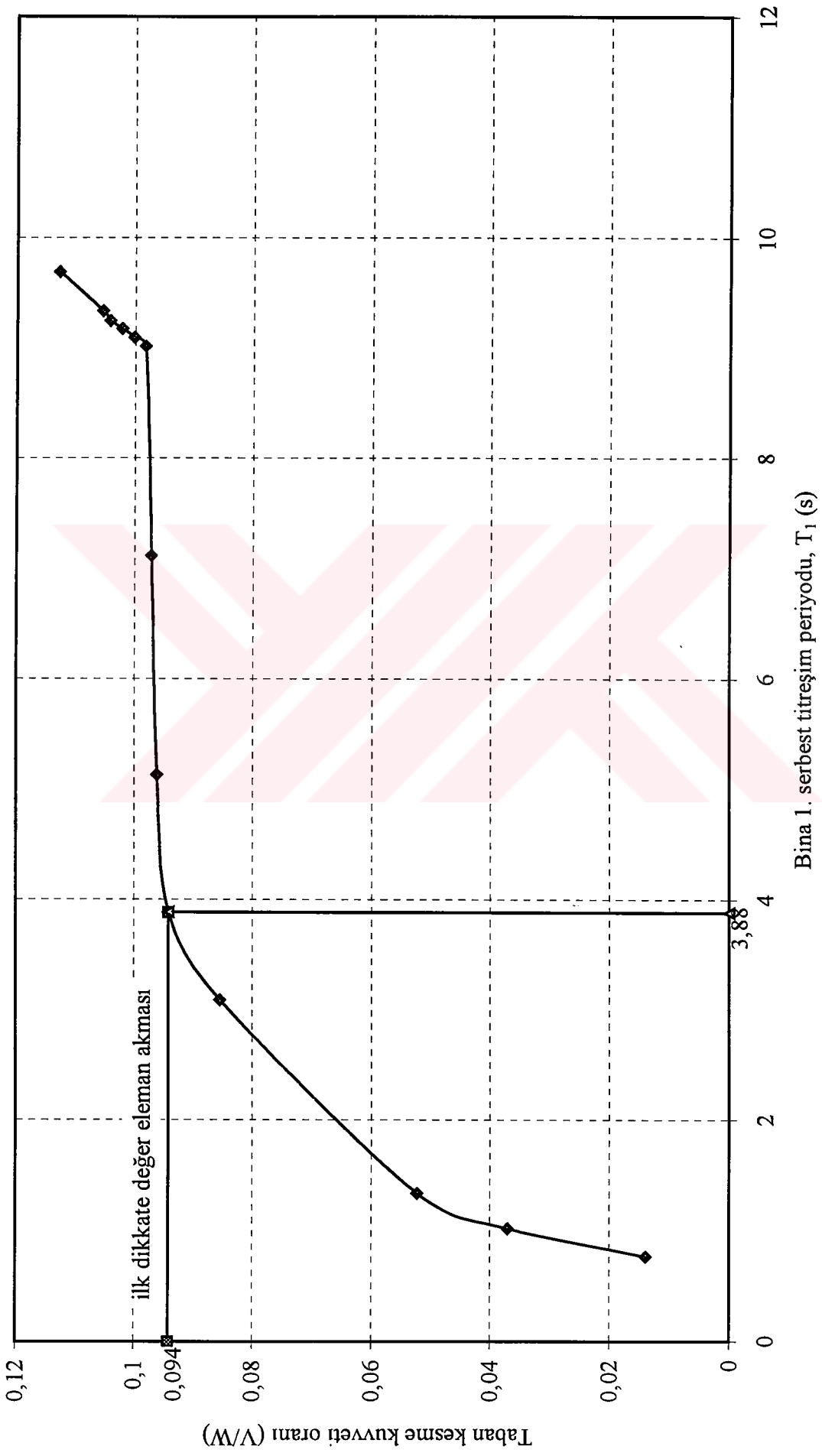
İşaretler: --- =kiriş !=kolon W=perde X=çatlama O=akma • =göçme

Ek 5.1. 5 katlı binanın X yönünde statik itme analizinde periyot eksenli kapasite eğrisi ve ilk dikkate değer eleman akmasının tespiti



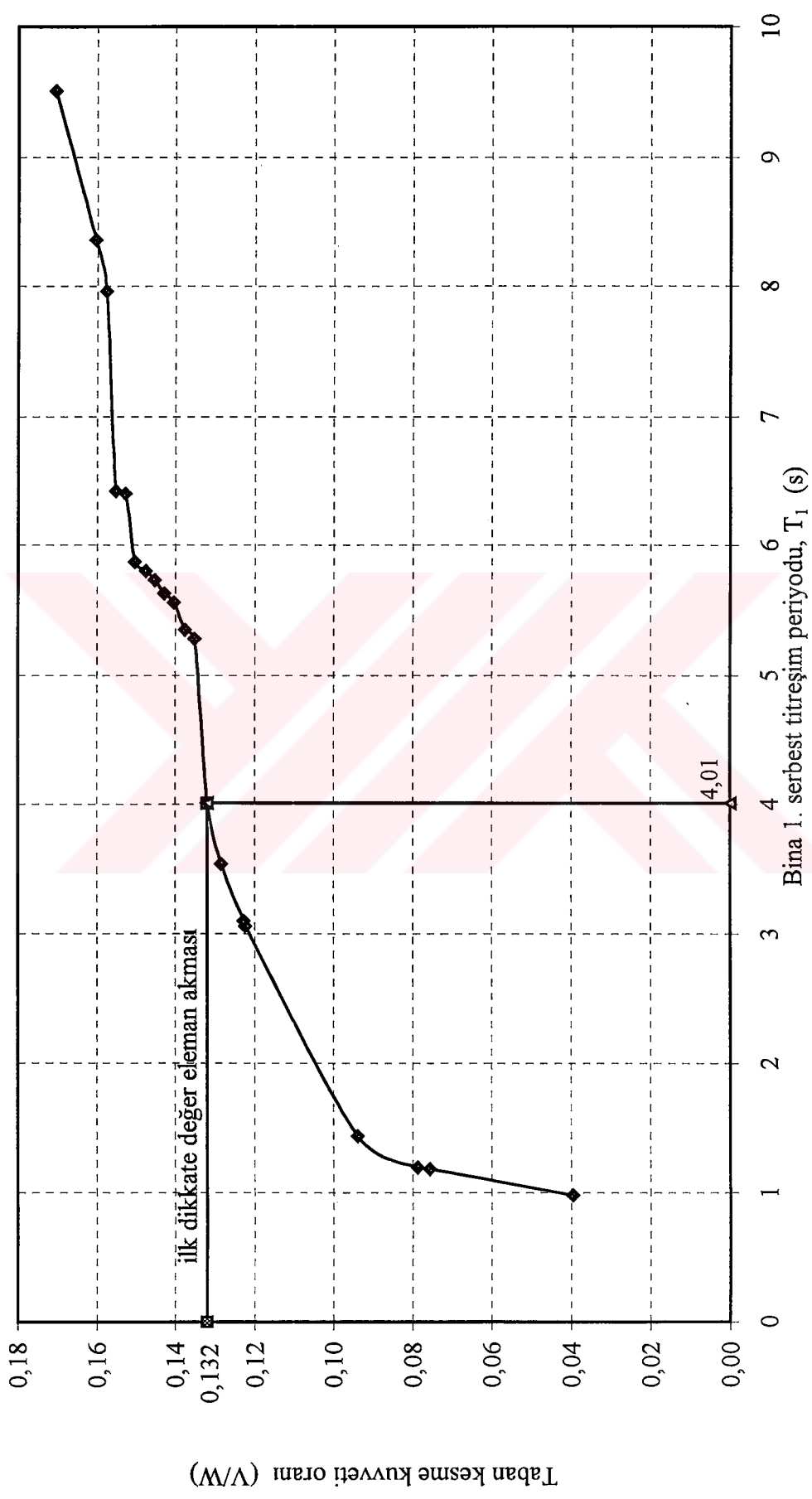
Bina 1. serbest titreşim periyodu, T_1 (s)

Ek 5.2. 5 katlı binanın Y yönünde statik itme analizinde periyot eksenli kapasite eğrisi ve ilk dikkate değer eleman akmasının tespiti

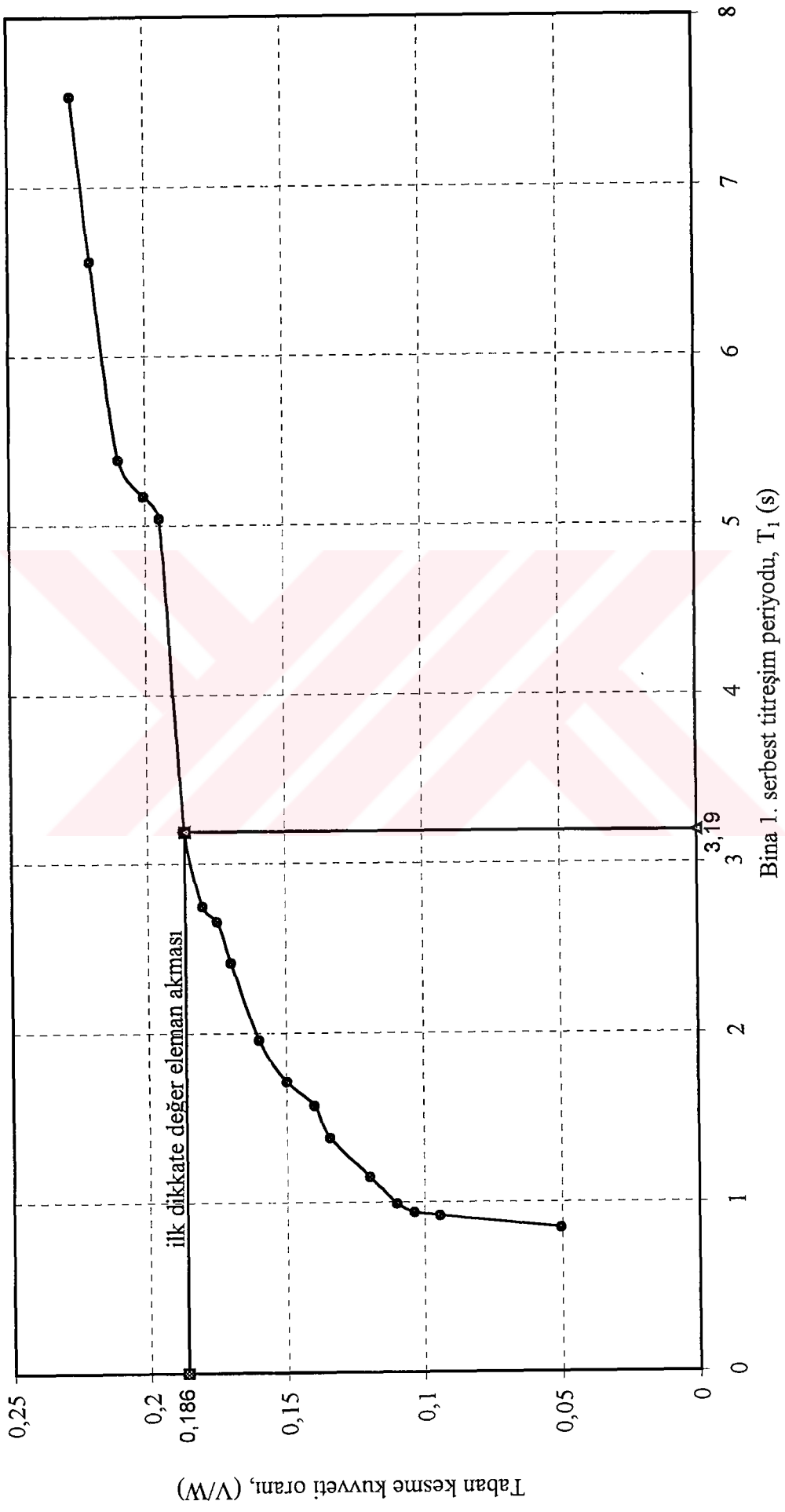


Bina 1. serbest titreşim periyodu, T_1 (s)

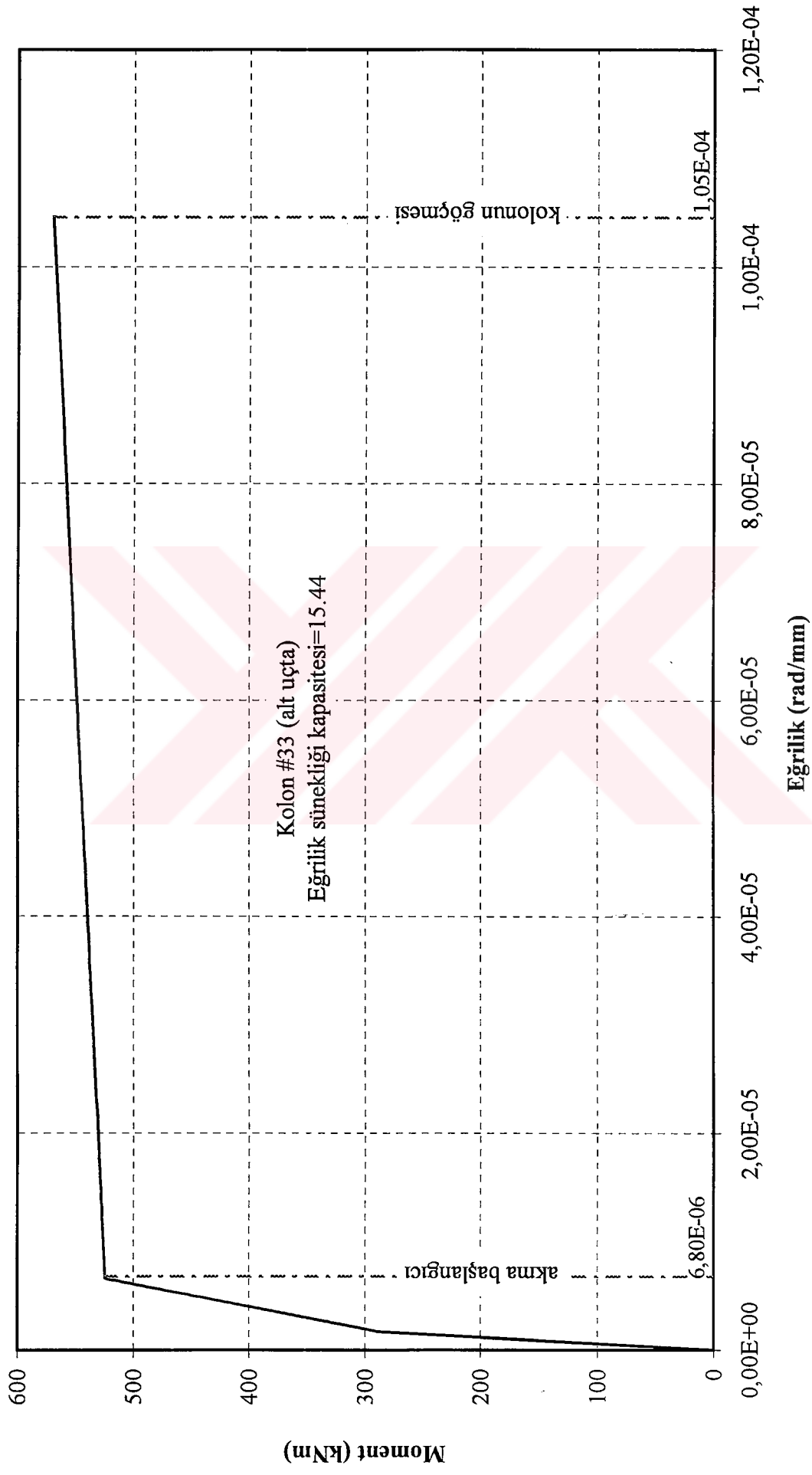
Ek 5.3. 10 katlı perdeli binanın X yönünde statik itme analizinde periyot eksenli kapasite eğrisi ve ilk dikkate değer eleman akmasının tespiti



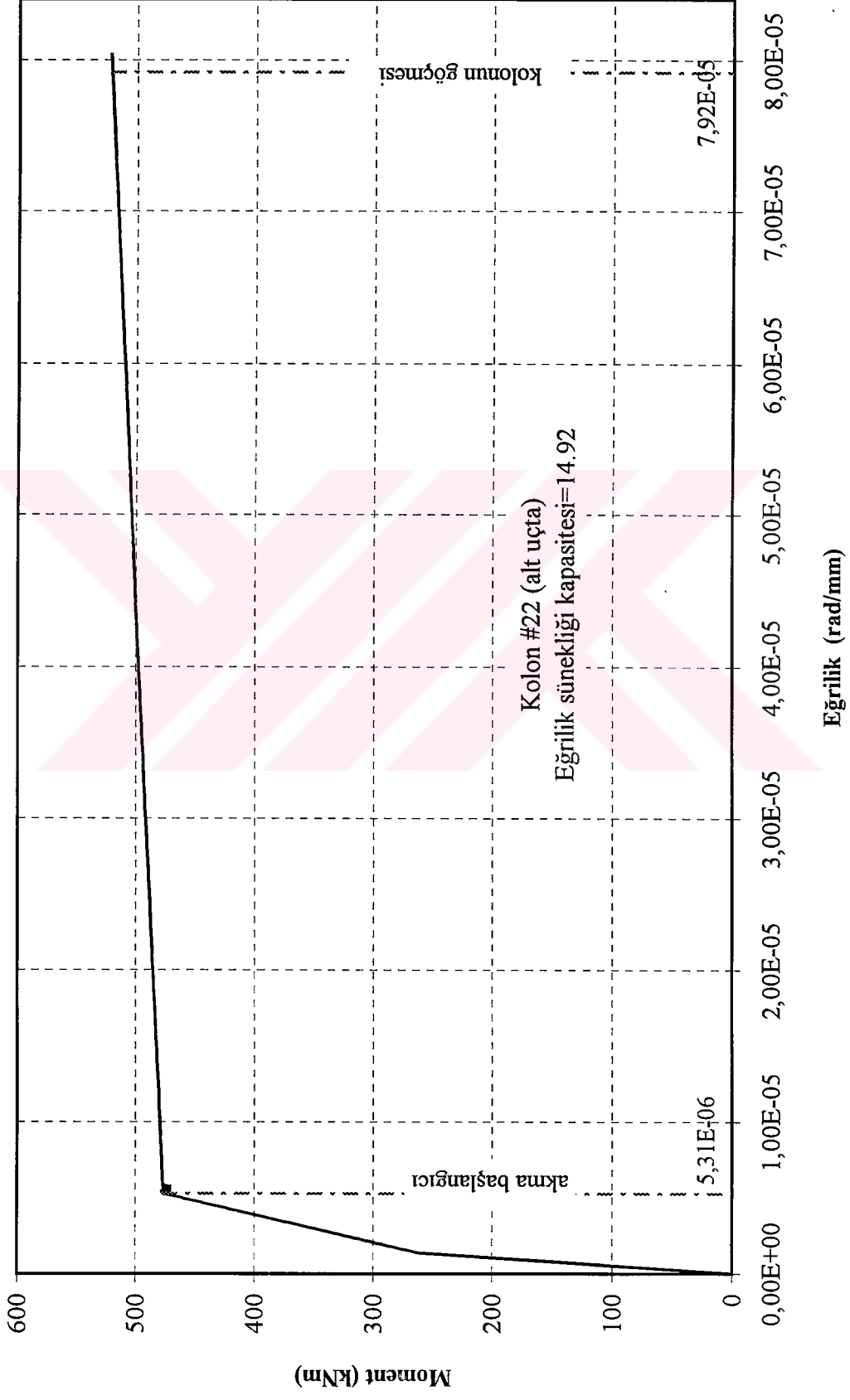
Ek 5.4. 10 katlı perdeli binanın Y yönünde statik itme analizinde periyot eksenli kapasite eğrisi ve ilk dikkate değer eleman akmasının tespiti



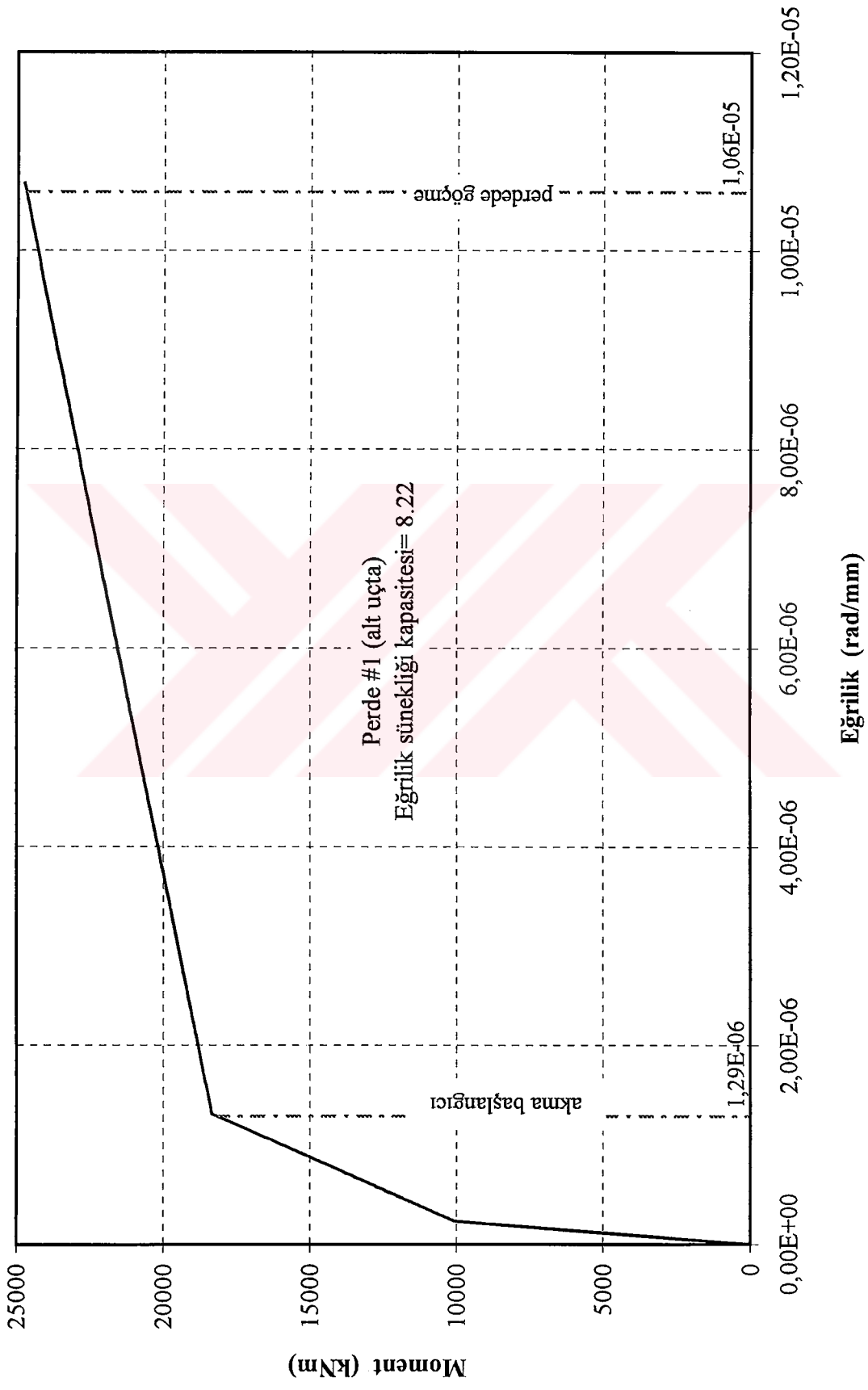
Ek 6.1. 5 katlı binanın X yönündeki statik itme analizinde 33 numaralı kolonun alt ucunda "moment-eğrilik" diyagramı



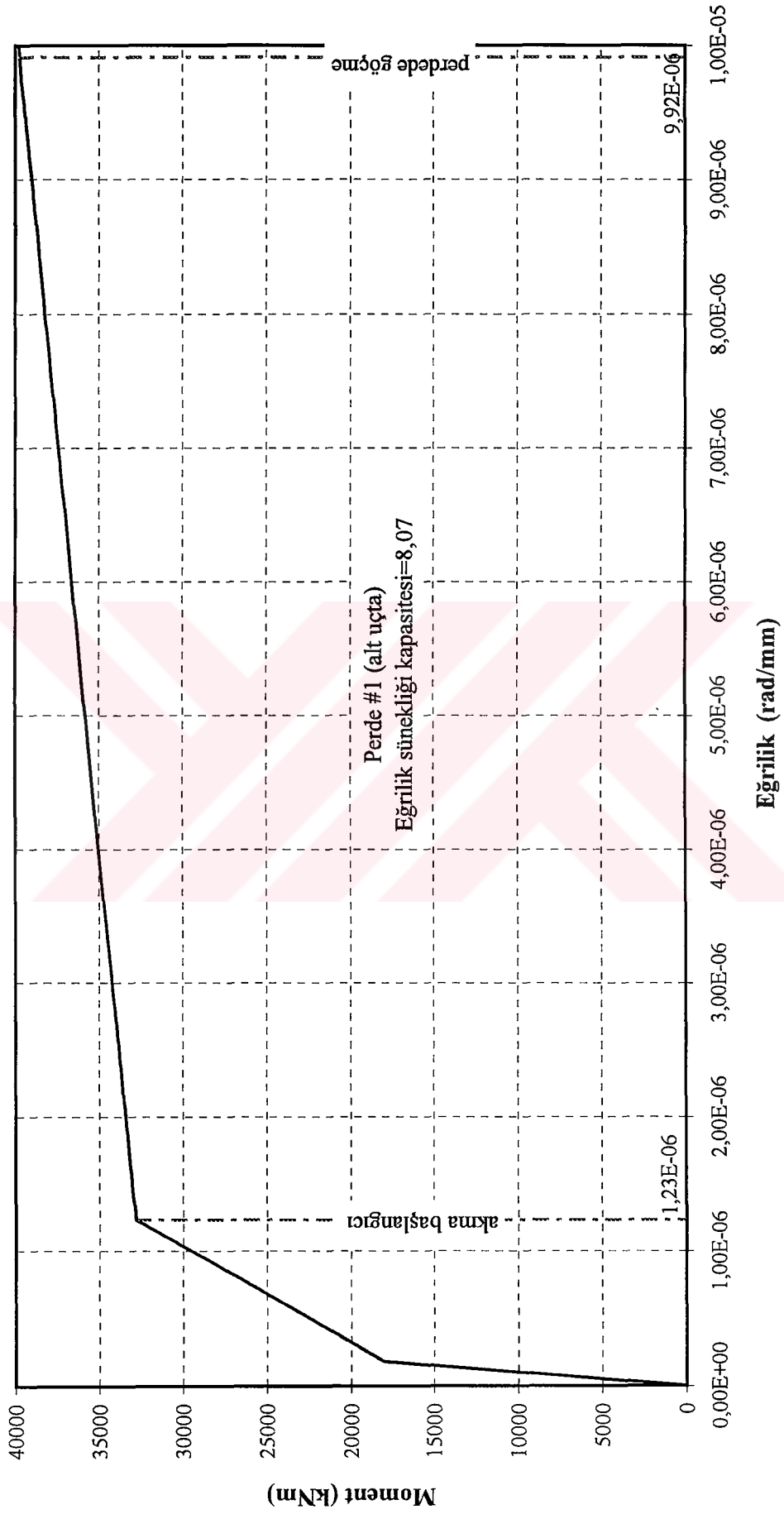
Ek 6.2. 5 katlı binanın Y yönünde statik itme analizinde 22 numaralı kolonun alt ucunda "moment-eğrilik" diyagramı



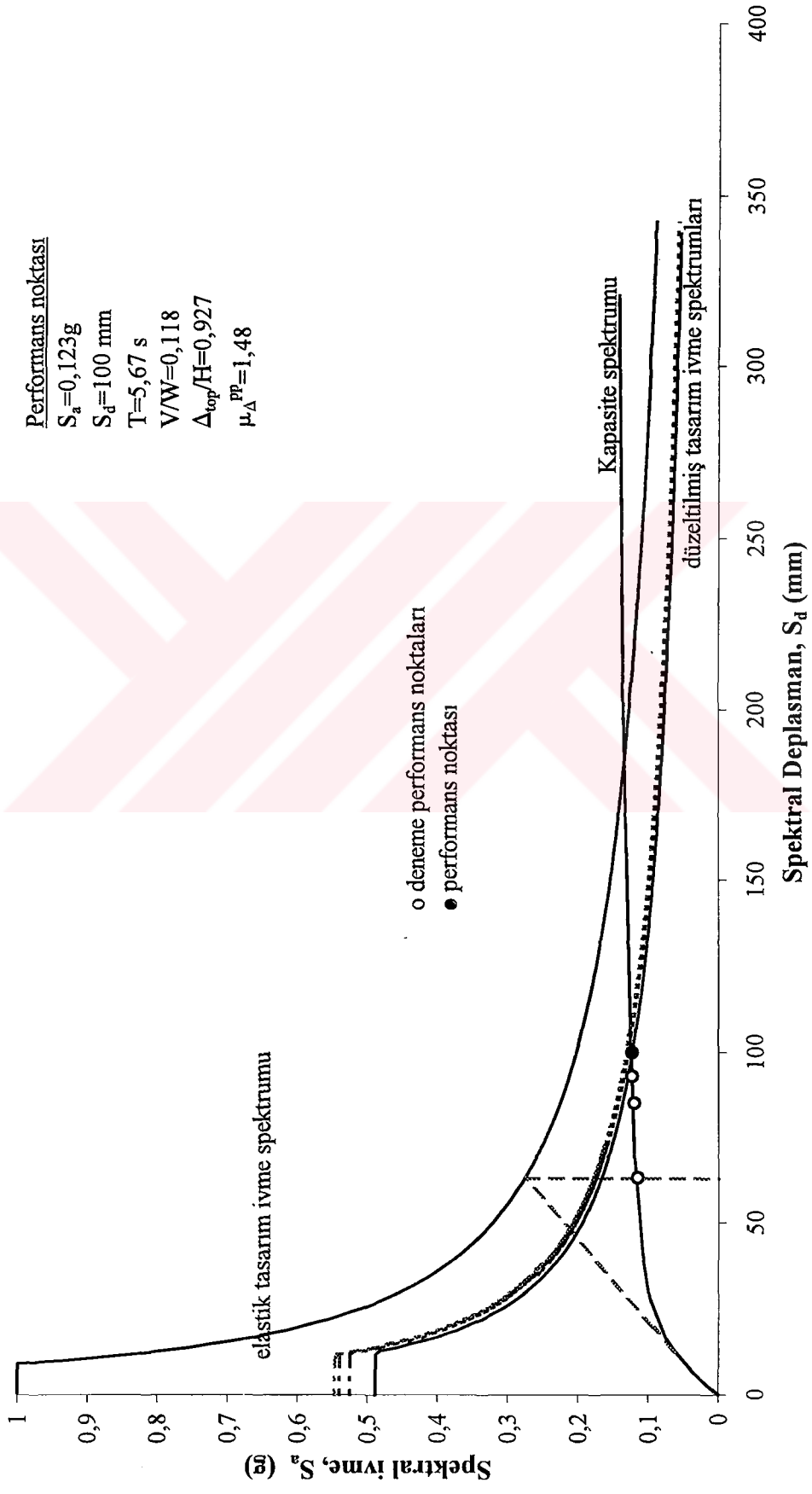
Ek 6.3. 10 katlı perdeli binanın X yönünde statik itme analizinde 1 numaralı perdenin alt ucunda "moment-egrilik" diyagramı



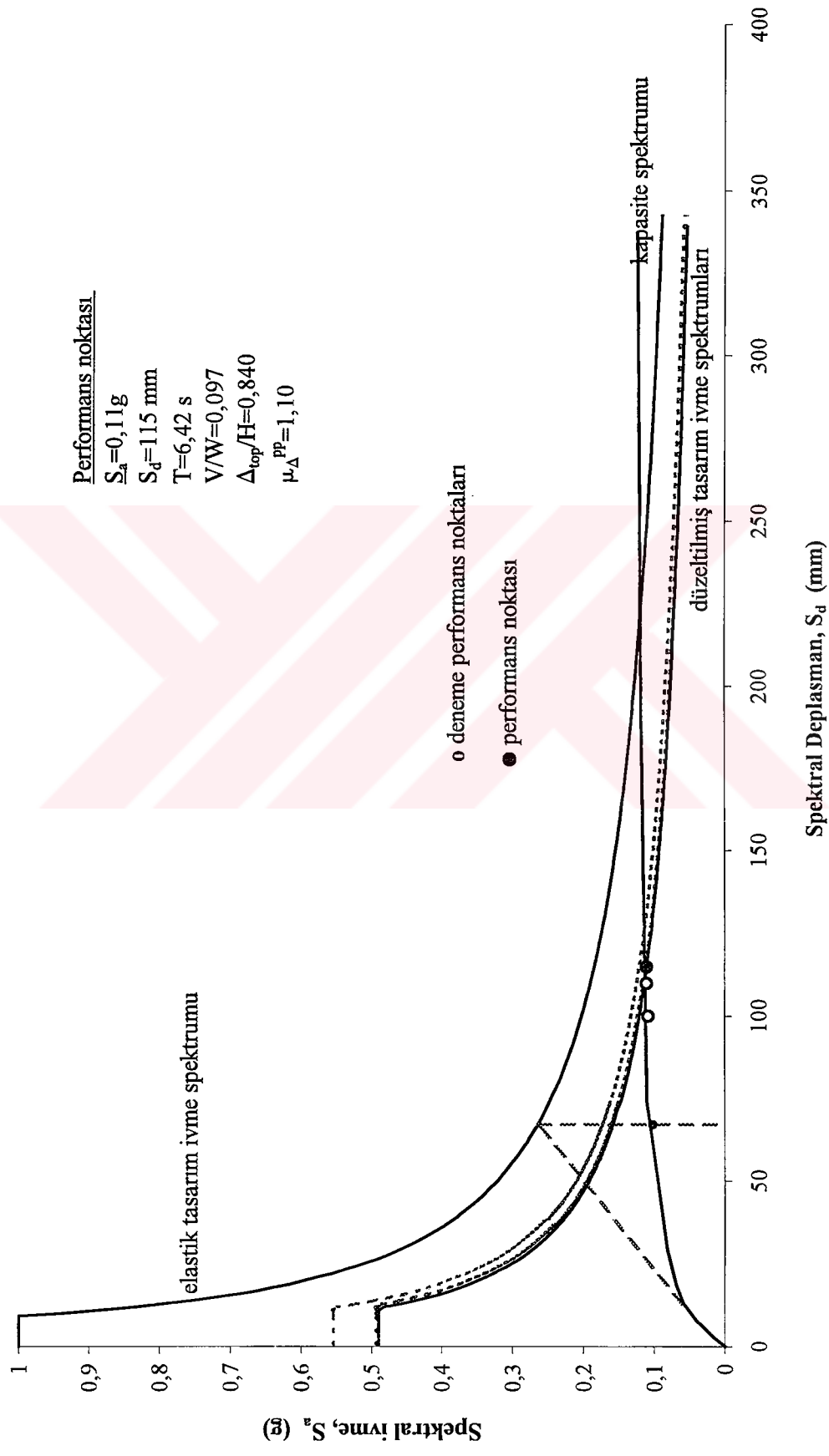
Ek 6.4. 10 katlı perdeli binanın Y yönündeki statik itme analizinde 1 numaralı perdenin alt ucunda "moment-eğrilik" diyagramı



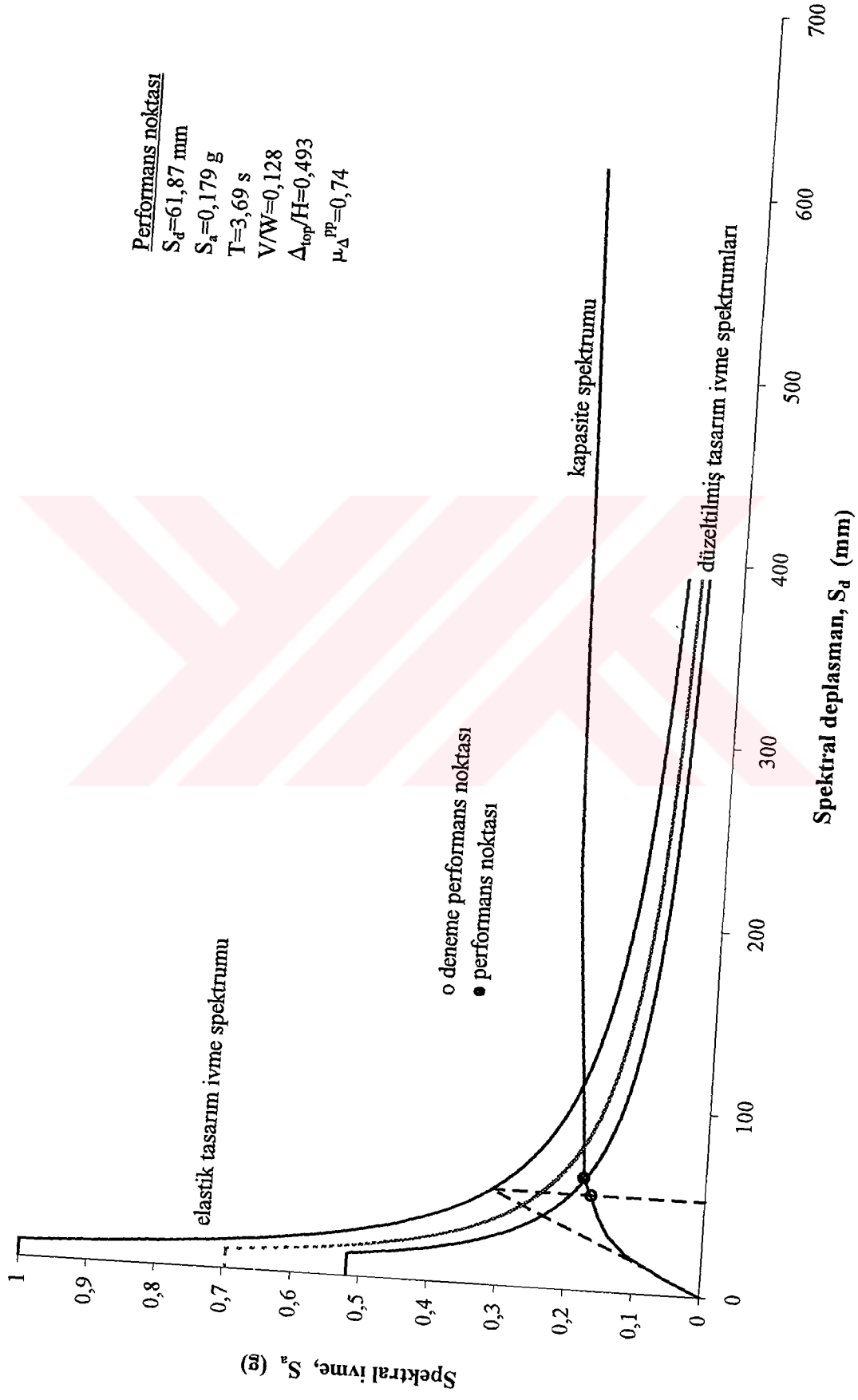
Ek 7.1. 5 katlı binanın X yönünde kapasite spektrumu yöntemiyle performans noktasının tespiti



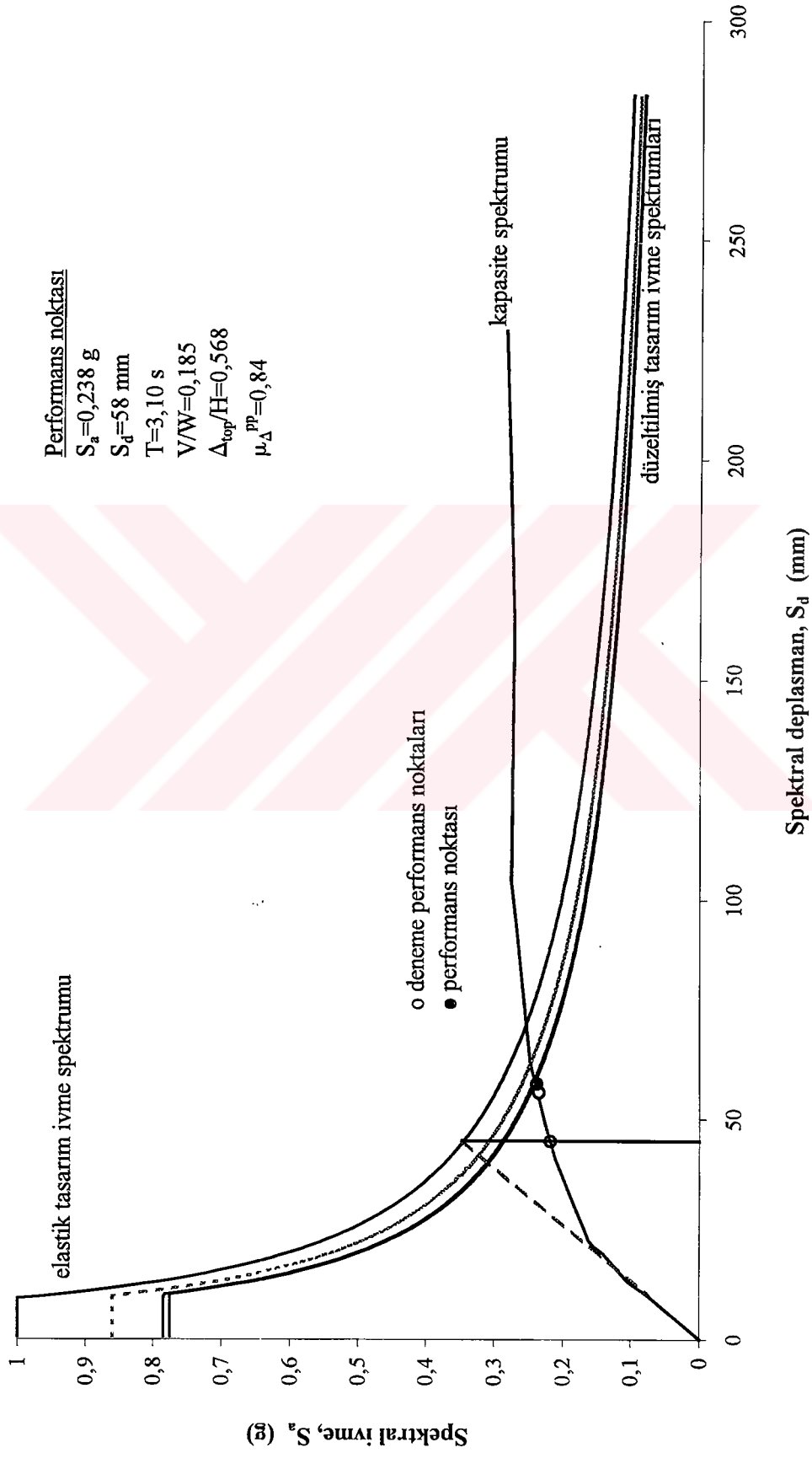
Ek 7.2. 5 katlı binanın Y yönünde kapasite spektrumu yöntemiyle performans noktasının tespiti



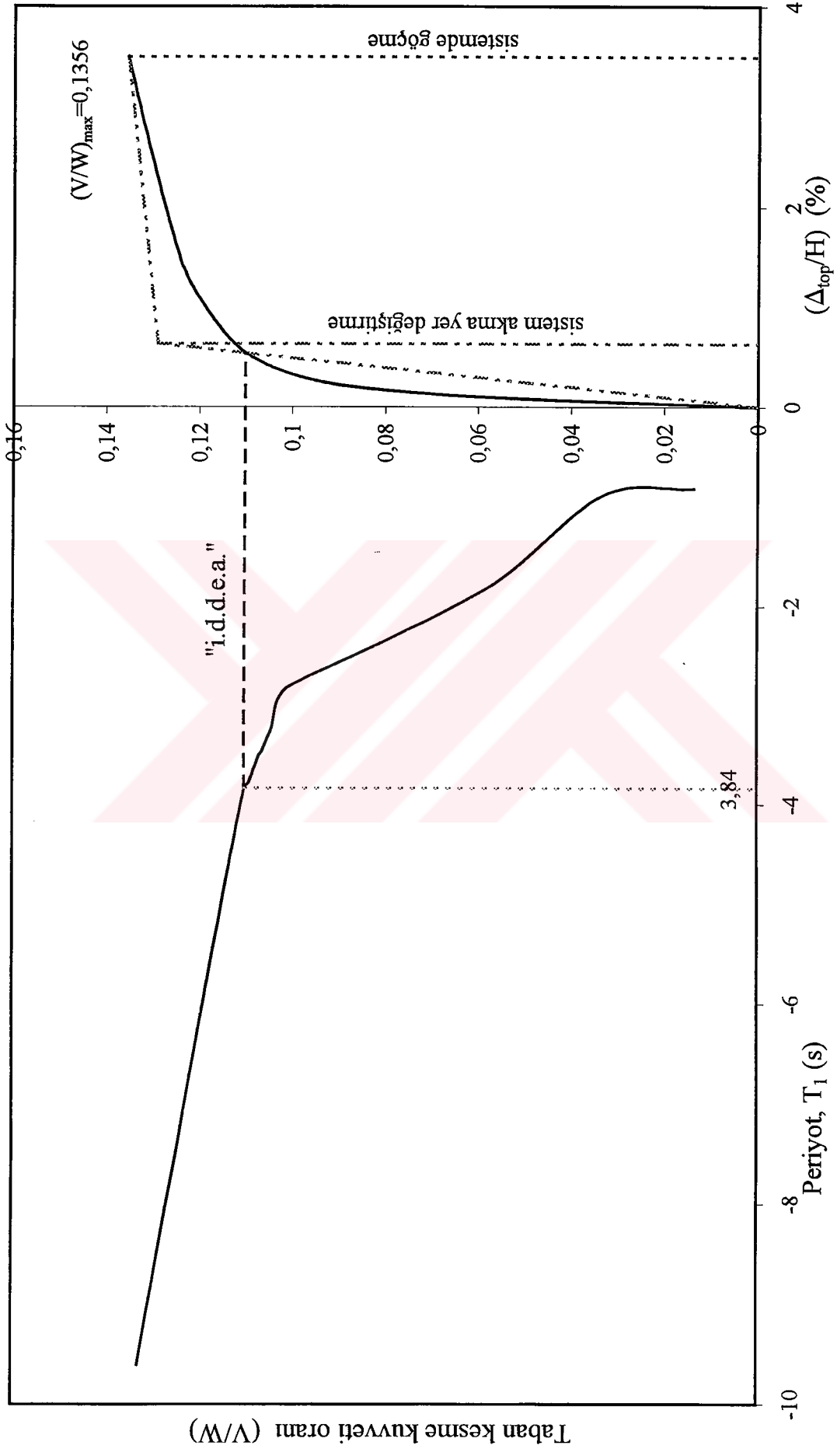
Ek 7.3. 10 katlı perdeli binanın X yönünde kapasite spektrumu yöntemiyle performans noktasının tespiti



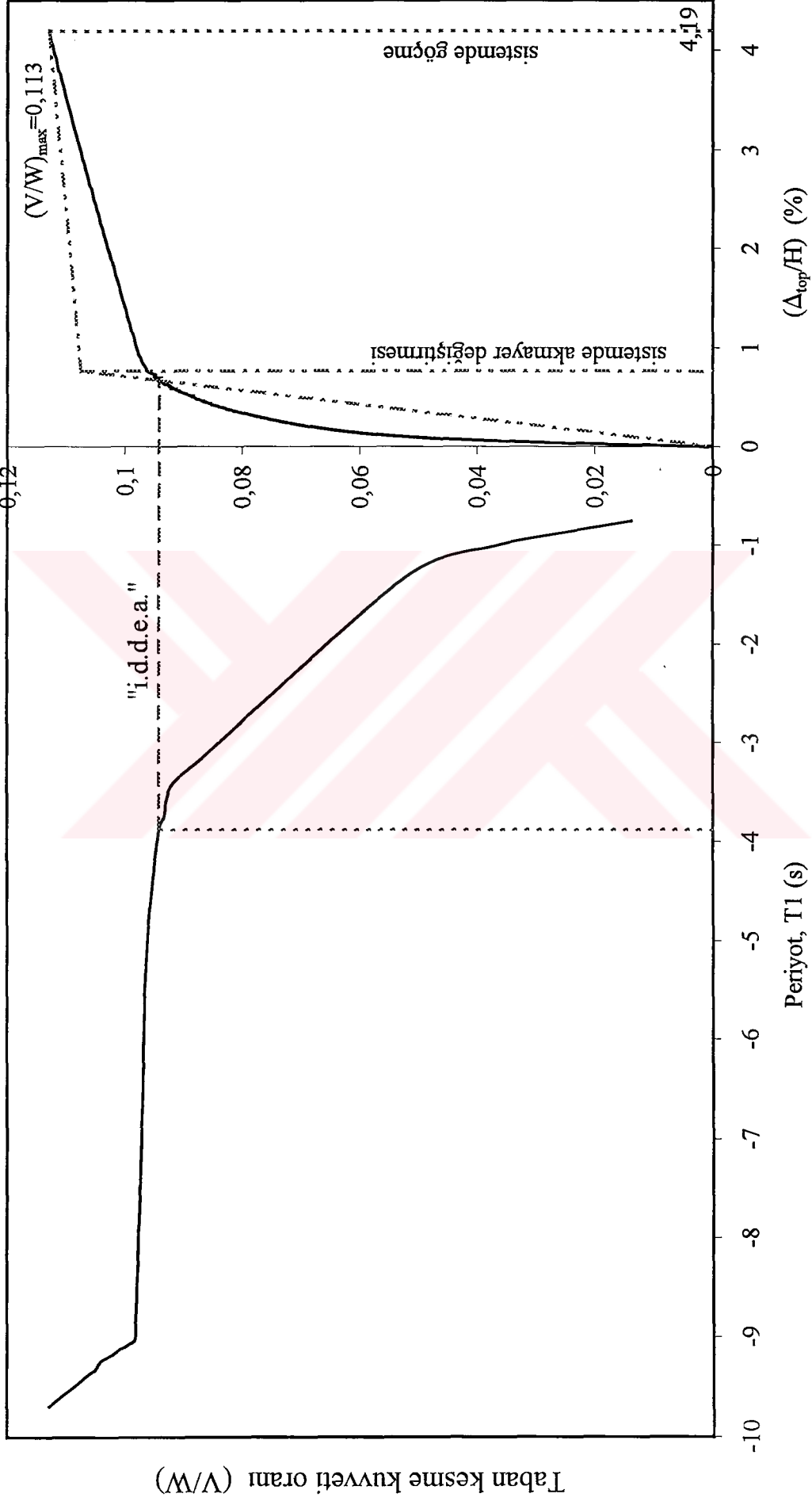
Ek 7.4 10 katlı perdeli binanın Y yönünde kapasite spektrumu yöntemiyle performans noktasının tespiti



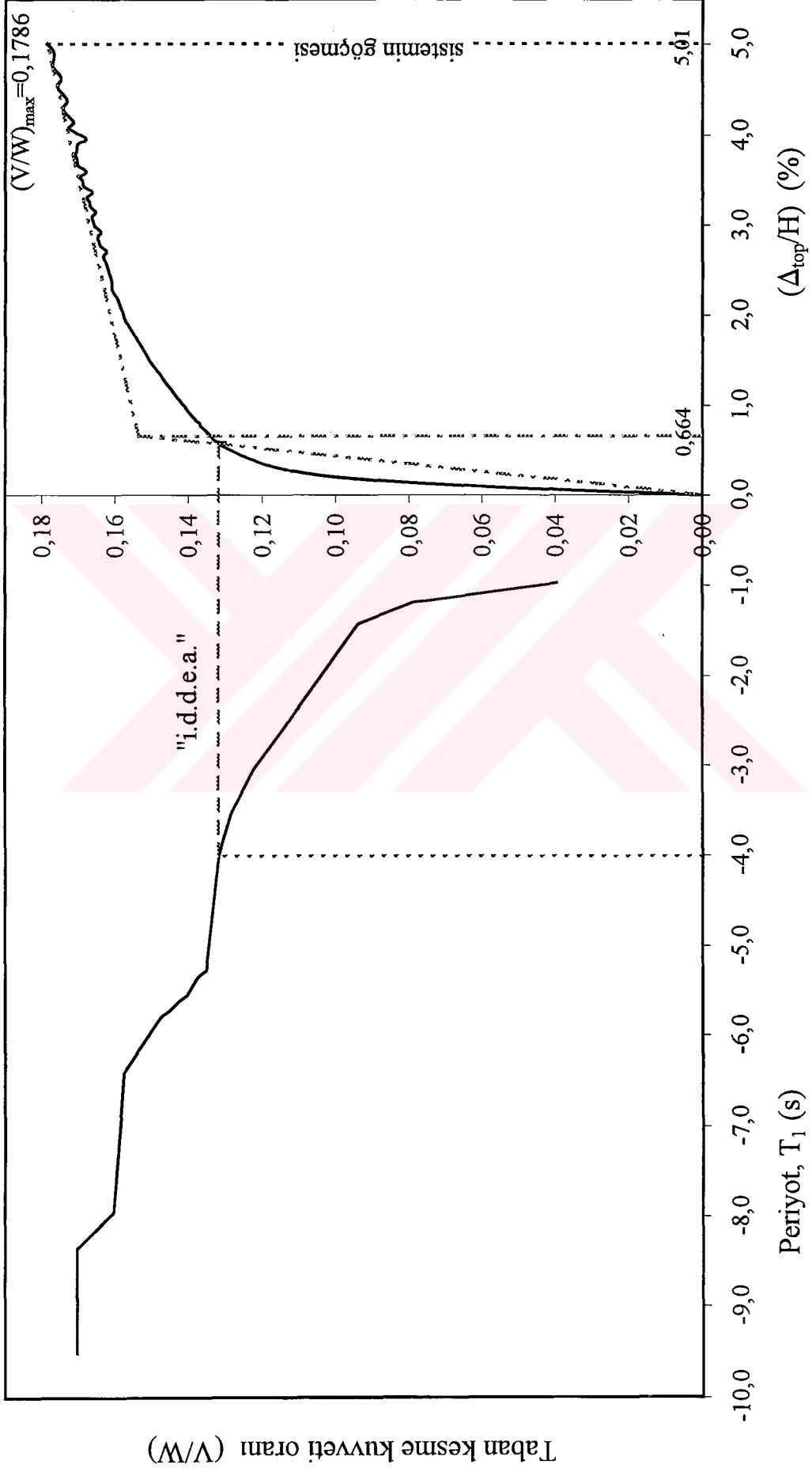
Ek 8.1 5 katlı binanın X yönünde statik itme analizinde "i.d.d.e.a."nın periyot ve deplasman eksenli gösterilmesi



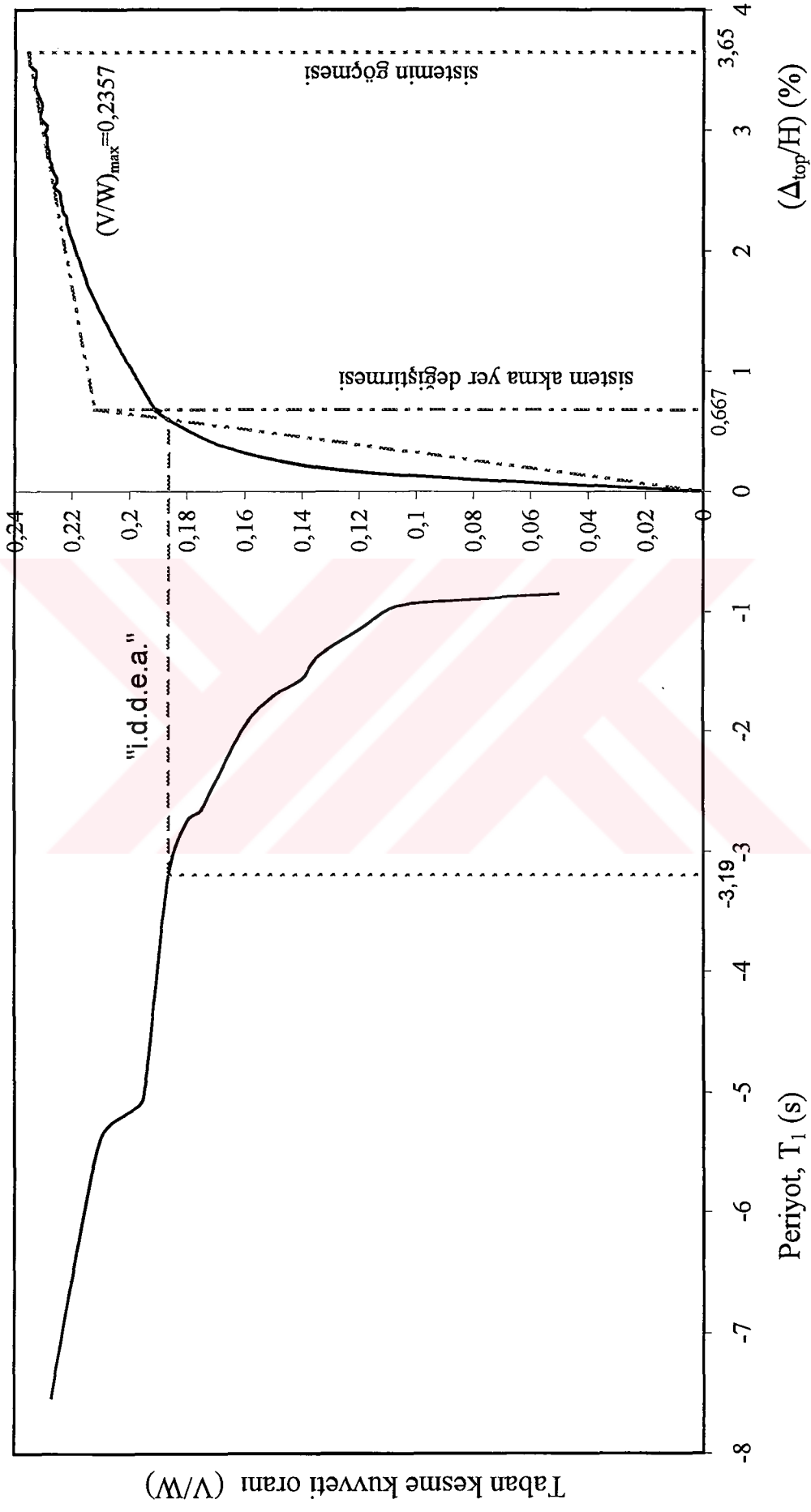
Ek 8.2 5 katlı binanın Y yönünde statik itme analizinde "i.d.d.e.a."nın periyot ve deplasman eksenli gösterilmesi



Ek 8.3. 10 katlı perdeli binanın X yönünde statik itme analizinde "i.d.d.e.a."nın periyot ve deplasman eksenli gösterilmesi



Ek 8.4. 10 katlı perdeli binanın Y yönünde statik itme analizinde "i.d.d.e.a."nın periyot ve deplasman eksenli gösterilmesi



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	06.01.1967	
Doğum yeri	Fatsa/ORDU	
Lise	1981-1984	Fatsa Bolaman Lisesi
Lisans	1984-1990	Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1992-1995	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı
Doktora	1995-2000	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı
Çalıştığı kurumlar	1990-1991 1991-1993 1993-Halen	Ordu Yalıköy Belediyesi, İnşaat Mühendisi HÜZMF Kdz. Ereğli MYO Öğretim Görevlisi ZKÜ Alaplı MYO Öğretim Görevlisi