

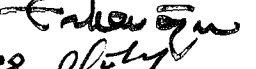
75093

**BAZI DÜZENSİZLİKLER İÇEREN ÜÇ BOYUTLU BÜYÜK
YAPI SİSTEMLERİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN ÇÖZÜMLEMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Y.Müh. Ercan YÜKSEL**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Şubat 1998

Tezin Savunulduğu Tarih : 4 Haziran 1998

Tez Danışmanı : Prof.Dr. H.Faruk KARADOĞAN 16.6.1998 
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Erkan ÖZER 16.6.1998 
Doç.Dr. Gülten GÜLAY 16.6.1998 
Prof.Dr. Nuray AYDINOĞLU 16.6.1998 
Prof.Dr. Sadettin ÖKTEN 16.6.1998 

HAZİRAN 1998

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi ve tecrübesine başvurduğum Hocam Prof.Dr. H.Faruk Karadoğan'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tezin hazırlanması sırasında yardım ve desteklerini esirgemeyen Dr.Engin Orakdöğen, Yük.Müh.Alper İlki, Yük.Müh.Kutlu Darılmaz ve Yük.Müh.Hakan Saruhan başta olmak üzere Yapı Statik Çalışma Grubu, Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı ile Malzeme Laboratuvarı çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Örnek 3D-3 ün hazırlanması ve sonuçların karşılaştırılması aşamasında göstermiş olduğu yakın ilgi dolayısıyla Dr.Konuralp Girgin'e teşekkür ederim.

Çalışmanın deneysel bölümlerinin gerçekleştirilmesinde JICA (Japonya Uluslararası İşbirliği Teşkilatı)'nın sağladığı aletlerle güncelleştirilen İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarının imkanlarından yararlanılmıştır. Her iki kuruluşa da katkılarından dolayı teşekkür ederim.

ŞUBAT 1998

Ercan YÜKSEL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xvi
ÖZET	xvii
SUMMARY	xviii
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 Tezin Kapsam ve Amacı	1
1.2 Kesit ve Yapı Sünekliği	5
1.2.1 Tanım ve süneklik gereksinimi	5
1.2.2 Betonarme kesitte süneklik	8
1.2.3 Betonarmede sarılma ve kesit sünekliği konusunda önceki çalışmalar	9
1.2.4 Saatçioğlu-Razvi sarılmış beton modeli	12
BÖLÜM 2 ÇUBUK SİSTEMLERDE DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ ve İKİ BOYUTLU SİSTEMLER	18
2.1 Düzlem Çubuklarda İç Kuvvet-Şekildeğiştirme İlişkisi	18
2.2 Betonarme Düzlem Çubuklarda Kuramsal Moment-Eğrilik İlişkisinin Belirlenmesi	20
2.3 Betonarme Düzlem Çubuklarda Moment-Eğrilik İlişkisini Belirleyen Bir Bilgisayar Programı, M-KAPA	23
2.4 Bünye Bağıntısında Doğrusallaştırma	24
2.5 Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Doğrusal Olmayan Yapı Sistemlerinin Hesabı	27
2.5.1 Birinci düzey alt sistemler	28
2.5.1.1 Mesnetlenmiş eleman	31
2.5.1.2 Dönme farklarının belirlenmesi için bir ardışık başvuru bağıntısı	34

2.5.1.3	Düşey yerdeğiştirmelerin belirlenmesi için bir ardışık başvuru bağıntısı	36
2.5.1.4	Kayma şekildeğiştirmelerinin etkisi	37
2.5.1.5	Eksenel kuvvetin ikinci merteye etkileri	38
2.5.1.6	Uçlarında rijit parçalar bulunan çubuklar	39
2.5.2	İkinci düzey alt sistemler	40
2.6	Düzlem Sistemlerde Doğrusal Olmayan Çözümleme İçin Geliştirilen Bir Bilgisayar Programı, DOC2B	44
2.7	Düzlem Sistemlerde Hesap Sonuçlarının Grafik Ortamda İzlenmesi İçin Geliştirilen Program, DUZ-GRF	46
2.8	Düzlem Sistemlerde Uygulamalar	50
2.8.1	Örnek 2D-1 beş katlı çelik çerçeve	50
2.8.2	Örnek 2D-2 betonarme kolon	55
2.8.3	Örnek 2D-3 betonarme düzlem çerçeve	62
2.8.4	Örnek 2D-4 beş katlı betonarme düzlem çerçeve	70
BÖLÜM 3	ÜÇ BOYUTLU BÜYÜK YAPI SİSTEMLERİNDE DÜZLEM ALT SİSTEMLER KULLANARAK YAPILAN DOĞRUSAL OLMAYAN ÇÖZÜMLEME	79
3.1	Önceki Çalışmalar	79
3.2	Yapı Sisteminin Tanımı ve Varsayımlar	81
3.3	Bilinmeyenler	83
3.4	Statik Yükleme İçin Denge Denklemleri	87
3.5	Yapı Serbest Titreşim Özelliklerinin Belirlenmesi	93
3.6	Üç Boyutlu Büyük Yapı Sistemlerinde Doğrusal Olmayan Çözümleme İçin Geliştirilen Bir Bilgisayar Programı, DOC3B	97
3.7	Üç Boyutlu Yapı Sistemlerinde Uygulamalar	101
3.7.1	Örnek 3D-1 doğrusal elastik malzemeden yapılmış büyük yapı sistemi	102
3.7.2	Örnek 3D-2 çok katlı bir yapıda büyük döşeme boşlukları içeren alt katların yatay yükler etkisindeki davranışı	112
3.7.3	Örnek 3D-3 üç boyutlu bir yapı sisteminde doğrusal olmayan hesap	120
SONUÇLAR		132
KAYNAKLAR		137

EKLER

EK A Betonarme Kolon Deneyleri 141

EK B Bölme Duvarlarının Yapı Davranışına Olan
Etkilerinin Küçük Titreşim Ölçümü Deneyleriyle
Belirlenmesi 145

EK C Betonarme Düzlem Çerçevelerde
Özel Bir Bölme Duvarı Tipi 157

ÖZGEÇMİŞ 189



SEMBOL LİSTESİ

A_s	: Sargı donatısı enkesit alanı
b_c	: Kesitte en dış enine donatı merkezleri arasındaki mesafe
b_{cx}, b_{cy}	: Beton çekirdek boyutları
$[C]$	: Sönüm matrisi
C_s	: Kesitte tarafsız eksenin pozisyonu
d, d_o	: Kesit yüksekliği, kesit faydalı yüksekliği
$[d]$	: Yerdeğiştirme vektörü
$[\dot{d}]$	: Hız vektörü
$[\ddot{d}]$	: İvme vektörü
$[\bar{d}]$	: Üç boyutlu yapıda, seçilen statik serbestlik dereceleri doğrultusundaki yerdeğiştirmeler
D_1, D_2, D_3	: Çubuk elemanda bağımsız uç yerdeğiştirmeleri
$\overline{D_1}, \overline{D_2}, \overline{D_3}$	: Mesnetlenmiş elemanda bağımsız uç yerdeğiştirmeleri
$d\phi/ds = \chi$	: Birim dönme, eğrilik
$du/ds = \epsilon$	: Birim boy değişimi
$dv/ds = \gamma$	: Birim kayma açısı
$[\ddot{d}_{zemin}]$	: Yer ivmesi vektörü
E, G	: Elastisite modülü, kayma modülü
$EF = EA$	: Eksenel rijitlik
EI	: Eğilme rijitliği
EI_k	: k nolu parçada eğilme rijitliği

EI^s	: Sanal eğilme rijitliği
$[f]$	: Çubuk fleksibilite matrisi
F_a	: Elastik dayanım
F_b	: Azaltılmış dayanım
f'_{cc}	: Sargılı beton basınç dayanımı
f'_{co}	: Sargısız beton basınç dayanımı
f_l	: Yanal sargı basıncı
f_{le}	: Eşdeğer üniform sarma basıncı
f_{lex}, f_{ley}	: b_{cx} ve b_{cy} beton çekirdek boyutlarına dik doğrultulardaki eşdeğer sarma gerilmeleri
f_{yt}	: Enine donatı akma gerilmesi
GF'	: Çubuk kayma rijitliği
$[k]$	: Çubuk rijitlik matrisi
$[K]$	: Sistem rijitlik matrisi
k_1	: Poisson oranının fonksiyonu olan bir çarpan
k_2	: Eşdeğer üniform sarma basıncına geçiş katsayısı
$[k]_g$	: Görelî yerdeğiştirmeler kullanılarak oluşturulan yatay rijitlik matrisi
$[k]_m$	: Mutlak yerdeğiştirmeler kullanılarak oluşturulan yatay rijitlik matrisi
$K_{sargı}$	: ϵ_{01} den ϵ_1 e geçişte kullanılan katsayı (sarılma indeksi)
L	: Üç boyutlu yapı kat sayısı
m	: X doğrultusundaki yatay yük taşıyıcı düşey alt sistemlerin sayısı
M, T, N	: Eğilme momenti, kesme kuvveti, eksenel kuvvet
$[M]$	: Kütle matrisi
$\overline{M}$	: Birim moment diyagramı

M_{cr}	: Betonarme kesitte çatlama momenti
$M^{dış}$	: Dış yük moment diyagramı
M_u	: Moment taşıma gücü
M_y	: Akma momenti
n	: Y doğrultusundaki yatay yük taşıyıcı düşey alt sistemlerin sayısı
N_{2D}	: İkinci düzey alt sistem düğüm noktası sayısı
N_{DELTA}	: Sanal alt parça sayısı
$[P_o]$	: Çubuk yükleme vektörü
P_1, P_2, P_3	: Çubuk elemanda bağımsız uç kuvvetleri
$\overline{P}_1, \overline{P}_2, \overline{P}_3$	: Mesnetlenmiş elemanda bağımsız uç kuvvetleri
q	: Düzgün yayılı yük şiddeti
$[Q]$	: İkinci düzey alt sistem düğüm noktası yükleri vektörü
$[\overline{Q}]$	: Üç boyutlu yapı yükleme matrisi
$[\overline{Q}]_ç, [\overline{Q}]_d$	: İndirgenmiş ve küçültülmüş düşey ve yatay alt sistem yükleme matrisleri
$[\overline{Q}]_x, [\overline{Q}]_y$	: Üç boyutlu yapı yükleme matrisinin bileşenleri
R	: Deprem yükü azaltma faktörü
R_o	: Eğrilik yarıçapı
R_θ	: Kesit dönme sünekliği oranı
R_δ	: Yapısal (yerdeğiştirme) süneklik oranı
s	: Enine donatı aralığı (çubuk boyunca)
$[S]$	: İkinci düzey alt sistem rijitlik matrisi
$[\overline{S}]$	: Üç boyutlu yapı yatay rijitlik matrisi

$[\bar{S}]_{\varphi}, [\bar{S}]_d$: İndirgenmiş ve küçültülmüş düşey ve yatay alt sistem rijitlik matrisleri

$[\bar{S}]_{\varphi x}, [\bar{S}]_{\varphi y}$: X ve Y doğrultularında yerleşik düşey alt sistem rijitlik matrisleri

$[\bar{S}]_{dx}, [\bar{S}]_{dy}$
 $[\bar{S}]_{dyx}, [\bar{S}]_{dy}$: Yatay alt sistem rijitlik matrisinin bileşenleri

s_l : Kesitte, tutulu düşey donatılar arası mesafe

$[T_d]$: Mutlak ve görelî yerdeğiştirmeler arasında dönüşümü sağlayan matris

$[T]_i, [T]_j$: Çubuk eksen takımından sistem eksen takımına geçişi sağlayan dönüşüm matrisi

t : Üniform sıcaklık değişimi

u, v : Çubuk eksenî ve eksene dik doğrultudaki yerdeğiştirmeler

$\alpha_{sol}, \alpha_{sağ}$: Çubuk uçlarındaki rijit parça boylarını ifade eden çarpanlar

α_t : Genleşme katsayısı

α_u : Sistemin taşıyabileceği en büyük yatay yük çarpanı

α_y : Boyuna donatıda ilk akmanın gözleendiği sıradaki yatay yük çarpanı

β : Çubuk ve sistem eksen takımları arasındaki açı

ΔL_k : k nolu parçanın boyu

Δt : Farklı sıcaklık değişimi

ΔT : İkinci mertebe etkileri temsil eden sanal kesme kuvvetleri

$\Delta \theta_k$: Dönme farkı

δ_k : Çubukta düşey yerdeğiştirme

$\delta_U = \delta_a$: En büyük yerdeğiştirme

$\delta_Y = \delta_b$: Akma yerdeğiştirmesi

ε : Birim boy değişimi

$\overline{\varepsilon}$: Ardışık yaklaşım yakınsama kriteri

ϵ_{01}	: Sargısız betonda en büyük gerilmeye karşı gelen şekildeğiştirme
ϵ_{085}	: Sargısız betonda en büyük dayanımın %85 ine karşı gelen şekildeğiştirme
ϵ_1	: Sarılmış betonda en büyük gerilmeye karşı gelen şekildeğiştirme
ϵ_{85}	: Sarılmış betonda en büyük dayanımın %85 ine karşı gelen şekildeğiştirme
$\epsilon_{b1} , \epsilon_{b2}$	: Sarılmış beton modelini tanımlayan şekildeğiştirme ordinatları
$\epsilon_c, \epsilon_{cm}$	: En büyük beton basınç şekildeğiştirmesi
$\epsilon_{c1} , \epsilon_{c2} , \epsilon_{c3}$	: Donatı malzeme modelini tanımlayan şekildeğiştirme ordinatları
ϵ_s , ϵ_s'	: Donatı şekildeğiştirmesi
ϕ	: Kesit dönmesi
χ	: Eğrilik
χ_p	: Plastik eğrilik
χ_u	: Göçmeye karşı gelen eğrilik
χ_y	: Akmaya karşı gelen eğrilik
μ	: Yerdeğiştirme sünekliği, yapısal süneklik oranı
ω	: Açısal frekans
ρ	: Beton çekirdek bölgesinde enine donatı oranı
σ	: Normal gerilme
$\sigma_{b1} , \sigma_{b2}$	: Sarılmış beton modelini tanımlayan gerilme ordinatları
$\sigma_{c1} , \sigma_{c2} , \sigma_{c3}$	: Donatı malzeme modelini tanımlayan gerilme ordinatları
θ_k	: Mutlak dönme
τ	: Kayma gerilmesi

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Yük-yerdeğiştirme ilişkisi	7
Şekil 1.2 : Süneklik oranı-kuvvet küçültme oranı ilişkisi	8
Şekil 1.3 : Betonarme kesitte tanımlar	9
Şekil 1.4 : Betonarme kesitte sarma kuvvetleri	14
Şekil 1.5 : Sargılı ve sargısız betonda gerilme şekildeğiştirme ilişkileri	16
Şekil 2.1 : Kesit tesirleri ve şekildeğiştirmeler	18
Şekil 2.2 : ds uzunluğundaki sonlu parçada eğrilik hesabı	19
Şekil 2.3 : Tek yönlü yükler etkisindeki betonarme kesitte moment-eğrilik ilişkisi	20
Şekil 2.4 : Genel bir kesitte moment-eğrilik ilişkisinin oluşturulması	21
Şekil 2.5 : Kullanılan malzeme modelleri	24
Şekil 2.6 : M-KAPA programı genel akış diyagramı	25
Şekil 2.7 : Başlangıç kirişi yönteminin uygulanması	27
Şekil 2.8 : Doğrusal olmayan malzeme davranışının hesaba katılması	29
Şekil 2.9 : Çubuk alt dilimlerinde ortalama iç kuvvetlerin hesabı	30
Şekil 2.10 : Mesnetlenmiş elemanda bağımsız uç yerdeğiştirmesi ve uç kuvvetleri	31
Şekil 2.11 : İkinci düzey alt sistemde kullanılan çubuk sonlu eleman	32
Şekil 2.12 : Mesnetlenmiş elemanda bağımsız uç kuvvetleri ve dış yük	34
Şekil 2.13 : Mesnetlenmiş elemanda dönme farklarının hesabı	35
Şekil 2.14 : Mesnetlenmiş elemanda düşey yerdeğiştirmelerin hesabı	36

Şekil 2.15 : Eksenel kuvvetin ikinci mertebe etkisini temsil eden kesme kuvvetleri	38
Şekil 2.16 : Mesnetlenmiş elemanda ikinci mertebe etkilerin hesaba katılması	39
Şekil 2.17 : Rijit uçlu çubuklar	40
Şekil 2.18 : İkinci düzey alt sistem	41
Şekil 2.19 : DOC2B-1 programı genel akış diyagramı	47
Şekil 2.20 : DOC2B-2 programı genel akış diyagramı	49
Şekil 2.21 : Beş katlı çelik düzlem çerçeve	51
Şekil 2.22 : Çelik kesitlerde eğilme momenti-eğrilik ilişkileri	52
Şekil 2.23 : Beş katlı çelik çerçevede üç algoritmanın sonuçlarının karşılaştırılması	53
Şekil 2.24 : Betonarme kolon için oluşturulan mekanik model	55
Şekil 2.25 : Sarılmış betonda gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi	56
Şekil 2.26 : Boyuna donatı için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi	56
Şekil 2.27 : Numune 1 için moment- eğrilik ilişkileri	57
Şekil 2.28 : Deneysel ve kuramsal moment eğrilik ilişkilerinin karşılaştırılması	58
Şekil 2.29 : Deneysel ve kuramsal yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi ilişkileri	59
Şekil 2.30 : Konsol kolonda kuramsal eğrilik dağılımı	60
Şekil 2.31a : Hacimsel enine donatı oranındaki artışın kesit davranışı üzerindeki etkisi	61
Şekil 2.31b : Hacimsel enine donatı oranındaki artışın sistem davranışı üzerindeki etkisi	62
Şekil 2.32 : Sarılmış beton kesite ait geometrik büyüklükler	63
Şekil 2.33 : Sarılmış betonda gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri	64
Şekil 2.34 : Enine ve boyuna donatılar için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi	64

Şekil 2.35	: Örnek 2D-3 betonarme çerçeve mekanik modeli	65
Şekil 2.36	: Moment-eğrilik ilişkileri	65
Şekil 2.37	: Kuramsal ve deneysel yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi ilişkileri	67
Şekil 2.38	: Kuramsal χ/χ_u dağılımı	68
Şekil 2.39	: Hacimsel enine donatı oranındaki artışın P- δ ilişkisi üzerindeki etkisi	69
Şekil 2.40	: Kısa kolonlu betonarme düzlem çerçeve	69
Şekil 2.41	: Kısa kolonlu betonarme çerçevede M ve χ/χ_u diyagramları	70
Şekil 2.42	: Örnek 2D-4 betonarme düzlem çerçeve mekanik modeli	71
Şekil 2.43	: Yatay yükün katlar arasındaki dağılımı	71
Şekil 2.44	: Yatay yük çarpanı-tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi	72
Şekil 2.45	: Güçlendirme amacıyla ilave edilen perdelerin çerçeve içindeki yerleşimi	72
Şekil 2.46	: Deneysel çalışma sonuçlarından sanal rijitliklere geçiş	74
Şekil 2.47	: Özel bölme duvarlı çerçevede taban kesiti	74
Şekil 2.48	: Özel bölme duvarlı çerçeve taban kesiti bünye bağıntıları	75
Şekil 2.49	: Güçlendirilmiş betonarme düzlem çerçeve mekanik modeli	75
Şekil 2.50	: Güçlendirilmiş çerçevede yatay yük çarpanı-tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi (<i>Durum 1</i>)	76
Şekil 2.51	: Güçlendirilmiş çerçevede yatay yük çarpanı-tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi (<i>Durum 2</i>)	77
Şekil 2.52	: Güçlendirilmiş betonarme düzlem çerçevelerde göçme modları	78
Şekil 3.1	: Üç boyutlu yapı sisteminin düzlem alt sistemlere ayrılması	82
Şekil 3.2	: Kesişen düzlem alt sistemlerde eğilme rijitliklerinin tanımı	83
Şekil 3.3	: Mutlak yerdeğiştirmelerin kullanılması durumunda, $\delta_2=1$ birim hali	84

Şekil 3.4	: Düşey alt sistemlerdeki görelî yerdeğıştirmelerin bilinmeyen seçilmesi	85
Şekil 3.5	: Yatay alt sistemlerde görelî yerdeğıştirmelerin bilinmeyen seçilmesi	86
Şekil 3.6	: Görelî yerdeğıştirmelerden mutlak yerdeğıştirmelere geçiş	86
Şekil 3.7	: Üç boyutlu yapı sisteminde yatay rijitlik matrisinin kurulması	89
Şekil 3.8a	: Alt sistemlerde yatay rijitlik ve yükleme matrislerinin elde edilmesi	92
Şekil 3.8b	: Yatay alt sistemlerde rijitlik matrisinin bileşenleri	93
Şekil 3.9	: Düzlem alt sistemler ile yapılan serbest titreşim hesabında kütleler	95
Şekil 3.10	: Yaklaşık serbest titreşim hesabı için üç boyutlu yapı yatay rijitlik matrisinde iki ana doğrultunun ayrılması	97
Şekil 3.11	: DOC3B program grubu genel akış diyagramı	100
Şekil 3.12	: Döşeme ve perdeleri ayrıklaştırılmış eşdeğer üç boyutlu sistem	102
Şekil 3.13	: Tipik kat planları	103
Şekil 3.14	: Örnek 3D-1 i oluşturan düzlem alt sistemler	106
Şekil 3.15	: Eşdeğer statik deprem yükleri, kat kütleleri ve plandaki dağılımları	107
Şekil 3.16	: Çözüm #1 ve Çözüm #3 ün karşılaştırılması	109
Şekil 3.17	: Çözüm #2 ve Çözüm #4 ün karşılaştırılması	109
Şekil 3.18	: Rijit döşemeli yapıda serbest titreşim özellikleri	111
Şekil 3.19	: Boşluklu döşemeli yapıda serbest titreşim özellikleri	111
Şekil 3.20	: Örnek 3D-2 Tipik kalıp planı	113
Şekil 3.21	: Örnek 3D-2 yi oluşturan düzlem alt sistemler	114
Şekil 3.22	: Örnek 3D-2 de kullanılan yatay yükler ve plandaki dağılımları	115
Şekil 3.23	: Örnek 3D-2 de kullanılan moment-eğrilik ilişkileri	116
Şekil 3.24	: Örnek 3D-2 Çözüm #1 de elde edilen yerdeğıştirme ve bazı iç kuvvetler	117

Şekil 3.25	: <i>Örnek 3D-2</i> Çözüm #2 de elde edilen yerdeğiştirme ve bazı iç kuvvetler	118
Şekil 3.26	: <i>Örnek 3D-2</i> İki farklı yatay yük çarpanı için, Çözüm #1 ve Çözüm #2 de ulaşılan ikinci kat tavanı yerdeğiştirme dağılımı	118
Şekil 3.27	: <i>Örnek 3D-2</i> de yatay yük çarpanı - yerdeğiştirme ilişkisi	119
Şekil 3.28	: <i>Örnek 3D-2</i> kalıcı şekildeğiştirmelerin yayılışı	119
Şekil 3.29	: Serbest titreşim hesabında kullanılan kütleler	120
Şekil 3.30	: <i>Örnek 3D-2</i> 1.modun ikinci kat tavanı ile ilgili bölümü (plan)	120
Şekil 3.31	: <i>Örnek 3D-3</i> Tipik kalıp planı ve boykesit	121
Şekil 3.32	: Üçgen ve trapez yayılı düşey yüklere eşdeğer tekil yükler	123
Şekil 3.33	: <i>Örnek 3D-3</i> X doğrultusu eşdeğer deprem yükleri	124
Şekil 3.34	: <i>1.Grup Çözüm</i> için malzeme modelleri	124
Şekil 3.35	: <i>Örnek 3D-3</i> için hazırlanan mekanik model	125
Şekil 3.36	: <i>1.Grup Çözüm</i> Yatay yük çarpanı-tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi	126
Şekil 3.37	: <i>2.Grup Çözüm</i> için malzeme modelleri	128
Şekil 3.38	: İki kritik kesitte moment-eğrilik ilişkisi	128
Şekil 3.39	: <i>2.Grup Çözümde</i> I. ve II. mertebe hesap sonuçları	129
Şekil 3.40	: <i>1. ve 2.Grup Çözüm</i> için sistem süneklik oranı hesabı	129
Şekil 3.41	: <i>1.Grup Çözüm</i> ; 3,4 ve 5 nolu alt sistemlerin χ/χ_u diyagramları	130

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 : Çelik kesitlere ait mekanik özellikler	51
Tablo 2.2 : Bazı büyüklüklerin sistem davranışı üzerindeki etkileri	54
Tablo 2.3 : <i>Örnek 2D-2</i> Betonarme kolonda süneklik oranları	61
Tablo 2.4 : Açısal süneklik oranları	69
Tablo 2.5 : Betonarme düzlem çerçeve çubukları için bünye bağıntısı numaraları	71
Tablo 2.6 : Güçlendirilmiş çerçevede bünye bağıntısı numaraları (<i>Durum 1</i>)	76
Tablo 2.7 : Güçlendirilmiş çerçevede bünye bağıntısı numaraları (<i>Durum 2</i>)	77
Tablo 3.1 : <i>Örnek 3D-1</i> çubuk mekanik büyüklükleri	104
Tablo 3.2 : <i>Örnek 3D-1</i> için yapılan çözümler	104
Tablo 3.3 : <i>Örnek 3D-1</i> alt sistem yatay rijitlik matrisleri	108
Tablo 3.4 : <i>Örnek 3D-2</i> de doğrusal bölgede kalması öngörülen elemanlara ait rijitlik değerleri	115
Tablo 3.5 : <i>Örnek 3D-3</i> çubuk eleman boyutları	122
Tablo 3.6 : Kolon boyuna donatıları	122
Tablo 3.7 : Eşdeğer tekil yüklerin şiddetleri	123

ÖZET

Bazı düzensizlikler içeren üç boyutlu büyük yapı sistemlerinin malzeme ve geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan çözümlemesi ve gerçekleşen sistem sünekliğinin belirlenmesi için bir algoritmanın geliştirildiği bu çalışma, *üç ana bölüm* ile yapılan deneyleri konu alan *ekleri* içermektedir.

Yapı sisteminin boyutlandırılmasında kullanılan deprem yükleri sistem süneklik düzeyiyle ilişkilidir. Hesabın başlangıcında öngörülen sistem süneklik düzeyinin ne ölçüde gerçekleştiğini belirlemek için, doğrusal olmayan çözümlemeye gereksinim vardır. Bu amaçla geliştirilen algoritma; her adımda doğrusal hesap yapılması, problemin genel bilinmeyen sayısının az tutulması, basit bilgisayar programlarının etkin kullanımı, gerçek yapı davranışını daha iyi yansıtabilecek mekanik modellerin oluşturulması ve kullanılması gibi ana esaslara oturtulmuştur.

Önerilen hesap yönteminde, üç boyutlu yapı sistemi birbirlerine göre dik olarak yerleşik yatay ve düşey konumlu düzlem alt sistemlere ayrılmakta; her tür yapısal düzensizlik, düzlem alt sistemleri oluşturan çubuk elemanlar düzeyinde dikkate alınabilmektedir.

Sarılmış betona ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin, olayı etkileyen en önemli değişkenleri içeren bir modelle ifadesinin ardından bileşik eğilmeye maruz genel betonarme kesitte bünye bağıntısı oluşturulmaktadır. Kesit dönme sünekliği bünye bağıntısından elde edilen önemli bir büyüklüktür. Doğrusal olmayan şekildeğiştirmelerin, çubuklar üzerinde iç kuvvet dağılımıyla uyumlu olarak yayılması durumu gözönüne alınmaktadır. Bir alt sistem olarak değerlendirilen çubuk eleman yeter sayıda alt parçaya bölünüp, her parçadaki ortalama iç kuvvetten sanal rijitliğe geçilmektedir. Değişken rijitlikli çubukta birim yerdeğiştirme ve yükleme sabitlerinin hesabı için konsol mesnetlenmiş elemandan yararlanılmakta ve ardışık başvuru bağıntıları kullanılmaktadır.

Döşemelerinde boşluklar bulunan büyük yapı sistemlerinde serbest titreşim hesabının önerilen algoritmayla yapılması, genel programlara göre önemli bir üstünlük getirmektedir.

Gerçekleştirilen üç grup deneysel çalışmadan birincisi, bileşik eğilme etkisindeki 1/1 ölçekli betonarme kolonları; ikincisi, bölme duvarlarının yapı davranışına olan etkilerini ortaya çıkarmak üzere değişik inşaat aşamalarındaki gerçek binalar üzerinde yapılan küçük titreşim ölçümlerini; üçüncüsü ise 1/2 ölçekli bölme duvarlı ve duvarsız betonarme düzlem çerçevelerin iki yönlü yatay yükler etkisindeki davranışını konu almaktadır. Üçüncü grup deneysel çalışmanın ana amacı bölme duvarı ile betonarme çerçeve arasında beton kayma kamaları meydana getirerek oluşturulan, *özel bölme duvarlı çerçevenin* yatay yükler etkisindeki davranışını incelemektir.

Deneysel ve kuramsal sonuçlar karşılaştırılarak aralarındaki uyum gösterilmiştir.

NONLINEAR ANALYSIS OF 3D LARGE STRUCTURES WITH CERTAIN IRREGULARITIES

SUMMARY

A general algorithm for the analysis of 3D large structures with certain irregularities such as discontinuities in floor diaphragms and big openings in shear walls has been proposed to take into account all kind of member irregularities including geometrical and material nonlinearities. Although the algorithm has developed to analyze three dimensional structures made of steel or reinforced concrete, special attention has been exercised on the overall behavior of reinforced concrete structures.

The computer programs developed for this purpose can be feeded by the data obtained experimentally.

The algorithm proposed in this work has not been only justified by theoretical comparisons but also by the results achieved experimentally.

A versatile tool has been obtained at the end which can be used not only for design purposes but to criticize some of the design requirements taking place in the earthquake codes.

The computer program developed herein is applicable to small size computers and can easily be adopted to the parallel computation techniques.

The general purpose program called *DOC3B* developed here has been mainly based on two level substructuring technique. In the first level, beam elements are dealt with. And in the second level of substructuring, planar two dimensional frames and/or floors are dealt with.

The following paragraphs are devoted to the summaries of the three major chapters and their complementary parts given in appendices.

The basic definitions of sectional and structural ductilities are given in the first chapter together with the constitutive model chosen for plain and confined concrete. Structural ductility which is the major parameter to define the earthquake loads reduction factor R is strongly pertinent to the sectional ductilities and is selected at the very beginning of the aseismic design. A nonlinear analysis is needed to check at the end of design whether the R value chosen is reached or not, the ductility demands are provided by the existing sectional dimensions and configurations of reinforcement bars and confinement or not. This is why the constitutive model of concrete which carries the amount of volumetric confinement into analysis has been chosen in the

computer program developed. The details of this model is given in chapter one together with a short review of other models available in the literature.

The second chapter of this work which covers essentially the nonlinear analysis of two dimensional planar systems with all kind of irregularities, consist of three parts.

In the first part of the second chapter a computer program called *M-KAPA* has been developed to take into account sectional disorders and material nonlinearity. For this purpose laminas with different characteristics are defined within the total height of the section. Namely the characteristics of concrete and reinforcement configuration can be considered in this program and moment-curvature relationship can be obtained automatically for the section. This nonlinear relationship has been linearized using the modified initial slope technique, Figure 1.

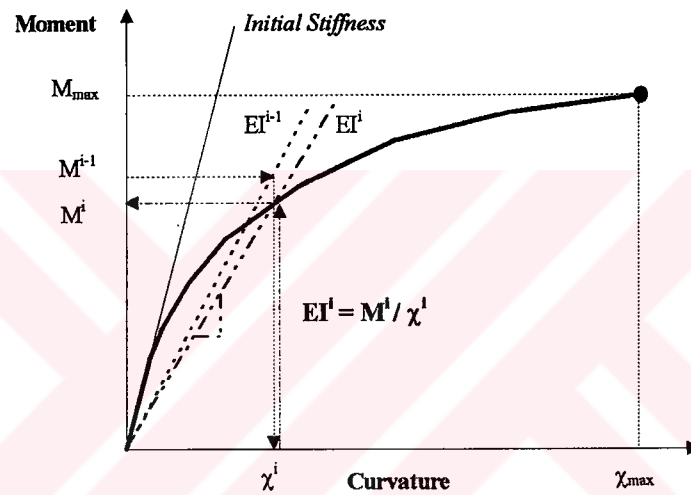


Figure 1 Modified Initial Slope Method For Linearization

Using this technique one can easily obtain the effective flexural rigidity of the portion of the beam which is represented by the help of moment-curvature relation derived at the beginning of the analysis. In fact the algorithm can be modified so that only the necessary points which are corresponding to the observed value of bending moment can be calculated by the program *M-KAPA* and the effective flexural rigidity can be defined accordingly.

Beam elements which are considered as the first level substructures are divided into smaller fictitious parts for which the flexural characteristics are calculated as it is explained in the previous paragraph. Since elements are divided to small fictitious parts all kind of irregularities can be taken into account at this preparatory stage of the analysis. It has to be kept in mind that this is done only when and where it is necessary. The irregularities which can be taken into account are as follows; *i.* Any kind of change in height and width of section including rigid ends, *ii.* Second order effects of axial force, *iii.* Shear deformations together with flexural deformations. The deflected shape of the base element which has been chosen as a cantilever is obtained

and some fictitious forces are defined to account the above listed features. Two recurrence formulae which are suitable for quick hand calculations are given to obtain the necessary deflected shapes of base cantilever beams. And after having calculated the terms of flexibility matrix, the rigidity matrix is obtained by simple inversion of flexibility matrix. Loading terms and fixed end forces are all calculated using the stiffness matrix and the necessary edge displacement.

The computer program called *DOC2B* which consist of two main sub programs has been developed for the nonlinear analysis of two dimensional structural systems which are going to be considered as the second level substructures in the preceding chapter three. The program named *DOC2B-1* utilizes and composes the stiffness matrices which are prepared by the sub programs *DOC2B-2* developed for this purpose. Composed global stiffness matrix is stored in one dimensional array taking into account the symmetry and half band width. And it can be organized so that the reduced stiffness matrices of two dimensional substructures can be reached.

Several graphical features have been added to the program so that the internal forces, curvature distributions or curvature ratios with respect to certain curvature along the members can be displayed.

There are several important features of the program *DOC2B* which can be feeded by ready moment-curvature relationships, force-displacement relationship which might be experimentally obtained and new moment-curvature relationship based on the effective axial force which is valid at a particular load increment, calculates the ultimate load corresponds to any local or global failure.

Three type of executions can be identified for the program *DOC2B* which is able to combine the effects of vertical and horizontal loadings; *i.* Execution for a specified vertical and lateral single load case, *ii.* Execution for lateral load increments keeping the vertical loads constant. Lateral load-specific displacement relationship can be achieved at the end of this analysis. *iii.* Execution for the critical load which corresponds to a certain curvature or structural ductility. The vertical loads are kept constant in this analysis even though it is not a restriction for the main logic of the program.

One bay five story steel structure which had already been analyzed by other researchers has been used for the justification of the results produced by *DOC2B*. Lateral load factor-top displacement curves obtained by three different programs and different concepts are compared and very good agreement has been observed, see Page 53. Also, this comparative work has included a parametric study to find out the relative importance of some parameters on the top deflection and the number of successive approximations. The selected parameters are the amount of subdivisions on the elements, the number of points which are used to apply recurrence formulae on the elements and required stiffness approaching ratios, respectively. The parametric study shows that the first two parameters have to be increased and the third one be decreased after reaching the yielding level of the moment-curvature relationship.

The theoretical analysis of a reinforced concrete cantilever which had been tested for constant axial and monothonicly increased lateral loads in the laboratory has been

compared with experimentally found moment curvature and load-top displacement curves. And very good agreement has been observed, see Page 59. It means that the selected constitutive model, the assumptions made for the theoretical analysis are good enough to be used for predictions. The details of the experimental work carried out are given in Appendix A. The measured and calculated structural ductilities are compared in a table, see Page 61.

Another experimental work carried out on a 1/2 scale reinforced concrete frame subjected to displacement reversals has been used to verify the theoretical results obtained through the computer program *DOC2B*. The results are in very good agreement in the lower rate of loadings and higher level of displacements, see Page 67. However theoretical results do not coincide very much with the experimental results around the yielding level of reinforcement. This may be because of the lack of bond between the concrete and reinforcement at that stage, which has not been reflected into the theoretical models. Since the initial slopes, ultimate loads and displacements are in good agreement the proposed model can be used for predictions. Theoretically and experimentally found plastified regions are good agreement as well, see Page 68. The details of this experimental work can be found as a part of Appendix C.

Another theoretical work carried out on a similar nonsymmetric frame, to have better understanding about the length of plastified zone. The results indicate that loading and configuration of the structure or in more general terms the distribution of internal forces are effective on the lengths of plastified zones.

One of the strength upgrading technique of an existing structure is shear wall adding to the building. An existing wall can be modified using special techniques to resist higher lateral loads, instead. As another alternative a partitioning wall can be prepared so that it could have a chance to act with the peripheral reinforced concrete element and the integrated structure can carry higher lateral loads. A group of pilot tests which are summarized in Appendix C has been carried out in the laboratory to show the importance of the integration of partitioning wall to frame. The theoretical findings of this experimental work has been utilized in the last example taking place in chapter two of this work. Experimentally found load-deflection curves have been implemented into the program *DOC2B* by means of a fictitious flexural rigidity which contains the shear deformations. Integrated walls are represented in the computer program by means of another approach observing from the test results that the shear resistance between the wall and reinforced concrete elements are perfect. The results achieved by means of these two approaches are in good agreement, see Page 76. Taking this opportunity the shear wall orientation has been changed and the behavior of two planar structures strengthened by two different shear walls have been observed theoretically. And it has been indicated that in the case of shear wall-weak beam connection, shear strength of the structures are restricted by the existing flexural ductility of weak beam elements, see Page 77.

It is very well known that the amount of unknowns are tremendously increased as soon as the inplane deformations of slabs are taken into consideration during the 3D analysis of a building system subjected to both vertical and lateral loading. Most of the computer programs which are available are not capable enough to analyze the

structural systems even in the elastic range unless their slabs are assumed as rigid diaphragms. However not only the big openings of slabs jeopardize this assumption done for the plane rigidity of slabs but the nonlinear behavior of slabs also. An algorithm proposed in Chapter 3 enables the nonlinear analysis of 3D structures with flexible slab diaphragms. The proposed algorithm which is based on two level of substructuring technique utilizes mainly the reduced lateral rigidity matrices of planar elements such as lateral load carrying vertical frames, shear walls or shear walls with openings and lateral load distributing slabs and slabs with openings. There exist too many simplified methods or algorithms to obtain the reduced lateral rigidity matrices of substructures. In the program called *DOC3B*, the computer program *DOC2B* which has already mentioned in chapter 2 is being used as a subprogram to derive the lateral rigidity matrices of slabs and lateral load resisting substructures. *DOC3B* combines effectively the matrices supplied by *DOC2B* and solve the equations at each level of loading. All the characteristics described for *DOC2B* are valid for *DOC3B*.

Static equilibrium equations used for this algorithm can be modified to dynamic equilibrium equations simply by adding the inertia forces and damping forces. It has been shown in this chapter that these equations can be solved readily for free vibrational characteristics of the 3D building systems. Even the general formulation can be simplified omitting some of the unimportant interaction terms between the coupled rigidities. All the proposed algorithms have been verified and used to demonstrate the importance of flexible diaphragm action.

The achieved accuracy and efficiency of the proposed algorithm has been proven by means of the first example enclosed to this chapter. A three storey, 3 by 8 bays structure has been analyzed both by *DOC3B* and very well known computer program SAP90, and the results are compared. The following conclusions are achieved; *i.* The differences between the results are negligible, the assumption made in the proposed algorithm are acceptable, *ii.* SAP90 is able to analyze the structures with 10000 unknowns or less for static loadings and the efficiency drops down for free vibrational analysis. On the other hand *DOC3B* has practically no limits for both type of analysis, *iii.* Inplane elastic deformations of slabs may become very effective on the overall structural behavior of 3D buildings, *iv.* The inplane flexibility of slabs can be controlled by means of peripheral beam elements.

Another numerical example to show the importance of inelastic deformations of slabs has been prepared, which can not obviously be analyzed by SAP90. Once again it has been observed in this analysis that if the slab elements undergo to plastic deformations, the shear walls which are very important in elastic analysis becomes unimportant elements as for as the lateral loads are concerned.

In the last numerical 3D example which has been designed according to the Turkish Earthquake Code of 1975 analyzed previously by another program which is based on plastic section assumption, *DOC3B* has been tested once again. The following results are achieved at the end of comparisons, *i.* Load-deflection curves of pushover analyses by two programs are in good agreement, see Page 126, *ii.* The actual behavior of the 3D structure without any deformation restrictions can be followed up easily by *DOC3B*. Doing that some higher displacement ductilities are reached. And even higher ductilities can be achieved introducing higher volumetric ratios for

confinements in critical regions. This means that the required overall ductility can be controlled in a certain extent.

Appendix A has been devoted to the details of an experimental work for which theoretical predictions have been prepared by the help of computer program mentioned in Chapter 2, *DOC2B*. Doing that the test results are compared with theoretical results to justify the chosen constitutive model for concrete and to test the program. Three columns with 1/1 scale has been prepared in Structural and Earthquake Engineering Laboratory of ITU and tested for monotonically increased displacements. The results shows that both the moment-curvatures and load-displacement curves are in good agreement, which means that the preferences and assumptions done at the beginning of programming are acceptable.

Very brittle bricks are widely used in local practice to construct the partitioning walls of low rise reinforced concrete structures which have dual actions on the vibrational characteristics of the buildings. They are effective on the lateral rigidities of structures and on the mass of the structures. Even they have a certain amount of shear strength which becomes important if the concrete quality of structures reduce for any reason. Plastering on brick wall are also effective on the structural behavior in the same direction. In order to quantify all this effects an experimental preliminary study has been carried out in the field on three building with identical structural systems. Micro tremor measurements have been picked up and evaluated by means of a specially developed computer program called *MICI*. Test results which have initiated the experimental program outlined in Appendix B, indicated that contribution of walls to the stiffness is larger than to the mass of structure, because the first free vibrational periods of structures are getting relatively smaller after the construction of either plane or plastered walls.

The contribution of walls to the shear strength of integrated wall-frame system has been launched in the laboratory by 7 early experiments. The experimentally produced load-displacement diagrams which are already implemented into the computer program *DOC2B*, have been compared in Appendix C which contains all the details of testing program. The most spectacular part of this program is related to the specimen which has prepared referring to a local practice in which the brick walls are constructed first and then the peripheral reinforced concrete elements are casted. In the laboratory the brick wall constructed so that concrete and brick shear connectors obtained at the interfaces of concrete and brick masonry domains. It has been proven at the end of the tests that these ordinary shear connectors made of the same materials always used in practice are enough to integrate the partitioning wall to the reinforced concrete frame. The integrated system has not only better behavior against earthquake loads but the total shear strength of composite action is higher than the summation of individual shear capacities. For any easy upgrading and strengthening purposes wire meshes have been mounted on two sides of the tested infill frame and coated by simple plaster with higher cement/water ratio and tested. Approximately 30% of increment in stiffness has been achieved. The expected strength increment which is obvious will be tested after having improved the loading capacity of testing setup.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 TEZİN KAPSAM VE AMACI

Yapının deprem güvenliğini birlikte tanımlayan iki olgu, **dayanım** ve **sünekliktir**.

Bu çalışma kapsamında incelenecek olan yapı tipinin, aşağıda sıralanan özelliklerin tümünü ya da bir bölümünü aynı anda bulundurabileceği düşünülmektedir;

- Perde, boşluklu perde, kolon gibi yatay yük taşıyıcı düşey konumdaki elemanların yapı planındaki dağılımları gelişigüzel olabilir, yapı yatay yükler etkisinde burulabilir veya yapı doğrudan burulma etkisindedir,
- Yatay yük yayıcı döşeme veya eşdeğeri olan elemanlar, düzlemleri içerisinde sonsuz rijit sayılan bölümler bulundursalar da bazı bölümlerinde bu varsayım geçerli olmayabilir veya döşemeler yapı davranışını etkileyecek mertebede büyük boşluklar içerebilirler,
- Gerek yapının geometrik özellikleri gerekse donatı yerleşim detaylarıyla bağlantılı olarak kalıcı şekildeğiştirmelerin elemanlar üzerinde yayılması olasılığı vardır,
- Yapıyı oluşturan çubuk elemanlarda ya da sürekli bir ortama karşılık gelen eşdeğer çubuk elemanlarda malzemenin doğrusal olmaması, kesitlerin değişmesi, eğilme şekildeğiştirmeleri yanında kayma şekildeğiştirmelerinin de etkili olması, eksenel kuvvetin ikinci mertebe etkilerinin gözönüne alınacak düzeyde olması gibi çeşitli düzensizlikler olabilir,
- Sabit düşey ve artan yatay yükler etkisindeki yapı sisteminin hesabında, yüklerin küçük değerlerinden itibaren gerçeğe en yakın sistem davranışının izlenebilmesi için bölme duvarlarının gözönünde bulundurulması gerekli olabilir,

- İncelenen yapı, yeni boyutlandırılacak bir yapı olabileceği gibi yatay yüklere karşı güçlendirilmesi istenen mevcut bir yapı da olabilir. Kullanılacak güçlendirme tekniği mevcut bazı duvarların perdeleştirilmesi şeklinde ise bu tip yapı elemanlarının davranışlarının deneysel olarak belirlenmesi ve üretilen sonuçların doğrusal olmayan çözümleme programında kullanılması gerekebilir.

İleride yapılacak tartışmalarda ortak bir dil oluşturabilmek için birinci cümlede yer alan **dayanım** ve **süneklik** kavramlarının çalışmanın başlangıcında tanımlanmasında yarar vardır.

Dayanım düşey yükler ile yapının taşınması öngörülen yatay yüklerin toplamını, süneklik ise önemli yatay yükler etkisindeki yapının göçmeden yapabileceği yerdeğıştirmelerin doğrusal davranış sırasındaki yerdeğıştirmelerden ne ölçüde büyük olabileceğini tanımlayan kavramlardır. Yapının bütününe ilişkin genel yerdeğıştirme sünekliği, yapının karakteristik yatay rijitlik özelliklerini yansıtabilecek olan bir yerdeğıştirme bileşeninin, örneğin tepe yerdeğıştirmesinin, gösterge olarak seçilmesiyle hesaplanabilir. Genel yerdeğıştirme sünekliği bina türü yapıyı oluşturan kolon ve kirişlerin önemli kesitlerinde ve birleşim bölgelerinde sağlanan sünekliklerle yakından ilgilidir. Kalıcı şekildeğıştirmelerin yapısal olarak toplanacağı bu bölgeler öyle boyutlandırılmalıdır ki buralarda bölgesel göçmeler ortaya çıkmasın ve yapının diğer bölümlerinde bulunan dayanımlardan da yararlanılabilsin. Böyle bir erken göçmenin önlenmesi, gereken kesit sünekliğinin sağlanmasından başka kesiti ve bulunduğu elemanı etkileyen kesit zorları kesme kuvveti ve momentle ilgili taşıma kapasitelerinin uyumlu olması, donatı ve beton arasındaki kenetlenmenin kaybolmaması, basınç donatılarının burkulmaması, büyük yerdeğıştirme ve büyük çatlakların meydana gelmemesine de bağlıdır.

Boyutlandırmaya esas olacak deprem yüklerinin saptanması yapının tümüne ilişkin yerdeğıştirme sünekliğiyle ilgilidir. Yerdeğıştirme sünekliği gerektiğinde ikinci mertebe teorisi kullanılarak yapılacak doğrusal olmayan bir çözümlemeden sonra elde edilebilecek bir büyüklüktür. Bilinmektedir ki deprem yükleri etkisindeki bir yapı sisteminde doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlar birbirleriyle karşılaştırıldığında yapının birinci titreşim periyodu uzadıkça yerdeğıştirmelerin, çok kısaldığında

ivmelerin ve arada da hızların yaklaşık olarak eşitliğinden söz edilebilmektedir. Buna göre yapıya etkimesi olasılığı bulunan gerçek deprem yükleri; yerdeğiştirme benzerliği durumunda μ yerdeğiştirme sünekliğine, hız benzerliği durumunda $\sqrt{2\mu - 1}$ değerine ve ivme benzerliği durumunda da 1'e bölünerek, doğrusal olmayan davranışın bir anlamda doğrusal bir hesapla gözönüne alınması sağlanabilmektedir. Bu yaklaşım belirli ölçüde kalıcı şekildeğiştirmelere izin veren, ancak hiçbir kesitte öngörülen dönme sünekliğinin aşılmadığı dolayısıyla toptan bir göçmeden uzak, ekonomik olabilecek bir boyutlandırmanın esasıdır.

Yukarıda söylenenlerin ışığında bir boyutlandırmanın tamamlanabilmesi, hesabın başlangıcında öngörülen sistem sünekliğine ulaşılmasına bunun için de bölgesel göçme olmaksızın gereken kesit sünekliklerinin sağlanmasına bağlıdır. Deneme yanılma biçimindeki bir hesap yolunun izlenmesini gerektiren bu durumun doğrusal boyutlandırma alışkanlığı sürdürülerek, bilinmeyen sayısını arttırmadan, basit bilgisayar programları kullanılarak ve olanaklar ölçüsünde gerçek yapı davranışını daha yakından izleyerek yapılabileceği mümkün görünmektedir.

Bu tür bir hesap yöntemiyle;

- Basit ancak genel algoritmalarla, eleman düzeyindeki hesapları bütün özel durumlar için birbirine benzer olarak yapabilmek ve sistem düzeyindeki bilinmeyen sayısını arttırmaksızın işlemleri sürdürmek,
- Yapının olası davranışı gözönünde tutularak yapılacak varsayımlarla, sistem düzeyindeki bilinmeyen sayısını azaltmak,
- Bilinmeyenlerin hesabı için yazılacak izdüşüm denge denklemlerini döşeme düzlem içi şekildeğiştirmelerini de içerecek biçimde düzenleyebilmek,
- Gerek görüldüğünde tek tek yerdeğiştirmelerin bilinmeyen alınması yerine yerdeğiştirme gruplarının bilinmeyen alınmasını doğrudan matris işlemleriyle sağlayabilmek,

mümkün olabilmektedir.

Öngörülen bu hesap yolu izlenirken, gerekli görülen yerlerde iki kademeli alt sistem kullanımı söz konusudur. Basit bilgisayar yazılımlarından yararlanarak gerçekleştirilen eleman düzeyindeki hesabın ardından yatay yük taşıyıcı düşey konumlu elemanlarla, yatay yük yayıcı döşeme türü elemanlar da birer alt sistem olarak tanımlanmaktadır.

Üç boyutlu yapı sistemi doğrusal olmayan hesap açısından düzlem alt sistemlere ayrılmaktadır. Çubuk kesitlerinde iç kuvvetlerin karşılıklı etkileşiminin önemsiz olduğu varsayılmaktadır.

Malzeme bakımından doğrusal olmayan elemanlarda *Başlangıç Kirişi Yöntemi* kullanılarak doğrusallaştırma yapılmaktadır. Herhangi bir yük seviyesi için doğrusal olmayan hesap doğrudan gerçekleştirilebilmektedir. Geometri değişimi bakımından doğrusal olmayış ise eksenel yükün bir önceki hesap adımından alınmasıyla eleman düzeyinde doğrusallaştırma yapılarak dikkate alınmaktadır.

Eleman düzeyindeki kesit sünekliğinin kontrol altında tutulabilmesi ve hangi değişkenlerin sistem sünekliği üzerinde ne ölçüde etkili olduğunun da kuramsal olarak incelenmesi konuya bütünlük kazandırmak açısından önem taşımaktadır.

Yukarıda söylenenlerin tümü yeni boyutlandırılacak yapılar için olduğu kadar deprem güvenliği yeter düzeyde olmayan mevcut yapıların güçlendirildikten sonraki davranışlarının belirlenmesi için de geçerlidir. Değişik güçlendirme yöntemlerinin uygulanmasından sonra mevcut yapının yatay yükler etkisindeki davranışı önemli ölçüde değişikliğe uğrayabilir. Bu değişimle ulaşılan dayanım ve sistem sünekliği bilinmeli, bölgesel göçme nedenlerinin ortadan kaldırılmasına çalışılmalıdır. Güçlendirme için bazen yapıya yeni perdeler eklenmesi bazen de mevcut bölme duvarlarının uygun bir yolla perdeleştirilerek var olan bir elemandan yararlanma yoluna gidilmesi mümkün olabilmektedir. Çünkü bölme duvarlarının genelde hesaba katılmayan önemli yatay yük taşıma kapasiteleri bulunmaktadır. Bu kapasitenin önemi çeşitli deneysel çalışmalarla algılanmış, güçlendirmede bu elemanlardan yararlanmak için bir yol önerilmiş ve önerilen yolun etkinliği deneysel bir çalışma ile gösterilmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen davranış modelinin doğrusal olmayan hesaba

yansıtılması için bir örnek üzerinde çalışılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar üç ana grupta toplanmıştır:

1.Grup Deneysel Çalışmalar: Sabit eksenel ve artan tek yönlü yatay yük etkisindeki betonarme konsol elemanlar üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmada üretilen bilgilerden moment-eğrilik ve yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi ilişkileri, geliştirilen algoritmayla ulaşılan kuramsal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel ve kuramsal yolla ulaşılan süneklik oranları karşılaştırılmıştır. Ayrıca enine donatı hacimsel oranında yapılan artımın kesit ve yapı sünekliği üzerindeki etkisi kuramsal olarak irdelenmiştir.

2.Grup Deneysel Çalışmalar: Küçük titreşimler seviyesinde, bölme duvarlarının yapı dinamik özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmak üzere gerçekleştirilen deneysel çalışmadır. Duvarlar bakımından değişik inşaat aşamalarındaki gerçek yapılar üzerinde yapılan küçük titreşim deneyleri, özellikle sıvanmış bölme duvarlı yapılara ait dinamik özelliklerin duvarsızlara göre oldukça farklı olduklarını göstermektedir.

3.Grup Deneysel Çalışmalar: Değişik özelliklerdeki bölme duvarlı ve duvarsız düzlem çerçevelerin, tersinir yatay yükler etkisindeki davranışları incelenmiştir. Ulaşılan deneysel bulguların karşılaştırılmasıyla önerilen özel duvarın etkinliği anlaşılmıştır. Ayrıca hasarlı bölme duvarına uygulanan bir güçlendirme yönteminin deneysel olarak irdelenmesi de bu grupta yer almaktadır. Üretilen sonuçlardan bazıları kuramsal hesaplarda da kullanılmıştır.

1.2 KESİT ve YAPI SÜNEKLİğİ

1.2.1 Tanım ve Süneklik Gereksinimi

Büyük deprem etkilerine maruz bir betonarme yapının bu harekete elastik bölgede kalarak karşı koymasıda durumunda oluşan atalet kuvvetleri, deprem yönetmeliklerince öngörülen eşdeğer statik deprem yüklerinden çok büyük olmaktadır. Yönetmeliklerce

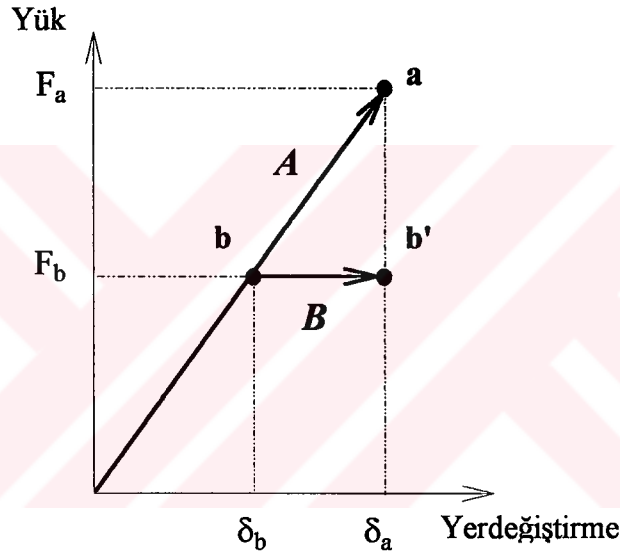
öngörülen yüklere göre boyutlandırılmış pek çok yapı, elastik sınırın ötesinde sünek bir davranış sergileyip, enerji sönümleyerek, büyük deprem hareketlerini çeşitli düzeydeki hasarlarla atlatmışlardır. Yeni deprem yönetmelikleri plastikleşmenin giriş uç kesitlerinde yoğunlaşmasını sağlayacak hükümler içermekle birlikte, kolon uç kesitleri de plastikleşme olabilecek bölgelerdir, [1,2]. Bu kritik bölgelerde sünek bir davranış temin edilerek, iç kuvvetlerin çerçeve üzerinde yeniden dağılımı ve daha fazla deprem enerjisinin yutulması sağlanabilir. Bu iki önemli özellik sistemi oluşturan betonarme çubukların moment-eğrilik ilişkileriyle yakından ilgilidir, [3]. Uzumeri [4], deprem mühendisliğinde süneklik kavramının değişik şekillerde kullanıldığını; ilgili yayınlarda, süneklik oranı hesabına esas büyüklükler yeterince tanımlanmadığı zaman bu kavramla ilgili karışıklıklar olabildiğini belirtmiştir.

Yapının elastik sınırın ötesine geçme yeteneği süneklik kavramı ile ölçülmektedir. Süneklik oranı sistemin genel yatay rijitlik özelliklerini yansıtan bir yerdeğiştirme bileşeninin, aldığı en büyük değerin akmanın başladığı seviyedeki değerine oranlanmasıyla hesaplanır. Doğrusal olmayan dinamik yapı davranışının belirlenmesi için süneklik oranı tek başına yeterli olmayıp; tersinir sönüm özellikleri, enerji sönümleme yeteneği gibi büyüklüklerinde bilinmesi gerekmektedir. Bazı sınırlamalar altında süneklik oranı, deprem bölgelerinde inşa edilecek yapıların uygunluğunu ölçen bir büyüklük olarak görülebilir, [4].

Aynı deprem etkilerine maruz uzun periyotlu yapılarda analiz ile elde edilen doğrusal ve doğrusal olmayan toplam yerdeğiştirmelerin yakın olduğu bilinmektedir. Şekil 1.1 de, A ve B iki farklı yapı davranışını temsil etmektedir. A tipi davranışta, etkiyen yatay yüklere tamamen elastik bölgede kalınarak karşı koyulmakta ve ulaşılan en büyük yerdeğiştirme δ_a olmaktadır. B tipi davranışta ise F_b yük seviyesine erişildiğinde elastik bölge bitmekte ve bu seviyedeki yerdeğiştirme δ_b olmaktadır. B tipi davranışta, b-b' arasında kalıcı şekildeğiştirmeler oluşmaktadır, Şekil 1.1. Bu karşılaştırmada en büyük yerdeğiştirme $\delta_U = \delta_a$ ve akma yerdeğiştirmesi de $\delta_Y = \delta_b$ olmaktadır. Yapısal süneklik oranı $\mu = \delta_U / \delta_Y$ şeklinde hesaplanmaktadır. Yapısal

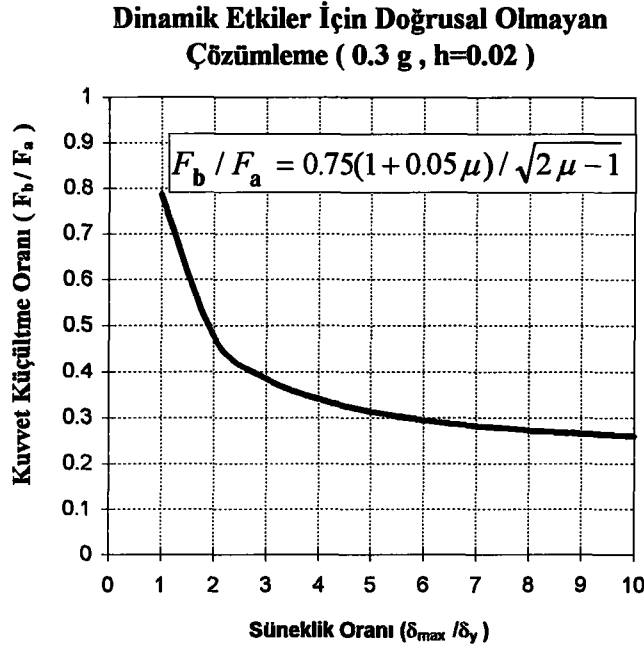
süneklik oranının tersi de, $R = 1/\mu$, deprem yükü azaltma faktörü olarak isimlendirilir.

Boyutlandırma için; F_a elastik dayanımı yerine daha küçük olan F_b dayanımı esas alındığında, yapıda belirli düzeyde kalıcı şekil değiştirme ve hasar kabul edilmiş olmaktadır. Güncel deprem yönetmeliklerinde F_b / F_a oranı 1/3 ile 1/8 arasında değişmektedir, [5]. Deprem yüklerinde yapılan bu azaltma, boyutlandırma ve detaylandırma aşamalarında bazı özel önlemlerin alınmasını gerektirmektedir.



Şekil 1.1 Yük-Yerdeğiştirme İlişkisi

Okada [6], çok sayıdaki yapıda değişik deprem kayıtları etkisinde doğrusal olmayan malzeme davranışı dikkate alınarak ulaşılan ve yapısal süneklik oranının değişimini ifade eden eğriler vermiştir. Şekil 1.2 de betonarme yapılarla ilgili olan bir eğri gösterilmiştir. Diyagramda düşey aks, sistem akma dayanımının aynı harekete elastik olarak karşı konması durumundaki dayanıma oranını, yatay aks ise sistem süneklik oranını göstermektedir. Eğriye karşı gelen bağıntı da aynı şekil üzerinde yer almaktadır.



Şekil 1.2 Süneklik Oranı-Kuvvet Küçültme Oranı İlişkisi

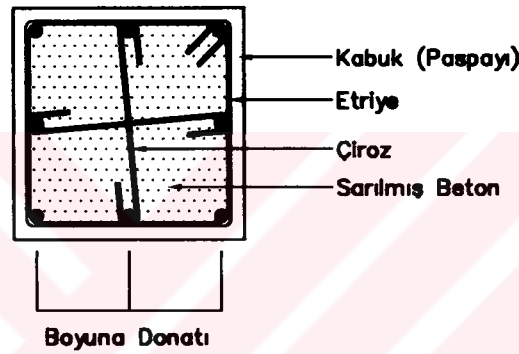
Yapısal süneklik oranı, kullanılan malzemelerin şekildeğiştirme yetenekleri yanında eleman ve sistem özelliklerine de önemli ölçüde bağlıdır. Sünek bir malzeme olmayan beton yeter miktarda çelikle sarıldığında, oluşan kesit sünek bir davranış göstermektedir.

Çakıroğlu ve Karadoğan [7], yapının boyutlandırılması için kullanılan yatay yüklerin hesabına esas olan, öngörölmüş yapısal süneklik oranının ne ölçüde gerçekleştiğini belirleyen bir yöntemin mevcut olmadığını belirtmişlerdir. Sistem sünekliğinin kesitlerdeki dönme süneklik oranı ile elemanların kritik bölgelerindeki plastik şekildeğiştirme yayılışına bağlı olduğu söylenmiştir. Basit veya bileşik eğilme etkisindeki çift donatılı betonarme kesitlerde, sünekliği belirlemeye yönelik bağıntılar oluşturmuşlardır.

1.2.2 Betonarme Kesitte Süneklik

Betonarme kesitte en dış enine donatı kollarını çevreleyen bölgeye *kabuk*, enine donatılarla çevrelenmiş bölgeye ise *çekirdek* veya *sarılmış beton* denilmektedir, Şekil

1.3. Kabuk bölgesindeki betonun davranışı kabuk kalınlığı ve enine donatı aralığı gibi değişkenlere bağlıdır. Kuramsal çözümlemede çok defa bu bölgenin sargısız beton gibi davrandığı kabul edilmektedir. Sarılmış betonun davranışı ise pek çok değişkene bağlıdır. Bu değişkenlerden başlıcaları; enine donatı hacimsel oranı, kesitte etriyelere ilaveten kullanılan değişik tipteki enine donatılar, boyuna donatıların kesit çevresindeki yayılış şekli, enine donatı akma dayanımı, sarılmış alanın tüm kesit alanına oranı, yükleme hızı, eksenel veya dışmerkezsiz yükleme uygulanması, kesite eğilme momentiyle birlikte etkiyen eksenel kuvvetin şiddeti, tek yönlü veya tersinir yükleme tatbik edilmesi vb. şeklinde sıralanabilir.



Şekil 1.3 Betonarme Kesitte Tanımlar

Yükleme doğrultusuna dik istikametlerde sarılmış olan beton elemanda; yükleme doğrultusunda oluşan gerilme, betonun tek eksenli basınç dayanımına yaklaşıncaya oluşan içsel çatlakların etkisiyle çekirdek betonun hacmi artacak, kendisini çevreleyen donatı kafesini de genişletmeye çalışacak ve donatı kafesinde etkinliğiyle orantılı *kuşatma kuvvetleri* oluşacaktır. Bu kuşatma türüne *pasif kuşatma* adı verilmektedir, [2,3]. Bu tür bir kuşatmayla betonun gerilme ve şekildeğiştirme özelliklerinin iyileştirildiği bilinmektedir.

1.2.3 Betonarmede Sarılma ve Kesit Sünekliği Konusunda Önceki Çalışmalar

Kent ve Park [2], sarılma etkisinin beton dayanımında meydana getirdiği artışı terk ederek parabol ve doğrusal kollardan oluşan bir model geliştirmiştir. En büyük dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme miktarı 0.002 olarak alınmış ve bu değerin

sarılma miktarı ve dışmerkezsiz yükleme durumunda büyüyeceği belirtilmiştir. Parabol ve doğrusal kollardan oluşan gerilme bloğunun, elle yapılacak hesaplardaki kullanım zorluğu dolayısıyla, eşdeğer basınç bloku tanımlanarak bileşke basınç kuvvetinin yeri ve şiddeti verilmiştir. Analitik çözümlemede, basınç bölgesinde 0.004 şekildeğiştirme düzeyine erişmiş bölgelerde pas payının döküldüğü kabul edilmektedir. Gerçekte pas payının dökülmesi, belirli bir şekildeğiştirme düzeyine ulaşıldığında aniden olmamakta, yavaş yavaş gelişmektedir. Önerilen model kullanılarak çözülen problemlerde deneysel çalışma sonuçlarının altında kalınmış olması, pas payı ile ilgili yapılan bu kabüle dayandırılmıştır. Sargı donatısının, büyük normal kuvvet taşıyan kolonların sünekliğinde daha da etkili olduğu belirtilmiştir.

Park, Priestley, Gill [3], dört adet 1/1 ölçekli kolon numunesini test ettikleri çalışmalarında, normal kuvvet ve moment yüklemesini birlikte kullanarak sargı donatısı miktarı ve normal kuvvet şiddetindeki değişimlerin genel davranışı nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Deneysel çalışmada, '*düzlem kesit düzlem kalır*' varsayımı kullanılarak ortalama şekildeğiştirme ve eğrilik ölçümleri yapılmıştır. *Kent ve Park Sarılmış Beton Modeli* [2] iyileştirilerek, sargının beton dayanımını da artırdığı gösterilmiştir.

Gündüz [8], sarılmış dikdörtgen kesitli betonarme elemanlarda boyuna donatıdaki pekleşmeyi de dikkate alarak çözümleme ve tasarım amaçlı bir algoritma geliştirmiştir.

Ersoy ve Özcebe [9], sarılmış betonarme kesitlerde moment-eğrilik ilişkisini elde eden bir algoritma geliştirmişler ve basınç donatısı, normal kuvvet, betonun sarılması, çelikteki pekleşme gibi değişkenlerin kuramsal moment-eğrilik ilişkisi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Sheik ve Uzumeri [10], boyuna donatıların kesit çevresine yayılı olarak yerleştirilmesi ve enine donatı aralıklarının küçük seçilmesinin, sarılmış betonun dayanım ve şekildeğiştirme özelliklerini önemli ölçüde iyileştireceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada diğer modellerden farklı olarak, tüm çekirdek bölgesinin aynı miktarda sarılamadığı belirtilerek *etkili sarılmış bölge* tanımı yapılmış ve *Sheik-Uzumeri Modeli*

geliştirilmiştir. Dikdörtgen veya kare kesitli kolonlarda, kolon boyuna donatılarının kesitin dört köşesine toplanması yerine bu noktalarla beraber kenar orta noktalarına da yerleştirilmesinin, sarılma açısından daha etkin bir kullanım şekli olduğu belirtilmiştir.

Sheikh ve Yeh [11], dışmerkezsiz yüklemenin dayanım üzerindeki etkisini terk ederek süneklikte meydana getireceği değişimi incelemiş ve bu etkiyi *Sheik-Uzumeri Modeline* ilave etmişlerdir. Söz konusu modele yapılan bir başka ilave de normal kuvvet düzeyidir. Eşdeğer basınç bloku tanımlanarak elle yapılacak hesap kolaylaştırılmıştır. *Değiştirilmiş Sheik-Uzumeri Modeliyle* ulaşılan kuramsal sonuçların deneysel sonuçlara daha yakın olduğu belirtilmiştir.

Mander ve diğerleri [12], potansiyel plastik mafsallık bölgelerinde enine donatı düzeninin önemli bir konu olduğunu; enine donatının, basınç bölgesindeki betonu sarmak, boyuna donatının burkulmasını engellemek ve kayma donatısı olarak çalışmak gibi görevleri olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan kuramsal çözümlerde kabuk ve çekirdek betonu için iki ayrı davranış modeli kullanılmıştır. Sarılmış beton için önerilen modelde *etkili sarılma bölgesi* kavramı kullanılmıştır. Tek yönlü artan yüklemeyle elde edilen gerilme şekil değiştirme ilişkisinin tersinir yüklemeyle ulaşılan sonuçların zarfı olduğu belirtilmiştir.

Sakai ve Sheikh [13], betonda sarılma etkisi dikkate alınmaksızın hesaplanan eğilme dayanımlarının deneysel sonuçlara göre küçük olduğunu ve küçük eğilme dayanımlarıyla yapılacak kayma hesabının güvensiz olabileceğini belirtmektedirler. Daha önceki çalışmaların birçoğu incelenerek, bu çalışmalarda geliştirilen sarılmış beton davranış modelleri kritik edilmiştir. Geliştirilen pek çok modelin genel amaçlı olmayıp kendi deneyleriyle sınırlı kaldığı, *Sheikh-Uzumeri* ve *Değiştirilmiş Kent-Park Modellerinin* daha genel amaçlı olarak kullanılabileceği söylenmiştir.

Deneysel çalışmada kullanılan yükleme fonksiyonu tatbik hızı ile eksenel ya da dışmerkezsiz yükleme kullanmanın, deney sonuçlarını etkileyebileceği belirtilmiştir. Ayrıca yer değiştirme veya kesit sünekliği tartışılırken; herhangi bir yer değiştirme

seviyesindeki tekrar sayısının önemli bir parametre olduğu, ancak sunulan bir çok deneysel çalışmada bu bilginin verilmediği belirtilmiştir.

Saatçioğlu ve Razvi [14], enine ve boyuna donatılarla oluşturulan kafesin sağladığı eşdeğer sarılma basıncına dayalı olarak bir analitik model geliştirmişlerdir. Model, değişik tipteki sargı donatılarının katkılarını süperpoze edebilmektedir. Bu modelle ilgili detaylı bilgi Bölüm 1.2.4 de yer almaktadır.

Saatçioğlu, Salamat ve Razvi [15], mevcut birçok davranış modelinin eksenel yükleme deneyiyle üretildiğini ancak pratikte daha çok dışmerkezsiz yüklemenin sözkonusu olduğunu belirtmişlerdir. 12 adet kare kesitli kolon, değişik sarılma donatıları ve dışmerkezsizlikler için deneysel olarak incelenmiş, ulaşılan sonuçlar [14] de verilen davranış modelinin sonuçlarıyla karşılaştırıldığında çok uyumlu oldukları gözlenmiştir. Ayrıca önceki deneysel çalışmalarda tersinir yükler kullanarak elde edilen sonuçların zarf eğrilerine, bu modelle teorik olarak yakın sonuçlar elde edilmiştir.

1.2.4 Saatçioğlu-Razvi Sarılmış Beton Modeli [14]

Sarılmış beton davranışını belirlemeye yönelik olarak geliştirilmiş en yeni modellerden biri olması, uygulanabildiği kesit geometrisi ve sargı donatısı tiplerinin genel oluşu, uygulanmasının kolaylığı, eksenel veya dışmerkezsiz yüklemeler için kullanılabilir olması ve farklı deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmış olması sebepleriyle çalışmada bu modelin kullanımına karar verilmiştir.

Model, betonarme çubuklarda enine ve boyuna donatılarla oluşturulan donatı kafesinin sağladığı *eşdeğer üniform sargı basıncının* saptanması esasına dayanmaktadır. Model değişik tipte ve/veya düzenleme şekillerinde kullanılan donatılarla sağlanan sargı etkilerinin süperpozisyonunu da yapabilmektedir.

Betonun üç eksenli basınç altındaki dayanımını, tek eksenli basınç dayanımı ve yanal sargı basıncına bağlayan ifade (1.1) de verilmiştir. Bu bağıntıda, f'_{∞} ve f'_{c0} sırasıyla

sarılmış ve sarılmamış betona ait basınç dayanımlarını, f_l yanal sargı basıncını, k_1 ise Poisson oranının fonksiyonu olan bir çarpanı göstermektedir.

$$f'_{cc} = f'_{c0} + k_1 f_l \quad (1.1)$$

k_1 çarpanı ile f_l arasındaki ilişki (1.2) de verilmiştir.

$$k_1 = 6.7(f_l)^{-0.17} \quad (1.2)$$

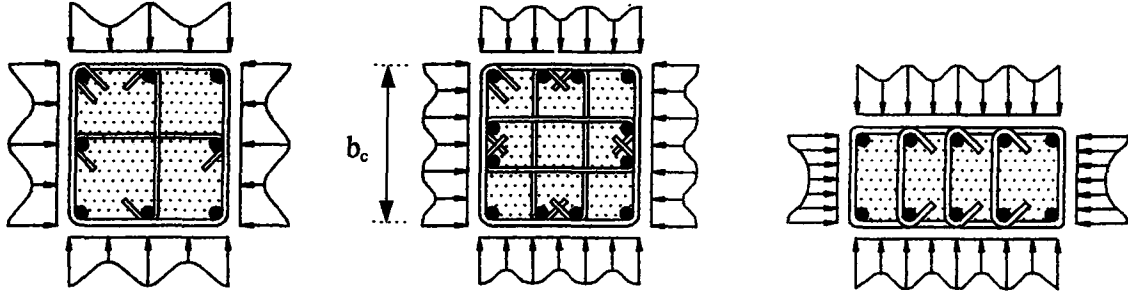
bu bağıntıda f_l , [Mpa] boyutunda olmalıdır.

f'_{c0} , eksenel yükleme durumunda sargısız betondaki basınç dayanımını göstermekte olup, sargılı beton numunesi ile aynı boyutlarda ve özelliklerdeki bir numuneden elde edilmiş olması gerekmektedir. Bunun mümkün olmadığı durumlarda, standart silindirik basınç dayanımı sonuçlarının, 0.85-1.00 aralığından seçilecek bir katsayıyla düzeltilmesiyle ulaşılabilecek değerin de kullanılabileceği belirtilmiştir.

Kare veya dikdörtgen enkesitli betonarme çubuklarda etriyenin düşey donatılarla bağlandığı bölgelerde yüksek, bu bölgelerin uzağında ise düşük bir sargı etkisinin mevcudiyeti bilinmektedir. Sargı basıncı, bağlantı noktalarında enine donatı enkesit alanı ve çekme dayanımıyla, bağlantı noktaları arasındaki bölgelerde ise enine donatı eğilme rijitliği ve açıklığıyla ilgilidir. Donatı eğilme rijitliğinin küçük oluşu sebebiyle boyuna donatılardan uzaklaştıkça sargı etkisi küçülmektedir, Şekil 1.4.

Yakın yerleştirilmiş ve boyuna donatıyı yanal yönde yeterli düzeyde mesnetleyebilen enine donatı durumunda, sargı basıncı dağılımı üniforma yakındır. Enine donatıların akma gerilmesine kadar çalıştırılması durumunda, bu çubuklar üzerinde oluşacak en büyük sarma kuvveti $A_s f_{yt}$ olacaktır. A_s enine donatı enkesit alanını, f_{yt} ise donatı akma gerilmesini göstermektedir. Bu kuvvetlerin toplanarak ilgili beton alanına bölünmesiyle (1.3) bağıntısında verilen *ortalama üniform sarma basıncına* ulaşılmaktadır.

Ortalama üniform sarma basıncının hesabında kullanılan alan, kesitte en dış enine donatı merkezleri arasındaki mesafenin, b_c , çubuk boyunca enine donatılar arasındaki mesafeyi gösteren s ile çarpılmasıyla hesaplanmaktadır. Ortalama üniform sarma basıncının (1.4) de ifade edilen k_2 çarpanıyla azaltılmasıyla, *eşdeğer üniform sarma basıncına*, f_{le} , ulaşılmaktadır.



Şekil 1.4 Betonarme Kesitte Sarma Kuvvetleri

$$f_l = \frac{\sum A_s f_{yt} \sin(\alpha)}{s b_c} \quad (1.3)$$

$$f_{le} = k_2 f_l \quad (1.4)$$

k_2 katsayısı spiralli kolonlarda ve çok sık enine donatılı kare kolonlarda 1.0 e eşittir. α açısı kenar ile enine donatı arasındaki açıyı göstermekte olup, ilgili kenara dik enine donatı durumunda 90° değerini almaktadır.

k_2 katsayısının belirlenmesi için gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, bu büyüklüğün enine donatı aralığına, enkesitte tutulu düşey donatılar arasındaki mesafeye ve ortalama yanal sargı basıncına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir ve (1.5) deki gibi ifade edilmiştir.

$$k_2 = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_c}{s}\right) \left(\frac{b_c}{s_l}\right) \left(\frac{1}{f_l}\right)} \leq 1.0 \quad (1.5)$$

Bu bağıntıda; s_l , kesitte tutulu düşey donatılar arasındaki mesafeyi göstermektedir. f_t [Mpa] boyutunda olmalıdır.

Betonun aksenal basınç altındaki şekildeğiştirme yeteneği sarılma etkisiyle artmaktadır. Sargılı betonda; en büyük gerilmeye karşı gelen şekildeğiştirme miktarının sargısız betona göre daha büyük, gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin azalan kolundaki dayanım kaybının ise daha az olduğu bilinmektedir. En büyük gerilme düzeyindeki şekildeğiştirme, uygulanan sarılma yönteminin etkinliğiyle yakından ilgilidir ve (1.6) bağıntısıyla ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \varepsilon_{01} (1 + 5K_{sarg}) \\ K_{sarg} &= \frac{k_1 f_{te}}{f_{c0}'}\end{aligned}\quad (1.6)$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_{01}$ sırasıyla sarılmış ve sarılmamış betonda en büyük gerilme düzeyindeki şekildeğiştirmeleri göstermektedir. Sargısız betonla ilgili deneysel veri mevcut değilse, ε_{01} olarak 0.002 değeri kullanılabilir.

En büyük gerilme düzeyine eriştikten sonra betonun şekildeğiştirme yeteneğini boyuna donatıların davranışı önemli ölçüde etkilemektedir. Beton pas paylarının dökülmesinin ardından boyuna donatıyı burkulmaya karşı yeterli düzeyde yerleştirilmiş enine donatılar koruyacaktır, (1.7). Sarılmış betona ait gerilme- şekildeğiştirme ilişkisinin azalan kolu üzerinde, en büyük gerilmenin %85'i düzeyinde ulaşılan şekildeğiştirme miktarı da (1.8) bağıntısında verilmiştir.

$$\rho = \frac{\sum A_s}{s(b_{cx} + b_{cy})} \quad (1.7)$$

enine donatı oranı olmak üzere,

$$\varepsilon_{85} = 260 \rho \varepsilon_1 + \varepsilon_{085} \quad (1.8)$$

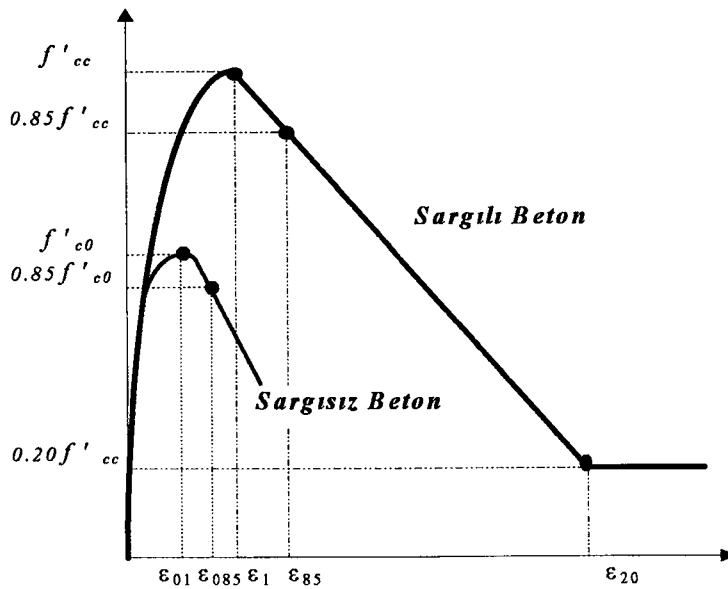
(1.7) bağıntısındaki b_{cx}, b_{cy} sırasıyla enkesitte x ve y doğrultularındaki çekirdek beton boyutlarını göstermektedir. $\varepsilon_{0.85}$, sargısız betonda pikten sonra en büyük dayanımın %85 ine karşı gelen şekildeğiştirme miktarı olup, deneysel veri mevcut değilse 0.0038 değeri kullanılmaktadır.

(1.8) bağıntısının oluşturulması için yapılan deneysel çalışmalarda; (1.7) bağıntısıyla tanımlanan enine donatı oranı için en fazla %2 ye çıkıldığı, daha yüksek enine donatı oranları durumunda (1.8) bağıntısını kullanmanın doğru olmayacağı belirtilmiştir.

Sarılmış beton için oluşturulan gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi üç ana parçadan meydana gelmektedir. Artan bölüm, bir parabol denklemiyle (1.9) da verilmiştir.

$$f_c = f_{cc}' \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_1} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_1} \right)^2 \right]^{1/(1+2K_{sargı})} \leq f_{cc}' \quad (1.9)$$

Verilen bağıntı sargısız durum için *Hognestad Modeline (1951)* karşı gelmektedir. (1.9) bağıntısı, Şekil 1.5 ile birlikte değerlendirilmelidir. Gerilme şekildeğiştirme diyagramının ikinci bölümü, en büyük gerilme f'_{cc} yi, %20 f'_{cc} ye bağlayan azalan koldur. Üçüncü bölüm ise %20 lik artık dayanımı içeren son bölümdür.



Şekil 1.5 Sargılı ve Sargısız Betonda Gerilme Şekildeğiştirme İlişkileri

Dikdörtgen enkesitli betonarme çubuklarda, uzun ve kısa kenarlar boyunca oluşan sarma basınçları yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak ayrı ayrı hesaplandıktan sonra (1.10) bağıntısı kullanılarak eşdeğer üniform sarma basıncı elde edilir.

$$f_{le} = \frac{f_{lex} b_{cx} + f_{ley} b_{cy}}{b_{cx} + b_{cy}} \quad (1.10)$$

(1.10) bağıntısındaki f_{lex} ve f_{ley} sırasıyla b_{cx} ve b_{cy} beton çekirdek boyutlarına dik doğrultularda oluşan eşdeğer sarma basınçlarını göstermektedir.



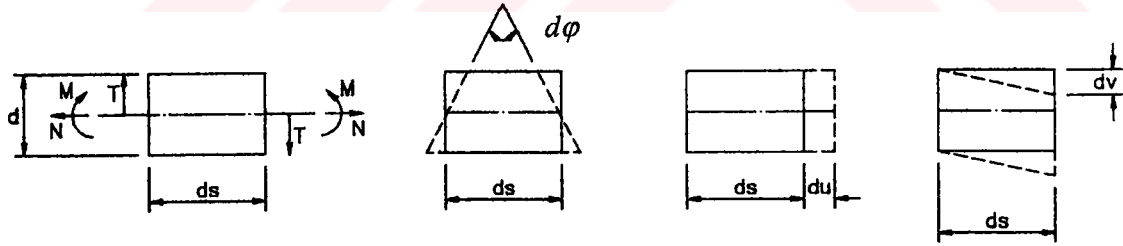
BÖLÜM 2

ÇUBUK SİSTEMLERDE DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ VE İKİ BOYUTLU SİSTEMLER

2.1 DÜZLEM ÇUBUKLARDA İÇ KUVVET-ŞEKİLDEĞİŞTİRME İLİŞKİSİ

Düzlemi içersindeki dış etkilere maruz bir çubuk elemanda oluşan kesit tesirleri; eğilme momenti M , normal kuvvet N ve kesme kuvveti T dir. ds uzunluğundaki bir sonlu parçanın iki yüzünün birbirine göre olan göreceli hareketlerinin iç kuvvetler doğrultusundaki bileşenleri; $d\phi$ kesit dönmesi, du eksen ve dv eksene dik doğrultudaki yerdeğişmelerdir, [16], Şekil 2.1.

$d\phi/ds=\chi$ birim dönme (eğrilik), $du/ds=\epsilon$ birim boy değişimi, $dv/ds=\gamma$ birim kayma isimlerini almaktadır.

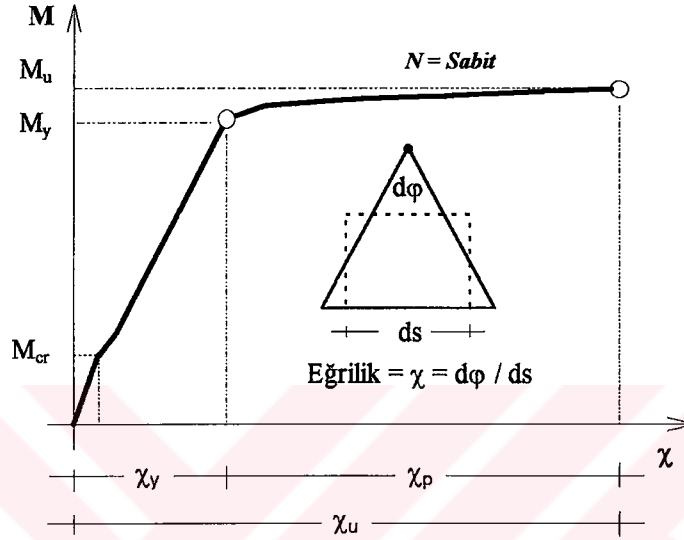


Şekil 2.1 Kesit Tesirleri ve Şekildeğişmeler

Düzlem çubuklarda kesit tesirleriyle şekildeğişmeler arasındaki ilişkinin genel formu (2.1) bağıntısında verilmiştir. Bu bağıntılardaki F_1 , F_2 , F_3 kesit tesirlerine bağlı fonksiyonları, t ve Δt kesite etkiyen üniform ve farklı sıcaklık değişimi miktarlarını, d kesit yüksekliğini, α_t ise genleşme katsayısını göstermektedir.

$$\begin{aligned}\frac{d\varphi}{ds} &= \chi = F_1(M, N, T) + \frac{\alpha_t \Delta_t}{d} \\ \frac{du}{ds} &= \varepsilon = F_2(M, N, T) + \alpha_t t \\ \frac{dv}{ds} &= \gamma = F_3(M, N, T)\end{aligned}\tag{2.1}$$

Eğilme momenti ve sabit aksenal kuvvet veya yalnızca eğilme momenti etkisindeki bir betonarme kesitte, deneysel ya da kuramsal olarak elde edilen moment-eğrilik ilişkisi kullanılarak; dayanım, rijitlik, kesit dönme sünekliği, yutulan enerji miktarı, dayanım ve rijitlik kaybı gibi önemli büyüklüklere ulaşabilmektedir, Şekil 2.3.



Şekil 2.3 Tek Yönlü Yükler Etkisindeki Betonarme Kesitte Moment-Eğrilik İlişkisi

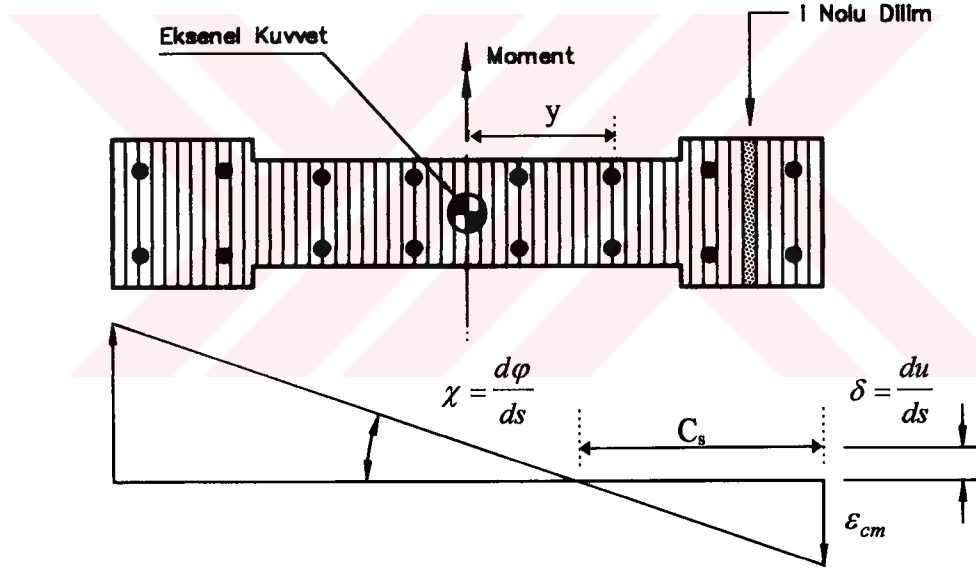
Uygulamada yapı sistemleri deprem gibi tersinir yüklerin etkisinde kalmaktadır. Bu tür yüklemeler için oluşturulmuş malzeme davranış modelleri kullanılarak, betonarme kesite ait moment-eğrilik ilişkisi elde edilebilir. Bu amaçla geliştirilen pek çok model öncelikle tekrarlayan çevrimlerin zarf eğrisini belirlemeyi amaçlamaktadır. Tersinir yüklenme durumundaki moment-eğrilik ilişkisi zarf eğrisinin, tek yönlü artan yükler için oluşturulan moment-eğrilik ilişkisine yakın olduğu bilinmektedir, [19].

2.2 BETONARME DÜZLEM ÇUBUKLARDA KURAMSAL MOMENT-EĞRİLİK İLİŞKİSİNİN BELİRLENMESİ

M eğilme momenti ve N normal kuvveti etkisindeki betonarme bir kesitte moment-eğrilik ilişkisinin oluşturulması aşamasında yapılan varsayımlar şunlardır:

1. Şekildeğiştirme öncesinde düzlem olan kesit, şekildeğiştirme sonrasında da düzlemdir. Yani kesitteki her noktanın şekildeğiştirmesi tarafsız eksene olan uzaklığıyla orantılıdır.
2. Kesit çatlama dayanımına erişildikten sonra betonun çekme dayanımı terkedilmektedir.
3. Beton ve donatı arasındaki kenetlenme tamdır.
4. Tüm beton basınç bölgesi için sarılmış betona ait malzeme modeli geçerlidir.

Betonarme kesitte yükseklik boyunca şekildeğiştirme yayılışı biliniyorsa, ilgili beton ve çelik malzeme modelleri kullanılarak kesit boyunca oluşan gerilmelere, oradan da denge denklemleri yardımıyla iç kuvvetlere geçilebilir, [20], Şekil 2.4.



Şekil 2.4 Genel Bir Kesitte Moment-Eğrilik İlişkisinin Oluşturulması

Betonarme kesitte yazılabilen denge denklemleri (2.3) bağıntısında verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \int_{A_{\text{beton}}} \sigma_{\text{beton}} dA_{\text{beton}} + \int_{A_{\text{çelik}}} \sigma_{\text{çelik}} dA_{\text{çelik}} &= N \\
 \int_{A_{\text{beton}}} \sigma_{\text{beton}} y dA_{\text{beton}} + \int_{A_{\text{çelik}}} \sigma_{\text{çelik}} y dA_{\text{çelik}} &= M
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

(2.3) bağıntısında; basınç gerilmeleri pozitif, çekme gerilmeleri negatif alınmaktadır. Normal kuvvetin basınç ve momentin de alt liflerde çekme etkisi yaratması halleri pozitif olarak değerlendirilmektedir.

Betonarme kesitte moment-eğrilik ilişkisinin oluşturulması aşamasında [9,16,18,21] nolu çalışmalarda da kullanılmış olan, betonarme kesiti ince dilimlere ayırma metodu uygulanmıştır. Bu tür bir hesabın en önemli üstünlükleri integral hesaba veya eşdeğer gerilme bloku tanımına gerek kalmaması, kesit geometrisiyle ilgili sınırlama getirmemesidir.

Hesabın ana adımları şöyle sıralanabilir:

1. Betonarme kesit ince dilimlere ayrılır.
2. En uç basınç lifinde bir şekildeğiştirme miktarı seçilir. Amaç, bu şekildeğiştirme miktarı için kesitte denge denklemlerini sağlayacak tarafsız eksen pozisyonunu bulmaktır.
3. Seçilen bir tarafsız eksen derinliği için, tüm beton dilimleri ve donatı merkezleri hizasındaki şekildeğiştirme miktarları hesaplanır.
4. İlgili malzeme modellerine gidilerek bu şekildeğiştirmelere karşı gelen gerilmeler belirlenir. Gerilme değerleri ilgili elemanların alanlarıyla çarpılarak kuvvetlere geçilir.
5. Kesitte oluşan basınç ve çekme kuvvetlerinin farkıyla, dış normal kuvvetin dengesi aranır.

$$\sum \text{Basınç} - \sum \text{Çekme} = N \quad (2.4)$$

(2.4) denklemi için öngörülen doğruluk sağlanana kadar 3-5 arası adımlar tekrarlanır.

6. Denge yeter doğrulukta sağlandıktan sonra çekme ve basınç kuvvetlerinin kesit ağırlık merkezine göre momentleri alınarak, verilmiş normal kuvvet ve şekildeğiştirme etkisinde kesitte oluşan moment belirlenir. En dış beton

basınç lifindeki şekildeğiştirme miktarı bulunan tarafsız eksen derinliğine bölünerek eğrilik hesaplanır.

$$\chi = \frac{\varepsilon_{cm}}{C_s} \quad (2.5)$$

7. Madde 2 ye gidilerek başka bir şekildeğiştirme durumu için hesap yinelenir.

Bu şekilde, sabit bir N eksenel kuvveti için moment-eğrilik ilişkisini oluşturan noktalar belirlenir.

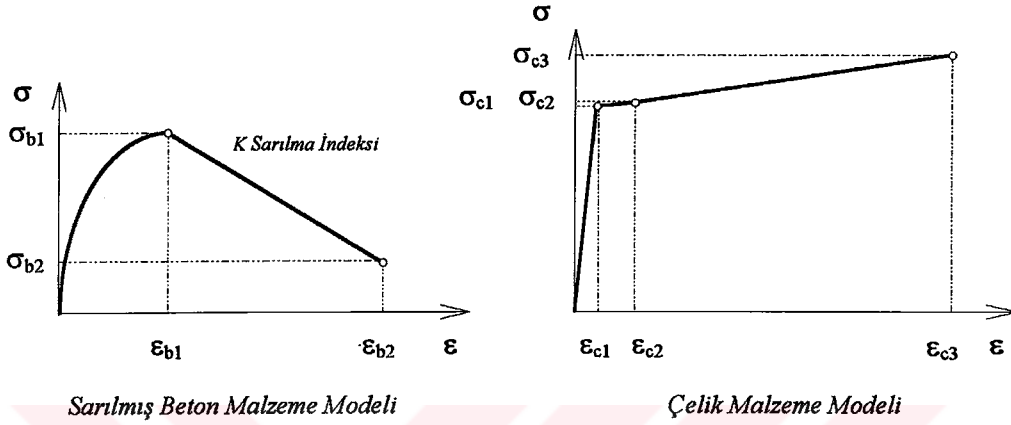
2.3 BETONARME DÜZLEM ÇUBUKLARDA MOMENT-EĞRİLİK İLİŞKİSİNİ BELİRLEYEN BİR BİLGİSAYAR PROGRAMI, M-KAPA

Bölüm 2.2 de sıralanan varsayımlar ve hesap düzeni kullanılarak, tek eksenli eğilme ve eksenel kuvvet etkisindeki betonarme kesitte moment-eğrilik ilişkisini belirleyen bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. **M-KAPA** isimli programın kullanımı için, kesitin moment düzlemi içinde bir simetri eksenini bulundurması gereklidir.

Doğrusal olmayan hesapta kullanılacak moment-eğrilik ilişkisinin oluşturulması aşamasında, uygun malzeme modeli seçimi önemlidir. Betonda sarılma etkisi, donatıda ise pekleşmenin dikkate alınmasıyla; moment-eğrilik ilişkisinin özellikle akmadan sonraki bölgesinde gerçek davranışa daha fazla yaklaşmak mümkündür. Malzeme modelleri, Şekil 2.5 de gösterilen büyüklüklerin programa giriş bilgisi olarak verilmesiyle tanımlanmaktadır.

Kesit çatlama dayanımına erişildikten sonra betonun aldığı çekme kuvveti terkedilmektedir. Beton elastisite modülü, çelik elastisite modülü ve beton çekme dayanımı için deneysel veri olmaması durumunda TS500 [22] de önerilen büyüklükler kullanılmaktadır.

Geometrisi tanımlanmış kesit program tarafından sonlu sayıda dilime bölünür. Seçilen bir şekil değiştirme durumu için, beton dilimler ile donatıların merkezindeki şekil değiştirmeler hesaplanıp, ilgili malzeme modeli ile gerilmeye geçilir. Dilim sayısının artmasıyla doğruluk ve icra süresi artmaktadır. Dikdörtgen kesitlerde dilim sayısının 100 civarında seçilmesi yeterli olmaktadır.



Şekil 2.5 Kullanılan Malzeme Modelleri

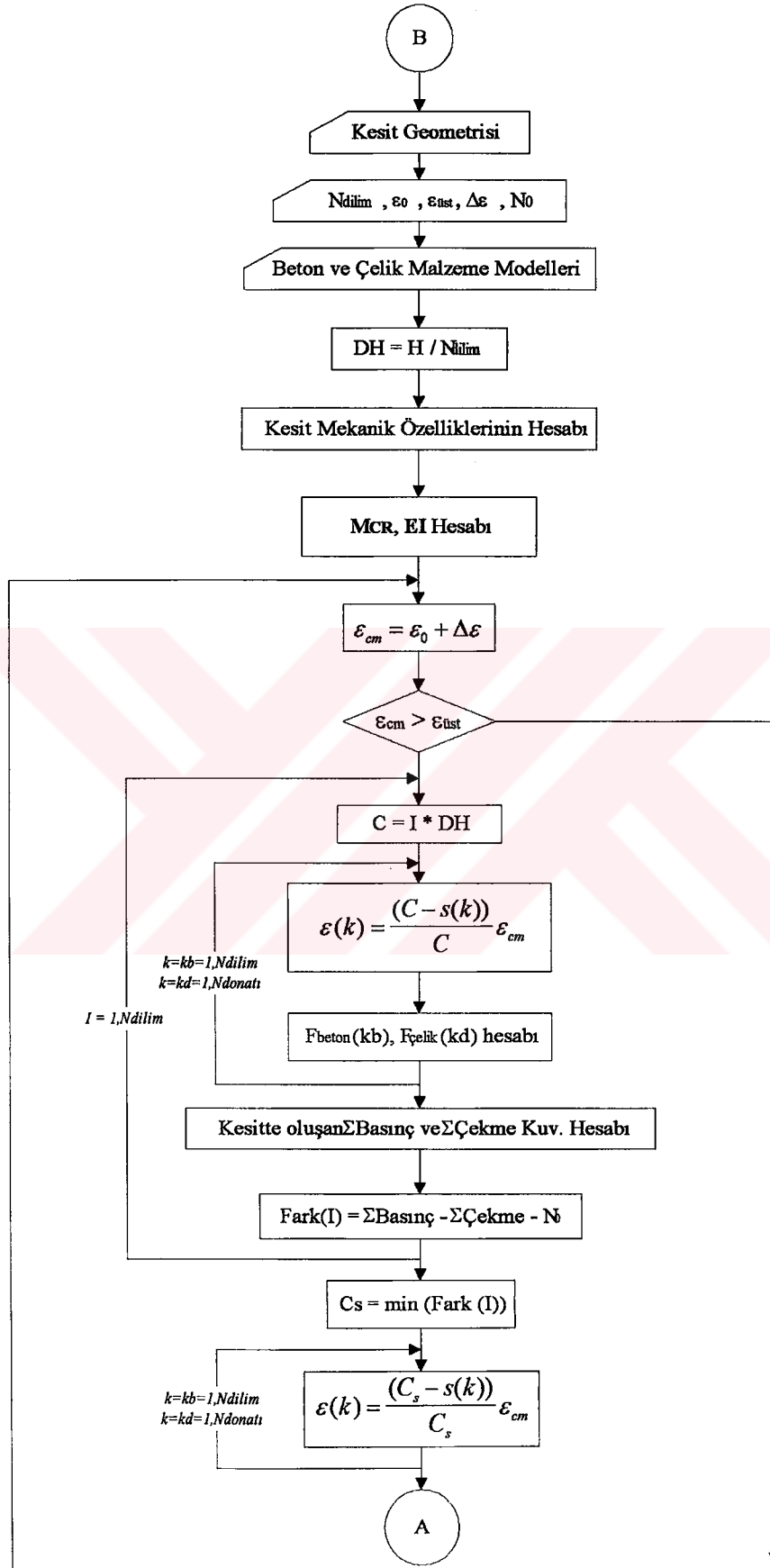
Geliştirilen programın genel bir akış diyagramı Şekil (2.6) da verilmiştir.

M-KAPA programı kesit dönme sünekliğinin hesabı için, akmaya ilk ulaşan boyuna donatıyı da tesbit etmektedir. ε_y donatıda akma şekil değiştirmesini göstermek üzere, boyuna donatılardan birinde $\varepsilon = \varepsilon_y$ olması durumu için kesitteki eğrilik χ_y ve moment M_y değerleri de belirlenir. Bu büyüklüklerden hareketle, kesit dönme sünekliği (2.6) bağıntısıyla hesaplanır, Şekil 2.3.

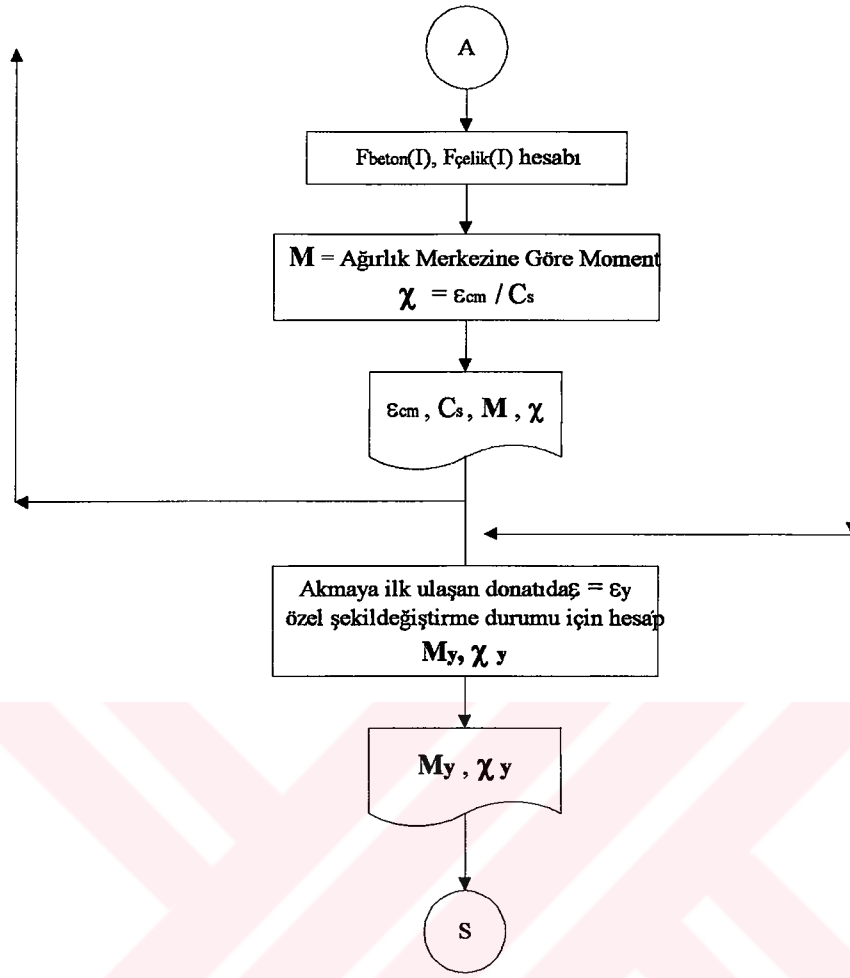
$$R_\theta = \frac{\chi_u}{\chi_y} \quad (2.6)$$

2.4 BÜNYE BAĞINTISINDA DOĞRUSALLAŞTIRMA

Malzeme, geometri değişimi veya sınır koşulları bakımından doğrusal olmayan yapı sistemlerinin çözümlenmesinde ardışık yaklaşım esaslı yöntemlerin kullanılması hesabı



Şekil 2.6 M-KAPA Programı Genel Akış Diyagramı



Şekil 2.6 M-KAPA Programı Genel Akış Diyagramı (devam)

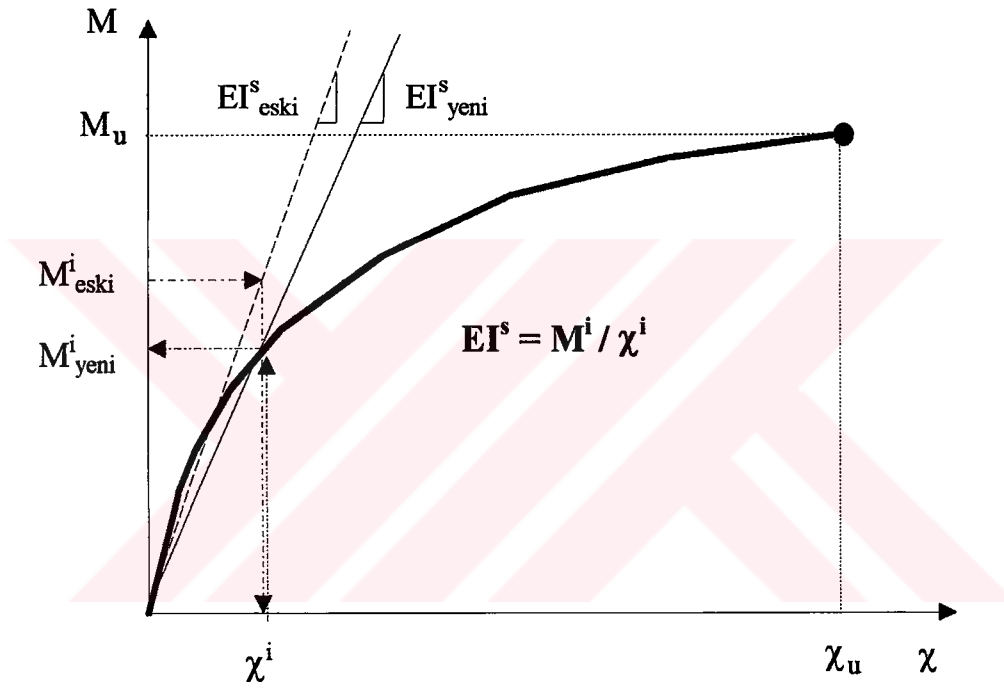
kolaylaştırmaktadır. Bu tür yöntemlerin malzeme bakımından doğrusal olmayan yapı sistemlerine uygulanmasında, yapı sistemi her yük düzeyi için doğrusallaştırılmaktadır. Bir başka deyişle çubuklara ait bünye bağıntıları, çalışılan iç kuvvet düzeyi için doğrusal alınmaktadır.

Bu çalışmada doğrusallaştırma işlemi, *başlangıç kirişi yöntemi* kullanılarak yapılmaktadır. Yöntem uygulanırken, (2.7) de verilen statik yükler için geçerli genel denge denkleminde;

$$[S][d] + [P_0] = [Q] \quad (2.7)$$

$[S]$ sistem rijitlik ve $[P_0]$ yükleme matrisleri ardışık yaklaşımın her adımında değiştirilmektedir. Ardışık yaklaşım hızı düşük olmakla beraber, bünye bağıntısının yatıklaştığı bölgede yakınsamanın kararlı olması dolayısıyla tercih edilmiştir.

Başlangıç kirişi yönteminin uygulanmasında, eleman üzerindeki iç kuvvet düzeyi ve ardışık yaklaşımın bir önceki adımında kullanılmış sanal rijitlikten yararlanılır. Yöntemin uygulanması Şekil 2.7 de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Başlangıç Kirişi Yönteminin Uygulanması

2.5 MALZEME VE GEOMETRİ DEĞİŞİMİ BAKIMINDAN DOĞRUSAL OLMAYAN YAPI SİSTEMLERİNİN HESABI

Malzeme bakımından doğrusal olmayan yapı sistemlerinin hesabında; doğrusal olmayan şekildeğiştirmelerin, iç kuvvet dağılımıyla uyumlu olarak sistem üzerinde yayılı ya da bazı kesitlerde yığılı olarak gözönüne alınması bu konudaki iki farklı yaklaşımı teşkil etmektedir. Özer [23], doğrusal olmayan şekildeğiştirmelerin sistem üzerinde sürekli olarak yayıldığını gözönüne alarak malzeme ve geometri değişimleri

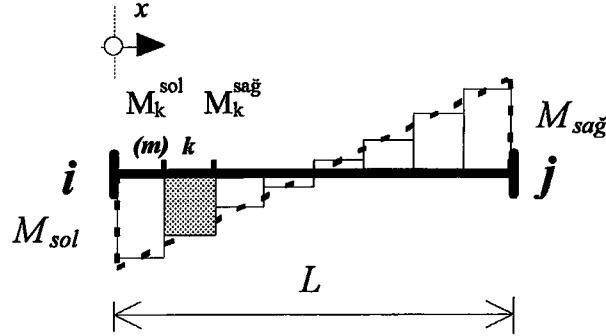
bakımından doğrusal olmayan elastik sistemlerin ikinci mertebe hesabı ve göçme yüklerinin bulunması için bir ardışık yaklaşım hesap metodu önermiştir. Kronke [24], betonarme düzlem çerçevelerin hesabında kullanılmak üzere doğrusal olmayan çubuk sonlu eleman formülasyonu geliştirmiştir. Moment-eğrilik ilişkisinde doğrusallaştırma için teğet yöntemi kullanılmıştır. Girgin K., [25], doğrusal olmayan şekildeğiştirmeleri plastik kesit adı verilen ve sınırlı plastik şekildeğiştirme yeteneği olan belirli kesitlerde toplamakta, bu kesitlerin dışında sistemin doğrusal elastik olarak davrandığı gözönünde tutulmaktadır. Bileşik eğik eğilme etkisindeki betonarme çubuklar için idealleştirilmiş akma yüzeyleri önerilmiştir. Bu yolla malzeme bakımından doğrusal olmayan betonarme sistemlerde, akma koşullarının lineer denklemlere dönüştürülmesi sağlanmaktadır. Kat döşemelerinin düzlemleri içinde sonsuz rijit varsayılması özel halinde, bilinmeyen sayısının azaltılmasını sağlayan özel bir algoritma geliştirilmiştir. Girgin C.,[26], çubuk elemanlarda mekanik özelliklerin hesabından yola çıkarak; geometri değişimi, malzeme ve sınır koşulları bakımından doğrusal olmayan düzlem sistemlerin artan dış yükler etkisinde hesabı için bir algoritma geliştirmiştir. Eleman mekanik özelliklerinin belirlenmesi aşamasında Mohr Yöntemi etkin olarak kullanılmıştır.

2.5.1 Birinci Düzey Alt Sistemler

Malzemenin doğrusal davranış göstermemesi, büyük şekildeğiştirme durumu, değişken kesitli çubuk kullanımı, kayma şekildeğiştirmelerinin etkili olması gibi düzensizlikler çubuk eleman düzeyinde hesaba katılmaktadır. Hesapta kullanılan çubuk elemana *birinci düzey alt sistem* adı verilmiştir. Doğrusal olmayan şekildeğiştirmelerin belirli kesitlerde yoğunlaşmayıp, iç kuvvet dağılımıyla uyumlu olarak çubuk üzerinde yayılması durumu gözönüne alınmaktadır.

Uygulanan hesap yönteminde, birinci düzey alt sistem sonlu sayıda parçaya bölünmektedir. Her türlü düzensizlik alt parçalar düzeyinde doğrusallaştırılmakta ve alt parça üzerinde özelliklerin sabit kaldığı varsayılmaktadır. Bu yaklaşımla, birinci düzey alt sistem değişken özellikli çubuk haline dönüşmektedir. Geliştirilen ardışık başvuru bağıntıları ile değişken rijitlikli çubuğun birim yerdeğiştirme ve yükleme

2. Her sanal parçadaki ortalama iç kuvvet, sanal parça uç kuvvetlerine bağlı olarak hesaplanır, Şekil 2.9.



Şekil 2.9 Çubuk Alt Dilimlerinde Ortalama İç Kuvvetlerin Hesabı

Bir i-j çubuğunun uç momentleri M_{sol} ve $M_{sağ}$ ise, sol uçtan x mesafede bulunan bir (m) kesitindeki eğilme momenti (2.8) bağıntısıyla belirlenir.

$$M_m = M_{sol} - \frac{M_{sol} - M_{sağ}}{L} * x + M_{bas} \quad (2.8)$$

(2.8) bağıntısında; L çubuk boyunu, M_{bas} ise ilgili kesitte çubuk üzerindeki yükten oluşan basit kiriş eğilme momentini göstermekte olup yüksüz çubukta M_{bas} sıfır olmaktadır.

k nolu sanal alt parça üzerindeki ortalama iç kuvvet ise parçanın sol ve sağ uçlarında hesaplanan iç kuvvetlerden hareketle (2.9) bağıntısıyla belirlenir.

$$M_{ort} = \frac{M_k^{sol} + M_k^{sağ}}{2} \quad (2.9)$$

NDELTA değişkenine büyük değerler verilerek, sürekli formdaki moment diyagramına daha yakın bir çokgen elde edilebilir.

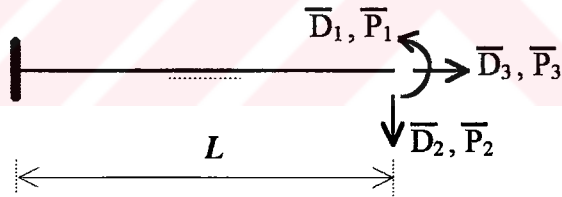
3. Her sanal alt parçada, hesaplanan ortalama iç kuvvetle ilgili bünye bağıntısına gidilerek Bölüm 2.4 de anlatılan şekilde sanal rijitlikler hesaplanır.

4. Sistemdeki tüm çubuklar, NDELTA adet sanal rijitliği içeren değişken kesitli çubuk haline dönüşmüş olmaktadır.
5. Bölüm 2.5.1.1 de anlatılan mesnetlenmiş eleman ve hesap yöntemi kullanılarak, değişken kesitli çubuklar için birim yerdeğiştirme ve yükleme matrisleri oluşturulup ikinci düzey alt sistem hesabında kullanılır.

2.5.1.1 Mesnetlenmiş Eleman

Değişken eğilme rijitlikli düzlem çubukta mekanik özelliklerin hesaplanması için özel bir mesnetlenmiş eleman kullanılmaktadır, Şekil 2.10. Mesnetlenmiş eleman bir konsol çubuk olup; bağımsız uç yerdeğiştirmeleri, sağ uçtaki dönme ile çubuk eksenine dik ve çubuk eksenine doğrultusundaki doğrusal yerdeğiştirmelerdir. Bağımsız uç kuvvetleri de Şekil 2.10 da gösterilmiştir.

Kendi düzlemindeki kuvvetlerin etkisinde olan i-j çubuğunda, toplamı altı adet olan uç kuvvetlerinden üçü bilinirse, diğerleri denge denklemleri yardımıyla hesaplanabilir, [27,28].



Şekil 2.10 Mesnetlenmiş Elemanda Bağımsız Uç Yerdeğiştirmesi ve Uç Kuvvetleri

Uç kuvvetlerinin birim değerlerinden meydana gelen uç yerdeğiştirmelerine *birim kuvvet sabitleri*, uç yerdeğiştirmelerinin birim değerlerinden meydana gelen uç kuvvetlerine de *birim yerdeğiştirme sabitleri* adı verilmektedir, [27,28]. Birim yerdeğiştirme sabitleri matrisine, birim kuvvet sabitleri matrisinin tersi alınarak da ulaşılabilmektedir, (2.10).

$$[k] = [f]^{-1} \quad (2.10)$$

Kullanılan mesnetlenmiş elemanda, bağımsız uç kuvvetlerinin birim değerlerinden meydana gelen uç yerdeğiştirmeleri $\overline{f_{11}}, \overline{f_{12}}, \overline{f_{22}}, \overline{f_{33}}$ olarak isimlendirilir. $\overline{f_{33}}$ terimi diğer uç yerdeğiştirmelerinden lineer bağımsız olduğu için doğrudan (2.11) denklemiyle hesaplanır. Bu bağıntıda L çubuk boyunu, EF ise çubuk eksenel rijitliğini göstermektedir.

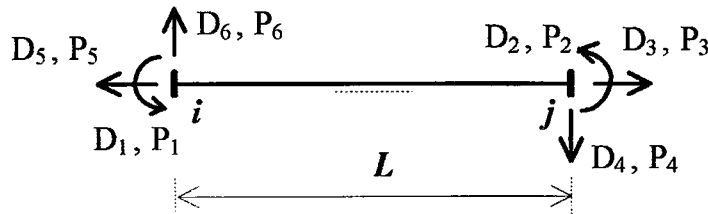
$$\overline{f_{33}} = \frac{L}{EF}, \quad \overline{k_{33}} = \frac{1}{\overline{f_{33}}} \quad (2.11)$$

Mesnetlenmiş elemanın diğer birim yerdeğiştirme sabitleri ise (2.12) bağıntısıyla hesaplanır.

$$\overline{k_{11}} = \frac{\overline{f_{22}}}{\overline{f_{11}\overline{f_{22}} - \overline{f_{12}}^2}}, \quad \overline{k_{12}} = \frac{-\overline{f_{12}}}{\overline{f_{11}\overline{f_{22}} - \overline{f_{12}}^2}}, \quad \overline{k_{22}} = \frac{\overline{f_{11}}}{\overline{f_{11}\overline{f_{22}} - \overline{f_{12}}^2}} \quad (2.12)$$

İkinci düzey alt sistemlerin hesabı için geliştirilen bilgisayar programında, [27] de verilen çubuk sonlu eleman formülasyonu kullanılmaktadır. Dolayısıyla (2.12) bağıntısıyla hesaplanan birim yerdeğiştirme sabitlerinin yeniden isimlendirilmesi gerekmektedir.

[27] de verilen doğru eksenli prizmatik çubuk eleman, uç yerdeğiştirmeleri ve uç kuvvetleriyle birlikte Şekil 2.11 de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 İkinci Düzey Alt Sistemde Kullanılan Çubuk Sonlu Eleman

Şekil 2.10 da verilen mesnetlenmiş konsol elemanda hesaplanan $\overline{k_{11}}, \overline{k_{12}}, \overline{k_{22}}, \overline{k_{33}}$ terimlerinin, Şekil 2.11 deki çubuk elemanda sırasıyla $k_{22}, k_{44}, k_{24}, k_{33}$ terimlerine

karşı geldiği görülmektedir. [27] de verilen çubuk birim yerdeğiştirme matrisine ulaşmak için, (2.13) de sıralanan birim yerdeğiştirme sabitlerinin bilinmesi yeterli olmaktadır.

$$\begin{aligned}
 k_{22} &= \overline{k_{11}} \\
 k_{44} &= \overline{k_{22}} \\
 k_{24} &= \overline{k_{12}} \\
 k_{12} &= k_{24} * L - k_{22} \\
 k_{11} &= k_{44} * L^2 - 2 * k_{12} - k_{22} \\
 k_{14} &= (k_{11} + k_{12}) / L \\
 k_{13} &= 0 \\
 k_{23} &= 0 \\
 k_{34} &= (k_{13} + k_{23}) / L \\
 k_{33} &= k_{55} = k_{53} = EF / L
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

Çubuk özel eksenlerinde yazılmış rijitlik matrisinin genel formu;

$$[k] = \begin{bmatrix} [k]_{ii} & [k]_{ij} \\ [k]_{ji} & [k]_{jj} \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

şeklinde olup, 6x6 boyutundaki matrisin tüm terimleri (2.15) de matris formunda verilmiştir.

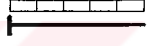
$$\begin{bmatrix}
 \begin{matrix} 1 & 5 & 6 \\
 k_{11} & 0 & k_{16} \\
 0 & k_{55} & 0 \\
 k_{61} & 0 & k_{66}
 \end{matrix}
 &
 \begin{matrix} 2 & 3 & 4 \\
 k_{12} & 0 & k_{14} \\
 0 & k_{53} & 0 \\
 k_{62} & 0 & k_{64}
 \end{matrix}
 \end{bmatrix}
 \tag{2.15}$$

Birim yerdeğiştirme sabitlerinin hesabına benzer olarak, mesnetlenmiş elemanlarda düzgün yayılı yük etkisinde oluşan uç yerdeğiştirmeleri $\overline{f_{10}}$ ve $\overline{f_{20}}$ dan hareketle [27]

de verilen çubuk yükleme matrisine geçilir. P_{02} , P_{04} terimlerinin hesabından sonra diğer terimler denge denklemleriyle belirlenir, (2.16).

$$\begin{aligned} P_{02} &= -(k_{22} * \overline{f_{10}} + k_{24} * \overline{f_{20}}) \\ P_{04} &= -(k_{24} * \overline{f_{10}} + k_{44} * \overline{f_{20}}) \end{aligned} \quad (2.16)$$

Değişken rijitlikli çubukta, Şekil 2.12 de gösterilen birim kuvvet durumlarına karşı gelen uç yerdeğiştirmelerinin hesabı için ardışık başvuru bağıntıları geliştirilmiştir.

$P_1 = 1$	$P_2 = 1$	Dış Yük
		

Şekil 2.12 Mesnetlenmiş Elemanda Bağımsız Uç Kuvvetleri ve Dış Yük

2.5.1.2 Dönme Farklarının Belirlenmesi İçin Bir Ardışık Başvuru Bağıntısı

Ardışık iki nokta arasındaki dönme farkından hareketle, mesnetlenmiş elemanın tüm noktalarındaki mutlak dönmelerin bulunması [29] nolu çalışmada kullanılmış bir yoldur.

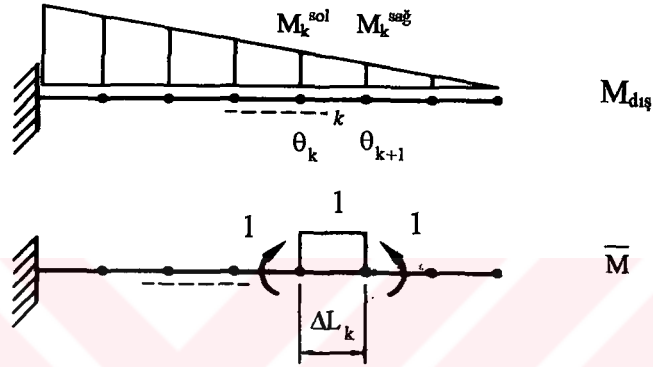
Mesnetlenmiş eleman olarak kullanılan konsol çubukta, ardışık başvuru bağıntılarının uygulanmasına mesnet kesitinden başlanarak serbest uca doğru ilerlenmektedir. Mesnette θ dönmesi ve δ çökmesi sıfıra eşittir.

Konsol kirişte ardışık iki nokta arasında oluşan dönme farkı, virtüel iş teoremi kullanılarak hesaplanabilir, Şekil 2.13.

$M^{dış}$ dış yük, $\overline{M}$ de aralarında dönme farkı hesaplanacak iki noktaya yapılan birim moment yüklemeinden oluşan moment diyagramlarını göstermektedir.

Mesnetlenmiş elemandan çıkarılan k nolu parçada;

- M_k^{sol} ve $M_k^{sağ}$, dış yükten dolayı parçanın sol ve sağ uçlarında oluşan momentleri,
- EI_k parça eğilme rijitliğini,
- ΔL_k parça boyunu,
- q düzgün yayılı yük şiddetini,



Şekil 2.13 Mesnetlenmiş Elemanda Dönme Farklarının Hesabı

göstermek üzere, virtüel iş teoremi ile elde edilen *dönme farkı ardışık başvuru bağıntısı* (2.17) de verilmiştir. (2.17) bağıntısının son terimi, q düzgün yayılı yükünden oluşan basit kiriş momentinin katkısını göstermekte olup, yapılan yükleme düzgün yayılı yük içermiyorsa sıfıra eşit olmaktadır.

$$\Delta \theta_k = \int \frac{M_k^{dis} \bar{M}}{EI_k} ds = \frac{M_k^{sol} + M_k^{sağ}}{2} * 1 * \frac{\Delta L_k}{EI_k} + \frac{2}{3} * \Delta L_k * 1 * q * \Delta L_k^2 * \frac{1}{8EI_k} \quad (2.17)$$

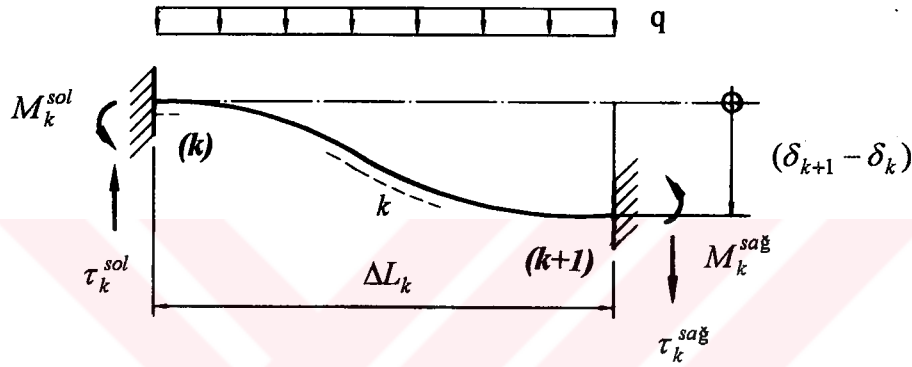
k nolu parçanın sol ucundaki mutlak dönme θ_k bilindiğine göre, sağ uçtaki θ_{k+1} dönmesi (2.18) bağıntısıyla hesaplanır.

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \Delta \theta_k \quad (2.18)$$

(2.18) bağıntısıyla hesaplanan θ_{k+1} mutlak dönmesi pozitif işaretli ise $k+1$ noktasının saatin tersi yönünde döndüğü anlaşılmalıdır.

2.5.1.3 Düşey Yerdeğiştirmelerin Belirlenmesi İçin Bir Ardışık Başvuru Bağıntısı

Dönme farkı ardışık başvuru bağıntısı kullanılarak mesnetlenmiş elemanın tüm noktalarındaki mutlak dönme değerlerinin belirlenmesinin ardından, çökme değerleri de aşağıdaki formülasyon ile hesaplanabilir. Şekil 2.14 de, mesnetlenmiş elemandan çıkarılan k parçasında açt yöntemi uç kuvvetleri pozitif yönleriyle gösterilmiştir.



Şekil 2.14 Mesnetlenmiş Elemanda Düşey Yerdeğiştirmelerin Hesabı

k parçasının sol ucuna ait moment denge denklemi (2.19) bağıntısında verilmiştir. Bu kesitte dış yükten meydana gelen M_k^{sol} momenti denge denklemiyle doğrudan belirlenmekte, bu durumda (2.19) bağıntısındaki tek bilinmeyen k nolu parça sağ ucundaki δ_{k+1} düşey yerdeğiştirmesi olmaktadır.

$$-M_k^{sol} = M_{0k}^{sol} + m_{i\theta}^k \theta_k + m_{i\theta}^k \theta_{k+1} + m_{i\delta}^k (\delta_{k+1} - \delta_k) \quad (2.19)$$

Doğru eksenli, sabit kesitli ve ΔL_k boyundaki parçada q düzgün yayılı yükünden oluşan ankastrelik momenti ,

$$M_{0k}^{sol} = \frac{q\Delta L_k^2}{12} \quad (2.20)$$

bağıntısıyla hesaplanır.

(2.19) bağıntısı yeniden düzenlenirse, *düşey yerdeğiştirme hesabı için bir ardışık başvuru bağıntısı* elde edilir.

$$\delta_{k+1} = \frac{1}{m_{i\delta}^k} \left(-M_k^{sol} - \frac{q\Delta L_k^2}{12} - m_{i\theta}^k \theta_k - m_{i\theta}^k \theta_{k+1} + m_{i\delta}^k \delta_k \right) \quad (2.21)$$

Doğru eksenli ve sabit EI_k eğilme rijitlikli k nolu parçada; $m_{i\theta} = \frac{4EI_k}{\Delta L_k}$, $m_{i\delta} = \frac{2EI_k}{\Delta L_k}$, $m_{i\delta} = \frac{6EI_k}{\Delta L_k^2}$ olmaktadır. ΔL_k , k nolu parçanın boyunu göstermektedir.

(2.21) bağıntısıyla bulunan δ_{k+1} düşey yerdeğiştirmesinin pozitif olması, k nolu parçanın sağ ucunun sol uca göre saat yönünde çöktüğü anlamına gelmektedir.

2.5.1.4 Kayma Şekildeğiştirmelerinin Etkisi

Perde ve yüksek kiriş gibi kesit yüksekliğinin çubuk açıklığına oranının büyük olduğu yapı elemanlarında kayma şekildeğiştirmelerinin etkin olduğu bilinmektedir, [28,30].

Kayma şekildeğiştirmelerinin (2.17) ile verilen dönme farkı ardışık başvuru bağıntısına etkisi yoktur. Çünkü bu bağıntının esası olan birim moment yüklemesi sonucu kesme kuvveti oluşmamaktadır. Buna karşın (2.21) ile verilen çökme ardışık başvuru bağıntısındaki birim yerdeğiştirme sabitleri, kayma şekildeğiştirmelerini de içerecek tarzda düzenlenerek, bu etki önerilen algoritma çerçevesinde kolayca dikkate alınmış olmaktadır. Kayma şekildeğiştirmelerinin etkisi [28] de yapıldığı gibi, (2.22) bağıntılarıyla hesaba katılmaktadır.

$$c = \frac{3EI_k}{\Delta L_k^2 GF'}, \quad m_{i\theta} = \frac{4EI_k}{\Delta L_k} \frac{1+c}{1+4c}, \quad m_{i\theta} = \frac{2EI_k}{\Delta L_k} \frac{1-2c}{1+4c}, \quad m_{i\delta} = \frac{6EI_k}{\Delta L_k^2} \frac{1}{1+4c} \quad (2.22)$$

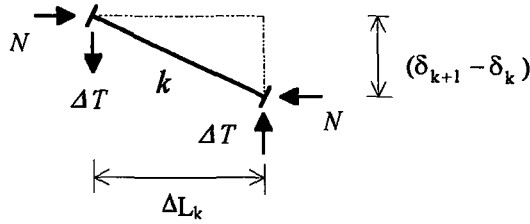
Kesit kayma alanını gösteren F' , dikdörtgen kesitlerde enkesit alanının 5/6 sına eşittir. (2.22) bağıntısında G kayma modülünü, ΔL_k k nolu parçanın boyunu, EI_k ise k nolu parçanın eğilme rijitliğini göstermektedir.

2.5.1.5 Eksenel Kuvvetin İkinci Mertebe Etkileri

Yapı sisteminde değişik sebeplerle yerdeğiştirmelerin büyük olması halinde; yazılacak denge denklemlerinin, kuvvetlerin yerdeğiştirmiş sistem eksenine etkidikleri gözönüne alınarak oluşturulması gerekmektedir, [27].

Önerilen algoritma çerçevesinde, eksenel kuvvetin ikinci mertebe etkileri iki farklı şekilde hesaba katılabilmektedir. Bunlardan ilkinde, mesnetlenmiş elemanı oluşturan NDELTA adet alt parçada normal kuvvete bağılı birim yerdeğiştirme ve yükleme sabitleri kullanılmaktadır. Diğer yolda ise eksenel kuvvetin ikinci mertebe etkileri, bir ardışık yaklaşım hesap düzeni içerisinde sanal kesme kuvvetleriyle hesaba katılmaktadır. Bu hesabın adımları şöyledir:

1. Mesnetlenmiş elemanda dış yükten oluşan dönmeler ardışık başvuru bağıntısı kullanılarak belirlenir.
2. Birinci mertebe teorisi esaslı birim yerdeğiştirme sabitleri kullanılarak dış yükten oluşan düşey yerdeğiştirmeler hesaplanır.
3. Mesnetlenmiş elemandan çıkarılan bir k parçasının uçlarında, büyük yerdeğiştirme ve eksenel kuvvetin etkisiyle oluşan ve ikinci mertebe etkileri temsil eden ΔT sanal kesme kuvvetleri hesaplanır, Şekil 2.15.

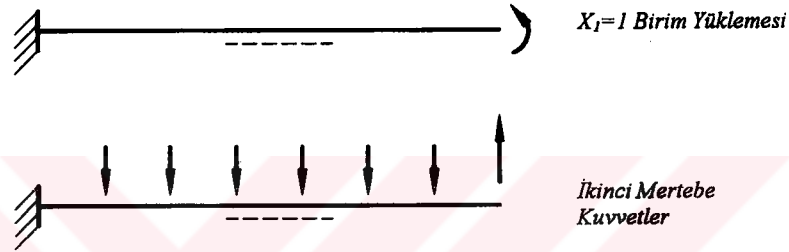


Şekil 2.15 Eksenel Kuvvetin İkinci Mertebe Etkisini Temsil Eden Kesme Kuvvetleri

ΔT kesme kuvveti, düşey uç yerdeğiştirmeleri farkı $(\delta_{k+1} - \delta_k)$ ile çubuk eksenel kuvveti N nin çarpılmasıyla oluşan ikinci mertebe momentin, çubuk boyu ΔL_k ya bölünmesiyle belirlenir, (2.23).

$$\Delta T = \frac{(\delta_{k+1} - \delta_k)N}{\Delta L_k} \quad (2.23)$$

Mesnetlenmiş elemanın tüm alt parçalarındaki ΔT kuvvetleri hesaplanıp süperpoze edilir. Şekil 2.16 da bir numaralı bağımsız uç kuvvetinin birim durumu için, $\overline{P}_1 = 1$, ikinci mertebe etkileri temsil eden sanal kesme kuvvetleri gösterilmiştir. Bu kuvvetlerin oluşturduğu ikincil moment diyagramı, esas moment diyagramıyla toplanarak sonuç diyagram elde edilir.



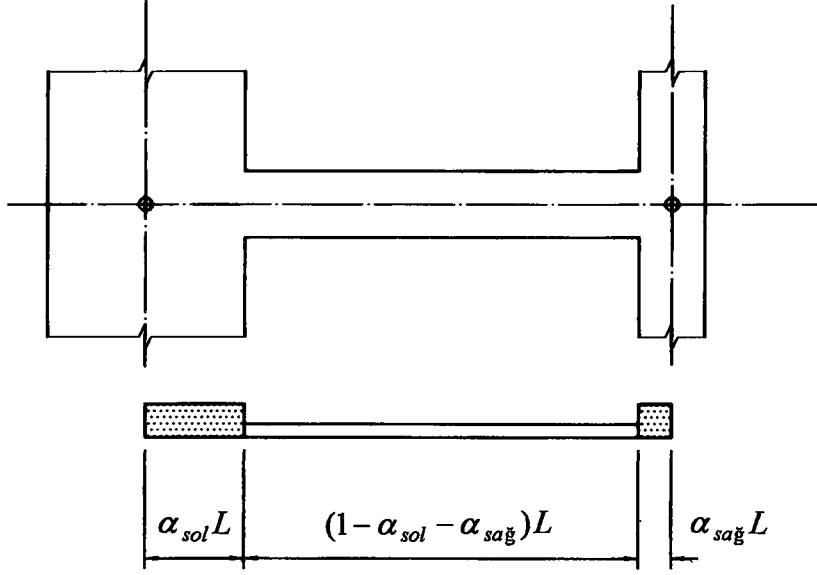
Şekil 2.16 Mesnetlenmiş Elemanda İkinci Mertebe Etkilerin Hesaba Katılması

4. Mesnetlenmiş elemanda, bileşke moment diyagramından oluşan dönmeler ve düşey yerdeğiştirmeler ilgili ardışık başvuru bağıntıları kullanılarak belirlenir.
5. Ardışık iki adım arasında sonuçlardaki farklılık öngörülen değerden küçük değilse, *Adım 3* e gidilerek hesap tekrarlanır.

2.5.1.6 Uçlarında Rijit Parçalar Bulunan Çubuklar

Çubuk ağırlık merkezlerinden geçen eksenlerle yapılan idealleştirmelerde; kirişlerin geniş perdeler, perdelerin de yüksek kirişler içerisinde kalan bölgelerinin bir kısmı rijit olarak alınabilir, [31], Şekil 2.17.

Bu tür idealleştirilmiş elemanların davranışını yansıtabilmek için çubuk giriş bilgilerine, çubuk sol ve sağ uçlarında bulunabilecek rijit bölge boylarının tüm çubuk boyuna oranlarını ifade eden α_{sol} ve $\alpha_{sağ}$ katsayıları da eklenmiştir.



Şekil 2.17 Rijit Uçlu Çubuklar

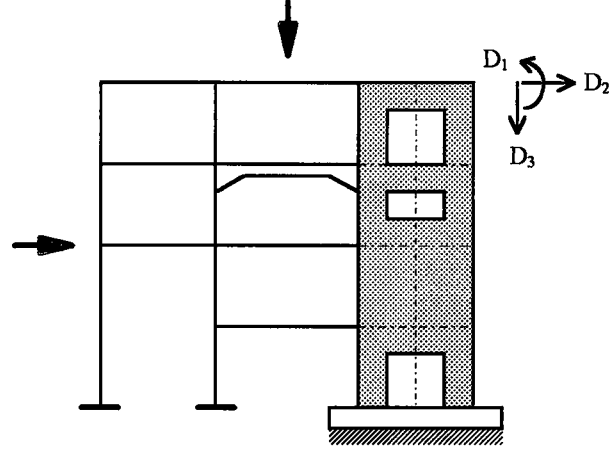
Bu tür çubuklarda algoritmanın genelliğini bozmadan yapılan işlem; rijit bölgeye isabet eden dilimlerdeki EI eğilme rijitliğini, normal bölgelere isabet eden dilimlerdeki en büyük eğilme rijitliği değerinin γ katı olarak vermektir. γ katsayısı, 1000 - 10000 aralığından seçilebilir.

2.5.2 İkinci Düzey Alt Sistemler

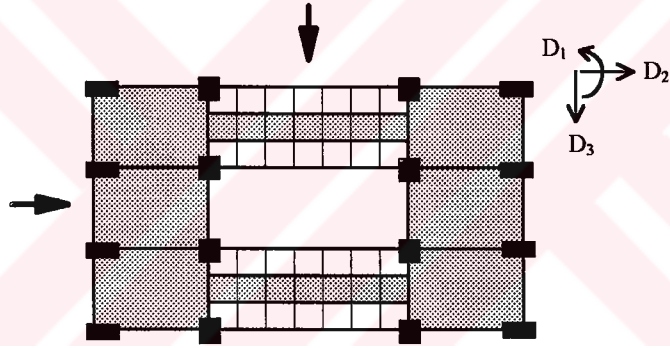
Çubuk elemanlardan meydana gelen bağımsız düzlem taşıyıcılar ya da Bölüm 3 de sunulan algorithmada uygulandığı şekilde, üç boyutlu yapının ayrıklaştırılmasıyla elde edilen yatay veya düşey konumlu düzlem taşıyıcılar *ikinci düzey alt sistem* olarak adlandırılır, Şekil 2.18.

İkinci düzey alt sistemi oluşturan çubuk elemanlarda malzemenin doğrusal davranmaması, kesitlerin değişken olması, eğilme şekil değiştirmeleri yanında kayma şekil değiştirmelerinin de etkili olması, aksenal kuvvetin ikinci merteye etkilerinin dikkate alınmak istenmesi gibi düzensizlikler olabilir. Perde ve döşemelerde yer alan büyük boşluklar da ikinci düzey alt sistemde karşılaşılan düzensizlikler arasındadır.

İkinci düzey alt sistemin düğüm noktalarında dönme, yatay ve düşey doğrusal yerdeğiştirme olmak üzere toplam üç yerdeğiştirme bileşeni mevcuttur, [27].



Yatay Yük Taşıyıcı Düşey Alt Sistem



Yatay Yük Yayıcı Yatay Alt Sistem

Şekil 2.18 İkinci Düzey Alt Sistem

Bölüm 2.5.1 de çubuk eksen takımında hazırlanan eleman birim yerdeğiştirme matrisleri, (2.24) bağıntılarında verilen dönüştürme işlemi ile sistem eksen takımına dönüştürülür.

$$\begin{aligned}
 [k]_{ixix} &= [T]_i [k]_{ii} [T]_i^T \\
 [k]_{ixjx} &= [T]_i [k]_{ij} [T]_j^T \\
 [k]_{jxix} &= [T]_j [k]_{ji} [T]_i^T \\
 [k]_{jxjx} &= [T]_j [k]_{jj} [T]_j^T
 \end{aligned}
 \tag{2.24}$$

Dönüştürme işleminde kullanılan matrisler, çubuk i ve j uçları için sırasıyla (2.25) de verilmektedir.

$$[T]_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta_i & -\sin\beta_i \\ 0 & \sin\beta_i & \cos\beta_i \end{bmatrix} \quad [T]_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta_j & -\sin\beta_j \\ 0 & \sin\beta_j & \cos\beta_j \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Ortak koordinat eksenlerinin her düğüm noktasında birbirine paralel olması durumunda, β_i ve β_j açıları aynı değeri almaktadır. β olarak isimlendirilen bu açı, çubuk uç noktalarının koordinatları kullanılarak (2.26) bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

$$L_x = x_j - x_i, \quad L_y = y_j - y_i, \quad L = \sqrt{L_x^2 + L_y^2}, \quad \cos \beta = \frac{L_x}{L}, \quad \sin \beta = \frac{L_y}{L} \quad (2.26)$$

Eleman birim yerdeğiştirme matrisleri için tanımlanan dönüştürme işleminin, çubuk eksen takımına göre oluşturulmuş yükleme matrisleri için de uygulanması gerekmektedir. $[p_0]_i$ ve $[p_0]_j$ çubuk eksenlerindeki yükleme matrislerini göstermek üzere, dönüştürme işlemi (2.27) bağıntısıyla tanımlanmaktadır.

$$[p_0]_{ix} = [T]_i [p_0]_i \quad [p_0]_{jx} = [T]_j [p_0]_j \quad (2.27)$$

İkinci düzey alt sistemde statik yükler için geçerli olan genel denge denklemi (2.28) bağıntısında verilmiştir. Bu bağıntıda $[S]$ sistem rijitlik, $[P_0]$ çubuk yükleme, $[Q]$ düğüm noktası yükleri ve $[d]$ yerdeğiştirme matrislerini göstermektedir.

$$[S][d] + [P_0] = [Q] \quad (2.28)$$

Sistem eksenlerine dönüştürülmüş çubuk birim yerdeğiştirme ve yükleme matrisleri çubuğun bağlı olduğu düğüm noktalarıyla adresli bölgelere yerleştirilerek, $[S]$ ve $[P_0]$ matrisleri elde edilir, (2.29). N_{2D} , ikinci düzey alt sistemdeki düğüm noktası sayısını göstermektedir.

$$\begin{array}{c}
1 \dots i \quad j \dots 3N_{2D} \\
[S] = \begin{bmatrix} & & \\ & [k]_{ixix} & [k]_{ixjx} \\ & [k]_{jxix} & [k]_{jxjx} \\ & & \end{bmatrix} \quad [P_0] = \begin{bmatrix} & & \\ [P_0]_{ix} & & \\ [P_0]_{jx} & & \\ & & \end{bmatrix} \begin{array}{c} 1 \\ i \\ j \\ 3N_{2D} \end{array}
\end{array} \quad (2.29)$$

Düğüm noktalarına etkiyen tekil yükler ve tekil momentler, $[Q]$ matrisinde etkidikleri yerdeğiştirme bileşeniyle ilgili satıra yerleştirilirler.

Bağımsız düzlem sistem durumunda (2.28) denkleminin çözümüyle yerdeğiştirmelere ulaşılır. Üç boyutlu yapının ayrıştırılmasıyla elde edilmiş yatay ya da düşey konumlu düzlem alt sistem durumunda ise indirgenmiş ve küçültülmüş rijitlik ve yükleme matrislerinin bulunmasına hazırlık olarak, $[S]$ ve $[P_0]$ matrislerinde satır ve sütunlar istenilen sırada yeniden düzenlenir. Bu işlemle ilgili ayrıntılı bilgi Bölüm 3.4 de verilmektedir.

Yerdeğiştirmelerin hesabından sonra (2.30) ifadeleri kullanılarak sistem eksen takımındaki çubuk uç kuvvetleri belirlenir. (2.31) bağıntıları ile de çubuk eksen takımındaki uç kuvvetlerine geçilir.

$$[P]_{ix} = [k]_{ixix}[d]_{ix} + [k]_{ixjx}[d]_{jx} + [P_0]_{ix} \quad (2.30)$$

$$[P]_{jx} = [k]_{jxix}[d]_{ix} + [k]_{jxjx}[d]_{jx} + [P_0]_{jx}$$

$$\begin{aligned}
[P]_i &= [T]_i^T [P]_{ix} \\
[P]_j &= [T]_j^T [P]_{jx}
\end{aligned} \quad (2.31)$$

2.6 DÜZLEM SİSTEMLERDE DOĞRUSAL OLMAYAN ÇÖZÜMLEME İÇİN GELİŞTİRİLEN BİR BİLGİSAYAR PROGRAMI, DOC2B

Malzeme ve/veya geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan ve bazı düzensizlikler içeren düzlem sistemlerin çözümlenmesi için geliştirilen **DOC2B** programı, DOC2B-1.FOR ve DOC2B-2.FOR isimindeki iki programın DOS işletim sisteminde BAT dosya düzeniyle bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Her iki program da bağımsız altprogramlara sahiptir.

Genel bir akış diyagramı Şekil 2.19 da verilen DOC2B-1.FOR programı, düzlem sistemlerin doğrusal hesabı için oluşturulan bir düzlem çerçeve programının, bazı ilavelerle geliştirilmesiyle elde edilmiştir. Hesabın ilk adımında, IADIM=0, çubuk birim yerdeğiştirme ve yükleme matrisleri ile yayılı yük etkisindeki çubukların basit kiriş kesit zorlarını hesaplar. Takip eden adımlarda ise DOC2B-2.FOR programı tarafından hesaplanmış ve sistem eksenlerine dönüştürülmüş olan çubuk birim yerdeğiştirme ve yükleme matrislerini hazır olarak okumaktadır. Hesabın birinci adımından sonra DOC2B-1.FOR programının ana görevi [S] sistem rijitlik, [P] dış yük ve [Q] düğüm noktası yük matrislerinin kurulması, sınır şartlarının ve yay bilgilerinin uygulanması, denklem takımının çözümü, süperpozisyon ve çubuk uç kuvvetlerinin belirlenmesidir.

Bilgisayar bellek kapasitesinin daha etkin kullanımı amacıyla [S] sistem rijitlik matrisi tek boyutlu bir dizi olarak oluşturulup, içerisinde esas köşegen üzerinde yarım bant genişliğindeki bölgenin terimleri saklanmaktadır. Adresleme için [32] de verilmiş olan (2.32) bağıntısı kullanılmaktadır.

$$IYER(IS,I,J)=0.5*((J-I)*(2*IS-J+I+1)+2*I) \quad (2.32)$$

(2.32) bağıntısında; IS toplam satır-sütun sayısını, I ve J ise satır ve sütun numaralarını göstermektedir.

DOC2B-2.FOR programı çubuk uç kuvvetlerinden hareketle, her çubuk için belirtilen sayıda alt dilimde, ortalama iç kuvvet hesaplar. Hesaplanan iç kuvvetler, alt dilim

sanal rijitliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu programa ait genel bir akış diyagramı Şekil 2.20 de verilmiştir.

DOC2B-2.FOR programında üç farklı tipte çubuk bünye bağıntısı kullanılabilir. Bunlar: *i.* Ardışık yaklaşımın bir önceki adımında elde edilen çubuk eksenel kuvvetini kullanarak, program tarafından hesaplanan moment-eğrilik ilişkisi (IMKPK=0), *ii.* Hazır veri dosyası olarak girilen moment-eğrilik ilişkisi (IMKPK=1), *iii.* Hazır veri dosyası olarak girilen yük-yerdeğiştirme ilişkisi (IMKPK=2).

Üç farklı yoldan biriyle girilen bünye bağıntıları çubuk alt dilimlerindeki ortalama iç kuvvet seviyelerinde doğrusallaştırılarak, sanal rijitlikler elde edilir. Değişken rijitlikli çubuğa dönüşen mesnetlenmiş elemanda, birim yerdeğiştirme ve yükleme matrisleri hesaplandıktan sonra sistem eksenlerine dönüştürülüp, saklanır.

Yeni birim yerdeğiştirme ve yükleme matrisleri kullanarak yapı sistemi tekrar çözülür. Bu kapalı hesap çevrimi, teorik olarak esas alınan ve elde edilen rijitlikler aynı oluncaya kadar tekrarlanmalıdır. Programda giriş bilgisi olarak verilen $\bar{\varepsilon}$ yakınsama değerine ulaşıldığında hesap durdurulur.

Hesap sonucunda çubuk dilimlerindeki iç kuvvet, eğrilik, sanal rijitlik, akma eğrilğine oran χ / χ_y ve en büyük eğrilğe oran χ / χ_u gibi büyüklükler dış ortama basılır.

Geliştirilen algoritma doğrusal olmayan hesaba herhangi bir yük düzeyinden doğrudan başlayabilmektedir. İstenen yük seviyesi için hesap yapılırken, sıfır seviyesinden başlayıp küçük yük artımları ile ilerleme zorunluğu yoktur.

Yapı sistemini oluşturan çubuklardan herhangi birinin bir alt diliminde oluşan şekildeğiştirme miktarı, o kesit için öngörülen en büyük değere ulaştığında hesaba son verilmekte ve bu yük düzeyi *Göçme Yüğü* olarak adlandırılmaktadır.

DOC2B programı, üç farklı amaçla icra edilebilmektedir. Bunlar;

1. Verilmiş bir yükleme için, tüm sistemde yerdeğiştirme, iç kuvvet ve şekildeğiştirmelerin belirlenmesi,
2. Verilmiş bir grup yük çarpanı için, otomatik olarak arka arkaya hesap yaparak yapı sisteminin istenen bir kesitine ait yerdeğiştirme, iç kuvvet veya şekildeğiştirme bileşeni ile yük çarpanları arasındaki ilişkiyi gösteren grafikleri çizmek,
3. Verilmiş bir yük dağılımı için, istenen şekildeğiştirme miktarına erişmeyi sağlayan yük çarpanının belirlenmesi. Hedef şekildeğiştirme, sistemin tüm kesitleri için aynı ya da farklı değer alabilir. Bu özellik kullanılarak yapı sisteminin yerdeğiştirme sünekliğini belirlemeye yönelik iki önemli bilgi üretilmektedir: i. Yapı sisteminin herhangi bir kesitinde boyuna donatının akmasını sağlayan en küçük α_y yük çarpanının belirlenmesi, ii. Sistemin taşıyabileceği en büyük α_u yük çarpanının elde edilmesi.

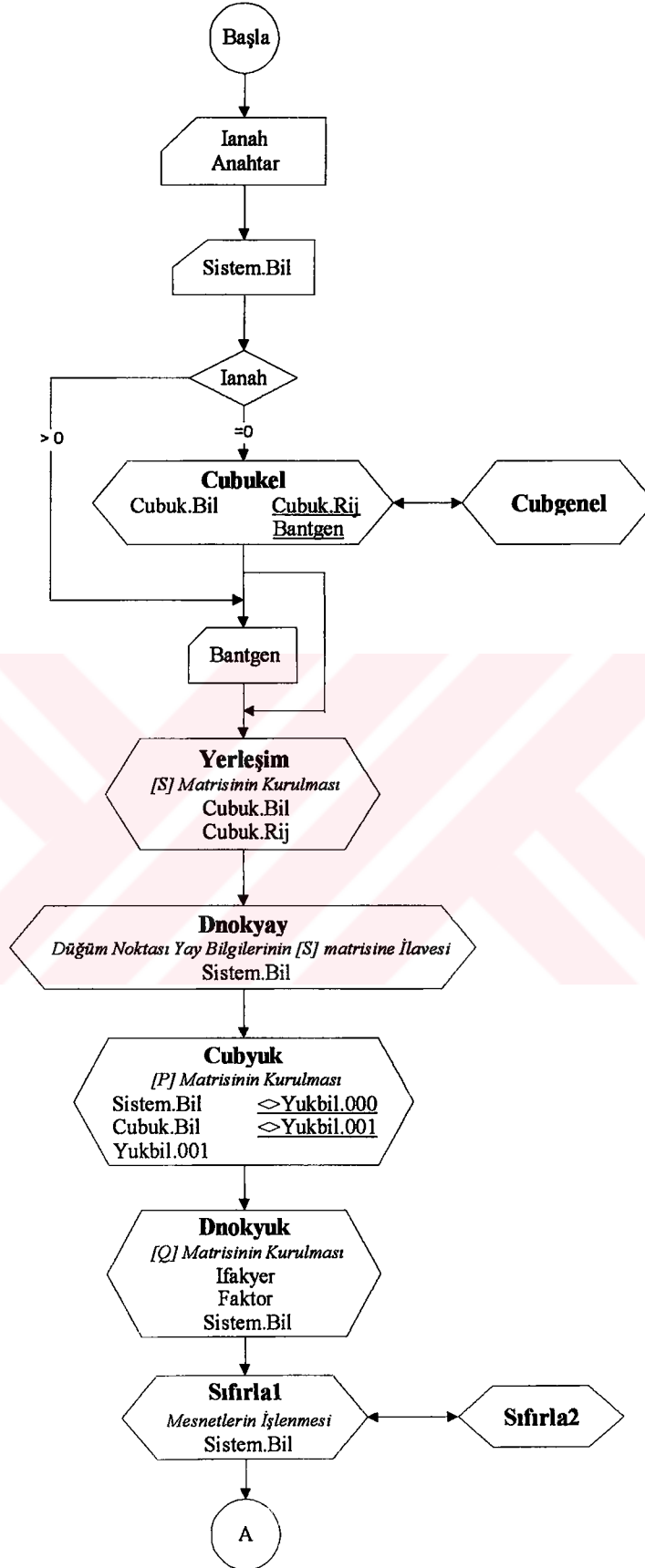
3 nolu maddede anlatıldığı şekilde belirlenen α_y, α_u yük çarpanlarına karşılık gelen yerdeğiştirmeler sırasıyla δ_y ve δ_u ise sistem genel süneklik oranı (2.33) bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

$$R_\delta = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (2.33)$$

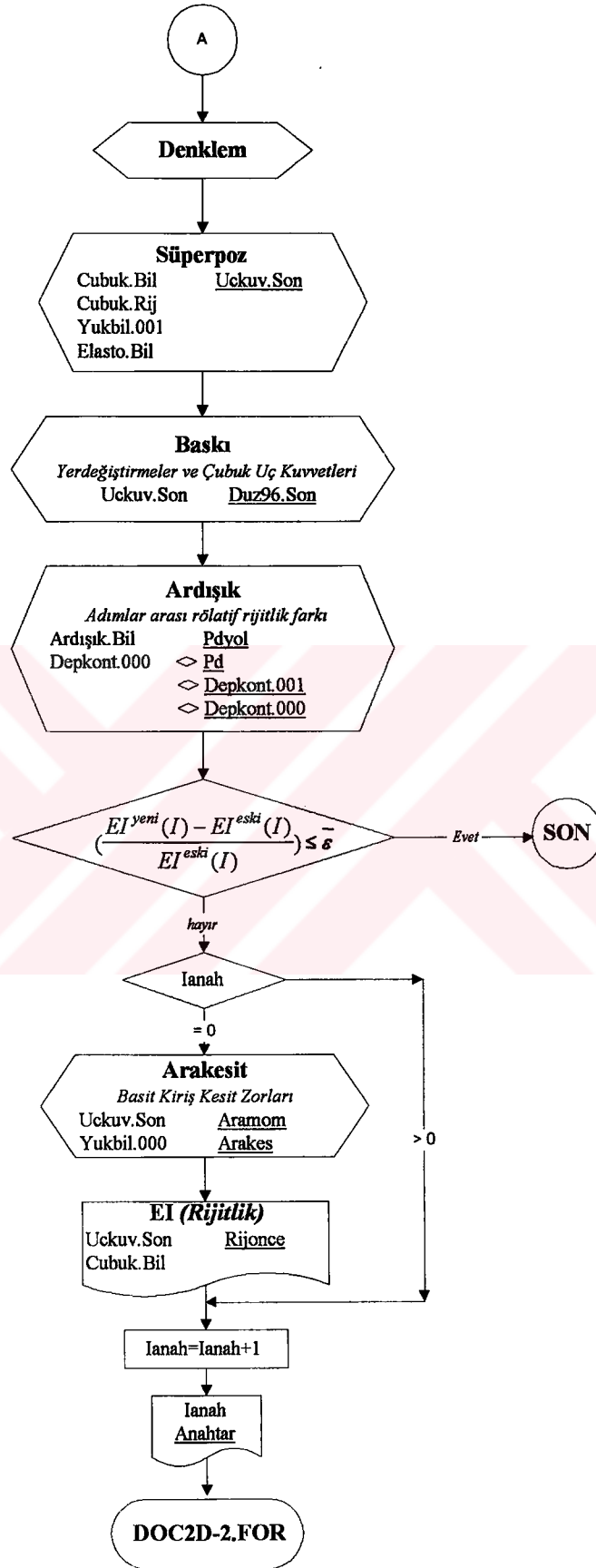
2.7 DÜZLEM SİSTEMLERDE HESAP SONUÇLARININ GRAFİK ORTAMDA İZLENMESİ İÇİN GELİŞTİRİLEN PROGRAM, DUZ-GRF

Üç boyutlu yapıdan çıkarılmış bir düzlem alt sistemde gerek hazırlanan veri dosyalarını kontrol etmek, gerekse hesaplanan bazı büyüklükleri bilgisayar ekranında grafik olarak izlemek üzere bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. **DUZ-GRF** isimindeki program, *BASIC 7* dilinde kodlanmıştır.

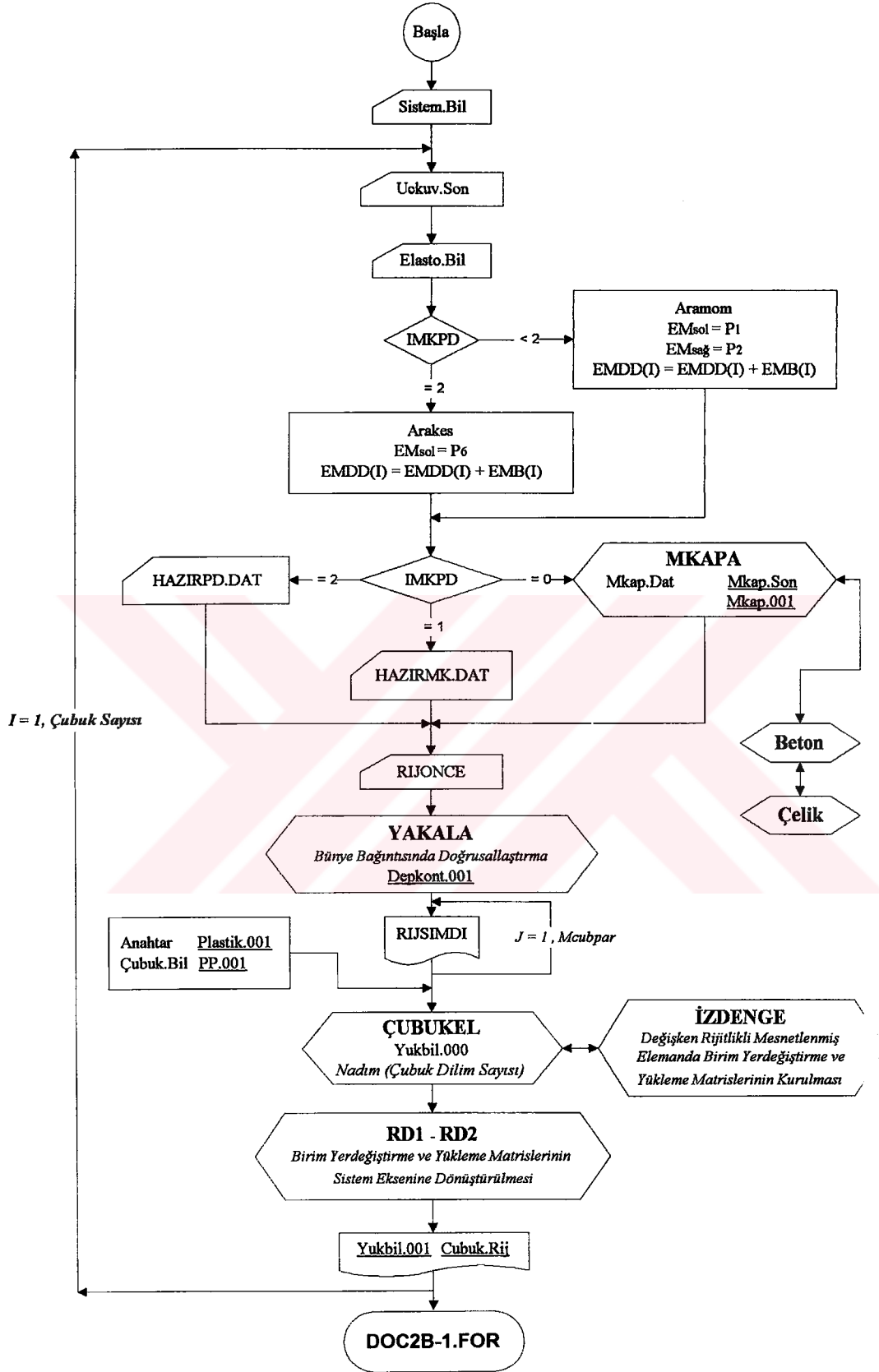
İcra edildiğinde bir menü ile ekrana gelen program üç farklı imkan sunmaktadır. Bunlar; sistem geometrisinin çizimi, hesaplanan bir büyüklüğün sistemin tümünde ya



Şekil 2.19 DOC2B-1 Programı Genel Akış Diyagramı



Şekil 2.19 DOC2B-1 Programı Genel Akış Diyagramı (Devam)



Şekil 2.20 DOC2B-2 Programı Genel Akış Diyagramı

da istenen bir bölgesinde büyütülerek çizdirilmesi şeklinde sıralanabilir. Çizdirilebilen büyüklükler moment diyagramı, eğrilik diyagramı, sanal rijitlik diyagramı ile χ / χ_y ve χ / χ_u oranlarını gösteren diyagramlardır.

Seçilen bir değer esas alınıp, bu değer %25 lik alt dilimlerinde farklı renkler kullanılarak sonuçların izlenmesi kolaylaştırılmıştır.

DUZ-GRF programıyla üretilen bazı grafikler, örnekler bölümünde verilmektedir.

2.8 DÜZLEM SİSTEMLERDE UYGULAMALAR

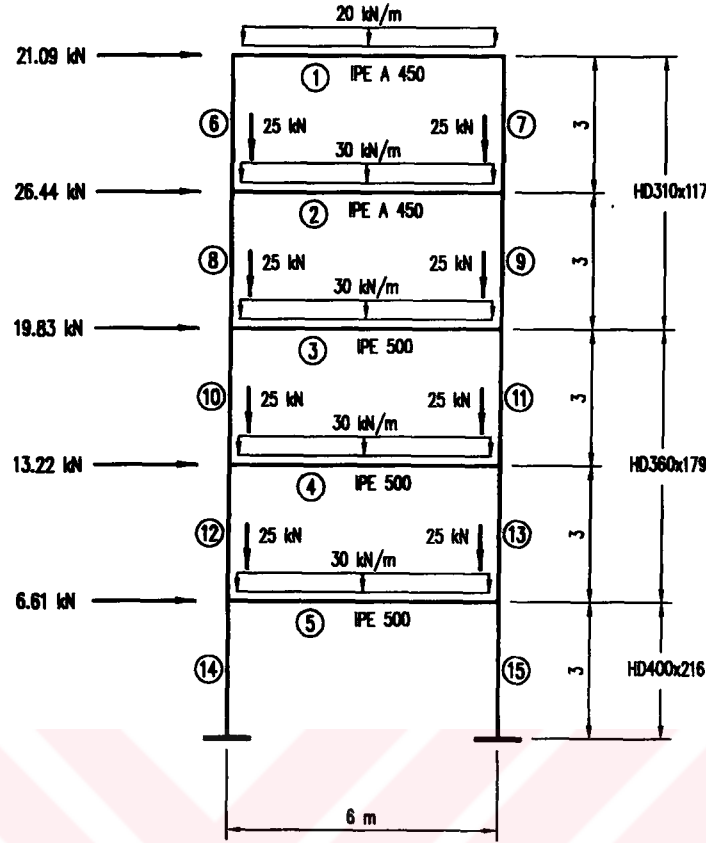
Bu bölümde, geliştirilen programlar ile çözümlenen dört yapı sisteminde elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. İlk örnek beş katlı çelik düzlem çerçevedir. Geliştirilen algoritmanın kontrolüne yönelik olarak hazırlanmıştır. İki ve üç numaralı örneklerde, kuramsal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır. Dört numaralı örnek ise prototip bir çerçevede bazı deneysel sonuçların kullanımını örneklemek ve güçlendirme perdesi oluşturulması sırasındaki yaklaşımı tartışmak için hazırlanmıştır.

2.8.1 Örnek 2D-1 Beş Katlı Çelik Çerçeve

Beş katlı çelik bir düzlem çerçevenin, sabit düşey ve artan yatay yükler etkisinde doğrusal olmayan çözümlemesinin yapıldığı bu örnek [26] nolu çalışmadan alınmıştır. İncelenen yapının geometrisi, işletme yükleri ve kesit özellikleri Şekil 2.21 de, kullanılan çelik kesitlere ait mekanik özellikler de Tablo 2.1 de verilmektedir.

Çelik kesitlerde kullanılan bünye bağıntıları Şekil 2.22 de görülmektedir. Kolonlarda, eksenel kuvvetin moment-eğrilik ilişkisi üzerindeki etkisi terkedilmiştir.

Geometri ve yükleri tanımlanan düzlem çerçeve, sabit düşey ve artan yatay yükler etkisinde birinci mertebe teorisi kullanılarak başka algoritmalarla da çözülmüştür.



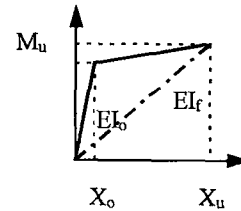
Şekil 2.21 Beş Katlı Çelik Düzlem Çerçeve

Tablo 2.1 Çelik Kesitlere Ait Mekanik Özellikler

St I Çeliği, $\sigma_{akma} = 240000 \text{ kN/m}^2$

KESİT	A (cm ²)	I (cm ⁴)	EL _o [kNm ²]	X _o [1/m]	M _u [kNm]	EL _f (α=0.115)
IPE A 450	85.6	29760.0	62496.0	0.005737	358.6	3120.0
IPE 500	116.0	48200.0	101220.0	0.005200	526.6	4580.0
HD310X117	149.0	27310.0	57351.0	0.008095	464.3	4040.0
HD360X179	228.0	57480.0	120708.0	0.006928	836.3	7270.0
HD400X216	275.0	70810.0	148701.0	0.006845	1018.0	8850.0

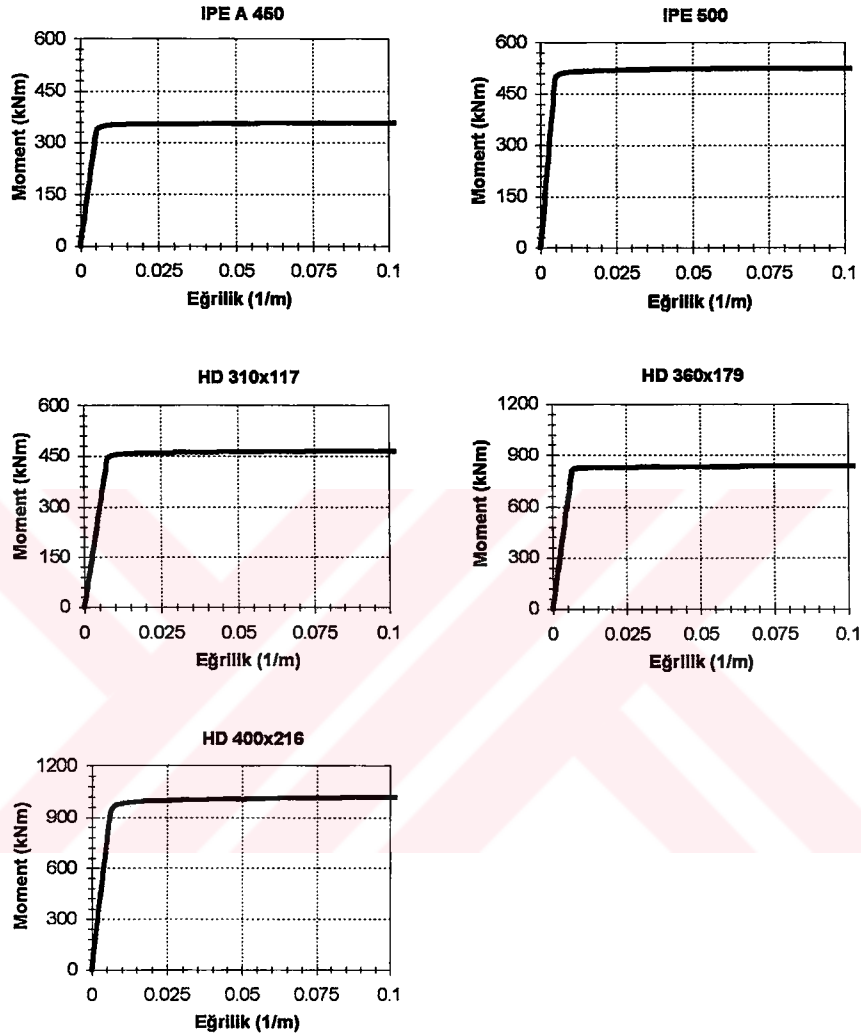
E=210,000,000. kN/m²



[25] nolu çalışmada geliştirilen programla, ideal elastoplastik malzeme kabulü ve plastik kesit kavramı kullanılarak çözüm yapılmış ve yatay yük çarpanının 7.169 'a eşit olması durumunda sistemin mekanizma durumuna geldiği belirtilmiştir.

[26] nolu çalışmada ise yayılı doğrusal olmayan şekildeğiştirme durumu esas alınmış, bünye bağıntılarının doğrusallaştırılması için de teğet yöntemi kullanılmıştır. Ulaşılan sonuçların [25] ile karşılaştırılması amaçlandığından, kesitte dönme miktarı

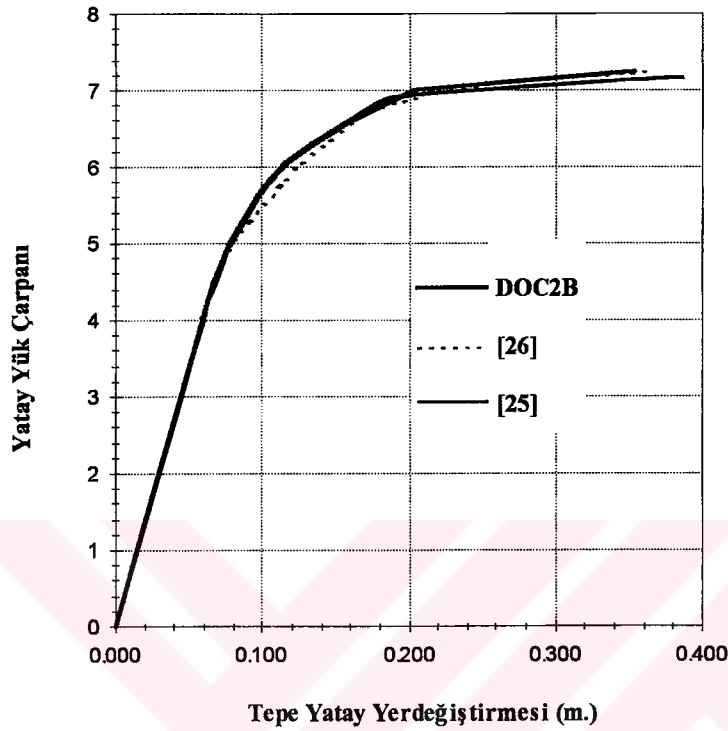
sınırlandırılmamıştır. Göçme yükü seviyesinin belirlenmesi için çerçevenin birinci serbest titreşim periyodundaki değişime bakılmış ve en büyük yatay yük çarpanı olarak 7.25 değeri verilmiştir.



Şekil 2.22 Çelik Kesitlerde Eğilme Momenti-Eğrilik İlişkileri

DOC2B programıyla yapılan çözümlemede, diğer çalışmalarda üretilen sonuçlarla karşılaştırma yapabilmek amacıyla benzer yatay yük çarpanları kullanılmıştır. Çözüm yapılan en büyük yatay yük çarpanı 7.25 dir. Kesitlerde dönme kapasitesi sınırlandırılmadığı için teorik olarak daha büyük yatay yük çarpanlarına gidilebilir. Ancak bu durumda, yatay yük çarpanında yapılan küçük artımlar yerdeğiştirmelerde büyük artışlara sebep olmaktadır.

Her üç algoritma ile elde edilen yatay yük çarpanı - tepe yerdeğiştirmesi eğrileri Şekil 2.23 de verilmiştir. Sonuçların çok yakın olduğu gözlenmektedir.



Şekil 2.23 Beş Katlı Çelik Çerçeve Üç Algoritmanın Sonuçlarının Karşılaştırılması

DOC2B programında bünye bağıntısının doğrusallaştırılması için başlangıç kirişi yöntemi kullanıldığından, çok düşük eğimli akma platosu bölgesinde ardışık yaklaşımın yakınsamasıyla ilgili bir sorunla karşılaşmamıştır. Ancak bu bölgede yakınsama hızı düşmektedir.

Şekil 2.23 de verilen eğriye ulaşmak için sistemin tüm çubukları 100 adet sanal alt parçaya bölünmüştür. Mesnetlenmiş elemanda dönme ve çökme ardışık başvuru bağıntıları 400 adet ara noktada yazılmıştır. Ardışık yaklaşımın durdurulması için öngörülen rijitlik yaklaşım değeri ise %1 dir.

Bu değişkenlerin sonuçlar üzerindeki etkisini anlamak üzere üç farklı yatay yük çarpanı için, sözkonusu büyüklüklere değişen değerler verilerek hesap yapılmıştır. Bu çözümlerde, sistem davranışını temsil eden tepe yerdeğiştirmesinin aldığı değerler Tablo 2.2 de topluca verilmektedir.

Tablo 2.2 Bazı Büyüklüklerin Sistem Davranışı Üzerindeki Etkileri

Yatay Yük Çarpanı	Dilim Sayısı		Nokta	Rijitlik	Ardışık Yak.	Tepe
	Kolon	Kiriş	Sayısı	Yaklaşım	Sayısı	Yerdeğ. [m]
5	10	20	400	0.010	15	0.076079
	20	50	400	0.010	32	0.077484
	20	100	400	0.010	43	0.077989
	100	100	400	0.010	43	0.077989
	100	200	400	0.010	67	0.078387
	400	400	400	0.010	72	0.078474
	100	100	100	0.010	49	0.077909
	100	100	100	0.050	13	0.076633
	100	100	100	0.025	25	0.077361
	100	100	100	0.010	23	0.105016
6	20	50	400	0.010	56	0.111460
	20	100	400	0.010	101	0.113412
	100	100	400	0.010	101	0.113412
	100	200	400	0.010	115	0.113971
	400	400	400	0.010	120	0.114254
	100	100	100	0.010	78	0.112360
	100	100	100	0.050	24	0.108478
	100	100	100	0.025	49	0.111503
	10	20	400	0.010	40	0.175043
	20	50	400	0.010	79	0.189777
7	20	100	400	0.010	149	0.198454
	100	100	400	0.010	148	0.201270
	100	200	400	0.010	158	0.205537
	400	400	400	0.010	163	0.206946
	100	100	100	0.010	158	0.199834
	100	100	100	0.050	34	0.183888
	100	100	100	0.025	74	0.192245

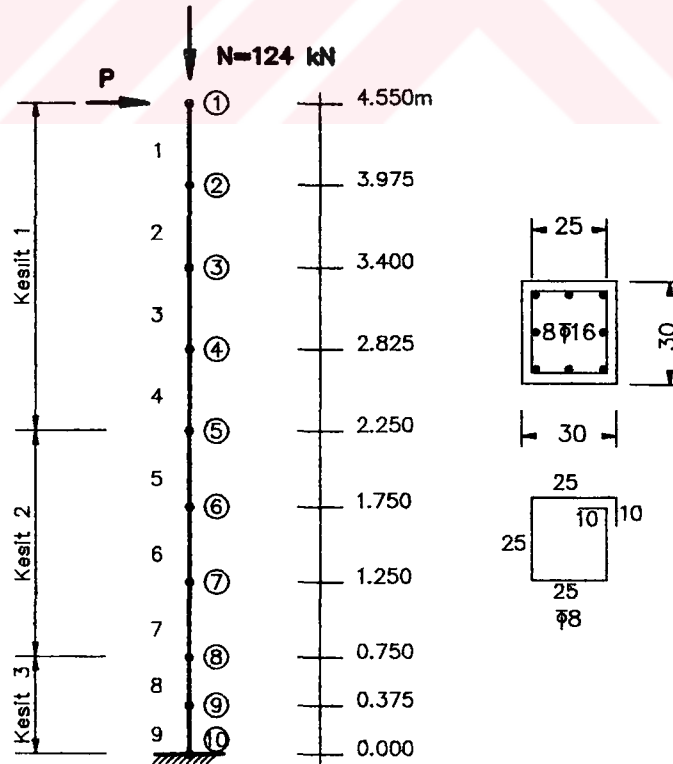
Şekil 2.23 de verilen diyagramın doğrusal bölgesine karşı gelen 5 yatay yük çarpanı için, sözkonusu değişkenlere küçük değerler verilebileceği; akma bölgesine karşı gelen 7 yatay yük çarpanı içinse özellikle çubuk sanal dilim sayısının artırılması gerektiği söylenebilir.

Yapılan hesap sonucunda kalıcı şekildeğiştirmelerin 2,3,4,5 nolu kiriş uçları ile 14 ve 15 numaralı kolonların alt kesitlerinde yoğunlaştığı görülmüştür.

2.8.2 Örnek 2D-2 Betonarme Kolon

Bileşik eğilme etkisindeki bir betonarme kolonda, doğrusal olmayan hesaplarda elde edilen davranışın deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılması örneğin amacını teşkil etmektedir. Bu işlem için, EK A da sunulan deneysel çalışmanın sonuçları kullanılmaktadır.

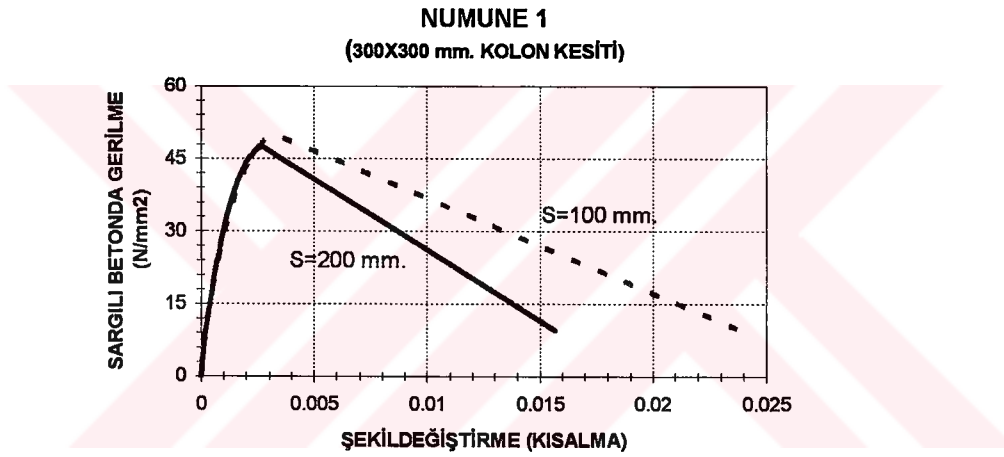
İncelenen sistem 30x30 cm. lik kolon ve 85x85 cm. lik temel gövde kesitini içermektedir, Şekil A.1. Kolonda boyuna donatılar sürekli olup enine donatı aralıkları temel üst kotundan itibaren 150 cm. lik bölgede 10 cm., geri kalan bölgede ise 20 cm. dir. Bu özelliklere uygun olarak hazırlanan mekanik model Şekil 2.24 de verilmektedir. Oluşturulan modelin düğüm noktalarında dönme, yatay ve düşey doğrusal yerdeğiştirme olmak üzere toplam üç adet bilinmeyen mevcuttur. Sistem temel gövdesi alt kotu hizasından dış ortama ankastre olarak bağlanmıştır. Modelin #1 numaralı düğüm noktasına, $N=124$ kN luk düşey kuvvet ile şiddeti tek yönlü olarak artırılan P yatay kuvveti etkililmektedir.



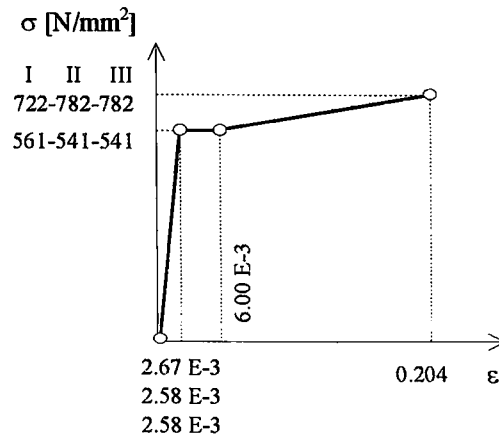
Şekil 2.24 Betonarme Kolon İçin Oluşturulan Mekanik Model

Deneysel bölümde üç adet numune incelenmiştir. Numunelerin geometrik özellikleri aynı olmakla beraber, malzeme özelliklerinde bir miktar farklılık vardır, Tablo A.1.

Sarılmış betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi, detayları Bölüm 1.2.4 de verilen *Saatçioğlu-Razvi Modeli* kullanılarak hesaplanmıştır. İki farklı enine donatı aralığı için hazırlanan diyagramlar Şekil 2.25 de verilmektedir. Sargısız betonun basınç dayanımı boyut etkisini dikkate almak amacıyla 0.85 katsayısıyla küçültülmüştür. Boyuna donatılar için oluşturulan davranış modeli de numune numaralarıyla birlikte Şekil 2.26 da verilmektedir. Beton ile donatı arasındaki kenetlenmenin tam olduğu varsayılmıştır.

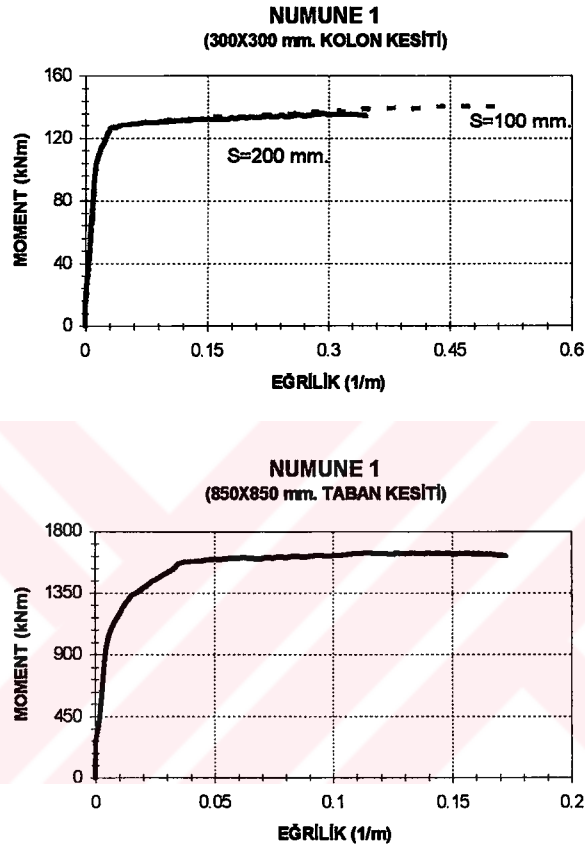


Şekil 2.25 Sarılmış Betonda Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 2.26 Boyuna Donatı İçin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi

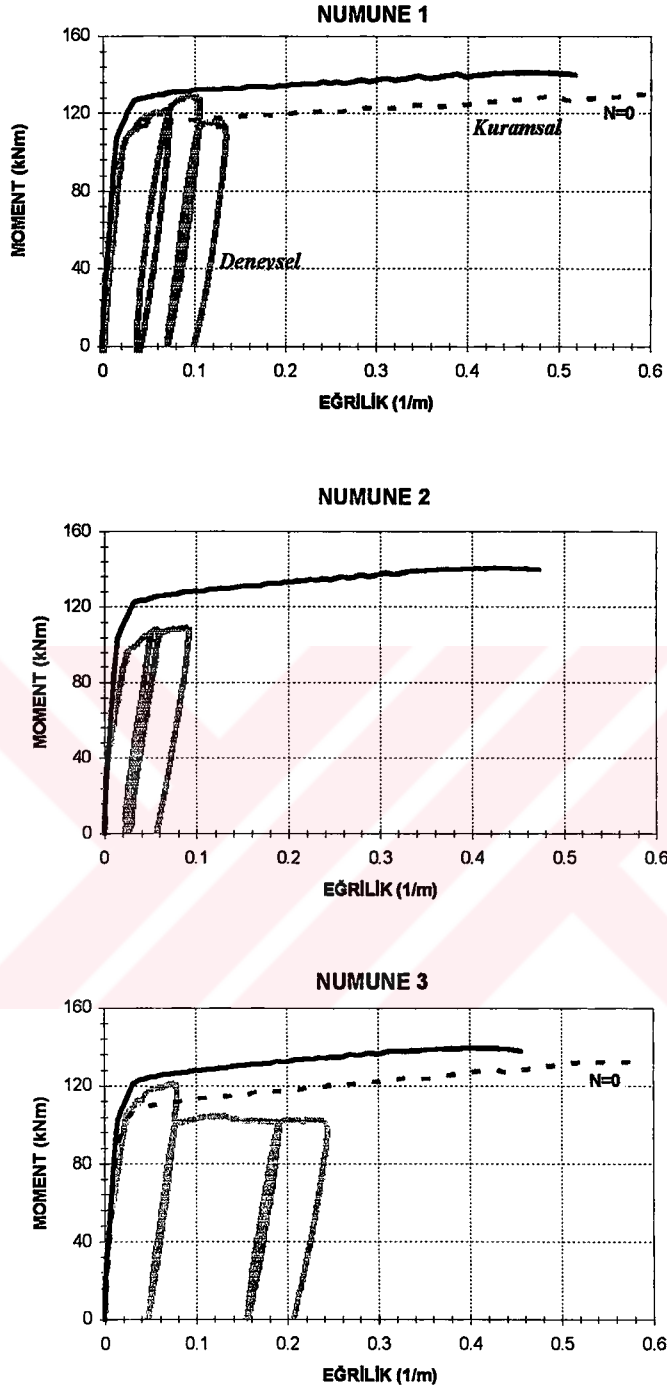
Bu malzeme modelleri kullanılarak, **M-KAPA** programı ile moment-eğrilik ilişkileri oluşturulmuştur. Şekil 2.27 de, Numune 1 in tüm farklı kesitleri için elde edilen moment-eğrilik ilişkileri gösterilmektedir.



Şekil 2.27 Numune 1 İçin Moment-Eğrilik İlişkileri

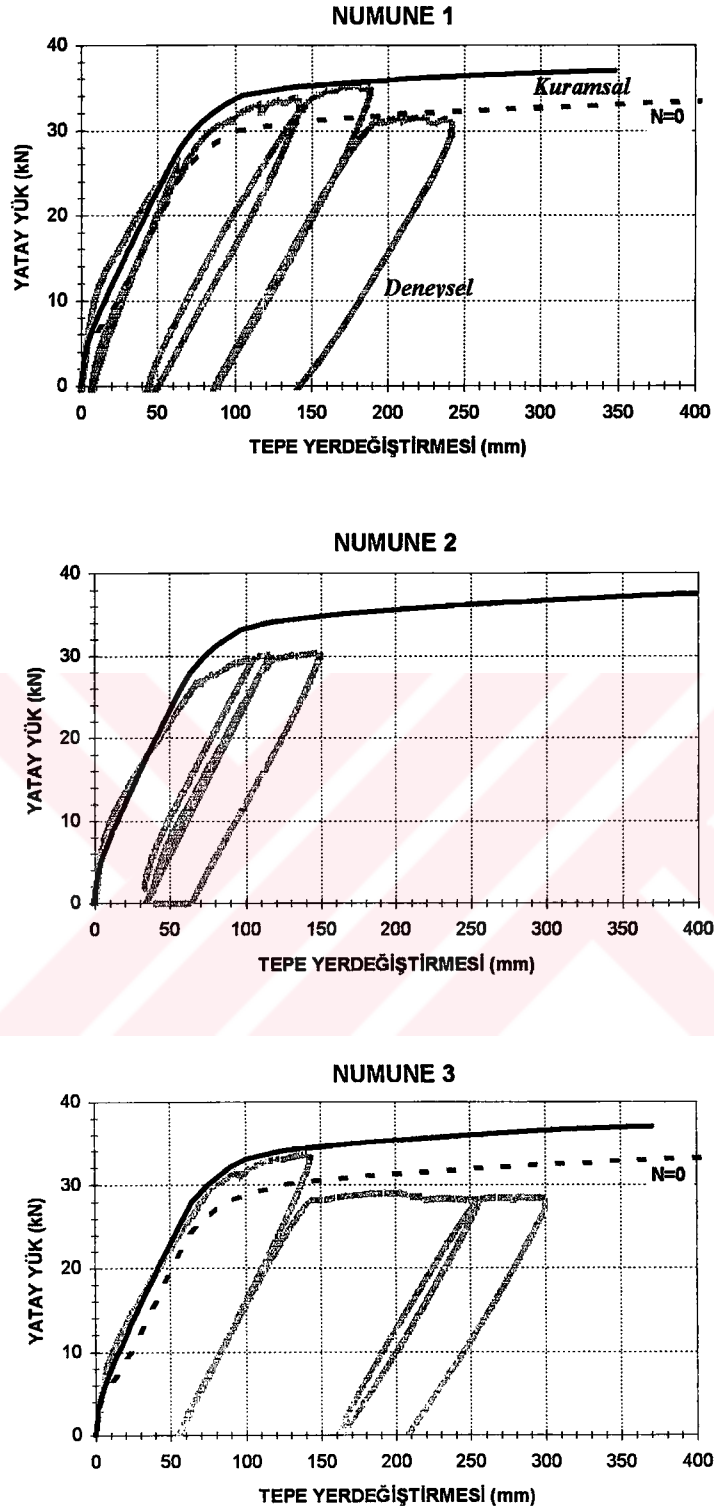
Kolon alt ucundaki 240 mm. lik bölgede, ölçülen ortalama şekildeğiştirmelerden hareketle elde edilen deneysel moment-eğrilik ilişkileri, bu bölge için kuramsal olarak oluşturulan moment eğrilik ilişkileriyle birlikte Şekil 2.28 de verilmektedir. Deneysel moment-eğrilik ilişkisinin oluşturulmasıyla ilgili detaylar Ek A da yer almaktadır.

Deneysel çalışmada; Numune 1'in 3. yük çevriminde, Numune 3'ün ise 2. ve 3. yük çevrimlerinde normal kuvvet kullanılmamıştır. Karşılaştırma yapabilmek amacıyla, normal kuvvetin sıfır olduğu durumdaki kuramsal moment-eğrilik ilişkileri de oluşturulup Şekil 2.28 de verilmiştir.



Şekil 2.28 Deneysel ve Kuramsal Moment Eğrilik İlişkilerinin Karşılaştırılması

DOC2B programıyla elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi ilişkileri, deneysel çalışma sonuçlarıyla birlikte Şekil 2.29 da yer almaktadır. 1 ve 3 nolu numunelerde, $N=0$ durumu için de kuramsal hesap yapılmıştır.



Şekil 2.29 Deneysel ve Kuramsal Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkileri

Doğrusal olmayan hesapta, sistemin tüm çubukları 25 sanal alt parçaya bölünmüştür. Ardışık başvuru bağıntılarının yazılması için her çubukta 400 nokta kullanılmıştır.

Ardışık yaklaşımın durdurulması için öngörülen rijitlik yaklaşımı değeri, $\bar{\varepsilon}$, %1 olarak seçilmiştir.

Şekil 2.29 dan izlendiği gibi, normal kuvvetin olması ve olmaması durumlarında da geçerli olmak üzere deneysel ve kuramsal sonuçlar arasında uyum vardır.

Deneysel çalışmada, Şekil 2.29 da verilen yerdeğiştirme seviyelerine gelindiğinde kalıcı şekildeğiştirmelerin kolon alt ucunda yaklaşık 35 cm. lik bölgede toplandığı görülmüştür. Çekme bölgesinde yatay konumlu çatlaklar mevcuttur. Ölçülen en büyük çatlak genişlikleri; Numune 1 de 2.2 mm., Numune 2 de 2.0 mm., Numune 3 de ise 4.5 mm. dir, [33]. Deneysel çalışma bu aşamada durdurulmuş olmakla birlikte, numunelerin genel durumu daha büyük yerdeğiştirme seviyelerine gidilebileceğini göstermektedir.

Doğrusal olmayan hesapla elde edilen χ/χ_u eğrilik oranı diyagramı Şekil 2.30 da verilmektedir.



Şekil 2.30 Konsol Kolonda Kuramsal Eğrilik Dağılımı

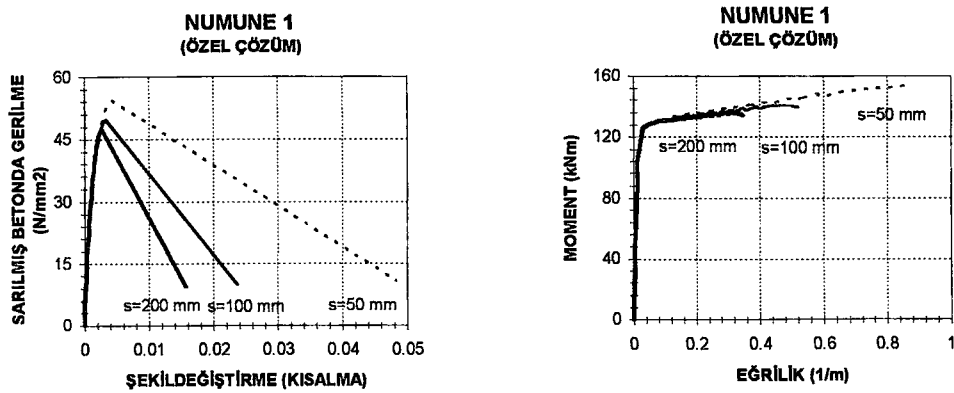
DUZ-GRF programı ile oluşturulan diyagram, her kesitteki χ eğriliğinin o kesit için öngörülen en büyük eğrilik χ_u ya oranlanmasıyla elde edilmiştir. Yatay yükün şiddeti 37.3 kN a eriştiğinde, kolon taban kesitinde χ/χ_u oranı %100 olmuştur.

Tanımları (2.6) ve (2.33) bağıntılarıyla yapılmış olan kesit dönme ve sistem yerdeğiştirme süneklik oranlarının aldığı değerler, Tablo 2.3 de özetlenmiştir. Tablodaki deneysel sonuçlar, deneyin durdurulduğu yerdeğiştirme seviyesindeki durumu yansıtmaktadır, [33].

Tablo 2.3 Örnek 2D-2 Betonarme Kolonda Süneklik Oranları

Numune	Kesit	Kuramsal R_θ	Kuramsal R_δ	Deneysel R_δ
1	1	24.56	6.06	4.30
	2	36.73		
2	1	23.00	7.09	3.60
	2	34.23		
3	1	21.62	6.30	6.30
	2	32.69		

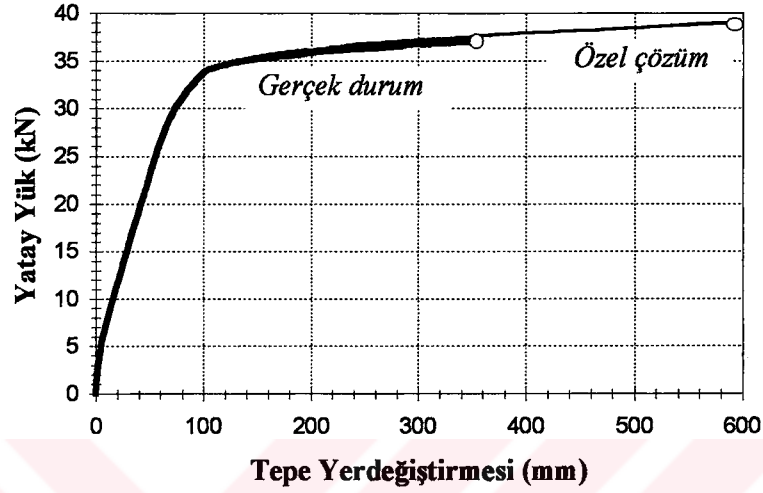
Genel sistem sünekliğinin iyileştirilmesi için alınabilecek önlemlerden birisi, hacimsel enine donatı oranının artırılmasıdır. Bu durumu örneklemek üzere, Numune 1 de Kesit 2 nin geçerli olduğu bölgede, Şekil 2.24, enine donatı aralığı 50 mm. ye düşürülmüştür. Hacimsel enine donatı oranındaki bu artışın sarılmış beton gerilme-şekildeğiştirme ve kesit moment-eğrilik ilişkileri üzerindeki etkisi, diğer enine donatı oranları için hazırlanan eğrilerle birlikte, Şekil 2.31a da verilmektedir.



Şekil 2.31a Hacimsel Enine Donatı Oranındaki Artışın Kesit Davranışı Üzerindeki Etkisi:

Enine donatı aralığının 50 mm. ye düşürüldüğü kesitte, ulaşılan kesit süneklik oranı 63.04 olmuştur.

Enine donatı aralığının küçültüldüğü sistemde, doğrusal olmayan hesapla ulaşılan yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi Şekil 2.31b de verilmiştir. Ulaşılan yerdeğiştirme süneklilik oranı 10.31 olmuştur.



Şekil 2.31b Hacimsel Enine Donatı Oranındaki Artışın Sistem Davranışı Üzerindeki Etkisi

2.8.3 Örnek2D-3 Betonarme Düzlem Çerçeve

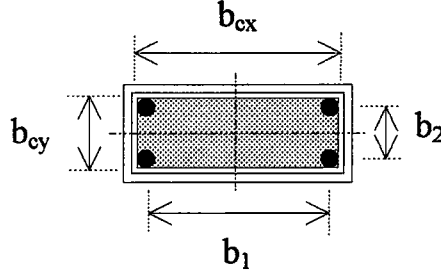
Çalışmanın deneysel bölümünde üretilen betonarme bir düzlem çerçevenin kuramsal olarak incelenmesi, örneğin içeriğini oluşturmaktadır. Deneysel çalışmaya ait ayrıntılı bilgi EK C de verilmiştir.

Deneysel çalışmada düşük hızda yerdeğiştirme kontrollü olarak tersinir yatay yüklemeye maruz bırakılan çerçeve, kuramsal çalışmada tek yönlü artan yatay yük etkisinde incelenmektedir.

Söz konusu çerçeve, bir prototip yapının 1/2 ölçeğinde küçültülmesiyle elde edilmiş olup kolon boyutları 20x25 cm., kiriş boyutu ise 20x32.5 cm. dir. Sistemin genel boyutları ve donatı yerleşim detayları Şekil C.4 de verilmiştir.

Numunede kullanılan betonun ortalama basınç dayanımı 16.4 N/mm^2 dir. Sarılmış beton gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin belirlenmesi aşamasında boyut etkisini dikkate

alabilmek için, beton silindir basınç dayanımı 0.85 küçültme katsayısı kullanılarak 13.94 N/mm^2 ye düşürülmüştür. Saatçioğlu-Razvi modelinin oluşturulması aşamasında kullanılan bazı geometrik büyüklükler, Şekil 2.32 de gösterilmiştir.



Şekil 2.32 Sarılmış Beton Kesite Ait Geometrik Büyüklükler

Kolon kesitleri için,

$b_{cx} = 224 \text{ mm}$, $b_{cy} = 174 \text{ mm}$, $b_1 = 202 \text{ mm}$ ve $b_2 = 152 \text{ mm}$

Kiriş kesitleri için,

$b_{cx} = 174 \text{ mm}$, $b_{cy} = 304 \text{ mm}$, $b_1 = 152 \text{ mm}$ ve $b_2 = 282 \text{ mm}$

olmaktadır.

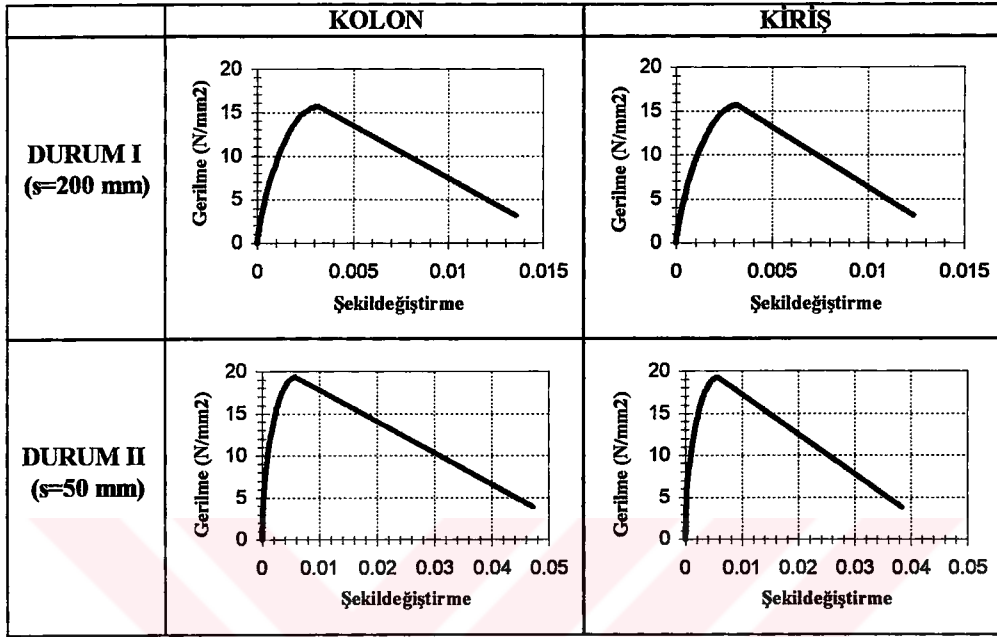
Kolon üst kesitlerinde pilye uzantısının, kiriş kesitlerinde ise tablanın sarılma üzerindeki etkisi terkedilmiştir.

Saatçioğlu-Razvi Modeliyle oluşturulan sarılmış beton gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 2.33 de verilmektedir. Şekil 2.33 de belirtilen *Durum I*, deneysel çalışmada olduğu gibi tüm elemanlarda enine donatı aralığının 200 mm. olması, *Durum II* ise enine donatı aralığının tüm sistemde 50 mm. ye indirilmesi hallerine karşı gelmektedir.

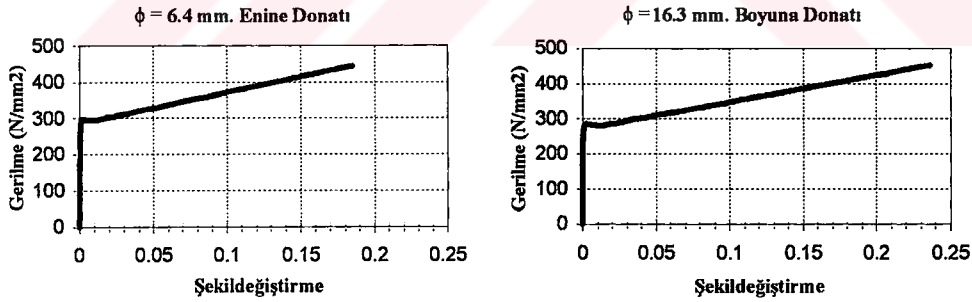
Enine ve boyuna donatılar için deneysel çalışmayla elde edilen davranış modelleri de Şekil 2.34 de yer almaktadır.

Sistemin doğrusal olmayan hesabı için hazırlanan mekanik model Şekil 2.35 de verilmiştir. Ara düğüm noktalarının yerleri; kirişte, pilye ortalama kırılma noktasına, kolonlarda ise öngörülen pilye kolu çalışma yüksekliğine göre ayarlanmıştır. Sistemde

eleman zati ağırlıkları dışında, düşey yük bulunmamaktadır. Kiriş ve döşeme zati ağırlığını temsil eden yayılı yükün şiddeti $g=3.50$ kN/m dir.

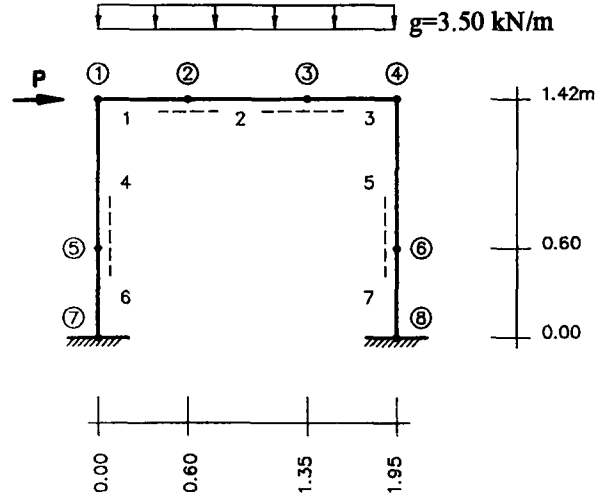


Şekil 2.33 Sarılmış Betonda Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

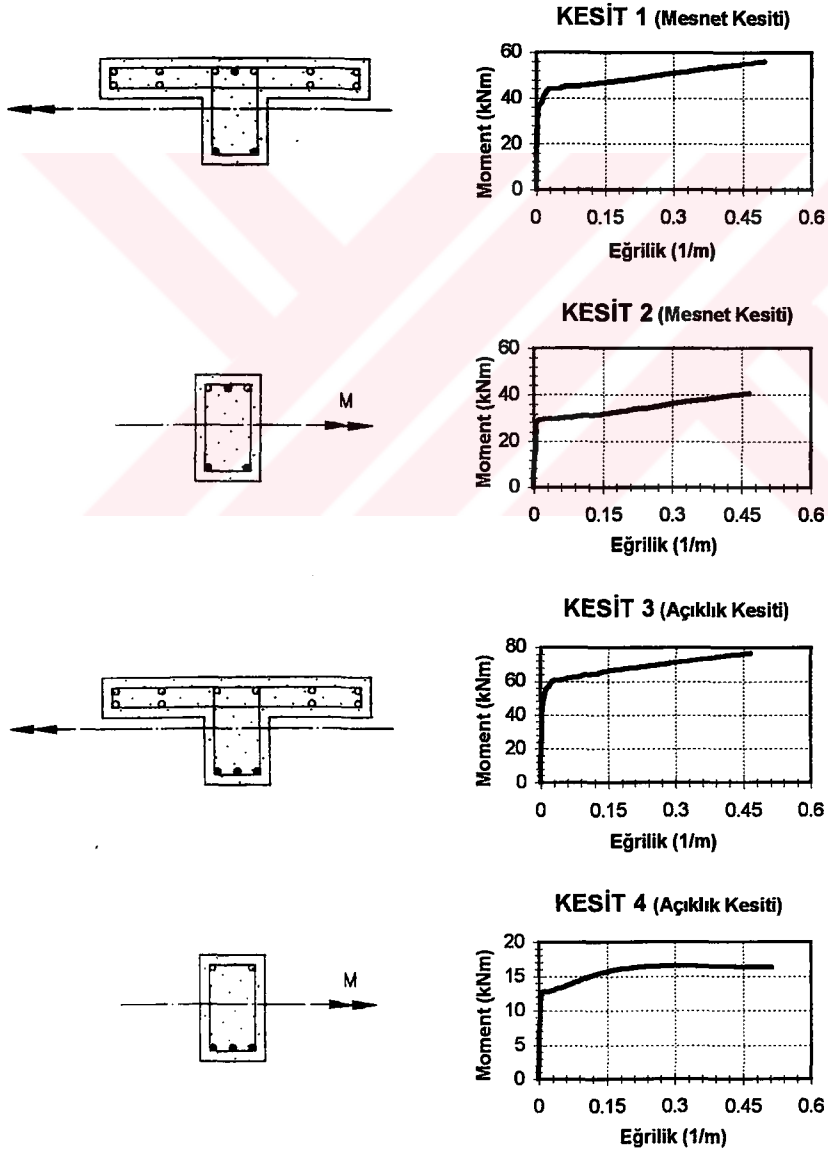


Şekil 2.34 Enine ve Boyuna Donatılar İçin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi

Sistemin malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışı 7 farklı moment-eğrilik ilişkisiyle temsil edilmektedir. Bunlardan 4 tanesi kirişe, 3 tanesi ise kolonlara aittir. Kiriş pozitif moment için tablalı, negatif moment içinse dikdörtgen kesit olarak idealleştirilmiştir. Oluşturulan moment-eğrilik ilişkileri Şekil 2.36 da verilmektedir.



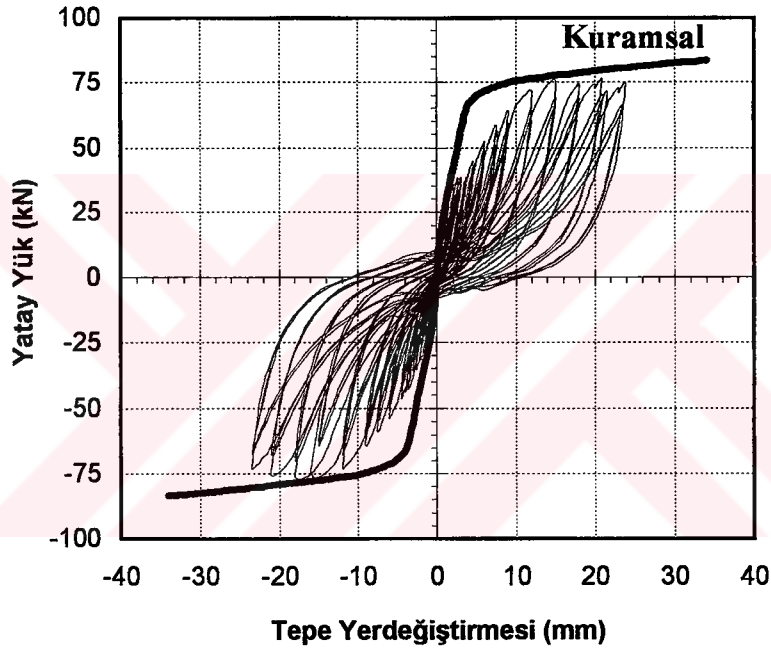
Şekil 2.35 Örnek2D-3 Betonarme Çerçeve Mekanik Modeli



Şekil 2.36 Moment-Eğrilik İlişkileri

Ardışık başvuru bağıntıları çubuklar üzerinde 100 adet noktada yazılmıştır. Herhangi bir yük düzeyi için, ardışık adımlar arasında sanal parça rijitliklerindeki değişim %1 in altına düşene kadar hesap tekrarlanmıştır. Kolon kesitlerinde ardışık yaklaşımın bir önceki adımında elde edilen eksenel kuvvet değerleri esas alınarak moment-eğrilik ilişkileri oluşturulmuştur.

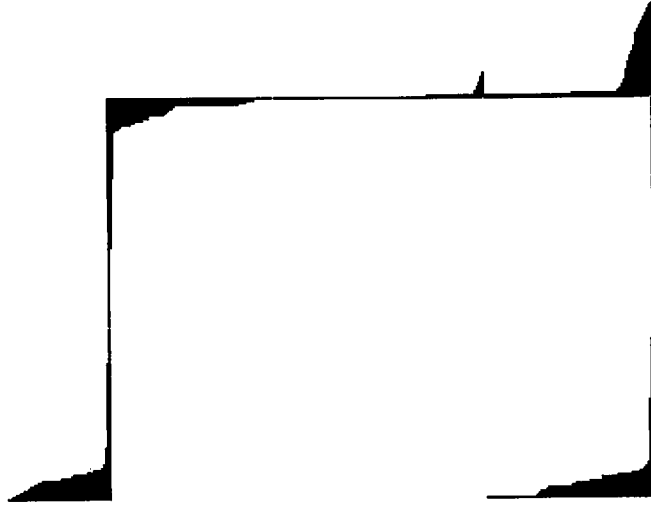
Kuramsal hesaplara ulaşılan yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi, deneysel çalışma sonucuyla birlikte Şekil 2.37 de verilmektedir.



Şekil 2.37 Kuramsal ve Deneysel Yatay Yük - Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkileri

Şekil 2.37 de, deneysel çalışmaya ait grafiğin son noktalarına sağ kolon alt ucunda eğilmeden kaymaya dönüşen bir çatlağın büyümesiyle, Şekil C.7 ve Şekil C.21c, kuramsal eğrinin uç noktalarına ise sağ kolon alt ucunda *Saatçioğlu-Razvi Modelinde* öngörülen en büyük beton şekildeğiştirmesine gelinmesiyle erişilmiştir.

DUZ-GRF programıyla oluşturulan χ/χ_u diyagramı Şekil 2.38 de verilmiştir. Grafikten izlendiği gibi, en büyük oranlara sırasıyla sağ kolon alt ucu ve sol kolon üst ucunda erişilmektedir.

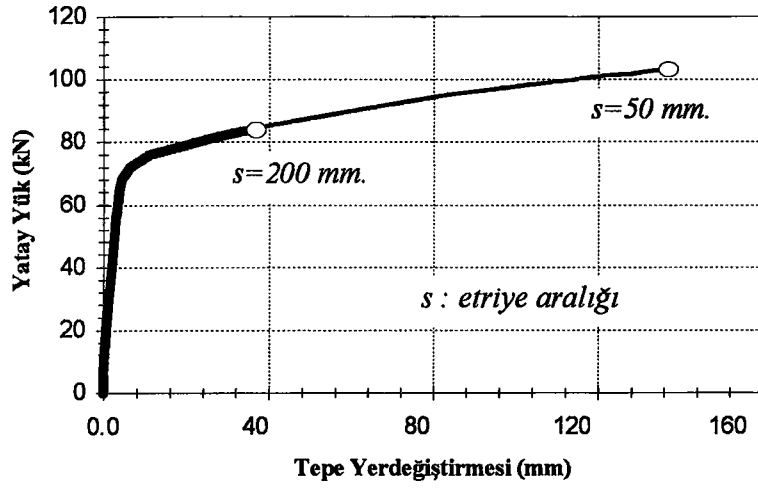


Şekil 2.38 Kuramsal χ/χ_u Dağılımı

Kuramsal hesapta beton ve donatı arasındaki kenetlenmenin tam olduğu varsayımının yapılması, bu örnekteki gibi yumuşak donatı kullanımı halinde deneysel ve kuramsal sonuçlar arasında beliren farkın önemli sebeplerinden biri olmaktadır. Ayrıca kuramsal hesabın tek yönlü artan yükleme için yapılması, tersinir yüklemeyle elde edilen deneysel dayanımdan daha büyük değerlere ulaşılmasının bir diğer sebebidir.

Hacimsel enine donatı oranında yapılan artırımın çerçeve sünekliği üzerindeki etkisini gözlemek üzere, sistemin tüm elemanlarında enine donatı aralığı 200 mm. den 50 mm. ye indirilerek hacimsel enine donatı oranı 4 kez büyütülmüştür. Bu değişimden sarılmış beton malzeme modellerinin nasıl etkilendiği, Şekil 2.33 de *Durum II* ye ayrılan bölümden görülmektedir. Enine donatı aralığının küçültüldüğü sistemde doğrusal olmayan hesapla elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi de Şekil 2.39 da verilmektedir.

Sistemin yedi kesitinde iki farklı enine donatı aralığı için, (2.6) bağıntısıyla hesaplanan dönme süneklik oranları Tablo 2.4 de verilmektedir. Enine donatı aralığının 200 mm. olması durumunda **11.35**, 50 mm. olması durumunda ise **46.81** yerdeğiştirme süneklik oranlarına erişilmiştir. Bu değerler de (2.33) bağıntısı ile hesaplanmıştır.

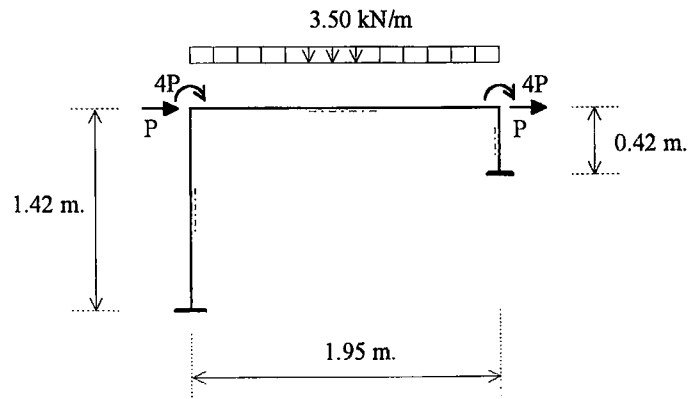


Şekil 2.39 Hacimsel Enine Donatı Oranındaki Artışın P- δ İlişkisi Üzerindeki Etkisi

Tablo 2.4 Açısal Süneklik Oranları

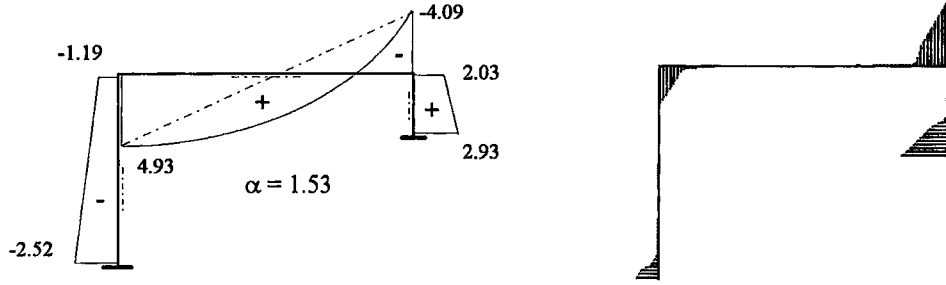
Kesit No	Enine Donatı Aralığı	
	$s=200 \text{ mm}$	$s=50 \text{ mm}$
1	92	157
2	75	135
3	82	150
4	97	158
5	56	129
6	60	134
7	32	90

İncelenen sistemde yapılan bazı değişikliklerle, Şekil 2.40 da verilen çerçeve elde edilmiştir. Kısaltılan sağ kolonda yeterli kayma dayanımının mevcut olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 2.40 Kısa Kolonlu Betonarme Düzlem Çerçeve

Şekil 2.41 den izlendiği gibi, kalıcı şekildeğiştirmeler elemanlar üzerinde geniş bölgelere yayılmaktadır. Geometri ve/veya yükleme şekli dolayısıyla ortaya çıkan böyle durumlarda, **DOC2B** programında uygulandığı gibi kalıcı şekildeğiştirmelerin iç kuvvet dağılımıyla ilişkili olarak sistem üzerinde yayılması yaklaşımına dayanan doğrusal olmayan hesap şekli önem kazanmaktadır.



Şekil 2.41 Kısa Kolonlu Betonarme Çerçeve M ve χ/χ_u Diyagramları

2.8.4 Örnek 2D-4 Beş Katlı Betonarme Düzlem Çerçeve

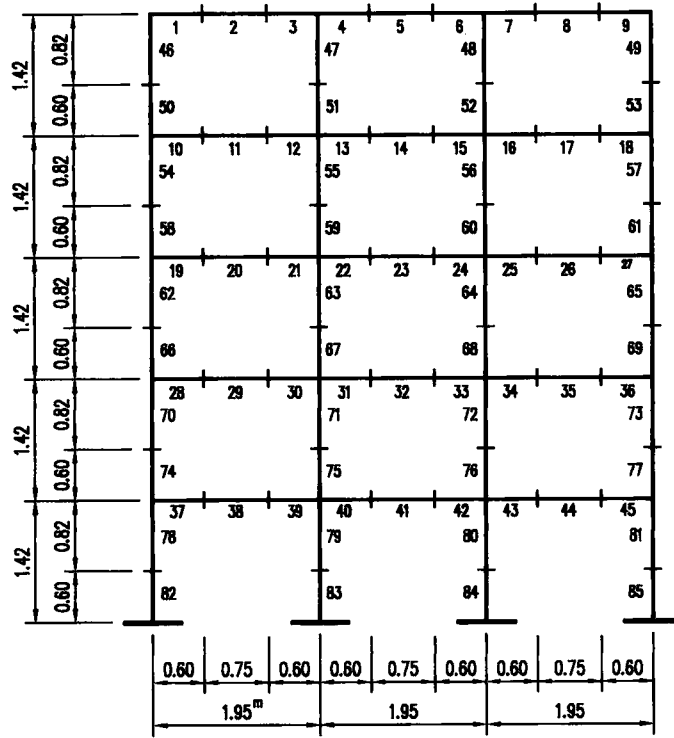
Çalışmanın deneysel bölümünde üretilen bazı sonuçların da kullanıldığı bu örnek, betonarme bir düzlem çerçevenin güçlendirme öncesi ve sonrasındaki davranışının karşılaştırılmasını amaçlamaktadır.

Üç açıklıklı ve beş katlı olan düzlem çerçeve, 1/2 ölçekli prototip bir yapıdır. Eleman boyutları ve bünye bağıntıları, *Örnek 2D-3* de incelenen sisteminki ile aynıdır.

Şekil 2.42 de sistemin çözümü için hazırlanan mekanik model görülmektedir. Sistem çubukları için geçerli olan bünye bağıntısı numaraları da Tablo 2.5 de verilmiştir. Bünye bağıntıları için Şekil 2.36 ya bakılmalıdır.

Yapılan çözümlerde, tüm kirişler üzerinde 50 kN/m lik yayılı düşey yük kullanılmıştır. Bu yüklemenden oluşan en büyük moment, ilgili kesitteki moment taşıma kapasitesinin yaklaşık %33 üne karşı gelmektedir.

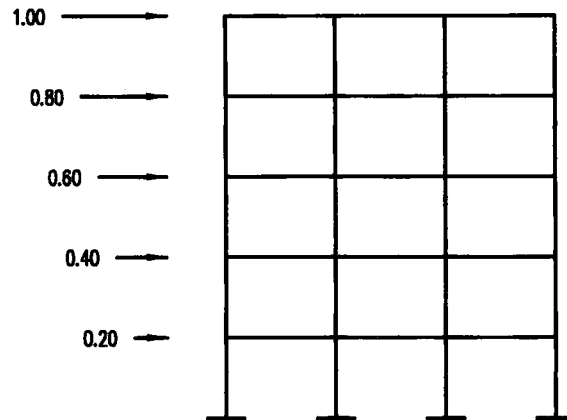
Yatay yükün katlar arasındaki dağılımı için, Şekil 2.43 de gösterilen birim dağılım oranı esas alınmıştır.



Şekil 2.42 Örnek 2D-4 Betonarme Düzlem Çerçeve Mekanik Modeli

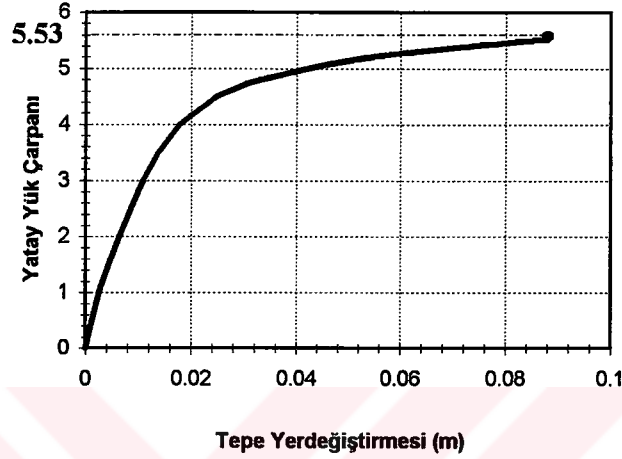
Tablo 2.5 Betonarme Düzlem Çerçeve Çubukları İçin Bünye Bağıntısı Numaraları

Kesit	Bünye Bağ. No	
	M (+)	M (-)
Kiriş Mesnet Bölgesi	1	2
Kiriş Açıklık Bölgesi	3	4
Kolon Üst Bölge	6	7
Kolon Alt Bölge	5	5



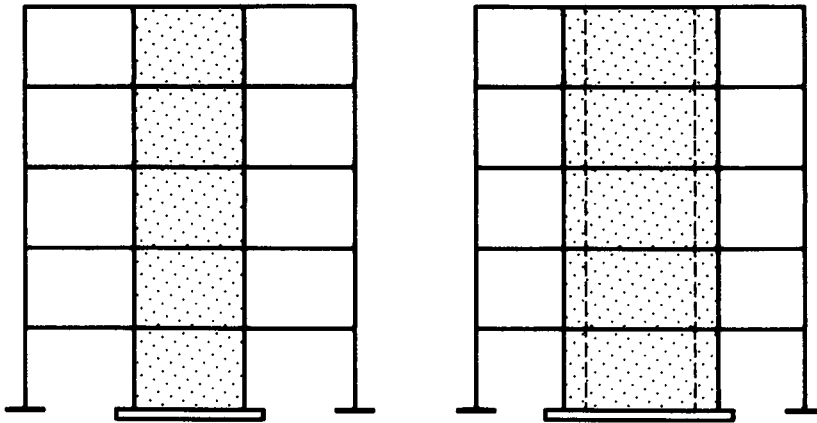
Şekil 2.43 Yatay Yükün Katlar Arasındaki Dağılımı

Doğrusal olmayan hesapla elde edilen yatay yük çarpanı-tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi Şekil 2.44 de verilmiştir. Bu hesapta düşey yükün şiddeti sabit tutulup yatay yük çarpanı göçme gerçekteşene kadar artırılmıştır. Yatay yük çarpanı 5.53 değerine eriştiğinde 45 nolu çubuğun sağ ucunda, 71 ve 79 nolu çubukların da üst uçlarında öngörülen sınır şekildeğiştirmelere ulaşılmıştır.



Şekil 2.44 Yatay Yük Çarpanı-Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkisi

Örneğin ikinci bölümünde, ilave perdeler inşa ederek ya da mevcut bazı yapısal elemanları perdeleştirerek sağlanan güçlendirilmenin, betonarme çerçevenin davranışına olan etkileri irdelenmiştir. Bu konudaki pratik uygulamalarda iki farklı durumla karşılaşılmaktadır. Bunlar; *i.* Güçlendirme perdesinin bir aks içerisinde kalması durumu, *Durum 1.* *ii.* Güçlendirme perdesinin komşu açıklıklara da geçmesi durumu, *Durum 2.* Her iki durum şematik olarak Şekil 2.45 de gösterilmiştir.



Şekil 2.45 Güçlendirme Amacıyla İlave Edilen Perdelerin Çerçeve İçindeki Yerleşimi

Güçlendirme perdeleri veya perdeleştirilmiş yapısal elemanlarda malzeme bakımından doğrusal olmayan davranış değişik şekillerde hesaba katılabilmektedir. Bu çalışmada iki yol üzerinde durulmuştur. Bunlardan ilki deneysel çalışmada elde edilen davranış modellerinin kullanılması, ikincisi ise bu tür elemanların eğilme çubuğu olarak idealleştirilmesi esasına dayanmaktadır.

*1.Yaklaşım*da, benzer özellikteki numunelerde deneysel olarak elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrilerinin zarfı kullanılmaktadır. Bu çalışmanın deneysel bölümünde, tek katlı ve tek açıklıklı bölme duvarlı düzlem çerçeveler tersinir yatay yükler etkisinde denenmiştir. Hazırlanan numunelerle ilgili ayrıntılı bilgi ve kullanılan deney tekniğı EK C de yer almaktadır. Deneyde elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi ilişkisinin zarf eğrisi çizilerek, tek yönlü artan yükleme için bünye bağıntısı olarak kullanılmıştır.

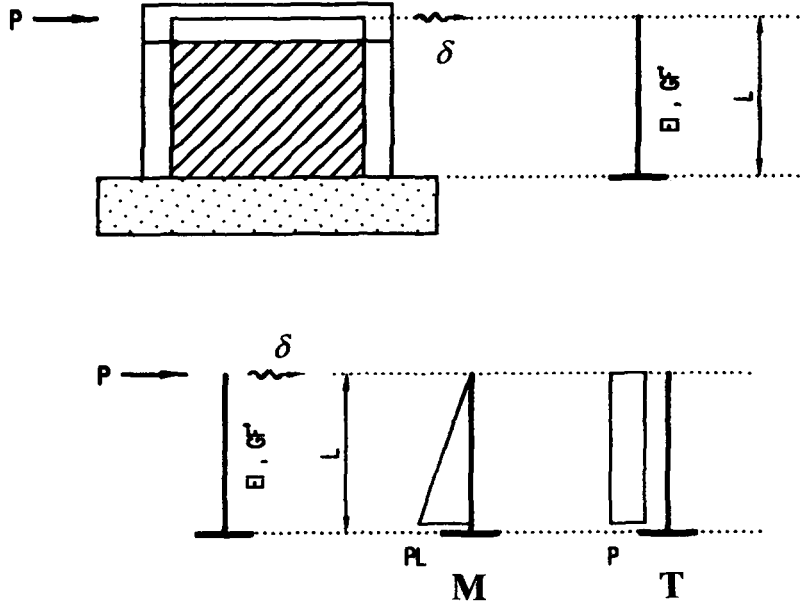
L uzunluklu bir konsol çubukta, uç noktaya etkiyen P tekil yükünden oluşan tepe yerdeğiştirmesi (2.34) bağıntısıyla hesaplanır, Şekil 2.46.

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} + \frac{PL}{GF'} \quad (2.34)$$

(2.34) bağıntısında EI sistem eğilme rijitliğini, GF' ise sistem kayma rijitliğini tanımlamaktadır. Kayma şekildeğiştirmelerini temsil eden ikinci terim terk edilirse, $(EI)_s$ sanal eğilme rijitliğı, P yatay yükü ve δ uç yerdeğiştirmesine bağılı olarak (2.35) bağıntısıyla ifade edilir.

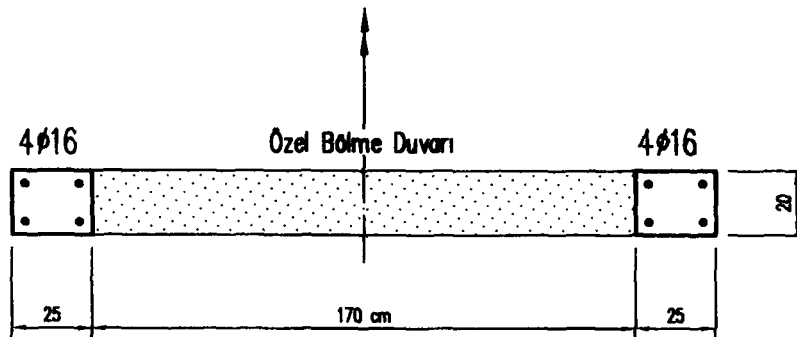
$$(EI)_s = \frac{PL^3}{3\delta} \quad (2.35)$$

DOC2B programında özel çubuk tip numarasıyla tanımlanan bu tür elemanlarda, oluşan kesme kuvveti ile ilgili bünye bağıntısına gidilerek karşı gelen sanal eğilme rijitliğı (2.35) bağıntısına göre hesaplanmaktadır.



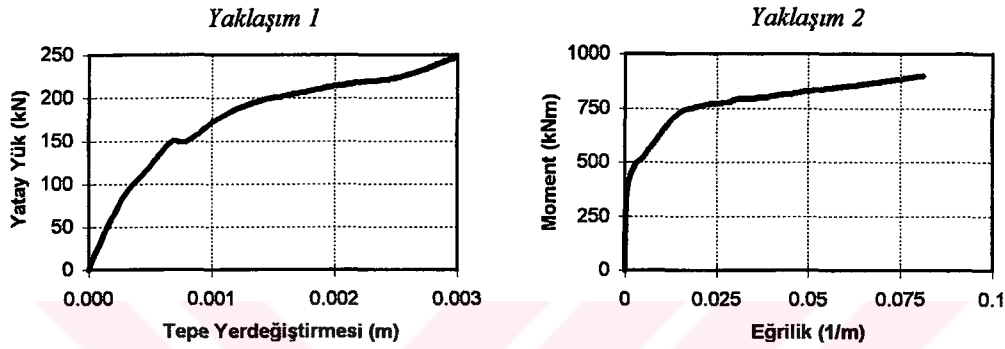
Şekil 2.46 Deneysel Çalışma Sonuçlarından Sanal Rijitliklere Geçiş

2. Yaklaşımda, güçlendirme perdeleri veya perdeleştirilmiş elemanlar mekanik modele eğilme çubuğu olarak katılmaktadır. Malzeme bakımından doğrusal olmayan davranış, elemanın moment-eğrilik ilişkisiyle temsil edilmektedir. Bu yaklaşımın bölme duvarlı çerçevelere uygulanabilmesi için, kenar kolonlar ile bölme duvarı arasında kayma ve ayrılma olmaması gerekmektedir. Önerilen teknikte oluşturulan duvarlarda gerçekleştirilen deneysel çalışmada, ± 250 kN luk yükleme aralığında, kenar kolon ve özel bölme duvarı arasında kayma ve ayrılma gözlenmemiştir. Buna dayanarak, Şekil 2.47 de gösterilen kesitin moment-eğrilik ilişkisi oluşturulmuştur. Hesapta tuğlanın çekme ve basınç dayanımı terkedilmiştir.



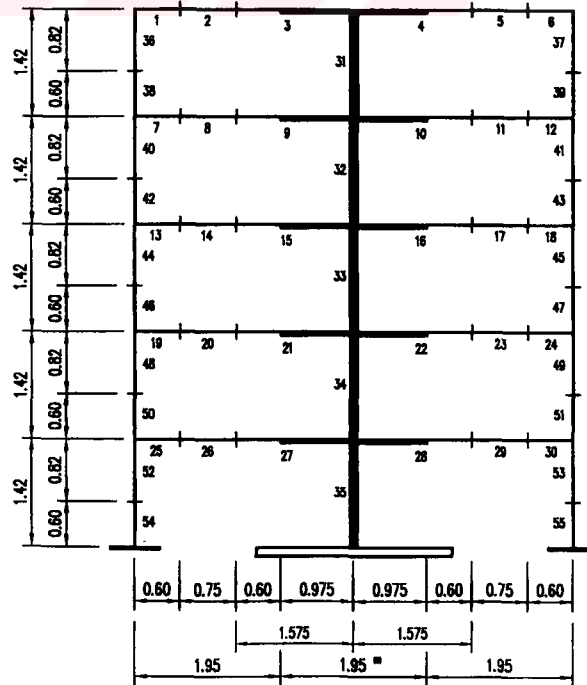
Şekil 2.47 Özel Bölme Duvarlı Çerçeve Taban Kesiti

Her iki yaklaşımla özel bölme duvarlı çerçeve için oluşturulmuş bünye bağıntıları Şekil 2.48 de verilmektedir. Ek C de belirtildiği gibi bölme duvarlı çerçeve numuneleri, yükleme aletinin fiziksel kapasitesi olan ± 250 kN luk bölge içinde test edilmişlerdir. Bu sebeple Şekil 2.48 de verilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrisinin son noktası göçme durumuna karşı gelmemektedir. Gözlenen numune davranışından diyagramın daha ilerilere gidebileceği öngörülmektedir.



Şekil 2.48 Özel Bölme Duvarlı Çerçeve Taban Kesiti Bünye Bağıntıları

İncelenen sistemde perdeleştirilen bölümün 2 ve 3 aksları arasında olması durumu için, *Durum 1*, oluşturulan mekanik model Şekil 2.49 da verilmiştir.



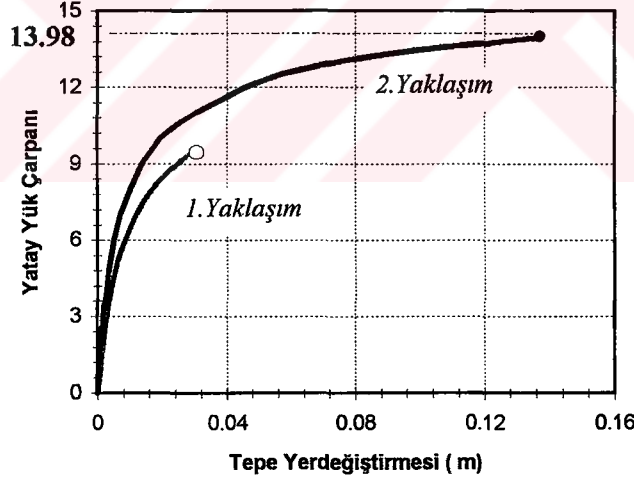
Şekil 2.49 Güçlendirilmiş Betonarme Düzlem Çerçeve Mekanik Modeli

Bu durum için çubuk bünye bağıntısı numaraları da Tablo 2.6 da verilmektedir.

Tablo 2.6 Güçlendirilmiş Çerçeve Bünve Bağıntısı Numaraları (*Durum 1*)

Kesit	Bünve Bağ. No	
	M (+)	M (-)
Kiriş Mesnet Bölgesi	1	2
Kiriş Açıklık Bölgesi	3	4
Kolon Üst Bölge	6	7
Kolon Alt Bölge	5	5
Perde	Özel	Özel

Güçlendirme perdesinin idealleştirilmesinde iki farklı yaklaşım kullanılarak elde edilen, yatay yük çarpanı - tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi Şekil 2.50 de verilmiştir. Önceki paragraflarda belirtildiğı gibi, *1.Yaklaşım* karşı gelen eğri deneyin yapıldığı aralıktaki durumu göstermekte olup son nokta göçmeye karşı gelmemektedir. *2.Yaklaşım*da ulaşılan en büyük yatay yük çarpanı **13.98** olmuştur.



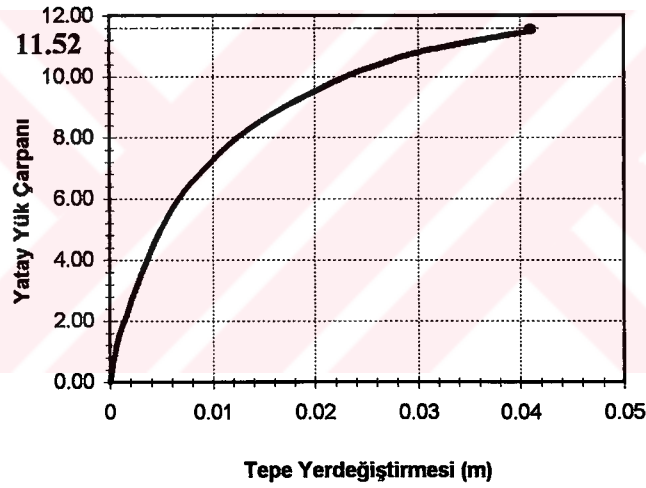
Şekil 2.50 Güçlendirilmiş Çerçeve Yatay Yük Çarpanı-Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkisi (*Durum 1*)

Güçlendirme perdesinin açıklık ortasına kadar devam etmesi hali için, *Durum 2*, hazırlanan mekanik modele, Şekil 2.49 da verilen modelin bazı çubuk bünye bağıntısı tiplerinin değıştirilmesiyle ulaşılmıştır. Yeni durum için çubuk bünye bağıntısı numaraları Tablo 2.7 de verilmektedir.

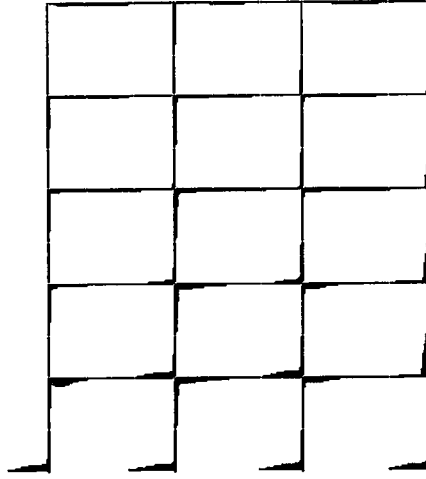
Tablo 2.7 Güçlendirilmiş Çerçeve Bünve Bağıntısı Numaraları (*Durum 2*)

Kesit	Bünve Bağ. No	
	M (+)	M (-)
Kiriş Mesnet Bölgesi	1	2
Kiriş Açıklık Bölgesi	3	4
Kiriş Mesnet Bölgesi <i>Perde Tarafı</i>	3	4
Kolon Üst Bölge	6	7
Kolon Alt Bölge	5	5
Perde	Özel	Özel

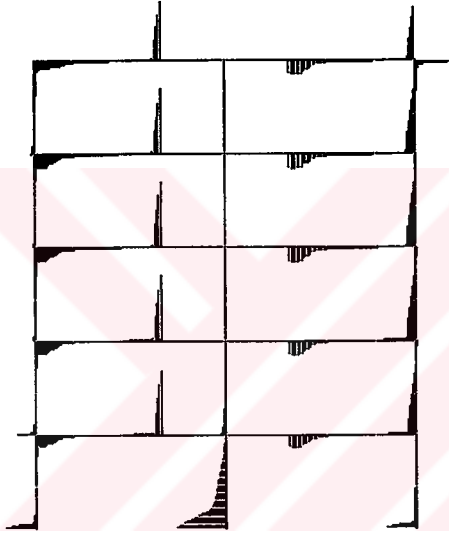
Bu durum için, doğrusal olmayan hesapla elde edilen yatay yük çarpanı-tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi de Şekil 2.51 de verilmektedir. Ulaşılan en büyük yatay yük çarpanı 11.52 ye düşmüştür.

Şekil 2.51 Güçlendirilmiş Çerçeve Yatay Yük Çarpanı-Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkisi (*Durum 2*)

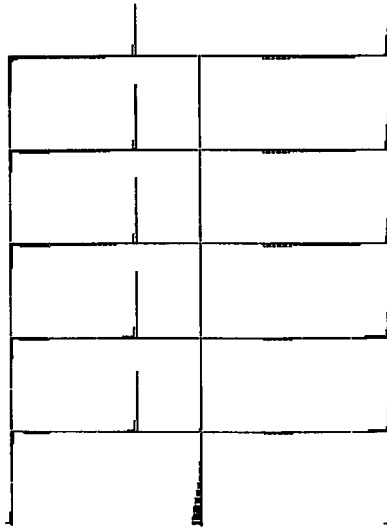
DUZ-GRF programıyla oluşturulan χ/χ_u oran diyagramları, çıplak çerçeve ile *Durum 1* ve *Durum 2* olarak isimlendirilen güçlendirme durumları için sırasıyla Şekil 2.52 de verilmektedir. Çıplak çerçeve durumunda ulaşılan en büyük yatay yük çarpanı 5.53 dür. *Durum 1* de yatay yük çarpanının 13.98 e erişmesiyle, güçlendirme perdesi taban kesiti ve perdeye saplanan kiriş uçlarında beraberce göçmeye erişilmektedir. *Durum 2* de ise yatay yük çarpanı 11.52 olduğunda, güçlendirme perdesine saplanan kirişlerin tümünde taşıma gücüne erişilmekte ve *Durum 1* e göre daha yüksek dayanımı olan güçlendirme perdesi, etkin olarak kullanılamamış olmaktadır.



Betonarme Çerçeve



*Güçlendirilmiş Betonarme Çerçeve
(Durum 1)*



*Güçlendirilmiş Betonarme Çerçeve
(Durum 2)*

Şekil 2.52 Güçlendirilmiş Betonarme Düzlem Çerçevelerde Göçme Modları

BÖLÜM 3

ÜÇ BOYUTLU BÜYÜK YAPI SİSTEMLERİNDE DÜZLEM ALT SİSTEMLER KULLANARAK YAPILAN DOĞRUSAL OLMAYAN ÇÖZÜMLEME

3.1 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Yatay yükler etkisindeki üç boyutlu yapı sistemlerinde; rijit kat döşemeleri kendi düzlemlerinde, yatay yük taşıyıcı düşey elemanlar arasındaki etkileşimi sağlayan bağlantılar olarak çalışır, [34]. Bu bağlantılar sayesinde, düşey taşıyıcılar sistemin yatay yük taşıma kapasitesine kendi rijitlikleriyle orantılı olarak katılırlar. Kat döşemesi kendi düzlemindeki büyük eğilme rijitliği dolayısıyla diyafram olarak davranır. Bu çalışma şekli nedeniyle, katın her iki doğrultudaki rijit ötelenme ve düşey bir aks etrafındaki dönme miktarı bilindiğinde, düşey taşıyıcıların rölatif yerdeğiştirmeleri hesaplanabilir. Döşemelerin önemli bir görevi de, deprem hareketi sırasında oluşan atalet kuvvetlerinin düşey taşıyıcılara dağıtılmasıdır. Yapının özellikle alt katlarında, düşey taşıyıcılar arasında önemli kuvvet alış verişleri olmakta ve döşeme sisteminde büyük iç kuvvetler oluşmaktadır. Döşemenin plan kenar boyutları arasındaki oranın büyümesi ya da boşluklar içermesi durumunda, döşeme düzlem içi deformasyonları artmaktadır. Yerinde döküm döşemeler büyük delikler içermedikleri sürece diyafram etkisi için yeterli olurken; öndöküm ya da diğer hazır döşeme sistemlerinde, döşeme düzleminde yeterli dayanım ve rijitliğe sahip bağlantıların yapılması gerekmektedir. Öndöküm veya hazır döşeme sistemi üzerinde oluşturulan ince kavrama betonu yaygın olarak kullanılan bir bağlantı türüdür. Birbirlerine ve ana taşıyıcı sisteme yeterli düzeyde bağlanmamış hazır döşeme elemanlarının, kat atalet kuvvetlerini düşey taşıyıcılara aktarırken yetersiz kaldıkları 1988 Ermenistan Depremi sonrasında yapılan gözlemlerden birisidir.

Saffarini ve Quadaimat [35], kat sayısı, kat yüksekliği, döşeme tipi, bina plan boyutları, bina planındaki düzensizlikler, döşeme boşlukları, kolon ve perde kesit boyutları, düşey taşıyıcılar arasındaki mesafeler gibi değişkenleri kullanılarak; aynı yapı üzerinde, rijit döşeme kabulü yapılması ve döşeme düzlem içi şekildeğiştirmelerinin dikkate alınması durumlarında ortaya çıkan iç kuvvet dağılımlarını karşılaştırmıştır. İncelenen 37 adet yapı sisteminde ulaşılan ortak sonuçlar düşey taşıyıcıların yatay rijitlikleri arttığında rijit döşeme varsayımıyla yapılan hata miktarının da arttığı, döşeme düzlem içi rijitliği arttıkça rijit döşeme varsayımıyla yeter yaklaşıklıkta sonuçlara ulaşıldığı şeklindedir. Çerçeve türü yapılarda rijit döşeme varsayımının çok iyi sonuç verdiği, perdeli yapılarda perdenin plandaki yerleşiminin de döşeme düzlem içi şekildeğiştirmelerini artırıcı yönde etki yapabildiği belirtilmiştir.

Rutenberg [36], az katlı ve planda kenar boyutları arasındaki oranın büyüdüğü yapı sistemlerinde, döşeme düzlem içi şekildeğiştirmelerinin önemli olabildiğini belirtmiş ve bu şekildeğiştirmeleri dikkate almak için bir yol önermiştir. Önerilen yol kayma çerçeveleri ile eksenel yüklü çubuklar arasındaki bir analojiye dayandırılmıştır. Yatay yükler etkisindeki gerçek yapı sistemi; yatayda tutulu, düşey yüklere maruz eşdeğer bir düzlem çerçeveye dönüştürülmektedir. Eşdeğer düzlem çerçevenin kolonları pandül çubuklar olarak tanımlanmaktadır. Pandül çubuk eksenel rijitlikleri, kayma çerçevesi yatay rijitliklerine karşı gelmektedir. Kiriş rijitlikleri de karşı geldiği döşemenin düzlem içi mekanik özelliklerinden hareketle belirlenmektedir.

Kirişsiz döşemelerde olduğu gibi döşeme düzlem içi rijitliğinin göreceli olarak küçük olması, yatay yük taşıyan düşey elemanlar arasındaki mesafelerin büyümesi, döşemelerde büyük boşluklar bulunması, yapı sisteminin plandaki kenar boyutları arasındaki oranın büyük değerler alması gibi durumlarda, döşeme düzlem içi şekildeğiştirmelerinin dikkate alınması gerekmektedir.

Karadoğan [29], döşeme düzlem içi şekildeğiştirmelerini dikkate almak için alt sistemler kullanarak, biri yerdeğiştirme diğeri ise kuvvet yöntemi esaslı iki hesap yolu önermiştir.

Yatay yükler etkisindeki üç boyutlu büyük yapı sistemlerinde doğrusal elastik malzeme davranışı için, alt sistem kullanımı esasına dayanan bir hesap yöntemi [26,37] de verilmiştir.

Betonarme sistemlerin doğrusal elastik olmayan üç boyutlu hesabı için son yıllarda geliştirilen DRAIN3D, IDARC3D gibi bilgisayar programları, döşemeleri kendi düzlemleri içerisinde rijit olarak hesaba katmaktadır.

Bu tez çalışmasında geliştirilen algoritmayla, döşeme düzlemi içinde de doğrusal ve doğrusal olmayan şekildeğişirmeler hesaba katılabilmektedir. Döşemeler, üç boyutlu yapı sistemi içerisinde yatay konumlu düzlem alt sistemler olarak düşünülmektedir. Döşeme alt sistemlerin mekanik modelleri için, iki boyutlu levha veya kabuk sonlu elemanlar kullanılabileceği gibi çubuk sistem idealleştirmesi de yapılabilmektedir. Doğrusal olmayan hesapta, bünye bağıntısının kolay tanımlanması dolayısıyla eşdeğer çubuk sistem yaklaşımı tercih edilmiştir.

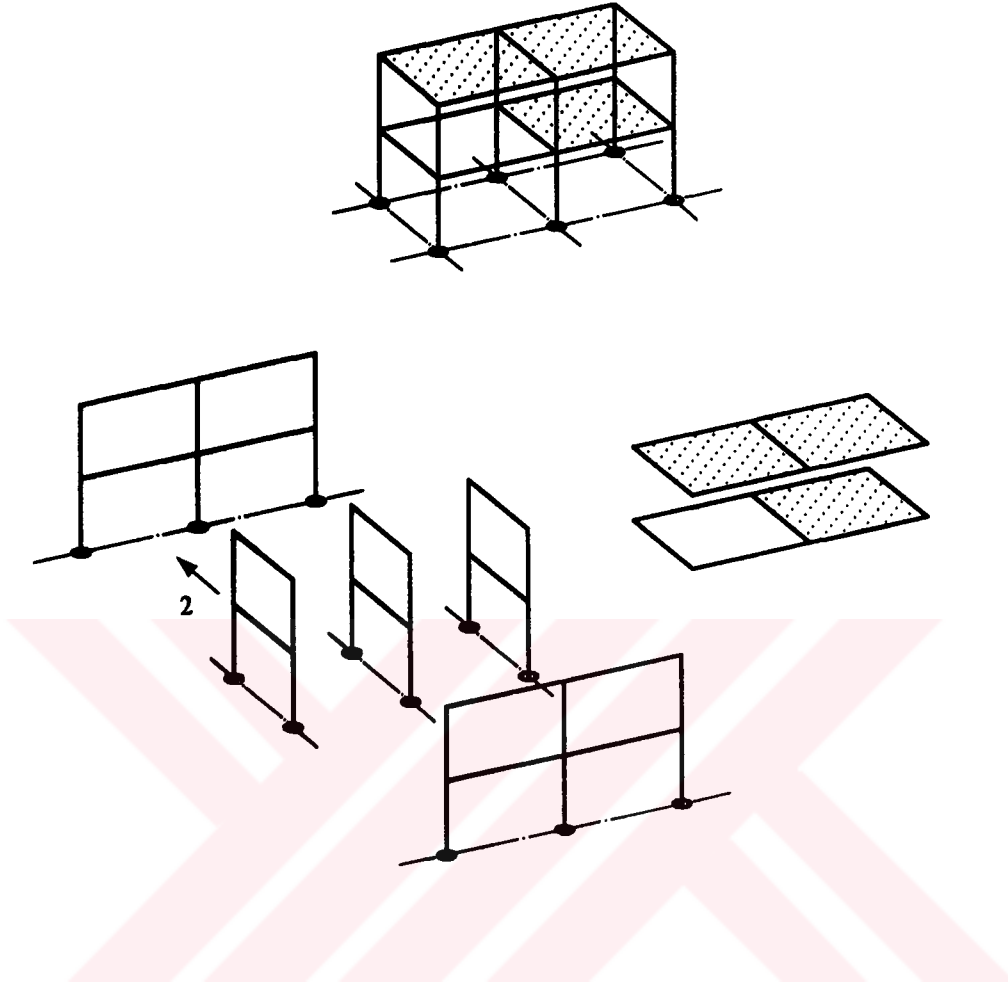
3.2 YAPI SİSTEMİNİN TANIMI VE VARSAYIMLAR

Düşey ve/veya yatay yükler etkisindeki, doğrusal ya da doğrusal olmayan malzemeden yapılmış üç boyutlu yapı sistemlerinin çözümlenmesinde iki boyutlu düzlem alt sistemlerden yararlanılmaktadır. Düzlem alt sistemler, yatay yük taşıyıcı **Düşey Alt Sistemler** ve yatay yük yayıcı **Yatay Alt Sistemler** olarak iki gruba ayrılmaktadır. Düzlem alt sistemlerin birbirlerine göre olan konumları diktir, Şekil 3.1.

Düşey alt sistemler; çerçeveler, boşluklu veya boşluksuz perdeler, perdeli çerçeveler veya bunların bileşiminden meydana gelebilirler. Yatay alt sistemler ise boşluklu veya boşluksuz döşemeler, kirişli döşemeler, ızgara sistemler şeklinde olabilirler.

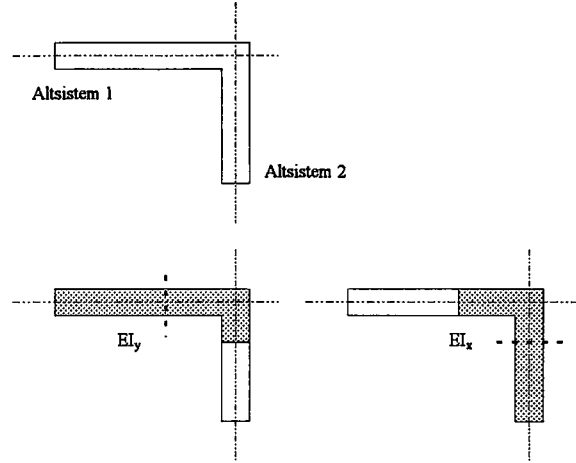
Hesapta yapılan varsayım ve yaklaşımlar şöyledir:

1. Yapı sistemi birbirlerine göre dik olarak yerleşik düzlem alt sistemlerden oluşmaktadır veya böyle olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 3.1 Üç Boyutlu Yapı Sisteminin Düzlem Alt Sistemlere Ayrılması

2. Düzlem alt sistemlerin birbirleriyle kesiştikleri ortak eksenler boyunca düşey süreklilik sağlanamamaktadır.
3. Çubukların kendi eksenlerine göre olan burulma rijitlikleri terkedilmektedir.
4. Düzlem alt sistemlerin kesişim hatları üzerindeki çubuklarda, eğilme rijitlikleri ilgili alt sistemler arasında uygun bir şekilde dağıtılmaktadır. İki alt sistemin kesiştiği dikdörtgen kesitli bir kolonda, kolon I_x ve I_y atalet momentleri ilgili alt sistemlerin çubuklarında kullanılmaktadır. Perde veya çekirdek türü elemanlarda ise etkin tabla genişliği tanımlanarak, ilgili alt sistemlerde kullanılabilecek kesit özellikleri belirlenmektedir, Şekil 3.2.



Şekil 3.2 Kesişen Düzlem Alt Sistemlerde Eğilme Rijitliklerinin Tanımı

5. Kesitte, iç kuvvetler arasında karşılıklı etkileşimin olmadığı veya sonuçlara etkisinin önemsiz olduğu varsayılmaktadır.
6. Perde veya döşeme plağı gibi sürekli ortamlar eşdeğer çubuk sistemlere dönüştürülerek hesaba katılmaktadır. Kirişlerin perde içinde kalan bölümleri sonsuz rijit alınabilmektedir. Döşemeleri temsil eden çubuk sistemlerde; EI eğilme rijitlikleri, GF' kayma rijitlikleriyle birlikte kullanılabilir.
7. Yükleme statik özelliktedir.
8. Malzeme yönünden doğrusal olmayan davranış, yayılı şekil değiştirme durumu esas alınarak hesaba katılmaktadır. Geliştirilen konsol birim eleman ile sistemin genel bilinmeyen sayısı artırılmadan çözüme ulaşılmaktadır.
9. Geometri değişimi bakımından doğrusal olmayış, başlangıçta eksenel kuvvetin yaklaşık olarak hesabıyla dikkate alınmaktadır.

3.3 BİLİNMEYENLER

Malzeme ve/veya geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan üç boyutlu yapı sistemlerinin çözümlenmesi için bir bilgisayar programının geliştirildiği bu çalışmada, özel bir alt sistem tekniği kullanılmaktadır. Yapı sistemini oluşturan düşey ve yatay konumlu düzlem alt sistemlerin, mutlak ya da görelî yer değiştirmelerine dayalı yatay

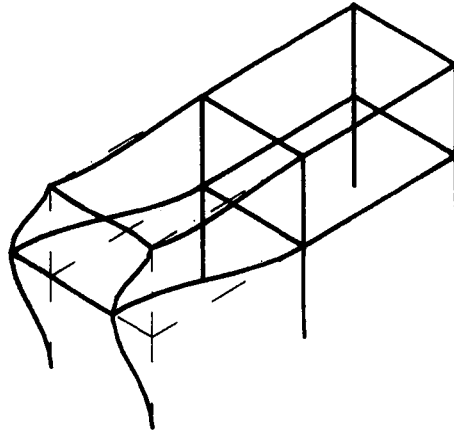
rijitlik matrisleri, üç boyutlu yapı sisteminde düğüm noktası gruplarının yatay izdüşüm denge denklemlerinin yazılmasında kullanılmaktadır.

Doğrusal olmayan malzeme davranışı, geometri değişimi bakımından doğrusal olmayış ve diğer bazı düzensizlikler düzlem alt sistemler için oluşturulan yatay rijitlik ve yükleme matrislerinde dikkate alınmaktadır.

İncelenen yapı sisteminin özelliğine göre bilinmeyen olarak mutlak veya göreceli yerdeğiştirmeler seçilebilmektedir. Basit matris işlemleriyle, bir durumdan diğerine kolayca geçilebilir. Problemin bilinmeyenlerinin seçimindeki bu esneklik, özellikle hasta karakterli denklem takımıyla karşılaşılması muhtemel yapı sistemlerinde yararlı olmaktadır.

Bilinmeyenlerin seçiminde aşağıda sıralanan yollardan biri izlenebilir:

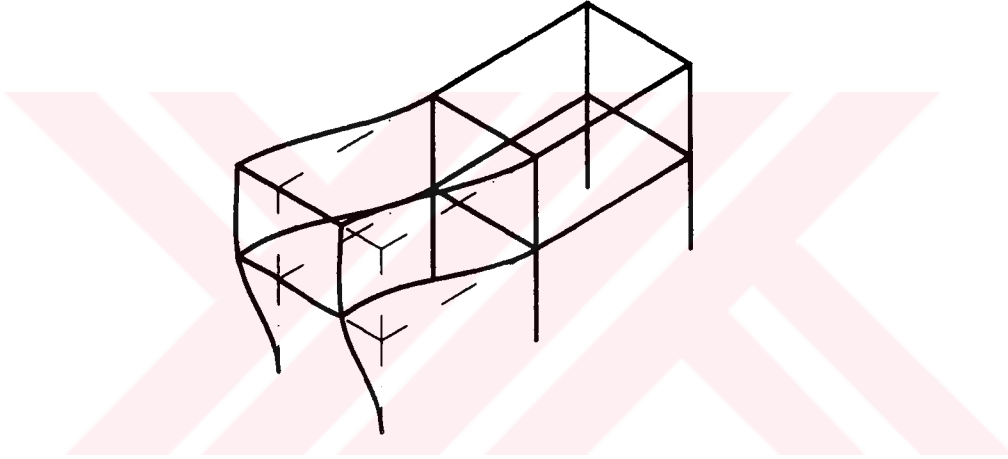
- i. Düşey alt sistemlerin her kattaki mutlak yerdeğiştirmeleri bilinmeyen olarak seçilebilir. Döşeme düzlem içi şekildeğiştirmeleri bu bilinmeyenler cinsinden ifade edilmiş olmaktadır. Şekil 3.1 de verilen yapı sisteminde, düğüm noktası gruplarının mutlak yerdeğiştirmelerine dayalı yatay rijitlik matrisi 10 farklı birim durumdan oluşan kesme kuvvetlerini içermektedir. Bu yapı sisteminde, örnek olarak 2 numaralı yerdeğiştirme bileşeninin birim mutlak hareket yapması halinde ortaya çıkan durum Şekil 3.3 de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Mutlak Yerdeğiştirmelerin Kullanılması Durumunda, $\delta_2=1$ Birim Hali

Bu birim hareketten dolayı düğüm noktası gruplarına birleşen çubuklarda oluşan kesme kuvvetlerinin toplanmasıyla, düğüm noktası grupları toplam kesme kuvvetleri elde edilir ki bu da üç boyutlu yapı yatay rijitlik matrisinin 2 numaralı kolonuna karşı gelmektedir.

- ii. Düşey alt sistemlerin görelî yerdeğıştirmeleri bilinmeyen olarak seçilebilir. Düşey alt sistem mutlak yerdeğıştirmeleri, görelî olarak seçilenlerin ardışık toplamı olarak, döşeme düzlem içi şekildeğıştirmeleri ise aynı kattaki mutlak yerdeğıştirmeler cinsinden ifade edilir. Örnek olarak, Şekil 3.4 de kenar aks çerçevesi üzerinde yapılan ve görelî yerdeğıştirmeleri esas alan bir birim yerdeğıştirme durumu gösterilmiştir.

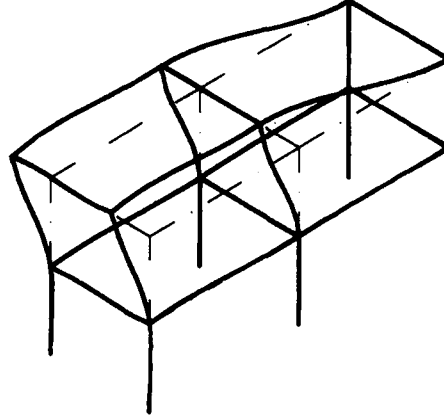


Şekil 3.4 Düşey Alt Sistemlerde Görelî Yerdeğıştirmelerin Bilinmeyen Seçilmesi

- iii. Yatay alt sistemlerde görelî yerdeğıştirmeler bilinmeyen olarak seçilebilir. Döşeme seviyelerinde, seçilen görelî yerdeğıştirmelerin ardışık toplamı yapılarak döşeme mutlak yerdeğıştirmelerine geçilir. Farklı katlardaki döşeme mutlak yerdeğıştirmelerinin toplamıyla da düşey alt sistemlerin kat seviyelerindeki yerdeğıştirmelerine ulaşılır. Örnek olarak, Şekil 3.5 de üst kat döşemesinde görelî yerdeğıştirmeleri esas alan bir birim yerdeğıştirme durumu verilmiştir.

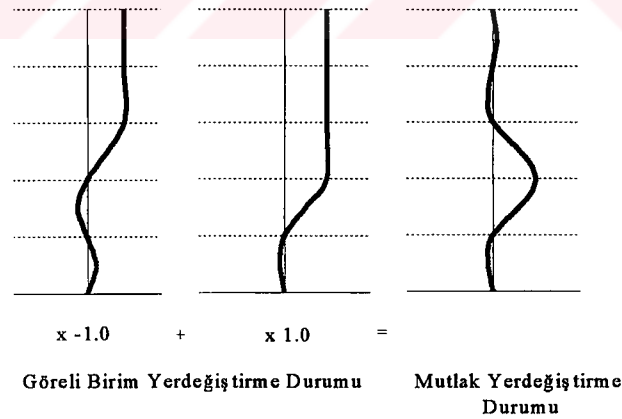
Yatay yük taşıyıcı veya yayıcı alt sistemlerde; $[k]_m$ mutlak yerdeğıştirme esaslı yatay rijitlik matrislerine, $[k]_g$ görelî yerdeğıştirmeler esas alınarak oluşturulan yatay rijitlik matrislerinden geçilebilmektedir. Şekil 3.6 da, verilen iki adet ardışık özel görelî

yerdeğiştirme durumu birbirinden çıkarılarak mutlak yerdeğiştirme durumundaki büyüklüklere ulaşılmaktadır.



şekil 3.5 Yatay Alt Sistemlerde Görelİ Yerdeğiştirmelerin Bilinmeyen Seçİlmesi

Buna göre, görelİ yerdeğiştirmesi mutlak yerdeğiştirmesine eşİt olan serbestliğe ait satır ve sütun esas alınarak, sistematik bir çıkarma işlemiyle görelİ yerdeğiştirme esaslı yatay rijitlik matrisinden mutlak yerdeğiştirme esaslı yatay rijitlik matrisine geçİlebilir. Bu dönüşüm matris işlemleriyle (3.1a) bağıntısında tariflenmiştir.



şekil 3.6 Görelİ Yerdeğiştirmelerden Mutlak Yerdeğiştirmelere Geçİş

$$[k]_m = [T_d]^{-1} [k]_g [T_d]^{-1^T} \quad (3.1a)$$

$[T_d]^{-1}$ dönüşüm matrisi (3.1b) de tanımlanmıştır.

$$[T_d]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1b)$$

Yukarıdaki işlemin tersi olarak, $[k]_m$ matrisinden $[k]_g$ matrisine geçiş de (3.2a) bağıntısı ile yapılmaktadır.

$$[k]_g = [T_d][k]_m[T_d]^T \quad (3.2a)$$

(3.2a) bağıntısında kullanılan dönüşüm matrisi (3.2b) de verilmiştir.

$$[T_d] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2b)$$

3.4 STATİK YÜKLEME İÇİN DENGİ DENKLEMLERİ

Yatay yük taşıyıcı düşey alt sistemlerin, kendi düzlemlerinde ve döşeme seviyelerindeki *mutlak yerdeğiştirmelerinin* bilinmeyen seçilmesi durumunda, bu esasa göre oluşturulmuş yatay rijitlik matrislerinden yararlanılarak üç boyutlu sisteme ait rijitlik matrisi iki aşamada kurulabilir.

Üç boyutlu yapı sisteminde;

L : Kat sayısı

m : X doğrultusundaki yatay yük taşıyıcı düşey alt sistem sayısı

n : Y doğrultusundaki yatay yük taşıyıcı düşey alt sistem sayısı

$[S]_{\phi}$: Düşey alt sistem yatay rijitlik matrisi, $(L \times L)$; $[S]_{\phi x}$, $[S]_{\phi y}$ sırasıyla X ve Y doğrultusunda yer alan alt sistemlerin yatay rijitlik matrislerine karşı gelmektedir.

$[Q]_{\phi}$: Düşey alt sistem yükleme matrisi, $(L \times I)$

$[S]_d$: Yatay alt sistem rijitlik matrisi, $((m+n) \times (m+n))$; $[S]_{dx}$, $[S]_{dy}$, $[S]_{dxy}$, $[S]_{dyx}$ yatay alt sistem rijitlik matrisi alt parçalarıdır.

$[Q]_d$: Yatay alt sistem yükleme matrisi, $((m+n) \times I)$

$[S]$: Üç boyutlu yapının yatay rijitlik matrisi, $(L.(m+n) \times L.(m+n))$

$[Q]$: Üç boyutlu yapının yükleme matrisi, $(L.(m+n) \times I)$

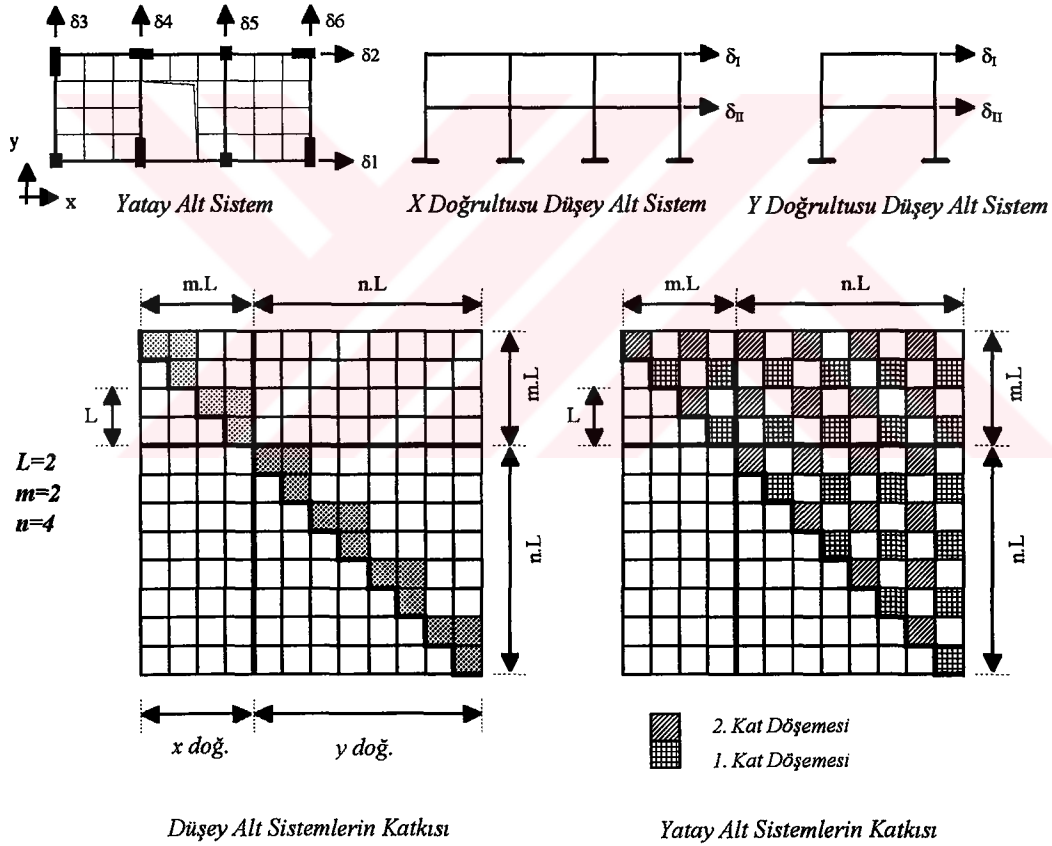
$[d]$: Üç boyutlu yapının yerdeğiştirme matrisi, $(L.(m+n) \times I)$

olmak üzere; birinci aşamada, $[S]$ matrisinin esas köşegeni üzerindeki ilgili satır ve sütunlara düşey alt sistem yatay rijitlik matrisleri, $[S]_{\phi}$ yerleştirilir. İkinci aşamada ise yatay alt sistem rijitlik matrisleri $[S]_d$, $[S]$ matrisinin ilgili satır ve sütunlarına yerleştirilir, [26]. Üç boyutlu yapı sistemine ait denklem takımının kuruluşu (3.3) de özetlenmiştir. Bu bağıntıda X ve Y alt indisleri ilgili doğrultuyu tanımlamaktadır.

$$\begin{aligned}
 [S][d] &= [Q] \\
 [S]_{\phi} + [S]_d [d] &= [Q] \quad (3.3) \\
 \begin{bmatrix} [S]_{\phi x} & [0] \\ [0] & [S]_{\phi y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [S]_{dx} & [S]_{dxy} \\ [S]_{dyx} & [S]_{dy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [d]_x \\ [d]_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [Q]_x \\ [Q]_y \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Düşey ve yatay alt sistemlere ait $[Q]_{\phi}$ ve $[Q]_d$ yükleme matrisleri ile üç boyutlu yapının serbestlikleri doğrultusunda etkiyen tekil yüklerin yerleştirilmesiyle, $[Q]$ yükleme matrisi elde edilir.

$\overline{[S]}$ üç boyutlu yapı yatay rijitlik (*birim yerdeğiştirme*) matrisinin herhangi bir ij terimi, j numaralı serbestlik doğrultusundaki 1 birimlik hareketten dolayı i numaralı serbestlikle hareketleri tanımlanan düğüm noktası grubuna birleşen çubuklarda oluşan kesme kuvvetlerinin toplamını ifade etmektedir. $\overline{[S]}$ matrisi simetriktir. Yatay alt sistemlerden gelen terimler, dağınık yerleştiklerinden dolayı bant matris değildir. $\overline{[S]}$ matrisinin kurulması ve indirgenmesi aşamalarında sadece üst üçgen parçasıyla çalışılmaktadır. İki katlı bir yapı için, Şekil 3.7 de $\overline{[S]}$ matrisinin kuruluşu örneklenmiştir.



Şekil 3.7 Üç Boyutlu Yapı Sisteminde Yatay Rijitlik Matrisinin Kurulması

Düzlem alt sistemlerin yatay rijitlik matrisleri değişik yollarla elde edilebilir, [27,28].

Bunlardan başlıcaları;

- i. Birim yerdeğiştirme uygulama yöntemi,

- ii. İndirgeme yöntemi,
- iii. Birim kuvvet matrisinin tersini alma yöntemi,
- iv. Yaklaşık yöntemler,

şeklinde. Geliştirilen programda *indirgeme yöntemi* kullanılmaktadır.

Bir düzlem alt sistemin, benzer bilinmeyenlerinin veya statik serbestlik derecelerinin arka arkaya sıralandığı sistem rijitlik $[S]$ ve yükleme $[Q]$ matrislerinde, istenilen bir serbestlik derecesine kadar *Gauss İndirgemesi* uygulanarak, *indirgenmiş (yoğunlaştırılmış) rijitlik ve yükleme matrislerine* ulaşılır. Kiriş eksenel şekildeğiştirmelerinin terk edilmesi halinde bu matrislere küçültme işlemi de uygulanarak, *küçültülmüş rijitlik $[\bar{S}]$ ve yükleme matrisleri $[\bar{Q}]$* elde edilir.

Düzlem alt sistemlerde statik yükler için geçerli olan genel denge denklemi (3.4) de verilmiştir.

$$[S][d] + [P_o] = [Q] \quad (3.4)$$

(3.4) denkleminde $[S], [P_o], [Q]$ sırasıyla, benzer statik serbestlik derecelerinin ard arda dizildiği sistem rijitlik, çubuk yükleri ve düğüm noktası yükleri matrislerini göstermektedir.

$$[S][d] = [Q] - [P_o] \quad (3.5)$$

Yükleme terimlerinin sağ tarafta toplandığı (3.5) denkleminde, ilgili statik serbestlik derecesine kadar uygulanan indirgeme işleminin ardından, küçültme işlemi de yapılarak (3.6) denklemine ulaşılır.

$$[\bar{S}][\bar{d}] = [\bar{Q}] \quad (3.6)$$

Düzlem alt sistemlerde benzer bilinmeyenlerin ard arda sıralandığı rijitlik ve yükleme matrislerine ise iki yolla ulaşılabilir. Bunlar,

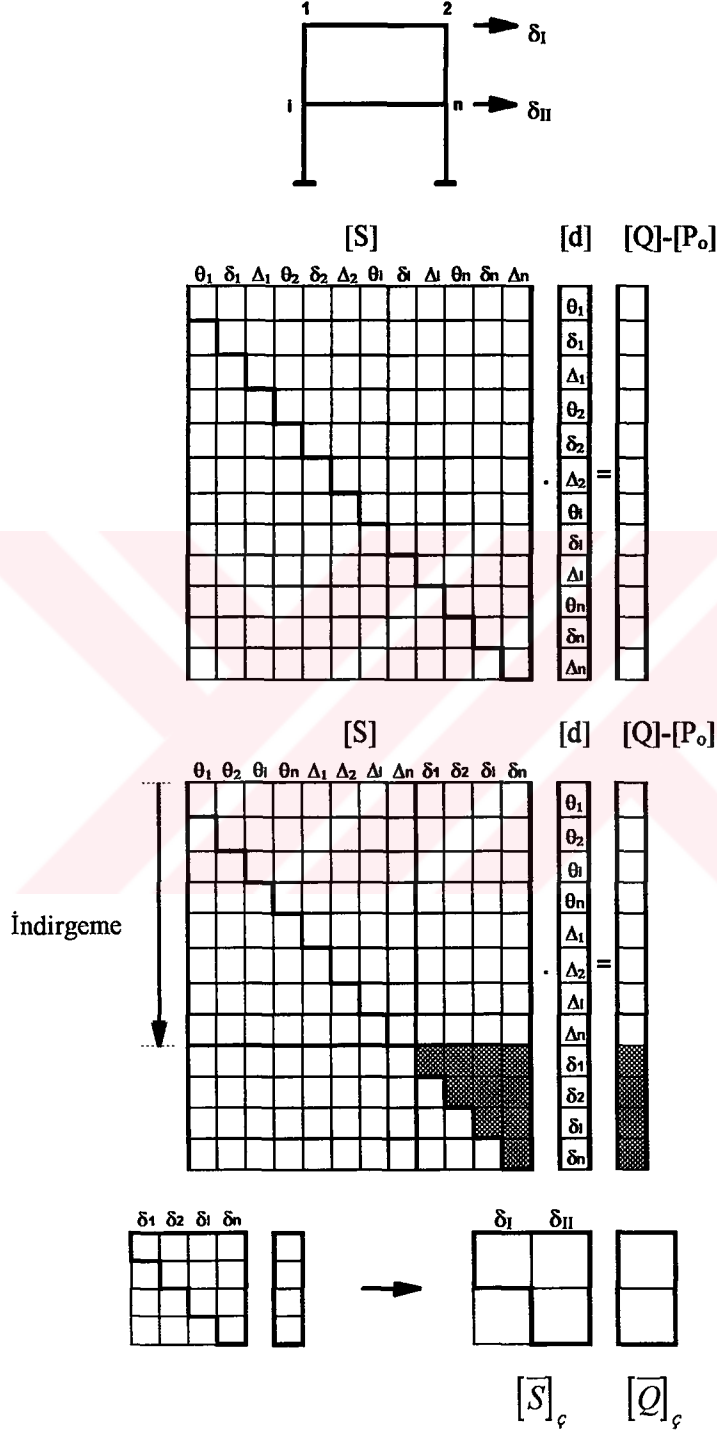
- i. Kod numaraları yöntemi kullanılarak, satır ve sütunların doğrudan istenilen sırada oluşmasını sağlamak,
- ii. Herhangi bir sırada oluşturulmuş rijitlik ve yükleme matrislerinde, istenilen düzeni sağlayacak şekilde satır-sütun yerdeğiştirmesi yapmak.

Bu çalışmada ikinci yol izlenmiştir. Yeniden sıralanan denklem takımının indirgenip, küçültülmesiyle; düşey alt sistemler için $[S]_c$ ve $[Q]_c$, yatay alt sistemler için de $[S]_d$ ve $[Q]_d$ matrislerine ulaşılmaktadır. Şekil 3.8a da; denklem takımının yeniden sıralanması, indirgenmesi ve küçültülmesi işlemleri düşey bir alt sistem için örneklenmiştir. Benzer işlemler, yatay alt sistemler (döşemeler) için de aynen uygulanmaktadır. Kiriş eksenel şekildeğiştirmelerinin önemli olabileceği durumlarda küçültme işlemi yapılmamalıdır.

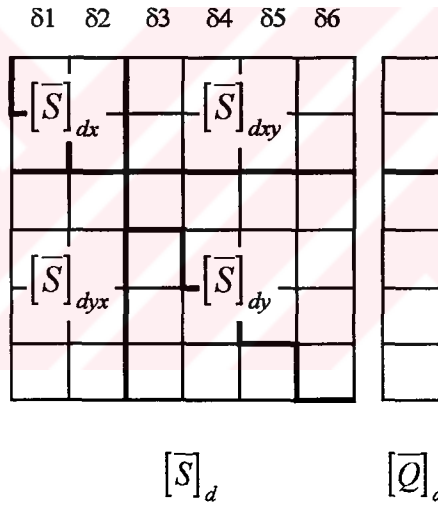
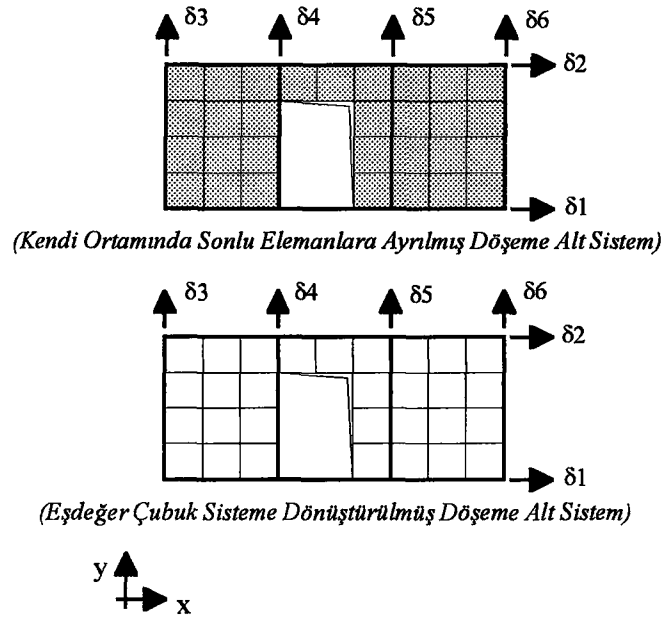
Döşeme düzlem içi şekildeğiştirmelerini hesaba katmaya yönelik $[S]_d$ yatay rijitlik matrisinin kurulmasında, alt sistem kesim noktalarının planda birbirine dik iki statik serbestlik derecesi bulundurması önem taşımaktadır. Bu özellik sayesinde üç boyutlu sistemin burulma özellikleri doğrudan hesaba aktarılmaktadır. Bu aşamada yapılan ve gerçekçi olan varsayım, daha öncede belirtildiği gibi, kiriş boy değişimlerinin yok sayılmasıdır. Şekil 3.8b de yer alan $[S]_{dx}$, $[S]_{dyx}$ alt matrisleri x doğrultusundaki serbestlik derecelerinin birim değerlerinden dolayı sırasıyla x ve y doğrultularında oluşan kuvvetleri göstermektedir. Benzer şekilde $[S]_{dy}$, $[S]_{dxy}$ matrisleri de y doğrultusundaki serbestlik derecelerinin birim değerlerinden dolayı sırasıyla y ve x doğrultularında oluşan kuvvetlere karşı gelmektedir. Birbirinin transpozu olan $[S]_{dxy}$ ve $[S]_{dyx}$ alt matrislerinin terimleri, döşeme düzlem içi şekildeğiştirmelerinin bir doğrultuda önemli diğer doğrultuda önemsiz olduğu durumlarda ve esas köşegenden uzaklaştıkça küçülmektedir. Bu durumun başka basitleştirmelere kaynak oluşturabileceği düşünülmektedir.

Çok katlı yapı sistemlerinde birbirine benzeyen pek çok yatay ve düşey alt sistem bulunabileceği gözönünde tutulursa, yukarıda tanımlanan işlemlerin sınırlı olduğu ve

basit bilgisayar programları kullanılarak kolayca yapılabileceği görülür. Birbirinden bağımsız olan bu işlemlerin yapılmasında paralel işlemcilerden de yararlanılabileceği açıktır.



Şekil 3.8a Alt Sistemlerde Yatay Rijitlik ve Yükleme Matrislerinin Elde Edilmesi



Şekil 3.8b Yatay Alt Sistemlerde Rijitlik Matrisinin Bileşenleri

3.5 YAPI SERBEST TİTREŞİM ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Deprem hareketi etkisindeki çok serbestlik dereceli yapı sisteminin dinamik denge denklemi (3.7) bağıntısında verildiği gibidir.

$$[M][\ddot{d}] + [C][\dot{d}] + [K][d] = -[M][U][\ddot{d}_{zemin}] \quad (3.7)$$

Bu bağıntıda $[M]$ yığılı tekil kütlelerin esas köşegen üzerine yerleştirildiği kütle matrisini, $[C]$ sönüm matrisini, $[K]$ seçilen dinamik serbestlik dereceleri esas alınarak kurulmuş rijitlik matrisini, $[U]$ rijit hareket aktarma matrisini göstermektedir. $[d]$ ve $[\ddot{d}_{\text{zemin}}]$ sırasıyla ilgili serbestlikler doğrultusundaki görelî yerdeğiştirmeler ile yapıya etkileyen zemin ivmelerini içeren kolon matrisleri, $[\dot{\cdot}]$ ise zamana göre türevi göstermektedir.

Serbest titreşim durumu söz konusu olduğunda, (3.7) bağıntısının sağ tarafı sıfır olacaktır. Sönümün serbest titreşim üzerindeki etkisi de yok sayıldığında (3.8) bağıntısına erişilir.

$$[M][\ddot{d}] + [K][d] = [0] \quad (3.8)$$

Lineer sistemlerin serbest titreşimleri harmonik hareket olduğundan [28]; ω özel açısal frekansı göstermek üzere, ivme ve yerdeğiştirme vektörleri arasında (3.9) bağıntısı yazılabilir.

$$[\ddot{d}] = -\omega^2 [d] \quad (3.9)$$

(3.9) bağıntısı, (3.8) de yerine konulduğunda (3.10) bağıntısına erişilir.

$$[[K] - \omega^2 [M]][d] = [0] \quad (3.10)$$

(3.10) da verilen lineer homojen denklem takımının, sıfırdan farklı köklere sahip olabilmesi için, katsayılar determinantının sıfır olması gerekmektedir.

$$\text{Det}[[K] - \omega^2 [M]] = 0 \quad (3.11)$$

(3.11) denkleminin özel değer problemi olarak çözülebilmesi için, (3.12) denklemine dönüştürülmesi gereklidir, [38].

$$[M]^{-\frac{1}{2}}[K][M]^{-\frac{1}{2}}[M]^{\frac{1}{2}}[d] - \omega^2[M]^{-\frac{1}{2}}[M][d] = [0] \quad (3.12)$$

(3.12) bağıntısının yeniden düzenlenmesiyle (3.13) denklemi elde edilir.

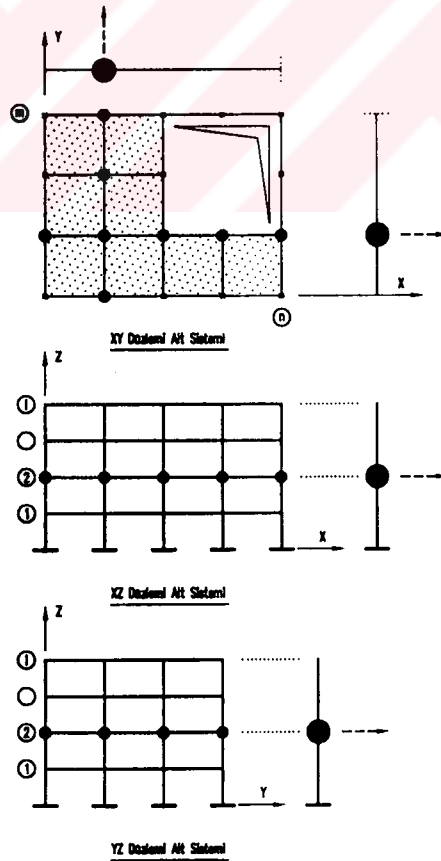
$$[A]\{X\} - \omega^2\{X\} = 0$$

$$[A] = [M]^{-\frac{1}{2}}[K][M]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.13)$$

$$[X] = [M]^{\frac{1}{2}}[d]$$

$$[d] = [M]^{-\frac{1}{2}}\{X\}$$

Özel değer probleminin çözümünü sağlayan (3.13) bağıntısının, Bölüm 3.4 de özetlenen algoritma için kullanımı durumunda; $[K]$, üç boyutlu yapının yatay rijitlik matrisi $[\bar{S}]$ ye; $[M]$ ise gözönüne alınan dinamik serbestlikler doğrultusundaki yığılı kütleleri birleştiren kütle matrisine karşı gelmektedir, Şekil (3.9).



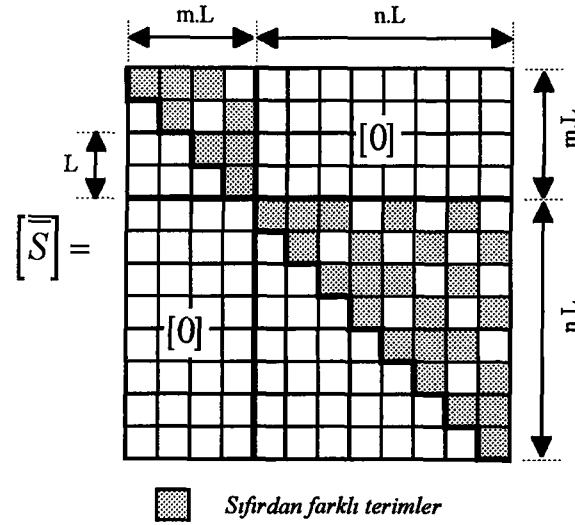
Şekil 3.9 Düzlem Alt Sistemler İle Yapılan Serbest Titreşim Hesabında Kütleler

Seçilmiş olan dinamik serbestlik dereceleri, döşeme düzlem içi şekildeğiştirmelerini ve burulma özelliklerini yansıtmaya yeterlidir.

Serbest titreşim analizinin, bir ardışık yaklaşım hesabına indirgenebileceği bilinmektedir. Uygulamada çok kullanılan birinci moda ait açısal frekans değerine, tek adımda yeter yaklaşımla (3.14) deki *Rayleigh Oranı* ile ulaşılabilir. $\vec{P}_i$ ve $\vec{m}_i$ sırasıyla üç boyutlu yapıda çalışılan serbestlikler doğrultusundaki tekil yük ve kütlelere karşı gelmektedir. $\vec{d}_i$ ise $\vec{P}_i$ yük vektörü etkisindeki üç boyutlu yapının, Bölüm 3.4 de anlatılan algoritma ile çözümlenmesiyle elde edilmiş yerdeğiştirme vektörüdür.

$$\omega^2 = \frac{\sum \vec{P}_i \vec{d}_i}{\sum \vec{m}_i \vec{d}_i^2} \quad (3.14)$$

Bu aşamada, serbest titreşim hesabını basitleştirmek üzere başka bir yol daha önerilebilir. Şekil 3.7 de gösterildiği gibi, $[\bar{S}]$ üç boyutlu yapı yatay rijitlik matrisinde düşey alt sistem yatay rijitlik matrislerinin tamamı ile döşeme düzlem içi şekildeğiştirmelerini hesaba katmaya yönelik olan yatay alt sistem rijitlik matrislerinin hesap sonuçlarını etkileyecek düzeydeki önemli terimleri köşegen üzerine yerleştirirken, yatay alt sistemlerde iki ana doğrultuyu ilişkilendiren $[\bar{S}]_{dxy}$ ve $[\bar{S}]_{dyx}$ matrislerinin terimleri bölünmüş matrisin köşegeni dışında kalmaktadır. $[\bar{S}]_{dxy}$ ve $[\bar{S}]_{dyx}$ matrisleri terimlerinin sıfır alınmasıyla; iki ana doğrultu birbirinden ayrılmış, ancak döşeme düzlem içi şekildeğiştirmelerinin önemli katkıları da korunmuş olmaktadır, Şekil 3.10. Bu işlem yapıldığında, dinamik denge denklemi (3.15) bağıntısında verilen birbirinden ayrı iki yaklaşık özdeğer problemine indirgenmiş olmaktadır. Bu yolla elde edilen büyüklüklerin, genel özdeğer probleminin çözümüyle bulunanlara yeter derecede yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 3.10 Yaklaşık Serbest Titreşim Hesabı İçin, Üç Boyutlu Yapı Yatay Rijitlik Matrisinde İki Ana Doğrultunun Ayrılması

$$\begin{bmatrix} [M]_x & [0] \\ [0] & [M]_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\vec{d}]_x \\ [\vec{d}]_y \end{bmatrix} + \left[\begin{bmatrix} [\overline{S}]_{\varphi x} & [0] \\ [0] & [\overline{S}]_{\varphi y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\overline{S}]_{dx} & [0] \\ [0] & [\overline{S}]_{dy} \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} [d]_x \\ [d]_y \end{bmatrix} = [0] \quad (3.15)$$

Yukarıda sıralanan üç farklı yaklaşım, doğrusal ya da doğrusal olmayan hesabın doğrusallaştırılmış herhangi bir adımı için geçerlidir.

3.6 ÜÇ BOYUTLU BÜYÜK YAPI SİSTEMLERİNDE DOĞRUSAL OLMAYAN ÇÖZÜMLEME İÇİN GELİŞTİRİLEN BİR BİLGİSAYAR PROGRAMI, DOC3B

Malzeme ve/veya geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan ve bazı düzensizlikler içeren üç boyutlu yapı sistemi yatay ve düşey konumlu düzlem alt sistemlere ayrılmakta, bu sistemlerde her tür düzensizlik gözönüne alınarak oluşturulan birim yerdeğiştirme ve yükleme matrisleri bir araya getirilerek, üç boyutlu yapıya ait denklem takımı kurulmaktadır.

Düzlem alt sistemlerin hesabıyla ilgili olarak; Bölüm 2.6 da içerikleri anlatılan DOC2B-1.FOR ve DOC2B-2.FOR programlarında yapılan değişikliklerle, DOC2B-1R.FOR ve DOC2B-2R.FOR programları elde edilmiştir. Bu iki ana programla beraber, geliştirilen diğer küçük programların da içinde bulunduğu gruba **DOC3B** adı verilmiştir. Birbirinden bağımsız olan programlar, DOS işletim sisteminde BAT dosya düzeniyle bir araya getirilip otomatik olarak ard arda çalıştırılmaktadır.

Verilmiş çubuk rijitliklerinden hareketle ya da DOC2B-2R programı tarafından hesaplanmış çubuk birim yerdeğiştirme ve yükleme matrisleri kullanılarak, düzlem alt sistemlere ait $[S]$ sistem rijitlik ve $[Q]$ yükleme matrisleri kurulur. Oluşturulan $[S]$ ve $[Q]$ matrisleri, giriş bilgisinde belirtilen şekilde yeniden sıralama işlemine tabi tutularak, benzer statik serbestlik derecelerinin arka arkaya dizilmesi sağlanmış olur. Yeniden sıralanmış $[S]$ ve $[Q]$ matrisleri, istenilen statik serbestlik derecesine kadar *Gauss İndirgemesi* ile indirgenip, küçültülerek $[\bar{S}], [\bar{Q}]$ matrislerine ulaşılır. İkinci aşama, düzlem alt sistemlere ait $[\bar{S}]_c, [\bar{Q}]_c$ ve $[\bar{S}]_d, [\bar{Q}]_d$ matrislerinin üç boyutlu yapı rijitlik ve yükleme matrislerine $[\bar{S}], [\bar{Q}]$ yerleştirilmesidir. Oluşan $[\bar{S}]$ matrisi simetrik olduğundan sadece üst yarısıyla işlem yapılır.

Üç boyutlu yapıya ait denklem takımının çözümüyle genel yerdeğiştirmelere ulaşılır.

Hesaplanan genel yerdeğiştirmelerden, *yerine koyma işlemleri* ile düzlem alt sistem yerdeğiştirme ve çubuk uç kuvvetlerine geçilir.

Çubuk uç kuvvetlerinden hareketle, her çubukta belirtilen sayıda alt dilim ortalama iç kuvveti hesaplanır. Bu büyüklükler alt dilim sanal rijitliklerinin belirlenmesi için kullanılmaktadır. Çubuk bünye bağıntısı olarak, moment-eğrilik ilişkisi (EMK()) ya da yük-yerdeğiştirme ilişkisi (EPD()) kullanılabilir. Elde edilen değişken rijitlikli çubuğun birim yerdeğiştirme ve yükleme terimleri, geliştirilen ardışık başvuru bağıntıları yardımıyla hesaplanarak DOC2B-1R programı tarafından kullanılmak üzere saklanır.

Birbirini takip eden adımlar arasında; tüm düzlem alt sistem çubuk dilimlerinde, öngörülen rijitlik yaklaşımı sağlanana kadar ardışık yaklaşıma devam edilir.

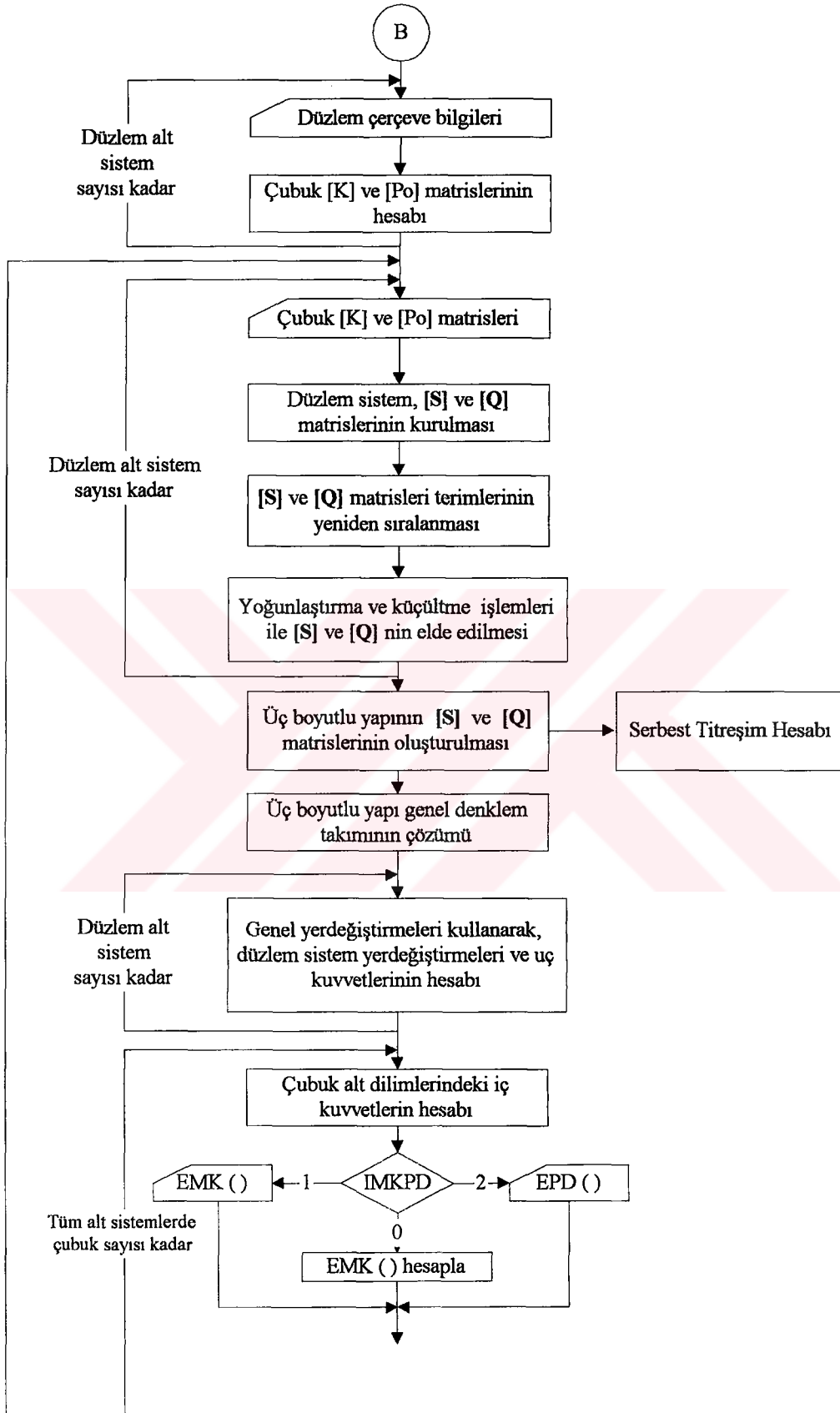
Düzlem alt sistemlerin çubuk dilimlerine ait iç kuvvet, eğrilik, akma eğriliğine oran, en büyük eğriliğe oran gibi büyüklükler dış ortama basılır ve sonuçlar **DUZ-GRF** programı ile de grafik olarak izlenebilir.

DOC3B program grubunun genel akış diyagramı Şekil 3.11 de verilmiştir.

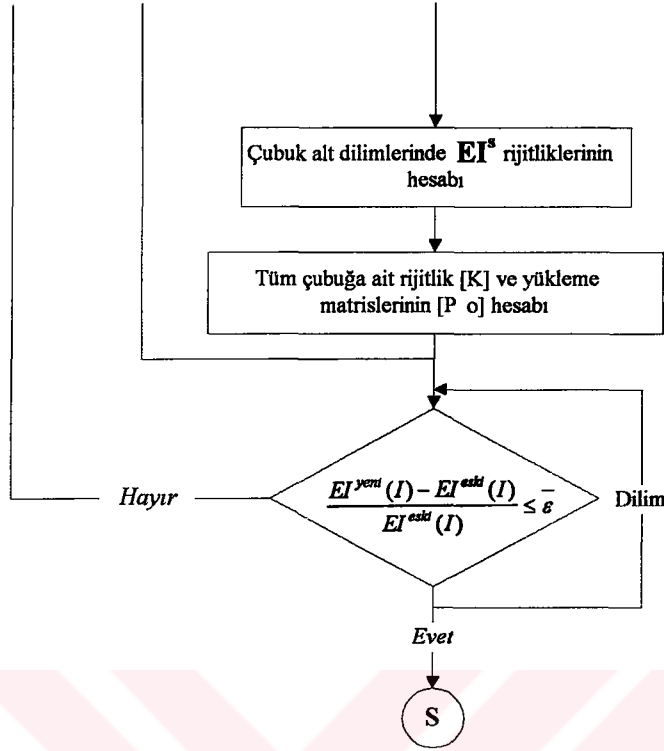
DOC3B programıyla, üç boyutlu büyük yapı sistemlerinin serbest titreşim hesabı da yapılmaktadır. Bu hesap için iki farklı yol izlenebilir:

1. Rayleigh Oranıyla Hesap: Verilen bir yatay yük durumu için statik hesapla belirlenen yerdeğiştirmeler ve ilgili serbestlikler üzerinde yoğunlaştırılmış kütleler kullanılarak, ilk serbest titreşim frekansı yeter doğrulukta hesaplanmaktadır. Özdeğer problemine dönüşüm ve bu problemin çözümü gerekmediği için tercih edilebilir.
2. Üç boyutlu yapı sisteminin $[S]$ yatay rijitlik ve $[M]$ kütle matrislerini kullanarak özdeğer problemi çözmek. Özdeğer probleminin çözümü için literatürde mevcut algoritmalarından yararlanılmaktadır, [38,39]. Bu aşamada iki farklı yol izlenebilir. Bunlardan birincisinde denklem takımı bütün olarak çözülürken; ikinci yaklaşımda (3.15) bağıntısında önerildiği şekilde, iki ana doğrultu birbirinden ayrılarak özdeğer probleminin boyutları küçültülmektedir.

Serbest titreşim hesabında kullanılan $[S]$ yatay rijitlik matrisi, üç boyutlu yapıdaki diğer düzensizliklerle beraber döşeme boşluklarının etkisini de içermektedir. Bu durum genel üç boyutlu programlara karşı önemli bir üstünlüktür. Çünkü bu tür programlarda döşeme boşluklarının dikkate alınabilmesi için, kat seviyelerinde çok sayıda dinamik serbestlik derecesi tanımlamak gerekmektedir. Özdeğer probleminin boyutları büyüdüğünde, çözüm zorlaşmakta bazı durumlarda ise program ve/veya bilgisayar bellek kapasiteleri aşıldığı için sonuç alınamamaktadır.



Şekil 3.11 DOC3B Program Grubu Genel Akış Diyagramı



Şekil 3.11 DOC3B Program Grubu Genel Akış Diyagramı (Devam)

DOC3B programı da, Bölüm 2.6 da anlatılan üç farklı tipteki hesabı yapabilmektedir.

Sistem süneklik oranının tanımı aynı olup; bu büyüklüğün hesabına esas yerdeğiştirmeler, üç boyutlu yapının genel yatay rijitlik özelliklerini temsil edebilecek yerdeğiştirmeler arasından seçilmektedir.

3.7 ÜÇ BOYUTLU YAPI SİSTEMLERİNDE UYGULAMALAR

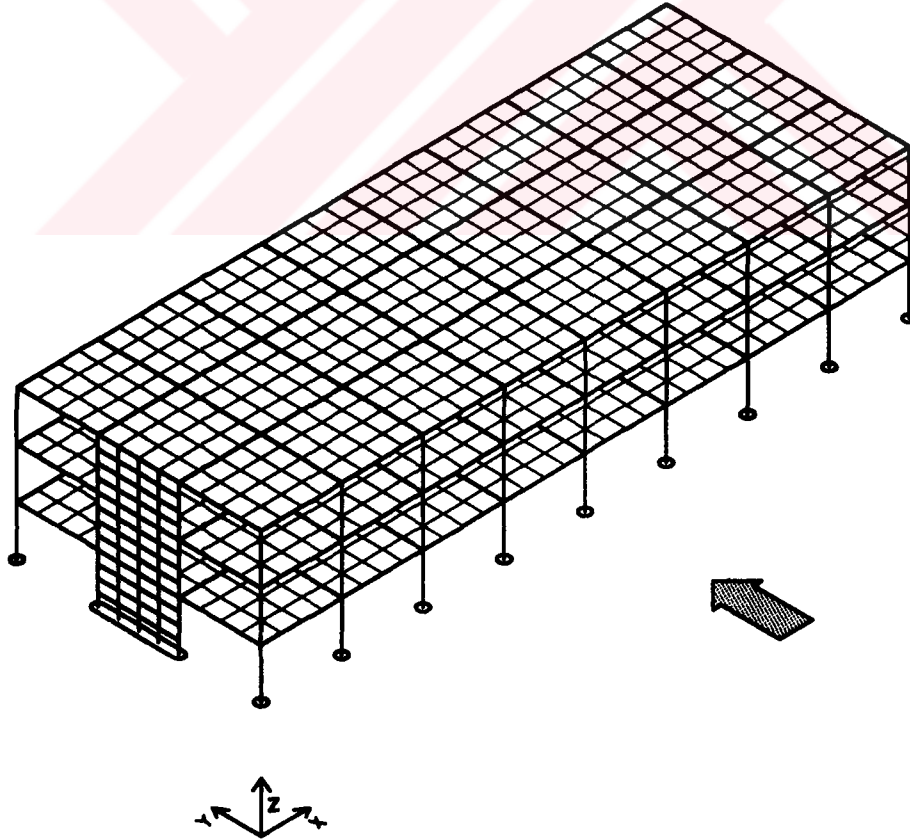
Bu bölümde, geliştirilen programlar ile çözümlenmiş üç yapı sisteminde elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Birinci örnek doğrusal elastik malzemeden yapılmış büyük bir yapı sistemidir. İkinci örnekte, bazı elemanlarında malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışın gözönüne alındığı bir yapı incelenmektedir. Üçüncü örnekte ise yönetmeliklere uygun olarak boyutlandırılmış bir yapıda, iki farklı durum için yapısal süneklik oranları belirlenmektedir.

3.7.1 Örnek 3D-1 Doğrusal Elastik Malzemedan Yapılmış Büyük Yapı Sistemi

Bu örneğin hazırlanmasında üç ana amaç gözetilmiştir. Bunlar ;

- Doğrusal veya herhangi bir yük düzeyinde doğrusallaştırılmış üç boyutlu bir yapı sisteminin çözümünde **DOC3B** programıyla elde edilen sonuçların, doğrusal hesap yapan genel bir programın [40] sonuçlarıyla karşılaştırılması,
- Döşeme boşluklarının, üç boyutlu yapının yatay yükler altındaki davranışını nasıl etkilediğinin örneklenmesi,
- Yapı sisteminin büyümesiyle genel üç boyutlu programların veya bilgisayar kapasitelerinin aşılabildiğini, buna karşın geliştirilen algoritmayla daha büyük sistemlerin çözülebileceğini vurgulamak.

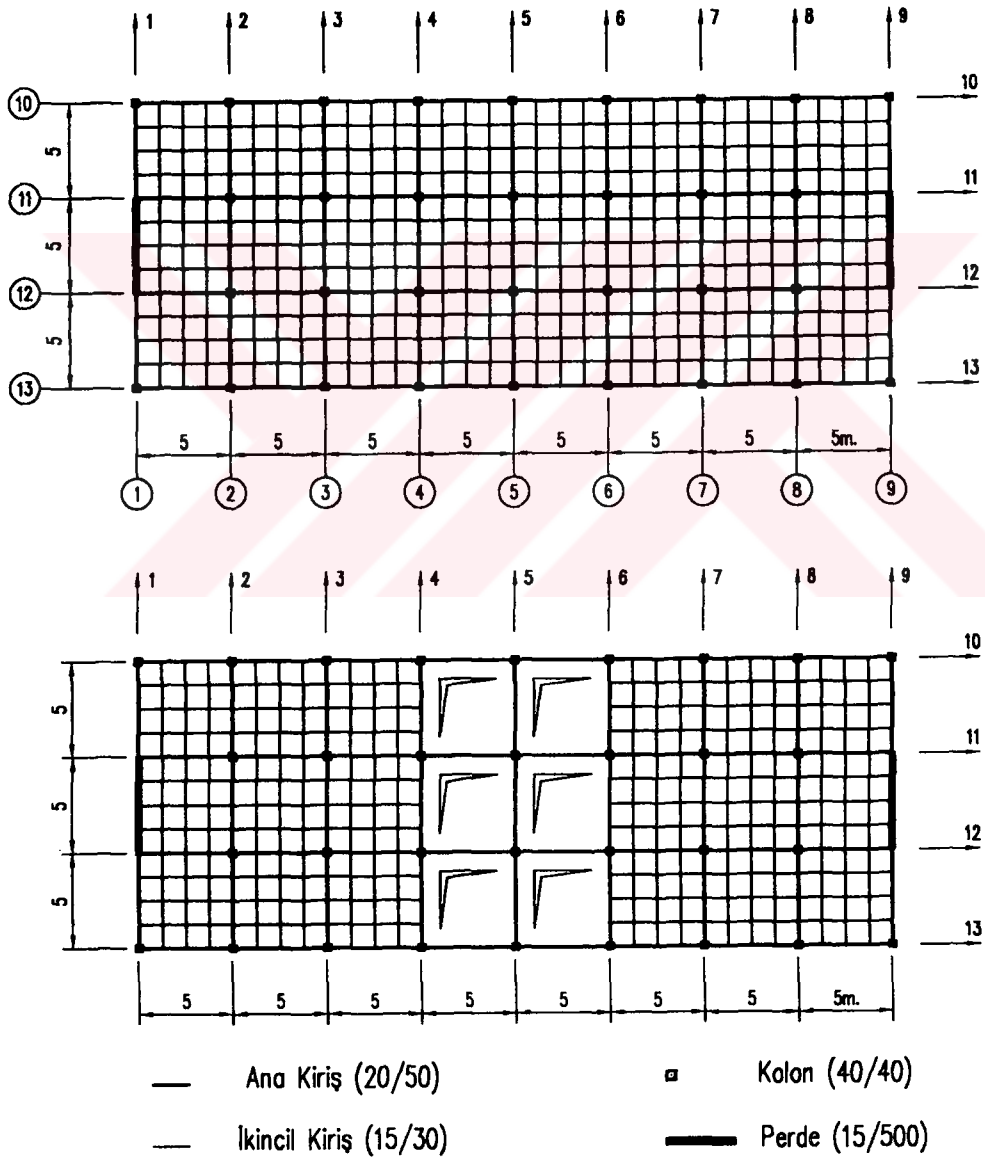
İncelenen yapı sistemi 3 katlı olup, X doğrultusunda 8, Y doğrultusunda 3 açıklık içermektedir. Döşeme ve perdeleri ayrıklaştırılmış, eşdeğer üç boyutlu sistem Şekil 3.12 de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Döşeme ve Perdeleri Ayrıklaştırılmış Eşdeğer Üç Boyutlu Sistem

Yapı sistemi, döşemelerinin rijit olması ve boşluk içermesi durumları için ayrı ayrı incelenmiştir, Şekil 3.13. Şekilde verilen bilgiler yapının her üç katı için de ortak olarak geçerlidir.

Kat seviyelerinde, 5 m. aralıklı ana kirişler ile bunlar arasında 1.25 m. aralıkla yerleştirilmiş ikincil kirişler 8 cm. kalınlıklı döşemeyi taşımaktadırlar. Y doğrultusunda kenar akslara yerleştirilmiş bulunan 15x500 cm. kesitli perdelerin dışındaki tüm düşey elemanlar 40x40 cm. kesitli kolonlardır.



Şekil 3.13 Tipik Kat Planları

Döşeme ve perde gibi tüm iki boyutlu ortamlar çubuklaştırılmıştır, Şekil 3.12. Döşeme kirişlerinin düzleme dik doğrultudaki eğilme rijitliklerinin hesabında TS500 [22] de verilen etkili tabla genişliği bağıntıları kullanılmıştır. Döşeme düzleminde ise, ilgili doğrultudaki döşeme kesiti rijitlik değeri bu doğrultudaki çubuk sayısına bölünerek, çubuklara dağıtılmıştır. Mekanik modelde kullanılan çubuk özellikleri Tablo 3.1 de özetlenmiştir.

İlk paragrafta belirtilen amaçları gerçekleştirmek üzere 7 ayrı çözüm yapılmış olup; kullanılan program, yapı türü ve yüklemeyle ilgili bilgiler Tablo 3.2 de özetlenmiştir.

Tablo 3.1 Örnek 3D-1 Çubuk Mekanik Büyüklükleri

	Çubuk	EF [kN]	EI ₁ [kNm ²]	Rijit Döşeme	Boşluklu Döşeme
				EI ₂ [kNm ²]	EI ₂ [kNm ²]
1	Y doğrultusu ana kiriş(kenar)	3648000x500	87294.0	573341410.0	85872690.0
2	Y doğrultusu ana kiriş (ara)	4446000x500	105344.0	573341410.0	85872690.0
3	Y doğrultusu ikincil kiriş	2878500x500	19074.1	573341410.0	85872690.0
4	X doğrultusu ana kiriş(kenar)	3648000x500	87294.0	85872690.0	85872690.0
5	X doğrultusu ana kiriş (ara)	4446000x500	105344.0	85872690.0	85872690.0
6	X doğrultusu ikincil kiriş	2878500x500	19074.1	85872690.0	85872690.0
7	Kolonlar	4560000.0	60705.0	60705.0	60705.0
8	Perde yatay çubuk (ara)	3206250.0	21642190.0	0.1	0.1
9	Perde dikey çubuk (ara)	4275000.0	8906250.0	0.1	0.1
10	Perde dikey çubuk (kenar)	4275000.0	8906250.0	20040.0	20040.0
11	Perde yatay çubuk (kenar)	3648000x500	21642190.0	573341410.0	85872690.0
12	Delikten geçen kiriş (ara)	4446000x500*	105344.0*	x	146487.0
13	Delikten geçen kiriş (kenar)	3648000x500*	87294.0*	x	64780.5

* Bu değerler boşluklu döşemeli yapıda kullanılmıştır.

Tablo 3.2 Örnek 3D-1 İçin Yapılan Çözümler

Çözüm	Program	Sistem	Yükleme
1	SAP90	Döşeme boşluksuz	Statik
2	SAP90	Döşeme boşluklu	Statik
3	DOC3D	Döşeme boşluksuz	Statik
4	DOC3D	Döşeme boşluklu	Statik
5	SAP90	Döşeme boşluksuz	Serbest titreşim
6	DOC3D	Döşeme boşluksuz	Serbest titreşim
7	DOC3D	Döşeme boşluklu	Serbest titreşim

Çözüm #1 de SAP90 [40] programı için hazırlanan mekanik model, **1569** adet düğüm noktası ve **2916** adet çubuk eleman içermektedir. Bu çözümde, her düğüm noktasında üçü doğrusal üçü de dönme olmak üzere toplam 6 adet bilinmeyen kullanılmış olup toplam bilinmeyen sayısı **9414** dır. Bu değer SAP90 programının çözüm yapabildiği en büyük bilinmeyen sayısı olan 10000'e yakındır.

Çözüm #3, #4, #6 ve #7 de **DOC3B** programı kullanılarak çözüm yapılmıştır. Bu çözümlerde, yapı toplam 16 adet düzlem alt sisteme ayrılmaktadır. Bu alt sistemlerin 4 adedi X doğrultusundaki çerçevelere, 9 adedi Y doğrultusundaki çerçevelere ve 3 adedi de kat döşemelerine karşı gelmektedir, Şekil 3.14.

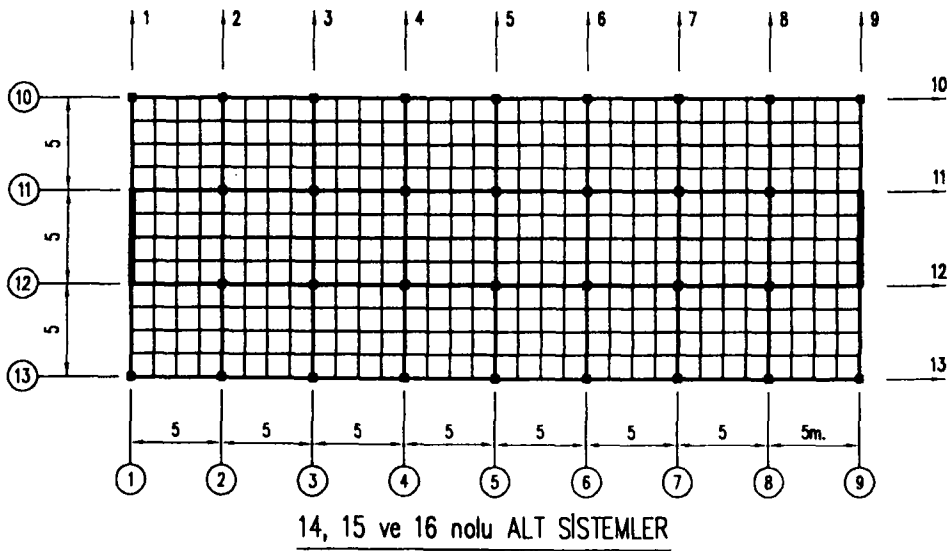
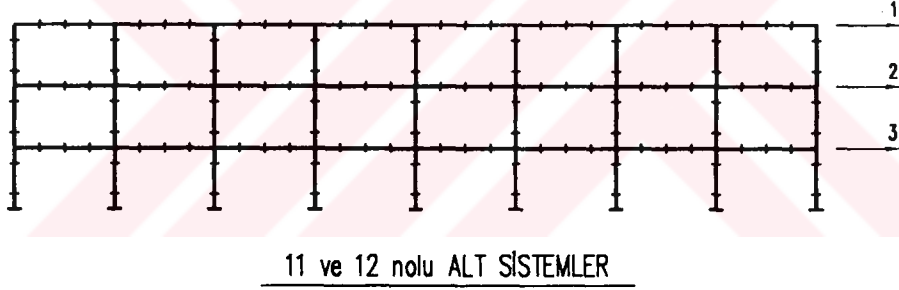
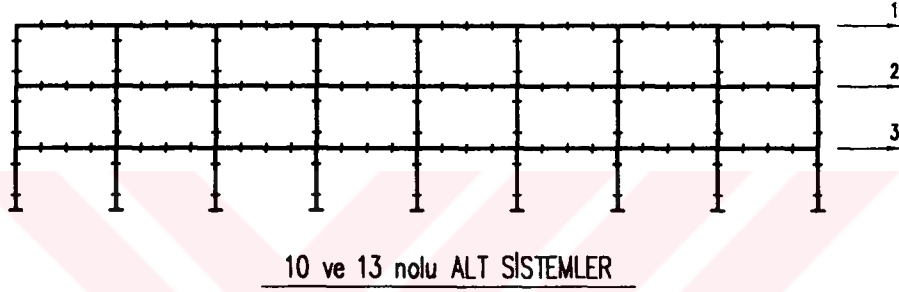
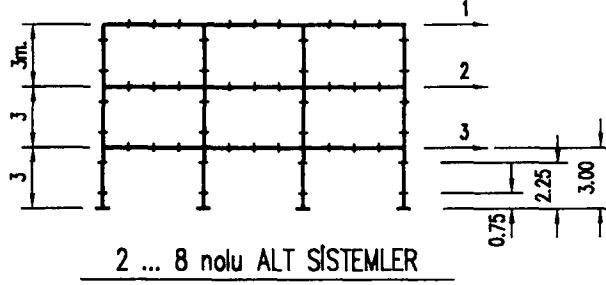
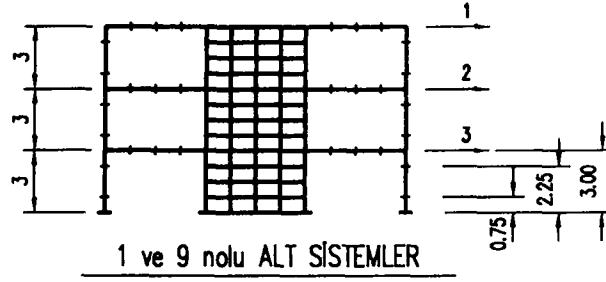
X doğrultusundaki alt sistemlerde (10,11,12,13), 153 adet düğüm noktası ve 177 adet çubuk eleman bulunmaktadır. Y doğrultusunda; kenar akslarda (1 ve 9), 96 düğüm noktası ve 150 çubuk eleman; orta akslarda (2,3,...,7,8) ise 63 düğüm noktası ve 72 çubuk eleman yer almaktadır. Döşeme alt sistemlerinde (14,15,16) ise 429 düğüm noktası ve 812 çubuk eleman bulunmaktadır.

Kiriş eksenel şekildeğiştirmeleri terk edildiğinden; her döşeme seviyesinde 13, yapının tümünde ise 39 adet bilinmeyen mevcuttur, Şekil 3.13.

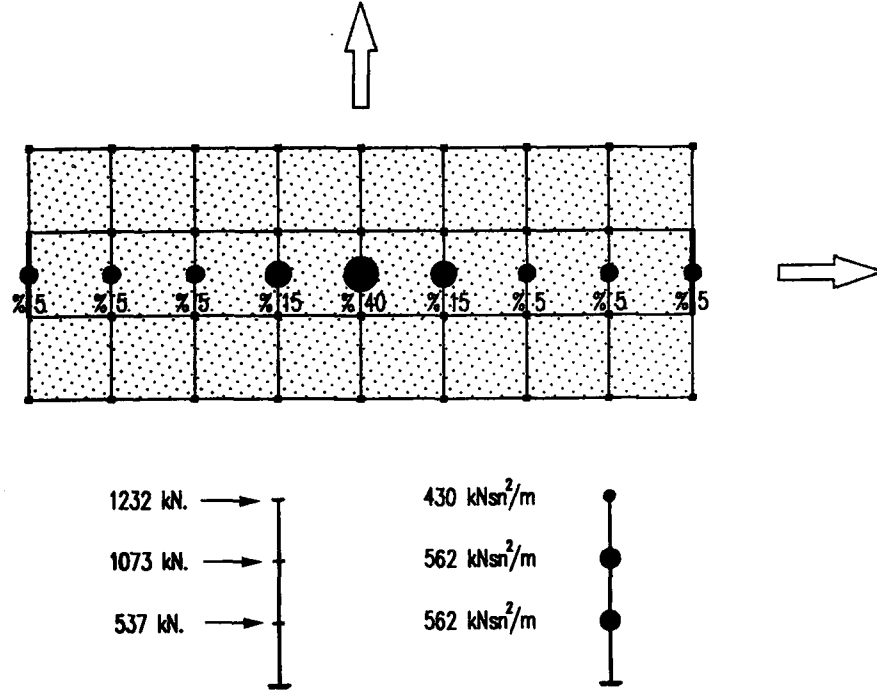
Statik yükleme ve serbest titreşim hesabında kullanılan, kat hizalarında toplanmış eşdeğer deprem yükleri ile kütleler ve bunların yapı planındaki dağılımları Şekil 3.15 de gösterilmiştir.

Rijit döşemeli durumda, **DOC3B** programı ile hesaplanan alt sistem yatay rijitlik matrisleri Tablo 3.3 de verilmektedir.

Çözüm #1 ve Çözüm #3 de elde edilen sonuçlar Şekil 3.16 da karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırma için 5 aksı çerçevesi ile 1 aksı perdesi kullanılmıştır. Şekil 3.16 dan, iki programın ürettiği sonuçların oldukça yakın olduğu gözlenmektedir.



Şekil 3.14 Örnek 3D-1 i Oluşturan Düzlem Alt Sistemler



Şekil 3.15 Eşdeğer Statik Deprem Yükleri, Kat Kütleleri ve Plandaki Dağılımları

Döşemelerinde büyük boşluklar bulunan ikinci tip yapıda her iki programla elde edilen sonuçlar Şekil 3.17 de karşılaştırılmıştır. Çözüm #2 ve Çözüm #4 de ulaşılan sonuçların birbirlerine çok yakın olduğu gözlenmektedir.

Döşeme boşluklarının iç kuvvet dağılımına olan etkisi, Çözüm #3 ve Çözüm #4 de elde edilen sonuçların karşılaştırılmasıyla anlaşılabilir. Kat planındaki dağılımları Şekil 3.15 de verilen yatay yükler, rijit döşemeli yapıda yatay rijitliği yüksek olan kenar akslara aktarılabilmekte ve ara çerçevelerde küçük iç kuvvetler oluşmaktadır. Buna karşılık boşluklu döşemeli yapıda, 5 nolu çerçevenin iç kuvvetleri önemli miktarda artmakta, büyük yatay rijitlikli kenar akslarda oluşan iç kuvvetler ise azalmaktadır. Belirtilen davranış farkı, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17 deki bazı iç kuvvetlerin karşılaştırılmasıyla kolayca görülebilir.

1 Aksı perdesi taban kesitinde oluşan kesme kuvveti miktarı;

$$\text{Çözüm \#3 de } Q_1 = 1358.4 \text{ kN}$$

$$\text{Çözüm \#4 de } Q_1 = 1281.9 \text{ kN}$$

Tablo 3.3 Örnek 3D-1 Alt Sistem Yatay Rijitlik Matrisleri

1 ve 9 NUMARALI ALT SİSTEMLER			
646562.9	-1439427.7	1022950.3	
	3896260.9	-3938252.5	x10
		6851399.6	

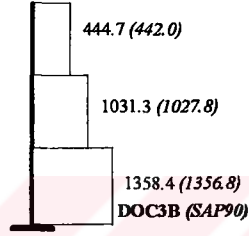
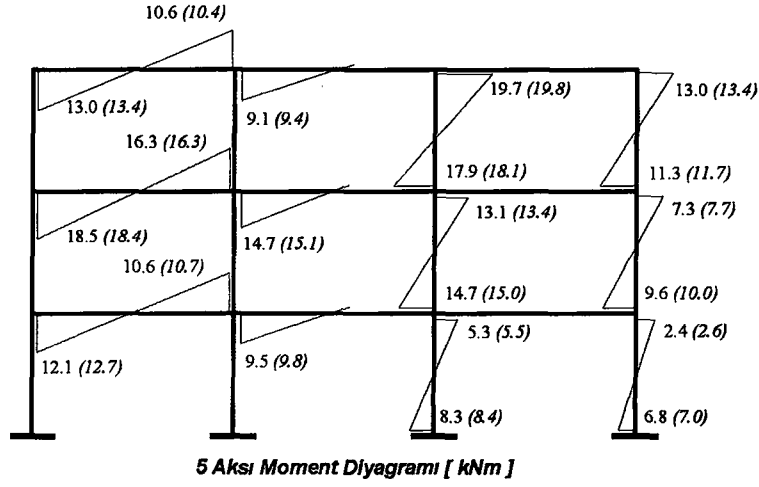
2,3,7,...,7,8 NUMARALI ALT SİSTEMLER	6730.0	-8215.0	1687.0
		16981.4	-10697.9
			19546.7

10 ve 13 NUMARALI ALT SİSTEMLER	15335.7	-18645.6	3760.0
		38430.0	-24088.6 x10
			44058.4

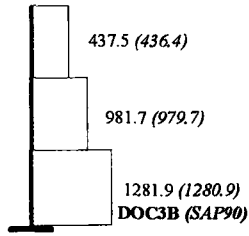
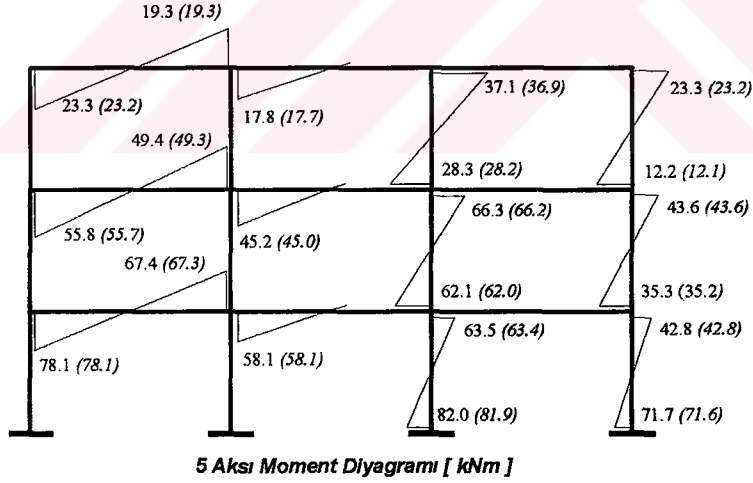
14609.4	-17034.4	2678.7
	34670.4	-20599.8
		38297.9

14 ve 15 NUMARALI ALT SİSTEMLER x10

[illegible]



Şekil 3.16 Çözüm #1 ve Çözüm #3 ün Karşılaştırılması



Şekil 3.17 Çözüm #2 ve Çözüm #4 ün Karşılaştırılması

değerlerini almaktadır. 5 aksı çerçevesi kolon taban kesitlerinde oluşan moment değerleri ise;

$$\text{Çözüm \#3 de } M_{\text{kenar}} = 6.8 \text{ kNm} , M_{\text{orta}} = 8.3 \text{ kNm}$$

$$\text{Çözüm \#4 de } M_{\text{kenar}} = 71.7 \text{ kNm} , M_{\text{orta}} = 82.0 \text{ kNm}$$

olmaktadır.

Büyük döşeme boşluklu yapı sisteminin davranışını rijit döşemeli yapıya yaklaştırmak için alınabilecek iki önlem, mümkün oluyorsa en üst kat döşemesini rijit yapmak ya da katlarda delik çevresi kirişlerini döşeme düzleminde rijitleştirmektir.

Delik çevresi kirişlerinin döşeme düzlemindeki rijitliklerinde yapılan artışın genel yapı davranışına olan etkisi parametrik olarak irdelenmiştir. Karşılaştırma için daha önce de kullanılan, 1 aksı perdesi taban kesme kuvveti ile 5 aksı çerçevesi kolon taban momentleri kullanılmaktadır.

Delik bölgesindeki kenar kirişlerin döşeme düzlemindeki rijitlikleri;

10 kez büyültüldüğünde;

$$Q_1 = 1333.1 \text{ kN} , M_{\text{kenar}} = 27.5 \text{ kNm} , M_{\text{orta}} = 31.5 \text{ kNm}$$

20 kez büyültüldüğünde;

$$Q_1 = 1343.4 \text{ kN} , M_{\text{kenar}} = 18.6 \text{ kNm} , M_{\text{orta}} = 21.6 \text{ kNm}$$

Delik bölgesindeki tüm kirişlerin döşeme düzlemindeki rijitlikleri;

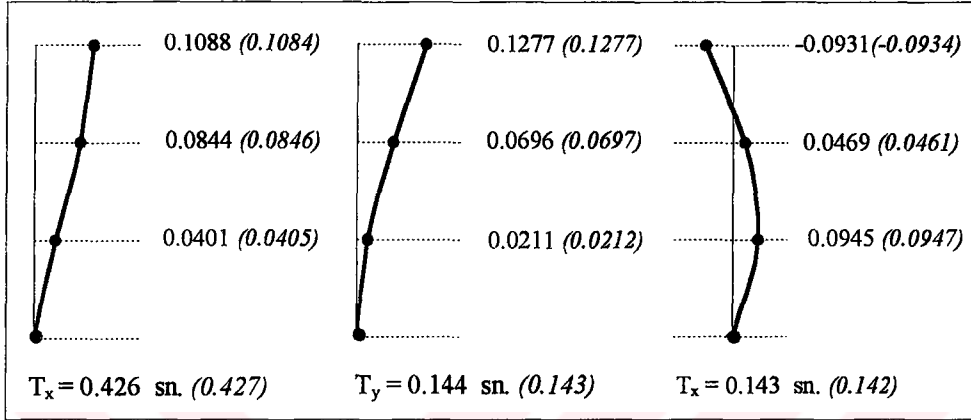
10 kez büyültüldüğünde;

$$Q_1 = 1347.5 \text{ kN} , M_{\text{kenar}} = 15.0 \text{ kNm} , M_{\text{orta}} = 17.5 \text{ kNm}$$

değerlerine ulaşılmaktadır. Sayısal değerlerden anlaşıldığı gibi, delik çevresi kirişlerinin döşeme düzlem içi rijitlikleri arttırıldıkça rijit döşemeli yapı davranışına yaklaşılmaktadır.

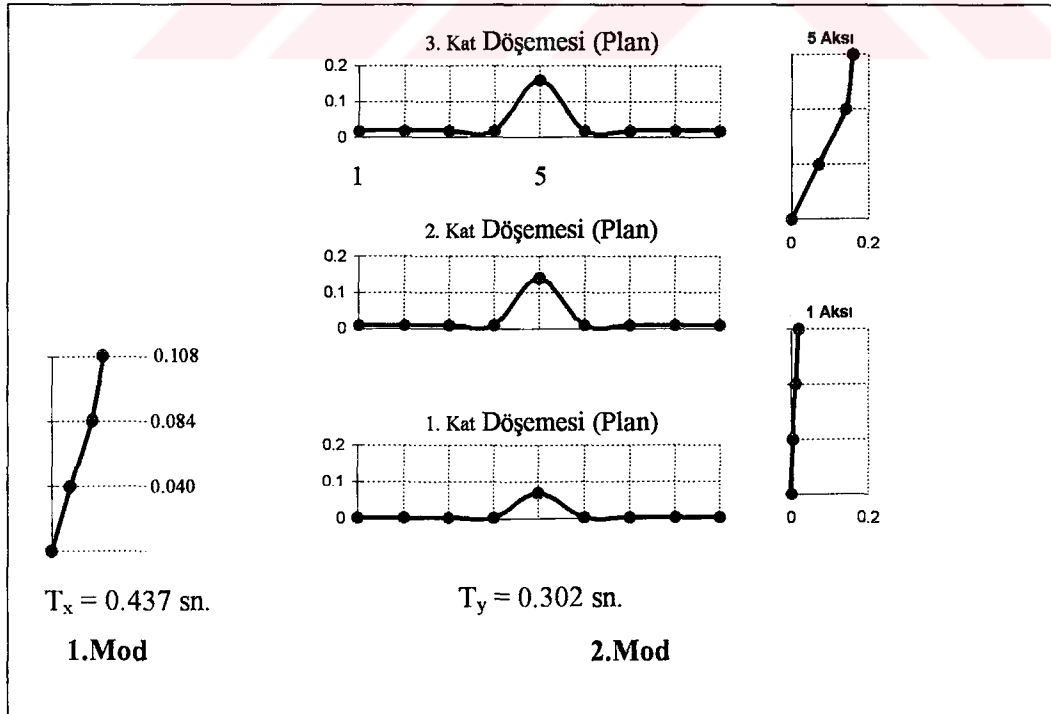
Çözüm #5, #6 ve #7 de, sırasıyla rijit döşemeli ve boşluklu döşemeli yapıların serbest titreşim özellikleri belirlenmektedir. Serbest titreşim hesabında kullanılan kat kütleleri

ve bunların plandaki dağılımları Şekil 3.15 de verilmiştir. Çözüm #5 de, rijit döşeme davranışı nedeniyle her kat seviyesinde iki ötelenme ve bir dönme serbestliği esas alınmıştır. Rijit döşemeli durumda her iki programla ulaşılan ilk üç titreşim moduna ait büyüklükler Şekil 3.18 de verilmektedir. Parantez içinde verilen değerler, SAP90 [40] programına ait sonuçlardır.

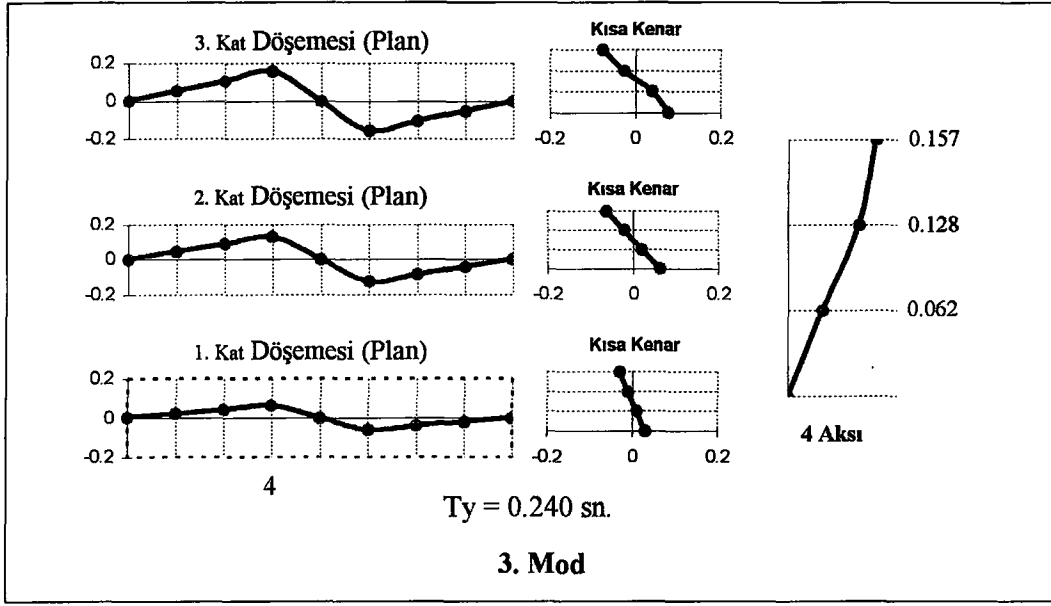


Şekil 3.18 Rijit Döşemeli Yapıda Serbest Titreşim Özellikleri

Döşemesinde büyük boşluklar bulunan yapıda, **DOC3B** programıyla hesaplanan serbest titreşim özellikleri Şekil 3.19 da yer almaktadır.



Şekil 3.19 Boşluklu Döşemeli Yapıda Serbest Titreşim Özellikleri



Şekil 3.19 Boşluklu Döşemeli Yapıda Serbest Titreşim Özellikleri (devam)

Şekil 3.19 dan izlendiği gibi, döşeme boşlukları periyotların uzamasına ve titreşim mod şekillerinin değişmesine neden olmuştur.

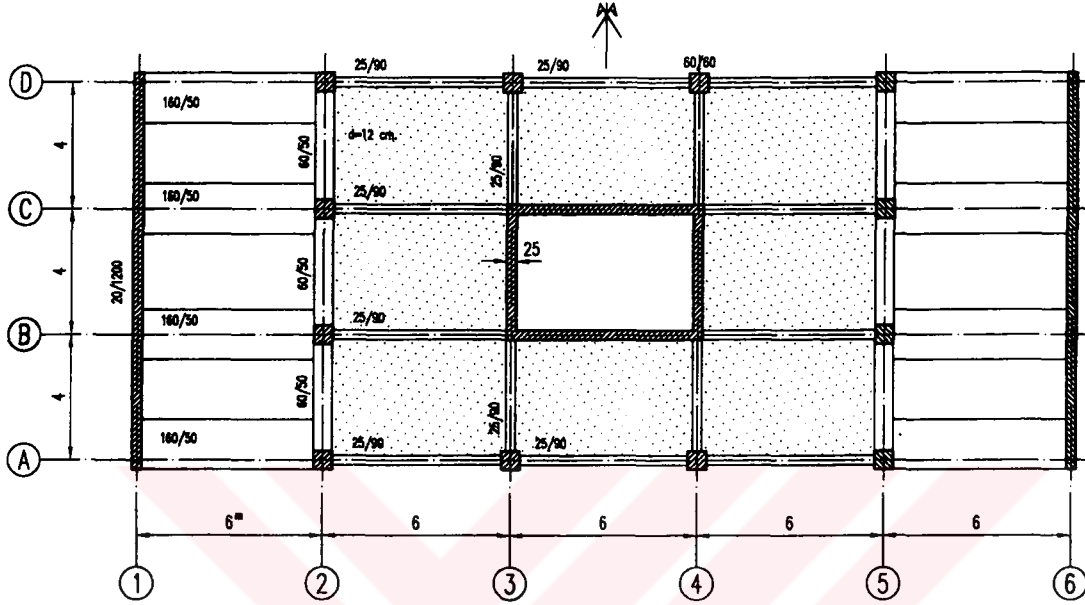
3.7.2 Örnek 3D-2 Çok Katlı Bir Yapıda Büyük Döşeme Boşlukları İçeren Alt Katların Yatay Yükler Etkisindeki Davranışı

Çok katlı bir yapının büyük döşeme boşlukları içeren alt iki katı, bazı elemanların malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışı da gözönüne alınarak yatay yükler etkisinde incelenmiştir.

Söz konusu yapı sistemi, planda daha geniş olan alt iki kat ile bu bölümün merkezindeki çekirdek üzerinde yükselen 18 katlı bir kuleden oluşmaktadır. Kule bölümü inceleme kapsamı dışında bırakılmış olup, alt yapıya olan etkisi belirli bir yaklaşıklıkla, deprem hareketi sırasında kule tabanında oluşan iç kuvvetlerin alt bölüme aktarılmasıyla dikkate alınmaktadır.

Yapının alt iki katı için geçerli olan kalıp planı Şekil 3.20 de verilmiştir. Yatay rijitliği çok büyük olan perdeler kenar akslara yerleştirilmiş durumdadır. Yapının plandaki

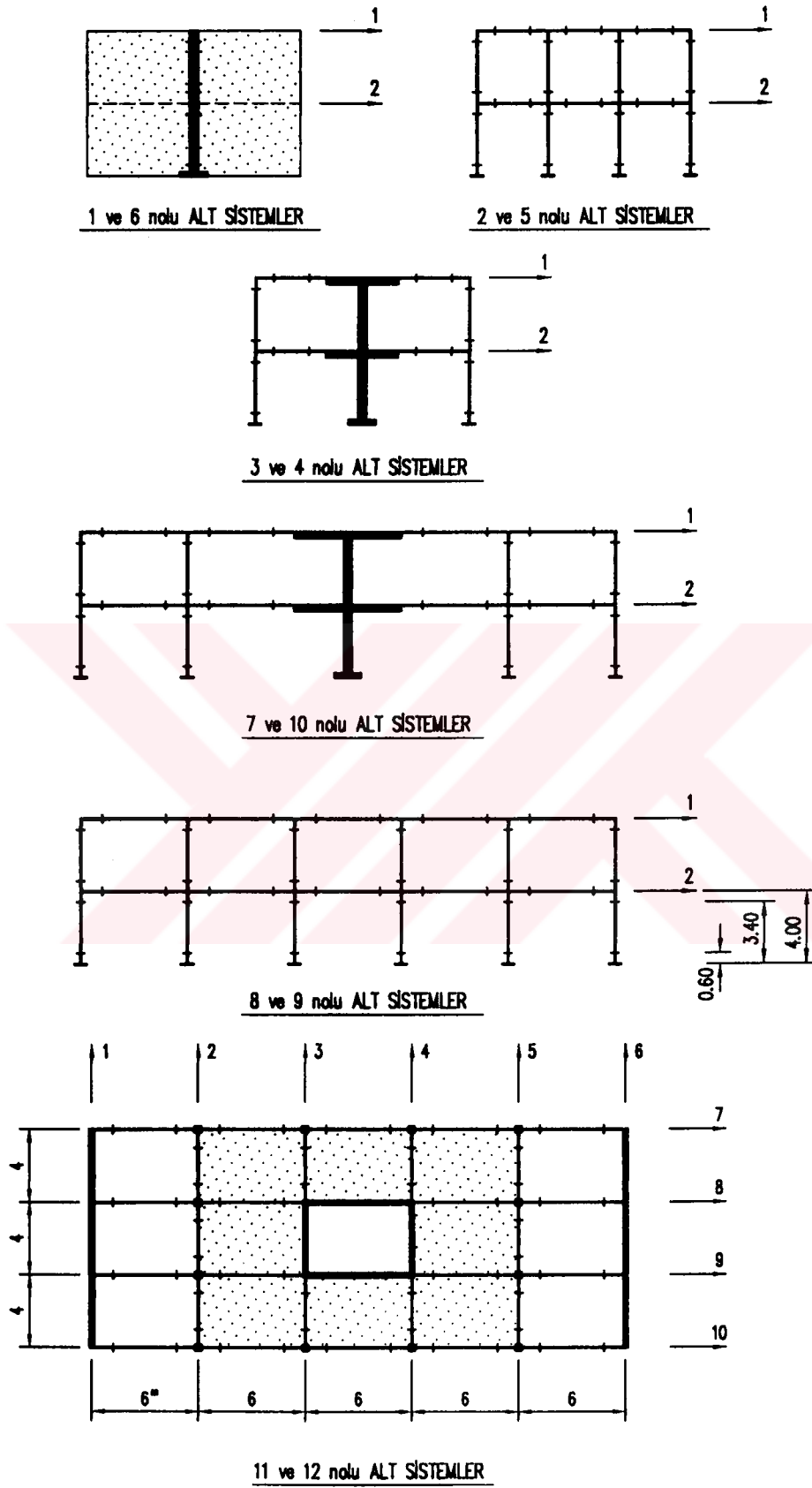
merkezinde, kulenin de yatay yük taşıyıcısı olan çekirdek yer almaktadır. Perde türü bu elemanlar dışında, aks kesişim noktalarına 60x60 cm. kesitli kolonlar yerleştirilmiştir. 1-2 ve 5-6 aksları arasında büyük döşeme boşlukları bulunmaktadır.



Şekil 3.20 Örnek 3D-2 Tipik Kalıp Planı

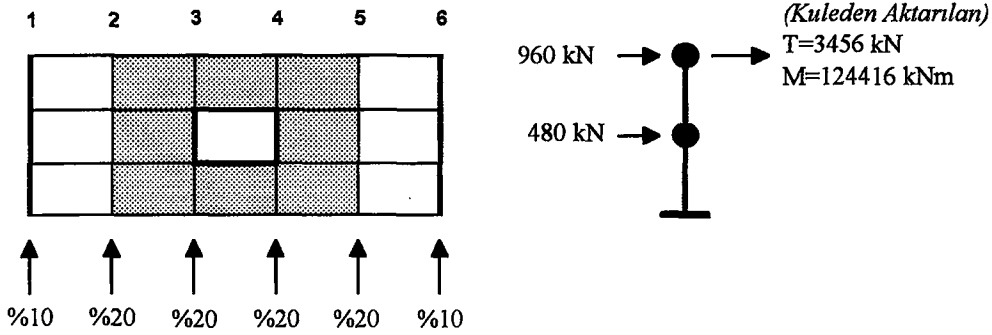
DOC3B programı için hazırlanan mekanik model Şekil 3.21 de verilmiştir. Çözüm için 12 adet düzlem alt sistem kullanılmaktadır. Bu alt sistemlerin 6 tanesi Y, 4 tanesi de X doğrultusundaki yatay yük taşıyıcı düşey alt sistemler, diğer 2 tanesi ise kat hizalarındaki yatay yük taşıyıcı alt sistemlerdir. Düşey alt sistemlerin kat hizalarındaki yatay yerdeğiştirmeleri, üç boyutlu sistemin genel bilinmeyenlerini teşkil etmektedir. Üç boyutlu yapı sisteminin toplam bilinmeyen sayısı 20 dir.

Üç boyutlu yapı sistemi Y doğrultusunda etkiyen eşdeğer deprem yüklerine maruzdur. Yüklerin şiddetleri ve etkiye noktaları Şekil 3.22 de gösterilmiştir. Kuleden aktarılan yükler 3 ve 4 nolu akslar arasında %50 oranında paylaştırılmaktadır. Düşey yüklerin kullanılmadığı bu örnekte, düşey yükten oluşan kolon eksenel kuvvetleri yaklaşık olarak hesaba katılmıştır.



Şekil 3.21 Örnek 3D-2 yi Oluşturan Düzlem Alt Sistemler

Gerek yükleme gerekse çubuk kesit özellikleri dolayısıyla, sistemdeki bazı elemanlar malzeme bakımından doğrusal bölgede kalmaktadır. Bunlar; yüklemeye dik doğrultudaki düşey alt sistemlere (A,B,C,D aksları) ait çubuklar, yükleme doğrultusundaki alt sistemlerde bulunan perde ve çekirdek türü eğilme rijitliği çok yüksek elemanlar ve dolu döşeme bölümleri olarak sıralanabilir. Bu elemanlara ait rijitlik değerleri Tablo 3.4 de verilmektedir.



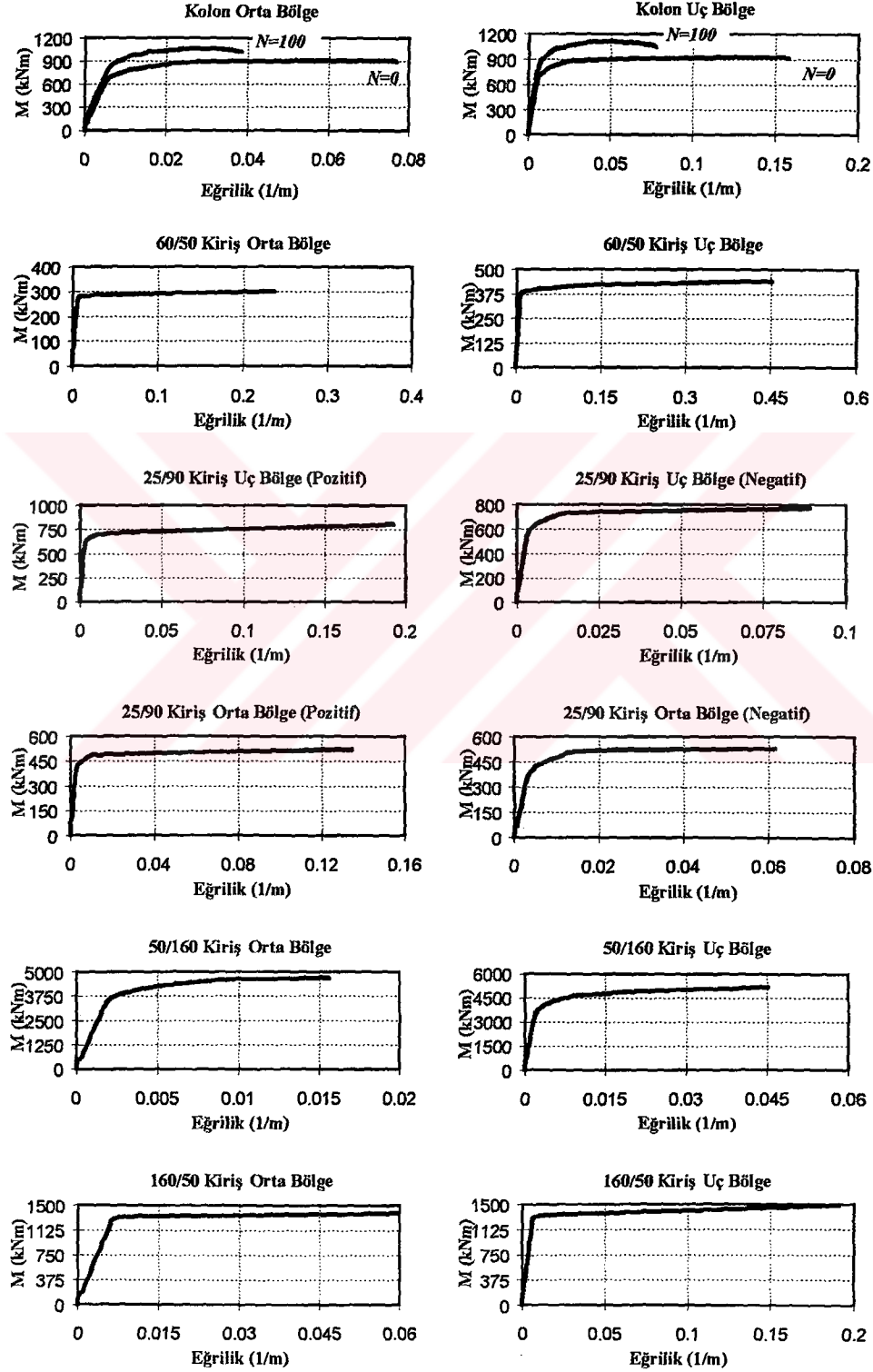
Şekil 3.22 Örnek 3D-2 de Kullanılan Yatay Yükler ve Plandaki Dağılımları

Tablo 3.4 Örnek 3D-2 de Doğrusal Bölgede Kalması Öngörülen Elemanlara Ait Rijitlik Değerleri

Alt Sistem	Eleman	EI (kNm ²)	EF (kN)
1 ve 6	Perde	820,800,000.0	68,400,000.0
3 ve 4	Perde	131,190,920.0	51,656,250.0
7 ve 10	Kolon	379,462.0	10,260,000.0
	Perde Zayıf Yön	38,000.0	11,400,000.0
	Kiriş (Açıklık)	782,210.0	8,977,500.0
	Kiriş (Mesnet)	823,830.0	8,977,500.0
	Delik Kenarı Kirişi	595,960.0	22,800,000.0
8 ve 9	Kolon	379,462.0	10,260,000.0
	Perde Zayıf Yön	76,000.0	22,800,000.0
	Kiriş (Açıklık)	782,210.0	8,977,500.0
	Kiriş (Mesnet)	823,830.0	8,977,500.0
	Delik Kenarı Kirişi	595,960.0	22,800,000.0
	Çekirdek	337,444,850.0	65,906,000.0
11 ve 12	Delik Kenarı Kirişi	5,955,930.0	22,800,000.0
	A-D Aks. arası döşeme	242,107,500.0	16,031,250.0
	A-B ve C-D Aks. arası döşeme	32,327,550.0	12,611,250.0
	Perde zayıf yön	19,000.0	5,700,000.0
	2-5 Aksları arası döşeme	746,700,000.0	21,945,000.0
	2-3, 4-5 Akslar arası döşeme	89,775,000.0	16,800,750.0

Perde ve döşeme parçalarında $GF' = 0.35EF$ ($\nu = 0.20$, $F' = 0.833F$)

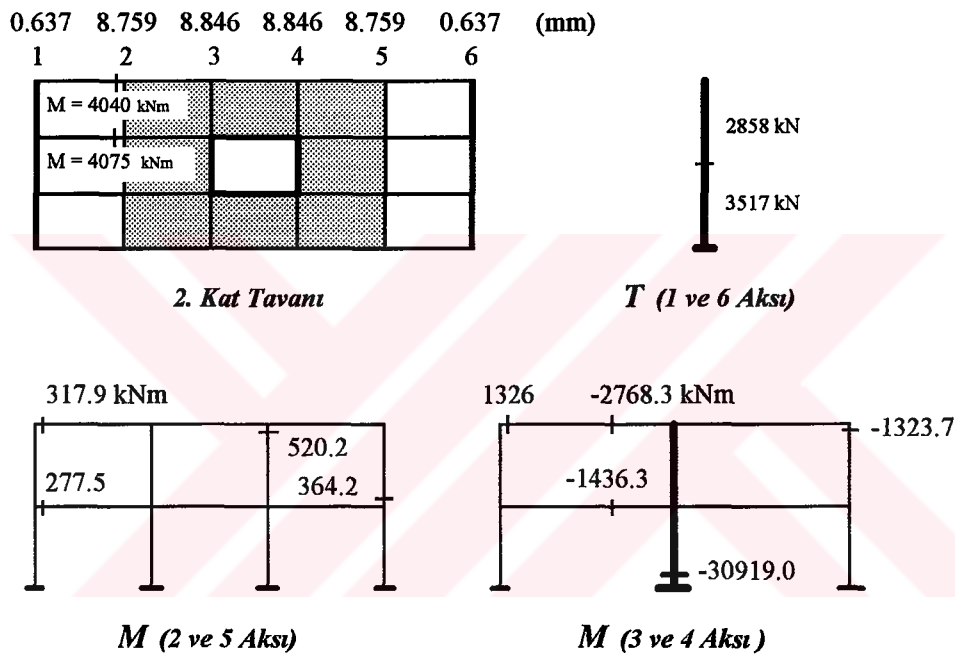
Bunların dışında kalan tüm elemanların doğrusal olmayan davranışı moment-eğrilik ilişkileriyle hesaba katılmaktadır. **M-KAPA** programıyla oluşturulan moment-eğrilik ilişkileri Şekil 3.23 de verilmiştir.



Şekil 3.23 Örnek 3D-2 de Kullanılan Moment-Eğrilik İlişkileri

Özellikleri yukarıda sıralanan yapı sisteminde iki ayrı çözüm yapılmıştır. Bunlar;

Çözüm #1 : Yapı sisteminin bütünüyle doğrusal davrandığı varsayılmıştır. Moment-eğrilik ilişkilerinde başlangıç rijitlikleri kullanılmaktadır. Hesap sonucu elde edilen 2. kat yatay yerdeğiştirme dağılımı ve kritik bazı kesitlerdeki iç kuvvetler Şekil 3.24 de verilmektedir. Bu iç kuvvetlerin Şekil 3.23 de verilen moment-eğrilik ilişkileriyle karşılaştırılmasıyla, bazı kesitlerdeki momentlerin kesit dayanımlarından büyük olduğu görülmektedir. Bu tür elemanlar 3 ve 4 nolu akslar üzerinde yoğunlaşmıştır.

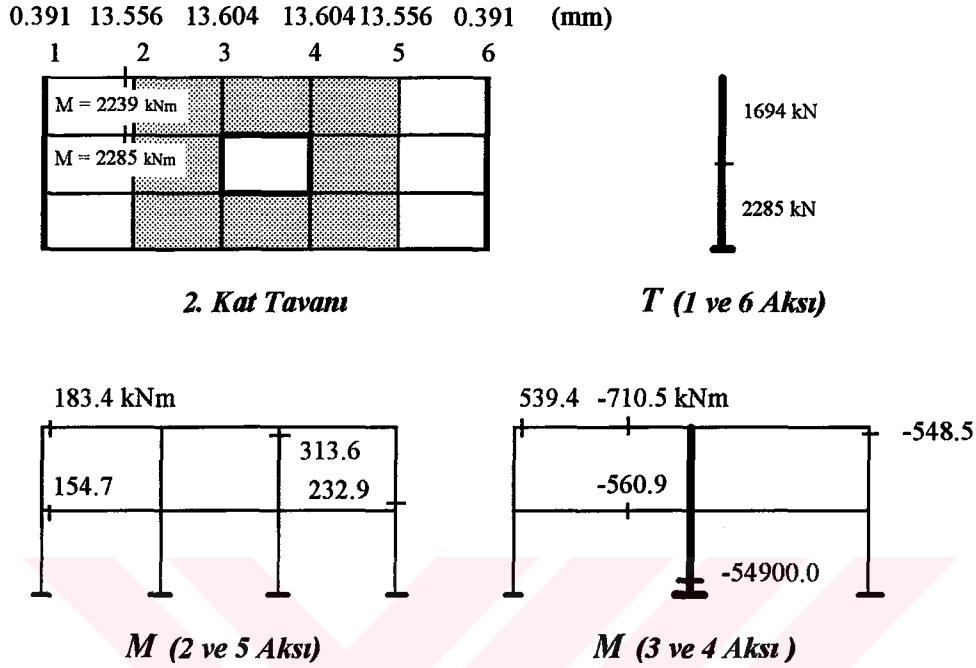


Şekil 3.24 Örnek 3D-2 Çözüm #1 de Elde Edilen Yerdeğiştirme ve Bazı İç Kuvvetler

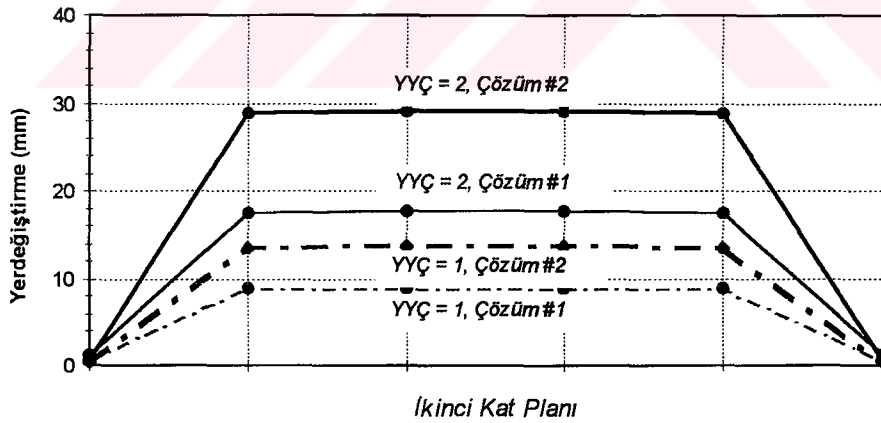
Çözüm #2 : Şekil 3.23 de sıralanan elemanlarda, doğrusal olmayan davranışın dikkate alınması durumunda ortaya çıkan yerdeğiştirme ve iç kuvvet dağılımı da Şekil 3.25 de verilmiştir.

İkinci kat tavanında yükleme doğrultusunda ortaya çıkan yerdeğiştirme dağılımı, yatay yük çarpanının (YYÇ) 1.0 ve 2.0 değerleri için Şekil 3.26 da karşılaştırılmıştır. Şekilden izlendiği gibi, elastik ve elastoplastik çözümler arasındaki yerdeğiştirme farkı yatay yük parametresinin büyümesiyle daha da artmaktadır.

2 nolu aksın ikinci kat tavanı hizasında, her iki çözümle elde edilen yatay yük çarpanı - yerdeğiştirme ilişkileri de Şekil 3.27 de verilmektedir.



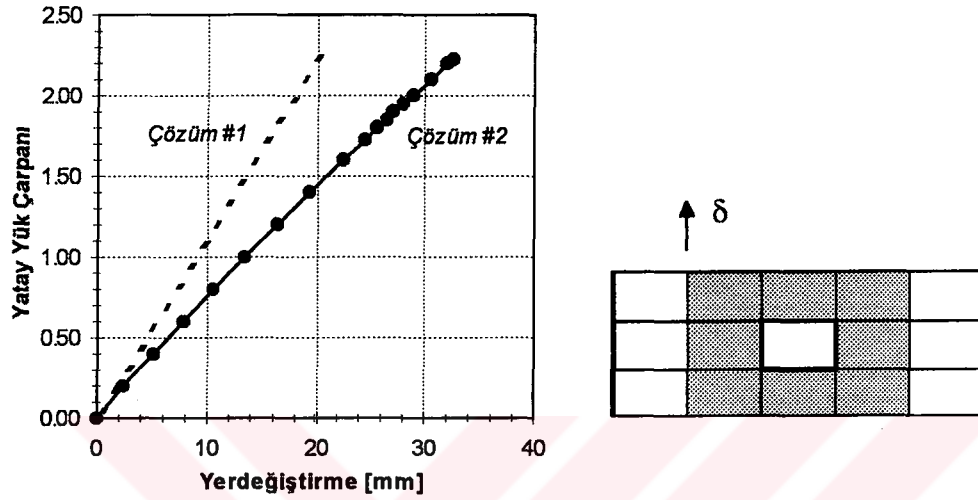
Şekil 3.25 Örnek 3D-2 Çözüm #2 de Elde Edilen Yerdeğiştirme ve Bazı İç Kuvvetler



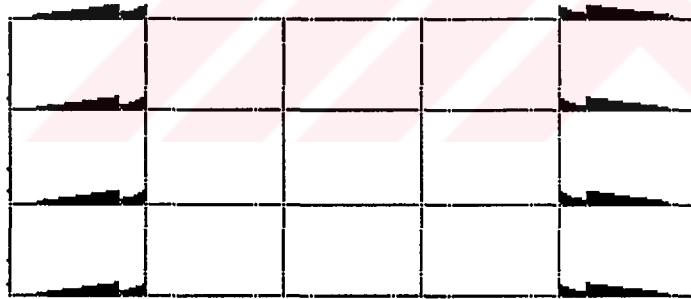
Şekil 3.26 Örnek 3D-2 İki farklı Yatay Yük Çarpanı İçin, Çözüm #1 ve Çözüm #2 de Ulaşılan İkinci Kat Tavanı Yerdeğiştirme Dağılımı

Çözüm #2 de, kalıcı şekildeğiştirmeler 11 ve 12 nolu döşeme alt sistemlerin boşluk kenarı kirişlerinde ve 3 ile 4 nolu düşey alt sistemlerin çekirdeğe saplanan kiriş uçlarında yoğunlaşmıştır, Şekil 3.28. Döşeme düzlem içi deformasyonları nedeniyle kenar perdelere ulaşan yatay yük oranı azalırken, merkezdeki çekirdeğin payı

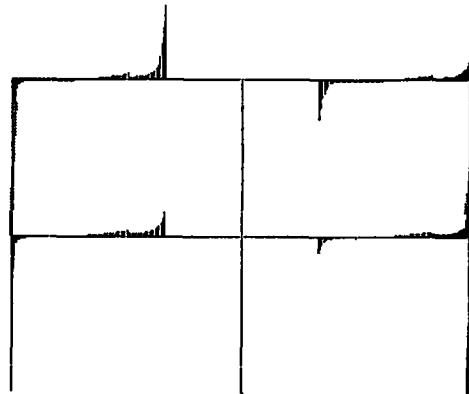
artmıştır. Tüm elemanların doğrusal davrandığı Çözüm #1 de $M=30919 \times 2$ kNm. lik taban momentine sahip olan çekirdek, bazı elemanlarda doğrusal olmayan davranışın söz konusu olduğu Çözüm #2 de $M=54900 \times 2$ kNm. lik momente maruz kalmaktadır. Çekirdek taban momentindeki artış, %78 e karşı gelmektedir.



Şekil 3.27 Örnek 3D-2 Yatay Yük Çarpanı - Yerdeğiştirme İlişkisi



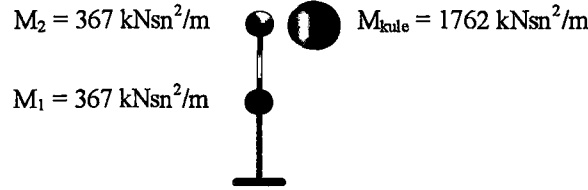
Alt Sistem 11



Alt Sistem 3 ve 4

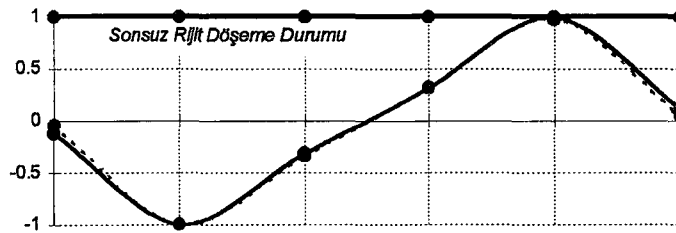
Şekil 3.28 Örnek 3D-2 Kalıcı Şekildeğiştirmelerin Yayılışı

Serbest titreşim hesabı, Şekil 3.22 de verilen yatay yük düzeyindeki ($YYÇ=1.0$) rijitlikler esas alınarak üç farklı durum için yapılmıştır. Bunlar; tam elastik çözüm, bazı elemanlarda doğrusal olmayan davranışın dikkate alındığı elastoplastik çözüm ve döşemelerin sonsuz rijit varsayıldığı elastoplastik çözümlerdir. Hesapta kullanılan kütleler Şekil 3.29 da verilmiştir.



Şekil 3.29 Serbest Titreşim Hesabında Kullanılan Kütleler

Döşeme boşluklarının etkisi ilk moddan itibaren gözlenmiştir. Sonsuz rijit döşeme varsayımı yapıldığında $T=0.090$ sn. olan birinci titreşim periyodu değeri; döşeme düzlem içi deformasyonlarının dikkate alınması halinde, tüm sistemin doğrusal elastik davrandığı durum için $T=0.182$ sn. ye, bazı elemanlarda doğrusal olmayan davranışın dikkate alındığı durumda ise $T=0.266$ sn. ye çıkmaktadır. En büyük değerlere göre normalleştirilmiş birinci modun, ikinci kat tavanı ile ilgili olan bölümü Şekil 3.30 da verilmektedir. Birbirine çok yakın olan elastik ve elastoplastik mod şekilleri, döşeme düzlem içi deformasyonlarının etkisini açık olarak göstermektedir, Şekil 3.30.



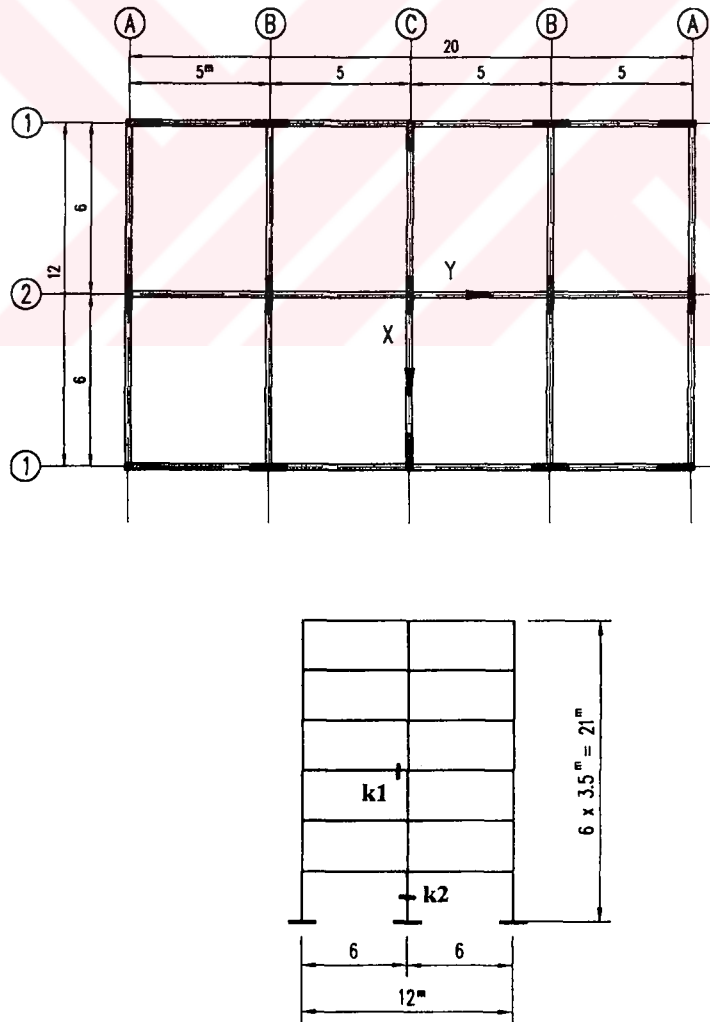
Şekil 3.30 Örnek 3D-2 1.Modun İkinci Kat Tavanı ile İlgili Bölümü (Plan)

3.7.3 Örnek 3D-3 Üç Boyutlu Bir Yapı Sisteminde Doğrusal Olmayan Hesap

Malzeme ve geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan, yatay ve düşey yükler etkisindeki bu yapı sisteminin çözümlenmesinin üç ana amacı;

- **DOC3B** programıyla üretilen sonuçların bir başka algoritmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmak istenmesi,
 - Yapılan bazı varsayımlar hariç tutulduğunda; TS500 Betonarme Yapılar Standardı [22] ve 1975 Deprem Yönetmeliğine [41] göre boyutlandırılmış bir yapı sisteminde, gerçekleşen yerdeğiştirme süneklik oranının belirlenmesi (*1. Grup Çözüm*),
 - Beton ve çelikte gerçek davranışa daha yakın malzeme modeli kullanılması durumunda, ulaşılabilir süneklik oranının hesabı (*2. Grup Çözüm*),
- şeklinde sıralanabilir.

[25] nolu çalışmadan alınan yapı sistemi X doğrultusunda 4, Y doğrultusunda 2 açıklığı olan, 6 katlı betonarme bir uzay çerçevedir. Yapının tipik kalıp planı ve düşey enkesiti Şekil 3.31 de verilmiştir.



Şekil 3.31 Örnek 3D-3 Tipik Kalıp Planı ve Boykesit

Sistemi oluşturan çubuk elemanların boyutları Tablo 3.5 de görülmektedir. Kiriş elemanlar altta çekme yaratan eğilme momenti etkisinde tablalı kesit, üstte çekme yaratan eğilme momenti etkisinde ise dikdörtgen kesit olarak idealleştirilmiştir. Kirişlerde boyuna donatı yerleşimi açısından, açıklığının 1/3'ü uzunluğunda üç farklı bölge tanımlanmıştır. Tablo 3.5 in kirişlerle ilgili bölümünde; h toplam kesit yüksekliğini, b tabla genişliğini, b_w gövde genişliğini, h_f ise tabla kalınlığını göstermektedir.

Tablo 3.5 Örnek 3D-3 Çubuk Eleman Boyutları

Kirişler					
Kat	Aks	h (mm)	b (mm)	b_w (mm)	h_f (mm)
1 - 6	A	600	660	300	150
	B, C	600	1020	300	150
	1	600	600	300	150
	2	600	900	300	150

Kolonlar							
Kat	mm / mm	A1	B1	C1	A2	B2	C2
6 - 5	h / b	400/300	400/300	400/300	400/300	400/300	400/300
4 - 3	h / b	400/300	500/300	500/300	500/300	600/300	600/300
2 - 1	h / b	400/300	600/300	600/300	600/300	800/300	800/300

Kolon boyuna donatıları Tablo 3.6 da sıralanmıştır. Yapı sisteminin çok sayıdaki kiriş kesitinde kullanılan boyuna donatılar için, [25] e bakılmalıdır.

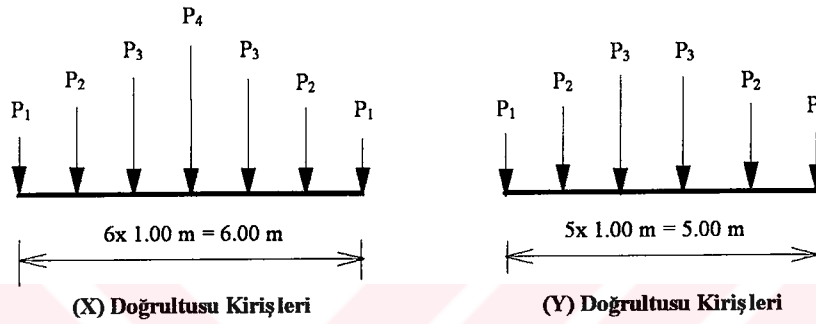
Tablo 3.6 Kolon Boyuna Donatıları

Kolonlar	Katlar		
	6 - 5	4 - 3	2 - 1
A1	4 Φ 18+4 Φ 16	4 Φ 18+4 Φ 16	4 Φ 18+4 Φ 16
B1	8 Φ 16	8 Φ 20	4 Φ 22+4 Φ 20
C1	4 Φ 16+4 Φ 14	8 Φ 20	8 Φ 20
A2	4 Φ 16+4 Φ 14	4 Φ 18+4 Φ 16	8 Φ 18
B2, C2	4 Φ 16+4 Φ 14	8 Φ 20	6 Φ 26+4 Φ 20

Kiriş ve kolonlarda enine donatı sıklaştırma bölgesi uzunlukları yönetmelik şartlarına uygun olarak seçilmiştir. Enine donatı olarak kirişlerde Φ 10/200 (sıklaştırma

bölgelerinde $\Phi 10/150$), kolonlarda ise $\Phi 10/200$ (sıklaştırma bölgelerine $\Phi 10/100$) etriye kullanılmıştır.

Üçgen ve trapez yayılı düşey yükleme, eşdeğer tekil yüklere dönüştürülüp kirişler üzerinde tanımlanan ara düğüm noktalarına etkilmiştir, Şekil 3.32. Düşey yüklerin şiddetleri için Tablo 3.7 ye bakılmalıdır.



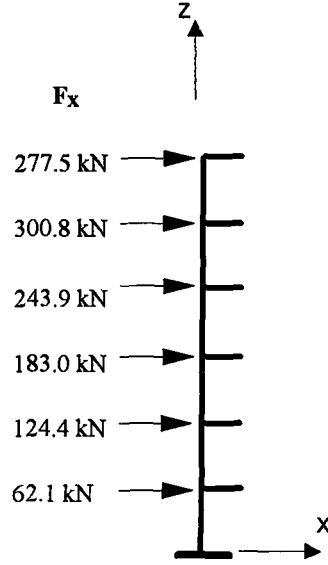
Şekil 3.32 Üçgen ve Trapez Yayılı Düşey Yüklere Eşdeğer Tekil Yükler

Tablo 3.7 Eşdeğer Tekil Yüklerin Şiddetleri

Yer	Aks	P ₁ (kN)	P ₂ (kN)	P ₃ (kN)	P ₄ (kN)
Çatı Katı Döşemesi	A	2.82	10.13	16.74	19.97
	B, C	3.95	16.88	30.10	36.56
	1	2.82	10.13	16.60	-
	2	3.95	16.88	29.82	-
Normal Kat Döşemeleri	A	7.15	20.13	28.70	32.89
	B, C	4.61	20.88	38.02	46.40
	1	7.15	20.13	28.52	-
	2	4.61	20.88	37.65	-

Yapının serbest titreşim özelliklerinden hareketle, 1. derece deprem bölgesi için belirlenmiş eşdeğer deprem yükleri Şekil 3.33 de verilmiştir. Verilen yükler, yatay işletme yükleri seviyesini ($YYÇ=1$) yansıtmaktadır. Eşdeğer deprem yükleri kat ağırlık merkezlerine %5 dışmerkezlilik momentleriyle birlikte etkililmektedir.

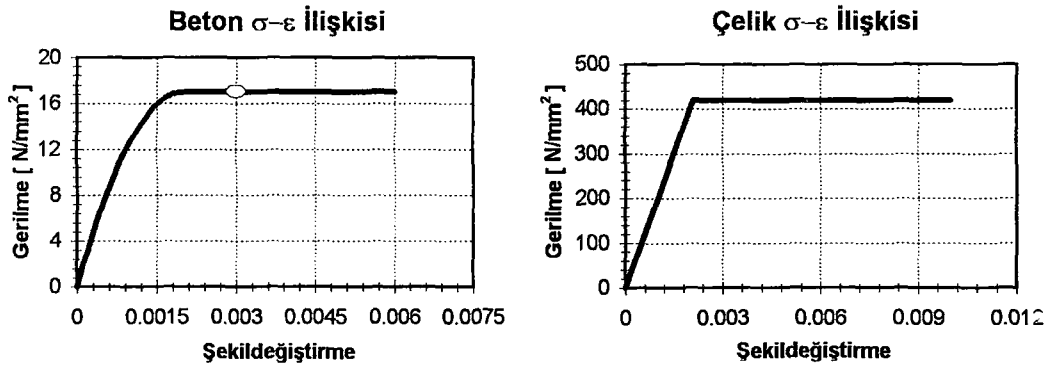
Yapılan çözümlerde kat döşemelerinin kendi düzlemleri içerisinde sonsuz rijit olduğu varsayımı yapılmıştır.



Şekil 3.33 Örnek 3D-3 X Doğrultusu Eşdeğer Deprem Yükleri

Yapı sistemi, sabit düşey yükler ile X doğrultusunda artan yatay yükler etkisinde incelenmektedir.

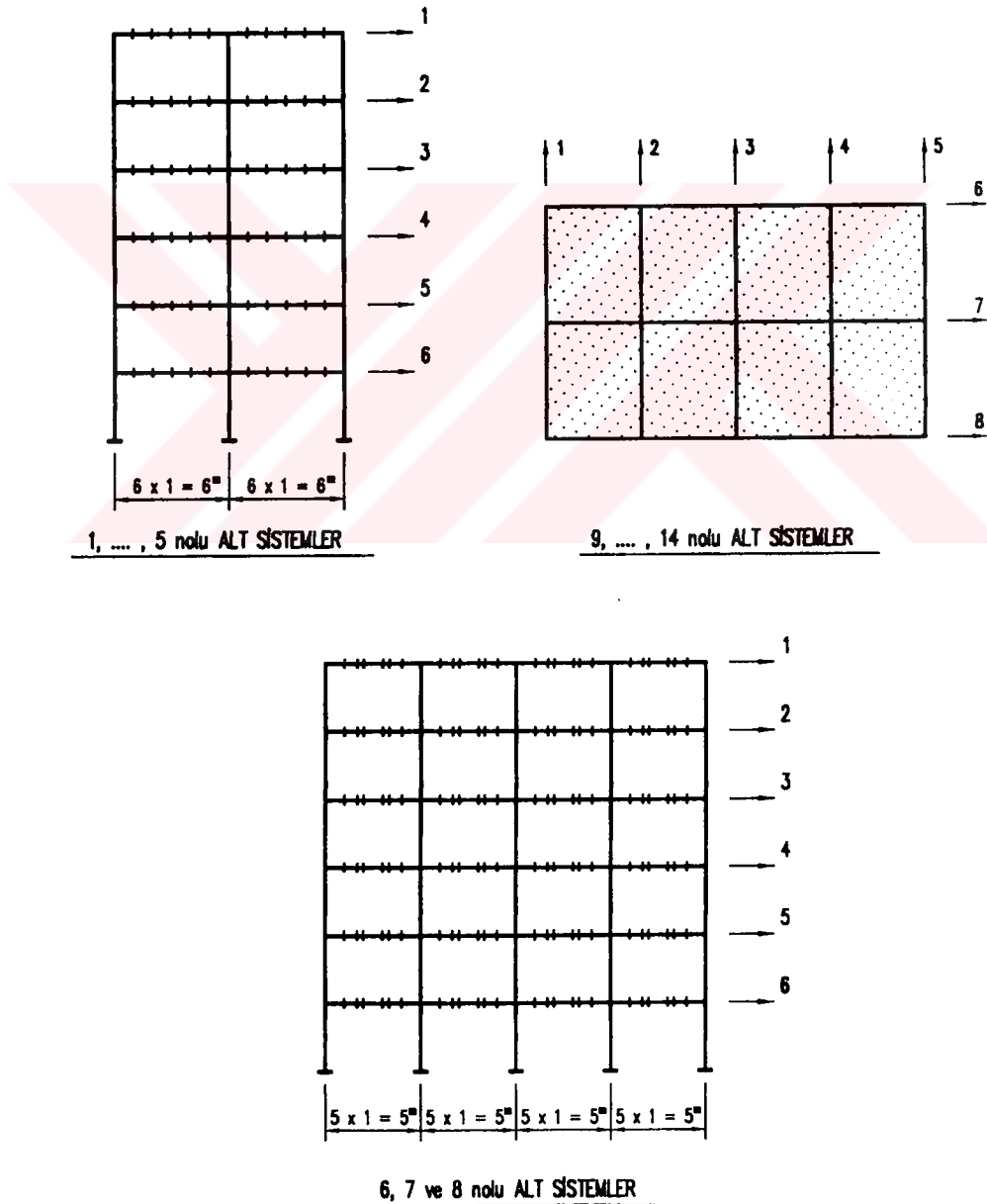
[25] nolu çalışmada kullanılan malzeme modelleri Şekil 3.34 de verilmektedir. Enine donatı nedeniyle artan şekil değiştirme yeteneği, beton malzeme modelinde TS 500 [22] ün önerdiği 0.003 lük beton şekil değiştirme üst sınırını 0.006 ya çıkararak dikkate alınmaktadır. Yapının gerçek davranışının belirlenmesi amaçlandığından malzeme güvenlik katsayıları kullanılmamıştır.



Şekil 3.34 1. Grup Çözüm İçin Malzeme Modelleri

DOC3B programı ile yapılan çözümlemede kullanılan mekanik model Şekil 3.35 de görülmektedir. Bu modelde üç boyutlu yapı sistemi X doğrultusunda 5, Y doğrultusunda 3 olmak üzere toplam 8 adet düşey ve 6 adet de yatay düzlem alt sisteme ayrılmaktadır.

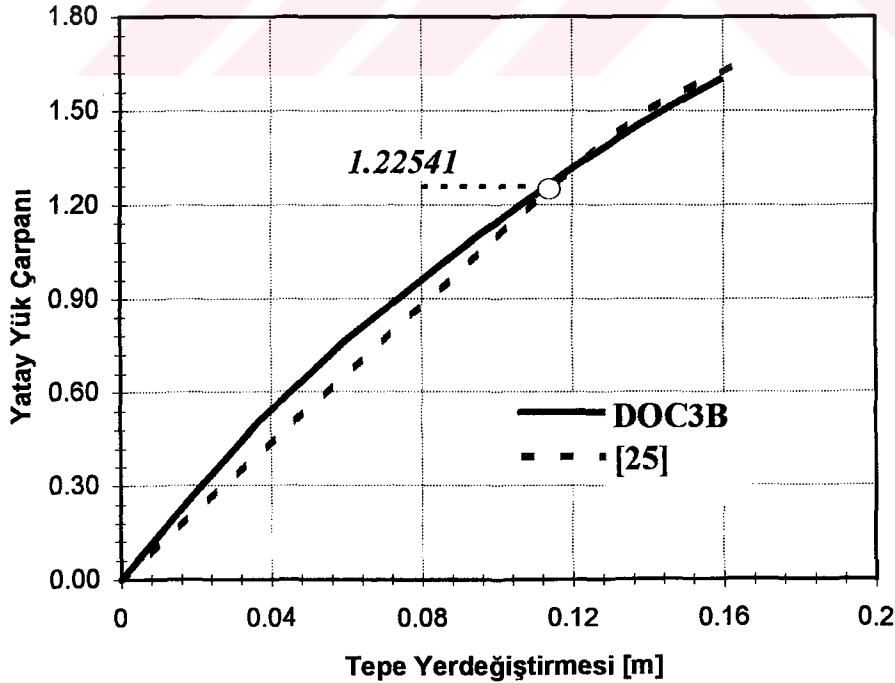
Yapılan çözümlerde kolonlar 35 adet, her kiriş alt parçası ise 20 adet sanal parçaya bölünmüştür. Herhangi bir yük düzeyinde ardışık yaklaşımın durdurulması için, çubuk alt parçalarında takip eden adımlar arasındaki rölatif rijitlik farkının %7.5 değerinin altına düşmesi koşulu aranmıştır.



Şekil 3.35 Örnek 3D-3 İçin Hazırlanan Mekanik Model

Bölüm 3.2 de belirtildiği gibi, düzlem alt sistemlerin kesişim çizgileri üzerinde yer alan düğüm noktalarında düşey süreklilik sağlanamamaktadır. Bu örnekteki gibi düşey ve yatay yüklerin birlikte etkimesi durumunda, kolon eksenel kuvvetlerinin büyük bir yaklaşıklıkla belirlenmesi için iki kademeli bir hesap yolu izlenebilir. Birinci adımda yapı sistemi yalnızca düşey yüklerin etkisinde çözülüp, düzlem alt sistem kolonlarında oluşan eksenel kuvvetler belirlenir. Hesabın ikinci adımında ise her düzlem alt sistemde, kendi düzlemindeki yatay ve düşey yüklere ilave olarak dik istikametteki alt sistemlerin birinci adımda hesaplanan düşey yük kolon normal kuvvetleri dış tekil yükler olarak alınıp, kolon üst noktalarına etkilir. Bu yolla, kolon kesitlerinin dayanım ve rijitlik hesabında etkili olan eksenel yük değerleri büyük bir yaklaşıklıkla belirlenmiş olur.

Sabit düşey ve X doğrultusunda artan yatay yükler için malzeme bakımından doğrusal olmayan davranış dikkate alınarak elde edilen yatay yük çarpanı - tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi Şekil 3.36 da verilmektedir. [25] nolu çalışmada elde edilen eğri de, aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. Tepe yerdeğiştirmesi tanımlamasından en üst katta C çerçevesi hizasında, X doğrultusundaki yatay ötelenme anlaşılmalıdır.



Şekil 3.36 1. Grup Çözüm Yatay Yük Çarpanı - Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkisi

Her iki programla elde edilen büyüklüklerin karşılaştırılmasından şu sonuçlara ulaşılmaktadır:

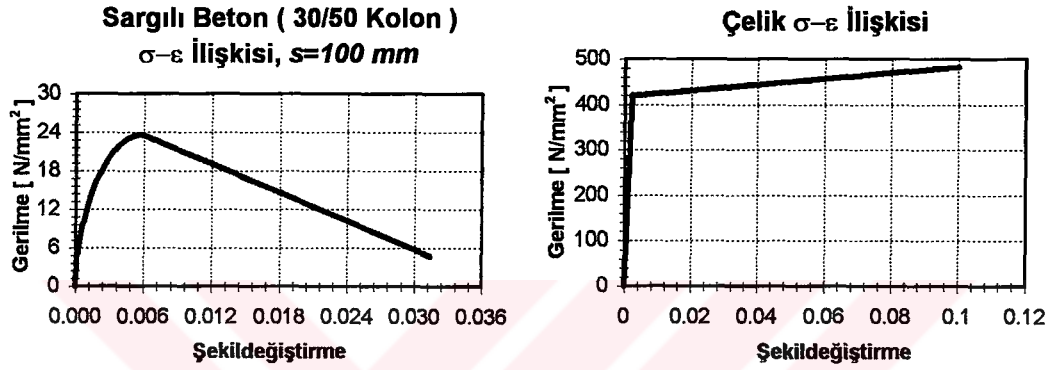
- Bu çalışmada, **DOC3B**, çubuk elemanlar üzerinde yayılı şekildeğiştirme durumu esas alınmakta, çubuk sanal alt parçalarında ortalama iç kuvvete karşılık gelen rijitlik değeri bünye bağıntısından belirlenmektedir. [25] nolu çalışmada ise kalıcı şekildeğiştirmeler plastik kesit adı verilen bölgelerde toplanıp, bu bölgelerin dışında sistemin doğrusal elastik davrandığı varsayılarak, çatlamış kesit esasına dayalı eğilme rijitlikleri kullanılmaktadır. Kirişlerde düşey yük iç kuvvet dağılımına göre belirlenen eğilme rijitliği bölge uzunluklarının, artan yatay yükler etkisinde değişmediği varsayılmaktadır.

Sıralanan bu özelliklere bağlı olarak; [25] nolu çalışmada belirtilen ilk plastik kesit (*Yatay Yük Çarpanı* = 1.22541) oluşuncaya kadar, **DOC3B** programıyla daha rijit bir davranış elde edilmektedir.

- **DOC3B** programında, düzlem alt sistemlerin kesişim çizgileri üzerinde yer alan düğüm noktalarında düşey süreklilik sağlanamamakta ve kolon kesitlerinde iki dik doğrultudaki momentler arasında karşılıklı etkileşim terkedilmektedir. Düşey yükten oluşan kolon normal kuvvetlerinin, çok büyük bir yaklaşıklıkla nasıl hesaplandığı önceki paragraflarda anlatılmıştır. İncelenen yapı sistemi için Şekil 3.36 da yapılan karşılaştırmayla, bu varsayımların getirdiği yaklaşıklık kontrol edilmiş olmaktadır.
- **DOC3B** programıyla yapılan çözümlemede, bir çubuk elemanın herhangi bir kesitinde öngörülen en büyük şekildeğiştirmenin aşılması durumunda sisteme tatbik edilen yükün taşınmadığı kabul edilmektedir. [25] nolu çalışmada sistem göçme yükünün belirlenmesi için, kesit yüksekliğinin yarısı uzunluğundaki bir bölgede yayılı plastikleşmeye dayanan, kesit dönme kapasiteleri esas alınmaktadır. İncelenen yapı sisteminde göçmeye karşı

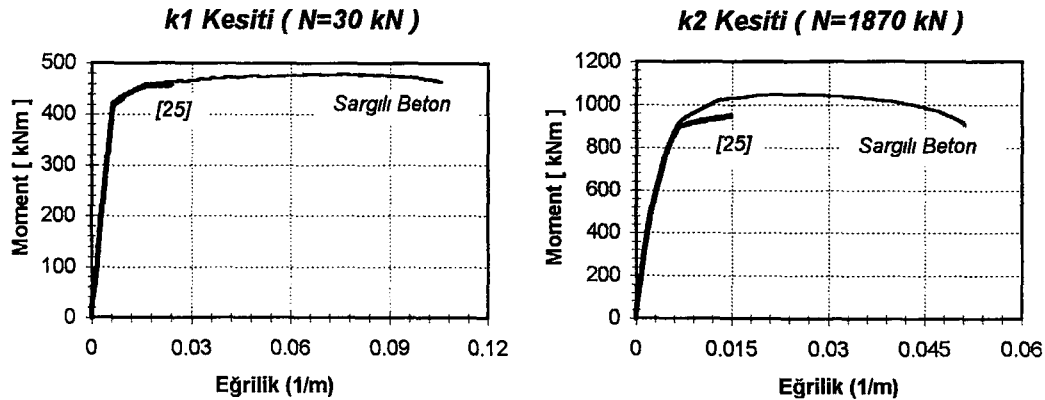
gelen yatay yük çarpanı **DOC3B** programıyla 1.600, [25] nolu çalışmayla 1.638 olarak bulunmuştur.

İkinci grup çözümde, betondaki sarılma etkisi *Saatçioğlu-Razvi Modeliyle* temsil edilmiştir. Sargılı betonda gerilme - şekildeğiştirme ilişkisini örneklemek üzere, 30x50 cm. kesitli bir kolona ait diyagram Şekil 3.37 de verilmektedir. Boyuna donatılar için de gerçek davranışa daha yakın olan bir malzeme modeli esas alınmıştır, Şekil 3.37.



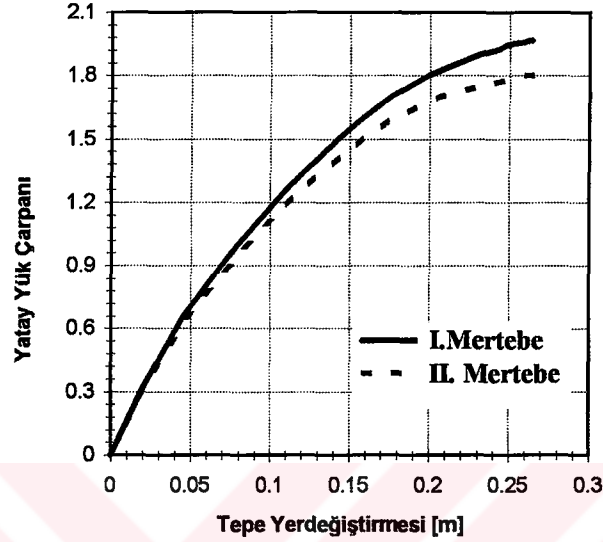
Şekil 3.37 2. Grup Çözüm İçin Malzeme Modelleri

Betonda sarılma etkisinin dikkate alınması, boyuna donatıda ise gerçek davranışa daha yakın bir malzeme modelinin kullanılmasıyla kesit dönme yetenekleri önemli ölçüde artmıştır. Bu durumu örneklemek üzere; C aksında, birisi kiriş diğeri de kolon üzerinde bulunan **k1 ve k2 kesitleri** seçilmiştir, Şekil 3.31. Bu kesitler için, iki farklı malzeme modeliyle elde edilen moment - eğrilik ilişkileri Şekil 3.38 de verilmektedir.



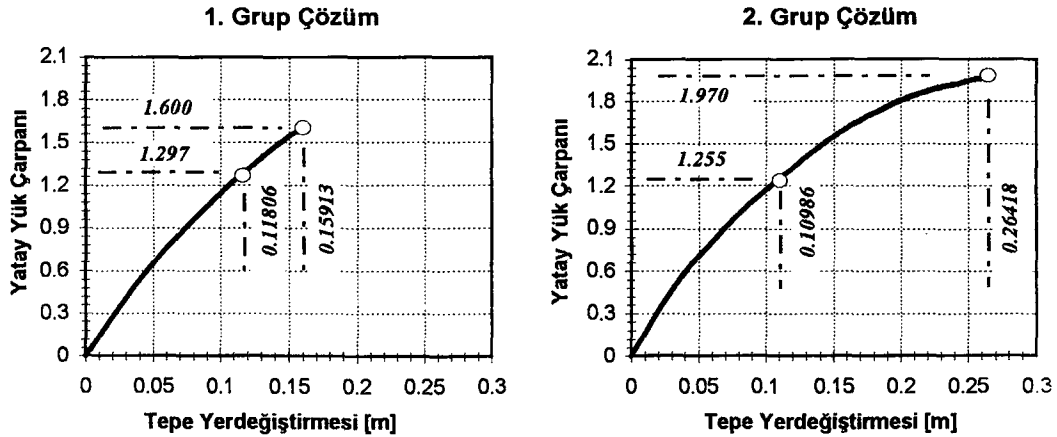
Şekil 3.38 İki Kritik Kesitte Moment-Eğrilik İlişkisi

İkinci grup çözümde elde edilen yatay yük çarpanı - tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi Şekil 3.39 da verilmektedir. Kolonlarda eksenel kuvvetin ikinci mertebe etkilerinin dikkate alınması (II. Mertebe Hesap) durumuna karşı gelen eğri de aynı grafik üzerinde gösterilmektedir.



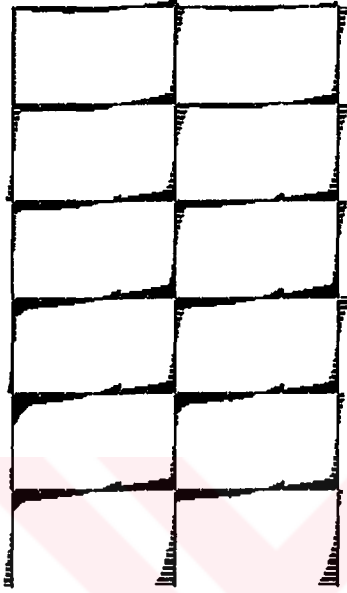
Şekil 3.39 2. Grup Çözümde I. ve II. Mertebe Hesap Sonuçları

İncelenen sistemde, yapısal süneklik oranı iki durum için belirlenmiştir. Bölüm 1.2.1 de anlatıldığı gibi yapısal süneklik oranı, sistemin genel yatay rijitlik özelliklerini yansıtan bir yerdeğiştirme bileşeninin; göçme durumunda aldığı değerin, tüm yapı sisteminde ilk boyuna donatı akmasının gerçekleştiği andaki değerine oranlanmasıyla hesap edilmektedir.

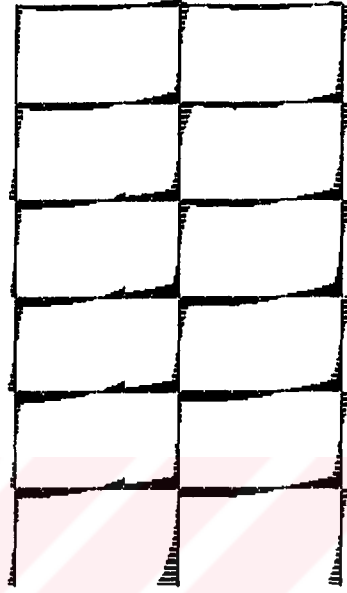


Şekil 3.40 1. ve 2. Grup Çözüm İçin Sistem Süneklik Oranı Hesabı

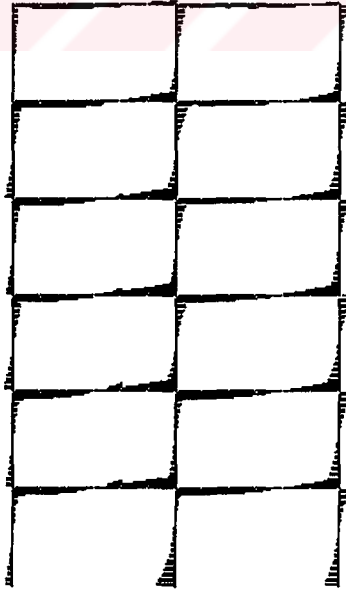
1. *Grup Çözümde* gerçekleşen süneklik oranı $\mu=0.15913/0.11806=1.348$ olmuştur, Şekil 3.40. 2. *Grup Çözümde* elde edilen yapısal süneklik oranı ise $\mu=0.26418/0.10986=2.405$ olmaktadır, Şekil 3.40.



Alt Sistem 3



Alt Sistem 4



Alt Sistem 5

Şekil 3.41 1. *Grup Çözüm*; 3,4 ve 5 nolu Alt Sistemlerin χ/χ_u Diyagramları

1. Grup Çözümde, kalıcı şekildeğiştirmeler 3, 4 ve 5 numaralı alt sistemler üzerinde yoğunlaşmıştır. **DUZ-GRF** programıyla oluşturulan χ/χ_u diyagramları, kalıcı şekildeğiştirmelerin alt sistemler üzerindeki yayılış şeklini göstermektedir, Şekil 3.41. Elde edilen şekildeğiştirme yayılışı, [25] nolu çalışmada verilen plastik kesit yerleriyle uyum içerisinde dir.



SONUÇLAR

Üç boyutlu büyük yapı sistemlerinde, malzeme ve geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan çözümleme yapılmaktadır. Düzlem alt sistemlerin kullanıldığı hesap yönteminde yatay ve düşey yükler birlikte bulunabilmekte, doğrusal olmayan döşeme düzlem içi şekildeğiştirmeleri de hesaba katılmaktadır. Problemin bilinmeyenleri olarak düğüm noktası gruplarının mutlak yerdeğiştirmeleri seçilebildiği gibi, gerektiğinde rölatif yerdeğiştirmeler de kullanılabilir.

Çubuk elemanlarda malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışı ifade eden bünye bağıntılarının oluşturulması aşamasında, betondaki sarılma etkisi uygun bir davranış modeliyle hesaba katılabilmektedir. Elemanların farklı özellikteki sarılma bölgeleri hesaba doğrudan yansıtılabilmekte, sistem sünekliğinin kontrolü ve daha gerçekçi olarak belirlenmesi mümkün olmaktadır. Bünye bağıntısında doğrusallaştırma için başlangıç kirişi yöntemi kullanılmaktadır.

Değişken rijitlikli çubukta, birim yerdeğiştirme ve yükleme terimlerinin hesabı için konsol mesnetlenmiş eleman ve ardışık başvuru bağıntıları kullanılmaktadır. Mesnetlenmiş elemanda elastik eğrinin kolayca belirlenmesi, çubuk seviyesindeki bazı düzensizliklerin hesaba katılmasını kolaylaştırmaktadır.

Üç boyutlu yapı sistemi için oluşturulan statik denge denkleminin atalet kuvvetlerinin eklenmesiyle, serbest titreşim denklemlerine geçilmektedir. Bu denklem takımının çözümünde döşeme rijitlik matrislerindeki bazı terimler terkedilerek, basitleştirmeye gidilebilmektedir.

Bölme duvarlarının yapı davranışına olan etkilerinin saptanması ve özel bölme duvarlı çerçevelerin yatay yükler etkisinde incelenmesi için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada elde edilen bazı önemli sonuçlar şöyle sıralanabilir:

Betonarme yapı sistemlerinde sünekliğin gerçekçi olarak belirlenebilmesi için, betonda sarılma nedeniyle değişen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisine etkiyen faktörler incelenmiş ve *Saatçioğlu-Razvi Sarılmış Beton Modeli* tanımlandıktan sonra bazı yapı sistemlerinde kuramsal olarak elde edilen kesit ve sistem davranışları deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. *Örnek 2D-2* de betonarme kolonlar, *Örnek 2D-3* de ise betonarme çerçeve üzerinde yapılan karşılaştırmalar, *Saatçioğlu-Razvi Sarılmış Beton Modelinin* kuramsal hesaplarda başarıyla kullanılabileceğini göstermiştir.

Bileşik eğilme etkisinde olan, genel bir geometri ve donatı dağılımına sahip betonarme kesitte, bünye bağıntısının oluşturulması için *M-KAPA* isimli bilgisayar programı geliştirilmiştir. Beton için kullanılan malzeme modeli değişik düzeylerdeki sargı etkisini dikkate alabilirken, çelik için de üç doğrusal koldan meydana gelen bir davranış modeli kullanılmaktadır. Gerçekleşen kesit dönme sünekliği, *M-KAPA* programının ürettiği önemli sonuçlardan birisidir.

Çubuk elemanlarda, doğrusal olmayan şekildeğiştirmelerin iç kuvvet dağılımıyla uyumlu olarak yayılması durumu dikkate alınmaktadır. Bu yaklaşım çubuğun tek eğrilikli ya da sabit iç kuvvete maruz olması durumlarında daha da önem kazanmaktadır. *Örnek 2D-3* ün ikinci bölümünde incelenen kısa kolonlu düzlem çerçevede kalıcı şekildeğiştirmelerin geniş bölgelere yayıldığı gözlenmiştir.

Değişken rijitlikli çubuğun birim yerdeğiştirme ve yükleme terimlerinin hesabında, mesnetlenmiş eleman olarak konsol kiriş kullanılmaktadır. Konsol kirişte elastik eğrinin belirlenmesi için, ardışık iki nokta arasındaki dönme ve çökme farklarını veren ardışık başvuru bağıntıları geliştirilmiştir. Çubukta meydana gelen yapısal değişiklikler, eleman düzeyinde yapılan hesaplarda dikkate alınmakta, sistemin genel bilinmeyen sayısı arttırılmadan çözüme gidilmektedir. Bu işlemlerin sadece gerekli çubuklarda yapılması da hesap süresi bakımından önemlidir.

Düzlem sistemlerde malzeme ve geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan çözümleme için, *DOC2B* isimli bilgisayar programı geliştirilmiştir. Program, üç boyutlu yapıdan ayıklaştırılan düşey ve yatay konumlu alt sistemlerin çözümlenmesinde de kullanılmaktadır.

Hesap düzeni içerisinde kullanılan; *i*. Sanal dilim sayısı, *ii*. Çubukta ardışık başvuru bağıntılarının yazıldığı nokta sayısı, *iii*. Ardışık yaklaşımı durdurmak için öngörülen rijitlik yaklaşım oranı gibi büyüklüklerin ardışık yaklaşım sayısı ve sistem davranışı üzerindeki etkileri *Örnek 2D-1* de irdelenmiş ve eleman bünye bağıntılarının yatıklaştığı bölgede, göreceli olarak *i* ve *ii* nolu değişkenlere daha büyük, *iii* nolu değişkene ise daha küçük değerler verilmesi gerektiği anlaşılmıştır.

Bileşik eğilme etkisindeki betonarme kolonlarda deneysel ve kuramsal yolla elde edilen moment-eğrilik ilişkisi, yatay yük-tepe yerdeğiştirme ilişkisi ve sistem süneklik oranları karşılaştırıldığında yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu karşılaştırma için, Ek A da sunulan deneysel çalışma ile *Örnek 2D-2* de yapılan hesaplar esas alınmıştır. Bu sonuçlara dayanarak, kuramsal hesapta öngörülen malzeme modellerinin ve yapılan varsayımların yeterli olduğu söylenebilmektedir.

Hacimsel enine donatı oranındaki artımın sarılmış betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi, kesit moment-eğrilik ilişkisi ve sistem davranışı üzerindeki etkileri *Örnek 2D-2* ve *Örnek 2D-3* de incelenmiştir. Sistem yerdeğiştirme yeteneğindeki iyileşme için, Şekil 2.31b ve Şekil 2.39 a bakılmalıdır.

Özel bölme duvarlı çerçeve deneylerinden elde edilen bazı sonuçlar kuramsal hesaplarda kullanılmıştır, *Örnek 2D-4*. Bunun için, deneysel çalışmada tersinir yüklemeyle elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirme eğrilerinin zarfından yararlanılmaktadır. Geliştirilen programda deneysel verilerin kullanılabilmesi, değişik güçlendirme yöntemlerinin kuramsal hesaplara yansıtılması yolunu açmıştır.

Programların değişik özel durumlar için kullanılabilmesi, çeşitli imkanları beraberinde getirmektedir. Olası güçlendirme modellerinin eleştirilmesi, yeni deprem yönetmeliğine ait bazı özelliklerin irdelenmesi bunlar arasında sayılabilir. Bu amaçla beş katlı ve 1/2 ölçekli prototip bir düzlem çerçeve üzerinde, *Örnek 2D-4*, güçlendirme perdeleriyle ilgili denemeler yapılmıştır. Sabit düşey ve artan yatay yükler etkisinde incelenen çerçeveler; güçlendirme öncesinde, yatay yük çarpanı 5.53 değerine eriştiğinde göçmeye ulaşmaktadır. Orta aksta kolonlar arasına yerleştirilen güçlendirme perdesi durumunda, yatay yük çarpanı 13.98 e çıkmaktadır.

Güçlendirme perdesinin orta aksa ilaveten komşu açıklıklara da bir miktar geçmesi durumunda ise bu değer 11.52 ye düşmektedir. İkinci tip güçlendirmede perdenin kapasitesi kullanılmadan, perdeye saplanan kirişlerin uç kesitlerindeki plastikleşmeyle göçme yüküne erişilmektedir, Şekil 2.52.

Malzeme ve geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan ve bazı düzensizlikler içeren üç boyutlu büyük yapı sistemlerinin çözülmesi için *DOC3B* isimli bilgisayar programı geliştirilmiştir. Üç boyutlu yapı düzlem alt sistemlere ayrılmakta; düzensizlikler, düzlem alt sistem çubukları düzeyinde dikkate alınmaktadır. Sürekli ortamlar eşdeğer çubuk sistemlere dönüştürülerek hesaba katılmakla birlikte, yapılan tanımlamalar genelliğini korumaktadır.

Düzlem alt sistemlerin genel rijitlik matrislerinde, esas köşegen üzerinde yarım bant genişliğindeki bölgenin terimleri tek boyutlu bir dizi içerisinde saklandığından büyük düzlem alt sistemlerin incelenmesinde güçlük yoktur. *Örnek 3D-1* de incelenen yapıda, yatay alt sistemler 429 adet düğüm noktası ve 812 adet çubuk eleman içermektedir. Üç boyutlu yapı sistemi için oluşturulan denklem takımının bilinmeyen sayısı da göreceli olarak az olduğundan, *DOC3B* programının çok büyük yapı sistemlerinde kullanılması mümkündür. *Örnek 3D-1* de incelenen yapı sisteminin döşeme boşluğu içermesi durumu için yapılan serbest titreşim hesabında, geliştirilen algoritmanın genel programlara olan üstünlüğü gösterilmiştir.

Üç boyutlu yapı sistemlerinde yer alan büyük döşeme boşluklarının, iç kuvvet dağılımı ve serbest titreşim özellikleri üzerindeki etkisi *Örnek 3D-1* ve *Örnek 3D-2* de incelenmiştir. Döşeme boşluğunu çevreleyen kirişlerin döşeme düzlemindeki rijitliklerinin arttırılmasıyla, rijit döşeme davranışına yaklaşılacağı *Örnek 3D-1* deki bir parametrik çalışmada gösterilmiştir.

Örnek 3D-3 de sunulan üç boyutlu yapı sisteminde, geliştirilen algoritma ile bir başka algoritmanın sonuçları karşılaştırılmış ve uyum içerisinde oldukları görülmüştür, Şekil 3.36 ve Şekil 3.41. Kolon kesitlerinin rijitlik ve dayanımı üzerinde etkili olan eksenel kuvvetin, düşey alt sistemlerin kesiştiği ortak kolonlarda büyük bir yaklaşıklıkla hesaba katılmasıyla ilgili bir yol önerilmiştir. Aynı örnekte, iki farklı grup malzeme modeli

kullanılarak yapılan hesaplarda 1.348 ve 2.405 mertebesinde sistem süneklik oranlarına erişilmiştir.

Küçük titreşimlerin kaydedilmesi ve değeriendirilmesi işlemindeki önemli adımlar sıralanmış, bu amaçla geliştirilen bir bilgisayar programının akış diyagramı verilmiştir. Değışik inşaat aşamalarındaki benzer yapılar üzerinde gerçekleştiren kk titreşim ölçümleriyle, bölme duvarlarının yapının serbest titreşim özelliklerine olan etkisi deneysel yolla belirlenmiştir. Yapı kütlesini de arttırarak bir yanda periyotları uzatma nedeni olan bölme duvarları, yatay rijitliğe olan katkılarının daha büyük oluşu nedeniyle yapı periyotlarının küçülmesine ve mod şekillerinin de bir miktar değışimine sebep olmaktadır. EK B de incelenen yapı sistemlerinde uzun doğrultu için birinci moda ait periyot değeri; duvarsız yapıda 1.02 sn., sıvalı duvarlı yapıda ise 0.60 sn. olarak ölçülmüştür.

Bölme duvarlı betonarme ereve deneylerinden elde edilen bazı sonuçlar da şöyle sıralanabilir: *i.* ıplak ereve içine sonradan duvar ilavesi durumunda, *Numune 4 ve 7*, kk yatay yükler düzeyinden başlayarak duvar ile betonarme ereve arasında bölgesel ayrılmalar oluşmakta, bunun sonucu olarak da duvarın sistem dayanım ve rijitliğine olan katkısı azalmaktadır, Şekil C.19 *eğri 7. ii.* zel bölme duvarı tipinde ise, *Numune 1*, 250 kN luk veren yükleme sınırına erişildiğinde duvar ile ereve arasında ayrılma gözlenmemiş, duvar üzerinde köşegen doğrultularda yoğunlaşmış ince çatlaklar oluşmuştur, Şekil C.21a. Sistemin dayanım ve rijitliğindeki artış, Şekil C.19 da *1 numaralı eğriyle* izlenmektedir. *iii.* Hasarlı zel bölme duvarına uygulanan güçlendirme tekniğinin etkinliği de, aynı grafikteki *2 numaralı eğriden* izlenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] GHOSH,S.,K., Seismic Design of Reinforced Concrete Structures Considering Inelasticity, Earthquake -Resistant Concrete Structures Inelastic Response and Design, ACI, SP-127, Sayfa 1-19, (1991)
- [2] KENT, D., PARK, R., Flexural Members with Confined Concrete, Journal of Structural Division, Vol.97, No. ST7, pp.1969- 1990, (1971)
- [3] PARK, R., PRIESTLEY, N., GILL, W., Ductility of Square-Confined Concrete Columns, ASCE Journal of Structural Division, Vol 108, No. ST4, pp.929-950, (1982)
- [4] ÜZÜMERİ , Ş.M., Use and Abuse of Ductility Concept, First Japan-Turkey Workshop on Earthquake Engineering, Istanbul,(1997)
- [5] İMAR VE İSKAN BAKANLIĞI DEPREM ARAŞTIRMA ENSTİTÜSÜ BAŞKANLIĞI, Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, (1996)
- [6] OKADA, T., Structural Analysis & Design Ders Notları
- [7] ÇAKIROĞLU, A., KARADOĞAN, F., Plastic Hinge Capacities, Curvature and Structural Ductilities of Reinforced Concrete Structures, First Japan-Turkey Workshop on Earthquake Engineering, Istanbul,(1997)
- [8] GÜNDÜZ, A., Kuşatılmış Betonlu Dikdörtgen Kiriş Kesitleriyle İlgili Geliştirilmiş Bir Tasarım Algoritması, İMO Teknik Dergi, Sayfa 133-146, (Temmuz 1990)
- [9] ERSOY,U., ÖZCEBE,G., Moment-Curvature Relationship of Confined Concrete Sections, First Japan-Turkey Workshop on Earthquake Engineering, Istanbul,(1997)
- [10] SHEIKH, S., UZUMERİ, S.M., Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns, Journal of Structural Division, Vol. 108, No. ST12, pp.2703-2722, (1982)

- [11] SHEIKH, S., YEH, C.C., Analytical Moment-Curvature Relations for Tied Concrete Columns, Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No.2 ,pp.529-544, (1992)
- [12] MANDER, J.B., PRIESTLEY, M.J.N., PARK, R., Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No.8 ,pp.1804-1826, (1988)
- [13] SAKAI, K., SHEIKH,S.,What Do We Know About Confinement in Reinforced Concrete Columns? , ACI Structural Journal, V.86, No.2, pp.192-207, (1989)
- [14] SAATCIOGLU, M., RAZVI, S., Strength and Ductility of Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, Vol.118, No.6, p.p.1590-1607, (1992)
- [15] SAATCIOGLU, M., SALAMAT, A., RAZVI,S., Confined Columns Under Eccentric Loading, Journal of Structural Engineering, Vol.121, No.11, pp.1547-1556, (1995)
- [16] ÇAKIROĞLU A., ÖZER E., Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistemler , Cilt I, İ.T.Ü. Kütüphanesi, İstanbul, (1980)
- [17] PARK, R., PAULAY, T., Reinforced Concrete Structures, A Willey-Interscience Publication , John Wiley & Sons (1975)
- [18] ERSOY U., Betonarmede Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı, Cilt I, Evrim Basım Yayın Dağıtım, İstanbul, (1987)
- [19] SAATCIOGLU, M., Modeling Hysteretic Force-Deformation Relationships for Reinforced Concrete Elements, Earthquake - Resistant Concrete Structures Inelastic Response and Design, ACI, SP-127, Sayfa 153-198, (1991)
- [20] CHARNEY, F.A., Correlation of the Analytical and Experimental Inelastic Response of a 1/5-Scale Seven-Story Reinforced Concrete Frame-Wall Structure, Earthquake -Resistant Concrete Structures Inelastic Response and Design, ACI, SP-127, Sayfa 261-361, (1991)
- [21] PARK, R., KENT, D., SAMPSON, R., Reinforced Concrete Members with Cyclic Loading, Journal of Structural Engineering, Vol.98, No.7, pp.1341-1360, (1972)
- [22] TÜRK STANDARTLARI ENSTİTÜSÜ, TS 500, Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, (1981)

- [23] **ÖZER, E.,** Lineer Olmayan Sistemlerin Hesabı İçin Bir Metod, Doktora Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, (1969)
- [24] **KROENKE, W., GUTZWILLER, M., LEE, R.,** Finite Element For Reinforced Concrete Frame Study, Journal of Structural Division, Vol.99, No.7, p.p.1371-1389, (1973)
- [25] **GİRGİN, K.,** Betonarme Yapı Sistemlerinde İkinci Mertebe Limit Yükün ve Göçme Güvenliğinin Belirlenmesi İçin Bir Yük Artımı Yöntemi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, (1996)
- [26] **GİRGİN, Z.C.,** Bazı Düzensizlikler İçeren Büyük Yapı Sistemlerinin Yatay Yüklere Göre Hesabı İçin Bir Yöntem, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, (1996)
- [27] **ÇAKIROĞLU, A., ÖZDEN, E., ÖZMEN, G.,** Yapı Sistemlerinin Hesabı İçin Matris Metodları ve Elektronik Hesap Makinası Programları, Cilt 1, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, (1992)
- [28] **ÇAKIROĞLU, A., ÖZDEN, E., ÖZMEN, G.,** Yapı Sistemlerinin Hesabı İçin Matris Metodları ve Elektronik Hesap Makinası Programları, Cilt 2, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, (1992)
- [29] **KARADOĞAN, F.,** Döşemeleri Düzlemleri İçinde Rijid Olmayan Yapıların Deprem Hesabı, Doçentlik Tezi, İTÜ, (1979)
- [30] **ÇAKIROĞLU, A.,** Kayma Şekildeğiştirmeleri Gözönünde Tutulan II. Mertebe Teorisine Ait Çubuk Sabitleri, İTÜ İnşaat Fakültesi Teknik Rapor No:32, (1978)
- [31] **ÇAKIROĞLU, A.,** Sonsuz Rijit Kısımları Bulunan Çubukların I. ve II. Mertebe Teorisine Ait Birim Deplasman Sabitleri, İTÜ Dergisi Cilt 36, Sayı 5, (1978)
- [32] **KESKİNEL, F., KARADOĞAN, F.,** Açıklamalı Örneklerle FORTRAN IV ve FORTRAN 77 Algoritma Kurma ve Program Geliştirme, (1987)
- [33] **KARADOĞAN, F., YÜKSEL, E., İLKİ, A.,** Deformability Limits and Ductility of Reinforced Concrete Bare Frames, First Japan-Turkey Workshop on Earthquake Engineering, Istanbul, Sayfa 53-67, (1997)

- [34] PAULAY, T., PRIESTLEY, M.J., Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, pp. 19-20, 186-187, John Wiley & Sons Inc., 1992.
- [35] SAFFARİNİ, H., QUDAIMAT, M., In-Plane Floor Deformations in RC Structures, *Journal of Structural Engineering*, Vol.118, No.11, p.p.3089-3102, (1992)
- [36] RUTENBERG, A., Laterally Loaded Flexible Diaphragm Buildings, *Journal of Structural Engineering*, Vol.106, No.9, p.p.1969-1973, (1979)
- [37] KARADOĞAN, F., GİRGIN, C., YÜKSEL, E., Simplified 3D Analysis of Staggered Buildings with Big Slab and Wall Openings, *European Workshop on the Seismic Behaviour of Asymmetric and Setback Structures*, Italy, (1996).
- [38] TEZCAN, S., Çubuk Sistemlerin Elektronik Hesap Makineleri İle Çözümü, Arı Kitabevi Matbaası, Sayfa 238, (1970)
- [39] PRESS, W., TEUKOLSKY, S., VETTERLING, W., FLANNERY, B., Numerical Recipes in Fortran The Art of Scientific Computing Second Edition, Cambridge University Press, Sayfa 449, (1992)
- [40] WILSON, E., HABIBULLAH, E., SAP90 - A Series of Computer Programs for the Finite Element Analysis of Structures, Structural Analysis User's Manual, C.S.I. Computers&Structures Inc. California, (1992)
- [41] İMAR VE İSKAN BAKANLIĞI DEPREM ARAŞTIRMA ENSTİTÜSÜ BAŞKANLIĞI, Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, (1975).

EK A BETONARME KOLON DENEYLERİ

Amaç

İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilen ve *Çanak Temel-Kolon Birleşimini* incelemeye yönelik olan bir deneysel çalışmada¹ üretilen sonuçlardan bazıları, bu tez çalışmasında aşağıda sıralanan amaçlar için kullanılmıştır:

- Deneysel ve kuramsal moment-eğrilik ilişkilerinin karşılaştırılması. Betonarme kesiti oluşturan beton ve donatı malzemeleri için öngörülen davranış modellerinin uygunluğu, yapılan varsayımların ve moment-eğrilik ilişkisini oluşturan programın kontrolü bu tür bir deneysel çalışmayla yapılabilir,
- Betonarme düzlem sistemlerde malzeme ve geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan çözümleme yapan *DOC2B* programının kontrolü amacıyla; deneysel ve kuramsal yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılmak istenmesi,
- Deneysel ve kuramsal yolla ulaşılan yapısal süneklik oranlarının karşılaştırılması.

Gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu davranışlarının benzer olduğu gözlenen numuneler, 1975 Deprem Yönetmeliğine göre boyutlandırılmışlardır. Boyutlandırma için, 124 kN. luk eksenel yük ile kolon tepe noktasına etkiyen 15.93 kN. luk yatay yük kullanılmıştır.

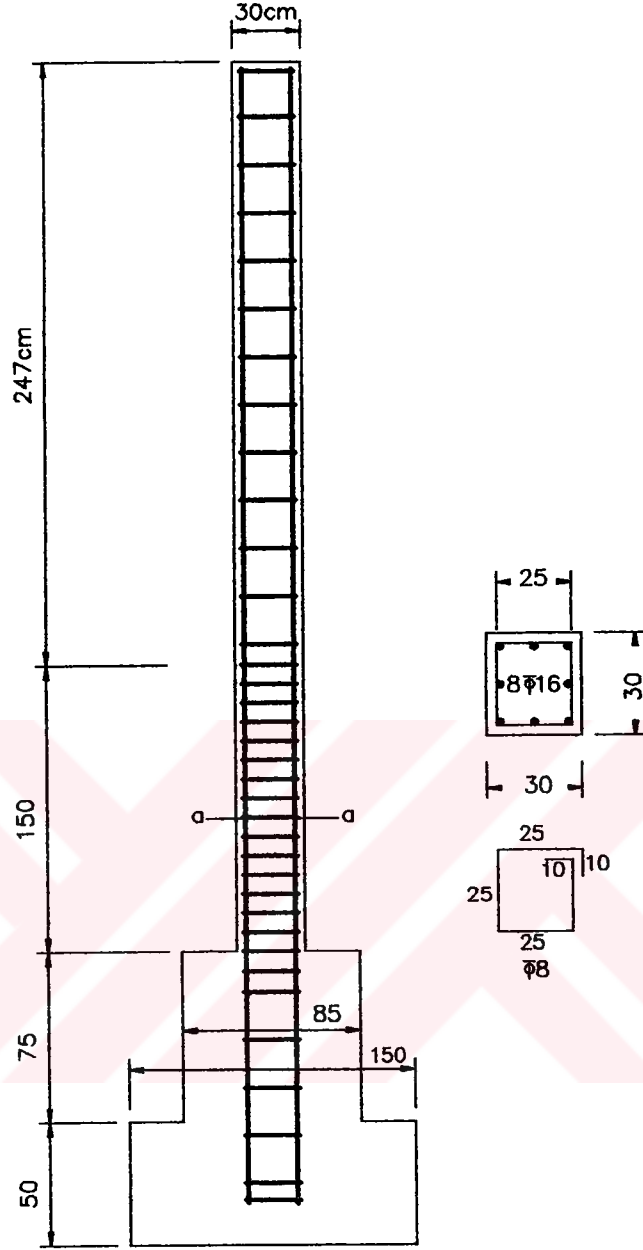
Deneysel çalışma 1/1 ölçekli 3 adet numuneyi içermektedir. Tüm numuneler aynı boyut ve donatı detaylarına sahip olmakla beraber farklı zamanlarda üretildikleri için malzeme dayanımlarında küçük değişimler söz konusudur.

Numunelerin genel boyutları ve donatı detayları Şekil A.1 de, malzeme deneyleriyle elde edilen özellikler de Tablo A.1 de verilmektedir.

Deney Düzeni

Tüm numuneler, temel tabanından ankastre olacak şekilde, test edilmek istenmektedir. Bu amaçla, temel pabucu üzerinde bırakılan deliklerden geçirilerek numuneyi laboratuvar test döşemesine bağlayan çelik öngerme bulonlarından yararlanılmıştır.

¹ Deprem Etkisindeki Betonarme Önyapım Çerçevelerin Davranışı ve Bunu Değiştiren Etkenler-I *Çanak Temel-Kolon Bağlantısı*, Teknik Rapor, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı



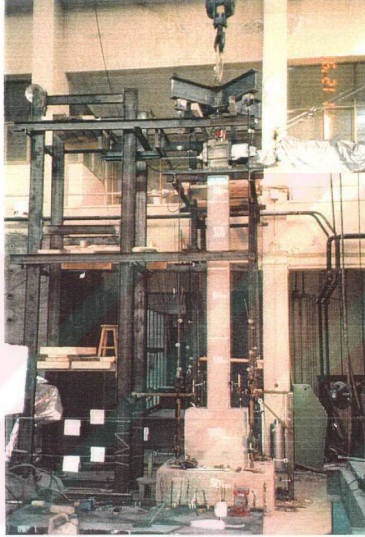
Şekil A.1 Numune Boyutları ve Donatı Yerleşimi

Tablo A.1 Malzeme Deneyleriyle Elde Edilen Özellikler

Dayanım N/mm^2	Beton	Boyuna Donatı			Enine Donatı		
	Basınç	Akma	Kopma	Uzama %	Akma	Kopma	Uzama %
Numune 1	51.6	561.0	722.0	20.4	509.7	603.0	23.7
Numune 2	48.0	541.0	782.0	20.4	465.0	658.0	17.0
Numune 3	45.2	541.0	782.0	20.4	465.0	658.0	17.0

Yüklemeler süresince, temel pabucu hizasındaki toptan kayma ve dönme miktarları yerdeğiştirme ölçerlerle sürekli olarak izlenmiş ve bu hareketlerin, ankastre mesnet kabulü yapılabilecek mertebede küçük oldukları gözlenmiştir.

Sabit normal kuvvet, oluşturulan özel bir deney düzeneği ile tatbik edilmiştir. Bu düzenekte; kolon, hidrolik krikonun ürettiği kuvvetle, laboratuvar döşemesi ile rijit çelik kiriş arasında sıkıştırılmaktadır, şekil A.2.



şekil A.2 Kolon Deneylerinde Kullanılan Düzenek

Yükleme Düzeni

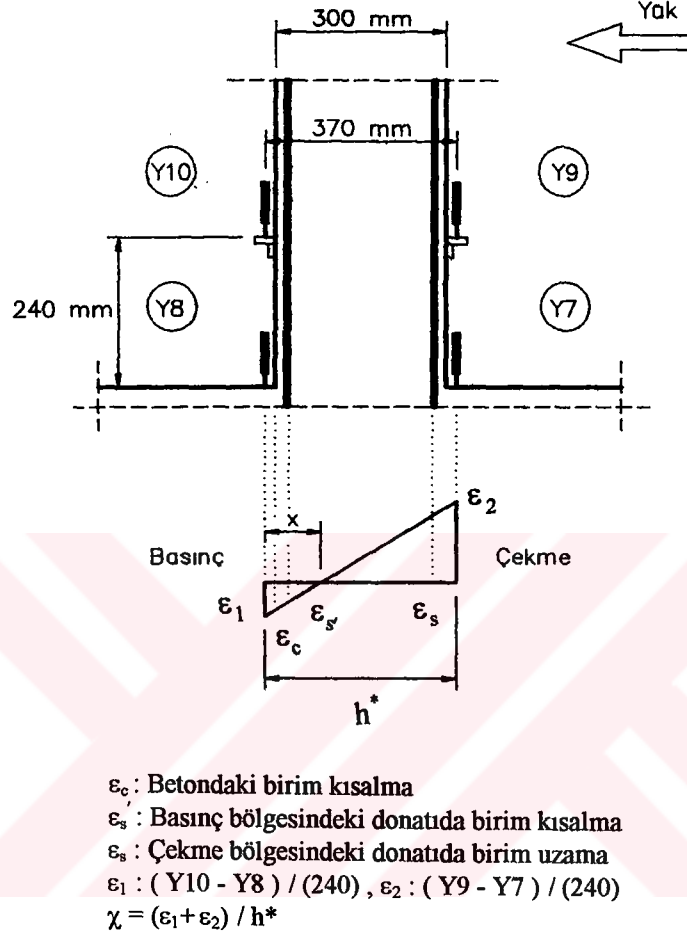
Uygulanan yükleme düzeni; sabit normal kuvvet altında, kolon tepe kesitindeki yatay yükün tek yönlü olarak artırılması şeklindeyir. Numunelere yatay yükü tatbik eden hidrolik veren, yerdeğiştirme esaslı olarak kontrol edilmiştir.

Ölçüm Düzeni

Yatay yükün şiddeti, hidrolik veren içerisindeki yük ölçerle tayin edilmektedir. Tepe yerdeğiştirmesi ve kolon-temel birleşim bölgesindeki yerdeğiştirmelerin ölçülmesi için de yerdeğiştirme ölçerlerden yararlanılmıştır, şekil A.3.

Ölçüm ve veri toplama sistemiyle ilgili detaylı bilgi Ek C de verilmektedir.

Kolon-temel birleşim bölgesinde, aralarındaki mesafe 240 mm. olan iki kesitte yapılan düşey yerdeğiştirme ölçümlerinden, bu bölgedeki moment-ortalama eğrilik ilişkisini elde etmek mümkün olmuştur, Şekil A.3.



Şekil A.3 Eğrilik Ölçüm Düzeneği

DeneySEL Bulgular

DeneySEL bulgular arasında yer alan; yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri ile kolon-temel birleşim bölgesindeki moment-eğrilik ilişkileri, kuramsal olarak elde edilenlerle karşılaştırılmak üzere Bölüm 2.8.2 de sunulmuştur.

EK B BÖLME DUVARLARININ YAPI DAVRANIŞINA OLAN ETKİLERİNİN KÜÇÜK TİTREŞİM ÖLÇÜMÜ DENEYLERİYLE BELİRLENMESİ

Giriş

Yeryüzü ve üzerindeki cisimler çok küçük genlikli dalgalarla sürekli olarak titreşmektedir. Küçük titreşimlerin (micro tremor) kaynakları arasında çok küçük yer sarsıntıları, trafik yükleri, makinalarının oluşturduğu titreşimler, rüzgarın yapılar üzerindeki etkileri vb. sayılabilir. Küçük titreşimlerin genlikleri genelde birkaç mikron mertebesinde, periyotları ise 0.05sn. ile 2 sn. aralığındadır. Gündüz ve gece kaydedilen küçük titreşimlerin periyotları arasında fazla fark olmamakta, ancak gündüz kayıtlarında genliklerin daha büyük olduğu gözlenmektedir.^{1,2}

Küçük titreşimler, ilk olarak 1908 yılında Japon araştırmacı F.OMORI tarafından elde edilmiştir. Bu tarihten sonra çok sayıda sismolog ve deprem mühendisi konuyla ilgilenmiştir. Zemin yada yapıların deprem sırasındaki davranışları, küçük titreşim ölçümü deneyleriyle tayin edilebilmektedir.³ Japonya'da sistematik olarak yapılan küçük titreşim ölçümleriyle, geniş bir alandaki zemin özellikleri konusunda bilgi birikimi sağlanmıştır. Küçük titreşimler ve deprem sırasında alınmış kayıtlardan elde edilen periyot ve sönüm oranı değerleri karşılaştırıldığında, deprem sırasında etkin yapı periyodunun %10 ile %20 mertebesinde daha büyük olduğu sonucuna ulaşılmıştır.⁴ Aynı çalışmada, sönüm oranıyla ilgili genel bir sonuca varılamamıştır.

Deneysel Çalışmada Kullanılan Aletler

1. Titreşim Ölçerler: 0.005 - 3000 mikron ve 1-70 Hertz sınırları arasında veri toplayabilirler. Alet doğal periyodu 1 sn.'dir. Karakteristikleri belirli hassas bir yaya bağlı olan bobinin (salıncağın) yer hareketiyle orantılı olarak mıknatıs halka içersinde salınması sonucu çıkış geriliminde meydana gelen değişimin kaydedilmesi, ölçüm tekniğinin temel ilkesini oluşturmaktadır. Titreşim ölçerin gönderdiği bilgi, salıncağın salınım hızıdır.

2. Yükseltici-Dönüştürücü (Amplifier) : Titreşim ölçeri sabit bir akımla besler. Titreşim ölçerlerden hız olarak gelen büyüklüğün yerdeğiştirme veya ivmeye

¹ KANAI, K., Engineering Seismology, University of Tokyo Press, (1983)

² KANAI, K., TANAKA. T., Bulletin of the Earthquake Research Institute Vol 39, pp.97-114, (1961)

³ ISHIYAMA, Y., Microtremors and Related Topics, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering Publication, JAPAN.

⁴ TANAKA,T., YOSHIKAWA, S., OSAWA,Y., MORISHITA,T., Period and Damping of Vibration on Actual Buildings During Earthquakes, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol 47, pp.1073-1092, (1969)

dönüştürülmesi, genliğin değiştirilmesi gibi fonksiyonları vardır. Ortam sıcaklığı ve rutubet oranındaki değişim sonuçları etkileyebildiğinden farklı ortamlarda deney öncesi uyarılma yapılması gerekmektedir.

3. Sayısal Kaydedici : Analog sinyal olarak aldığı sürekli formdaki veriyi tanımlanan sıklıkta sayısallaştırarak disket ortamında saklar. Deney sırasında, oluşan dalgayı eş zamanlı olarak izleme imkanı da vardır.

Zaman-Genlik Verilerinin İşlenme Yöntemleri

Karmaşık bir bileşimi bileşenlerine ayırıp, bu bileşenleri bir ölçüte göre sıralama işlemine *Spektrum* denir.⁵ Zaman-genlik eğrisinin analizinde değişik spektrumlar kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları; Periyot-Yineleme Sayısı Spektrumu, Olasılık Yoğunluğu Spektrumu, Fourier Spektrumu, Güç Spektrumu vb. dir. Burada Periyot-Yineleme Sayısı Spektrumu ve Fourier Spektrumu ile ilgili özet bilgi verilecektir.

i. Periyot-Yineleme Sayısı Spektrumu: İncelenecek büyüklük alt sınıflara ayrılır. Her sınıf için, sınıf ortalaması kullanılabilir. Her sınıfa isabet eden yineleme sayısı, orantılı çubuk diyagramla gösterildiğinde bir tür spektrum elde edilir. El-Centro deprem kaydında 0.22-0.27 sn.lik periyot sınıfına (sınıf ortalaması 0.245 sn.) ait periyot yineleme sayısı en fazladır. Yineleme sayısı fazla olan periyot değerine *hakim periyot* adı verilir. Periyot-Yineleme Sayısı Spektrumu incelenirken, sıfırdan geçme yöntemi ve tepe yöntemi üzerinde durulacaktır.

Zaman-genlik eğrisinin sıfırdan geçtiği noktalar arasındaki zaman aralığını ölçüp, bunun iki katını alarak periyot bulma işlemine *sıfırdan geçme yöntemi* adı verilir. Dalga formu, basit trigonometrik fonksiyonlardan uzaklaştığında sıfırdan geçme yönteminin verdiği periyot değeriyle gerçek periyot arasındaki fark açılır. Kısa periyotlu, esas dalga üzerine oturan ve sıfırdan geçmeyen küçük dalgacıklar bu yöntemde gözden kaçırılır.

Zaman-genlik eğrisinde, pikler arasındaki zaman aralığını ölçerek periyot değerine ulaşma yoluna da *tepe yöntemi* adı verilmektedir. Bu yöntemin elverişli yanı daha karmaşık dalga biçimlerinde de doğru değer verebiliyor olmasıdır.

ii. Fourier Spektrumu: Sürekli formdaki analog veri; *Analogtan Sayısala Çeviriciler (A/D Convertor)* vasıtasıyla, tanımlanmış aralıklarla sayısallaştırılmaktadır. Sonuçta Δt zaman aralıklı bir veri dizesi elde edilmektedir. Zaman-genlik verilerinin işlenmesi aşamasında, bu noktaların tümünden belirli bir yakınlıkta geçen ve orjinal sürekli eğriyi temsil edebilen bir fonksiyona ulaşmak amaçlanmaktadır. İşlemler trigonometrik fonksiyonlar kullanarak yapılabilmektedir. Yöntemi geliştiren Fransız matematikçisi Fourier'in adına izafeten *Sonlu Fourier Dönüşümü* adı verilen yöntemde; seçilen trigonometrik fonksiyonun katsayılarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Farklı katsayılarla çarpılan trigonometrik fonksiyonların (Sinüs ve Cosinüs) birbirine

⁵ OHSAKI, Y.; İPEK, M.(Türkçeye Çeviren) Deprem Dalgasının Spektral Analizine Giriş, İstanbul, (1991)

eklenmesiyle bileşke genlikler elde edilmektedir. Frekanslar ve hesaplanan genlik değerlerinin oluşturduğu diyagrama da *Fourier Spektrumu* adı verilmektedir.

Eşit aralıklı N adet noktadan oluşan veri dizesi x_m ($m=0,1,2,\dots, N-1$) ile gösterilirse, Fourier dönüşümünün matematik ifadesi (B.1) bağıntısında verilmiştir. A_0 veri dizesi ortalamasını göstermektedir.

$$\begin{aligned}
 A_k &= \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m \cos \frac{2\pi km}{N} & k &= 0,1,2,\dots, \frac{N}{2}-1, \frac{N}{2} \\
 B_k &= \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m \sin \frac{2\pi km}{N} & k &= 0,1,2,\dots, \frac{N}{2}-1 \\
 x_m &= \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} \left[A_k \cos \frac{2\pi km}{N} + B_k \sin \frac{2\pi km}{N} \right] + \frac{A_{N/2}}{2} \cos \frac{2\pi (N/2)m}{N} \\
 m &= 0,1,2,\dots, N-1
 \end{aligned} \tag{B.1}$$

Kompleks sayıların kullanılması halinde, Sonlu Fourier Kompleks Katsayıları:

$$\begin{aligned}
 C_k &= \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m e^{-i(2\pi km/N)} & k &= 0,1,2,\dots, N-1 \\
 A_k &= 2R(C_k) \\
 B_k &= -2I(C_k) & k &= 0,1,\dots, \frac{N}{2}
 \end{aligned}$$

Fourier dönüşümüyle, zaman ortamından frekans ortamına geçilmektedir. Bu dönüşümle, zaman ortamındaki veri dizesinin hangi frekans bileşenlerini içerdiği ve hangi frekans bileşenlerinin genliklerinin daha büyük olduğu (Hakim Frekans) ortaya çıkmaktadır.

Sonlu Fourier Dönüşümü, kolay anlaşılabilir ve kolay programlanabilir bir yöntem olmakla beraber veri sayısı arttığında hesap süresi çok uzamaktadır. J.W. Cooley ve J.W. Tukey'in geliştirdikleri *Hızlı Fourier Dönüşümü* (Fast Fourier Transform, FFT), sonlu kompleks Fourier katsayılarına çok daha hızlı ulaşabilmektedir. Bu teknikte örnek nokta sayısının, 2'nin (n.) kuvveti olması gerekmektedir. Bu durumu sağlamak üzere, gerektiğinde gerçek verinin sonuna sıfırlar eklenerek en yakın tam kuvvete ulaşma yoluna gidilir.

Veri İşlemede Bazı Önemli Noktalar

i. Sayısal kaydedicide saklama işlemi 2'li sayma düzeninde (Binary Mode) yapılmaktadır. Hazır bir yazılım kullanılarak; veri, ASCII (American Standart Code for Information Interchange) moduna dönüştürülür.

ii. İdeal olarak, tüm titreşim ölçerlerin aynı ortamda aynı sonuçları ürettiyor olmaları gerekmektedir. Ancak bu durum, çok defa mümkün olamamaktadır. Bu yüzden deneysel çalışma öncesi titreşim ölçerler birbirlerine yakın olarak yerleştirilerek (deney sırasında kullanılacak kablolama ve kanal numaraları aynı olacak şekilde) uyarılama verisi alınmalıdır. Kullanılan titreşim ölçerlerden bir tanesi karşılaştırmacı kabul edilerek, diğer titreşim ölçerler için kullanılacak düzeltme çarpanları belirlenecektir. Düzeltme çarpanlarının hesaplanmasında izlenen yollardan biri, tüm kanallarda FFT çözümlemesi yaparak Fourier Spektrumları elde etmek ve bunları karşılaştırmacı kanalın Fourier Spektrumuna oranlamaktır. Bu tür bir düzeltmenin bazı durumlarda sonuçları %10 mertebesinde değiştirebildiği söylenilmektedir.

iii. Veri pencereleri, FFT çözümlemesi sonrasında ulaşılacak spektrumun özelliklerini bir miktar değiştirmek, ana pikler civarında ortaya çıkabilecek küçük pikleri elemek amacıyla kullanılan çarpım fonksiyonlarıdır. Seçilen hesap aralığında, keskin piklerin bulunması durumunda *Dikdörtgen Veri Penceresi*, sürekli formda veri bulunması durumunda ise *Hanning Veri Penceresi* uygun sonuç vermektedir, Şekil B.1.

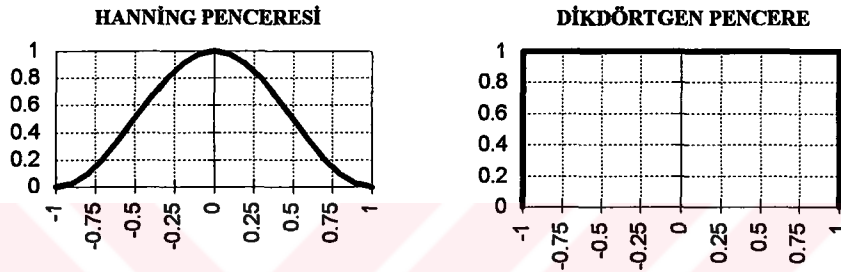
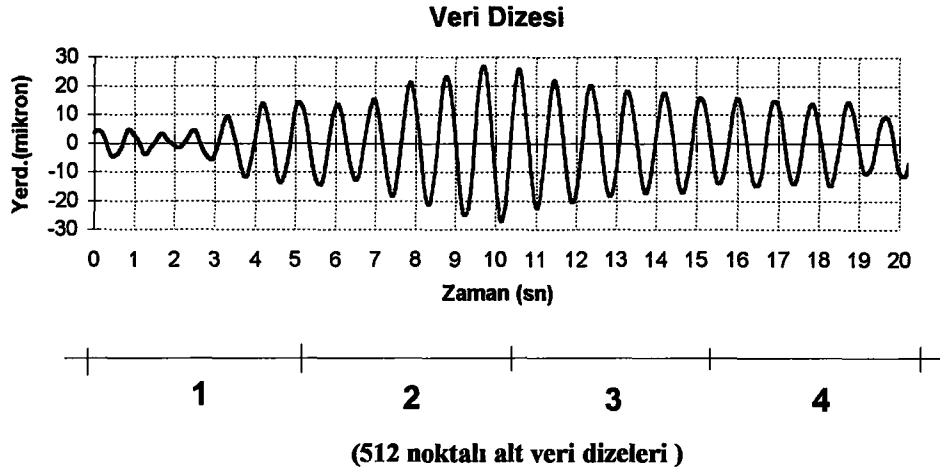
iv. Büyük bir kaydın küçük dilimlere ayrılıp, hesabın tüm dilimlerde ayrı ayrı yapıldıktan sonra ulaşılan büyüklüklerin ortalamasının alınması, daha genel sonuçlara varmak açısından önemlidir, Şekil B.1.

Geliştirilen Bir Bilgisayar Programı

Toplanan veri dizisine FFT çözümlemesini uygulayarak; veri dizisinin hangi frekans bileşenlerini içerdiğini, hangi frekans bileşenlerinin genliklerinin daha büyük olduğunu ortaya çıkarmak, mod şekillerini çizmek, kat rijitlik merkezinin yerini belirlemek gibi amaçlar için bir bilgisayar programı geliştirilmiştir.

Genel Akış Diyagramı Şekil B.2 de verilen bilgisayar programında, büyük veri dizisi alt parçalara ayrılmakta ve her farklı bölge için Hanning ya da Dikdörtgen türü veri pencerelerinden birisi kullanılarak, toplanan veriler çözümlemeye hazırlanmaktadır. Pencere uygulanmış küçük veri dizisi; FFT çözümlemesine tabi tutulmakta, ulaşılan büyüklükler saklandıktan sonra işlemler diğer alt parçalarda yinelenmektedir. Tüm veri dizisi için geçerli olacak değerlere ise alt parçalarda ulaşılan büyüklüklerin ortalaması alınarak ulaşılmaktadır.

Şekil B.2 deki akış diyaramından da görüldüğü gibi, geliştirilen programda istenen spektrumların oranlanması imkanı da vardır. Bu özellik, uyarılama verileri için ya da göreceli hareketlerin anlaşılmasına yönelik analizlerde kullanılmaktadır.



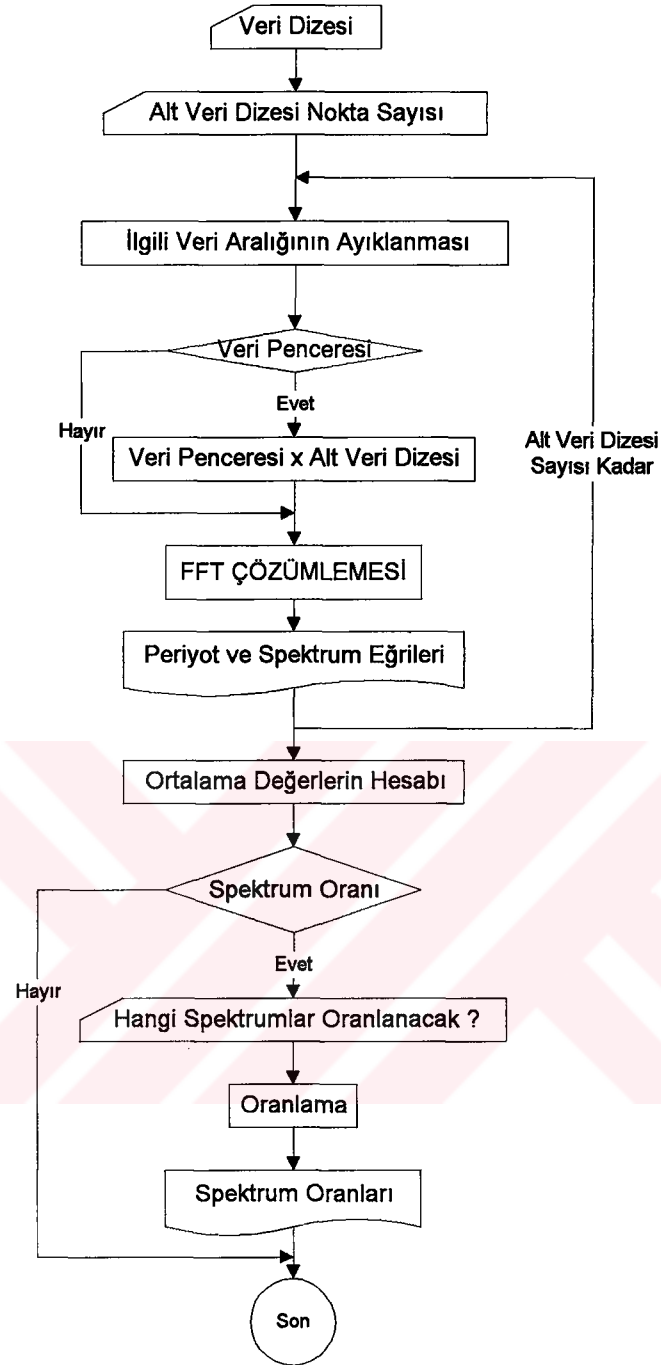
Şekil B.1 Veri Dizisi, Alt Veri Dizeleri ve Veri Penceresi

Bölme Duvarlarının Yapı Dinamik Özelliklerine Olan Etkilerinin Belirlenmesine Yönelik Bir Deneysel Çalışma

Bir toplu konut alanından seçilen, aynı proje ile inşa edilmiş üç yapı bloğunda küçük titreşim ölçümleri yapılmıştır. Seçilen blokların birbirlerine yakın oluşları ve bölgedeki zemin özelliklerinde bir değişme gözlenmemiş olması nedeniyle, zemin özelliklerini belirlemeye yönelik bir çalışma yapılmamıştır. Blokların aynı yapımcı tarafından inşa edilmesi ve üretimde hazır beton kullanılması da bloklar arasındaki üretim farklılıklarını azaltmaktadır.

Seçilen bloklar 1 bodrum, 1 zemin, 9 normal ve 1 çatı katını içermektedir. Tüm bloklar için geçerli olan tipik kat planı ve titreşim ölçerlerin konumları Şekil B.3 de verilmiştir. Yapıların genel görünüşü de Şekil B.4 yer almaktadır.

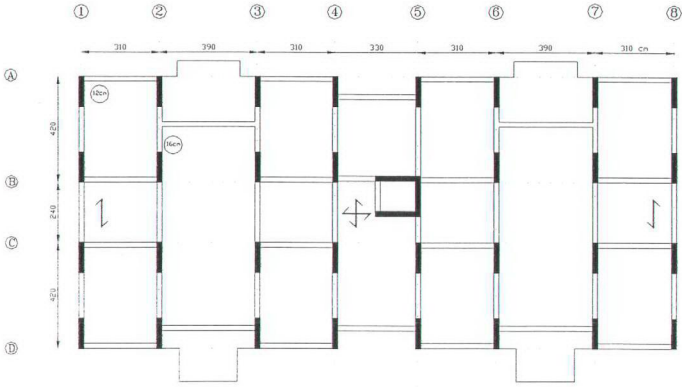
1.Blokta, zemin kattaki küçük bazı duvarlar hariç, bölme duvarı yoktur. Dolayısıyla bu blok, bölme duvarı katkısını belirlemek üzere karşılaştırma verisi özelliği taşımaktadır. *2.Blokta*, tüm katlarda bölme duvarlarının oluşturulması işlemi tamamlanmış fakat sıva işlemi başlanamıştır. Çerçeve gözlerinde, duvar üst kenarı ile kiriş arasında boşluklar bulunmaktadır. *3. Blokta* ise, sıva işlemi tümüyle tamamlanmıştır.



Şekil B.2 FFT Çözümlemesi Yapan Programın Genel Akış Diyagramı

Dış duvarlar 30 cm.lik ısı yalıtım tuğlası, iç duvarlar ise 8.5 cm.lik bölme tuğlası kullanılarak inşa edilmiştir.

Tüm bloklarda ölçümler kısa ve uzun doğrultu için ayrı ayrı yapılmıştır. Veri toplama zaman aralığı 0.01 sn. olup, her veri dizesi yaklaşık 12000 nokta içermektedir. Bu veri dosyaları geliştirilen bilgisayar programıyla işlenerek, bina dinamik özellikleri belirlenmiştir.



Şekil B.3 Tipik Kalıp Planı ve Titreşim Ölçerlerin Yerleşimi



Şekil B.4 Titreşim Ölçümü Yapılan Binaların Genel Görünümü

Uzun doğrultuda toplanan verinin 20 sn.lik bölümü, duvarsız blok ve sıvalı duvarlı blok için sırasıyla Şekil B.5, Şekil B.6 da verilmiştir.

Tüm bloklarda ulaşılan Fourier Spektrumları, kısa doğrultu için Şekil B.7 de, uzun doğrultu için de Şekil B.8 de verilmiştir. Hesaplanan periyot değerleri de aynı şekiller üzerinde görülmektedir.

Bloklar için, her iki doğrultudaki normalleştirilmiş ilk üç mod Şekil B.9 da verilmiştir.

Sonuçlar

Küçük titreşim ölçümleriyle ulaşılan serbest titreşim özelliklerinin karşılaştırılmasından görülmektedir ki, yapıya bölme duvarlarının ilave edilmesi periyotları küçültmekte, mod şekillerini ise bir miktar değiştirmektedir.

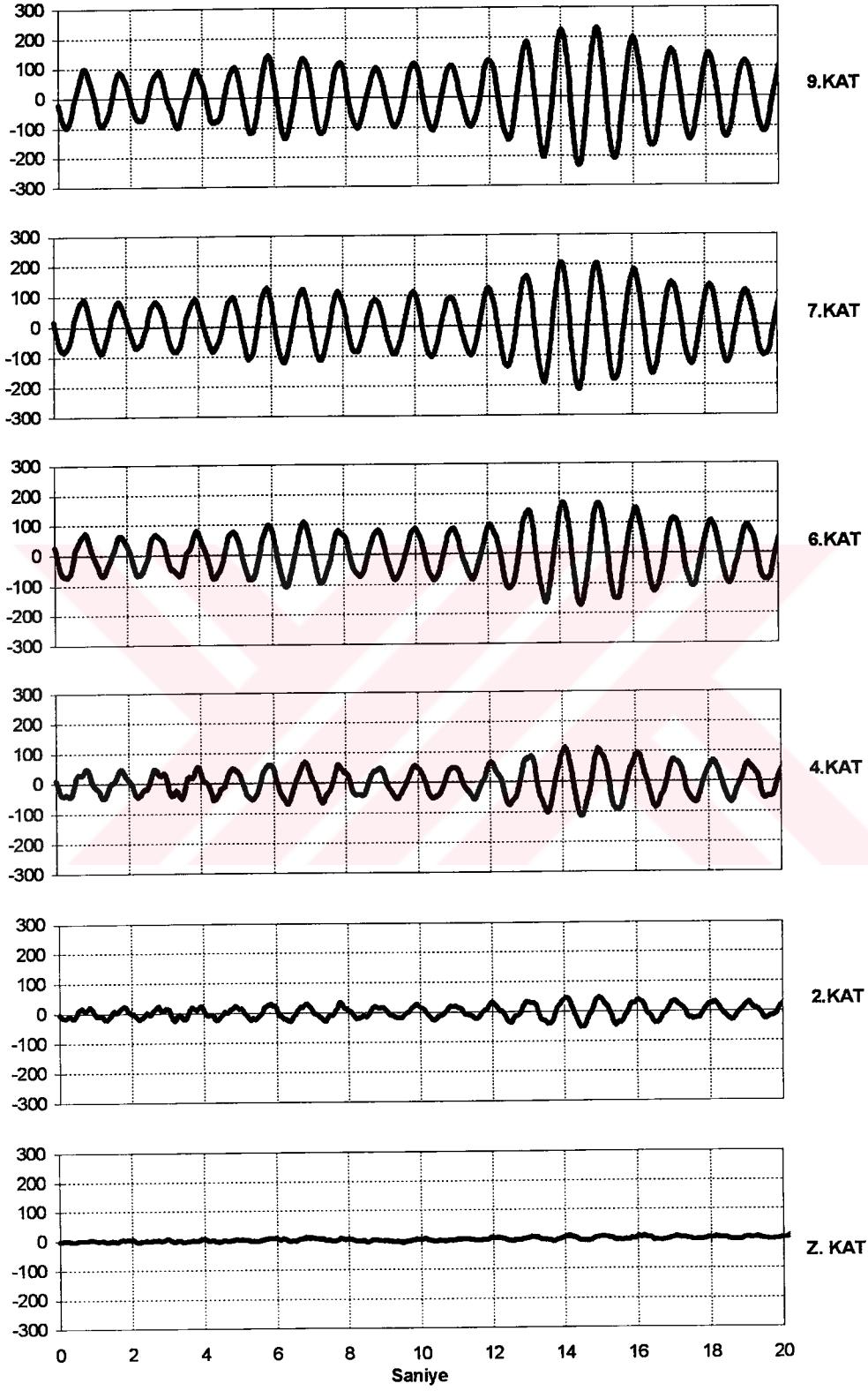
Yapı kütlesini de arttırarak bir yanda periyotları uzatma nedeni olan bölme duvarları, yatay rijitliğe katkılarının daha büyük olması sebebiyle yapı periyotlarını küçültmektedirler.

Bölme duvarlarının yatay rijitliğine olan katkıları, kat yatay yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılmasıyla anlaşılabilir. Uzun doğrultu için; duvarsız blokta 230 mikron mertebesinde olan 9. kat yerdeğiştirmesi, sıvalı duvarlı blokta 4 mikron mertebesine düşmektedir, Şekil B.5 ve Şekil B.6.

Titreşim modlarına ait periyot değerleri, duvarların etkisiyle küçülmektedir. Bu küçülme, betonarme çerçeve yatay rijitliğinin diğer doğrultuya göre küçük olduğu uzun doğrultuda daha belirgindir. Uzun doğrultu için kaydedilen 1. moda ait periyot değerleri; duvarsız blok için 1.02 sn., sıvalı duvarlı blok için 0.60 sn. olmuştur, Şekil B.8.

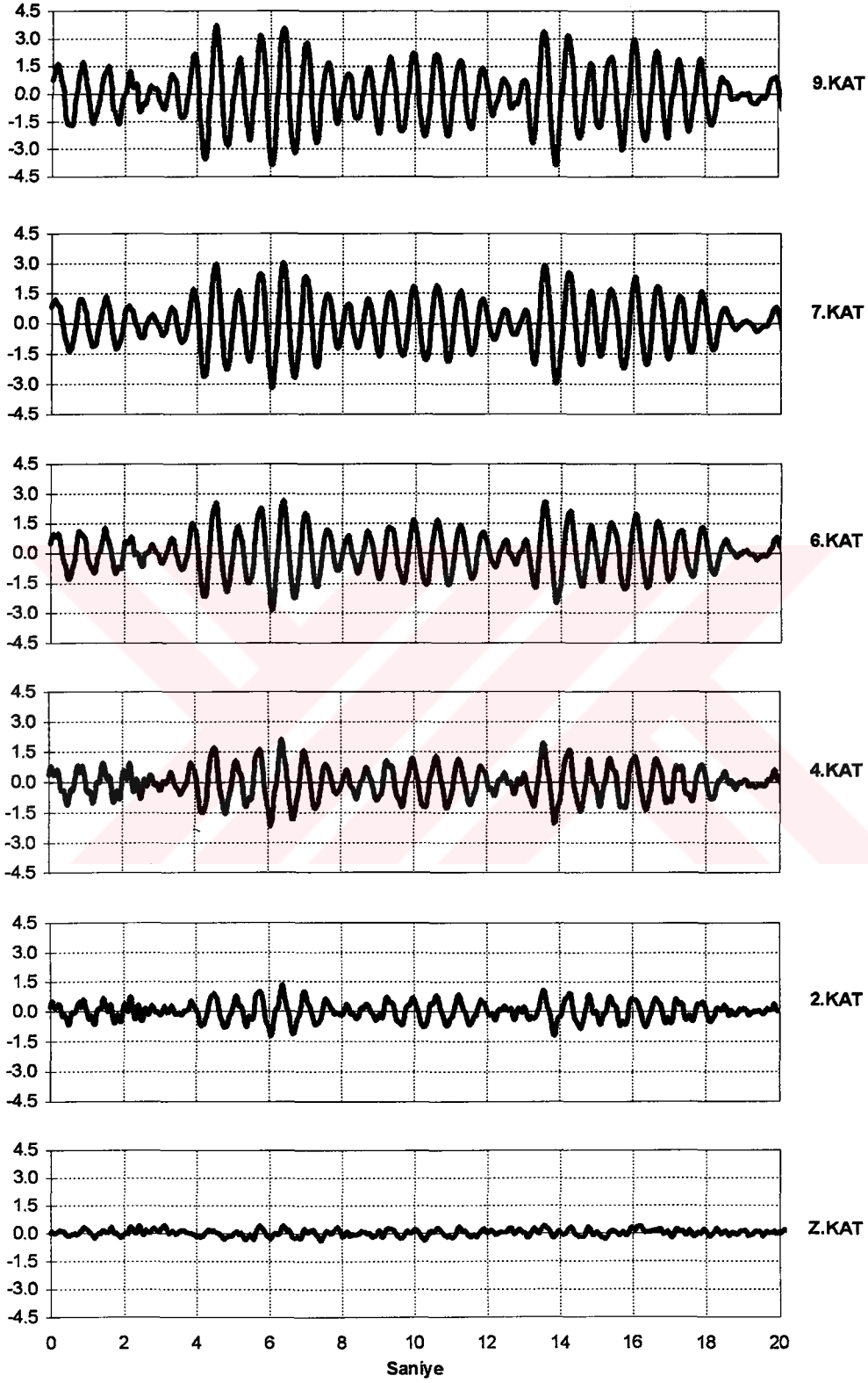
Ölçümler sonucu elde edilen bir diğer önemli nokta da, binalarda iki ana doğrultudaki yatay rijitliklerin birbirlerine yakın olmayışlarıdır. Ülkemizde yaygın olarak karşılaşılan bu durumun başlıca nedenleri, mimari tercihlerde dikdörtgen kolon kesitlerinin baskın olması ve yapıda dikdörtgen kesitli kolonların aynı doğrultuda yerleştirilmeleridir. Duvarsız bloğun 1. mod için kısa ve uzun doğrultuları karşılaştırıldığında, periyot değerleri sırasıyla 0.68 sn. ve 1.02 sn. olmaktadır, Şekil B.7 ve Şekil B.8.

DUVARSIZ BLOK - UZUN DOĞRULTU
Zaman - Kat Yerdeğiştirmesi (Mikron)



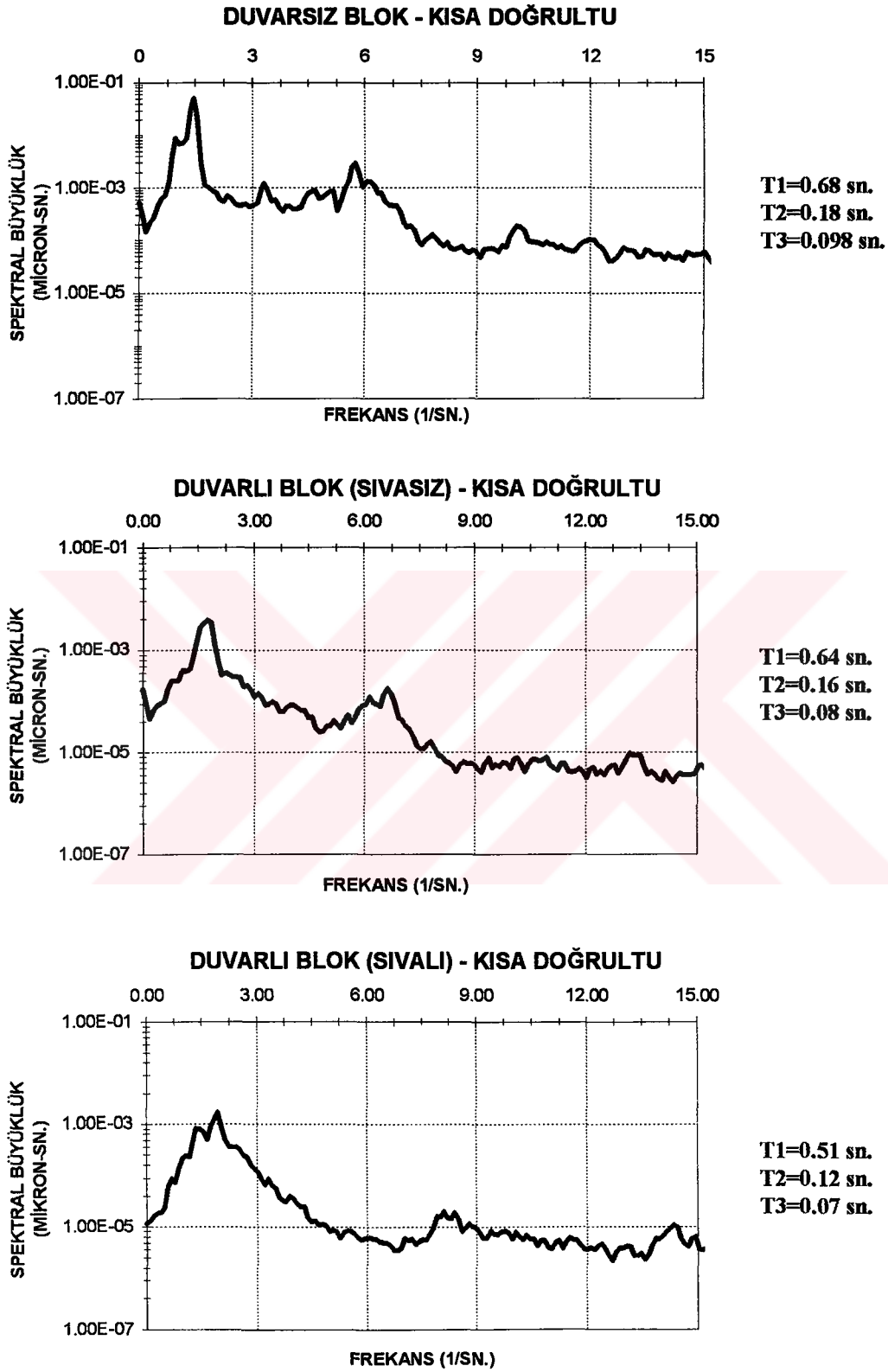
Şekil B.5 Duvarsız Bloкта Uzun Doğrultu İçin Kaydedilen Veriden Bir Bölüm

DUVARLI BLOK (SIVALI) - UZUN DOĞRULTU
Zaman - Kat Yerdeğişirmesi (Mikron)



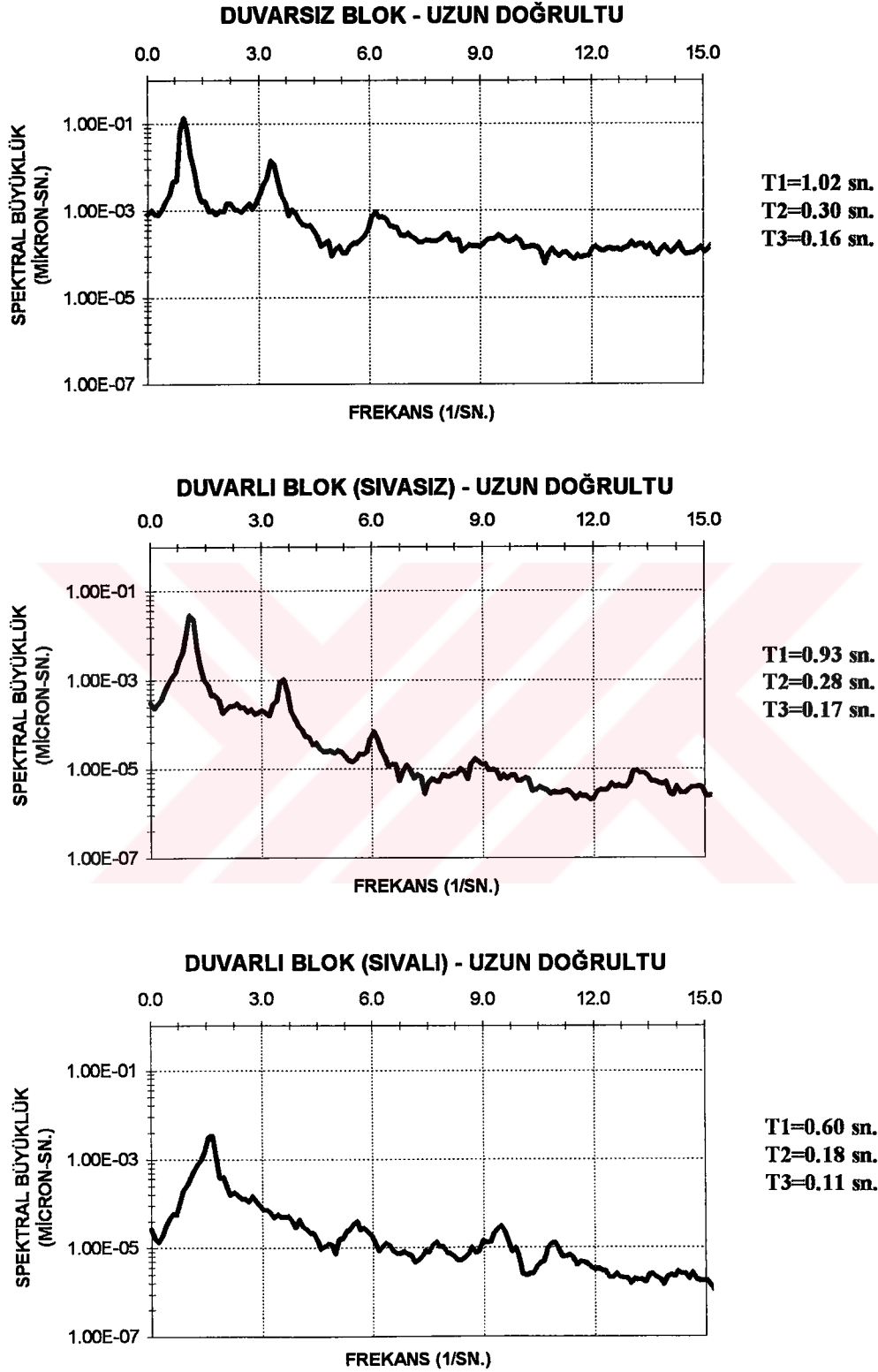
Şekil B.6 Sıvalı Duvarlı Bloкта Uzun Doğrultu İçin Kaydedilen Veriden Bir Bölüm

KISA DOĞRULTU İÇİN FOURİER SPEKTRUMLARI



Şekil B.7 Kısa Doğrultu İçin Fourier Spektrumları

UZUN DOĞRULTU İÇİN FOURİER SPEKTRUMLARI



Şekil B.8 Uzun Doğrultu İçin Fourier Spektrumları

EK C BETONARME DÜZLEM ÇERÇEVELERDE ÖZEL BİR BÖLME DUVARI TİPİ

Kapsam ve Amaç

Betonarme veya çelik elemanlarla oluşturulmuş bir çerçevede, kolon ve kirişlerle çevrili çerçeve gözlerinin tuğla duvarlar ile doldurulması yaygın bir uygulamadır. Kullanım nedenleri; bağımsız üniteleri birbirinden ayırmak, ısı ve ses yalıtımı sağlamak olan tuğla duvarlar, düşük maliyetli yapı elemanlarıdır.

Bölme duvarları yapıya ikincil eleman olarak yerleştirilmiş olmalarına rağmen, deprem hareketi sırasında içerisinde bulundukları çerçevelerin ve dolayısıyla yapının davranışını önemli ölçüde değiştirebilirler. Bu davranış değişikliği, olumlu ya da olumsuz yönde olabilir. Oysa yaygın boyutlandırma tarzında; taşıyıcı sistemin kesit hesaplarına esas olacak iç kuvvetler, duvarların yok sayıldığı mekanik modelden alınmaktadır.

Bölme duvarlı çerçevelerin davranışlarının belirlenmesine yönelik çok sayıda deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda kullanılan numuneler, genelde tek katlı ve tek açıklıklı düzlem çerçevelerdir. Deneysel çalışmalarda gözlenen göçme modları; çekme tarafındaki kolonda hasar, tuğlaların yatay derzler boyunca birbirleri üzerinde kayması, duvar çekme köşegeninde çekme çatlağı, duvar basınç köşegeninde ezilme, kolonlarda eğilme veya kayma tipi göçme, şeklinde sıralanabilir. Çok defa bu göçme modlarından bazıları birbirlerini takiben meydana gelmektedir¹.

Duvar davranışının kuramsal hesaplara yansıtılabilmesi için iki önemli yaklaşım vardır. Bunlardan birincisi; tuğla, harç ve aderans düzeyine inilerek yapılan *mikro modelleme*, ikincisi ise genel göçme modlarını yakalayabilecek tarzda yapılan *makro modelledir*. Bölme duvarlarının bileşenleri düzeyinde ele alındığı hesap tarzının büyük yapı sistemlerine uygulanmasındaki zorluk dolayısıyla, doğrusal olmayan hesap yapan programlarda genelde makro modeller kullanılmaktadır.²

Bu çalışmada; bölme duvarı ile kendisini çevreleyen betonarme elemanlar arasında beton kayma kamaları oluşturularak, özel bir duvar elde edilmektedir. Kullanılan inşaat tekniğinde; önce duvar özel kenar profiliyle inşa edilmekte, ardından betonarme elemanlar oluşturulmaktadır. Yatay yükler etkisinde çerçeve duvar arayüzü boyunca ayrılma ve rölatif hareket gözlenmemekte ve sistem dayanımı önemli ölçüde artmaktadır. Bu tip duvarın bir diğer üstünlüğü de düzlemine dik doğrultuda blok olarak devrilmesinin önlenmiş olmasıdır. Önerilen duvarın etkinliğini anlamak üzere,

¹ PAULAY, T., PRIESTLEY, M., J., Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings (1992), Sayfa 584-595

² VIA, G., DECANINI, L.D., BERTOLDI, S., H., SANTINI, S., Analytical Models of Infilled Frames, 10th European Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam, (1995)

betonarme çıplak çerçeve deneyleri ile kayma kamasız duvar deneyleri de yapılmıştır. Ayrıca hasar görmüş bölme duvarına uygulanabilecek bir onarım tekniği çalışılmıştır.

Deneysel olarak incelenen numune sayısının az olması nedeniyle; bu aşamada bir davranış modeli oluşturulamıyor ise de üretilen sonuçların kuramsal hesaplarda nasıl kullanılacağı, bir örnekle gösterilmiştir.

Önceki Çalışmalar

Negro ve Verzeletti³ ; bölme duvarlarının yapının başlangıç rijitliğini arttırmaları sebebiyle, atalet kuvvetlerinin büyümesine neden olabildiklerini, planda ve kesitte uygun olmayan yerleşimleri dolayısıyla da, burulma deformasyonlarının etkili olmasına, yumuşak kat mekanizmasına yada kısa kolon oluşumuna sebebiyet verebildiklerini belirtmişlerdir.

Bertero ve Brokken⁴ ; bölme duvarlı çerçevelerde iki uç durumun altını çizmişlerdir. Birinci durumda; bölme duvarları kendilerini çevreleyen çerçevelerden uygun bir şekilde izole edilerek, yapısal etkileri ortadan kaldırılmaktadır. İkinci durumda ise, bölme duvarları çerçeve içersine sıkıca yerleştirilerek, çerçeve ile etkileşimleri artırılır. Yapıya yerleştirilen kütle gerekli ise, bu kütle yi yatay yüklerin taşınmasında da kullanmak daha rasyonel bir yaklaşımdır. Duvarların mevcudiyeti, esnek olan çerçevelerin dayanım ve rijitliklerini önemli ölçüde artırmaktadır. Duvar ile çerçeve arasındaki etkileşim dolayısıyla, duvarlar elastik sınırlarının ötesinde deformasyonlara maruz kalmaktadır. Bu durum donatısız tuğla ve beton duvar kullanımı halinde, yarı kırılğan bir bölme duvarı tipini ortaya koymaktadır. Bölme duvarına yerleştirilecek donatılar bu sorunun çözülmesinde etkili olabilmektedir.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada ulaşılan en önemli sonuçlar; yapıya donatılı veya donatısız bölme duvarı ilavesiyle, yatay rijitlik ve dayanımın artacağı, servis yatay yükleri düzeyinde duvarda çatlama meydana geldikten sonra başlangıç rijitliğinin önemli ölçüde azaldığı ve yön değiştiren yüklemenin herhangi bir adımındaki yatay rijitlik ve dayanımın önceki yük geçmişine bağlı olduğu, şeklinde sıralanmıştır.

Page⁵ , dolu tuğla ve harçla oluşturulan duvarlar üzerinde deneysel ve kuramsal olarak çalışmıştır. Tuğlanın homogen ve izotrop bir malzeme olmadığını belirterek; genelde harç dayanımının dolu tuğla dayanımına göre daha düşük olduğunu, duvarda doğrusal olmayan şekildeğişikliklerin önemli bölümünün harç fazından kaynaklandığını belirtmiştir. Ortalama duvar elastisite modülü olarak, tuğla sıralarına paralel ve dik yönde hesaplanan elastisite modüllerinin ortalamasının alınabileceği söylemiştir. Poisson oranı olarak yaklaşık 1/6 değerini önermiştir.

³ NEGRO, P., VERZELETTI, G., Effect of Infills on the Global Behaviour of R/C Frames: Energy Considerations from Pseudo-dynamic Tests, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.25, 753-773, (1996)

⁴ BERTERO, V., BROKKEN, S., Infills in Seismic Resistant Building, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.109, No.6, (1983)

⁵ PAGE, A., Finite Element Model for Masonry, ASCE Journal of Structural Division, Vol.104, No.8, (1978)

Knutson ve Nielsen⁶, duvar elemanlar üzerinde gerçekleştirilen eksenel basınç deneylerinde, duvar elastisite modülünün nasıl tanımlanabileceği konusunda çalışmışlardır. Ulaşılan basınç dayanımının yaklaşık %40'ı düzeyindeki dayanım ve şekildeğiştirme oranlandığında, elde edilen büyüklük *Duvar Elastisite Modülü* olarak isimlendirilmiştir. Yükleme başlıklarında meydana gelen ezilme etkilerini de ortadan kaldırmak için, gerilme-şekildeğiştirme diyagramının %5 ve %35 'i düzeyindeki değerler kullanılarak (C.1) bağıntısı oluşturulmuştur.

$$E_{0.05-0.35} = \frac{0.35f_c - 0.05f_c}{\epsilon_{0.35} - \epsilon_{0.05}} \quad (C.1)$$

Yorulmaz ve Atan⁷, iki eksenli gerilme durumunda değişik forme yapı taşlarından oluşturulmuş duvar numunelerin davranışlarını belirlemeye yönelik bir deneysel çalışma yapmışlardır. Oluşturulan numunelerde; taşıyıcı delikli tuğla, ytong ve karkas yapı tuğlası gibi yapı taşlarını, çimento ve kireç-çimento harcı kullanarak birleştirmişlerdir. Numunelerde iki eksenli gerilme hali, yatay duvar derzleri ile değişik açılar yapan basınç kuvveti uygulanarak elde edilmiştir. Eksenel gerilme ile kayma gerilmeleri arasındaki ilişki; karkas yapı tuğlası için, çimento ve kireç-çimento harçları kullanımı durumlarında ayrı ayrı verilmiştir, (C.2). Bu bağıntıda gerilme boyutu [kg/cm²] dir.

Kayma kırılmaları bölgesi için;

$$\tau = 3.642 + 0.340\sigma \text{ (Çimento harcı)}$$

$$\tau = 5.279 + 0.212\sigma \text{ (Melez harç)}$$

Basınç kırılmaları bölgesi için;

$$\tau = 9.677 - 0.0935\sigma - 0.008\sigma^2 \text{ (Çimento harcı)}$$

$$\tau = 5.118 + 0.478\sigma - 0.039\sigma^2 \text{ (Melez harç)}$$

(C.2)

Aynı yapı taşı için harç kalitesinin değişmesi kayma kırılmaları bölgesinde sonucu önemli ölçüde etkilemektedir. Deneysel çalışmada ulaşılan sonuçlardan karkas dolgu tuğlası ile ilgili olanlar Tablo C.1 de verilmiştir. Söz konusu değerler yüklemenin yatay derzlere dik olması durumu içindir.

Tablo C.1 Karkas Dolgu Tuğlası Özellikleri

	<i>Elastisite Modülü</i>	<i>Poisson Oranı</i>	<i>En Büyük Birim Kısalma</i>
<i>Kireç-Çimento Harcı</i>	1138.1 N/mm ²	0.23	% 0.18
<i>Çimento Harcı</i>	1898.5 N/mm ²	0.21	% 0.19

Manos⁸, bölme duvarlı çerçeve numunelerinde ölçek faktörünün sonuçlar üzerindeki etkisini araştırmıştır. Küçük ölçekli numunelerde 1/9, prototip numunelerde ise 1/3

⁶ KNOTSSON, H., NIELSEN, J., On the Modulus of Elasticity for Masonry, Masonry International Vol 9, No 2, (1995)

⁷ YORULMAZ, M., ATAN, Y., Çeşitli Forme Yapı Taşlarıyla Yapılmış Duvar Numunelerin İki İstikametli Yükleme Altında Davranışları, İTÜ, (1971)

⁸ MANOS, G. C., YASIN, B., VALIASIS T., Small Scale Model Simulation of the Cyclic Behavior of Infill Brick Panels, The Sixth North American Masonry Conference, Pennsylvania, (1993)

küçültme oranı kullanılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarla; çıplak çerçevelerde farklı ölçekli numune davranışları arasındaki uyumun oldukça iyi olduğu, bölme duvarlı çerçevelerde ise küçük ölçek durumunda %30'a varan dayanım artışlarının gözlemlendiği belirtilmiştir.

Mehrabi ve diğerleri⁹ ; bölme duvarlı betonarme çerçevelerde, boyutlandırmaya esas olan yatay yük düzeyi, duvar kenar oranları ve düşey yük miktarı gibi değişkenlerin genel davranış üzerindeki etkilerini, deneysel bir çalışmayla incelemişlerdir. Test sonrasında hasarlı bölme duvarları sökölüp yenileri oluşturularak ve betonarme sistemde de epoksi onarımı yapılarak, aynı çerçeveden çok defa yararlanılmıştır. Bölme duvarlarında dolu ve boşluklu beton tuğlalar kullanılmıştır. Düşük yatay yük düzeyi esas alınarak üretilen çerçeveye *zayıf çerçeve*, boşluklu tuğla kullanılarak üretilen duvara da *zayıf duvar* isimleri verilmiştir. Ulaşılan önemli sonuçlar şöyle özetlenmiştir:

Zayıf çerçevede, zayıf bölme duvarı kullanımı halinde; sistem taşıma gücüne, tuğlaların yatay derzler boyunca birbirleri üzerinde kaymasıyla ulaşılmaktadır. Bu durumda çerçeve-dolgu duvarı etkileşimi olmamakta; toplam dayanım, çerçeve dayanımıyla, duvarda yatay harç yüzeyleri boyunca mevcut olan kayma dayanımlarının toplamına eşit olmaktadır. Zayıf çerçeve ve kuvvetli bölme duvarı tipinde ise taşıma gücüne köşegen boyunca oluşan kayma tipi duvar çatlağıyla ulaşılır ve en son adımda kolon kayma çatlağı oluşur. Kuvvetli çerçeve ve kuvvetli bölme duvarı tipinde de taşıma gücüne bölme duvarının köşesinin ezilmesiyle ulaşılır. Bu hal, basınç köşegeni kabulüne en yakın durumdur.

Bölme duvarı kenar uzunluk oranlarının, duvarda farklı bir göçme modu oluşturmamak kaydıyla, bölme duvarlı çerçevenin dayanımı üzerindeki etkisinin önemli olmadığı sonucuna varılmıştır.

Düşey yüklerin belirli bir düzeye kadar artırılması, bölme duvarlı çerçevede rijitlik ve dayanımın artmasına neden olmaktadır.

Kuvvetli çerçeve ve kuvvetli duvardan oluşan yapının; dayanım ve enerji yutumu açısından, zayıf çerçeve ve zayıf duvardan oluşan numuneye göre daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Bu deneysel çalışma, kuvvetli deprem yüklerine göre boyutlandırılmış yapılarda, bölme duvarlarının olumlu etkilerini ortaya koymaktadır.

Kato, Goto ve diğerleri¹⁰ , betonarme bölme duvarlı çerçevelerde, duvar üzerinde kolon ve kirişlerin oluşturduğu sargı etkisini, deneysel olarak incelemişlerdir. Sarılmış bölme duvarlı çerçevede, önce duvar, arkasından kolon ve kirişler oluşturulmaktadır. Bu tip yapılardaki tipik hasar türünün, duvarda köşegen doğrultuda çatlak ve/veya kolon alt ve üst kesitlerinde eğilme yada kayma türü hasar olduğu belirtilmiştir. Oluşturulan numunelerde kolon boyuna ve enine donatı miktarları değiştirilerek, bölme duvarı üzerinde meydana gelecek sargı etkisinin değişik değerler alması

⁹ MEHRABI, A., SHING, B., and others, Experimental Evaluation of Masonry-Infilled RC Frames. Journal of Structural Engineering , Vol.122, (1996)

¹⁰ KATO, H., GOTO, T., MIZUNO, H., Cyclic Loading Tests of Confined Masonry Wall Elements for Structural Design, Development of Apartment Houses in the Third World, 10th World Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam, (1992)

sağlanmıştır. Ulaşılan en önemli sonuçlar, kolonlarda kullanılan boyuna donatı miktarı arttıkça bölme duvarlı çerçevenin taşıma gücünün arttığı, kolonların yeterli miktarda enine donatı bulundurmaları halinde de bölme duvarı üzerindeki sarma etkilerinin arttığı ve duvarda ani kayma kırılması riskinin azaldığıdır.

Govindan ve diğerleri¹¹, 1/4 ölçekli ve 7 katlı düzlem çerçeveler üzerinde yaptıkları deneysel çalışmada, tersinir yükler etkisiyle ortaya çıkan rijitlik ve dayanım azalmasını araştırmışlardır. Deneysel çalışma sonrası, çıplak ve bölme duvarlı çerçeve davranışlarının karşılaştırılmasıyla; bu çalışmayla sınırlı kalmak üzere, bölme duvarlarının yatay yük taşıma kapasitesini yaklaşık iki kat arttırdığını, bölme duvarlı çerçevenin çıplak çerçeveye göre başlangıçta yaklaşık 5 kez, servis yükleri seviyesinde ise yaklaşık 3 kez daha rijit olduğunu, yığılımlı süneklik oranının çıplak çerçevede yaklaşık 3.3 kez daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Liau ve Lo¹², tek katlı çok açıklıklı bölme duvarlı çerçevelerde, panel duvarı ve çerçeve arasındaki etkileşimi incelemişlerdir. Duvar panelleri ile çerçeveler arasında kayma kuvveti aktaracak elemanlar bulunmamaktadır. Kullanılan numuneler küçük ölçeklidir ve duvar panellerinin oluşturulmasında mikrobeton kullanılmıştır. Yük kontrollü olarak gerçekleştirilen deneyde, duvar panellerinin çevrelerindeki şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Kuramsal çözümleme için geliştirilen bilgisayar programında, duvar panelleri ve çerçeve arasındaki karşılıklı etkileşim arayüz elemanlar ile temsil edilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda ulaşılan göçme, panel duvarın basınç köşelerinde betonun ezilmesinden sonra çerçevede yeterli sayıda plastik mafsallık meydana gelmesiyle, olmuştur. Panel duvar ve çerçeve arasında karşılıklı etkileşim basınç köşelerinde yoğunlaşmış olup, sürtünme miktarı azdır.

Zarnic ve Tomozevic¹³ yaptıkları deneysel çalışmada; bölme duvarlarını, donatısız veya yatay donatılı olarak teşkil etmişlerdir. İlk deneyler sonrasında numunelerde onarım da yapılmıştır. Kullanılan onarım teknikleri, epoksi enjeksiyonu ve duvarın her iki yüzünde ince betonarme perdeler oluşturulması şeklindedir. Ulaşılan en önemli sonuçlar; bölme duvarlı çerçevelerin dayanım ve yatay rijitliklerinin çıplak çerçevelere göre çok büyük olduğu, bölme duvarına yerleştirilen enine donatıların özellikle kapı-pencere boşluğu içeren duvarlarda yararlı olduğu, tekrarlı yükleme durumunda taşıma gücüne erişildikten sonra aynı genlikli yükün çevrimleri arasında yatay rijitlik kaybı olduğu şeklindedir. Hasarlı duvarda onarım amacıyla, epoksi enjeksiyonu ve donatılı beton sıva kullanımının yatay rijitlik ve dayanımı önemli ölçüde artırdığı ancak en büyük yük seviyesine erişildikten sonra; bu tip onarım tekniklerinin, etkinliklerini hızla kaybettikleri belirtilmiştir.

¹¹ GOVINDAN, P., LAKSHMIPATHY, M., SANTHAKUMAR, A.R., Ductility of Infilled Frames. ACI Journal, July-August (1986)

¹² LIAU, T.C., LO, C.Q., Multibay Infilled Frames without Shear Connectors, ACI Structural Journal, July-August (1988)

¹³ ZARNIC, R., TOMAZEVIC, M., An experimentally Obtained Method for Evaluation of the Behaviour of Masonry Infilled R/C Frames, Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, JAPAN, (1988)

Zarnic ve Tomozevic¹⁴; duvara yerleştirilen yatay donatının, bölme duvarlı çerçeve genel davranışına olan etkisini incelemişlerdir. Üretilen numuneler; çıplak çerçeve, donatısız duvar, kolon boyuna donatılarına bağlanmış ve bağlanmamış yatay donatılı duvarlardır. Deney, sabit normal kuvvet altında, artan genlikli yatay tersinir yüklerle yapılmıştır. Bölme duvarında köşegen doğrultuda çatlak oluşmadan önce betonarme çerçeve ve bölme duvarı birlikte çalışmaktadır. Çatlak oluşuktan sonra ise betonarme çerçeve, kolonlarda plastikleşme meydana gelene kadar, yatay yükün büyük bölümünü taşımaktadır. Küçük oranda ($\rho=0.2\%$) yerleştirilen enine donatının yatay rijitlik ve dayanım üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı; ancak enine duvar donatılarının, kolon boyuna donatılarına bağlanması durumunda yatay rijitlikte artış gözlemlendiği belirtilmiştir.

Ghanem¹⁵, donatılı duvar numunelerinde, eksenel yükün yatay yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Duvarda kullanılan enine ve boyuna donatı oranı, $\rho=0.2\%$ düzeyinde olup, normal kuvvetin belirli değerleri için tek yönlü artan yatay yükleme yapılmıştır. Eksenel kuvvet miktarının artmasıyla, çatlama dayanımı artmakta, duvar davranışı eğilme tipinden kayma tipine yönelmekte ve süneklik azalmaktadır. Normal kuvvet miktarı arttıkça ani kayma göçmesi riski belirlediğinden bu tip elemanlarda eksenel kuvvet miktarının sınırlandırılması gereği belirtilmiştir.

Camacho¹⁶, bölme duvarlı çerçevelerde, kenar kolon boyutları ve kolonlardaki donatı yerleştirme şeklinin genel davranışa olan etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Numunelerde; boşluklu beton tuğlalar, yatay ve düşey donatılarla birlikte kullanılmıştır. Numuneler arasındaki farklılık; kolonlarda boyuna donatı yüzdesini sabit tutarak, kesit boyutlarının küçültülmesidir. En küçük kolon boyutuna sahip numunede, tüm boyuna donatı kesit merkezine toplanmış ve enine donatı spiral şeklinde oluşturulmuştur. Deneyler, sabit düşey ve artan tersinir yatay yükler kullanılarak yapılmıştır. Aynı boyuna donatı oranına sahip numunelerde, kenar kolon boyutları küçüldükçe elde edilen dayanım ve rijitlik değerleri azalmıştır. Bu farklılığın en önemli nedeni olarak, kenar kolonların duvar üzerinde sağladığı sargı etkisi gösterilmiştir. Yakın kolon enkesit alanlarına sahip, fakat boyuna ve enine donatı detaylarının farklı şekilde oluşturulduğu numunelerde genel davranışın benzer olması, önerilen basit donatı yerleştirme şeklinin etkinliğini göstermiştir.

Yoshimura ve diğerleri¹⁷, yatay duvar donatısı ve kolonlarda uygulanan donatı yerleşim detaylarının, bölme duvarlı çerçevenin genel davranışına olan etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmanın ilk bölümünde; duvar, çıplak çerçeve ve bölme duvarlı çerçeve deneyleri yapılarak, bölme duvarlı çerçeve dayanımının tek tek çıplak çerçeve ve duvar dayanımları toplamıyla ulaşılan değerden çok yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde ise duvarda kullanılan yatay ve

¹⁴ ZARNIC, R., TOMAZEVIC, M., The Behaviour of Masonry Infilled Reinforced Concrete Frames Subjected to Cyclic Lateral Loading, *Research On Confined Masonry Walls*, published by JICA, (1995)

¹⁵ GHANEM, G., and others, Effect of Axial Compression on the Behavior of Partially Reinforced Masonry Shear Walls, The Sixth North American Masonry Conference, Pennsylvania, (1993)

¹⁶ CAMACHO, O., and others, Experimental Study on Confined Concrete Masonry Walls, The Forth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering&Construction, Seoul, (1993)

¹⁷ YOSHIMURA, K., and others, Effect of Horizontal Wall Reinforcement in Confined Masonry Walls, *Research On Confined Masonry Walls*, published by JICA, (1995)

düşey donatı miktarının davranışa olan etkisi araştırılmıştır. Düşey duvar donatısı kullanımının dayanım ve süneklik üzerinde etkin olduğu anlaşılmıştır.

Papadopoulos ve Karayiannis¹⁸ ; tek yönlü artan yükler için yapılan statik hesabın, kolay olması ve tersinir yükler için elde edilecek davranışın zarfını oluşturması gibi nedenlerle tercih edildiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada; düzlem çerçeve, tek serbestlik dereceli elastoplastik sisteme benzetilerek dinamik analiz yapılmaktadır. Bu benzeşim için; yatay rijitlik, dayanım ve süneklik oranı gibi büyüklükler, düzlem çerçevenin tek yönlü artan yatay yüklerle doğrusal olmayan hesabından belirlenmektedir. Düzlem çerçevede yapılan doğrusal olmayan hesap, plastik mafsallı hipotezine dayanmaktadır. Perde duvarları ile bölme duvarlarının düzlem çerçeve davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Alt kat perde duvarlarındaki enine donatı oranının yükselmesi, genel sünekliği olumlu yönde etkilerken, bölme duvarları yapıda kolon mekanizması oluşmasına karşı koymada etkili olmaktadır. Deprem hareketi sırasında bazı duvarların devre dışı kalmasıyla yapının katları arasında ani rijitlik değişimi olabileceği de belirtilmiştir.

Klinger ve Bertero¹⁹ , bölme duvarlı düzlem çerçeveler üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalar sonucu, bölme duvarı etkisini global anlamda temsil eden bir mekanik model geliştirmişlerdir. Bölme duvarı olarak kullanılan paneller; kil veya betondan yapılmış boşluklu tuğlaların, yatay ve düşey donatılarla beraber kullanılmasıyla oluşturulmuştur. Yatay ve düşey donatılar; paneller üzerinde, yayılı çatlak durumu elde edebilmek için kullanılmıştır. Ayrıca kolon ve kirişlere, kayma türü bir kırılmayı engelleyecek miktarda enine donatı da yerleştirilmiştir.

Arayüzler boyunca çatlak oluşuncaya kadar, çerçeve ve panel elemanlar birlikte çalışmakta, çatlak oluşuktan sonra ise panel, çapraz basınç elemanı olarak davranışa katkıda bulunmaya devam etmektedir. Yatay yükün artmasıyla, çapraz basınç elemanlarının uçlarında ezilme meydana gelmektedir.

Deneysel çalışmayla ulaşılan yatay yük-yerdeğiştirme ilişkisine bakıldığında; panelde hasar birikimi arttıkça bölme duvarlı çerçeve davranışının, çıplak çerçeve mekanizma durumuna yaklaştığı görülmektedir.

Deneysel çalışma sonuçlarına dayalı olarak; bölme duvarı davranışını temsil eden basınç çaprazı bünye bağıntısı iki bölümden meydana gelmektedir, Şekil C.1.

$$\text{Elastik yükleme eğrisi (OA) , } S = \frac{EA}{L} \gamma \quad (C.3)$$

Bu bağıntıda; S eksenel kuvvet, E dolgu duvarı elastisite modülü, A dolgu duvarı enkesit alanı (Duvar kalınlığı x Etkili genişlik), γ eksenel kısalma, L köşegen boyudur.

$$\text{Zarf Eğri (AB), } S = Af_c (e^{\gamma^5}) \quad (C.4)$$

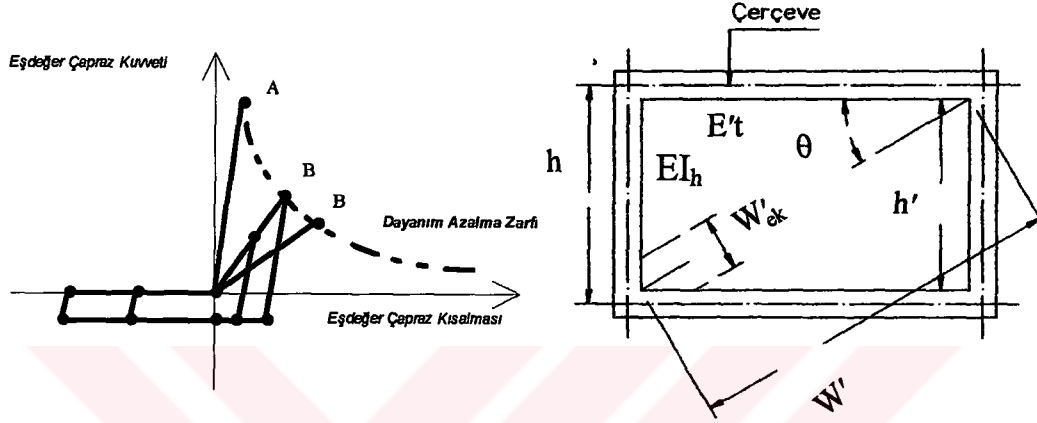
¹⁸ PAPADOPOULOS, P., KARAYIANNIS, C., Nonlinear Analysis of Infilled Plane RC Frames, 10th European Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam, (1995)

¹⁹ KLINGER, R., BERTERO, V., Earthquake Resistance of Infilled Frames, Journal of Structural Division, Vol 104, ST6, (1978)

f_c prizma testiyle belirlenmiş olan basınç dayanımını, ξ ise dayanım azaltma çarpanını göstermekte olup, bu çalışmada 1 alınmıştır.

Etkili duvar genişliği (C.5) bağıntısıyla elde edilebilir. Bu bağıntıda kullanılan sembollerin karşılıkları Şekil C.1 de gösterilmiştir.

$$\lambda h \cdot h = \sqrt[4]{\frac{E' t \sin 2\theta}{4 E I_h h}} \quad \left(\frac{W'_{ek}}{W'}\right) = 0.175(\lambda h \cdot h)^{-0.4} \quad [\text{inch}] \quad (C.5)$$



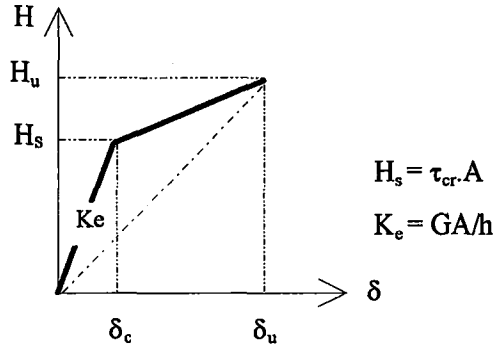
Şekil C.1 Klinger-Bertero Bölme Duvarı Modeli

Combescure²⁰, bölme duvarlı çerçevelerde duvarın katkısını belirlemek üzere, aynı malzeme ve geometrik özelliklere sahip, duvarlı ve duvarsız numunelerde elde edilen deneysel sonuçları birbirinden çıkartmaktadır. Tek yönlü yükleme durumu esas alındığında; duvar katkısının, iki doğrudan meydana gelen bir davranış modeliyle temsil edilebileceği belirtilmiştir, Şekil C.2. Davranış modeli üzerindeki iki önemli nokta; duvarın çatladığı ve taşıma gücüne eriştiği noktalardır. Tek yönlü yükler için, duvar mekanik modeli; başlangıç rijitliği, çatlama dayanımı, göçme dayanımı ve çatlamış rijitlik gibi dört büyüklüğe bağlı olarak ifade edilmiştir.

H_s , duvar çatlama dayanımını göstermektedir. Bu bağıntıda τ_{cr} , köşegen doğrultudaki çatlama dayanımını, A yataydaki duvar enkesit alanını göstermektedir. Başlangıç rijitliği K_e , G köşegen doğrultudaki duvar kayma modülü, A yataydaki enkesit alanı ve h duvar yüksekliğine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Duvar göçme dayanımı, H_u , duvar çatlama dayanımının yaklaşık olarak 1.3 katı olmaktadır. Duvar katkısının tek eşdeğer çaprazla temsil edilmesi durumunda, yatay rijitlik (C.6) bağıntısıyla tanımlanabilir.

$$K_c = \frac{E_i W_{ef} t \cos^2 \theta}{\sqrt{L^2 + H^2}} \quad (C.6)$$

²⁰ COMBESCURE, D., THESE pour l'obtention du GRADE DE DOCTEUR, (1996)



Şekil C.2 Combescure Bölme Duvarı Modeli

(C.6) bağıntısında, E_i duvar elastisite modülünü, W_{ef} eşdeğer çapraz genişliğini, t duvar kalınlığını, θ çaprazın yatayla yaptığı açığı, L duvar genişliğini ve H duvar yüksekliğini göstermektedir. Eşdeğer çapraz genişliğiyle ilgili olarak literatürde değişik bağıntılar mevcuttur. (C.5) de verilen bağıntı bunlardan biridir.

Zarnic²¹, bölme duvarlı çerçevelerin tekyönlü ve yöndeğiştiren yatay yükler etkisindeki davranışlarını belirlemek üzere iki ayrı mekanik model geliştirmiştir. Toplam 34 adet tek katlı ve tek açıklıklı numune test edilmiştir. Numunelerde ölçek 1/3 'dür. Geliştirilen mekanik modeller; bölme duvarlı çerçeveyi oluşturan elemanların boyutlarına, mekanik özelliklerine ve duvar ile çerçeve arasındaki etkileşim miktarına bağlanmıştır.

GERÇEKLEŞTİRİLEN DENEYSEL ÇALIŞMA

Numunelerin Tanıtılması

Numuneler, uygulamada çok karşılaşılan tipik bir betonarme yapıdan, 1/2 ölçekle küçültülerek çıkarılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada; prototip yapıyla numune arasındaki davranış benzerliğinin bire bir kurulmaya çalışılmasından öte, aynı ölçekle üretilmiş numuneler arasındaki davranış farklılıklarının gözlenmesi amaçlanmıştır.

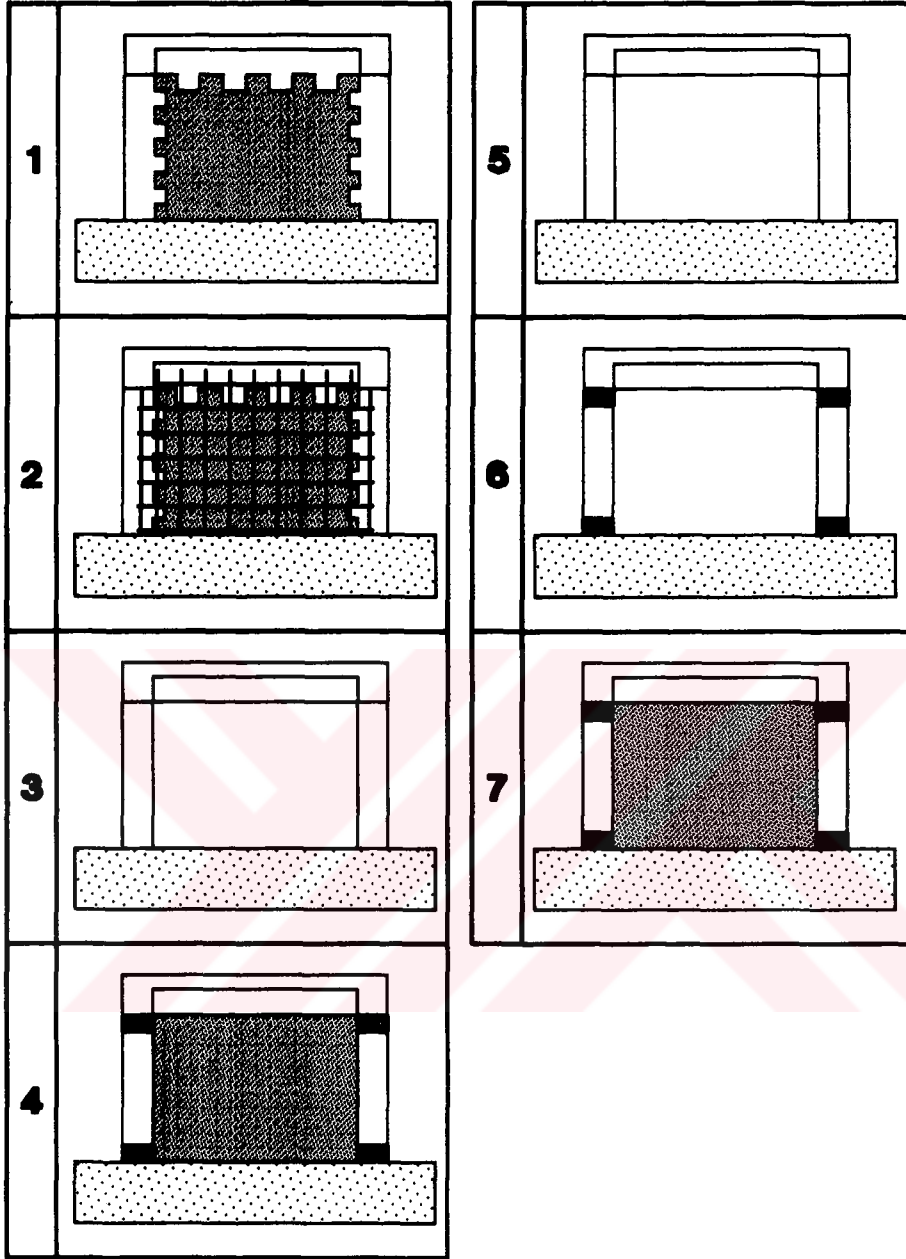
Deneysel çalışma için hazırlanan numuneler, şematik olarak Şekil C.3 de gösterilmiştir. Çalışma kapsamında toplam 7 farklı durum çalışılmıştır.

Boyut etkisini azaltabilmek amacıyla; enine donatı çapı 6 mm., boyuna donatı çapı 16 mm., en büyük agrega tane çapı da 5 mm. ile sınırlandırılmıştır.

Tüm numunelerde, kolonların alttan ankastremanını sağlamak ve özel laboratuvar döşemesine bağlantıyı mümkün kılmak için, 200x300x50 cm. boyutlarında betonarme temeller kullanılmıştır. Kolon düşey donatıları, 50 cm kalınlığındaki temel bloğunun

²¹ ZARNIC, R., Modelling of Response of Masonry Infilled Frames, 10th European Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam, (1995)

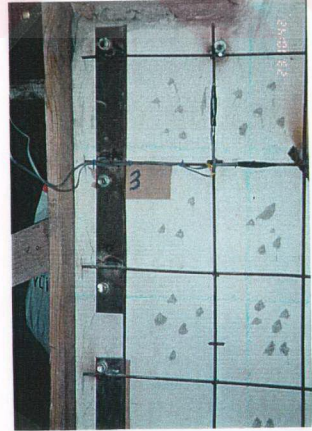
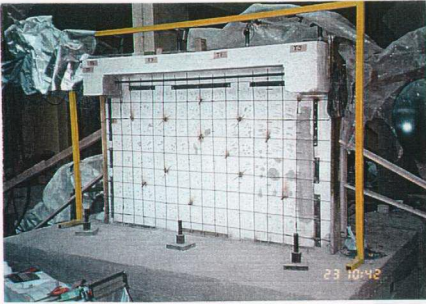
alt yüzüne kadar devam etmekte ve buradaki hasır donatıya bağlanmaktadır, Şekil C.4.



Şekil C.3 Deneysel Çalışmada Kullanılan Numuneler

Betonarme temel üzerinde 6 adet $\Phi 100$ mm. çapında delik mevcuttur. Bu deliklerden, 32 mm. çaplı özel ankraj bulonları geçirilerek; numunelerin laboratuvar döşemesine bağlantısı sağlanmaktadır. Her bulon için yaklaşık 150 kN. luk öngörme kuvveti kullanılmıştır. Deneyler sırasında beton bloğun yatay ve düşey hareketi sürekli olarak ölçülmüş ve ölçülen büyüklüklerin ihmal edilebilecek mertebede küçük oldukları gözlenmiştir.

Tüm numuneler için; kolon boyutları 20x25 cm., kiriş boyutu 20x32.5 cm., döşeme kalınlığı 12 cm. ve tabla genişliği de 82 cm. dir, Şekil C.4.



Şekil C.5 Numune 1 ve Numune 2 nin Üretim Aşaması

Beton prizini tamamladıktan sonra; ağırlıkça bileşimi, kum-çimento-kireç-su için sırasıyla %54,%21,%10,%15 olan ince bir sıvayla sıvanmıştır.

Numune 3 ve Numune 5: Bölme duvarının sistem davranışına olan katkısını ortaya çıkarmak üzere, iki adet çıplak çerçeve üretilmiştir. Numune 3 ün denenmesi sırasında yükleme sisteminde ortaya çıkan bir arıza nedeniyle, veren kontrol dışı kalmış ve numuneye zarar vermiştir. 5 numaralı numunede ise davranış baştan sona kadar başarıyla elde edilmiştir, Şekil C.7. Bu numunede artan yatay yük etkisindeki davranış, kuramsal olarak da elde edilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Numune 4 ve Numune 7: Çıplak çerçeve deneyinde kolon uçlarında yoğunlaşmış hasar durumu elde edilmiştir. Hasarlı çerçeveler içersine 13.5 cm. anma kalınlıklı tuğlalar, delikleri yatayda ve duvar kalınlığı 19 cm. olacak şekilde örülerek yeni numuneler elde edilmiştir. Bu numunelerden elde edilen sonuçlar, yaklaşık olarak duvarın yatay yük etkisindeki davranışına karşı gelmektedir, Şekil C.7.

Numune 6: Numune 5 in denenmesinden sonra; kolon alt ve üst uçlarında yoğunlaşan çatlaklar epoksi esaslı bir kimyasal madde ile doldurulmuştur. Bu onarım tekniğinin etkinliğini anlamak üzere, sistem yatay yük etkisinde tekrar denenmiştir.

Malzeme Deneyleri

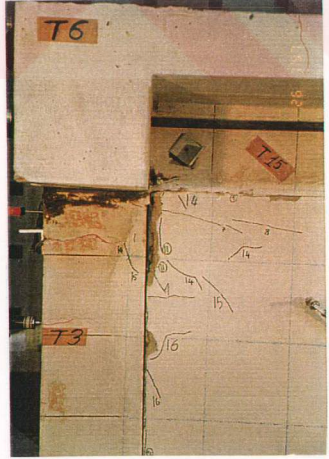
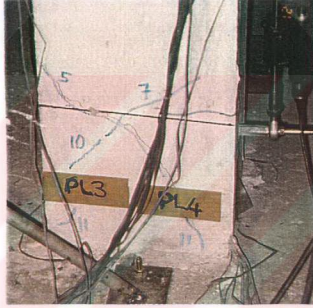
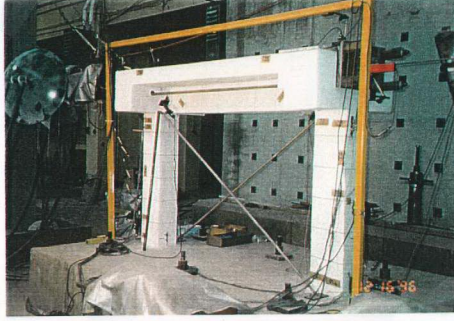
Numunelerin oluşturulmasının değişik aşamalarında; kullanılan betonlardan Tablo C.2 de belirtilen sayılarda, 15x30 cm. boyutlarında silindir numuneler alınarak eksenel basınç deneyine tabi tutulmuştur. Değişik aşamalarda kullanılan çeliklerden alınan numunelerle de çekme deneyleri yapılmıştır. Malzeme deneyleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılmıştır.

Tablo C.2 Numunelerden Alınan Malzeme Örnekleri

Numune İsmi	Sayı	Alındığı Yer
BETON1	3	Numune 1(2) ve 3(4) Temel Blok Betonu
BETON2	3	Numune 1(2) Kolon-Kiriş-Döşeme Betonu
BETON3	4	Numune 3(4) Kolon-Kiriş-Döşeme Betonu
BETON4	3	Numune 2 Onarım Perdesi Betonu
BETON5	4	Numune 5 Kolon-Kiriş-Döşeme Betonu
ÇELİK K1	2	Numune 1(2) ve 3(4) Boyuna Donatı 16 mm.
ÇELİK K2	2	Numune 1(2), 3(4) ve 5 Etriye 6 mm.
ÇELİK K3	2	Numune 2 Onarım Perdesi Donatısı 4.4 mm.
ÇELİK K4	2	Numune 5 Boyuna Donatı 10 mm.
ÇELİK K5	2	Numune 5 Boyuna Donatı 16 mm.

* Beton numuneleri, 15x30 cm. boyutlarında silindir elemanlardır.

** Beton numunelerin yaşı, test edildikleride 28 günün üzerindedir.



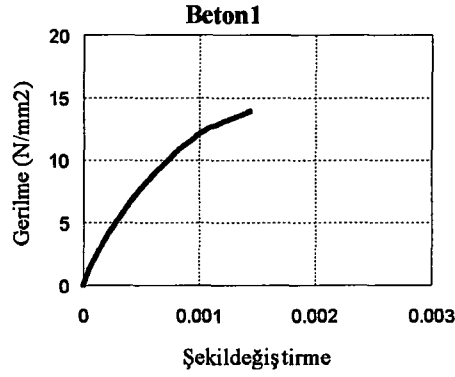
Şekil C.7 Numune 5 ve Numune 7 ile İlgili Fotoğraflar

Tablo C.2 de, malzeme numunelerinin alındığı yerler de belirtilmiştir. Kullanılan sembolik isimler, ilgili gerilme-şekildeğiştirme diyagramını tanımlamaktadır.

Malzeme deneyleriyle ulaşılan gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, betonlar için Şekil C.8 de, çelikler için de Şekil C.9 da verilmişlerdir.

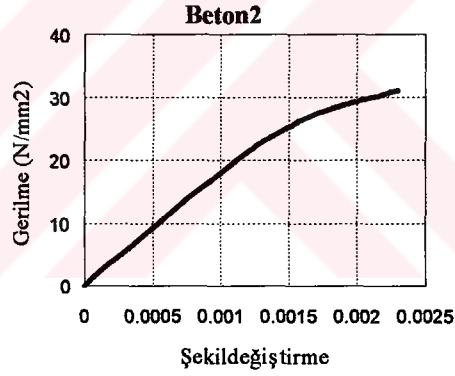
BETON1

Şekildeğiştirme	Gerilme
0.00000	0.0
0.00006	1.4
0.00013	2.8
0.00022	4.2
0.00031	5.5
0.00042	6.9
0.00055	8.3
0.00070	9.7
0.00086	11.1
0.00107	12.5
0.00144	13.9



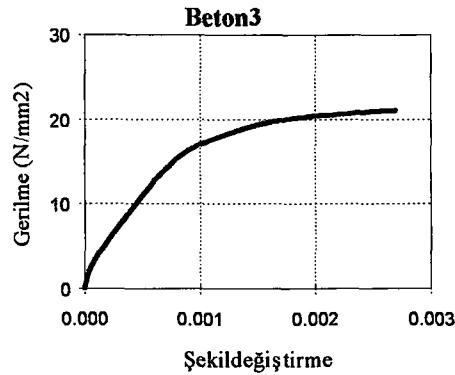
BETON2

Şekildeğiştirme	Gerilme
0.00000	0.0
0.00014	2.8
0.00029	5.5
0.00045	8.3
0.00060	11.1
0.00076	13.9
0.00092	16.6
0.00109	19.4
0.00126	22.2
0.00148	25.0
0.00175	27.7
0.00230	30.0



BETON3

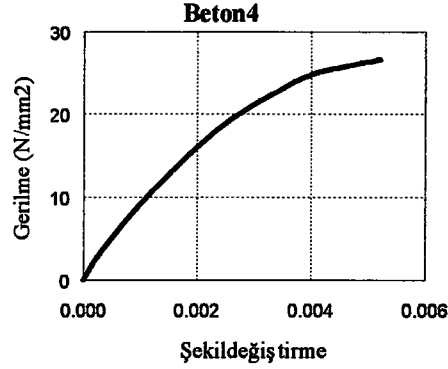
Şekildeğiştirme	Gerilme
0.00000	0.0
0.00007	2.8
0.00020	5.7
0.00035	8.5
0.00052	11.3
0.00071	14.1
0.00099	17.0
0.00168	19.8
0.00269	21.1



Şekil C.8 Beton Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

BETON4

<i>Şekildeğiştirme</i>	<i>Gerilme</i>
0.00000	0.0
0.00019	2.3
0.00044	4.5
0.00071	6.8
0.00098	9.1
0.00130	11.3
0.00163	13.6
0.00197	15.8
0.00234	18.1
0.00281	20.4
0.00339	22.6
0.00407	24.9
0.00522	26.6

**BETON5**

	Bası nç Dayanı mı N/mm ²
# 1	16.13
# 2	16.13
# 3	16.41
# 4	16.98
<i>Ortalama</i>	<i>16.41</i>

Şekil C.8 Beton Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri (Devam)

Deneyisel Çalışmada Kullanılan Aletler

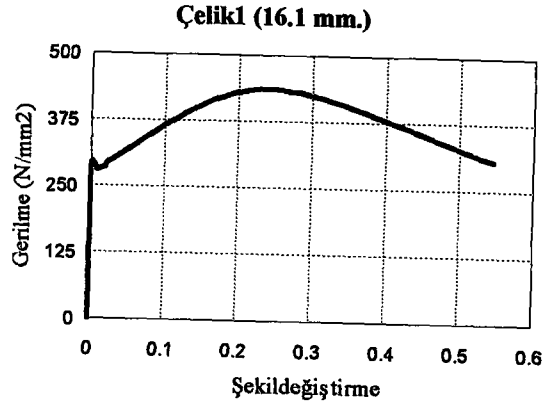
Deneyisel çalışma, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar test holündeki kalın test döşemesi numunelerin yere bağlanmasında, bir çelik tepki çerçevesi de hidrolik verenin mesnetlenmesi için kullanılmıştır, Şekil C.10.

Yükleme Sistemi:

Yatay yük, otomatik kontrollü hidrolik veren (Actuator) vasıtasıyla tatbik edilmektedir. Veren fiziksel sınırları, yük için ± 250 kN., yerdeğiştirme içinse ± 30 cm. dir. Özel bir kontrol ünitesi ve bu ünitenin bağlı olduğu bilgisayardaki yazılımlar vasıtasıyla otomatik yükleme ve veri toplama işlemi yapılabilmektedir. Hidrolik veren için; yük modu ve iki farklı yerdeğiştirme modu olmak üzere toplam üç bağımsız kontrol modu seçilebilmekte ve deney sırasında bu modların birinden diğerine geçiş çok hızlı olarak yapılabilmektedir. Bu modlar için veri, hidrolik veren üzerindeki yük hücresinden, iç yerdeğiştirme ölçerden ve bağımsız bir karşılaştırma çerçevesine mesnetlenmiş olan dış yerdeğiştirme ölçerden gelmektedir. Yerdeğiştirme kontrollü test sırasında dış yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır.

CELİ K1 (16.1 mm.)

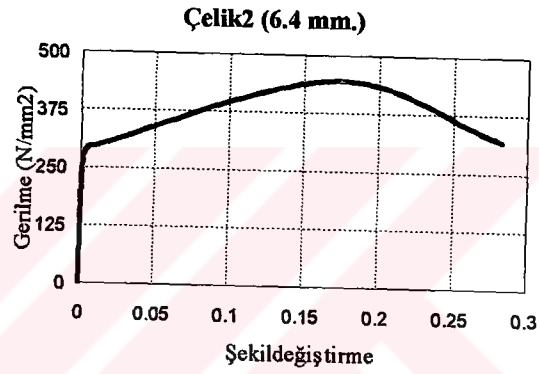
Şekildeğiştirme.	Gerilme
0.0000	0.0
0.0005	98.2
0.0010	196.5
0.0013	270.2
0.0015	294.7
0.0075	284.9
0.0100	280.0
0.0150	282.4
0.0200	284.9
0.0250	297.2
0.2360	434.7
0.5460	304.5



Toplam Kopma Uzama Oranı %34

CELİ K2 (6.4 mm.)

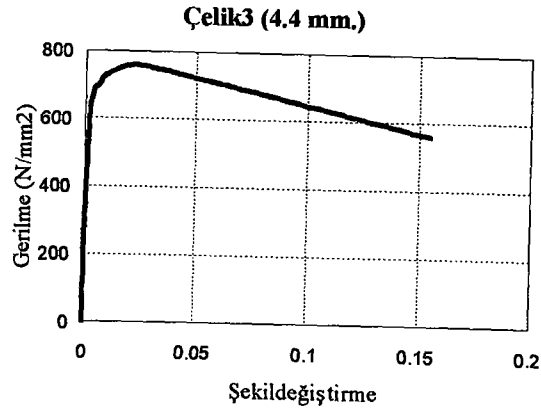
Şekildeğiştirme.	Gerilme
0.0000	0.0
0.0010	211.4
0.0015	254.9
0.0020	270.4
0.0025	279.8
0.0050	292.2
0.0075	295.3
0.0100	295.3
0.1850	444.5
0.2980	317.1



Toplam Kopma Uzama Oranı %30.5

CELİ K3 (4.4 mm.)

Şekildeğiştirme.	Gerilme
0.0000	0.0
0.0005	249.9
0.0010	368.3
0.0015	486.7
0.0020	572.2
0.0025	631.4
0.0035	670.8
0.0045	690.6
0.0050	690.6
0.0075	710.3
0.0100	730.0
0.0275	756.3
0.1575	559.0

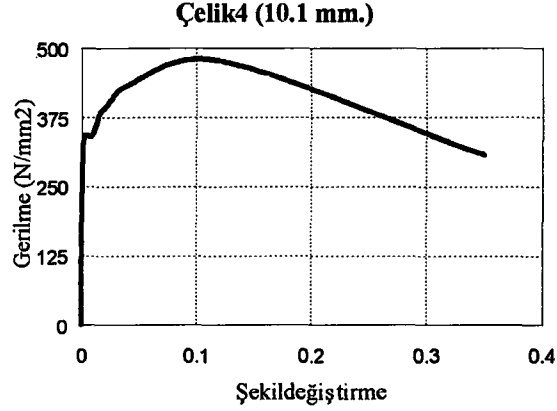


Toplam Kopma Uzama Oranı %8.1

Şekil C.9 Çelik Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

CELİ K4 (10.1 mm.)

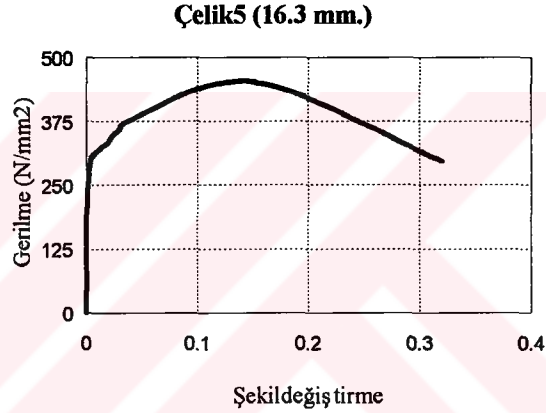
Şekildeğiştirme.	Gerilme
0.0000	0.0
0.0010	257.1
0.0025	342.9
0.0040	342.9
0.0090	342.9
0.0170	385.7
0.0200	391.8
0.0225	398.0
0.0275	410.2
0.0360	428.6
0.1100	477.5
0.3500	306.1



Toplam Kopma Uzama Oranı %28

CELİ K5 (16.3 mm.)

Şekildeğiştirme.	Gerilme
0.0000	0.0
0.0010	221.0
0.0040	300.9
0.0050	305.6
0.0060	305.6
0.0070	310.3
0.0150	324.4
0.0200	333.8
0.0250	347.9
0.0300	357.3
0.0350	371.4
0.1500	451.3
0.3200	296.2



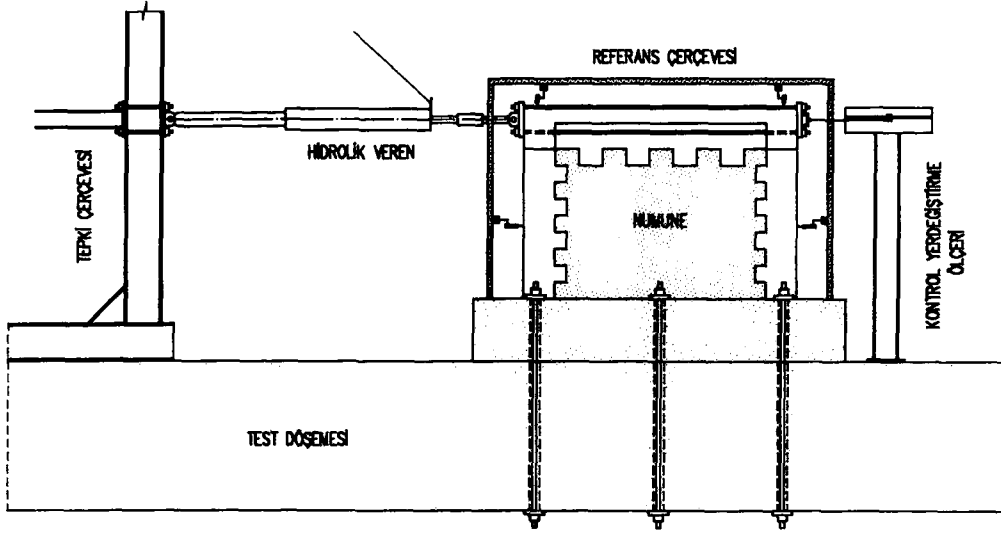
Toplam Kopma Uzama Oranı %27

Şekil C.9 Çelik Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri (Devam)

Yükleme ve ölçüm aletlerini korumak üzere, deney sırasında miktarları kolaylıkla değiştirilebilen, yük ve yerdeğiştirme üst sınırları tanımlanmaktadır.

Hidrolik verenin kontrolü, önceden oluşturulan bir test programının ilgili programda icrasıyla veya *deney sırasında kontrol* imkanı (*Run Time Ramp Control*) kullanılarak yapılabilmektedir. Bu deneysel çalışmada, *deney sırasında kontrol* seçeneği kullanılmıştır. Kontrol kanallarından gelen veri, deney anında bilgisayar ekranından izlenebilmektedir.

Hidrolik verenin mafsallı ucunun numunelere bağlantısı için, yüksek mukavemetli çelikten yapılmış 4 adet bulon kullanılmıştır.



Şekil C.10 Kullanılan Deney Düzenegi

Veri Toplama Sistemi:

Numuneler üzerine yerleştirilen; şekildeğiştirme ölçer (strain gauge), yerdeğiştirme ölçer, yük ölçer gibi ölçüm elemanlarının ürettiği analog bilgiyi fiziksel büyüklüğe çevirip, saklamak üzere kullanılan veri toplama sistemi; yönlendirme kutuları, veri dönüştürücü (TDS302 Data Logger), GPIB (General Purpose Interface Bus) kart ve kablosu, bilgisayar ve bir yazılımı içermektedir.

Bu deneysel çalışmada kullanılan tüm şekildeğiştirme ve yerdeğiştirme ölçerler; kendi kablolarıyla, numune yakınına yerleştirilmiş bulunan yönlendirme kutusuna bağlanmışlardır. Burada toplanan veri, özel bir kablo vasıtasıyla, kontrol odasında bulunan veri dönüştürücüye aktarılmaktadır. Veri dönüştürücü, GPIB kablo ve kartıyla bir bilgisayara bağlanmıştır. Bu bilgisayardaki bir yazılım vasıtasıyla, toplanan veriler diske yazılmakta ve aynı anda ekrandan izlenebilmektedir.

Esasen birbirinden bağımsız olan yükleme ve veri toplama sistemleri, yükleme sistemini kontrol eden ünitenin gönderdiği uyarı işareti ile eş zamanlı olarak veri toplamaktadır.

Numunelerde Kuvvet, Yerdeğiştirme ve Şekildeğiştirmelerin Ölçülmesi

Uygulanan yatay yük ya da numune direnci hidrolik veren üzerindeki yük hücresi ile, hidrolik veren hizasındaki yatay yerdeğiştirme ise bağımsız bir karşılaştırma çerçevesine bağlı olan ve hidrolik verenin kontrolü için de kullanılan dış yerdeğiştirme

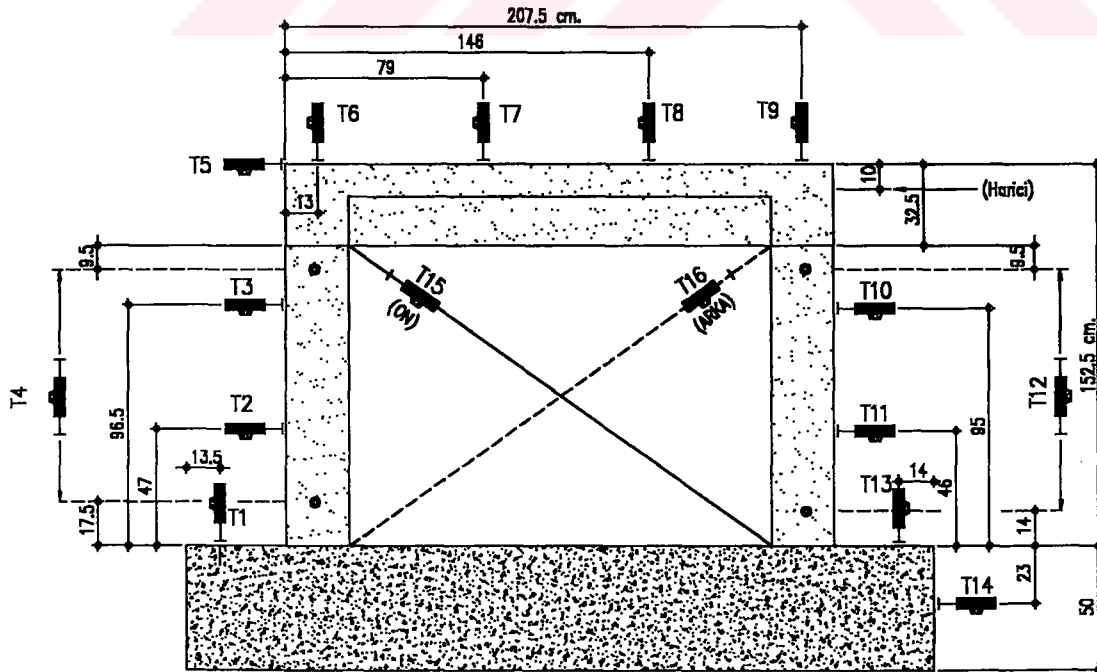
ölçer ile saptanmaktadır. Bu iki önemli büyüklüğün yanında, numunelerin değişik kesitlerinde meydana gelen yerdeğiştirmeleri de ölçmek üzere yeter sayıda yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Kullanılan yerdeğiştirme ölçerlerin tipleri ve mesnetlenme şekli Tablo C.3 ve Şekil C.11 de verilmektedir.

Tablo C.3 Kullanılan Yerdeğiştirme Ölçerler

No	Tipi	Kullanım Yeri	Mesnetlenme
1	CDP 50	Taban Bloku Düşey (Sol) *	Dış Ortam
2	SDP-100C	Sol Kolon Alt (Yatay)	R.Ç.**
3	SDP-100C	Sol Kolon Orta (Yatay)	R.Ç.
4	CDP 50	Sol Kolon Düşey	Numuneye
5	SDP-100C	Sol Kolon Tepe (Yatay)	R.Ç.
6	CDP 50	Kiriş Düşey Sol-1	R.Ç.
7	CDP 50	Kiriş Düşey Sol-2	R.Ç.
8	CDP 50	Kiriş Düşey Sol-3	R.Ç.
9	CDP 50	Kiriş Düşey Sol-4	R.Ç.
10	SDP-100C	Sağ Kolon Orta (Yatay)	R.Ç.
11	SDP-100C	Sağ Kolon Alt (Yatay)	R.Ç.
12	CDP 50	Sağ Kolon Düşey	Numuneye
13	CDP 50	Taban Bloku Düşey (Sağ)	Dış Ortam
14	CDP 25	Taban Bloku Yatay (Sağ)	Dış Ortam
15	CDP 50	Ön Yüz Diagonal	Numuneye
16	CDP 50	Arka Yüz Diagonal	Numuneye

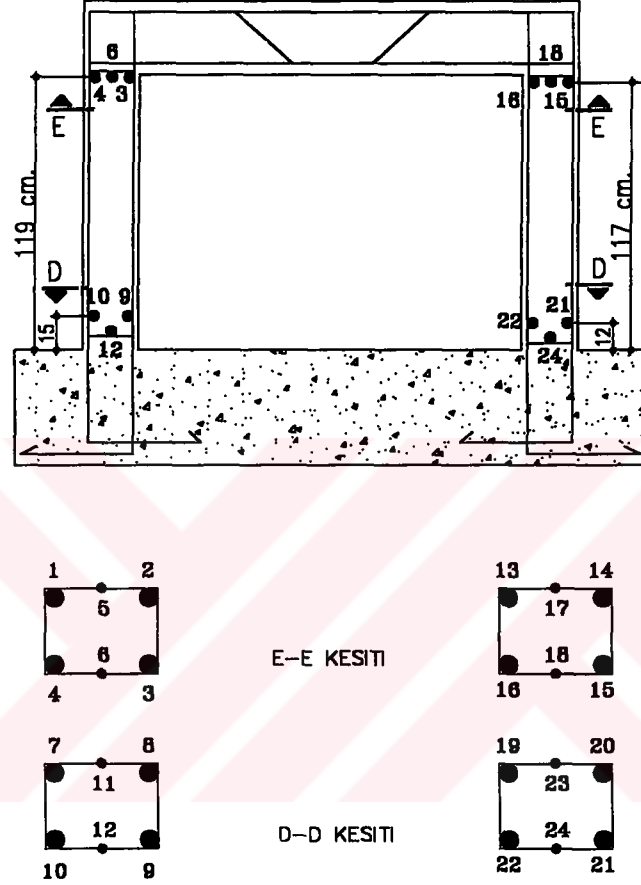
* Numunelere Bakış Kontrol Odası Tarafındandır.

** R.Ç. : Numune Taban Betonuna Sabitlenmiş Referans Çerçevesi



Şekil C.11 Yerdeğiştirme Ölçerlerin Yerleşimi

Numunelerde kolon alt ve üst kesitlerinde toplam 24 adet şekil değiştirme ölçer kullanılmıştır. Her kesitteki 6 adet şekil değiştirme ölçerin, 4 tanesi boyuna donatılara, 2 tanesi ise enine donatılara yapıştırılmıştır, Şekil C.12. Kullanılan şekil değiştirme ölçerler 6 mm. ölçme uzunlukludur. Numune 2 için, Şekil C.12 de gösterilenlere ilave olarak, güçlendirme perdelerinden birisi üzerine de 8 adet şekil değiştirme ölçer yerleştirilmiştir.



Şekil C.12 Şekil değiştirme Ölçerlerin Yerleri

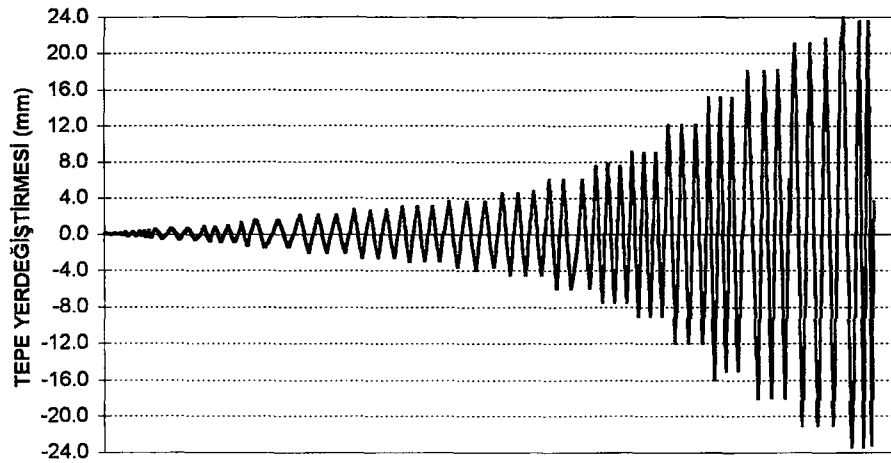
Kullanılan Yükleme Tipi

Bu deneysel çalışmada, tersinir yatay yükler etkisinde numune davranışlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Deneylerde düşey yük kullanılmamıştır. Yer değiştirme kontrollü olarak çalıştırılan hidrolik veren, Şekil C.13 de gösterilen yükleme eşiklerini yatay yönde numuneye tatbik etmiştir. Her yer değiştirme eşiği seviyesinde üç tekrar yapılarak, olabilecek dayanım azalmaları gözlenmiştir. Şekil C.13 de yer alan tabloda da işaret edildiği gibi, Numune 1 ve Numune 2 için ulaşılan en büyük tepe yer değiştirmesi ± 3.00 mm. nin altında olmuştur.

Seviye	Tepe Yerdeğiştirmesi [mm]	Rölatif Kat Yerdeğiştirmesi % 0
1	0.030	0.02
2	0.060	0.04
3	0.120	0.08
4	0.180	0.13
5	0.240	0.17
6	0.320	0.23
7	0.480	0.34
8	0.686	0.48
9	0.847	0.60
10	1.108	0.78
11	1.310	0.92
12	1.700	1.20
13	2.060	1.45
14	2.620	1.85
15	3.000	2.11
16	3.600	2.54
17	4.260	3.00
18	5.680	4.00
19	7.100	5.00
20	8.520	6.00
21	11.360	8.00
22	14.910	10.50
23	18.100	12.75
24	19.880	14.00
25	23.620	16.63

Her yerdeğiştirme seviyesi 3 kez tekrarlanmaktadır.

UYGULANAN YERDEĞİşTİRME EşİKLERİ

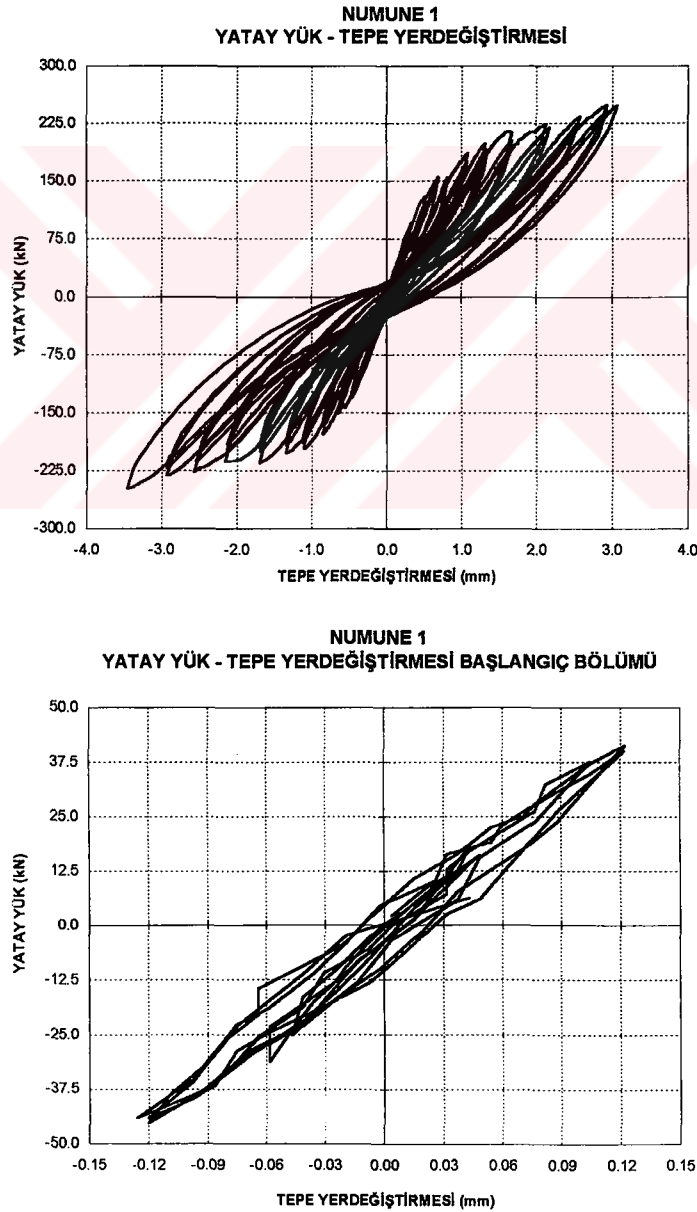


Şekil C.13 Uygulanan Yerdeğiştirme Eşikleri

Deneysel Bulgular

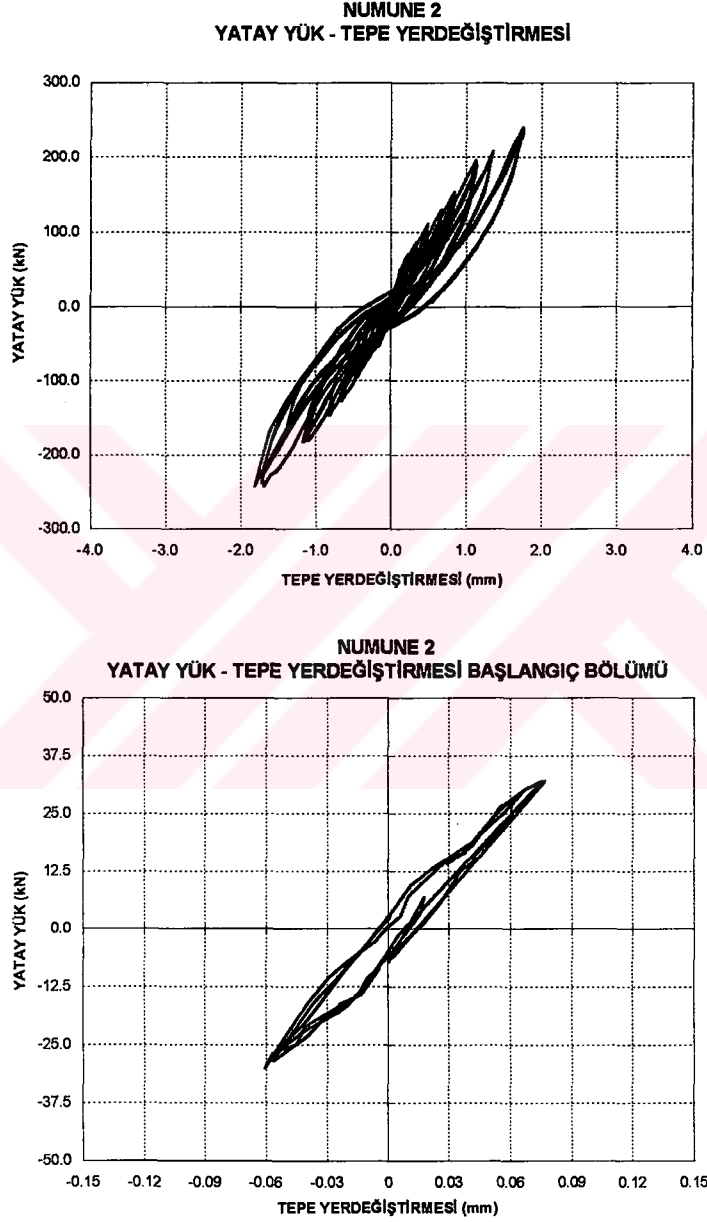
Detayları yukarıda verilen yükleme ve ölçüm sistemi kullanılarak çok miktarda veri toplanmıştır. Bu bölümde, davranış farklılıklarını ortaya koyan yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrileri, kritik bazı kesitlerdeki şekildeğiştirme eğrileri ile hasar dağılımlarının verilmesiyle yetinilecektir.

- Özel bölme duvarlı çerçevede; duvar üzerinde yoğunlaşmış yayılı çatlaklar oluşmuş, betonarme elemanlarda belirgin bir kalıcı şekildeğiştirme gözlenmeden hidrolik verenin 250 kN. luk yükleme sınırına erişilmiştir. Bu yerdeğiştirme seviyesine kadar elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi Şekil C.14 de verilmektedir. Başlangıç rijitliğini anlamak üzere, küçük yerdeğiştirmeler düzeyindeki eğri de verilmiştir.



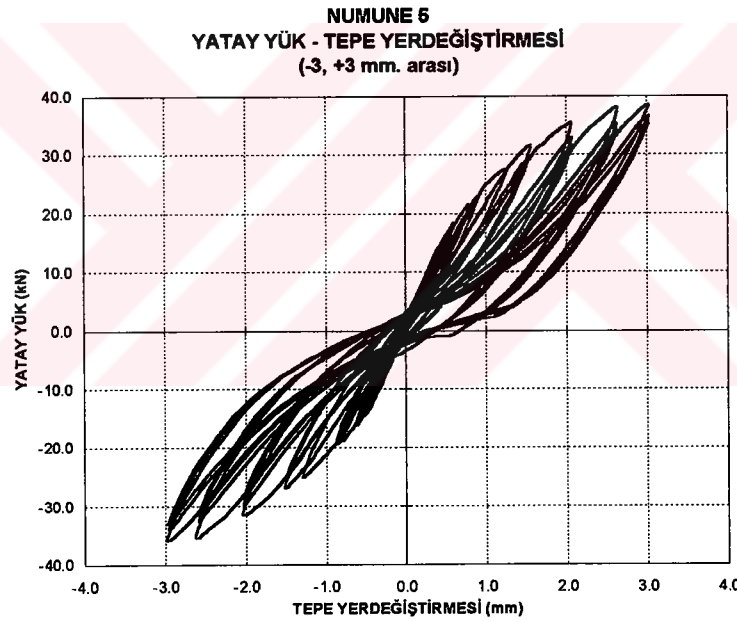
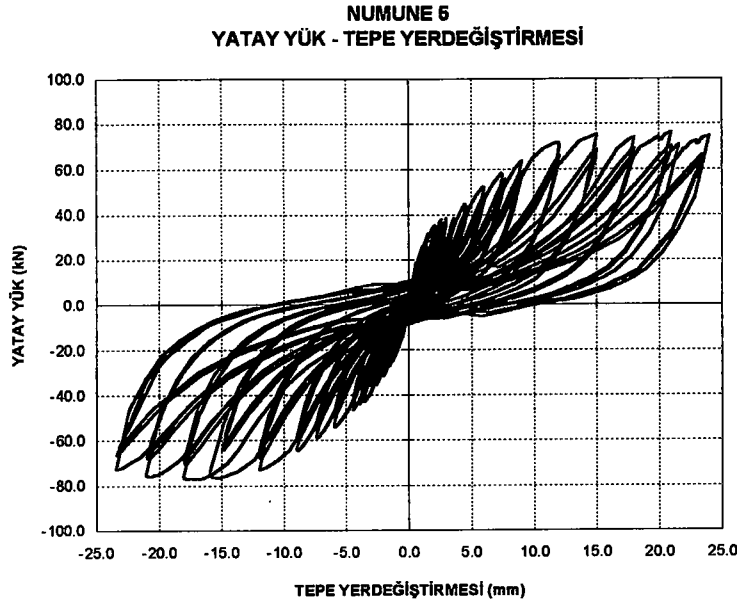
Şekil C.14 Numune 1 Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkisi

- Özel bölme duvarı üzerinde oluşan çatlaklarla duvarın etkinliğinin azalmaya başladığı, Şekil C.14 den izlenmektedir. Hasarlı bölme duvarına, detayları yukarıda açıklanan güçlendirme tekniği uygulandıktan sonra ulaşılan davranış biçimi de Şekil C.15 den gözlenmektedir. Bu numunede de ± 250 kN. luk veren yükleme üst sınırına kadar çalışılmıştır. Şekil C.14 ve Şekil C.15 in karşılaştırılmasıyla, kullanılan güçlendirme tekniğinin etkinliği anlaşılmaktadır.



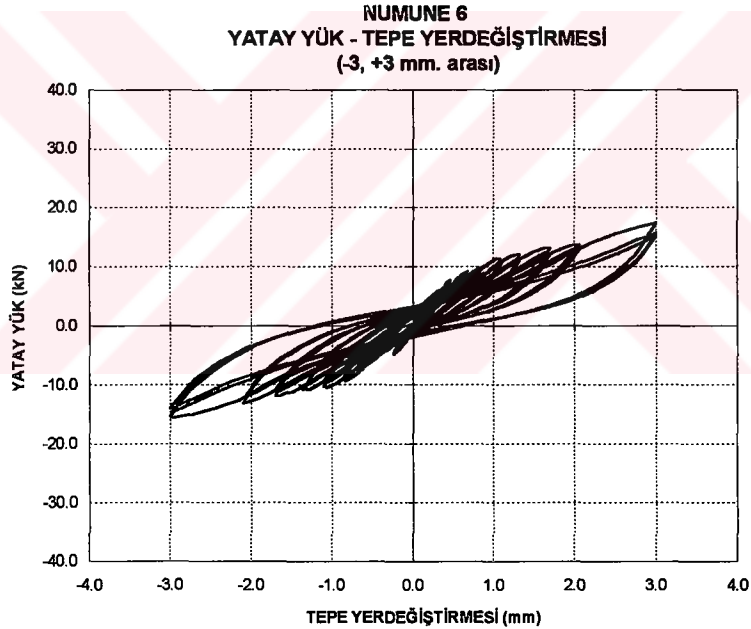
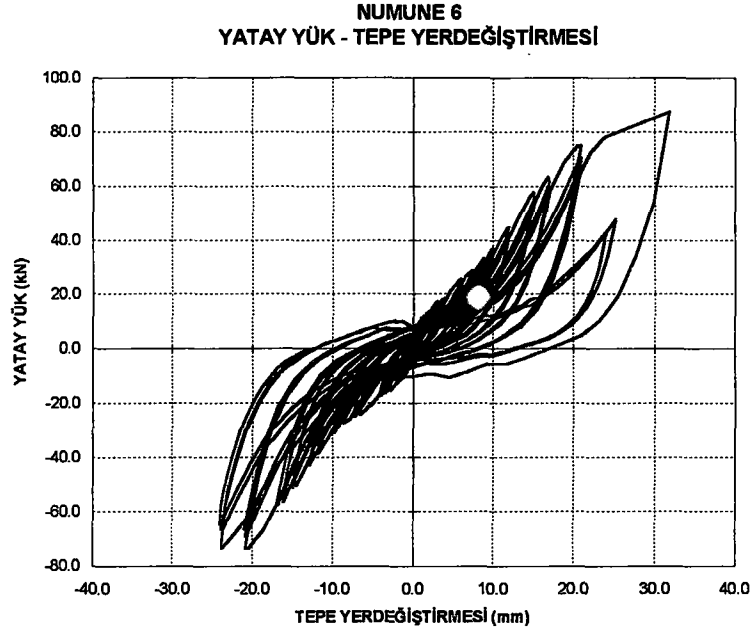
Şekil C.15 Numune 2 Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkisi

- Özel bölme duvarının, sistem davranışına olan katkısını ortaya çıkarmak üzere, Numune 1 ile aynı özelliklere sahip bölme duvarsız betonarme çerçeve, Numune 5, deneyinden elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi de Şekil C.16 da verilmektedir. Ayrıca bu çerçeve kuramsal olarak da incelenmiştir.



Şekil C.16 Numune 5 Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkisi

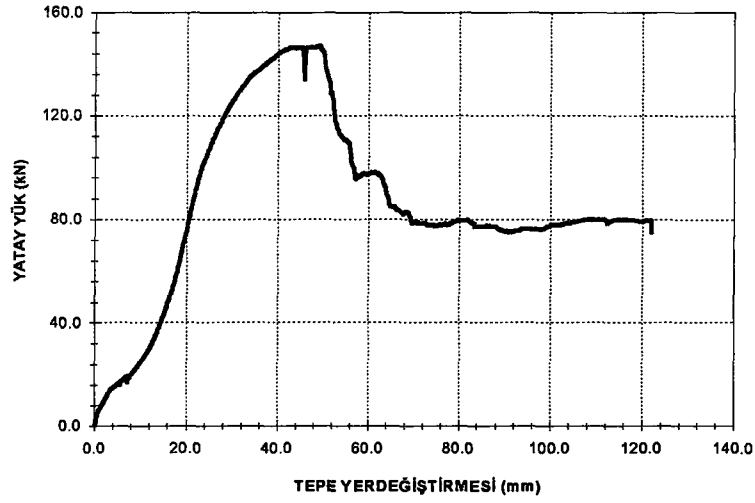
- Numune 5 in denenmesinden sonra; kolon uç bölgelerinde yoğunlaşan çatlaklar, epoksi esaslı bir yapıştırıcı malzemeyle doldurularak onarım yapılmıştır. Ulaşılan yeni yapının, Numune 6, yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi Şekil C.17 de verilmektedir. Şekil C.16 ve Şekil C.17 nin karşılaştırılmasından görölmektedir ki; epoksi onarımı yapılmış numunede ± 3 mm. lik başlangıç bölgesinde ulaşılan dayanım ve rijitlik, orijinal durumun yaklaşık 1/2 si mertebesindedir. Daha büyük yerdeğiştirmeler düzeyinde ise orijinal yapıya ait dayanımlara yaklaşıldığı görölmektedir. Numune 6 da, kolon elemanlar üzerinde yeni çatlaklar oluşmuştur. Uygulanan son pozitif yerdeğiştirme çevriminde ani dayanım azalması gözlenmiştir.



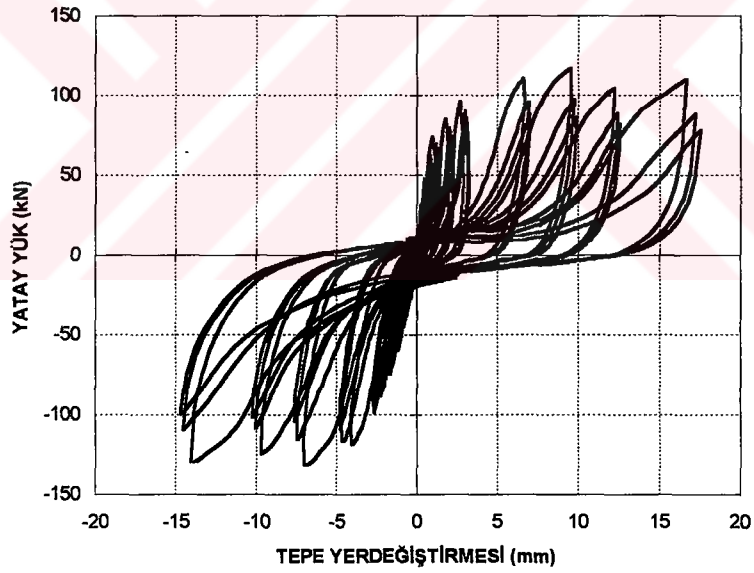
Şekil C.17 Numune 6 Yatay Yük Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkisi

- Hasarlı çıplak çerçeve içine bölme duvarı ilavesiyle elde edilen Numune 4 ve Numune 7 de, yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi ilişkileri Şekil C.18 de verilmiştir. Numune 4 için, tekrarlı yükleme sonrasında tatbik edilen tek yönlü artan yüklemeyle elde edilen eğri, Numune 7 içinse yön değiştiren yükleme etkisindeki davranış verilmiştir. Diyagramda önemli miktarda kesme oyulması olduğu görülmektedir. Numune 4 e ait diyagramın değerlendirilmesi sırasında yük geçmişi olduğu unutulmamalıdır.

NUMUNE 4
YÜK TEPE YERDEĞİŞTİRMESİ
 (TERSİNİR YÜKLEMEDEN SONRA TATBİK EDİLEN MONOTONİK ARTAN YÜKLEME)



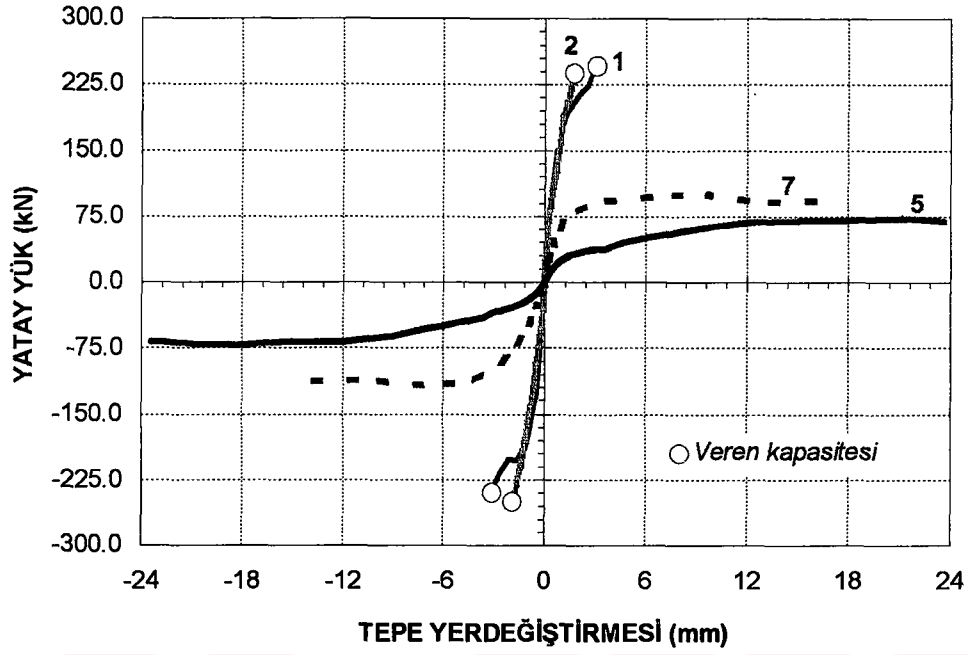
NUMUNE 7
YATAY YÜK-TEPE YERDEĞİŞTİRMESİ İLİŞKİSİ



Şekil C.18 Numune 4 ve Numune 7 Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkisi

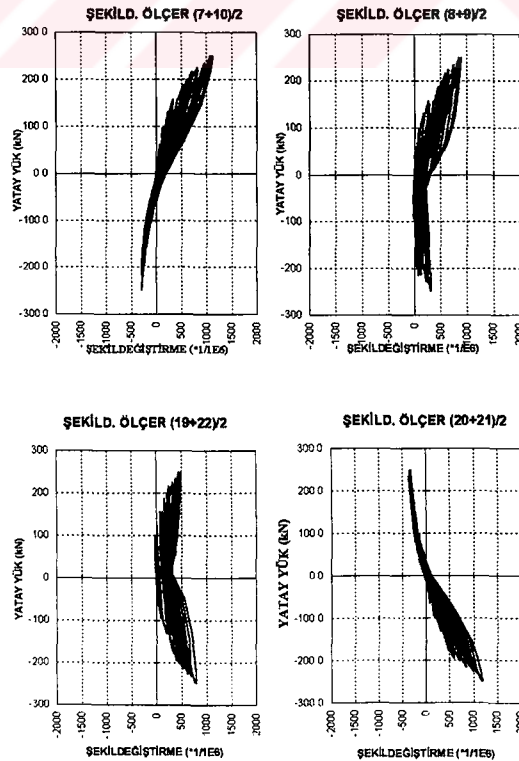
- Dört tip numune için; yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi eğrilerinden hareketle elde edilen zarf eğrileri, Şekil C.19 da üst üste verilmektedir. Diyagram üzerindeki numaralar, numune isimlerine karşı gelmektedir. Zarf eğrilerinin karşılaştırılmasıyla, özel bölme duvarında ulaşılan rijitlik ve dayanım artışları net olarak görülebilir. 1 ve 2 nolu numunelerde; uç noktalar, ± 250 kN. luk hidrolik veren yükleme sınırına karşı gelmektedir. Özellikle Numune 2 de dayanımın daha ileri düzeylere çıkacağı öngörülmektedir.

YATAY YÜK - TEPE YERDEĞİŞTİRMESİ ZARF EĞRİLERİ



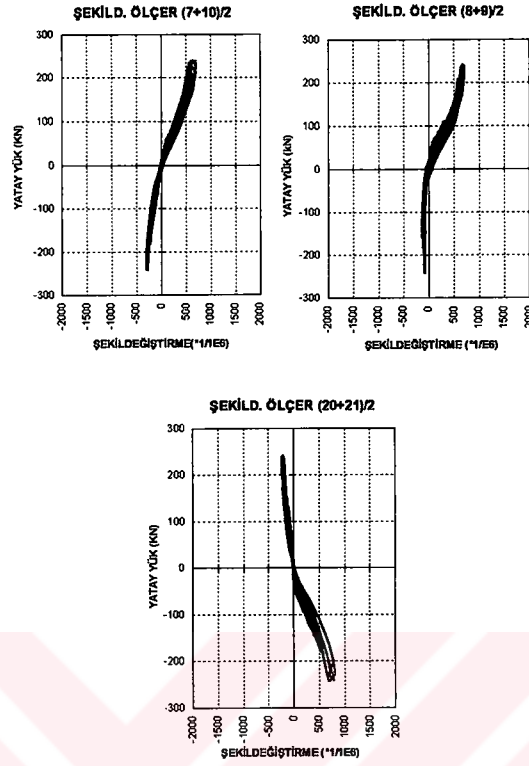
Şekil C.19 Yatay Yük-Tepe Yerdeğıştirmesi Zarf Eğrileri

- 1, 2, 5 nolu numunelerde, kolon taban kesitlerinde bulunan şekildeğıştirme ölçerlerden alınan sonuçlar Şekil C.20 de verilmektedir.

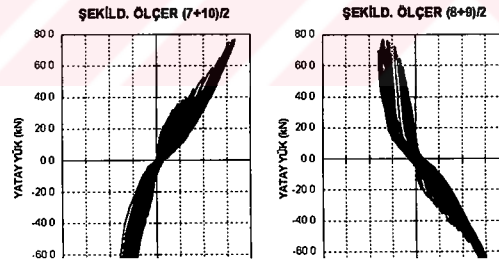


Şekil C.20a Numune 1 Kolon Taban Kesiti Boyuna Donatı Şekildeğıştirmeleri

Diyagramlarda referans verilen numaralar için, Şekil C.12 ye bakılmalıdır.

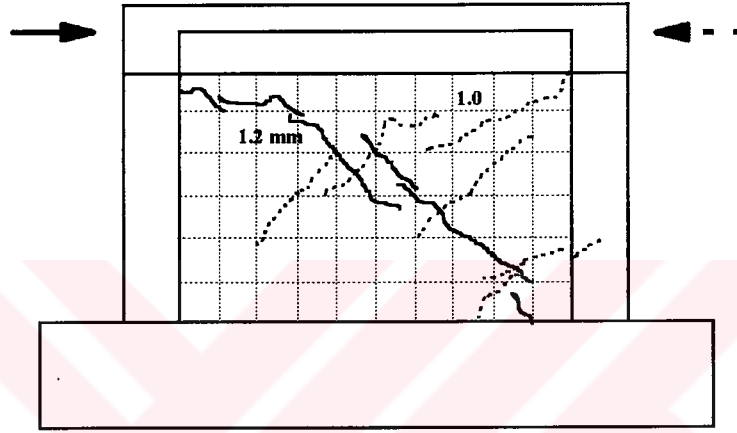


Şekil C.20b Numune 2 Kolon Taban Kesiti Boyuna Donatı Şekildeğişimleri



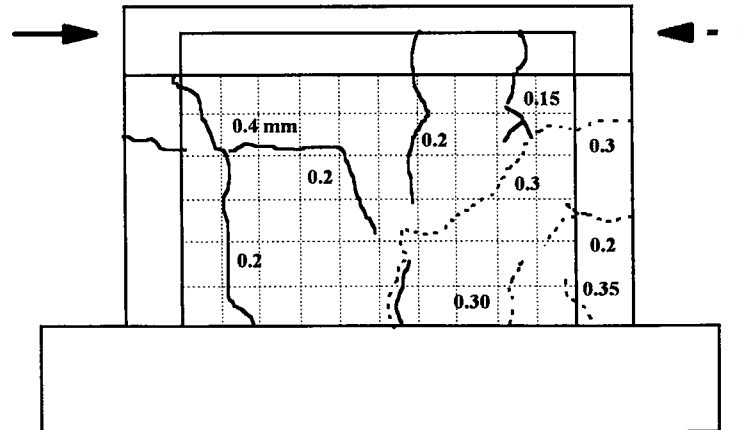
Kaydedilen en büyük şekildeğişimler; Numune 1 de % 0.12, Numune 2 de %0.08, Numune 5 te ise %0.18 mertebesindedir. Numune 1 ve Numune 2 kolonlarının tek, Numune 5 kolonlarının ise çift eğrilikli olarak çalıştıkları Şekil C.20 nin değerlendirilmesiyle anlaşılmaktadır.

- Numune 1, 2 ve 5 te gözlenen hasar durumları da Şekil C.21 de verilmektedir. Numune 1 de; ± 2.55 mm. çevriminde kaydedilen çatlak yayılımına bakıldığında, her iki yönde de köşegen üzerinde yoğunlaşma olduğu gözlenmektedir. Kaydedilen en büyük çatlak genişliği 1.2 mm. mertebesindedir. Kaydedilen çatlak genişlikleri, kayma kamasız benzer numunelere göre çok küçüktür.



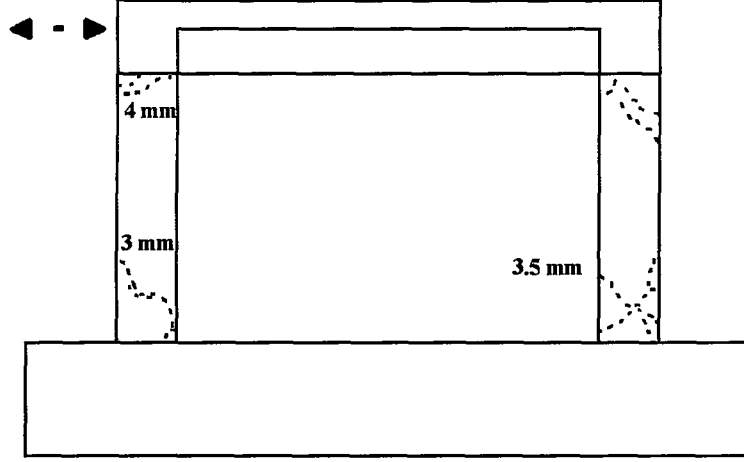
Şekil C.21a Numune 1 Hasar Dağılımı

Numune 2 de ± 1.72 mm. çevriminde kaydedilen çatlaklara bakıldığında, daha küçük genişlikli oldukları ve tüm yüzeye yayıldıkları gözlenmektedir. Bu durum, güçlendirme perdesine yerleştirilen hasır donatıyla ilgilidir.



Şekil C.21b Numune 2 Hasar Dağılımı

Numune 5 de; hasar, kolon alt ve üst kesitlerinde yoğunlaşmış durumdadır. ± 23.5 mm. çevriminde sağ kolon alt bölgesinde X şeklindeki çatlak meydana geldikten sonra deney durdurulmuştur, Şekil C.7.



Şekil C.21c Numune 5 Hasar Dağılımı

Sonuçlar

Deneysel olarak incelenen numune sayısının az olması dolayısıyla; genelleme yapılamamakla birlikte, elde edilen şu sonuçlar belirtilebilir:

1. Bölme duvarının beton kayma kamaları ile kendisini çevreleyen betonarme elemanlara bağlanması halinde; sistem dayanım ve rijitliği, kayma kamasız duruma göre önemli ölçüde artmaktadır. Birleşik sistemin dayanım ve rijitliği, bölme duvarı ile betonarme çerçeve dayanım ve rijitliklerinin toplamından daha büyüktür, Şekil C.19.
2. ± 250 kN. luk veren yükleme sınırına kadar, özel bölme duvarı ile betonarme çerçeve arasında ayrılma yada rölatif hareket gözlenmemiştir, Şekil C.21a.
3. Kayma kamasız duvarlarda; küçük yatay yükler düzeyinden itibaren bölme duvarı ile betonarme çerçeve arasında ayrılma başlayarak, duvarın dayanım ve rijitliğe olan katkısı düşmekte ve kısa kolonlar oluşabilmektedir, Şekil C.7.
4. Bölme duvarı ile betonarme elemanlar arasındaki kayma kamaları, duvarın blok olarak düzlem dışına devrilmesini engelleme görevi de görmektedirler.
5. Hasarlı özel bölme duvarına uygulanan güçlendirme yönteminin etkinliği, deneysel olarak gösterilmiştir, Şekil C.19.

ÖZGEÇMİŞ

Ercan YÜKSEL, 1966 yılında Eskişehir’de doğmuştur. Orta öğrenimini 1983 yılında Bursa Yenişehir Osmangazi Lisesinde bitirmiştir. 1987 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde lisans, 1990 yılında da İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisans öğrenimini tamamlayarak aynı enstitüde doktora çalışmasına başlamıştır. Halen İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

