

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FENBİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

106398

BOŞLUKLU PERDELERİN ELASTİK-PLASTİK ANALİZİ

İnş.Yük.Müh. Bilge DORAN

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

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi
Tez Danışmanı
Jüri Üyeleri

: 22.06.2001

: Prof. Zekeriya POLAT (YTÜ)

: Prof.Dr. Zekâi CELEP (İTÜ)

: Prof.Dr. Tuncer ÇELİK (İÜ)

YÜKSEKÖĞRETİM ENSTİTÜSÜ
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

İSTANBUL, 2001

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	i
ŞEKİL LİSTESİ	iii
ÇİZELGE LİSTESİ	v
ÖNSÖZ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel	1
1.2 Önceki Çalışmalar	2
1.3 Çalışmanın Amacı	4
2. PERDE SİSTEMLER	6
2.1 Perdeli-Çerçevesi Sistemler	6
2.2 Boşluklu Perdeler	8
3. BOŞLUKLU PERDELERİN ELASTİK ANALİZİ	9
3.1 Boşluklu Perde Bağ Elemanlarının Hesabı	12
3.2 Bağ Elemanlarının Eşdeğer Birim Dönme Momentlerinin Hesabı İçin Bir Yaklaşım	14
4. DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ VE PLASTİSİTE	31
4.1 Doğrusal Olmayan Davranış	31
4.2 Malzeme Açısından Doğrusal Olmayan Davranış	33
4.3 Doğrusal Çözümleyici ile Doğrusal Olmayan Hesap	34
4.4 Plastisite	35
4.4.1 Plastisitenin Yapı Mühendisliğindeki Önemi	39
4.4.2 Bir Noktadaki Gerilme ve Gerilme Tansörü	39
4.4.2.1 Asal Gerilmeler ve Gerilme Tansörünün İnvaryantları.....	41
4.4.2.2 Oktaedral Kayma Gerilmesi	46
4.4.2.3 Haigh-Westergaard Gerilme Uzaı	47
4.5 Kırılma Hipotezleri	52
4.5.1 von Mises Biçim Değiştirme Enerjisi Hipotezi.....	55

4.5.2	Mohr-Coulomb Kayma Gerilmesi Hipotezi.....	58
4.5.3	Drucker-Prager Kriteri	63
4.6	Elastik-Tam Plastik Malzemeler İçin Gerilme-Birim Şekil Değişirme İlişkisi	65
4.7	Elastik Limit ve Akma Fonksiyonu	66
4.8	Yükleme ve Boşaltma Evreleri	67
4.9	Elastik ve Plastik Şekil Değişirme Artım Tansörleri.....	68
4.10	Plastik Potansiyel ve Akış Kuralı	69
4.11	Bünye Bağlılıları	71
4.12	Drucker-Prager Modeli.....	76
4.12.1	Modelin Beton ve Betonarme Elemanlara Uygulanması.....	78
5.	BOŞLUKLU PERDELERİN PLASTİK ANALİZİ	87
5.1	Giriş	87
5.2	Simetrik İki Perdeyi Birleştiren Bağ Elemanları	87
5.3	Sayısal Örnek Üretmekte Kullanılan Sonlu Eleman Tipleri ve Önerilen Malzeme Modeli	89
5.4	Önerilen Çözüm Yöntemi	92
5.5	Sayısal Örnekler	98
5.6	Bir Perde ile Bir Kolonu Birleştiren Bağ Elemanları	101
6.	SONUÇ ve ÖNERİLER	106
	KAYNAKLAR	113
	EK-1	116
	EK-2	128
	ÖZGEÇMİŞ	147

SİMGE LİSTESİ

a	Kolon genişliği
$a_o, a_1, \dots, a_n$	Sabit katsayılar
A'	İndirgenmiş kesit alanı
A_{sw}	Yanal donatı(Etriye) alanı
b	Perde genişliği
$\underline{B}$	Şekil değiştirme matrisi
c	Kohezyon
C_{ijkl}	Elastik malzeme tansörü
$d\epsilon_{ij}$	Toplam şekil değiştirme artım tansörü
d	Bağ elemanı yüksekliği
d_{max}	Maksimum agrega boyutu
D_{ijkl}	Elastik malzeme tansörünün inversi
E	Elastisite modülü
$\underline{f}$	Elemana ait dış yük vektörü
f_{ctd}	Beton hesap çekme dayanımı
f_{yd}	Donatı çeliği akma hesap dayanımı
f_{ywd}	Etriye akma hesap dayanımı
$\underline{F}$	Toplam sisteme(Global) ait dış yük vektörü
G	Kayma modülü
h	Kat yüksekliği
I	Eğilme atalet momenti
I_1, I_2, I_3	Gerilme tansörünün invaryantları
J_1, J_2, J_3	Gerilme deviyatörü tansörünün invaryantları
$\underline{K}$	Toplam sistem(Global) rijitlik matrisi
K	Hacımsal modül
$\underline{k}^e$	Eleman rijitlik matrisi
ℓ	Bağ elemanı serbest açıklığı
$\bar{m}'_{i\theta_i}$	Gerçek sistemde $\theta_i = 1$, $\theta_j = 0$ durumunda i -düğümünde meydana gelecek birim moment (Birim dönme momenti)
$\bar{m}'_{j\theta_j}$	Gerçek sistemde $\theta_j = 1$, $\theta_i = 0$ durumunda j -düğümünde meydana gelecek birim moment (Birim dönme momenti)
$\bar{m}'_{i\theta_j}$	Gerçek sistemde $\theta_j = 1$, $\theta_i = 0$ durumunda i -düğümünde meydana gelecek birim moment (Birim dönme momenti)
$m'_{i\theta_i}$	Gerçek sistemde $\theta_j = 1$, $\theta_i = 1$ durumunda i -düğümünde meydana gelecek birim moment (Birim dönme momenti)
$m_{i\theta_i}$	Eşlenik(Fiktif) sistemde $\theta_j = 1$, $\theta_i = 1$ durumunda i -düğümünde meydana gelecek birim moment (Birim dönme momenti)
$\underline{N}$	Şekil fonksiyonu
$\underline{r}$	Düğüm noktası yer değiştirme vektörü
s_{ij}	Gerilme deviyatörü tansörü
t	Kalınlık
$\underline{t}^n$	Gerilme vektörü

U	İç kuvvetlerin şekil değiştirme enerjisi
u	X eksen doğrultusundaki yer değiştirme
V	Dış kuvvetlerin potansiyel enerjisi
V_e	Tasarım kesme kuvveti
v	Y eksen doğrultusundaki yer değiştirme
x	Yumuşama derinliği
η^e	Elastik durum için geçerli eşdeğerlik çarpanı
η^p	Plastik durum için geçerli eşdeğerlik çarpanı
η_{ii}^e, η_{ii}^p	$\theta_i = 1, \theta_j = 0$, durumunda, i -düğümüne ait, sırasıyla, elastik ve plastik durum için geçerli eşdeğerlik çarpanları
η_{ij}^e, η_{ij}^p	$\theta_j = 1, \theta_i = 0$, durumunda, i -düğümüne ait, sırasıyla, elastik ve plastik durum için geçerli eşdeğerlik çarpanları
η_{jj}^e, η_{jj}^p	$\theta_j = 1, \theta_i = 0$, durumunda, j -düğümüne ait, sırasıyla, elastik ve plastik durum için geçerli eşdeğerlik çarpanları
η_{FE}^e	Elastik durum için geçerli olan ve sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla bulunan eşdeğerlik çarpanı
η_{FE}^p	Plastik durum için geçerli olan ve sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla bulunan eşdeğerlik çarpanı
δ	Gerçek sistemdeki deplasman
$\bar{\delta}$	Eşlenik(Fiktif) sistemdeki deplasman
δ_{ij}	Kronecker deltası
$\delta_{11}, \delta_{12}, \delta_{21}$	Sistem birim yükleme sabitleri
$\delta_{10}^w, \delta_{20}^w$	Yük terimleri
$\Delta_{x_{i+1}}, \Delta_{x_i}$	Sırasıyla $i+1$ inci ve i inci düğümün yatay deplasmanları
$\Delta_{y_{i+1}}, \Delta_{y_i}$	Sırasıyla $i+1$ inci ve i inci düğümün düşey deplasmanları
σ_c	Referans noktasındaki beton gerilmesi
σ_{ij}	Gerilme tansörü
σ_{oct}	Oktaedral düzlemdeki normal gerilme
ε	Birim şekil değiştirme
ξ, ρ, θ	Haigh-Westergaard koordinatları
ρ_a, ρ_u	Bağ elemanında sırasıyla alt ve üst yüzündeki boyuna donatı yüzdeleri
ρ_{max}, ρ_{min}	Bağ elemanında sırasıyla maksimum ve minimum boyuna donatı yüzdeleri
θ_i	Perde-bağ elemanı eksenlerinin kesim noktasındaki dönme miktarı
μ	Poisson oranı
τ_{oct}	Oktaedral düzlemdeki kayma gerilmesi
ϕ	İçsel sürtünme açısı
$\sum M_p$	Pekleşmeli taşıma gücü momentlerinin toplamı

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Perdeli-çerçevesel sistem (düşey).....	7
Şekil 2.2	Boşluklu perdeli sistem	8
Şekil 3.1	Eleman ve düğüm noktası bilinmeyenleri	9
Şekil 3.3	Yatay yükler etkisindeki tipik bir boşluklu perde	12
Şekil 3.4	Boşluklu perde ve eşdeğer çerçeve.....	13
Şekil 3.5	Eşdeğer çubuk modeli	14
Şekil 3.10	Boşluklu perdeli sistem (Örnek 1)	26
Şekil 3.11	Kat ötelemeleri (Örnek 1)	27
Şekil 3.12	Boşluklu perdeli sistem (Örnek 2)	28
Şekil 3.13	Kat ötelemeleri(Örnek 2)	29
Şekil 4.1	Kuvvet – yer değiştirme ilişkisi	31
Şekil 4.2	Doğrusal olmayan davranış	32
Şekil 4.3	Gerçek davranış ve idealize edilmiş davranış	32
Şekil 4.4	Doğrusal ve doğrusal olmayan davranış	32
Şekil 4.5	Gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	33
Şekil 4.6	Doğrusal yaklaşım	34
Şekil 4.7	BSD sistem için $N-R$ işlem grafiği	35
Şekil 4.8	Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, sınır durumlar	36
Şekil 4.9a	$\sigma-\epsilon$ düzleminde malzeme modelleri	37
Şekil 4.9b	İki boyutlu ve üç boyutlu gösterimde malzeme modelleri	38
Şekil 4.10	Herhangi bir noktadaki gerilme vektörü(Chen ve Han, 1988).....	39
Şekil 4.11	Birbirine dik üç düzlemde gerilme vektörü (Chen ve Han, 1988).....	41
Şekil 4.12	Üç boyutlu kartezyen uzayda oktaedral düzlemler (Chen ve Han, 1988).....	46
Şekil 4.13	Haigh-Westergaard gerilme uzayı (Chen ve Han,1988).....	47
Şekil 4.14	Bir noktada tanımlı gerilme durumunun <i>Deviyatör Düzlemdeki</i> izdüşümü (Chen ve Han,1988).....	49
Şekil 4.15	Gerilme durumları	52
Şekil 4.16	Gerilme halleri	55
Şekil 4.17	Mohr kriterinin grafik gösterimi	58
Şekil 4.18	Mohr-Coulomb Kriterinin grafik gösterimi (Chen ve Han, 1988).....	59
Şekil 4.19	$\sigma_1 - \sigma_2$ düzleminde Mohr-Coulomb kriteri (Chen ve Han, 1988).....	61
Şekil 4.20	Asal gerilme uzayında Mohr-Coulomb kriterinin grafik gösterimi (Chen ve Han,1988).....	62
Şekil 4.21	Drucker-Prager kriteri (Chen ve Han,1988).....	63
Şekil 4.22	Drucker-Prager ve Mohr-Coulomb kriterlerinin karşılaştırılması, (a) asal gerilme uzayında, (b) deviyatör düzlemde (Chen ve Han, 1988).....	64
Şekil 4.23	$\sigma_1 - \sigma_2$ düzleminde Drucker-Prager kriteri (Chen ve Han, 1988).....	65
Şekil 4.24	Beton için idealize edilmiş gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı.....	66
Şekil 4.25	Elastik-tam plastik malzeme için yükleme ve boşaltma durumunda, akma yüzeyi	67
Şekil 4.26	Birleşik akış kuralının geometrik gösterimi	71
Şekil 4.27	Drucker-Prager akma yüzeyinde plastik hacımsal genleşme	77
Şekil 4.28	Drucker-Prager kriteri için önerilen kohezyon değerleri(Doran vd.,1998)...	81
Şekil 4.29	Beton prizmaların boyutları ve yükleme biçimleri (Polat vd., 2000).....	82
Şekil 4.30	Beton basınç elemanı için yük-şekil değiştirme eğrileri(Polat vd., 2000).....	83

Şekil 4.31	(a) Betonarme çekme-eğilme donatılı kiriş- boyutlar ve yükleme durumu, (b) Sonlu eleman modeli, (Doran vd., 1998) (c) Çelik için $\sigma - \varepsilon$ eğrisi.....	84
Şekil 4.32	Yük-öteleme eğrileri (Doran vd., 1998).....	84
Şekil 4.33	(a) Betonarme kesme-eğilme donatılı kiriş- boyutlar ve yükleme durumu, (b) Sonlu eleman modeli , (Doran vd., 1998) (c) Çelik için $\sigma - \varepsilon$ eğrileri	85
Şekil 4.34	Yük- öteleme eğrileri (Doran vd., 1998).....	86
Şekil 5.1	Tek açıklıklı boşluklu perde ve bağ elemanı donatı detayları	87
Şekil 5.2	(a)Şekil değiştirmiş durum ve çatlak bölgeleri (b) Sonlu eleman modeli	89
Şekil 5.3	Sonlu eleman tipleri	90
Şekil 5.4	Drucker-Prager malzeme modeli	90
Şekil 5.5	von Mises malzeme modeli.....	91
Şekil 5.6	$\sigma - \varepsilon$ eğrisi	91
Şekil 5.7	Betonarme kesitte $\sigma - \varepsilon$ eğrisi	94
Şekil 5.8	Farklı d/ ℓ değerleri için eşdeğer rijitlik çarpanları oranının(η^p / η^e) zorlanma derecesine (σ_c / f_c)bağlı değişimi	97
Şekil 5.9	Boşluklu perde örneği, $d=0.60m$, $b=3m$, $\ell = 3m$	98
Şekil 5.10	(σ_c / f_c)=0.72 için kat ötelemeleri	99
Şekil 5.11	Boşluklu perde örneği, $d=0.40m$, $b=3m$, $\ell = 3m$	100
Şekil 5.12	(σ_c / f_c)=0.45 için kat ötelemeleri	100

Çizelge 3.1	Ara kat bağlantılarının birim dönme momentlerinin hesabı ile ilgili büyüklükler (Şekil 3.4).....	21
Çizelge 3.2	Ara kat bağlantılarının birim dönme momentlerinin hesabı ile ilgili büyüklükler (Şekil 3.4).....	25
Çizelge 3.3	Örnek 1: Yatay yer değiştirmeler (mm).....	27
Çizelge 3.4	Örnek 2: Yatay yer değiştirmeler (mm).....	29
Çizelge 5.17	Perde-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=0.40m$, $b=4.4m$	116
Çizelge 5.22	Perde-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=0.60m$, $b=3.6m$	118
Çizelge 5.27	Perde-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=0.60m$, $b=4.6m$	119
Çizelge 5.28	Perde-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=0.80m$, $b=3.0m$	121
Çizelge 5.35	Perde-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=0.80m$, $b=4.4m$	122
Çizelge 5.37	Perde-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=1.00m$, $b=3.0m$	123
Çizelge 5.42	Perde-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=1.00m$, $b=4.0m$	124
Çizelge 5.46	Perde-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=1.20m$, $b=3.0m$	125
Çizelge 5.49	Perde-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=1.20m$, $b=3.6m$	126
Çizelge 5.79	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=0.60m$, $b=4.2m$	128
Çizelge 5.82	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=0.80m$, $b=3.0m$	129
Çizelge 5.90	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=0.80m$, $b=4.6m$	130
Çizelge 5.91	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=1.00m$, $b=3.0m$	131
Çizelge 5.99	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=1.00m$, $b=4.6m$	132
Çizelge 5.100	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=1.20m$, $b=3.0m$	133
Çizelge 5.106	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=1.20m$, $b=4.2m$	134
Çizelge 5.133	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=0.60m$, $b=4.2m$	135
Çizelge 5.136	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=0.80m$, $b=3.0m$	137
Çizelge 5.144	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=0.80m$, $b=4.6m$	137

Çizelge 5.145	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=1.00m$, $b=3.0m$	138
Çizelge 5.153	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=1.00m$, $b=4.6m$	139
Çizelge 5.154	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=1.20m$, $b=3.0m$	140
Çizelge 5.160	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=1.20m$, $b=4.2m$	141
Çizelge 5.187	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=0.60m$, $b=4.2m$	142
Çizelge 5.190	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=0.80m$, $b=3.0m$	143
Çizelge 5.198	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=0.80m$, $b=4.6m$	144
Çizelge 5.199	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=1.00m$, $b=3.0m$	144
Çizelge 5.207	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=1.00m$, $b=4.6m$	145
Çizelge 5.208	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=1.20m$, $b=3.0m$	145
Çizelge 5.214	Kolon-Perde bağ elemanları için üretilen sayısal (FE) sonuçlar hakkında açıklama; $d=1.20m$, $b=4.2m$	145

ÖNSÖZ

Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında yürütülen bu çalışmada, uygulamada büyük bir problem teşkil eden boşluklu perde bağ elemanları üzerinde durulmuş ve daha pratik bir çözüm yöntemi araştırılmıştır. Çözümde çeşitli paket programlar araç olarak kullanılmış, çok sayıda çözüm sonuçları irdelenmiş ve bir sonuca ulaşmaya çalışılmıştır.

Konunun şekillenmesi ve ortaya çıkmasında büyük teşvik ve yardımlarını gördüğüm ve bu doktora çalışması süresince benden hiçbir şekilde ilgisini esirgemeyen değerli hocam sayın Prof. Zekeriya POLAT'a, çalışmanın plastik analiz safhasında uygun parametrelerin belirlenmesi için ortak çalışmalar yürüttüğümüz sayın Yrd.Doç.Dr. H.Orhun KÖKSAL'a, LUSAS yapısal analiz programının kullanımı sırasında teknik sorunların giderilmesinde yardımcı olan sayın Hafez KEYPOUR'a ve diğer emeği geçen tüm Yapı Anabilim Dalı öğretim elemanlarına içtenlikle teşekkür ederim. Tezin son düzelteleri sırasında değerli önerilerde bulunan sayın Prof.Dr. Tuncer ÇELİK ve sayın Prof.Dr. Zekâi CELEP'e de ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2001

Bilge DORAN

ÖZET

Betonarme binalarda perdeli-çerçevesel veya sadece perdeli sistemler sıklıkla kullanılmaktadır. Deprem etkisindeki, perdeli-çerçevesel sistemlerde, gerekli ve yeterli olan rijitlik perde tarafından karşılanmaktadır. Bu yüzden sistem ve/veya sistem elemanlarının boyutlandırılmasında, perde ve çerçevelerin etkileşimi dikkate alınmalıdır.

Perdeli sistemlerin özel bir hali olan boşluklu perdeli sistemlerin hesapları eşdeğer çerçeve ve/veya sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Boşluklu perdelerin yapısal davranışlarını genelde bağ elemanları belirlediğinden, bu elemanların modellenmesi büyük önem taşımaktadır.

Boşluklu perdelerin hesabını konu alan bu tez çalışması iki temel kısımdan oluşmaktadır; ilk kısım boşluklu perdelerin elastik analizini, ikinci kısım ise plastik analizini inceler.

- 1.Bölümde; çalışmanın amacı ve daha önce gerçekleştirilen çalışmalar üzerinde durulmuştur.
- 2.Bölümde ise perde sistemler ve bu çalışmanın temelini oluşturan boşluklu perde sistemlerle ilgili kısa bilgiler verilmiştir.
- 3.Bölüm, boşluklu perdelerin elastik analizi üzerinedir. Bu bölümde, problemin bağlı olduğu parametreler tanımlanmıştır. Bağ elemanlarının rijitliği, rijitliğe etkisi olan başlıca geometrik ve malzeme büyüklükleri, doğrusal-elastik ortamda dikkate alınarak belirlenmiş ve bu amaçla, sonlu eleman modelleri ile elde edilen çok sayıda çözümler SPSS paket programının verileri olarak alınmak suretiyle, tüm geometrik ve mekanik parametreleri içeren regresyon bağıntıları araştırılmıştır.
4. Bölümde; söz konusu sistemin plastik analizi hedef alınmıştır. Plastik analizde uygun malzeme modeli seçiminin önemi açıktır. Bu sebeple malzeme modelleri üzerinde durulmuş daha sonra analizin matematik modeli açıklanmıştır. Çalışmada beton için Drucker-Prager, çelik için ise von Mises malzeme modelleri kullanılmıştır.
5. Bölümde; gerçekleştirilen plastik analiz sonuçları ve her model için belirlenen η -eşdeğer rijitlik çarpanları verilmiş, 3.Bölümde olduğu gibi elde edilen sonuçlar SPSS paket programının verileri olarak alınmak suretiyle elastik ötesi davranışı ifade edecek regresyon bağıntıları araştırılmıştır. Ayrıca örnek bir sistem üzerinde yöntemin kabul geçerliliği sınanmıştır.
6. Bölümde sonuç ve öneriler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Boşluklu perde, bağ elemanı, plastik analiz.

ABSTRACT

Recently, the coupled wall and/or shear(structural) wall systems are being most frequently used in medium and high-rise buildings in earthquake zones. It is well known that, in the medium and high-rise buildings, shear walls and coupled shear wall systems are needed to provide the necessary stiffness and strenght. In a structural and/or section design analysis of a building, determining the interactions between the frames and shear walls is the main issue.

The two types of modelling are used actually for the lateral load analysis of coupled shear wall systems: finite element modelling and the bar frame modelling. The use of bar frame model for analysing the coupled wall system is still one of the practical methods in design. The structural behaviour of coupled shear walls is mostly influenced by the behaviour of their coupling beams; therefore the design of those elements has a great importance.

This study consist of mainly two parts; firstly the elastic analysis and secondly the plastic analysis of coupled shear walls are studied.

First chapter contains the goal of the work and summaries the similar precedent studies.

In chapter two, general assessments of analysis are given related to the shear walls, shear- wall frame and the coupled wall systems which are being largely used in RC building structures.

Third chapter contains elastic analysis of coupled shear walls; the parameters of the problem are defined and the necessary explanations dealing with the subject are given. The stiffness of the coupling members, and the geometrical and material parameters that effect to the stiffness directly are defined in linear-elastic space. The adequate number of result which are obtained by finite element analysis in linear-elastic space, are considered as statistical sample data, and then using SPSS package program, an equivalent bar stiffness formula is provided:

$$m'_{i\theta i} = \eta^e m_{i\theta i} \quad (1)$$

in which,

$$\eta^e = 1.9210 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{0.0282} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.6824} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.5860} \quad (2)$$

or, by rounding,

$$\eta^e = 1.9 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{0.03} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.70} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.60} \quad (3)$$

where η^e is a factor and h , b , d , ℓ are the geometrical parameters of the problem. The numerical examples and the comparison made with some available data in literature, as well as with the results produced by finite element analysis, show that the provided formulae which take into account the principal geometrical and mechanical parameters, are quietly satisfactory.

In chapter four, concrete and reinforced concrete members are analyzed under the classical plasticity concepts by the ANSYS program working with the NLFEA (Non-Linear Finite Element Analysis) techniques, for producing sample data of statistical assessment.

Since it is a quasi-brittle material, the nonlinear behaviour of concrete can be modeled using the concepts of classical plasticity theory provided an adequate yield function. It is essential to choose a suitable yield criterion in order to analyze any member using classical plasticity concepts. In this study, the analytical model of Drucker-Prager yield criterion which is a smooth approximation to the Mohr-Coulomb theory, is used to model the nonlinear behaviour.

A smooth approximation to the Mohr-Coulomb surface was expressed by Drucker and Prager in the form (Chen and Han, 1988):

$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (4)$$

where α and k are positive constants pertaining to the material. α and k related to Mohr-Coulomb constants c (cohesion) and ϕ (friction) by,

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}, \quad k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (5)$$

These two parameters which define the strength of the material are used by the ANSYS and LUSAS (in chapter five) programs in the plastic analysis. $c=2.80-3.40 \text{ MPa}$ and $\phi=25^\circ-35^\circ$ are suitable values for RC members and $c=3.40 \text{ MPa}$ and $\phi=32^\circ$ are used in this study.

In chapter five, coupled wall systems are analyzed under the classical plasticity concepts by the LUSAS program. Whole numerical results for the plastic analysis and the equivalent rigidity multipliers for tie elements are given. The adequate number of result obtained by finite element analysis in plastic space, are considered as statistical samples, and then using SPSS package program, an equivalent coupling beam stiffness formula is provided by similar way as indicated in the third chapter:

$$\eta^p = 1.507 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{0.0281} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.6896} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.5124} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.345} \quad (6)$$

or, by rounding,

$$\eta^p = 1.5 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{0.03} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.70} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.51} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.35} \quad (7)$$

where, σ_c / f_c defines the various exciting (loading) levels. Examples made by using the produced formulae are clearly proved that the obtained procedure is accurate enough.

Finally, in chapter six, whole obtained results and the suggestions are presented.

Keywords: Coupled shear wall, coupling beams, plastic analysis.

1 GİRİŞ

1.1 Genel

Betonarme binalarda, perde ve çerçevesel sistemler genelde beraber kullanılmaktadır. Yapı davranışında perde ve çerçevelerin karşılıklı etkisi, global sistemin davranışı açısından oldukça belirleyicidir.

Perde ve çerçeve sistemlerin birleşim noktalarındaki etkileşim (gerilme, şekil değiştirme), az katlı yapısal sistemlerde ihmal edilebilecek düzeydedir. Ancak çok katlı yapısal sistemlerde bu etkileşimi dikkate almamak oldukça büyük bir hata payını beraberinde getirmektedir.

Perde sistemleri, perdeli-çerçevesel sistemler ve boşluklu perdeli sistemler olmak üzere başlıca iki gruba ayırmak mümkündür. Bu çalışmada, boşluklu perdeli sistemlerin elastik (Böl.3) ve plastik (Böl.4 ve Böl.5) davranışı incelenmiş; çerçeve modellerinde kullanılabilecek bağ elemanları^{*} rijitlikleri ile ilgili bağıntılar üretilmiştir; bununla beraber, bu tür sistemlerin analizine bütünlük kazandırmak için, kolon-perde sistemlerin kirişleri için de benzer formüller üretilmiştir.

Günümüzde boşluklu perdeli sistemlerin hesapları eşdeğer çerçeve ve/veya sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Ancak boşluklu perdelerin yapısal davranışları bağ elemanlarının davranışlarından oldukça etkilendiğinden bu elemanların modellenmesi büyük önem taşımaktadır.

Gerçekleştirilen bazı sonlu eleman yaklaşımları, levha elemanı düğüm parametrelerinin seçiminde dikkatli davranılması, singülarite problemi eğilimi olan, duyarlılığı yüksek düğüm parametrelerinden kaçınılması gerektiğini ortaya çıkarmıştır. Özellikle perde ve bağ elemanı birleşim noktalarında ortaya çıkan bu problem, her iki sistemin (perde-bağ elemanı) modellenmesinde uygun sonlu eleman tiplerinin kullanılması gerekliliğini

^{*} Literatürde bağ elemanı, bağlantı elemanı ve bağ kirişi eş anlamda kullanılmaktadır. Dolayısıyla yeni bir kavram olarak algılanmamalıdır.

getirmektedir. Ara eleman kullanmak, perdeleri levha, bağ kirişlerini ise kiriş eleman olarak modellemek yerine her iki sistemi levha eleman olarak dikkate almak problemin en kolay çözümü olacaktır. Boşluklu perdelerin hesabında sonlu elemanlar yönteminin uygulanmaya başlanması 1960'lı yıllara rastlamaktadır. Ancak yöntem uygulanırken hesap süresi uzamakta ve değerlendirme aşaması oldukça zahmetli olmaktadır. Tasarımda, halen çubuk sistemler geniş oranda kullanılmaktadır. Bu nedenle eşdeğer çerçeve yöntemi pratik değerini korumaktadır.

1.2 Önceki Çalışmalar

Boşluklu perdeli sistemlerin hesabı ile ilgili çalışmalar , 1945'li yıllardan itibaren başlamış ve günümüze kadar gelmiştir. Konu ile ilgili birçok teorik çalışmalar mevcut olmasına rağmen projecilik alanında çalışan mühendislerin kolaylıkla kullanabileceği pratik bir yöntem tam olarak geliştirilememiştir.

Coull ve Irvin (1969) yaptıkları çalışmada, boşluklu perdelerde gerilme ve deformasyonları hesaplayabilmek için bir grafik metod geliştirmişlerdir.

Girijavallbhan (1969), tamamen iki-boyutlu düzlem gerilme elemanı, MacLeod (1969), iki- boyutlu düzlem gerilme elemanları yanında bağ elemanı için bir-boyutlu kiriş eleman, Al-Mahaidi ve Nilson (1975), yine bağ elemanı için bir-boyutlu kiriş eleman modeli kullanmışlardır. Bu tarihten sonra yapılan çalışmaların çoğunda perde elemanlar iki-boyutlu düzlem-gerilme, bağ elemanları ise bir-boyutlu kiriş eleman yardımı ile modellenerek elastik çözüme gidilmiştir.

Joseph Schwaighofer ve Helmut F. Microys (1969), boşluklu perdeli sistemlerin elastik analizini, eşdeğer çerçeve yaklaşımı ile gerçekleştiren bir dizi sayısal çalışma yapmışlardır. Elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara yakın ve mühendislik açısından kabul edilebilir yaklaşıklıkta olduğunu savunmuşlardır.

Paulay (1970), boşluklu perde sistemlerin elasto-plastik analizi ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Söz konusu çalışmada ilk olarak Chitty (1947) tarafından ortaya atılan ve daha sonra Beck (1956) ve Rosman (1960) tarafından geliştirilen bir yöntem üzerinde durulmuştur. Çalışmada perdeleri birbirine katlar hizasında bağlayan bağ elemanları, eşdeğer rijitliğe sahip kiriş eleman olarak dikkate alınmıştır.

Subedi (1991), betonarme bağ kirişlerinin yapısal davranışını tanımlayarak, çatlakların da etkisini dikkate alan bir matematik model kullanmıştır. Bağ kirişlerinin taşıma gücü ile ilgili bu metodun, Paulay'ın (1971) deneysel sonuçları ile uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir.

Riadh S. Al-Mahaidi (1975), yine boşluklu perdelerin analizi ile ilgili çalışmıştır. Çalışmada, perdeler iki boyutlu düzlem gerilme elemanı olarak, bağ kirişleri ise bir boyutlu kiriş elemanı olarak dikkate alınmıştır.

John Bolander Jr. (1991), boşluklu perdeli sistemlerin sonlu eleman yöntemi ile çözümü için geliştirdiği teknikte, yine perdeler iki boyutlu düzlem gerilme elemanı olarak, bağ kirişleri ise bir-boyutlu kiriş elemanı olarak modellenmiştir ve çeşitli mevcut yapı sistemleri için yöntem uygulanmış, modelin uygunluğu kanıtlanmaya çalışılmıştır.

Çakıroğlu ve Çetmeli (1965), doğrusal-elastik malzemeden yapılmış boşluklu perdeli sistemleri, simetrik bir çerçeve olarak dikkate almışlardır. Ayrıca bağ elemanlarının perde duvar içerisindeki kısımlarını sonsuz katı kabul etmişlerdir.

Pala ve Özmen (1995), boşluklu perde bağ kirişlerinde efektif rijitliklerin hesabı ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada bağ kirişlerinin perde içinde kalan sonsuz rijit parçaların başlangıç noktası ile boşluk kenarı arasında kalan yumuşama bölgesini veren bir fonksiyon geliştirmişlerdir.

Park ve Klingner (1997) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, düzlem gerilme durumuna maruz betonarme yapı elemanlarının plastisite teorisi ile hesabını içeren bir malzeme

modeli önerilmiş ve incelemelerin sonuçları Drucker-Prager güç tükenmesi kriteri ile karşılaştırılmıştır.

Lefas ve Kotsovos (1990), betonarme perdelerin doğrusal olmayan davranışlarını sonlu elemanlar yöntemi ile inceleyerek, donatı konumları, eksenel yük ve betonun dayanımı gibi parametrelerin sonuca olan etkilerini araştırmışlardır.

Khatri ve Anderson (1995), betonarme perdelerin düzlem gerilme durumundaki davranışlarını sonlu eleman yöntemi ile incelemişlerdir. Çalışmalarında betonun doğrusal olmayan davranışını tarifleyecek bir malzeme modeli de öne sürülmüştür.

Karakoç ve Köksal (1992), betonun doğrusal olmayan malzeme modeli ve çatlak oluşumu için ileri sürülen bünye denklemlerini kullanarak sonlu eleman yöntemi ile ilgili bir dizi çalışma yapmışlardır.

Çakıroğlu ve Balıoğlu (1999), perde bağ kirişlerinin plastik şekil değiştirmeleri ile ilgili çalışmalarında, gerçek davranışı belirleyebilmek için sistemi, malzeme bakımından doğrusal olmayan teoriye göre çözümlemek yerine plastik mafsal hipotezine dayanan yaklaşık yöntemler kullanmışlardır.

1.3 Çalışmanın Amacı

Perdeli sistemlerde, perdeleri veya çekirdekleri birbirine bağlayan bağ elemanlarının yatay yer değiştirmeleri azalttığı buna karşın sünekliği artırdığı bir gerçektir. Bu tür sistemlerde yatay yükler etkisinde en çok zorlanan kesimler bağ elemanları ile perdelerin birleştiği mesnet kesimleridir. Sistemin elastik teoriye göre hesaplanması durumunda bu kesimlerde oldukça büyük (gerçekle uyuşmayan) eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri tahmin edilmektedir.

Sistemin plastik teoriye göre çözümlenmesi dolayısı ile bağ elemanlarında meydana gelmesi muhtemel plastik şekil değiştirmelerin dikkate alınması durumunda ancak söz konusu kesimlerdeki iç kuvvetleri gerçeğe yakın tahmin etmek mümkün olabilir.

Gerçek davranışı belirleyebilmek için plastik malzeme modelleri dikkate alınarak sistemin **plastisite teorisine** göre çözümlenmesi gerekecektir. Ancak birçok çalışmacı (Çakıroğlu ve Balıoğlu, 1999), bunun yerine daha pratik olması açısından plastik mafsal hipotezine dayanan yaklaşık yöntemler kullanmışlardır. Bu yöntemlerin ilkinde, bağ elemanı eğilme rijitlikleri bir miktar küçültülerek, plastik şekil değiştirmeler nedeniyle iç kuvvetlerin azalmasının dolaylı olarak sağlanması, ikincisinde ise bağ elemanlarına fiktif rijitlikler ve yüklemeler tanımlanarak, bağ elemanlarının mesnet kesimlerinde istenilen büyüklükte (betonarme olarak gerçekleştirilebilir) iç kuvvetlerin meydana gelmesinin sağlanması hedeflenmiştir.

Bu çalışmada, boşluklu perdelerin davranışlarını (elastik-plastik) ifade etmek üzere farklı geometriye sahip çok sayıda sonlu eleman modelleri hazırlanmış; perdeler iki boyutlu düzlem gerilme elemanı (levha elemanı) ile, bağ elemanları ise yükseklik/açıklık oranına bağlı olarak iki boyutlu düzlem gerilme elemanı ve/veya kiriş olarak; Bölüm 3’de elastik, Bölüm 5’de ise plastik malzeme modelleri ile bir seri sayısal çözümler üretilerek değerlendirilmiştir.

Bağ elemanlarının rijitliği, rijitliğe etkisi olan başlıca geometrik ve malzeme büyüklükleri, doğrusal-elastik ve plastik ortamda dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu amaçla, sonlu eleman modelleri ile elde edilen çok sayıda sistematik çözümler **SPSS** paket programının verileri olarak alınmak suretiyle tüm geometrik ve mekanik parametreleri içeren regresyon bağıntıları araştırılmış ve bunların hassasiyetleri sınanmıştır.

2 PERDE SİSTEMLER

Kat sayısı arttıkça yatay yer deşiştirmelerin de buna bağlı olarak artması, yüksek yapılar da gerekli yatay rijitliği sağlayacak eleman kullanımını gerektirir. Bu bağlamda perdeler, çerçeve sistemlerin yatay yüklere karşı rijitliklerini gerekli değerlere çekebilmek açısından, yapı tasarımı da oldukça sık kullanılan eleman olma özelliğini taşımaktadırlar.

Çok katlı yapı tasarımının temel elemanlarından olan perdeler, gerek mimari gerekse statik açıdan tercih edilmektedir. Bilindiği gibi depreme dayanıklı yapı tasarımı da taşıyıcı sistemin göçmeyecek şekilde ayakta kalması temel koşuldur. Bu da, sistemde önemli ölçüde enerji yutulması gerekliliğini beraber getirir. Betonarme perde ve elik çerçevelerden oluşan sistemler, uygun biçimde tasarlandıklarında, diğer sistemlere oranla çok daha fazla enerji yutabilirler; bir başka deyimle yeterince sünek davranabilirler. Son zamanlarda yapılan teorik ve deneysel çalışmalar, bunun için **kuvvetli kolon-zayıf kiriş** prensibinin sağlanması da çoğunlukla yeterli olduğunu göstermektedir.

Perdeli sistemlerde, sünekleğin büyük bir kısmının, perdeleri birleştiren ve katlar hizasında teşkil edilen bağ elemanları ile sağlandığı söylenebilir; bağ kirişlerinin önemi biraz da bu nedenle yüksektir.

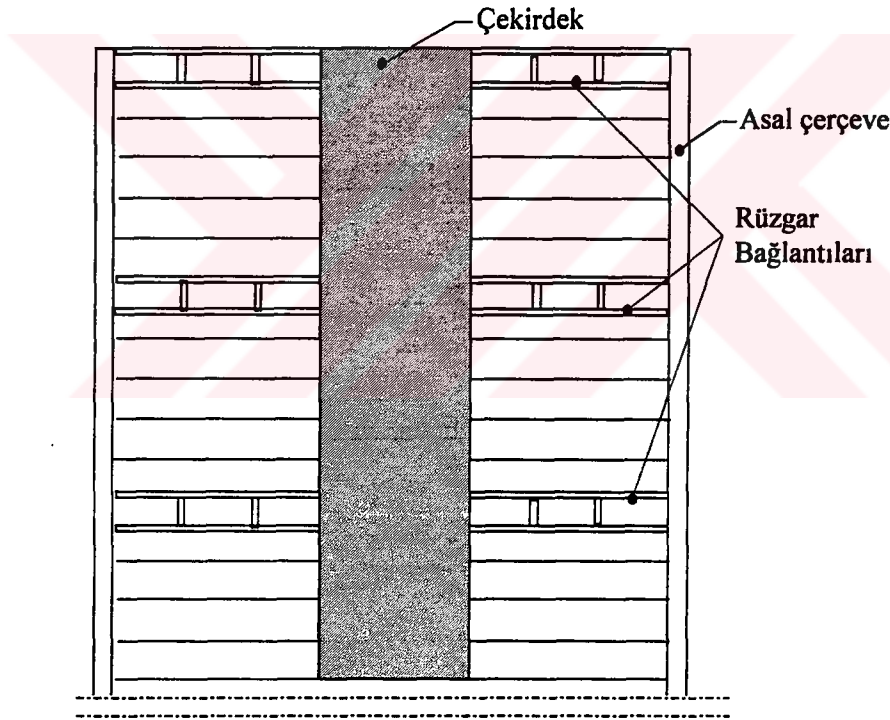
2.1 Perdeli-Çerçevesel Sistemler

Günümüzde yapı tasarımı da perdeli-erevesel ya da perdeli sistemler sıklıkla kullanılmaktadır (şekil 2.1). Perdeli-erevesel sistemlerde gerekli ve yeterli olan rijitlik perde tarafından sağlanmaktadır. Söz konusu elemanların aşırı zorlanması durumunda ise sünek erevesel devreye girerek yeterli dayanımı sağlarlar.

Perdeli-erevesel sistemlerin en büyük avantajlarından biri perdelerin, eğilme ereveselerinin rijitlik zaafını karşılamalarıdır. Bunun anlamı, kuvvetli kolon-zayıf kiriş şeklinde tasarlanması öngörülen ereve sistemlerde kolon mekanizması ile kat ve/veya

toplam göçmesinin, perdeler tarafından önlenmesidir. Bu, kolon ve kiriş boyutlarının seçiminde daha fazla serbestlik verebileceği gibi, yatay kuvvetler (Deprem, rüzgar gibi) etkisinde meydana gelebilecek, kat döşemelerinin çerçeve kirişleri üzerindeki burulma etkilerini de azaltabilecektir.

Genelde perdeli-çerçevesi sistemlerin kullanımı, orta veya yüksek sayılabilecek yapılar da, bir merkezî çekirdek oluşturulması ve asal çerçevelerin bu çekirdeğe bağlanması şeklinde olmuştur. Kat sayısının 50 yi aşması durumunda, rüzgar etkisini azaltacak, ana çekirdek ve asal çerçeve arasında teşkil edilen bağlantıların, rijitliği artıracak şekilde düzenlenmesi önerilmektedir.



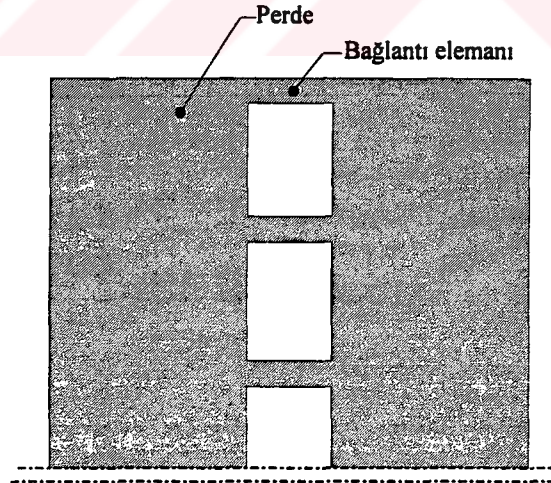
Şekil 2.1 Perdeli-çerçevesi sistem (düşey)

2.2 Boşluklu Perdeler

Perdeli sistemlerde, kapı, pencere boşlukları bırakılması nedeniyle perde elemanlarda düşeyde bir süreksizlik meydana gelecektir. Perdeli sistemlerin özel bir hali olarak düşünülebilecek bu tür sistemlere boşluklu perdeler denilmektedir (Şekil 2.2).

Bu durumda boşluklu perdeleri; iki perde duvarın, bağ elemanı diye adlandırılabilen kısa kirişlerle birbirlerine bağlandığı perde sistemler olarak tanımlamak mümkündür. Bu bağ elemanları; kimi kez döşeme plağının bu kısmı, kimi kez çubuk davranışında kirişler, kimi kez de çubuk davranışına uymayan perde parçalarıdır (levha).

Genelde söz konusu bağ elemanlarının boyutları, gerek mimari zorunluluklar gerekse çözüm kolaylığı açısından tüm katlarda sabit olacak şekilde düzenlenir. Ancak bu durumda boşluklu perdelerin bağ elemanları bazı bölgelerde (perdeye saplandığı kesimler) yetersiz kalabilir. Yeterli olup olmayacağına karar vermek bakımından, bağ elemanlarının plastik davranışlarının da bilinmesi gerekir.



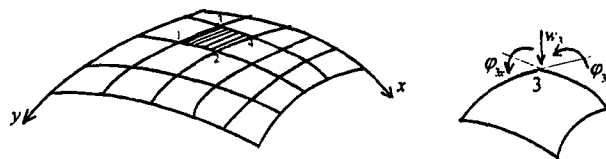
Şekil 2.2 Boşluklu perdeli sistem

3 BOŞLUKLU PERDELERİN ELASTİK ANALİZİ

Boşluklu perdeler, rüzgar ve/veya deprem gibi dış etkilere kaynaklanan yatay yükleri güvenle taşımaları açısından çok katlı yapıların tasarımında sıklıkla kullanılan yapısal elemanlardır. Boşluklu perdeler, kat hizalarında birbirine döşeme bağları ile bağlanmış perdeler olarak dikkate alınabilir; bu bağ elemanları kimi kez döşeme plağının bu kısmı, kimi kez çubuk davranışında kirişler, kimi kez de çubuk davranışına uymayan perde parçalarıdır. Bu tür sistemlerin tasarımında, çoğu kez, bağ elemanlarının plastik şekil değiştirmelerine izin verilir; bu yaklaşım, boşluklu perdelerin sünekliğini ve enerji yutma kapasitesini artırarak, yapının iç kuvvetlerini küçültür. Bu bağlamda, boşluklu perdeler, yatay yüklere karşı yeterli dayanım ve rijitlik sağlamakta üstün performanslı yapı elemanlarıdır.

Günümüzde boşluklu perdeleri, sistem serbestlik derecesine herhangi bir kısıtlama getirilmeden sonlu eleman yöntemleri ile yeterli doğrulukla hesaba katmak mümkündür. Ne varki, bu tür modellerle çalışmak hem hesap süresini uzatır, hem de hesap sonuçlarının değerlendirilmesini zahmetli kılar; kimi kez de serbestlik derecelerinin yüksekliği problemin matematik çözüm stabilitesini düşürür. Bu yüzden eşdeğer çerçeve sistemlerin kullanılmasının, bugün için oldukça pratik olduğu gibi, daha bir süre yapı tasarımında süreceği gözükmemektedir.

Sonlu elemanlar yönteminde bilindiği üzere, sürekli veya süreksiz bir ortam, fiktif sınırlarla sonlu sayıda elemana bölünür. Elemanın şekli, söz konusu ortamın şekline, sınır şartlarına bağlı olarak seçilir. Bu sonlu elemanların birbirleriyle bağlantısının, düğüm noktalarında olduğu varsayılır. Bilinmeyen olarak, düğüm noktalarının ötelemeleri ve eğimleri veya iç kuvvetler seçilebilir (Şekil 3.1).



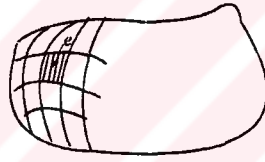
Şekil 3.1 Eleman ve düğüm noktası bilinmeyenleri

örnekte,

$$\underline{u}^e = \begin{Bmatrix} w \\ \partial w / \partial x \\ \partial w / \partial y \end{Bmatrix} \quad \text{veya} \quad \underline{u}^e = \begin{Bmatrix} w \\ \partial w / \partial x \\ \partial w / \partial y \\ \partial^2 w / \partial x^2 \\ \partial^2 w / \partial y^2 \\ \partial^2 w / \partial y \partial x \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

olarak alınabilir.

Burada $\underline{u}^e$, elemana ait deplasman fonksiyonunu veya daha genel bir tanımlamayla elemana ait alan büyüklüklerini ifade etmektedir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2

Önce her eleman için $\underline{u}^e$ alan büyüklükleri (yer değiştirme fonksiyonları) seçilir:

$$\underline{u}^e = \underline{N} \cdot \underline{r} \quad (3.2)$$

burada $\underline{N}$, şekil fonksiyonları matrisini, $\underline{r}$ ise eleman düğüm noktası yer değiştirmeleri vektörünü göstermektedir. Söz konusu alan büyüklüklerinden hareketle eleman içi şekil değiştirmeleri (Demir, 1998),

$$\underline{\varepsilon} = \underline{B} \cdot \underline{r} \quad (3.3)$$

şeklinde elde edilebilir (gerekli türev bağıntıları kullanılarak). Burada $\underline{B}$ şekil değiştirme matrisidir. Diğer taraftan doğrusal-elastik malzemeler için eleman içi gerilme-şekil değiştirme bağıntısı(elastisite bağıntısı),

$$\underline{\sigma} = \underline{C} \cdot \underline{\varepsilon} \quad (3.4)$$

veya

$$\underline{\sigma} = \underline{C} \cdot \underline{B} \cdot \underline{r} \quad (3.5)$$

şeklindedir; $\underline{C}$ malzeme matrisi olarak tanımlanmaktadır.

Elemanın düğüm noktalarına etkidiği kabul edilen dış kuvvetlerin potansiyel enerjisi, $\underline{f}$ dış yük vektörü olmak üzere,

$$V = -\underline{r}^T \cdot \underline{f} \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Şekil değiştirme enerjisi ise bilindiği gibi,

$$U = \frac{1}{2} \int (\underline{\varepsilon}^T \cdot \underline{\sigma}) dv = \frac{1}{2} \cdot \underline{r}^T \cdot \left\{ \int (\underline{B}^T \cdot \underline{C} \cdot \underline{B}) dv \right\} \cdot \underline{r} \quad (3.7)$$

olacaktır. Toplam potansiyel enerji ise,

$$\Pi = U + V = \frac{1}{2} \cdot \underline{r}^T \cdot \left\{ \int (\underline{B}^T \cdot \underline{C} \cdot \underline{B}) dv \right\} \cdot \underline{r} - \underline{r}^T \cdot \underline{f} \quad (3.8)$$

dir. Burada toplam potansiyel enerjinin stasyoner değer prensibi uygulanırsa; elastik bir sistemde geometrik uygunluk şartlarını ve geometrik sınır şartlarını sağlayan bütün konumlar arasında sadece denge konumu için potansiyel enerji bir stasyoner (kararlı denge) değere sahiptir:

$$\frac{\delta \Pi}{\delta \underline{r}} = 0 \quad (3.9)$$

Ara işlemler yapılır, ifade düzenlenirse:

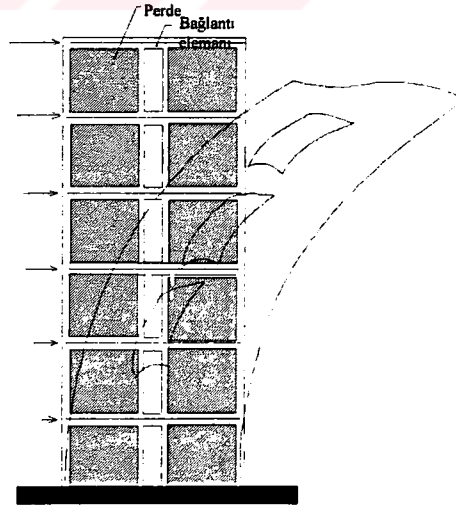
$$\left\{ (\underline{B}^T \cdot \underline{C} \cdot \underline{B}) dv \right\} \cdot \underline{r} = \underline{f} \quad \text{veya} \quad \underline{k}^e \cdot \underline{r} = \underline{f} \quad (3.10)$$

elde edilir. Bu ifadede $\underline{k}^e$ elemana ait rijitlik matrisidir. (3.10) bağıntısı, global sistemde,

$$\underline{K} \cdot \underline{r} = \underline{F} \quad (3.11)$$

şeklindedir. Burada $\underline{K}$, yapı sisteminin toplam rijitlik matrisi, $\underline{F}$ ise global sistemdeki (toplam sistem) yük vektörüdür. Rijitlik bağıntısı olarak da tanımlanabilecek (3.11) bağıntısı, kinematik sınır şartları uygulanarak çözülür ve deplasmanlar elde edilir. Buradan (3.3) ve (3.4) bağıntıları yardımıyla herhangi bir elemandaki gerilme ve şekil değiştirmeler hesaplanabilecektir.

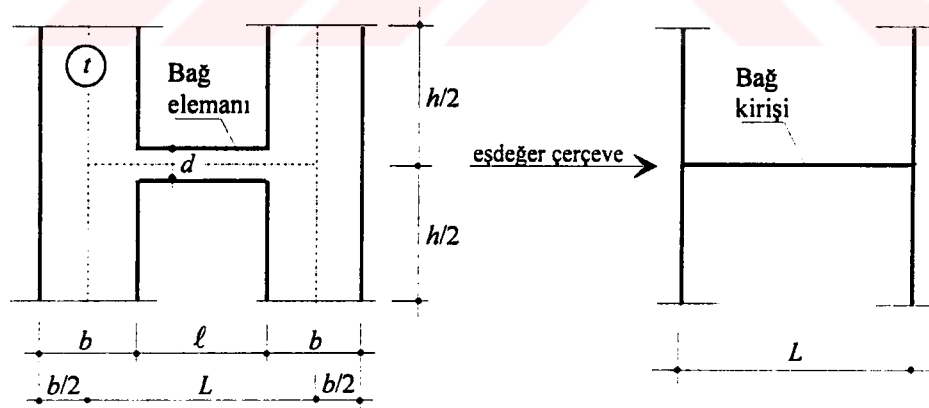
3.1 Boşluklu Perde Bağ Elemanlarının Hesabı



Şekil 3.3 Yatay yükler etkisindeki tipik bir boşluklu perde

Betonarme boşluklu perdelerin yapısal davranışları, bağ elemanlarının davranışlarından oldukça etkilenmektedir. Bağ elemanlarının davranışı ise elemanın geometrisine ve malzeme karakteristiklerine sıkı sıkıya bağlıdır. Tipik bir boşluklu perde ve bağ elemanları Şekil 3.3’de görülmektedir. Yatay yükler perde duvarlarda eğilme ve eksenel kuvvet, bağ elemanlarında ise eğilme ve büyük ölçüde kayma gerilmeleri meydana getirecektir. Geometrik olarak bağ elemanlarının genelde açıklığı küçük ve yükseklikleri fazla olmaktadır. Dolayısı ile yapısal davranış açısından söz konusu boyutlar çubuk tanımları dışına taşar.

Perdeli-çerçevesi sistemlerin eşdeğer çerçeve olarak modellenmesinde en önemli husus, yukarıda da belirtildiği gibi, bağ elemanlarının çubuk olarak eşdeğerinin yeterli doğrulukla tahmin edilebilmesidir. Bağ elemanının çubuk eşdeğerinin tahminindeki parametre sayısı oldukça yüksektir; genel bir yaklaşımda d , b , h , ℓ , L , t geometrik büyüklüklerinin (Şekil 3.4) yanında malzeme davranış parametrelerinin de dikkate alınması gerekir. Malzemenin doğrusal-elastik davranış sınırları içinde yapılacak yapısal çözümlemelerde E , G , μ (elastisite modülü, kayma modülü ve Poisson oranı) malzeme parametreleri olarak yeterlidir.



Şekil 3.4 Boşluklu perde ve eşdeğer çerçeve

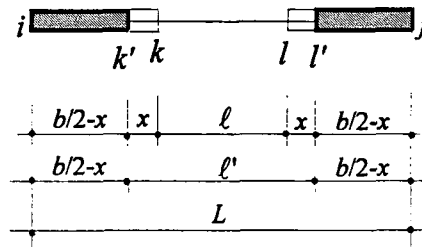
Bu çalışmada, sonlu eleman çözümleri ile elde edilmiş çok sayıda çözüm sonuçları, SPSS (Ver.5.0) paket programı kullanılarak, çok değişkenli regresyon yaklaşımıyla

değerlendirilmiştir. Doğrusal-elastik malzeme için elde edilen korelasyon oldukça yüksek gözükmemektedir.

Bu tip yapıların deprem hesabında, elastik ötesi davranış oldukça önem kazanmaktadır. Teorik çalışmalar, boşluklu perdelerin son limit dayanımlarının artabilmesi için bağ elemanlarının önemli ölçüde plastik deformasyon yapmaları gerektiğini göstermektedir (Paulay, 1971). Plastik davranış 4.Bölüm’de ayrıntılı olarak incelenecektir.

3.2 Bağ Elemanlarının Eşdeğer Birim Dönme Momentlerinin Hesabı İçin Bir Yaklaşım

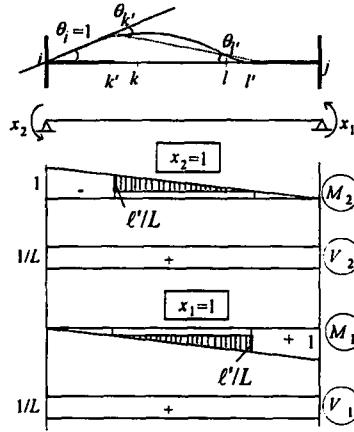
Eşdeğer çerçeve yaklaşımında bağ elemanlarının perde içinde kalan bölgelerinin belirli bir kısmının sonsuz rijitmiş gibi kabul edilerek hesabı (Şekil 3.5), öteden beri sık başvurulmuş bir yaklaşımdır (Pala ve Özmen, 1995; Çakıroğlu, 1978). Bu durumda sonsuz rijit kısımları bulunan doğru eksenli çubukların birim dönme momentlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu bölümde birim dönme momentleri, kayma şekil değiştirmeleri de dikkate alınarak hesaplanmış ve sade ifadelerle dönüştürülmüştür.



Şekil 3.5 Eşdeğer çubuk modeli

a) $\theta_i = 1$, $\theta_j = 0$ durumu (Şekil 3.6):

Bu durumda meydana gelecek $\overline{m}'_{i\theta i}$ birim dönme momenti, Şekil 3.6'daki yaklaşımla Kuvvet Yöntemi kullanılarak hesaplanabilir:



Şekil 3.6

Sistem birim yükleme sabitleri,

$$\delta_{11} = \frac{1}{3} \ell' \left(\frac{\ell'}{L} \right)^2 \frac{1}{EI} + \ell' \left(\frac{1}{L} \right)^2 \frac{1}{GA'} = \delta_{22} \quad (3.12)$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = -\frac{1}{6} \ell' \left(\frac{\ell'}{L} \right)^2 \frac{1}{EI} + \ell' \left(\frac{1}{L} \right)^2 \frac{1}{GA'} \quad (3.13)$$

yük terimleri,

$$\delta_{10}^w = 0, \delta_{20}^w = -1 \quad (3.14)$$

olacaktır. Süreklilik denklemleri olan,

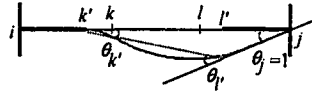
$$\begin{aligned} x_1 \delta_{11} + x_2 \delta_{12} &= -\delta_{10}^w \\ x_1 \delta_{21} + x_2 \delta_{22} &= -\delta_{20}^w \end{aligned} \quad (3.15)$$

lerin çözümü ile,

$$\bar{m}'_{i\theta_i} = x_2 = \frac{4EI}{\ell} \left(\frac{L}{\ell'} \right)^2 \frac{(3.077\ell'^2 + 3d^2)}{(3.077\ell'^2 + 12d^2)} \quad (3.16)$$

şeklinde elde edilir.

b) $\theta_j = 1$, $\theta_i = 0$ durumu (Şekil 3.7):



Şekil 3.7

Aynı yaklaşımla birim dönme momenti,

$$\bar{m}'_{i\theta_j} = \frac{2EI}{\ell} \left(\frac{L}{\ell'} \right)^2 \frac{(3.077\ell'^2 - 6d^2)}{(3.077\ell'^2 + 12d^2)} \quad (3.17)$$

olarak bulunur.

Bu ifadelerde malzeme büyüklükleri, $I = td^3 / 12$, $A' = td / 1.5$, $G = E / 2(1 + \mu) \cong E / 2.6$,

$\mu = 0.30$ alınmak suretiyle, $GA' = \frac{3.077}{d^2} EI$ kısaltması yapılmıştır (Çakıroğlu, 1978).

c) $\theta_i = 1$, $\theta_j = 1$ durumu :

$\theta_i = \theta_j = 1$ durumunda ise $m'_{i\theta_i}$, (3.16) ve (3.17) ifadelerinin toplamı olacaktır:

$$m'_{i\theta_i} = \bar{m}'_{i\theta_i} + \bar{m}'_{i\theta_j} = \frac{6EI}{\ell'} \left(\frac{L}{\ell'} \right)^2 \frac{\ell'^2}{(\ell'^2 + 3.9d^2)} \quad (3.18)$$

Bu çalışmada bağ elemanının eşdeğer birim dönme momenti anılan tüm parametrelerin bir fonksiyonu olarak, $\eta^e = \eta^e(d, b, h, \ell, L, I, E, G, \mu)$ şeklinde istatistik yaklaşımla tesbit edilecek çarpan olmak üzere, L açıklıklı, kesiti L boyunca sabit fiktif çubuğun birim dönme momentinin (η^e) katı olarak tanımlanmıştır:

$$m'_{i\theta_i} = \eta^e m_{i\theta_i} = \eta^e \frac{6EI}{L} \frac{L^2}{(L^2 + 3.9d^2)} \quad (3.19)$$

(3.18) ve (3.19) ifadelerinin eşitliğinden, bilinen x değerleri için,

$$\eta^e = \frac{m'_{i\theta_i}}{m_{i\theta_i}} = \frac{L^3 + 3.9d^2L}{8x^3 + 12\ell x^2 + (6\ell^2 + 7.8d^2)x + \ell^3 + 3.9d^2\ell} \quad (3.20)$$

olacaktır.

Diğer taraftan, η^e - eşdeğerlik çarpanı, kat yüksekliği h , kiriş yüksekliği d , kiriş serbest açıklığı ℓ , perde genişliği b ve a_0, a_1, a_2, a_3 gibi sabit katsayılara bağlı bir kuvvet fonksiyonu olarak,

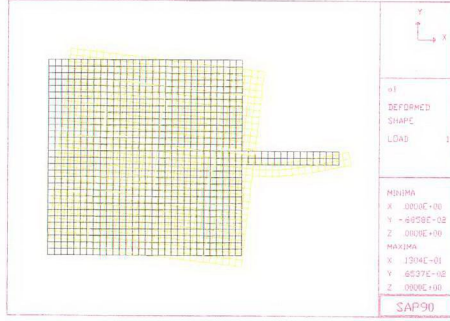
$$\eta^e = a_0 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{a_1} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{a_2} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{a_3} \quad (3.21)$$

şeklinde ifade edilmiştir.

Dikkate alınan boşluklu perdeye (Şekil 3.4) ait tüm geometrik özellikleri içeren η^e ler aşağıdaki yaklaşım çerçevesinde belirlenmiştir;

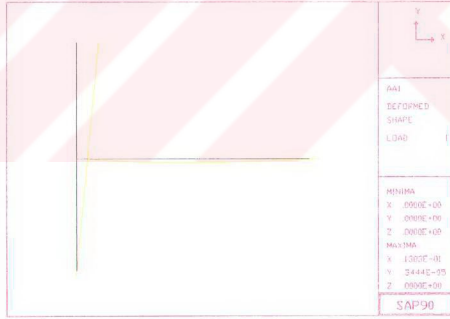
α) Söz konusu sistem sonlu eleman yöntemi ile $h = 3 \text{ m}$, $L = 6 \text{ m}$, $b = 3.0, 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 4.0, 4.2, 4.4, 4.6 \text{ (m)}$, $d = 0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00, 1.20 \text{ (m)}$ değerleri dikkate alınıp modellenerek çözümü antimetrik sınır şartları gözetilerek yarım sistem için yapılmış ve

deformasyon durumu belirlenmiştir (Şekil 3.8); antimetri noktasının yatay deplasmanı, δ , referans deplasman olarak alınmıştır.



Şekil 3.8

β) Yukarıda belirtilen geometrik büyüklükler ve sınır şartları dikkate alınarak, bu defa çerçeve şeklinde idealize edilen aynı sistem için deformasyon durumu belirlenmiştir (Şekil 3.9); referans noktasının yatay deplasmanı, $\bar{\delta}$, belirlenmiştir.



Şekil 3.9

Eşdeğer çerçeve kirişinin rijitliği $\delta = \bar{\delta}_r$ (r , bu yaklaşımda iterasyon sayısıdır) kinematik şartı sağlanuncaya kadar değiştirilmiştir. İterasyon sayısını düşürmek için, eşdeğer çerçeve kirişinin rijitliğinin başlangıç değeri $\bar{\delta} / \delta$ kere büyütülerek alınmıştır. (3.21) bağıntısındaki sabitler, Çizelge 3.1'in üçüncü sütununda verilen ve (d / ℓ) nin muhtemel

tüm değişim aralığında sonlu eleman çözümleri ile üretilmiş sonuçların, SPSS paket programının verileri olarak kullanılmak suretiyle hesaplanmıştır.

η^e - eşdeğerlik çarpanının bağlı olduğu değişkenler x - o - y düzleminde noktalandığında, değişkenler arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığı gözle farkedilecek ölçüde belirgindir. Bu durumda doğru yerine en uygun eğriyi geçirmek gerekecektir. Söz konusu eğrinin matematiksel ifadesi çarpım şeklinde olabileceği gibi üstel veya toplam şeklinde de düşünülebilir.

Çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon analizi uygulanırken (Chatfield, 1994; Hoel, 1984), en pratik yol, ifadeyi doğrusal hale getirmek ve daha sonra doğrusal regresyon analizini uygulamaktır. SPSS (Ver.5.0) paket programında da bu yol izlenmektedir. Bu regresyon yaklaşımında, (3.21) bağıntısında eşitliğin her iki tarafının “ e ” tabanına göre logaritması alınırsa;

$$\ln \eta = \ln a_o + a_1 \ln\left(\frac{h}{\ell}\right) + a_2 \ln\left(\frac{b}{\ell}\right) + a_3 \ln\left(\frac{d}{\ell}\right) \quad (3.22)$$

veya

$$Y = a_o + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 \quad (3.23)$$

bulunur. Gerçekleştirilen n adet sonlu eleman çözümünden elde edilen (gözlenen) Y_n ve Y_n lere karşı gelen X_{1n} , X_{2n} , X_{3n} değerleri hesaplanabilir. Gözlenen Y_n lerden (3.23) bağıntısı ile hesaplanabilecek beklenen değerlerin farkının karelerinin toplamı olarak tanımlanabilecek ifadenin;

$$Z = \sum_{i=1}^n (Y_i - a_o - a_1 X_{1i} - a_2 X_{2i} - a_3 X_{3i})^2 \quad (3.24)$$

minimum olma şartı arandığında, ayrı ayrı $\frac{\partial Z}{\partial a_0} = 0, \frac{\partial Z}{\partial a_1} = 0, \frac{\partial Z}{\partial a_2} = 0, \frac{\partial Z}{\partial a_3} = 0$ şartlarının sağlanması gerekir. Bu durumda bilinmeyen a_0, a_1, a_2, a_3 katsayıları için aşağıdaki cebirsel denklem takımı elde edilir:

$$\begin{aligned} a_0 n + a_1 \sum X_{1i} + a_2 \sum X_{2i} + a_3 \sum X_{3i} &= \sum Y_i \\ a_0 \sum X_{1i} + a_1 \sum X_{1i}^2 + a_2 \sum X_{2i} X_{1i} + a_3 \sum X_{3i} X_{1i} &= \sum Y_i X_{1i} \\ a_0 \sum X_{2i} + a_1 \sum X_{1i} X_{2i} + a_2 \sum X_{2i}^2 + a_3 \sum X_{3i} X_{2i} &= \sum Y_i X_{2i} \\ a_0 \sum X_{3i} + a_1 \sum X_{1i} X_{3i} + a_2 \sum X_{2i} X_{3i} + a_3 \sum X_{3i}^2 &= \sum Y_i X_{3i} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Denklemlerin çözümünden bulunan katsayılarla, η^e

$$\eta^e = 1.9210 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{0.0282} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.6824} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.5860} \quad (3.26)$$

bulunmuştur. Bu ifadenin korelasyon katsayısı, anılan çizelgede verilen örnek veriler (sample data) için, $r = 0.95$ bulunmuştur. Görüldüğü üzere hassasiyeti oldukça yüksek görünmektedir. Ayrıca, verilen formülde, değeri 1.00 - 1.022 arasında değişen $(h / \ell)^{0.0282}$ çarpanı yaklaşık “1” (bir) alınabilir.

(3.26) ifadesi, pratik amaçla üsler yuvarlatılarak,

$$\eta^e = 1.9 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{0.03} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.70} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.60} \quad (3.27)$$

şeklinde alınabilir (Çizelge 3.1, sütun 8). η^e değerleri, sonlu elemanlar yaklaşımıyla elde edilen çok sayıda çözümün istatistiki değerlendirilmesiyle bulunan değerler olarak alınıp, (3.20) ifadesinde bilinen değerler olarak kabul edildiğinde, x değerleri bilinen η^e eşdeğerlik çarpanlarına bağlı olarak elde edilebilir. Çizelge 3.1’de, birinci, ikinci, dördüncü, beşinci, altıncı sütunlarda problemin parametreleri, üçüncü sütunda örnek

yapıların sonlu eleman hesabı (FE) ile bulunan η^e değerleri, yedinci ve sekizinci sütunlarda SPSS programı ile elde edilen η^e değerleri, dokuzuncu sütunda, üçüncü sütuna, bir başka söylemle bu çalışmadaki yaklaşıma karşı gelen x değerleri, ve nihayet onuncu sütunda, Pala ve Özmen'in (1995) yapmış oldukları çalışmada verilen yöntemle hesaplanan x değerleri verilmiştir. Yine Çizelge 3.1 onuncu sütunda bazı değerlerin verilmemesinin sebebi, söz konusu kaynakta önerilen exponansiyel fonksiyonun, d/ℓ oranının 0.15 ile 0.50 arasında kalması durumunda geçerliliğini korumasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 3.1 - Ara kat bağlantılarının birim dönme momentlerinin hesabı ile ilgili büyüklükler (Şekil 3.4)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
d (m)	b (m)	η_{FE}^e	$\frac{h}{\ell}$	$\frac{b}{\ell}$	$\frac{d}{\ell}$	η^e (3.26) Bağıntısı	η^e (3.27) Bağıntısı	x (m) (3.20) Bağıntısı	x (m) Kaynak(•)
0.20	3.00	7.1773	1	1	0.0667	9.3884	9.6445	0.0492	-(••)
	3.20	8.7477	1.0714	1.1429	0.0714	11.3161	11.6425	0.0492	-
	3.40	10.81	1.1538	1.3077	0.0769	13.6188	14.0322	0.0492	-
	3.60	13.57	1.25	1.5	0.0833	16.4066	16.9289	0.0493	-
	3.80	17.35	1.3636	1.7273	0.0909	19.8132	20.4730	0.0493	-
	4.00	22.6633	1.5	2	0.1	24.0406	24.8764	0.0493	-
	4.20	30.3667	1.1667	2.3333	0.1111	29.0871	30.1220	0.0495	-
	4.40	41.9767	1.875	2.75	0.125	36.2719	37.6412	0.0500	-
	4.60	60.1833	2.1429	3.2857	0.1429	45.4138	47.1989	0.0500	-
0.40	3.00	6.0683	1	1	0.1333	6.1954	6.3658	0.123	0.119
	3.20	7.29	1.0714	1.1429	0.1429	7.4573	7.6780	0.123	0.113
	3.40	8.861	1.1538	1.3077	0.1538	8.9742	9.2578	0.123	0.107
	3.60	10.907	1.25	1.5	0.1667	10.8031	11.1649	0.122	0.102
	3.80	13.6217	1.3636	1.7273	0.1818	13.0461	13.5071	0.122	0.097
	4.00	17.29	1.5	2	0.2	15.8250	16.4123	0.122	0.092

Çizelge 3.1 - Devamı

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
d (m)	b (m)	η_{FE}^e	$\frac{h}{\ell}$	$\frac{b}{\ell}$	$\frac{d}{\ell}$	η^e (3.26) Bağıntısı	η^e (3.27) Bağıntısı	x (m) (3.20) Bağıntısı	x (m) Kaynak
0.40	4.20	22.3567	1.1667	2.3333	0.2222	19.1495	19.8731	0.122	0.087
	4.40	29.51	1.875	2.75	0.25	23.8667	24.8339	0.123	0.083
	4.60	39.8833	2.1429	3.2857	0.2857	29.8852	31.1462	0.124	0.079
0.60	3.00	5.2483	1	1	0.2	4.9154	4.9904	0.182	0.330
	3.20	6.2117	1.0714	1.1429	0.2143	5.9183	6.0208	0.182	0.313
	3.40	7.4233	1.1538	1.3077	0.2308	7.1194	7.2567	0.183	0.297
	3.60	8.9567	1.25	1.5	0.25	8.5733	8.7549	0.183	0.282
	3.80	10.9267	1.3636	1.7273	0.2727	10.3523	10.5903	0.184	0.268
	4.00	13.4793	1.5	2	0.3	12.5574	12.8681	0.185	0.254
	4.20	16.8417	1.1667	2.3333	0.3333	15.1953	15.5816	0.187	0.241
	4.40	21.3167	1.875	2.75	0.375	18.9385	19.4711	0.189	0.229
	4.60	27.2667	2.1429	3.2857	0.4286	23.7127	24.4185	0.194	0.218
0.80	3.00	4.6417	1	1	0.2667	4.1712	4.1989	0.226	0.541
	3.20	5.415	1.0714	1.1429	0.2857	5.0229	5.0666	0.228	0.514
	3.40	6.3633	1.1538	1.3077	0.3077	6.0423	6.1067	0.230	0.487
	3.60	7.5333	1.25	1.5	0.3333	7.2762	7.3674	0.233	0.463
	3.80	8.9733	1.3636	1.7273	0.3636	8.7855	8.9114	0.236	0.439
	4.00	10.79	1.5	2	0.4	10.6569	10.8281	0.239	0.417
	4.20	13.0513	1.1667	2.3333	0.4444	12.8956	13.1114	0.244	0.396
	4.40	15.89	1.875	2.75	0.5	16.0723	16.3843	0.251	0.376
	4.60	19.4433	2.1429	3.2857	0.5714	20.1253	20.5488	0.261	-
1.00	3.00	4.2067	1	1	0.3333	3.6731	3.6733	0.255	0.751
	3.20	4.8317	1.0714	1.1429	0.3571	4.4228	4.4319	0.259	0.714
	3.40	5.581	1.1538	1.3077	0.3846	5.3203	5.3417	0.266	0.678
	3.60	6.48	1.25	1.5	0.4167	6.4059	6.4435	0.271	0.643

Çizelge 3.1 - Devamı

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
d (m)	b (m)	η_{FE}^e	$\frac{h}{\ell}$	$\frac{b}{\ell}$	$\frac{d}{\ell}$	η^e (3.26) Bağıntısı	η^e (3.27) Bağıntısı	x (m) (3.20) Bağıntısı	x (m) Kaynak
1.00	3.80	7.559	1.3636	1.7273	0.4545	7.7355	7.7947	0.278	0.610
	4.00	8.855	1.5	2	0.5	9.3832	9.4712	0.285	0.580
	4.20	10.4083	1.1667	2.3333	0.5555	11.3544	11.4684	0.296	-
	4.40	12.2567	1.875	2.75	0.625	14.1514	14.3312	0.308	-
	4.60	14.4367	2.1429	3.2857	0.7143	17.7193	17.9731	0.324	-
1.20	3.00	3.9	1	1	0.4	3.3101	3.2924	0.268	0.963
	3.20	4.41	1.0714	1.1429	0.4286	3.9855	3.9722	0.278	0.914
	3.40	5.0053	1.1538	1.3077	0.4615	4.7949	4.7883	0.288	0.868
	3.60	5.7	1.25	1.5	0.5	5.7735	5.7761	0.299	0.824
	3.80	6.5117	1.3636	1.7273	0.5455	6.9707	6.9862	0.312	-
	4.00	7.45	1.5	2	0.6	8.4564	8.4898	0.326	-
	4.20	8.528	1.1667	2.3333	0.6667	10.2320	10.2791	0.343	-
	4.40	9.7567	1.875	2.75	0.75	12.7536	12.8461	0.361	-
	4.60	11.13	2.1429	3.2857	0.8571	15.9697	16.1114	0.386	-

(.) Pala ve Özmen, 1995

(.) Çizelgede bu sütunda verilmeyen değerler, anılan sınırlamadan kaynaklanmaktadır

Gerçek $m'_{i\theta_i}$ -birim dönme momentinin, sonsuz rijit kısımlar dikkate alınarak hesaplanan fiktif çubuğun $m_{i\theta_i}$ -birim dönme momentine oranını ifade eden (3.20) bağıntısı kullanılarak hesaplanabilecek perde sonsuz rijit parçalarının başlangıç noktası ile boşluk kenarı arasında kalan x mesafesinin (yumuşama derinliği), boşluk oranının küçülmesi dolayısı ile bağ elemanının çubuk karakterinden uzaklaşması ($d/\ell > 1/4$) durumunda artması beklenir; nitekim, Çizelge 3.1 dokuzuncu sütundaki sayısal sonuçlar bu eğilimi doğrulamaktadır.

Verilen sonuçların (Çizelge 3.1, dokuzuncu sütun), Muto'nun (1974) önerdiği $d / 4$ (kiriş yüksekliğinin dörtte biri) değerine yakın oluşu ileri sürülen yaklaşıma bir anlam kazandırmaktadır.

Boşluklu perdelerin çerçeve olarak modellenmesinde bağ elemanlarının çubuk eşdeğerlerinin belirlenmesi için kullanılmak üzere, yapı davranışının bu noktalardaki tüm parametrelerini dikkate alarak yeterli hassasiyette yaklaşım ifadeleri bulmak mümkün görünmektedir. Bu çalışmada, yapı elemanlarının doğrusal-elastik davranışı varsayımı altında elde edilen η^e -eşdeğerlik çarpanının hassasiyeti yapı mühendisliği ihtiyaçları bakımından kapalı ifadeler derecesinde yüksektir; burada kapalı ifade tam teorik sonuç anlamında kullanılmıştır.

Yapılan geniş bantlı çözümler, (d / ℓ) nin değişim aralığı sınırlandırılırsa, hassasiyeti daha yüksek eşdeğerlik katsayılarının elde edilebileceğini göstermiştir. Dolayısı ile genel bir bağıntı olan (3.26) yerine korelasyon katsayısı $r = 0.99$ olan daha hassas bir bağıntı önermek mümkündür,

$$\eta^e = 2.6965 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{0.1118} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.8526} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.3591} \quad (3.28)$$

veya, pratik amaçla üsler yuvarlatılarak,

$$\eta^e = 2.7 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{0.112} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.85} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.36} \quad (3.29)$$

Söz konusu bağıntıların gerçek değerlere (η_{FE}^e) yakınlığı Çizelge 3.2'den izlenebilir.

Çizelge 3.2 - Ara kat bağlantılarının birim dönme momentlerinin hesabı ile ilgili büyüklükler (Şekil 3.4)

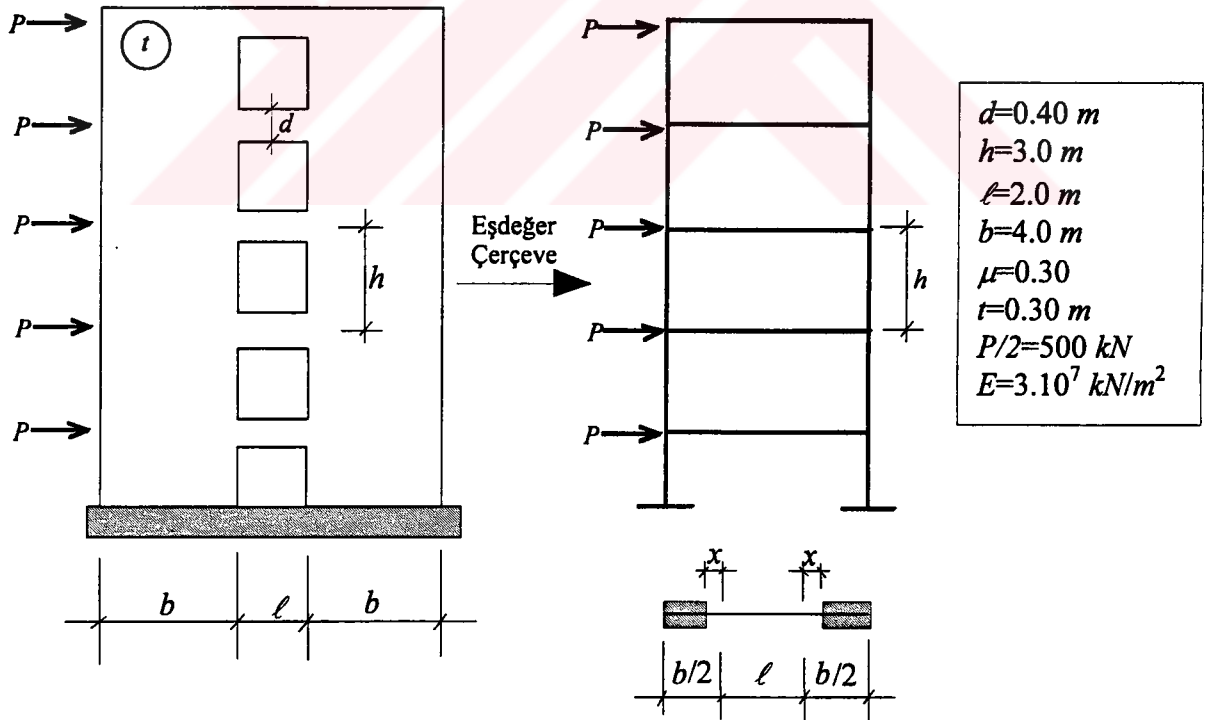
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
d (m)	b (m)	η_{FE}^e	$\frac{h}{\ell}$	$\frac{b}{\ell}$	$\frac{d}{\ell}$	η^e (3.28) Bağıntısı	η^e (3.29) Bağıntısı
0.20	3.00	7.1773	1	1	0.0667	7.1295	7.1561
	3.20	8.7477	1.0714	1.1429	0.0714	8.9795	9.0095
	3.40	10.81	1.1538	1.3077	0.0769	11.3150	11.3483
	3.60	13.57	1.25	1.5	0.0833	14.3040	14.3402
	3.80	17.35	1.3636	1.7273	0.0909	18.1796	18.2178
	4.00	22.6633	1.5	2	0.1	23.2957	23.3341
	4.20	30.3667	1.1667	2.3333	0.1111	29.0183	29.0504
	4.40	41.9767	1.875	2.75	0.125	39.7676	39.7940
	4.60	60.1833	2.1429	3.2857	0.1429	53.4982	53.5040
0.40	3.00	6.0683	1	1	0.1333	5.5560	5.5773
	3.20	7.29	1.0714	1.1429	0.1429	6.9991	7.0181
	3.40	8.861	1.1538	1.3077	0.1538	8.8217	8.8422
	3.60	10.907	1.25	1.5	0.1667	11.1497	11.1709
	3.80	13.6217	1.3636	1.7273	0.1818	14.1738	14.1947
	4.00	17.29	1.5	2	0.2	18.1625	18.1811
	4.20	22.3567	1.1667	2.3333	0.2222	22.6242	22.6350
	4.40	29.51	1.875	2.75	0.25	31.0048	31.0061
	4.60	39.51	2.1429	3.2857	0.2857	41.0048	41.0061
0.60	3.00	5.2483	1	1	0.2	4.8062	4.8194
	3.20	6.2117	1.0714	1.1429	0.2143	6.0512	6.0655
	3.40	7.4233	1.1538	1.3077	0.2308	7.6252	7.6401
	3.60	8.9567	1.25	1.5	0.25	9.6397	9.6545

Bu çalışmada ortaya konulan yaklaşım, daha geniş bir veri tabanı kullanılmak ve malzemenin doğrusal olmayan davranışlarını da dikkate almak suretiyle 5. Bölüm'de

irdelenecektir; bu bağlamda, ilk elde edilen sonuçlar, sürekli malzeme gerilme-şekil değiştirme modellerinin (Drucker-Prager) kullanılabileceği hissini vermektedir (Köksal ve Doran, 1997; Doran vd., 1998; Polat vd., 2000).

Örnek 1:

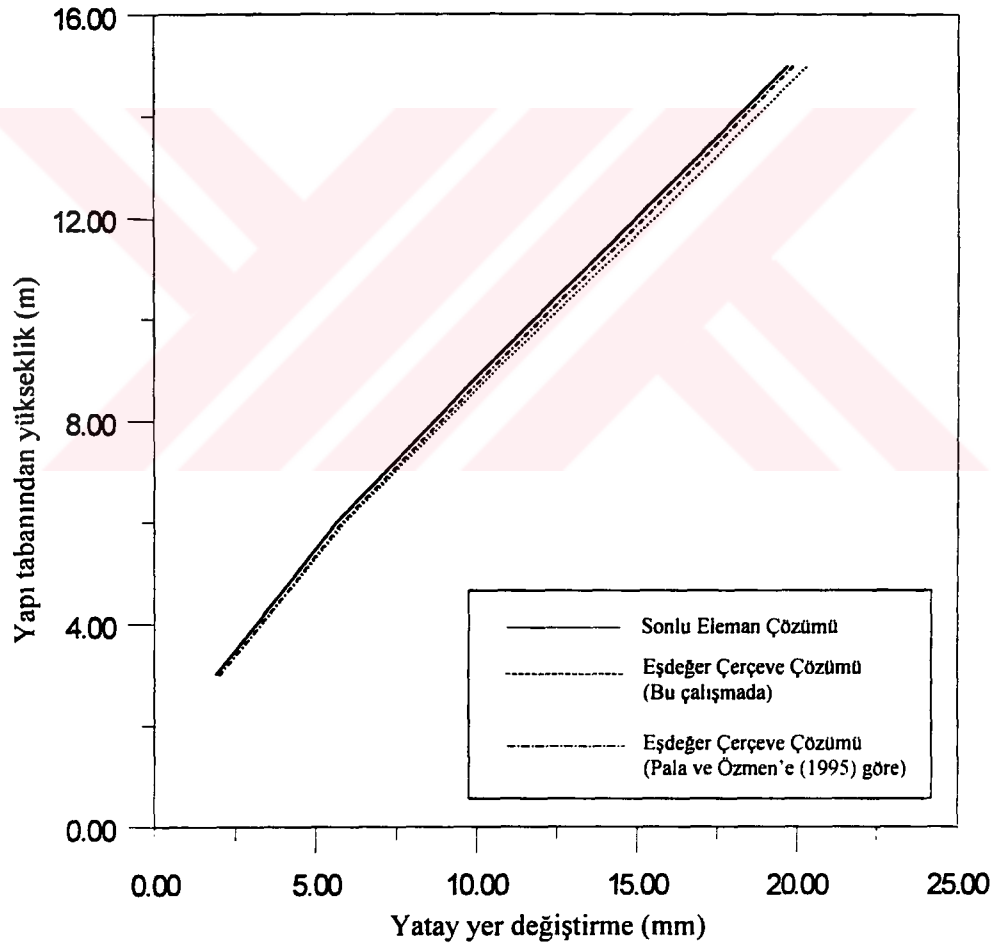
Şekil 3.10'da görülen boşluklu perdeli sistemde $(\frac{d}{\ell} \leq \frac{1}{4})$, (3.20), (3.26) bağıntıları ve Pala ve Özmen'in (1995) çalışmalarında önermiş oldukları bağıntı yardımıyla, bağ elemanı için yumuşama derinliği hesaplanmıştır. Bu değer esas alınarak elde edilen model, bu defa çubuk sistem olarak çözülerek yatay yer değiştirmeler bulunmuş ve karşılaştırmalı olarak Çizelge 3.3'de verilmiştir. Ayrıca söz konusu değerler Şekil 3.11'de, çerçeve yüksekliğince çizilmiştir.



Şekil 3.10 Boşluklu perdeli sistem (Örnek 1)

Çizelge 3.3 -Örnek 1: Yatay yer değiştirmeler (mm)

Kat No	Sonlu eleman çözüümü	Bu çalışma	Pala ve Özmen (1995)
1	1.879	2.037	2.015
2	5.612	5.890	5.804
3	10.180	10.594	10.411
4	14.970	15.510	15.208
5	19.680	20.296	19.862

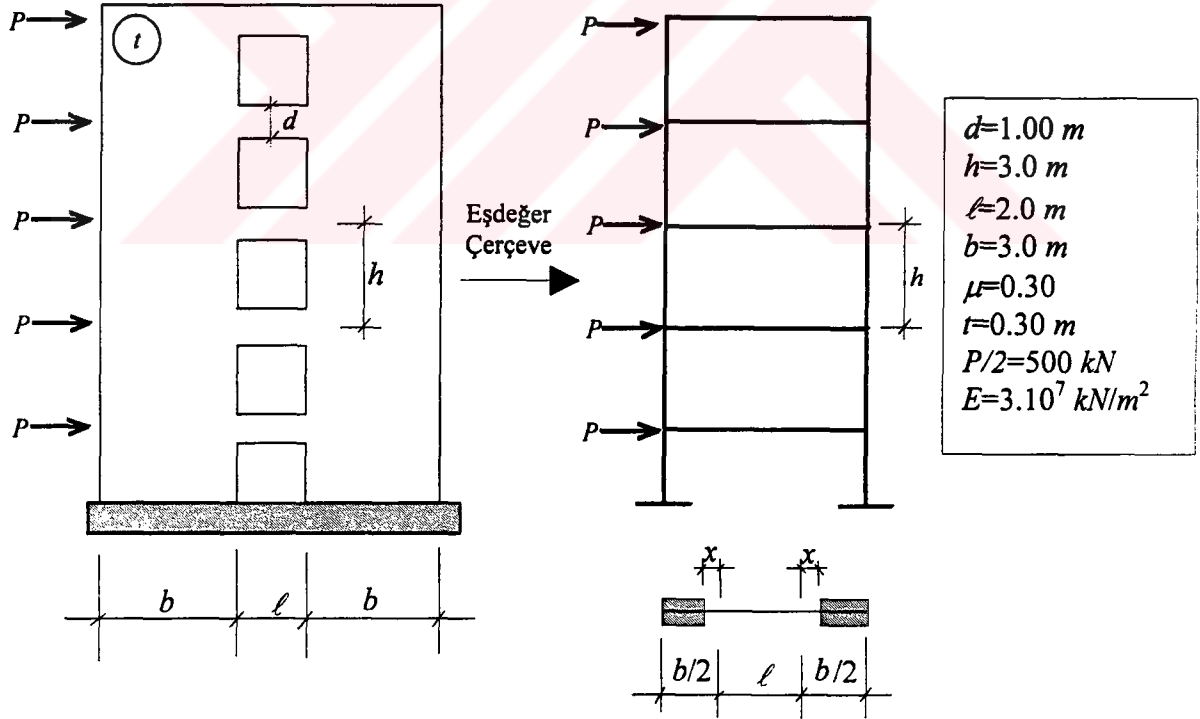


şekil 3.11 Kat ötelemeleri (Örnek 1)

Çizelge 3.3'deki çözümler incelendiğinde, eşdeğer çerçeve yaklaşımının getireceği toplam ağırlıklı hata bu çalışma için %4.5, Pala ve Özmen'e (1995) göre ise %3 olarak hesaplanmıştır.

Örnek 2:

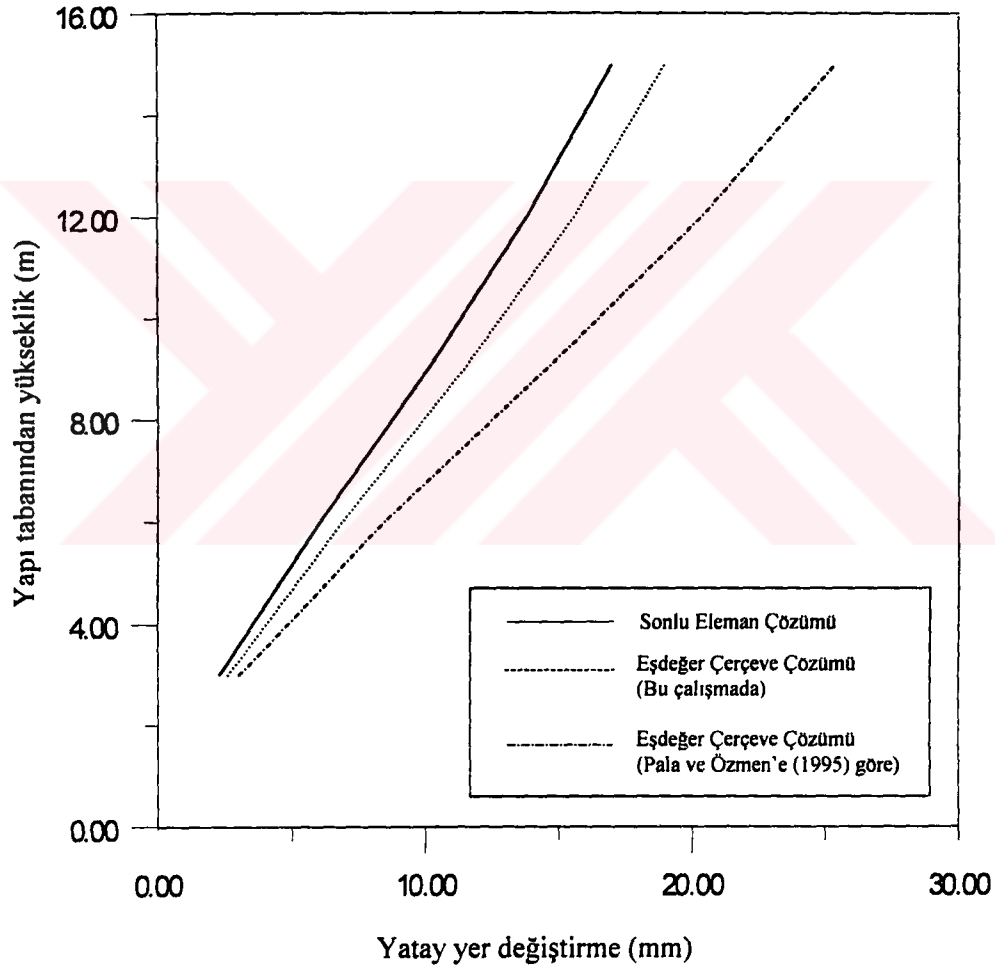
Şekil 3.12'de görülen boşluklu perdeli sistemde ($\frac{d}{\ell} > \frac{1}{4}$), (3.20), (3.26) bağıntıları ve Pala ve Özmen'in (1995) çalışmalarında önermiş oldukları bağıntı yardımıyla, bağ elemanı için yumuşama derinliği hesaplanmıştır. Bu değer esas alınarak elde edilen çubuk sistem modeli çözülerek yatay yer değiştirmeler bulunmuş ve karşılaştırmalı olarak Çizelge 3.4'de verilmiştir. Ayrıca söz konusu değerler Şekil 3.13'de, grafik olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.12 Boşluklu perdeli sistem (Örnek 2)

Çizelge 3.4 -Örnek 2: Yatay yer değistirmeler (mm)

Kat No	Sonlu eleman çözümü	Bu çalışma	Pala ve Özmen (1995)
1	2.277	2.592	3.021
2	6.066	6.893	8.453
3	10.101	11.453	14.533
4	13.806	15.571	20.305
5	17.035	19.030	25.421



Şekil 3.13 Kat ötelemeleri (Örnek 2)

Şekil 3.11 ve Şekil 3.13 sırası ile incelendiğinde, $\frac{d}{\ell} \leq \frac{1}{4}$ olduğu durumlarda; çubuk teorisinin geçerliliğini koruduğu bölgelerde, (3.20) ve (3.26) bağıntıları ve Pala ve Özmen'in (1995) önermiş oldukları bağıntı yardımı ile elde edilen x değerine göre gerçekleştirilen eşdeğer çerçeve çözümünden elde edilen kat ötelemeleri birbirleri ile uyum içerisinde. Ancak $\frac{d}{\ell} > \frac{1}{4}$ olduğu durumlarda, Pala ve Özmen'e (1995) göre çözüm, gerçek çözümden uzaklaşırken, bu çalışmadaki yaklaşıma ait çözümler sonlu eleman çözümlerine daha yakın düşmektedir. Bu, bağ elemanının rijitliğine katkısı olan başlıca parametrelerin tamamının, bu çalışmada dikkate alınmış olması ile açıklanabilir.

Yine bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen bazı sonlu eleman yaklaşımlarında, levha elemanı düğüm parametrelerinin seçiminde dikkatli davranılması, singülarite problemi eğilimi olan duyarlı düğüm parametrelerinden (düğümün eleman normali etrafında dönme serbestlik derecesi gibi) kaçınılması gerektiği görülmüştür.

4 DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ VE PLASTİSİTE

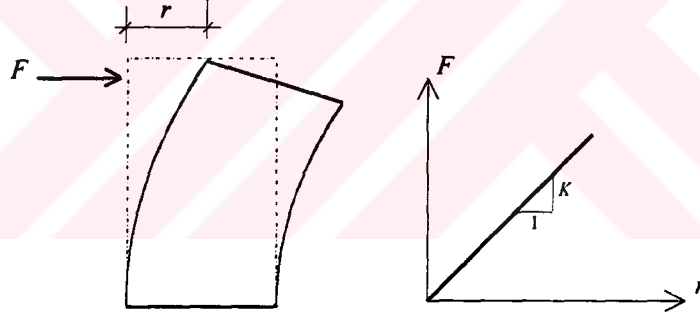
4.1 Doğrusal Olmayan Davranış

Bilindiği gibi doğrusal olmayan davranış üç durumda ortaya çıkmaktadır;

- Yer değiştirmelerin büyük olması,
- Şekil değiştirmelerin büyük olması,
- Malzemenin doğrusal davranış göstermemesi.

Bunlardan ilk ikisinde, denge denklemlerinin, cismin şekil değiştirmiş konumu üzerinde yazılması gereği duyulur. Bu duruma en iyi örnek stabilite problemleridir.

Diğer durum ise, malzeme davranışını ifade eden gerilme-şekil değiştirme bağıntısının doğrusal olmamasıdır. Bu çalışma kapsamında üçüncü durum dikkate alınmıştır.

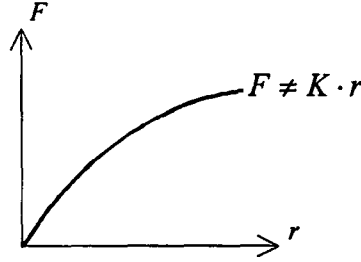


Şekil 4.1 Kuvvet – yer değiştirme ilişkisi

Şekil 4.1'den görüleceği gibi bir F kuvveti yapısal sisteme uygulandığında, kuvvet uygulanan nokta, kuvvetin doğrultusunda r kadar yer değiştirecektir. F ile r arasında Hooke Kanunu olarak bilinen ve yapısal sistemin davranışını betimleyen rijitlik bağıntısı (K değeri), çeşitli yükler için (3.11) bağıntısı yardımıyla hesaplanabilir.

Düğüm noktası yük vektörü ile düğüm noktası yer değiştirme vektörü arasında tanımlanan yapı sisteminin toplam rijitlik matrisi $\underline{K}$, doğrusal bağıntılar yardımıyla oluşturulabiliyorsa, sistemin davranışı doğrusal kabul edilir. Yapısal sistemler belirli bir hizmet yüküne kadar $\underline{K}$ doğrusal-elastik kalacak şekilde tasarlanabilir (Böl.5.4). Bununla beraber $\underline{F}$ ile $\underline{r}$

arasında doğrusal ilişki kurmanın mümkün olmadığı pek çok mühendislik uygulamalarına rastlamak mümkündür; K matrisinin oluşumunda kullanılacak olan denklemler; denge denklemleri, elastisite bağıntıları doğrusal olmayabilir; bu durumda doğrusal olmayan davranış söz konusudur.



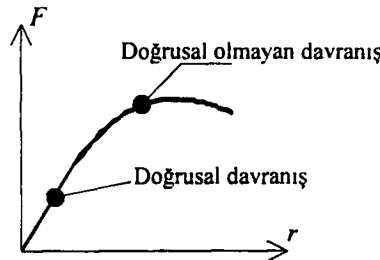
Şekil 4.2 Doğrusal olmayan davranış

Doğrusal kabul edilen sistemler de aslında tam olarak doğrusal davranış göstermezler. Ancak doğrusal olmayan davranış derecesi ihmal edilebilecek düzeydedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Gerçek davranış ve idealize edilmiş davranış

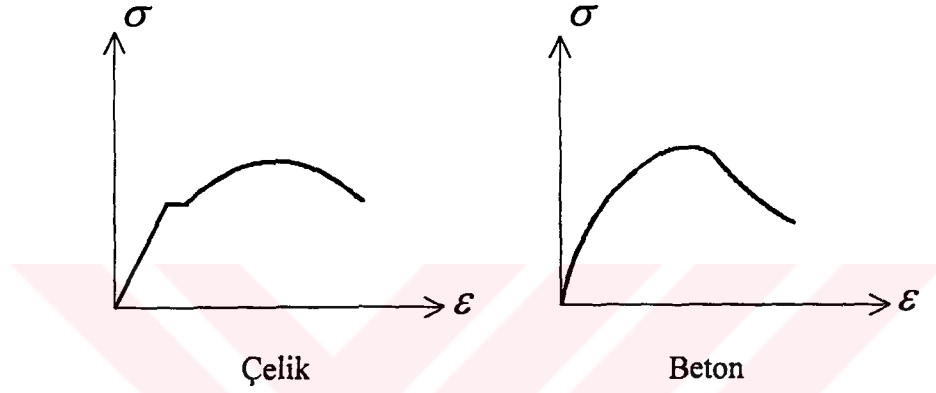
Yapı sistemleri, genelde, bağıl olarak küçük gerilmeler altında doğrusal, kırılmaya yakın gerilmeler altında doğrusal olmayan davranış gösterir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Doğrusal ve doğrusal olmayan davranış

4.2 Malzeme Açısından Doğrusal Olmayan Davranış

Malzeme davranışının doğrusal olmaması, gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisinin doğrusal olmaması demektir. Malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisini etkileyen birçok neden mevcuttur; yük geçmişi, çevre ve sınır şartları, yükleme süresi vb. Şekil 4.5’de bazı malzemeler için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri verilmiştir.



Şekil 4.5 Gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

Malzeme açısından doğrusal olmayan davranış, yapı sisteminin rijitliğinin değişken olması anlamına gelir. Eğer malzeme homojen değilse, malzeme bileşenlerinin (kristaller, dane, molekül, vb.) gelişigüzel dağıldığı kabul edilir. Pek çok mühendislik uygulamalarında malzemenin homojen olduğu kabul edilmektedir. Malzeme açısından doğrusal olmayan davranış tipleri şu şekilde sıralanabilir:

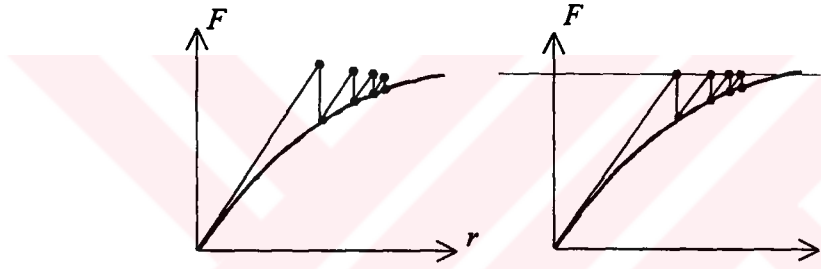
- Plastisite
- Hiperelastisite
- Sünme
- Viskoelastisite

4.3 Doğrusal Çözümleyici ile Doğrusal Olmayan Hesap

Doğrusal-elastik malzeme kabulü ile elde edilen (3.11) bağıntısındaki rijitlik matrisi $\underline{K}$, şekil değiştirmelere ve yüklemelere bağlı olarak,

$$\psi(r) = \underline{K} \cdot \underline{r} - \underline{F} = 0 \quad (4.1)$$

şeklindedir. Bu bağıntının çözümü kabul edilebilir yakınsama sağlanıncaya kadar yapılacak iterasyonla gerçekleştirilir. Dolayısı ile doğrusal olmayan sistemler doğrudan doğrusal çözümleyicilerle hesaplanamaz. Ancak bir dizi doğrusal yaklaşım kullanılarak hesaplanabilirler (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Doğrusal yaklaşım

Her doğrusal yaklaşım bir iterasyonu gerektirir. Bu iterasyon işlemi Newton-Raphson yöntemi ($N-R$) kullanılarak gerçekleştirilebilir (Newton-Raphson iterasyonu veya denge iterasyonu).

Bu yöntem için önerilen formül (4.2) bağıntısıyla verilmiştir:

$$\underline{K}^T \cdot \underline{\Delta r} = \underline{F}^{ygg} - \underline{F}^{nr} \quad (4.2)$$

Burada;

$\underline{K}^T$: Yapı sisteminin toplam teğetsel rijitlik matrisi,

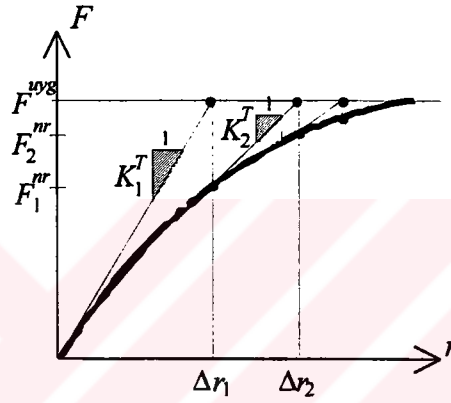
$\underline{\Delta r}$: Yer değiştirme artım vektörü,

$\underline{F}^{wg}$: Uygulanan düğüm noktası yük vektörü,

$\underline{F}^{nr}$: N - R yük vektörü (Eleman gerilmeleri ile hesaplanan),

$\underline{F}^{wg} - \underline{F}^{nr} = \underline{\varepsilon}$ fark vektörü olarak adlandırılır.

İterasyonun her adımında $\underline{K}^T$ ve $\underline{\varepsilon}$ hesaplanır, belirli bir $\underline{\varepsilon}$ değerine ulaşılmca iterasyona son verilir. Şekil 4.7'de bir serbestlik dereceli (BSD) sistemler için N - R işlem grafiği görülmektedir.



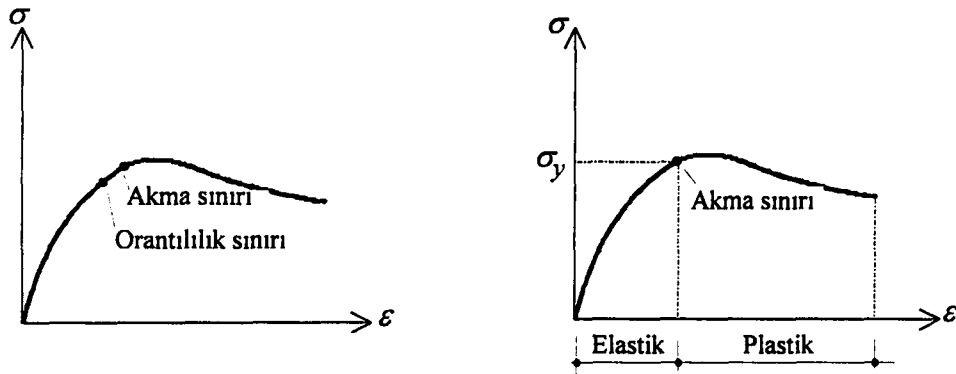
Şekil 4.7 BSD sistem için N - R işlem grafiği

İlk iterasyonda K_1^T ve F^{wg} kullanılarak Δr_1 yer değiştirmesine ulaşılır. Doğrusal olmayan davranış bu yer değiştirme değeri için F_1^{nr} değerine ulaşır. İkinci iterasyonda ise Δr_2 yer değiştirmesine düzeltilmiş K_2^T ve ε ile ulaşılır. Gerekli hassasiyet sağlandıktan sonra iterasyona son verilir.

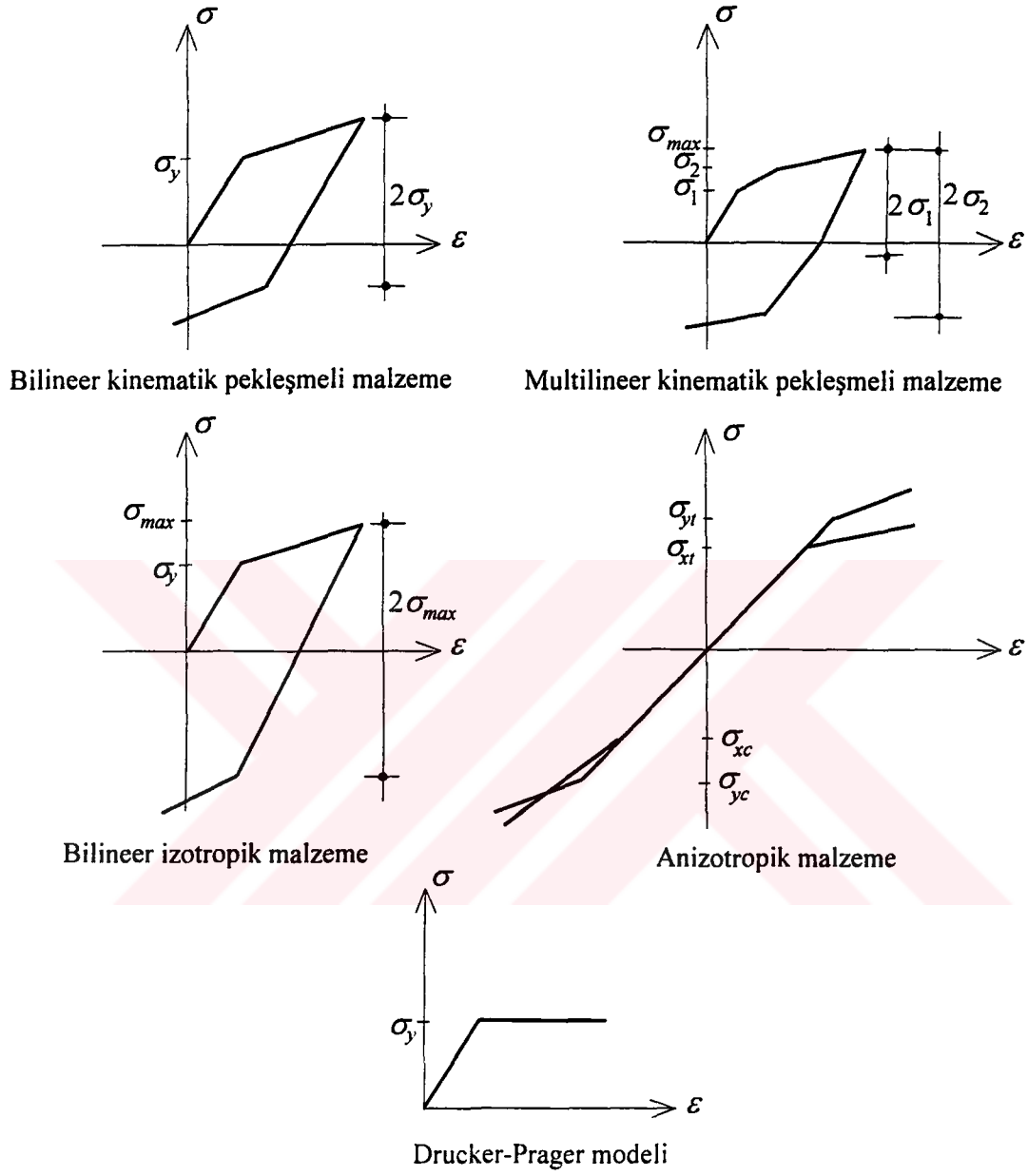
4.4 Plastisite

Plastisite, uygulanan yükler altında malzemenin sürekli şekil değiştirdiği bir malzeme davranışı olarak tanımlanabilir. Pek çok malzeme, gerilmelerinin belirli bir seviyenin altında kalması durumunda doğrusal davranış gösterir, bu seviyeye *Orantılılık Sınırı* denilmektedir. Gerilmelerin bu sınırın altında kalması şartı ile gerilme-birim şekil

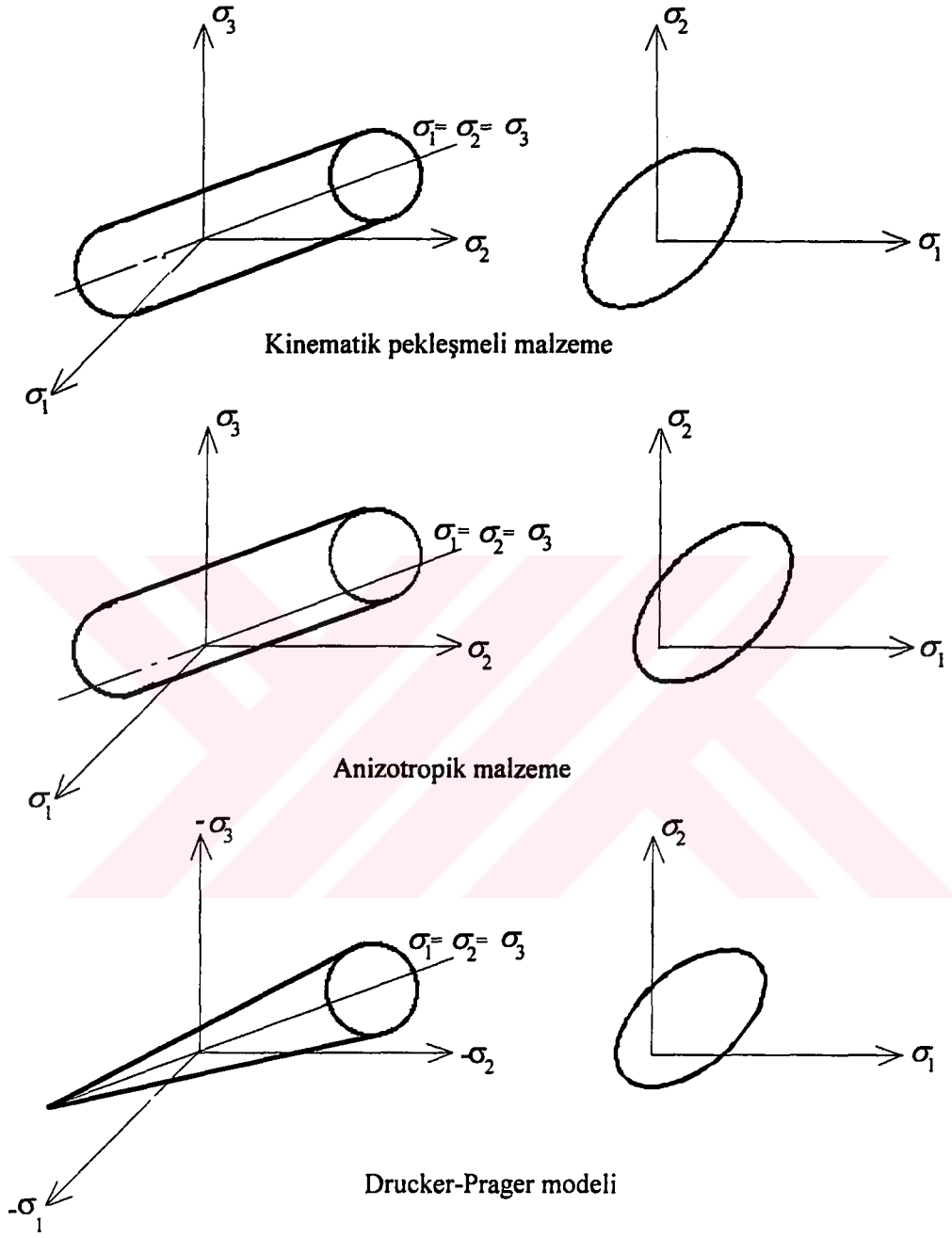
değiştirme ilişkisi doğrusal kabul edilebilir. Ek olarak bazı malzemeler gerilmelerin belirli bir seviyenin altında kalması durumunda elastik davranış gösterirler ki bu seviyeye de *Akma Sınırı (Noktası)* denilmektedir. Bu sınırın aşılmasıyla gerilme neredeyse sabit kalarak, şekil değiştirme hızla artacaktır. Elastik aşama ile plastik aşama arasında tanımlanan bu iki sınır, çoğunlukla tek bir sınır olarak dikkate alınır (Şekil 4.8). Kolon, kiriş gibi basit yapısal betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışlarıyla ilgili birçok analitik çalışma dikkati çekmektedir (Khatri ve Anderson, 1995; Park ve Klingner, 1997; Doran vd., 1998). Bu ve benzeri çalışmalarda betonun yük-yer değiştirme davranışı ve kapasite hesabı verilmiş, doğrusal olmayan hesabın uygulama alanı beton yapıların üç eksenli yükleme durumlarını içerecek şekilde genişletilmiştir (su tutucu yapılar, su altı yapıları, yeraltı depoları, kubbeler, vs.). Gerilme analizlerini yapan, büyük çapta sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan paket programlar olmasına rağmen, plastik davranışı tanımlayan yetersiz malzeme modelleri, yapısal analizi sınırlandıran en önemli faktör olarak göze çarpmaktadır. Bunun nedeni ise beton malzemenin temel karakteristiklerini tanımlayan, kabul edilebilir doğrulukta bünye denklemlerinin oluşturulamamasıdır. Bununla beraber son yıllarda, beton malzemenin çok eksenli gerilme altında gerilme-birim şekil değiştirme ve göçme davranışlarını karakterize eden pek çok model geliştirilmiştir. Tüm bu modellerin uygulama alanlarına bağlı olarak avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Söz konusu malzeme modellerinin bir kısmı Şekil 4.9a,b’de görülmektedir.



Şekil 4.8 Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, sınır durumlar



Şekil 4.9a σ - ϵ düzleminde malzeme modelleri (Doran vd., 1998)



Şekil 4.9b İki boyutlu ve üç boyutlu gösterimde malzeme modelleri (Doran vd., 1998)

4.4.1 Plastisitenin Yapı Mühendisliğindeki Önemi

Mühendislik yapılarının hesabında iki önemli aşama göze çarpmaktadır:

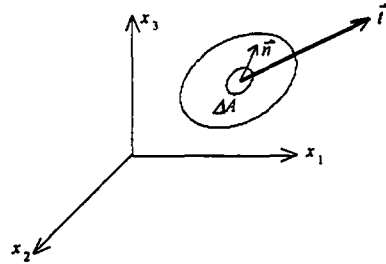
- Sistem elemanlarının maruz kaldığı iç kuvvetlerin tanımlanması,
- Bu kuvvetler etkisinde, söz konusu elemanların davranışının belirlenmesi.

İlk aşama, elemanlardaki gerilmelerin hesabını, ikinci aşama ise malzeme özelliklerinin tanımlanmasını gerektirir. Malzemenin akma gerilmesi aşılmadıkça, gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi doğrusal kabul edilir ve hesaplar doğrusal elastisite teorisine göre yapılır; akma gerilmesi üzerindeki gerilmeler (pekleşme) dikkate alınmaz. Bu bağlamda yapıların elastik olarak incelenmesinin, gerçek gerilme dağılımının her zaman düzgün olmadığı, yüksek gerilmeli yerel bölgelerin plastikleşebileceği düşünülünce, gerçeği tam olarak yansıtmayacağı açıktır. Plastik hesap, elastik hesaba oranla, süneklikten faydalanması, düzgün olmayan gerilme dağılımlarını faydalı şekilde dağıtması açısından daha gerçekçidir.

4.4.2 Bir Noktadaki Gerilme ve Gerilme Tansörü

Bilindiği gibi gerilme, herhangi bir yüzeye dağılı iç kuvvetlerin birim alana gelen dağılıma şiddetleri olarak tanımlanabilir (Chen ve Han, 1988). Şekil 4.10'dan görüleceği üzere, ΔA ile gösterilen alan elemanına karşı gelen iç kuvvet miktarı F_n ise, tanım gereği, gerilme,

$$\bar{t} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{F_n}{\Delta A} = t \quad (4.3)$$



Şekil 4.10 Herhangi bir noktadaki gerilme vektörü (Chen ve Han, 1988)

dir. Burada $\vec{t}$ nin ΔA elemanına dik olma zorunluluğu yoktur. ΔA elemanının birim dış normali $\vec{n}$ ise $\vec{t}$ nin $\vec{n}$ doğrultulu bir elemana ait olduğunu belirtmek için gerilme vektörü $\vec{t}$ şeklinde gösterilmektedir. Ayrıca gerilme vektörü x_1, x_2, x_3 koordinat eksenlerine dik düzlemlerdeki bileşenleri cinsinden ifade edilebilir. Örneğin, x_1 koordinat düzlemindeki gerilme $\vec{t}$, normal gerilme σ_{11} ve kayma gerilmeleri σ_{12}, σ_{13} cinsinden ifade edilmek istenirse, Şekil 4.11'den izlenebileceği gibi,

$$\vec{t} = \sigma_{11}n_1 + \sigma_{12}n_2 + \sigma_{13}n_3 \quad (4.4)$$

veya indis notasyonla,

$$t_i = \sigma_{ij}n_j \quad (4.5)$$

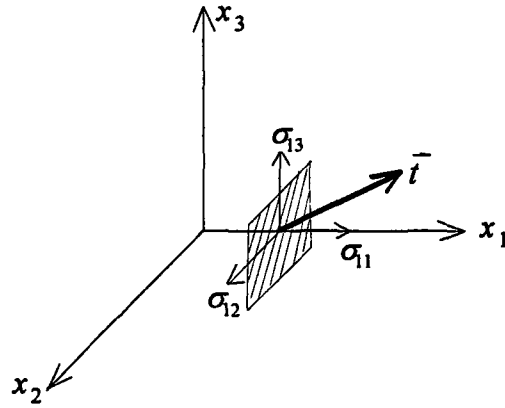
olarak yazılabilir. Benzer şekilde, $\vec{t} = \sigma_{2j}n_j$ ve $\vec{t} = \sigma_{3j}n_j$ olarak yazılabilecektir. Bir genelleme yapacak olursak,

$$t_i = \sigma_{ij}n_j \quad (4.6)$$

olacaktır. Burada, σ_{ij} Gerilme Tansörü olarak adlandırılır. Dokuz bileşenli bu büyüklük matris formda,

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

şeklinde yazılabilir.



Şekil 4.11 Birbirine dik üç düzlemde gerilme vektörü (Chen ve Han, 1988)

4.4.2.1 Asal Gerilmeler ve Gerilme Tansörünün İnvaryantları

Birim normali n_i olan herhangi bir düzlemdeki gerilme vektörü (4.6) bağıntısı ile hesaplanabilir. Verilen bir eksen takımına göre gerilme tansörünün dokuz bileşeni biliniyorsa, σ , normali $\bar{n}$ olan düzlemdeki asal gerilme bileşeni olarak tanımlandığından,

$$\underline{t} = \sigma \underline{n} \quad (4.8)$$

dir. (4.6) ile (4.8) bağıntısından, $\underline{\sigma n} = \sigma \underline{n}$ eşitliği elde edilecektir. İndis formda,

$$\sigma_{ij} n_j = \sigma n_i$$

$$\sigma_{ij} n_j - \sigma n_i = 0$$

$$(\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ji}) n_j = 0 \quad (4.9)$$

$$n_j \delta_{ji} = n_i, \quad \delta_{ji} = \begin{cases} i = j \rightarrow 1 \\ i \neq j \rightarrow 0 \end{cases}$$

yazılabilir. Burada δ_{ji} kronecker deltası olarak bilinir ve indis değiştirmeye yarar. Ayrıca birim matris özelliği de göstermektedir;

$n_1\delta_{1i} + n_2\delta_{2i} + n_3\delta_{3i} = n_i$ olduğundan $n_1\delta_{11}(=1) + n_2 0 + n_3 0 = n_1$ demektir.

$$\delta_{ji} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \underline{I} \quad (4.10)$$

(4.9) bağıntısı matris formda, $(\underline{\sigma} - \sigma \underline{I})\underline{n} = \underline{0}$ şeklini alacaktır. Sıfırdan farklı bir çözüm için, parantez içindeki ifadenin determinantının sıfıra eşit olması gerekecektir:

$$|\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ji}| = 0 \quad (4.11a)$$

veya açık halde,

$$\begin{vmatrix} \sigma_{11} - \sigma & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} - \sigma & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} - \sigma \end{vmatrix} = 0 \quad (4.11b)$$

dir. Bu determinantın açılımı ile, σ ya göre üçüncü dereceden bir denklem elde edilir.

$$\begin{aligned} &\sigma^3 - (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})\sigma^2 + (\sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}\sigma_{33} + \sigma_{11}\sigma_{33} - \sigma_{12}^2 - \sigma_{13}^2 - \sigma_{23}^2)\sigma - \\ & - (\sigma_{11}\sigma_{22}\sigma_{33} - \sigma_{11}\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{13}^2 - \sigma_{33}\sigma_{12}^2 + 2\sigma_{12}\sigma_{13}\sigma_{23}) = 0 \\ &\sigma^3 - I_1\sigma^2 + I_2\sigma - I_3 = 0 \end{aligned} \quad (4.12)$$

burada I_1, I_2, I_3 sırası ile gerilme tansörünün 1., 2., 3. invaryantlarıdır.

$$\begin{aligned}
I_1 &= \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \\
I_2 &= \sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}\sigma_{33} + \sigma_{11}\sigma_{33} - \sigma_{12}^2 - \sigma_{13}^2 - \sigma_{23}^2 = \frac{1}{2}I_1^2 - \frac{1}{2}\sigma_{ij}\sigma_{ij} \\
I_3 &= \frac{1}{3}\sigma_{ij}\sigma_{jk}\sigma_{ki} - \frac{1}{2}I_1\sigma_{ij}\sigma_{ji} + \frac{1}{6}I_1^3
\end{aligned} \tag{4.13}$$

(4.13) bağıntılarından ikincisinin ispatı aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
I_2 &= \frac{1}{2}I_1^2 - \frac{1}{2}\sigma_{ij}\sigma_{ij} = \frac{1}{2}\sigma_{ii}\sigma_{jj} - \frac{1}{2}\sigma_{ij}\sigma_{ij} \\
&= \frac{1}{2}\sigma_{11}\sigma_{jj} - \frac{1}{2}\sigma_{1j}\sigma_{1j} + \frac{1}{2}\sigma_{22}\sigma_{jj} - \frac{1}{2}\sigma_{2j}\sigma_{2j} + \frac{1}{2}\sigma_{33}\sigma_{jj} - \frac{1}{2}\sigma_{3j}\sigma_{3j} \dots \{i=1,2,3\} \\
&= \frac{1}{2}\sigma_{11}\sigma_{11} - \frac{1}{2}\sigma_{11}\sigma_{11} + \frac{1}{2}\sigma_{22}\sigma_{11} - \frac{1}{2}\sigma_{21}\sigma_{21} + \frac{1}{2}\sigma_{33}\sigma_{11} - \frac{1}{2}\sigma_{31}\sigma_{31} + \dots \{j=1\} \\
&+ \frac{1}{2}\sigma_{11}\sigma_{22} - \frac{1}{2}\sigma_{12}\sigma_{12} + \frac{1}{2}\sigma_{22}\sigma_{22} - \frac{1}{2}\sigma_{22}\sigma_{22} + \frac{1}{2}\sigma_{33}\sigma_{22} - \frac{1}{2}\sigma_{32}\sigma_{32} + \dots \{j=2\} \\
&+ \frac{1}{2}\sigma_{11}\sigma_{33} - \frac{1}{2}\sigma_{13}\sigma_{13} + \frac{1}{2}\sigma_{22}\sigma_{33} - \frac{1}{2}\sigma_{23}\sigma_{23} + \frac{1}{2}\sigma_{33}\sigma_{33} - \frac{1}{2}\sigma_{33}\sigma_{33} \dots \{j=3\} \\
&= \sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}\sigma_{33} + \sigma_{11}\sigma_{33} - \sigma_{12}^2 - \sigma_{13}^2 - \sigma_{23}^2
\end{aligned}$$

Koordinat eksenleri asal eksenler olarak alınır, gerilme invariantları asal gerilmeler cinsinden ifade edilebilir:

$$\begin{aligned}
I_1 &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\
I_2 &= \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3 \\
I_3 &= \sigma_1\sigma_2\sigma_3
\end{aligned} \tag{4.14}$$

Asal gerilmeler koordinat eksenlerinin seçimine bağlı olmadığından, I_1, I_2, I_3 büyüklükleri koordinat sisteminin değiştirilmesi durumunda değişmeyecektir. Bu yüzden bu büyüklüklere gerilme tansörü σ_{ij} nin invariantları (değişmezleri) denilir.

Gerilme tansörü iki ayrı tansörün toplamı şeklinde ifade edilebilir:

$$\sigma_{ij} = s_{ij} + \sigma_m \delta_{ij} \tag{4.15}$$

Burada, s_{ij} deviyatör tansörü, σ_m ortalama gerilme (teorik hidrostatik gerilme) olarak isimlendirilir ve

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij} \quad (4.16)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) = \frac{1}{3}\sigma_{ii} = \frac{1}{3}I_1 \quad (4.17)$$

olarak alınabilir. Ayrıca, $\sigma_m \delta_{ij}$ küresel tansör olarak anılır ve

$$\sigma_m \delta_{ij} = \frac{1}{3}I_1 \delta_{ij} \quad (4.18)$$

şeklinde ifade edilir. (4.15) bağıntısı matris formda,

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{11} - \sigma_m & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} - \sigma_m & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} - \sigma_m \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

şeklindedir. Buna göre deviyatör tansörü, gerilme halinin ortalama gerilmeden olan farkını göstermektedir. Gerilme deviyatörü tansörünün birinci invaryantı J_1 ile gösterilirse bunun,

$$J_1 = (\sigma_{11} - \sigma_m) + (\sigma_{22} - \sigma_m) + (\sigma_{33} - \sigma_m) = 0 \quad (4.20)$$

olduğu görülür. Bu invaryant her zaman sıfırdır. Deviyatör tansörünün gerilmelerini kullanarak asal gerilmeleri ifade edebilmek için (4.16) bağıntısı yardımı ile $\left\{s = \sigma - \frac{1}{3}I_1\right\}$

alınarak (4.12) bağıntısına gidilirse,

$$s^3 - J_1 s^2 + J_2 s - J_3 = 0 \quad (4.21)$$

elde edilir.

Burada,

$$\begin{aligned} J_1 &= 0 \\ J_2 &= \frac{1}{6} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2] + \\ &\quad + \sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ji} \\ J_3 &= \frac{1}{3} s_{ij} s_{jk} s_{ki} \end{aligned} \quad (4.22)$$

dir. Koordinat eksenleri asal eksenler olarak alınırsa,

$$\begin{aligned} J_1 &= s_1 + s_2 + s_3 = 0 \\ J_2 &= \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \frac{1}{2} (s_1^2 + s_2^2 + s_3^2) \\ J_3 &= \frac{1}{3} (s_1^3 + s_2^3 + s_3^3) = s_1 s_2 s_3 \end{aligned} \quad (4.23)$$

olacaktır. J_1, J_2, J_3 invaryantlarının gerilme tansörü σ_{ij} nin invaryantları I_1, I_2, I_3 cinsinden ifadesi ise,

$$\begin{aligned} J_1 &= 0 \\ J_2 &= \frac{1}{3} (I_1^2 - 3I_2) \\ J_3 &= \frac{1}{27} (2I_1^3 - 9I_1 I_2 + 27I_3) \end{aligned} \quad (4.24)$$

şeklinde bulunur.

4.4.2.2 Oktaedral Kayma Gerilmesi

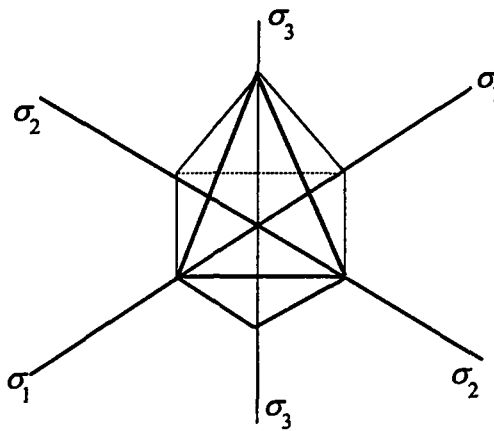
Üç asal eksen ile eşit açılar yapan bir düzlemdeki bileşke τ_{oct} kayma gerilmesine *oktaedral kayma gerilmesi* denilmektedir. Böyle olan düzleme de *oktaedral düzlem* denilir. Üç boyutlu kartezyen bir uzayda bu özelliği gerçekleyen düzlem sayısı sekiz olup bunlar, düzgün bir sekizyüzlü (oktaedral) oluştururlar (Şekil 4.12). Bu oktaedral düzlemin, asal eksenlere göre n_i doğrultu kosinüsleri, $n_i \bullet n_i = 1$ ve $n_i = n_j$ olduğu düşünülerek,

$$n_i \bullet n_i = (n_1)^2 + (n_2)^2 + (n_3)^2 = 1 \rightarrow n_1 = n_2 = n_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (4.25)$$

olarak bulunur. Ayrıca bu düzlemde etkiyen normal ve kayma gerilmeleri,

$$\begin{aligned} \sigma_{oct} &= \frac{1}{3} I_1 = \sigma_m \\ \tau_{oct} &= \sqrt{\frac{2}{3} J_2} \end{aligned} \quad (4.26)$$

şeklinde ifade edilebilir.

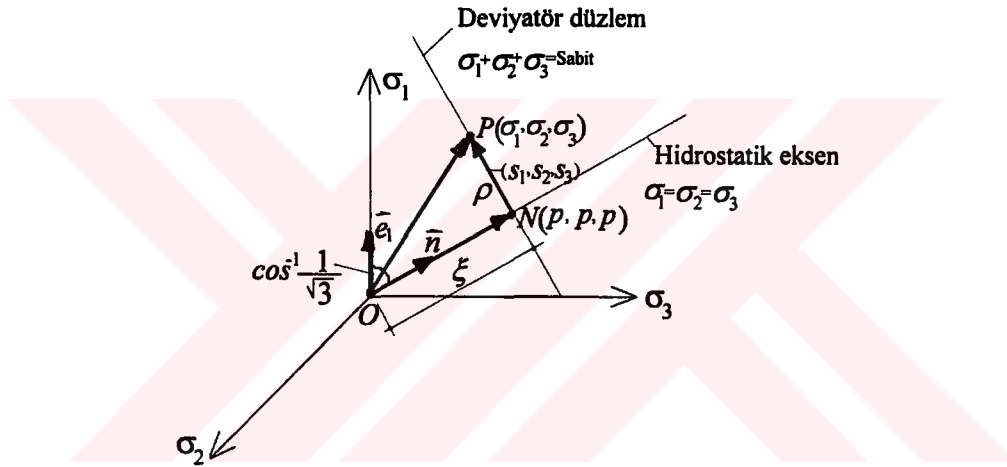


Şekil 4.12 Üç boyutlu kartezyen uzayda oktaedral düzlemler (Chen ve Han, 1988)

4.4.2.3 Haigh-Westergaard Gerilme Uzayı

Bir noktadaki gerilme durumunun geometrik gösterimi olan bu yöntem, plastisite teorisinde oldukça faydalıdır. Gerilme tansörü σ_{ij} nin 6 bağımsız bileşeni olduğundan, bu bileşenleri 6 boyutlu uzayda düşünmek mümkünse de, bunun yerine daha kolay ve anlaşılır olması açısından, gerilme durumunu belirleyecek 3 asal gerilmeyi, 3 boyutlu uzayda düşünmek tercih edilir.

Bu uzaya *Haigh-Westergaard Gerilme Uzayı* denilmektedir. Bu asal gerilme uzayında, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ gerilmeleri ile belirlenen her nokta, bir gerilme durumuna karşı gelmektedir.



Şekil 4.13 Haigh-Westergaard gerilme uzayı (Chen ve Han, 1988)

Şekil 4.13’de görüldüğü gibi, ON orjinden geçen ve koordinat eksenleri ile eşit açılar yapan bir doğru olsun. Bu doğru üzerindeki her noktada, gerilme durumu $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ dir; yani bu doğru üzerindeki her nokta hidrostatik gerilmeye maruz demektir (bu durumda deviyatör gerilmeler sıfırdır). Bu yüzden bu doğru, *Hidrostatik Eksen*, bu eksene dik herhangi bir düzlem ise *Deviyator Düzlem* olarak adlandırılır. Bu düzlem aşağıdaki forma uymalıdır;

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sqrt{3}\xi, \quad \xi = \sqrt{3}\sigma_m \quad (4.27)$$

Burada ξ , orjinden ölçülen, ON doğru parçasının uzunluğudur (Şekil 4.13). Özel bir durum olarak, orjinden geçen deviyatör düzlemde $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$ olacaktır. Bu düzlem π -Düzlem olarak adlandırılır.

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ gerilmeleri ile bir P noktasında verilen gelişigüzel bir gerilme durumu düşünölsün (Şekil 4.13). Gerilme vektörü OP iki bileşene ayrılabilir; bunlar, birim vektör $n = (1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$ doğrultusunda ON ve buna dik doğrultuda (π -Düzlemine paralel) NP dir. Böylece,

$$|ON| = OP \cdot n = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \cdot (1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}) \quad (4.28)$$

veya

$$|ON| = \frac{1}{\sqrt{3}} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{I_1}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} \sigma_m \quad (4.29)$$

NP vektörü,

$$NP = OP - ON \quad (4.30)$$

şeklinde ifade edilebilecektir. Ancak,

$$ON = |ON| \cdot n = (p, p, p) \quad (4.31)$$

olduğundan, (4.31) bağıntısı, (4.30)'da yerine konulursa,

$$NP = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) - (p, p, p) = [(\sigma_1 - p), (\sigma_2 - p), (\sigma_3 - p)] \quad (4.32)$$

bulunur. (4.16) bağıntısı kullanılarak (4.32) bağıntısı sadeleştirilebilir:

$$\mathbf{NP} = (s_1, s_2, s_3) \quad (4.33)$$

Buradan, $\mathbf{NP}$ vektörünün uzunluğu ρ ,

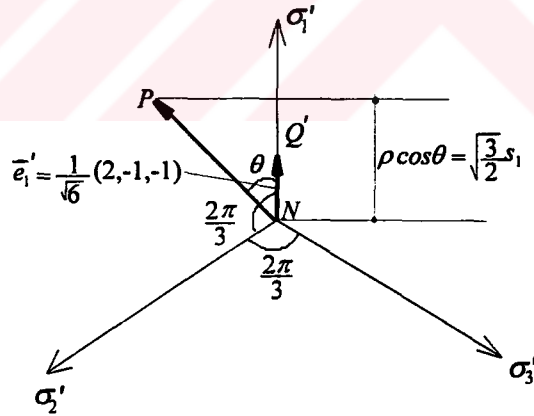
$$\rho = |\mathbf{NP}| = (s_1^2 + s_2^2 + s_3^2)^{1/2} = \sqrt{2J_2} \quad (4.34)$$

veya (4.26) bağıntısı yardımıyla,

$$\rho = |\mathbf{NP}| = \sqrt{3}\tau_{oct} \quad (4.35)$$

şeklinde hesaplanabilecektir.

Böylece, $\mathbf{ON}$ ve $\mathbf{NP}$ vektörleri, bir P noktasında σ_{ij} gerilme durumu için, $(\sigma_m \delta_{ij})$ hidrostatik bileşenleri ve deviyatör gerilme bileşenlerini (s_{ij}) tanımlayacaktır (Şekil 4.13). $\mathbf{NP}$ vektörü ve koordinat eksenlerinin, deviyatör düzlemdeki izdüşümleri düşünülürse, (Şekil 4.14), izdüşümler sırasıyla, $\mathbf{NP}$ ve $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ olacaktır.



Şekil 4.14 Bir noktada tanımlı gerilme durumunun *Deviyatör Düzlemdeki* izdüşümü (Chen ve Han, 1988)

$\mathbf{NP}$ vektörünün birim vektör $\mathbf{e}'_1$ doğrultusundaki bileşeni olan NQ' ,

$$NQ' = \rho \cos \theta = \mathbf{NP} \cdot \mathbf{e}'_1 = (s_1, s_2, s_3) \cdot \frac{1}{\sqrt{6}} (2, -1, -1) \quad (4.36)$$

veya

$$\rho \cos \theta = \frac{1}{\sqrt{6}}(2s_1, -s_2, -s_3) \quad (4.37)$$

dir. $s_2 + s_3 = -s_1$ olduğu düşünülürse, (4.37) bağıntısı,

$$\rho \cos \theta = \sqrt{\frac{3}{2}}s_1 \quad (4.38)$$

şeklini alacaktır. Burada ρ yerine (4.34)'deki değeri konulacak olursa,

$$\cos \theta = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{s_1}{\sqrt{J_2}} \quad (4.39)$$

elde edilecektir. Trigonometrik özellikleri kullanarak, $\cos 3\theta = 4 \cos^3 \theta - 3 \cos \theta$, (4.39) bağıntısı,

$$\cos 3\theta = 4 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{s_1}{\sqrt{J_2}} \right)^3 - 3 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{s_1}{\sqrt{J_2}} \right) \rightarrow \cos 3\theta = \frac{3\sqrt{3}}{2J_2^{3/2}} (s_1^3 - s_1 J_2) \quad (4.40)$$

şekline konulabilir. Burada, $J_2 = -(s_1 s_2 + s_2 s_3 + s_3 s_1)$ yerine konulursa,

$$\cos 3\theta = \frac{3\sqrt{3}}{2J_2^{3/2}} (s_1^3 + s_1^2 (s_2 + s_3) + s_1 s_2 s_3) \quad (4.41)$$

elde edilir. Son olarak, $s_2 + s_3 = -s_1$ ve $J_3 = s_1 s_2 s_3$ özdeşlikleri dikkate alınırsa,

$$\cos 3\theta = \frac{3\sqrt{3}J_3}{2J_2^{3/2}} \quad (4.42)$$

sonucuna varılır. (4.42) bağıntısı, deviyatör tansörün invaryantları cinsinden $\cos 3\theta$ nın değerini göstermektedir. Herhangi bir noktada $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ ile verilen gerilme durumu, kırılma kriterlerinin tanımlanmasında oldukça kullanışlı olan *Haigh-Westergaard* koordinatları (ξ, ρ, θ) ile ifade edilebilir. (4.39) bağıntısından,

$$s_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{J_2} \cos \theta \quad (4.43)$$

olduğu görülmektedir. Benzer şekilde deviyatör gerilmelerin diğer bileşenleri θ cinsinden ifade edilebilir:

$$s_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{J_2} \cos \left(\frac{2\pi}{3} - \theta \right) \quad (4.44)$$

$$s_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{J_2} \cos \left(\frac{2\pi}{3} + \theta \right) \quad (4.45)$$

Bu bağıntılar, $(\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3)$ ve θ nın belirli bir aralığı için geçerlidir:

$$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} \quad (4.46)$$

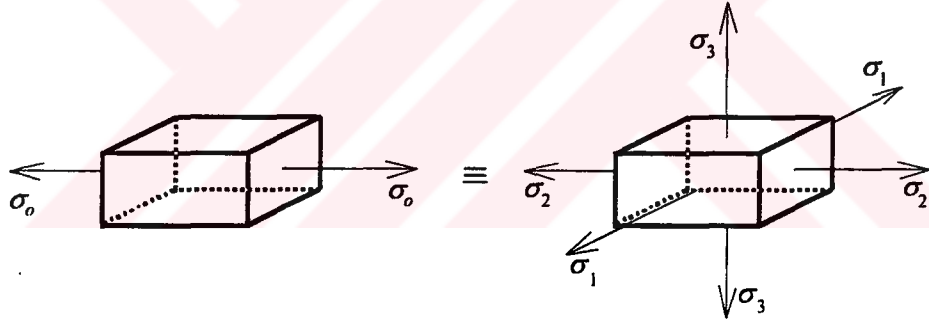
(4.16), (4.27), (4.34), ve (4.43)-(4.45) gözönüne alınarak, σ_{ij} gerilme tansörünün 3 asal gerilmesi:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_m \\ \sigma_m \\ \sigma_m \end{Bmatrix} + \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{J_2} \begin{Bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{Bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{Bmatrix} \xi \\ \xi \\ \xi \end{Bmatrix} + \sqrt{\frac{2}{3}} \rho \begin{Bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{Bmatrix} \quad (4.47)$$

olarak elde edilir.

4.5 Kırılma Hipotezleri

Yapı sistemleri açısından, malzemenin hangi yük sınırında plastik hale geçeceği veya hangi gerilme değeri için kırılma konumuna ulaşacağı oldukça önemli bir sorundur. Tehlikeli* sayılabilecek bu durumları ortaya çıkarabilmek için malzemeyi denemek gerekecektir. Ancak malzeme denemeleri genelde basit çekme ve basit basınç gibi tek eksenli gerilme durumu için yapılır. Fakat gerçekte cisimler daha çok iki eksenli veya üç eksenli gerilme durumu etkisindedir. Bu şekildeki bileşik zorlanmaların, malzemeyi hangi şartlar altında plastik duruma veya kırılma konumuna getireceği, üzerinde durulması gereken en önemli konudur. Bu da malzemenin en genel durumda- üç eksenli gerilme durumunda denenmesi ile mümkün olmaktadır. Ancak üç eksenli gerilme durumunun çeşidi sonsuz sayıda olduğundan, bütün bu durumlar için malzemeyi denemek çok zor hatta imkansızdır. Bu yüzden tek eksenli sınır durumdan, üç eksenli sınır duruma geçmek zorunluluğu doğacaktır.



Şekil 4.15 Gerilme durumları

Şekil 4.15’de, aynı cismin iki tip zorlanması gösterilmiştir. Bunlardan biri tek eksenlidir ve σ_o ile gösterilen gerilme altında cisim sınır duruma ulaşır. İkinci gerilme durumu ise üç eksenli olup, cisim gene sınır durumdadır. Kısaca heriki durum tehlike yönünden özdeş sayılabilir. Bu özdeşliği gerçeklemek için, fizik yönden eşit bu iki durumun gerilmeleri arasındaki bağıntıyı bulmak gerekecektir:

* Burada tehlikeli durum, gevrek malzemelerde kırılma, kopma, ezilme gibi parçalanma hali, plastik özelliğe sahip cisimlerde ise akma hali olarak algılanmalıdır.

$$\sigma_o = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \quad (4.48)$$

Burada f , üç asal gerilmeye bağlı bir fonksiyonu göstermektedir. Üç eksenli gerilme altında cisim henüz kırılma konumuna ulaşmamış veya plastik hale geçmemişse, $\sigma_o > f(\sigma)$ olacaktır.

Cisim homojen ve izotrop ise, f fonksiyonu asal gerilmelerin simetrik bir fonksiyonu olup yalnız onların şiddetine bağlıdır. İç bünye bakımından birbirinden farklı olan her malzeme tipine uygulanabilecek tek bir kriter tanımlamak güçtür (İnan, 1973). Malzeme için plastik hal ve kırılma kriterleri belirlenirken bir takım hipotezler yapılmıştır. Aşağıda bu hipotezlere değinilecektir.

Kırılma veya plastik hale geçişte yapılan hipotezleri üç grupta toplamak mümkündür:

- (α) Gerilme Hipotezleri
- (β) Şekil Değiştirme Hipotezleri
- (γ) Enerji Hipotezleri

Bu hipotezlerden birinci grup, tehlikeli duruma geçişte, gerilmenin ön plana çıktığını, ikinci grup, olaya şekil değiştirmenin hakim olduğunu, üçüncü grup ise şekil değiştirme enerjisinin rolünün daha önemli olduğunu savunmaktadır.

Gerilme-şekil değiştirme bağıntılarını (malzeme kanunları) dikkate almak şartı ile çeşitli açılardan ileri sürülen bu hipotezleri gerilmeler cinsinden ifade etmek mümkün olmaktadır. Çeşitli hipotezleri birbirleri ile karşılaştırmak için bunları geometrik olarak ifade etmek gerekir.

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ile verilen üç eksenli gerilme durumu, uzayda bir K noktasının koordinatı olarak kabul edilirse, farklı gerilme durumları çeşitli noktalara karşı gelecektir. Dolayısı ile mukavemet hipotezleri, tehlikeli durumları tehlikesiz durumlardan ayıran bir sınır yüzeyle ifade edilecek ve iki eksenli gerilme durumunda ise bu sınır yüzeylerin ilgili koordinat

düzlemleri ile olan ara kesit eğrileri ele alınacaktır.

Genelde malzemede akma durumunu tanımlayacak olan kriter,

$$f(\sigma_{ij}, k_1, k_2, \dots) = 0 \quad (4.49)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada k_1, k_2 deneysel olarak hesaplanacak malzeme sabitlerini göstermektedir. (4.49) bağıntısı asal gerilmeler cinsinden,

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, k_1, k_2, \dots) = 0 \quad (4.50)$$

ifade edilebilecektir. (4.50) bağıntısını, seçilen eksen takımından bağımsız hale getirebilmek için bu kez, gerilme tansörünün birinci invaryantı ve deviyatör tansörünün ikinci ve üçüncü invaryantları cinsinden,

$$f(I_1, J_2, J_3, k_1, k_2, \dots) = 0 \quad (4.51)$$

ifade etmek mümkün olmaktadır. Ayrıca, aynı kriterin Haigh-Westergaard koordinatları ile ifadesi,

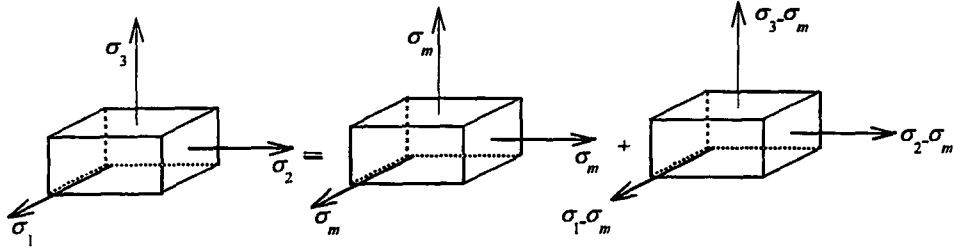
$$f(\xi, \rho, \theta, k_1, k_2, \dots) = 0 \quad (4.52)$$

şeklinde olacaktır.

Bu bölümde, gerilme kaynaklı hipotezler arasında yer alan Mohr-Coulomb kriteri, Drucker-Prager kriteri ile enerji hipotezleri arasında bulunan ve biçim değiştirme enerjisi hipotezine dayanan von Mises kriteri, ana hatlarıyla açıklanmış ve bu kriterlere ait akma fonksiyonları (güç tükenme fonksiyonları) verilmiştir.

4.5.1 von Mises Biçim Değiştirme Enerjisi Hipotezi

Herhangi bir şekil değiştirme durumunu, daima kendine benzer kalmak şartı ile yalnız hacmi değişen hal ile, hacmi sabit kalmak üzere yalnız biçimi bozulan bir diğer hale ayırmak mümkündür. Cisimde gerilme hali, örneğin $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ asal gerilmeleri ile verilmiş olsun. Gerilme hali Şekil 4.16'daki gibi iki durumun toplamı olarak düşünebilir,



Şekil 4.16 Gerilme halleri

Birinci halde bütün asal gerilmeler eşit olduğundan cisim şekil değiştirdikten sonra kendisine benzer kalır. İkinci halde ise hacmin sabit kalması şartının gerçekleşebilmesi için,

$$\theta = \frac{\Delta V - \Delta V_o}{\Delta V_o} \therefore \theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (4.53)$$

$\theta = 0$ olmalıdır. Burada, ΔV_o ve ΔV sırası ile şekil değiştirmeden önceki ve sonraki hacimlerdir. Dolayısıyla,

$$(\sigma_1 - \sigma_m) + (\sigma_2 - \sigma_m) + (\sigma_3 - \sigma_m) = 0 \quad (4.54)$$

olması gerekir. Buradan,

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \sigma_{oct} \quad (4.55)$$

bulunur. Toplam şekil değiştirme enerjisi, $u_i = u_v + u_g$ şeklinde düşünülebilir. Burada u_v ve u_g , sırası ile, hacim değişikliği ve biçim değişikliği ile ilgili enerji terimleridir:

$$u_v = \frac{1}{2E} (3\sigma_m^2 - 2\mu 3\sigma_m^2) = \frac{3}{2E} (1 - 2\mu) \sigma_m^2 = \frac{(1 - 2\mu)}{6E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 \quad (4.56)$$

ve

$$u_g = \frac{1}{6G} \{ \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3) \} \quad (4.57)$$

dir. Hidrostatik basınç deneyinde, dayanımın sınırsız oluşu, tehlikeli durumun doğmasında, hacim değiştirmenin bir rolü olmadığını gösterir. O halde enerji esasına dayalı bir hipotez kurulurken hacim değiştirme enerjisini hesaba katmaya gerek yoktur. Enerjinin, cismin geometrisini değiştirmeye harcanan kısmı -biçim değiştirme enerjisi karşılaştırmada esas alınmalıdır. Biçim değiştirme enerjisi hipotezine genel kayma hipotezi gözüyle bakılabilir. Çünkü oktaedral kayma gerilmesi* ile karşılaştırılacak olursa,

$$\frac{9}{2} \tau_{oct}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3) \quad (4.58)$$

bağıntısı elde edilir. Bu yüzden biçim değiştirme enerjisi oktaedral kayma gerilmesinin karesi ile orantılıdır. Ayrıca maksimum kayma gerilmesi kriteri basit olmasına karşın, ortanca asal gerilmenin etkisini dikkate almadığından bu hipotez ön plana çıkmıştır. Plastik hale veya kırılma durumuna ulaşmada maksimum kayma gerilmesi yerine daha uygun olan oktaedral kayma gerilmesini dikkate alan bu kriter von Mises (1913) tarafından önerilmiştir. Karşılaştırma, üç eksenli ve bir eksenli zorlamalarda biçim değiştirme enerjilerinin eşit olması kabul edilerek yapılır:

$$* \tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3} J_2} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)}$$

$$\frac{1}{6G} \{ \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3) \} = \frac{1}{6G} \sigma_o^2 \quad (4.59)$$

İfade sadeleştirilirse,

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3) = \sigma_o^2 \quad (4.60)$$

elde edilir. (4.60) bağıntısından, eşitliğin sol tarafındaki terimin, gerilme deviyatörü tansörünün ikinci invariantının 3 katı olduğu görülmektedir. Bu durumda kriter,

$$3J_2 - \sigma_o^2 = 0 \quad (4.61)$$

$$J_2 - \frac{\sigma_o^2}{3} = 0$$

şeklini alacaktır. $\sigma_o^2/3$ değerine k^2 denilirse, (4.61) bağıntısı, J_2 ye bağlı bir akma fonksiyonunu ifade eder,

$$f(J_2) = J_2 - k^2 = 0 \quad (4.62)$$

Burada k teorik kesmedeki akma gerilmesi olarak tanımlanmaktadır ve

$$k = \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} \quad (4.63)$$

eşitliği görülebilmektedir. (4.62) bağıntısı, (4.60) ve (4.63) bağıntıları dikkate alınarak, asal gerilmeler cinsinden,

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3) = \sigma_o^2 = 3k^2 \quad (4.64)$$

veya

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 6k^2 \quad (4.65)$$

şeklinde ifade edilebilir. (4.65) bağıntısı gerilme uzayında, her iki tarafından açık olan bir silindirik yüzeyi göstermektedir.

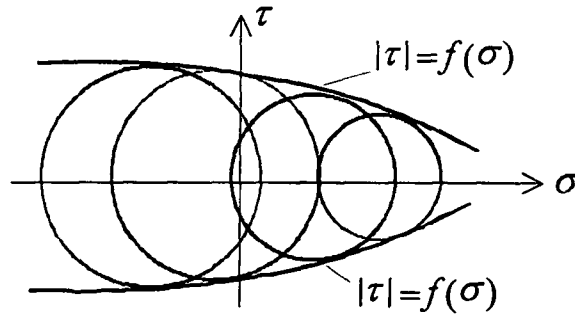
von Mises kriteri her ne kadar hidrostatik basınçta olduğu gibi hidrostatik çekme için de bir sınır tanırsa da, özellikle uzaması fazla olan malzemeler için iyi sonuçlar vermektedir.

4.5.2 Mohr-Coulomb Kayma Gerilmesi Hipotezi

Mohr kriteri (1900), plastik hale geçmede en büyük kayma gerilmesinin hakim olduğunu kabul etmektedir. Söz konusu kriterde kritik kayma gerilmesinin, etkidiği yüzeydeki normal gerilme σ nın bir fonksiyonu olduğu varsayılmaktadır,

$$|\tau| = f(\sigma) \quad (4.66)$$

burada $f(\sigma)$, deneysel olarak saptanan bir fonksiyondur. (4.66) bağıntısının Mohr tasvir sistemindeki grafik anlamı, malzemedeki akmanın, en büyük asal dairenin, $f(\sigma)$ sınır eğrisine teğet olması durumunda meydana geleceğidir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 Mohr kriterinin grafik gösterimi

Yukarıdaki açıklamalardan anlaşıldığı gibi Mohr Gerilme Hipotezi, en büyük kayma gerilmesinin, üzerine etkiyen normal gerilmeye bağlı bir fonksiyon ile ifade edileceğini ve bu fonksiyonun her malzeme için deneysel yolla belirlenebileceğini kabul etmektedir.

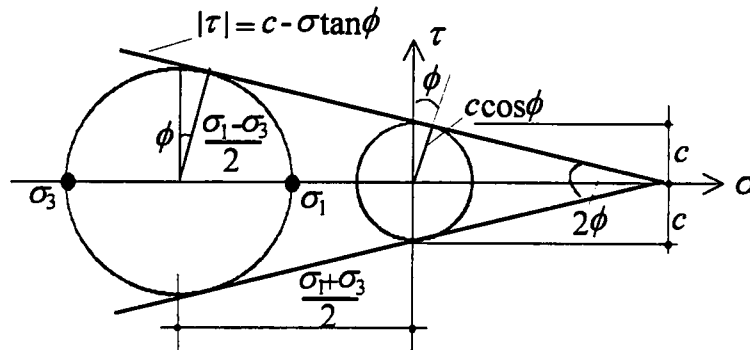
Mohr kriterinin daha basit formu, $f(\sigma)$ nın bir doğru denklemi ile ifadesidir (Şekil 4.18). Bu *Coulomb* denklemi (1773) olarak bilinmektedir. Denklem,

$$|\tau| = c - \sigma \tan \phi \quad (4.67)$$

şeklindedir. Burada c kohezyon, ϕ içsel sürtünme ile ilgili deneysel olarak saptanacak malzeme sabitleridir. (4.67) bağıntısı, akma sınır durumunu ifade eder ve *Mohr-Coulomb kriteri* olarak bilinir. (4.67) bağıntısından ve $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ durumu için Mohr-Coulomb kriteri,

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos \phi = c - \left[\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \phi \right] \tan \phi \quad (4.68)$$

şeklinde olacaktır.



Şekil 4.18 Mohr-Coulomb Kriterinin grafik gösterimi (Chen ve Han, 1988)

(4.68) bağıntısının düzenlenmesi ile,

$$\sigma_1 \frac{1 + \sin \phi}{2c \cos \phi} - \sigma_3 \frac{1 - \sin \phi}{2c \cos \phi} = 1 \quad (4.69)$$

elde edilecektir. Eğer burada,

$$\frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} = f_c \quad (4.70)$$

ve

$$\frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi} = f_t \quad (4.71)$$

tanımlamaları yapılacak olursa (4.69) bağıntısı,

$$\frac{\sigma_1}{f_t} - \frac{\sigma_3}{f_c} = 1 ; \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (4.72)$$

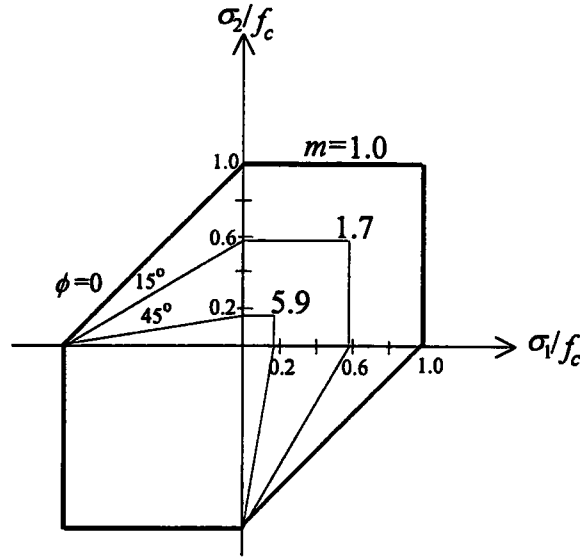
şeklini alacaktır. Burada f_t, f_c , sırası ile, çekme ve basınç mukavemetleridir. Çoğunlukla (4.72) bağıntısı bir m parametresine bağlı olarak ifade edilir;

$$m = \frac{f_c}{f_t} = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4.73)$$

olmak üzere (4.72) bağıntısı,

$$m\sigma_1 - \sigma_3 = f_c ; \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (4.74)$$

şeklini alır. $\sigma_1 - \sigma_2$ düzleminde, Mohr-Coulomb kriteri için kırılma yüzeyi, m nin çeşitli değerleri için çizilmiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19 $\sigma_1 - \sigma_2$ düzleminde Mohr-Coulomb kriteri (Chen ve Han, 1988)

Mohr-Coulomb kriterini üç boyutlu şekilde gösterebilmek için yine (4.47) bağıntısı kullanılırsa, (4.69) bağıntısı,

$$f(I_1, J_2, \theta) = \frac{1}{3} I_1 \sin \phi + \sqrt{J_2} \sin \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) + \frac{\sqrt{J_2}}{\sqrt{3}} \cos \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) \sin \phi - c \cos \phi = 0 \quad (4.75)$$

veya ξ, ρ, θ değişkenleri cinsinden,

$$f(\xi, \rho, \theta) = \sqrt{2} \xi \sin \phi + \sqrt{3} \rho \sin \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) + \rho \cos \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) \sin \phi - \sqrt{6} c \cos \phi = 0 \quad (4.76)$$

şeklini alır ($0 \leq \theta \leq \pi/3$). Asal gerilme uzayında, bu, bir düzensiz altı yüzlü piramit ile tasvir edilecektir; meridyenleri bir doğru (Şekil 4.20a) ve π -düzlemindeki kesiti düzensiz bir altıgen olacaktır (Şekil 4.20b). Söz konusu altıgeni çizebilmek için sadece iki

karakteristik uzunluğun bilinmesi yeterli olacaktır. π -düzleminde bu uzunluklar,

$\xi = 0, \theta = 0^\circ \rightarrow \rho_{to}$ ve $\xi = 0, \theta = \frac{\pi}{3} \rightarrow \rho_{co}$ ile (4.76) bağıntısından,

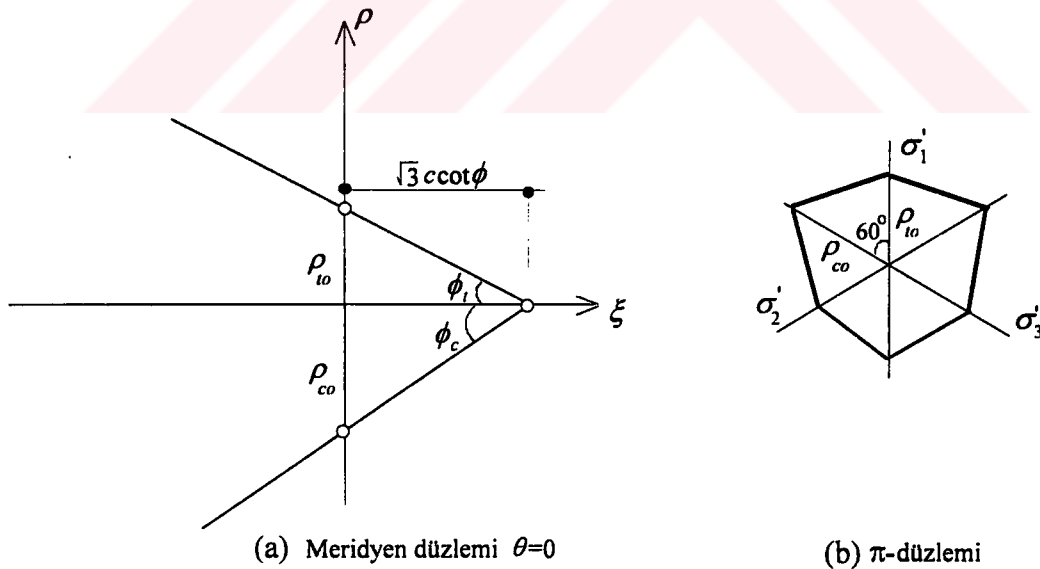
$$\rho_{to} = \frac{2\sqrt{6}c \cos \phi}{3 + \sin \phi} \quad (4.77)$$

$$\rho_{co} = \frac{2\sqrt{6}c \cos \phi}{3 - \sin \phi} \quad (4.78)$$

olarak bulunacaktır. Ayrıca söz konusu uzunluklar arasındaki oran,

$$\frac{\rho_{to}}{\rho_{co}} = \frac{3 - \sin \phi}{3 + \sin \phi} \quad (4.79)$$

olacaktır.



Şekil 4.20 Asal gerilme uzayında Mohr-Coulomb kriterinin grafik gösterimi
(Chen ve Han, 1988)

4.5.3 Drucker-Prager Kriteri

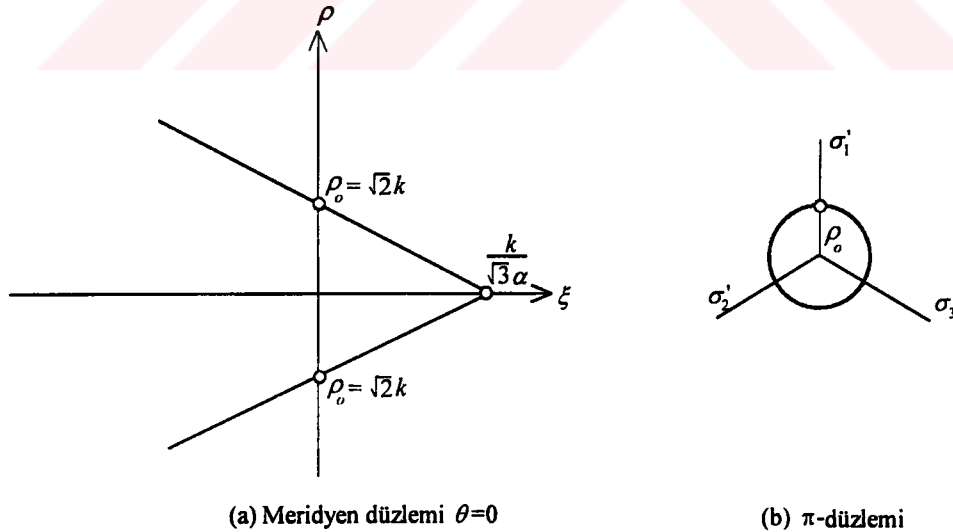
Drucker-Prager kriteri(1952), gerilme kaynaklı bir hipotezdir ve von Mises kriterinin basitleştirilmiş formu olduğu söylenebilir. Drucker-Prager, akma kriterini, von Mises kriterinde hidrostatik gerilme etkisini ek bir terim ile dikkate alarak,

$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (4.80)$$

veya ξ, ρ değişkenleri cinsinden,

$$f(\xi, \rho) = \sqrt{6}\alpha\xi + \rho - \sqrt{2}k = 0 \quad (4.81)$$

şeklinde ifade etmiştir. Burada α ve k malzeme sabitleridir. $\alpha=0$ olması durumunda kriter, von Mises kriteri [Bağıntı (4.62)] ile aynı olacaktır. (4.81) bağıntısının gösterdiği akma yüzeyi asal gerilme uzayında bir dairesel konidir. Meridyenleri ve π -düzlemindeki kesiti Şekil 4.21a,b'de görülmektedir.

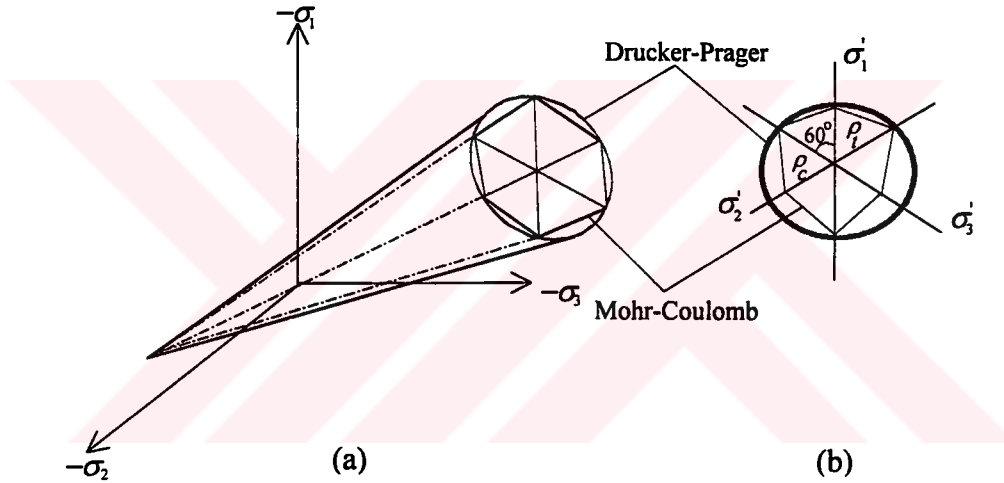


Şekil 4.21 Drucker-Prager kriteri (Chen ve Han, 1988)

Şekil 4.21'den görülebileceği gibi, Drucker-Prager kriteri, Mohr-Coulomb kriterine oldukça yakındır. Mesela, Drucker-Prager dairesi, Mohr-Coulomb altıgenine dıştan çizilen bir sınır daire olarak düşünülürse, iki yüzey $\theta = \pi/3$, α , k ile belirlenecek basınç meridyenine uygun düşer. Burada α ve k değerleri, Mohr-Coulomb kriterindeki [Bağıntı (4.69)] ϕ ve c değerlerine bağlı,

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}, \quad k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (4.82)$$

olacak şekilde belirlenebilir.

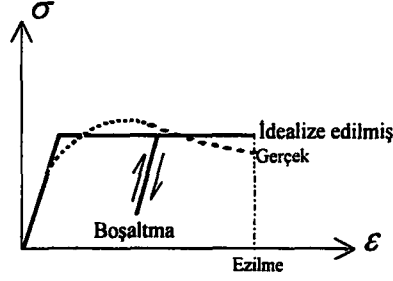


Şekil 4.22 Drucker-Prager ve Mohr-Coulomb kriterlerinin karşılaştırılması,
(a) asal gerilme uzayında, (b) deviyatör düzlemde (Chen ve Han, 1988)

(4.80) bağıntısındaki sabitlerle belirlenen koni, Mohr-Coulomb akma yüzeyindeki altıgen piramidi çevreleyen bir dış sınır görünümündedir (Şekil 4.22). Ayrıca çekme meridyeninden (ρ_t) geçen, $\theta = 0^\circ$ ile belirlenecek iç koniyi belirleyecek sabitler,

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)}, \quad k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (4.83)$$

plastik şekil değiştirmelerin sabit bir akma gerilmesi altında meydana geldiği kabul edilmiş olur. Bu davranış *mükemmel* veya *ideal plastik* davranış olarak bilinir. Daha önce de belirtildiği gibi bu tip davranış karmaşık yapısal sistemlerin hesabında büyük bir kolaylık sağlar.



Şekil 4.24 Beton için idealize edilmiş gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı

Malzemenin bileşik gerilme durumu altındaki gerçek davranışını, akma noktasından sonra düz, yatay bir doğru ile ifade etmek pek gerçeğe uymaz. Burada çözülmesi gereken önemli sorun iki eksenli gerilme deneylerine uygun sonuçlar verecek bir gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisinin ne şekilde sağlanacağıdır.

4.7 Elastik Limit ve Akma Fonksiyonu

Malzemenin mümkün olabilecek gerilme hali altındaki elastik limiti σ_{ij} gerilmeleri cinsinden bir akma fonksiyonu olarak,

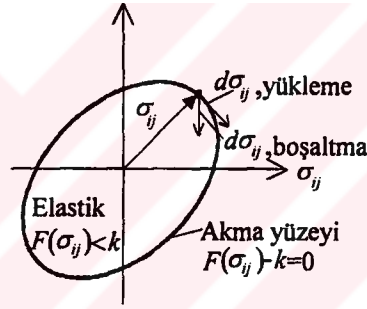
$$f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{ij}) - k = 0 \quad (4.86)$$

şeklinde ifade edilmektedir. (4.86) bağıntısı, gerilme uzayında bir dayanım yüzeyini (akma yüzeyi) iyi bir şekilde ifade edebilmesi açısından oldukça önemlidir. Bilindiği gibi söz konusu yüzey maksimum normal gerilme kriteri için bir küp, von Mises kriteri için bir silindir, Drucker-Prager kriteri için ise bir konidir. Tam-plastik malzemeler için akma fonksiyonun değişmediği sabit kaldığı varsayıldığından (4.86) ifadesi bir sabit değer olan

k değerine eşit olacaktır; $f(\sigma_{ij}) = k$. Gerilme uzayındaki akma yüzeyi Şekil 4.25’de gösterilmiştir.

4.8 Yükleme ve Boşaltma Evreleri

Bir noktadaki gerilme, akma yüzeyi sınırındaysa plastik şekil değiştirmeler meydana gelecektir. Plastik akışın devam edebilmesi için gerilme durumunun değişmemesi yani gerilmelerin akma yüzeyi üzerinde kalması gerekmektedir. Bu durum *yükleme* evresi olarak isimlendirilir (Şekil 4.25). Diğer taraftan gerilmeler akma sınırının altına düşerse,



Şekil 4.25 Elastik-tam plastik malzeme için yükleme ve boşaltma durumunda, akma yüzeyi

plastik şekil değiştirme oluşmaz ve tüm şekil değiştirmeler elastik aşamada kalır. Bu durum da *boşaltma* evresi olarak isimlendirilir (Şekil 4.25). σ_{ij} ile ifade edilen bir gerilme durumu dikkate alınır ve burada σ_{ij} ye çok küçük bir artım verilirse ($d\sigma_{ij}$), bu artım plastik şekil değiştirmeye neden olabilecektir. Tam-plastik malzemelerde gerilmeler akma yüzeyi dışına çıkmaz, dolayısı ile plastik şekil değiştirmeler sadece söz konusu gerilmenin akma yüzeyi üzerine düşmesi durumunda meydana gelir.

Plastik akış kuralı veya yükleme kriteri,

$$f(\sigma_{ij}, k) = 0 \text{ ve } df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} = 0 \quad (4.87)$$

şeklinde tanımlanır. Boşaltma kriteri ise,

$$f(\sigma_{ij}, k) = 0 \text{ ve } df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} < 0 \quad (4.88)$$

olacaktır. Sonuç olarak, akma fonksiyonu $f(\sigma_{ij})$ ilave plastik şekil değiştirme için *yükleme kriteri* olarak veya elastik şekil değiştirme için *boşaltma kriteri* olarak dikkate alınabilecektir. Akma fonksiyonu veya $f(\sigma_{ij})$ yüzeyi, bu yüzden, *yükleme yüzeyi* ve/veya *yükleme fonksiyonu* olarak isimlendirilir.

4.9 Elastik ve Plastik Şekil Değiştirme Artım Tansörleri

Toplam şekil değiştirme artım tansörü, elastik ve plastik şekil değiştirme artım tansörlerinin toplamı olarak düşünülebilir:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (4.89)$$

Burada $d\varepsilon_{ij}^e$ toplam şekil değiştirme artım tansörünün elastik kısmını ifade eder ve,

$$d\varepsilon_{ij}^e = D_{ijkl} d\sigma_{kl} \quad (4.90a)$$

şeklindedir. Burada D_{ijkl} , elastik malzeme tansörü C_{ijkl} nin inversidir ve izotropik elastik malzemeler için,

$$C_{ijkl} = \frac{E}{2(1+\mu)} \left[\frac{2\mu}{1-2\mu} \delta_{ij} \delta_{kl} + \delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk} \right] \quad (4.90b)$$

$$D_{ijkl} = \frac{(1+\mu)}{2E} \left[-\frac{2\mu}{1+\mu} \delta_{ij} \delta_{kl} + \delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk} \right] \quad (4.90c)$$

şeklindedir. Şekil değiştirme artım tansörü,

$$d\varepsilon_{ij}^e = \frac{1}{9K} dI_1 \delta_{ij} + \frac{1}{2G} ds_{ij} \quad (4.91)$$

şeklini alır. Burada G kayma modülü, K ise hacımsal modüldür ve

$$K = K(I_1) = K(\sigma_{oct}); G = G(J_2) = G(\tau_{oct}) \quad (4.92)$$

olarak tanımlanır (Chen ve Han, 1988).

4.10 Plastik Potansiyel ve Akış Kuralı

Akış kuralı, plastik şekil değiştirme veya plastik akış için oldukça gerekli bir kinematik varsayımdır. Söz konusu kural, plastik şekil değiştirme artım tansörü $d\varepsilon_{ij}^p$ nin bileşenlerinin göreceli büyüklüklerini verir. $d\varepsilon_{ij}^p$, Şekil 4.26'dan da izleneceği gibi, geometrik olarak 9 bileşenli bir vektör olarak gösterilmiştir ve akış kuralı plastik şekil değiştirme artım vektörü $d\varepsilon_{ij}^p$ nin şekil değiştirme uzayında doğrultusunu tanımlar.

Bilindiği gibi elastik şekil değiştirme, gerilme tansörüne (σ_{ij}) bağlı değişen bir elastik potansiyel fonksiyonun diferansiyelinden hesaplanabilir:

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{\partial Q(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4.93)$$

1928'de, von Mises, gerilme tansörünün skaler bir fonksiyonu olan plastik potansiyel fonksiyonu bulmuştur; $g(\sigma_{ij})$. Buna bağlı olarak, plastik akış denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4.94)$$

Burada $d\lambda$, skaler orantılılık çarpanıdır ve sadece plastik şekil değiştirmelerin oluşması durumunda sıfırdan farklı bir değer alır. $g(\sigma_{ij}) = \text{sabit}$ denklemi ise 9 bileşenli gerilme uzayında plastik potansiyel yüzeyi tanımlar. Söz konusu yüzeyin doğrultu kosinüsleri ve normal vektörleri $\partial g / \partial \sigma_{ij}$ ile orantılıdır. (4.94) bağıntısı, plastik akış vektörünün ($d\varepsilon_{ij}^p$) plastik potansiyel yüzeyine dik olduğunu göstermektedir (Şekil 4.26).

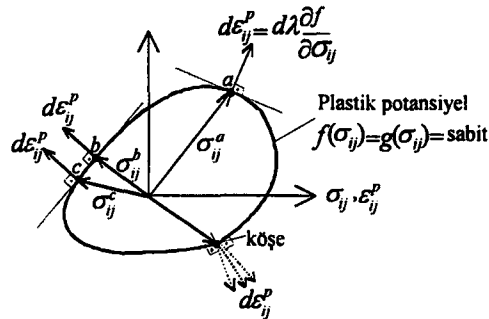
Genelde, kolaylık olması açısından plastik potansiyel fonksiyonu, akma fonksiyonu olarak dikkate alınır, $f = g$, böylece (4.94) bağıntısı,

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4.95)$$

şeklini alır. Ayrıca (4.95) bağıntısı, plastik akışın bir akma kriterine bağlı olması nedeniyle *birleşik akış kuralı* olarak anılır. $f \neq g$ alınması durumunda ise aynı denklem *birleşik olmayan akış kuralı* olarak isimlendirilir. von Mises, malzeme için plastik gerilme-birim şekil değiştirme bağıntılarını, birleşik akış kuralını kullanarak geliştirmiştir. Birleşik akış kuralı için üç önemli noktayı belirtmek gerekir:

- Birleşik akış kuralı, plastik şekil değiştirme sırasında harcanan işin tekrar kullanılamadığı, geriye dönüşümsüz plastik malzemeler için geçerlidir.

- Birleşik akış kuralı üzerine kurulu, malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme kanunu bir sınır değer probleminin tek çözümü olarak sonuçlanır.
- Birleşik akış kuralı, birçok kompleks formdaki akma yüzeylerini (yükleme yüzeyleri) dikkate alarak, plastisite denklemlerinin uygun bir şekilde formüle edilmesini mümkün kılmaktadır.



Şekil 4.26 Birleşik akış kuralının geometrik gösterimi

4.11 Bünyeye Bağıntıları

Bölüm 4.9’da belirtildiği gibi toplam şekil değiştirme artım vektörü, elastik ve plastik iki kısmının toplamı olarak düşünülebilir [Bağıntı (4.89)]:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (4.96)$$

Elastik şekil değiştirme artım tansörü Hooke kanunundan elde edilebilir [Bağıntı (4.90a) ve (4.91)]:

$$d\varepsilon_{ij}^e = D_{ijkl} d\sigma_{kl} \quad (4.97)$$

veya

$$d\varepsilon_{ij}^e = \frac{1}{9K} dI_1 \delta_{ij} + \frac{1}{2G} ds_{ij} \quad (4.98)$$

Plastik şekil değiştirme artım tansörü ise akış kuralı yardımıyla bulunur [Bağıntı (4.95)].
Sonuç olarak elastik-tam plastik malzemeler için gerilme-birim şekil değiştirme bağıntısı ,

$$d\varepsilon_{ij} = D_{ijkl}d\sigma_{kl} + d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4.99)$$

veya

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{1}{9K} dI_1 \delta_{ij} + \frac{1}{2G} ds_{ij} + d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4.100)$$

şeklinde olacaktır. Buradaki $d\lambda$ parametresi aşağıdaki değerleri alacaktır,

$$d\lambda \begin{cases} = 0 ; f \leq 0, df < 0 \\ > 0 ; f = 0, df = 0 \end{cases} \quad (4.101)$$

$d\lambda$ ayrıca gerilme-birim şekil değiştirme bağıntılarında, uygunluk şartının gerçekleşmesi ile de hesaplanabilir:

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} = 0 \quad (4.102)$$

Bu, artımsal değişimden ($d\sigma_{ij}$) sonra oluşan gerilme durumunun ($\sigma_{ij} + d\sigma_{ij}$), f akma kriterini sağladığını gösterir:

$$f(\sigma_{ij}) + \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} = f(\sigma_{ij}) + df = f(\sigma_{ij}) \quad (4.103)$$

(4.99) bağıntısının çözülmesi veya doğrudan Hooke kanununun^{*}, akış kuralının, (4.95) ve (4.96) bağıntılarının kullanılmasıyla gerilme artım tansörü,

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl}(d\varepsilon_{kl} - d\varepsilon_{kl}^p) = C_{ijkl}d\varepsilon_{kl} - d\lambda C_{ijkl} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} \quad (4.104)$$

şeklinde elde edilir. (4.104) bağıntısı, (4.102) bağıntısında yerine konulursa $d\lambda$,

$$d\lambda = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} C_{ijkl} d\varepsilon_{kl}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{rs}} C_{rstu} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}}} \quad (4.105)$$

olarak bulunur. Ayrıca (4.105) bağıntısı, (4.104)'de yerine konulacak olursa, artımsal gerilme-birim şekil değiştirme bağıntısı,

$$d\sigma_{ij} = \left\{ C_{ijkl} - \frac{C_{ijmn} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{pq}} C_{pqkl}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{rs}} C_{rstu} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{tu}}} \right\} d\varepsilon_{kl} \quad (4.106)$$

şeklinde elde edilir. Bağıntılardaki indisler uygun bir şekilde değiştirilebilir. Parantez içindeki tansörel bağıntı, elastik-tam plastik malzemeler için teğetsel modülün elastik-plastik tansörünü ifade eder,

$$C_{ijkl}^{ep} = C_{ijkl} - \frac{C_{ijmn} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{pq}} C_{pqkl}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{rs}} C_{rstu} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{tu}}} \quad (4.107)$$

* Hooke kanunu: $\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$

(4.107) bağıntısı, elastik-tam plastik malzemeler için en genel formdaki bünyesel bağıntıdır.

Gerilme artımlarının, akma fonksiyonu $f(\sigma_{ij})$ ve şekil değiştirme artımlarından $d\varepsilon_{ij}$ kolayca hesaplanabileceği açıktır. Diğer bir deyişle, eğer gerilme durumu biliniyorsa ve şekil değiştirme artımları hesaplanabiliyorsa, (4.106) bağıntısından gerilme artımları bulunabilir.

Elastik malzeme tansörü C_{ijkl} , E ve μ veya G ve K cinsinden bünye denklemlerinde ifade edilmek istenirse, bunun için, (4.90b) bağıntısının, (4.105)'de yerine konulması gerekir:

$$d\lambda = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\varepsilon_{ij} + \frac{\mu}{1-2\mu} d\varepsilon_{kk} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \delta_{ij}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{rs}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{rs}} + \frac{\mu}{1-2\mu} \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{rs}} \delta_{rs} \right)^2} \quad (4.108)$$

$\mu = \{(3K - 2G)/(3K + G)\}/2$, (4.108) bağıntısında yerine konulursa,

$$d\lambda = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\varepsilon_{ij} + \frac{3K - 2G}{6G} d\varepsilon_{kk} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \delta_{ij}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{rs}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{rs}} + \frac{3K - 2G}{6G} \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{rs}} \delta_{rs} \right)^2} \quad (4.109)$$

olur. Ayrıca C_{ijkl} nin (4.90b)'deki değeri, (4.104)'de yerine konulursa,

$$d\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\mu} d\varepsilon_{ij} + \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} d\varepsilon_{kk} \delta_{ij} -$$

$$d\lambda \left[\frac{E}{1+\mu} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} \delta_{mn} \delta_{ij} \right] \quad (4.110)$$

veya G ve K cinsinden,

$$d\sigma_{ij} = 2Gde_{ij} + Kd\varepsilon_{kk}\delta_{ij} - d\lambda \left[\left(K - \frac{2}{3}G \right) \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} \delta_{mn} \delta_{ij} + 2G \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \right] \quad (4.111)$$

şeklinde elde edilir.

Pek çok malzeme için akma fonksiyonu genelde aşağıdaki forma uymaktadır:

$$f(\sigma_{ij}) = F(I_1, \sqrt{J_2}) - k = 0 \quad (4.112)$$

Dolayısıyla bu fonksiyonun gerilme tansörüne göre kısmi türevi,

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial f}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial f}{\partial \sqrt{J_2}} \frac{\partial \sqrt{J_2}}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4.113)$$

veya

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial f}{\partial I_1} \delta_{ij} + \frac{1}{2\sqrt{J_2}} \frac{\partial f}{\partial \sqrt{J_2}} s_{ij} \quad (4.114)$$

şeklinde olacaktır. (4.114) bağıntısı yardımıyla, (4.111) bağıntısı,

$$d\sigma_{ij} = 2Gde_{ij} + Kd\varepsilon_{kk}\delta_{ij} - d\lambda \left[3K \frac{\partial f}{\partial I_1} \delta_{ij} + \frac{G}{\sqrt{J_2}} \frac{\partial f}{\partial \sqrt{J_2}} s_{ij} \right] \quad (4.115)$$

şekline dönüşür. Bağıntıdaki $d\lambda$ ise,

$$d\lambda = \frac{3Kd\varepsilon_{kk} \frac{\partial f}{\partial I_1} + \frac{G}{\sqrt{J_2}} \frac{\partial f}{\partial \sqrt{J_2}} s_{mn} de_{mn}}{9K \left(\frac{\partial f}{\partial I_1} \right)^2 + G \left(\frac{\partial f}{\partial \sqrt{J_2}} \right)^2} \quad (4.116)$$

şeklindedir.

4.12 Drucker-Prager Modeli

Drucker-Prager kriteri için akma fonksiyonu,

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (4.117)$$

dir; burada α ve k malzeme sabitleridir. Asal gerilme uzayında akma yüzeyi bir silindirik koni olacaktır. (4.99), (4.100) ve (4.116)'ya göre gerilme-birim şekil değiştirme bağıntısı, akma fonksiyonuna [Bağıntı (4.117)] uygun olacak şekilde,

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{1}{9K} dI_1 \delta_{ij} + \frac{1}{2G} ds_{ij} + d\lambda \left(\frac{s_{ij}}{2\sqrt{J_2}} + \alpha \delta_{ij} \right) \quad (4.118)$$

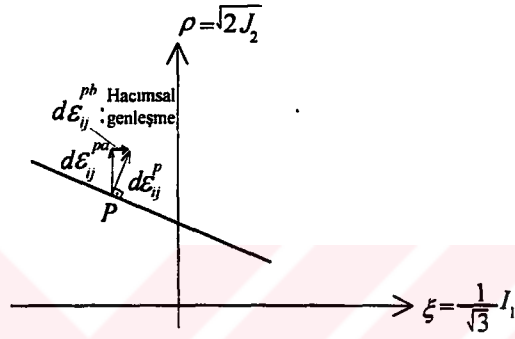
olarak ifade edilebilir; burada $d\lambda$,

$$d\lambda = \frac{3K\alpha d\varepsilon_{kk} + \frac{G}{\sqrt{J_2}} s_{mn} de_{mn}}{9K(\alpha)^2 + G} \quad (4.119)$$

dir. (4.119) bağıntısının sağ tarafında yer alan üçüncü terim, kübik genişlemenin plastik oranı,

$$d\varepsilon_{kk}^p = 3\alpha d\lambda \quad (4.120)$$

şeklinde tanımlanır. (4.120) bağıntısı, plastik şekil değiştirmelerin, $\alpha \neq 0$ olması durumunda hacımdaki artımlardan meydana geleceğini gösterir. Bu özellik *genleşme* olarak bilinir. Negatif hidrostatik eksen doğrultusundan açık herhangi bir akma yüzeyi için, plastik hacımsal genleşme, akma durumunda meydana gelir. Akma yüzeyinin meridyenleri, akma yüzeyi ile meridyen düzlemi arasında kalan kesit eğrileridir: $\theta = \text{sabit}$. Şekil 4.27’de negatif hidrostatik eksen doğrultusundan açık, Drucker-Prager akma yüzeyinin meridyeni gösterilmiştir.



Şekil 4.27 Drucker-Prager akma yüzeyinde plastik hacımsal genleşme

Birleşik akış kuralı plastik şekil değiştirme artım vektörü $d\epsilon_{ij}^p$ nin her akma noktasında (P) akma yüzeyine dik olmasını gerektirir. Plastik şekil değiştirme artım vektörü $d\epsilon_{ij}^p$, ρ ve ξ eksenlerine göre bileşenlere ayrılabilir: $d\epsilon_{ij}^{pa}, d\epsilon_{ij}^{pb}$. Yatay bileşen, akma yüzeyinin negatif hidrostatik eksen doğrultusundan açık olması durumunda daima pozitif olan plastik hacımsal değişimi ifade etmektedir. Toplam hacımsal şekil değiştirmedeki artım, $d\epsilon_{kk} = d\epsilon_{kk}^e + d\epsilon_{kk}^p$, (4.114) bağıntısından ve $d\lambda$ ise (4.119) bağıntısından hesaplanabilir, (4.118) bağıntısından,

$$d\epsilon_{kk} = \frac{dI_1}{3K} + 3\alpha \frac{\frac{G}{\sqrt{J_2}} \left\{ \sigma_{mn} d\epsilon_{mn} - I_1 \frac{d\epsilon_{kk}}{3} \right\} + 3K\alpha d\epsilon_{kk}}{G + 9K\alpha^2} \quad (4.121)$$

olduğu bilinmektedir. Bağıntı düzenlenirse,

$$d\varepsilon_{kk} = \frac{\sqrt{J_2} dI_1}{3KGk} (G + 9K\alpha^2) + \frac{3\alpha}{k} \sigma_{mn} d\varepsilon_{mn} \quad (4.122)$$

elde edilir. (4.117) bağıntısı ile verilen akma fonksiyonu, (4.115) ve (4.116)'da yerine konulursa, Drucker-Prager malzeme modeli için gerilme artım tansörü ile ilgili bağıntı,

$$d\sigma_{ij} = 2Gde_{ij} + Kd\varepsilon_{kk}\delta_{ij} - d\lambda \left[3K\alpha\delta_{ij} + \frac{G}{\sqrt{J_2}} s_{ij} \right] \quad (4.123)$$

elde edilir. (4.123) bağıntısı, sonlu eleman formülasyonuna daha uygun olması açısından,

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl}^{ep} d\varepsilon_{kl} \quad (4.124)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada;

$$C_{ijkl}^{ep} = 2G\delta_{ik}\delta_{jl} + \left(K - \frac{2}{3}G \right) \delta_{ij}\delta_{kl} - \frac{\frac{G}{\sqrt{J_2}} s_{ij} + 3K\alpha\delta_{ij}}{G + 9K\alpha^2} \left(\frac{G}{\sqrt{J_2}} s_{kl} + 3K\alpha\delta_{kl} \right) \quad (4.125)$$

dir; C_{ijkl}^{ep} , Drucker-Prager malzeme modeli için teğetsel modül elastik-plastik tansörünün özel bir halidir.

4.12.1 Modelin Beton ve Betonarme Elemanlara Uygulanması

Beton ve betonarme elemanlara plastisite teorisinin uygulanması, öncelikle uygun bir akma kriterinin seçimine bağlıdır. Özellikle çok eksenli basınç gerilmelerinin baskın olduğu durumlarda, betonun doğrusal olmayan davranışını ancak bu şekilde ifade etmek mümkün olabilmektedir.

Yarı gevrek bir malzeme olan betonda, kohezyonun artan yükler altında yitirilmesi sırasında, içsel sürtünme kuvvetlerinin sebep olduğu enerji kaybını da analitik olarak ifade edebilen böyle bir akma şartı,

$$f(\sigma) = c \quad (4.126)$$

şeklinde olmalıdır (Böl. 4.5.2, 4.5.3). Burada c değeri başlangıçtaki kohezyonu göstermektedir. En çok Mohr-Coulomb ve Drucker-Prager kriteri bu amaçla kullanılmaktadır.

Bu bölüm, beton gibi stabil çatlak gelişiminde hasarlı yüzeyler arası sürtünme kuvvetlerinin ve kohezyonun önem kazandığı granüler malzemelerde, Drucker-Prager kriteri kullanılarak yapılan sonlu eleman uygulamalarını içermektedir. Ayrıca Drucker-Prager akma kriterinin ihtiyaç duyduğu parametrelerin bağlı olduğu kohezyon değeri için analitik bir bağıntı önerilmektedir (Doran vd., 1998). Önerilen plastik modelin beton ve betonarme elemanlara uygulanışına ait örnekler verilmiş, sonuçlar gösterilmiştir.

Günümüzde statik ve dinamik etkiler altında betonarme elemanların hesabı, yüklemenin, malzeme davranışının ve sayısal çözüm yöntemlerinin dikkate alınmasını gerektirmektedir. Yükleme ile betonarme yapıların hesap ve boyutlandırılmasında esas alınacak belirli yükler kastedilmektedir. Beton için önerilen genelleştirilmiş malzeme davranış denklemleri (bünye denklemleri) ise genellikle monotonik yüklere maruz betonarme elemanların temel karakteristiklerini tanımlayacak üç boyutlu gerilme-birim şekil değiştirme ilişkilerini vermektedir. Bünye denklemleri, betonarme yapıların hesabında ihtiyaç duyulan en önemli bağıntılardır. Ancak betonun doğrusal olmayan davranışına ait matematiksel modellerin oluşturulabilmesi, beton ve donatı çeliği davranışları ile birlikte çelikle beton arasındaki bağ mekanizmasının (aderans) düşünülmesini gerektirir. Donatı çeliğinin eksenel kuvvet ilettiğini varsaymak gerçeğe yakın bir kabüldür. Beton için ise gereksenen çok eksenli gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisidir.

Betonarme elemanların kompozit davranışını ifade etmek için, her iki malzeme ile ilgili gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi (malzeme modeli) seçilmelidir. Bu çalışmada beton ve çelik arasında tam bir bağın olduğu varsayılmıştır.

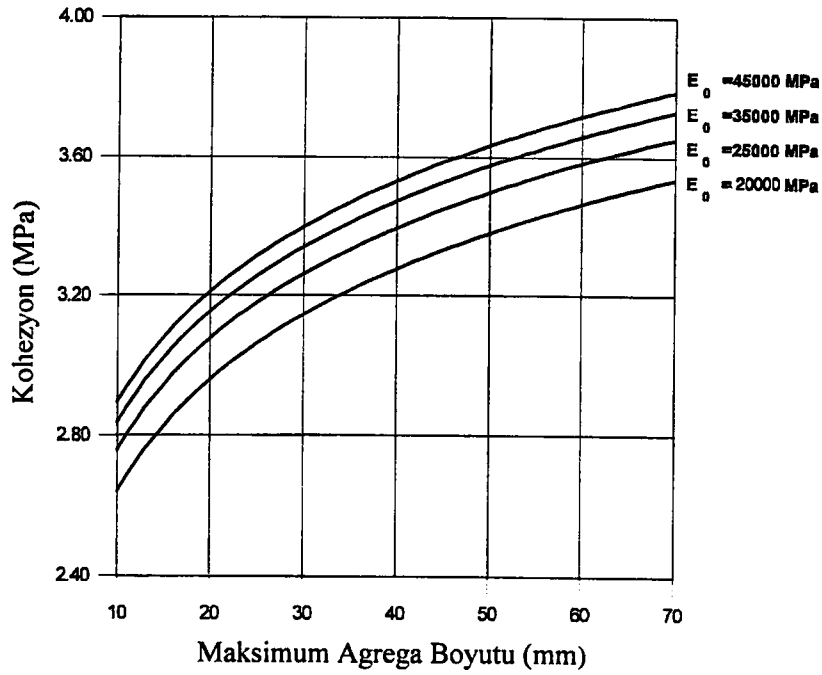
Sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan bilgisayar programları genellikle elastik, doğrusal olmayan elastik ve plastik modellerle statik ve dinamik yükler altında iki boyutlu analiz şeklinde sınırlandırılmıştır. Bu çalışmada, betonarme kirişlerin belirli yükler altında, plastik analizleri ANSYS programı ile gerçekleştirilmiştir. Analizde Drucker-Prager akma kriteri kullanılmıştır.

Son yıllarda, malzemelerin bünye denklemlerinin belirlenmesinde kullanılan pek çok matematik model geliştirilmiştir. Söz konusu modeller betonun mekanik davranışını, plastik ve visko-plastik teoriler yardımıyla ifade edebilmektedir. Yapıların plastik analizinde kullanılmak üzere hazırlanmış, sonlu eleman yöntemi ile çalışan paket programlarda yeralan ve en çok kullanılan, en temel malzeme modeli Drucker-Prager malzeme modelidir. Söz konusu modelde akma kriterinin, von Mises kriterinin genelleştirilmiş şekli olduğu söylenebilir. Bölüm 4.5.3, (4.82) bağıntısı ile belirlenebilecek parametreler, $c = 2.80 - 3.40 \text{ MPa}$ ve $\phi = 25^\circ - 35^\circ$ olarak alınabilir (Köksal ve Doran, 1997; Doran vd., 1998; Polat vd., 2000).

Gerçekleştirilen çalışmalarda (Doran vd., 1998), deneysel verilerle uyum gösteren çeşitli sonlu eleman analizleri baz alınarak, malzemenin kohezyonu c için, aşağıdaki bağıntı önerilmiştir,

$$c = 0.23 \ln(E_o d_{\max}^2) - 0.60 \quad (4.127)$$

burada, $d_{\max}$, maksimum agrega boyutunu (mm), E_o elastisite modülünü (MPa) ifade etmektedir. Söz konusu bağıntının uygunluğu Şekil 4.28'den izlenebilir.



Şekil 4.28 Drucker-Prager kriteri için önerilen kohezyon değerleri (Doran vd., 1998)

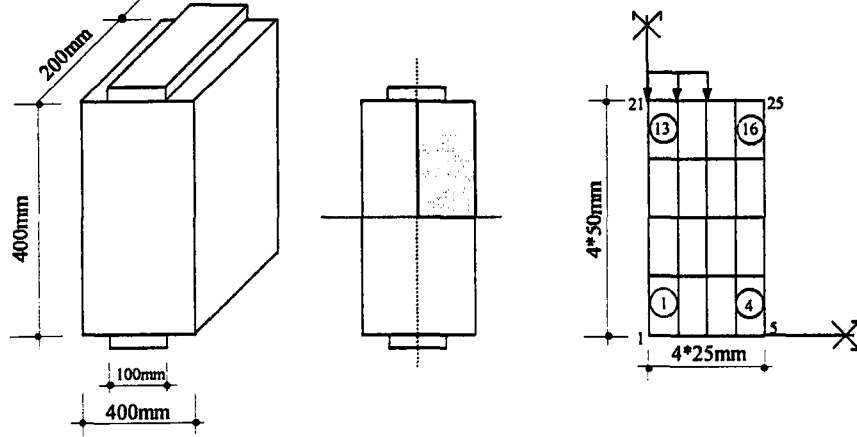
Verilen sayısal örneklerin çözümleri, sonlu eleman tekniği ile çalışan ANSYS programı yardımı ile yapılmış ve yük-şekil değiştirme eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

ANSYS programı, oldukça gelişmiş sonlu eleman modellerini kullanarak doğrusal ve/veya doğrusal olmayan davranışı irdeleyen bir paket programdır. Dört ana bölümden meydana gelmektedir:

- 1) Start: dosya adı, başlık satırı,
- 2) Preproc(PREP7): hazırlık safhası, geometri ve malzeme özellikleri ile ilgili tanımlar,
- 3) Solution(SOLU): çözüm safhası,
- 4) Postproc(POST1, POST26): çıktı dosyaları.

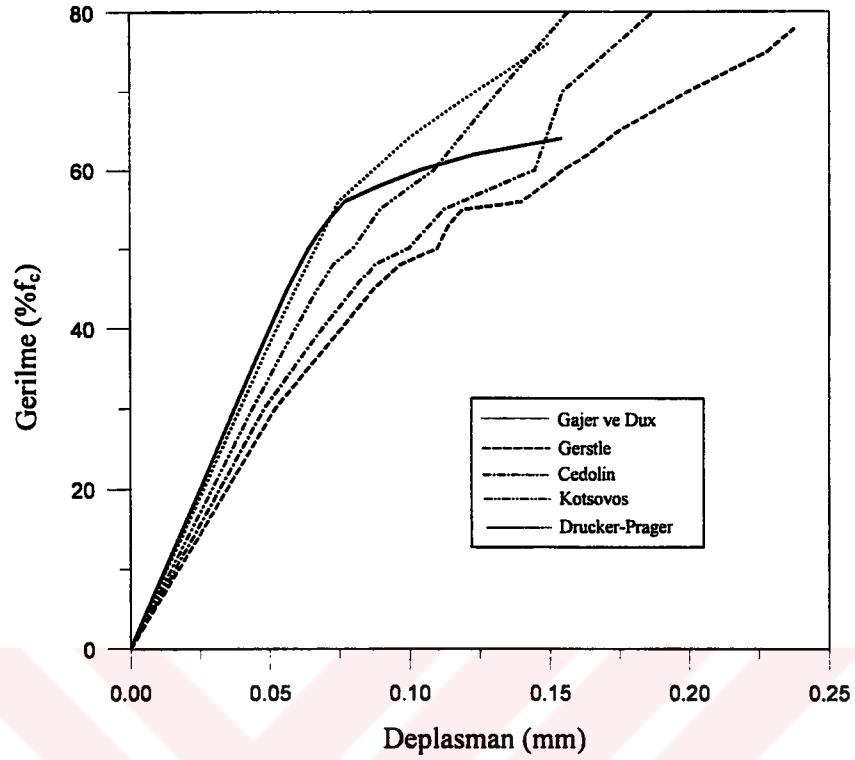
Sayısal örneklerde hazırlık safhası üzerinde durulmamış, sadece malzeme modelleri ve ihtiyaç duyulan malzeme parametreleri verilmiştir.

Örnek 1: Beton basınç elemanı



Şekil 4.29 Beton prizmaların boyutları ve yükleme biçimleri (Polat vd., 2000)

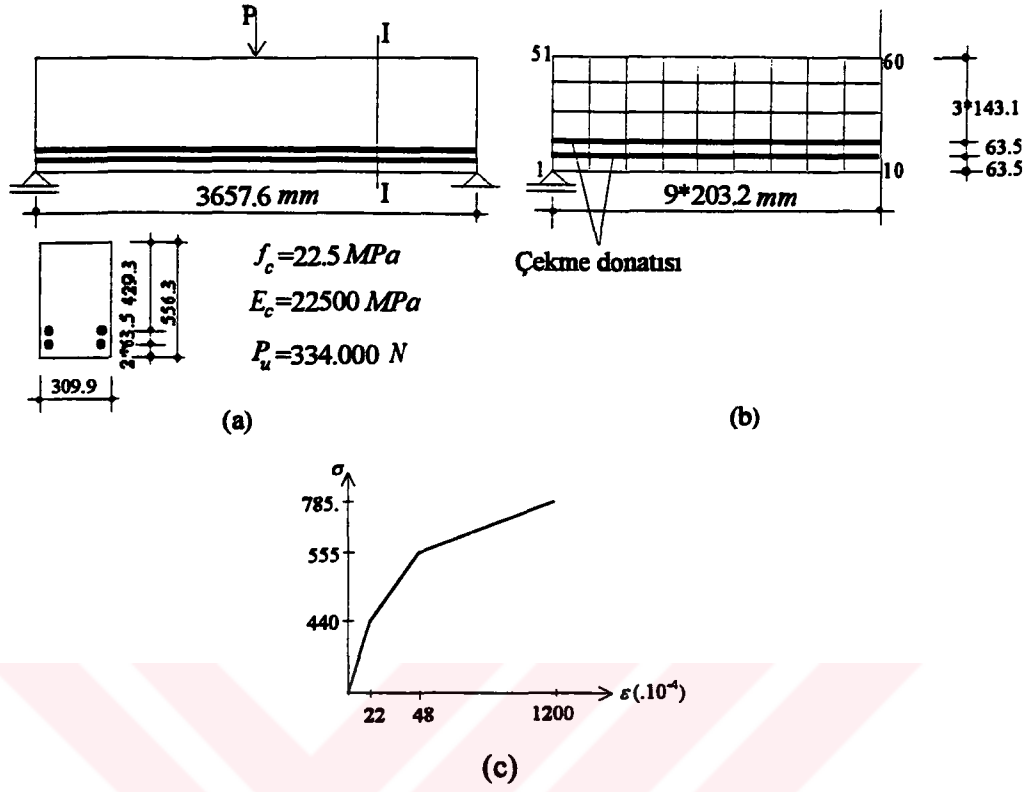
Şekil 4.29’da görülen beton basınç elemanının çeşitli sonlu eleman uygulamaları yapılmıştır (Bedard ve Kotsovos, 1986; Gajer ve Dux, 1990). Deneysel veriler, beton prizmalarda gözlenebilen ilk çatlağın $\%54 f_c$ değerinde oluştuğunu ve $\%65 f_c$ değerinde ise göçme durumuna geldiğini göstermiştir. Yük kontrollü Secant-Newton yöntemi (Gajer ve Dux, 1990) ve oktaedral modeller (Karakoç ve Köksal, 1995; Polat vd., 2000) kullanılarak yapılan bu çalışmalar sonucu, yük-şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.30’da verilmiştir. Aynı malzeme özelliklerine sahip beton prizmanın, yine aynı sonlu eleman ağı dikkate alınarak ANSYS programı ile plastik analizi yapılmıştır. Analizde *Plane 42 (2-D structural solid)* elemanlar kullanılmış ve malzeme modeli olarak Drucker-Prager kriteri seçilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yük-şekil değiştirme eğrisi, diğer çalışmalarla karşılaştırılması amacıyla Şekil 4.30’da verilmiştir.



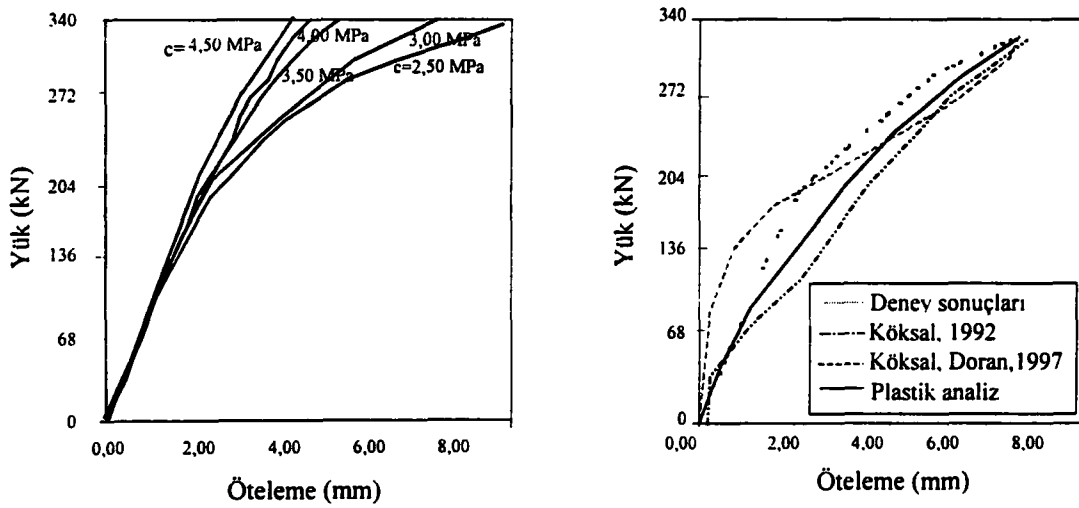
Şekil 4.30 Beton basınç elemanı için yük-şekil değiştirme eğrileri (Polat vd., 2000)

Örnek 2: Çekme-eğilme donatılı kiriş

Şekil 4.31a'da boyutları ve yükleme durumu ile verilmiş çekme donatılı kirişin ANSYS programı ile plastik analizi yapılmak üzere veri dosyası hazırlanmıştır. Oluşturulan sonlu eleman modeli Şekil 4.31b'de, çelik için kabul edilen $\sigma - \varepsilon$ eğrisi ise Şekil 4.31c'de görülmektedir. Beton için Drucker-Prager, çelik için çok parçalı lineer-izotropik malzeme modelleri kullanılmıştır. Sonuçlar deneysel verilerle (Cedolin ve Dei Poli, 1977; Bresler ve Scordelis, 1963) ve önceki çalışma sonuçları (Köksal ve Doran, 1997; Köksal, 1992; Karakoç ve Köksal, 1992; 1995) ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.32).



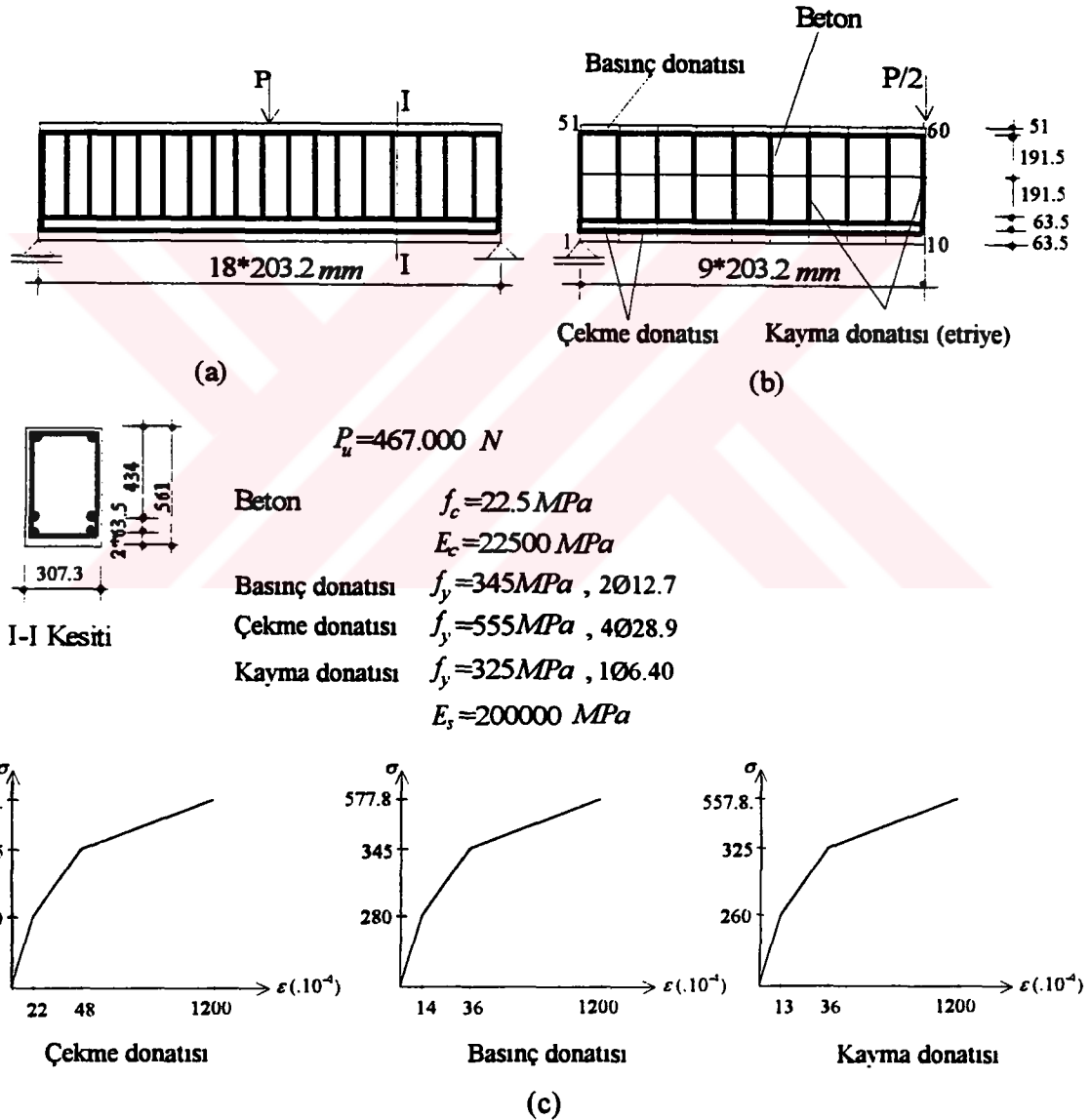
Şekil 4.31 (a) Betonarme çekme-eğilme donatılı kiriş- boyutlar ve yükleme durumu, (b) Sonlu eleman modeli, (Doran vd., 1998) (c) Çelik için $\sigma - \epsilon$ eğrisi



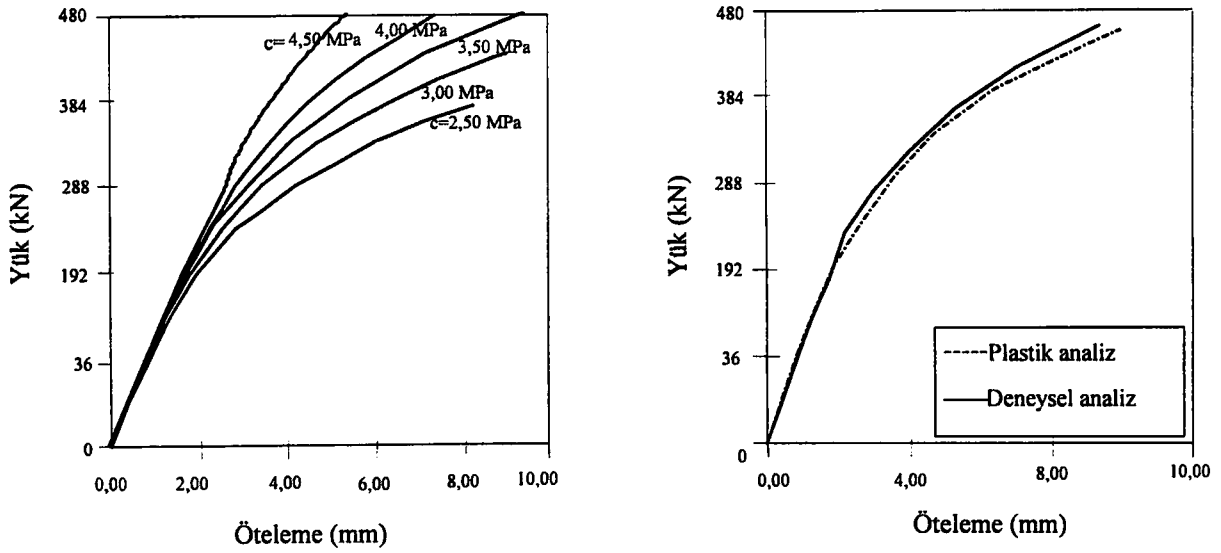
Şekil 4.32 Yük-öteleme eğrileri (Doran vd., 1998)

Örnek 3: Kesme-eğilme donatılı kiriş

Şekil 4.33a'da boyutları ve yükleme durumu ile verilmiş kesme-eğilme donatılı kirişin ANSYS programı ile plastik analizi yapılmak üzere veri dosyası hazırlanmıştır. Oluşturulan sonlu eleman modeli Şekil 4.33b'de, çelik için kabul edilen $\sigma - \varepsilon$ eğrileri ise Şekil 4.33c'de görülmektedir. Beton için Drucker-Prager, çelik için Multi-lineer izotropik malzeme modelleri kullanılmıştır. Sonuçlar deneysel verilerle (Cedolin ve Dei Poli, 1977) karşılaştırılmıştır (Şekil 4.34).



Şekil 4.33 (a) Betonarme kesme-eğilme donatılı kiriş- boyutlar ve yükleme durumu, (b) Sonlu eleman modeli , (Doran vd., 1998) (c) Çelik için $\sigma - \varepsilon$ eğrileri



Şekil 4.34 Yük-öteleme eğrileri (Doran vd., 1998)

Sayısal çözümlerde içsel sürtünme açısı 32° seçilmiştir. Bu değer diğer araştırmacıların önerdiği değerler ile uyum içerisindedir (Lubliner vd., 1989; Oller vd., 1990). Şekil 4.32 ve Şekil 4.34’de görüldüğü gibi, kohezyon değerleri arttıkça yük-şekil değiştirme eğrisi doğruya yaklaşmaktadır. Şekil 4.32’de kohezyonun 4.0 MPa ve üzerindeki, Şekil 4.34’de ise 4.5 MPa ve üzerindeki değerleri için yük-öteleme eğrisi doğrusal kabul edilebilir. Bu değerler, Şekil 4.28’de kohezyon için önerilen sınırlar içerisinde kalmaktadır.

Betonarme elemanlarda plastisite teorisinin uygulanması, öncelikle betonun bünyesel davranışına uygun bir akma kriteri seçilmesini gerekli kılmaktadır. Hidrostatik ve deviyatör gerilmelerin davranış üzerine etkisinin dikkate alındığı Mohr-Coulomb ve Drucker-Prager kriterleri beton için kullanılabilir. Bu kriterler ve değiştirilmiş formları betonun bünyesel olarak modellenmesinde kullanılmaktadır. Drucker-Prager akma kriterinin parametreleri Mohr-Coulomb akma yüzeyinden yararlanılarak belirlenebilir (Böl. 4.5.3). Bu çalışmada, Mohr-Coulomb kriterinin ihtiyaç duyduğu kohezyon ve içsel sürtünme açısı için öneriler yapılmıştır. Önerilen parametreler kullanılarak yapılan sonlu eleman analizlerinin (Örnek1-3) deneysel sonuçlara uygunluğu, bu parametrelerin de uygunluğuna bir gösterge olarak yorumlanabilir.

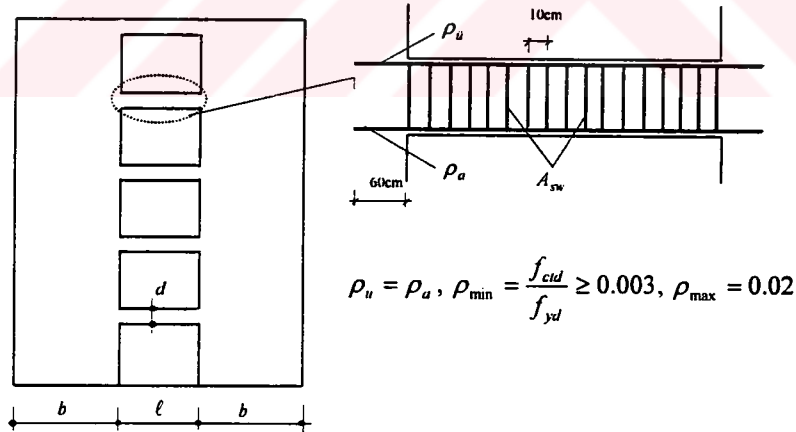
5 BOŞLUKLU PERDELERİN PLASTİK ANALİZİ

5.1 Giriş

Yanal yükler etkisinde, perdelerde daha çok eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve buna bağlı eğilme momenti, bağ elemanlarında ise eğilme ve büyük oranda kayma gerilmeleri meydana gelmektedir. Özellikle bağ elemanlarının uçlarında meydana gelen plastik şekil değiştirmeler sonucu, eleman ve yapı davranışı, doğrusal-elastik davranışa oranla oldukça değişmektedir.

5.2 Simetrik İki Perdeyi Birleştiren Bağ Elemanları

İki perdeyi birbirine birleştiren bağ elemanlarının davranışı, elemanın geometrisine, betonun ve donatının davranış modellerine bağlıdır. Gerçek davranışı belirleyebilmek için sistemin malzeme açısından doğrusal olmayan teoriye göre hesabı uygun olur.



Şekil 5.1 Tek açıklıklı boşluklu perde ve bağ elemanı donatı detayları

Şekil 5.1’de görülen detayda, kirişin eğilme ve kayma donatıları verilmiştir. Davranışa bağ elemanı hakim olduğundan, örnek modellerde, betonarme perde donatıları ihmal edilmiştir.

Bağ elemanlarında alt ve üst yüzdeki eğilme donatıları eşit kabul edilmiştir. Ayrıca eşit aralıklarla devam ettiği kabul edilen kayma donatıları ise, bu bağlamdaki Türk yönetmelik ve standartlarına (TS500, 2000; ABYYHY, 1997) uygun olarak,

$$A_{sw} = V_e \cdot \frac{s}{d \cdot f_{ywd}} ; A_{swmin} = \frac{0.60 \cdot b_w \cdot f_{ctd} \cdot s}{f_{ywd}} \quad (5.1)$$

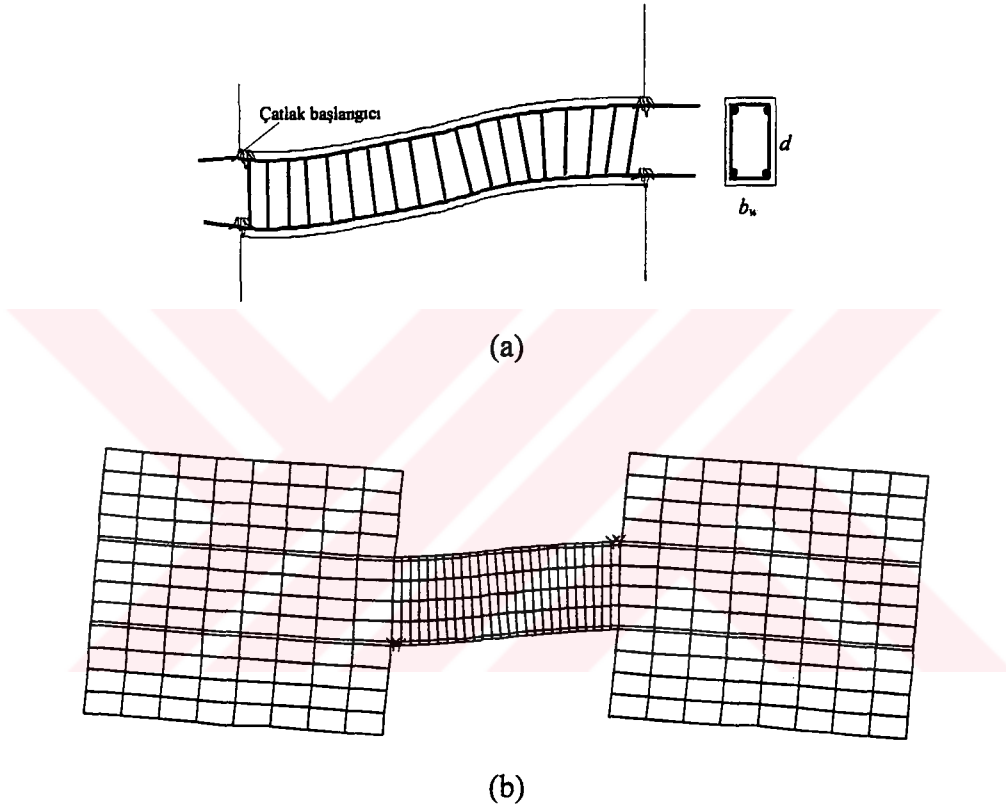
bağıntıları ile hesaplanabilir. Burada f_{ctd} ve f_{ywd} sırası ile beton hesap çekme dayanımı, etriye akma hesap dayanımı, b_w bağ elemanı genişliği (30 cm), V_e tasarım kesme kuvvetidir. Bağ elemanlarında kayma donatılarının (etriye) sık aralıklı olması gerektiğinden, minimum donatı miktarı A_{sw} , TS500'de öngörülenin iki katı düşünülmelidir. Tasarım kesme kuvveti V_e , elemanın her iki ucunda eşit ve her iki yüzdeki boyuna donatı miktarı gözönüne alınarak hesaplanan negatif veya pozitif taşıma gücü momentlerinin 1.4 katlarının (pekleşme, kapasite momentlerinin) toplamalarının bağ elemanı açıklığına bölümü olarak alınmıştır (ABYYHY, 1997):

$$V_e = \frac{\sum M_p}{\ell} \cong 2.8 \frac{M_r}{\ell} \quad (5.2)$$

Malzeme mukavemetlerinin hesap değerleri ile çalışılmasının nedeni, üretilecek olan fonksiyonların pratik (tasarım) karşılık taşınması görüşünden kaynaklanmaktadır. Ayrıca kayma donatılarının miktarı bağ elemanında her durumda kesme kırılmasını önleyen donatı miktarı olarak alınmıştır; ancak bu miktarın hesabında çubuk teorisinin her durumda geçerli olduğu varsayılmıştır. Bununla beraber eğilme donatılarının akması ve betonun ezilmesi ile eğilme kırılmasına ulaşılan safhada, bu suretle seçilen kayma donatılarında elde edilen maksimum gerilmelerin kontrolü de yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yapılan varsayımın, bu bağlamda yaklaşık olarak her durumda iyi bir gösterge (endeks) olduğunu göstermektedir.

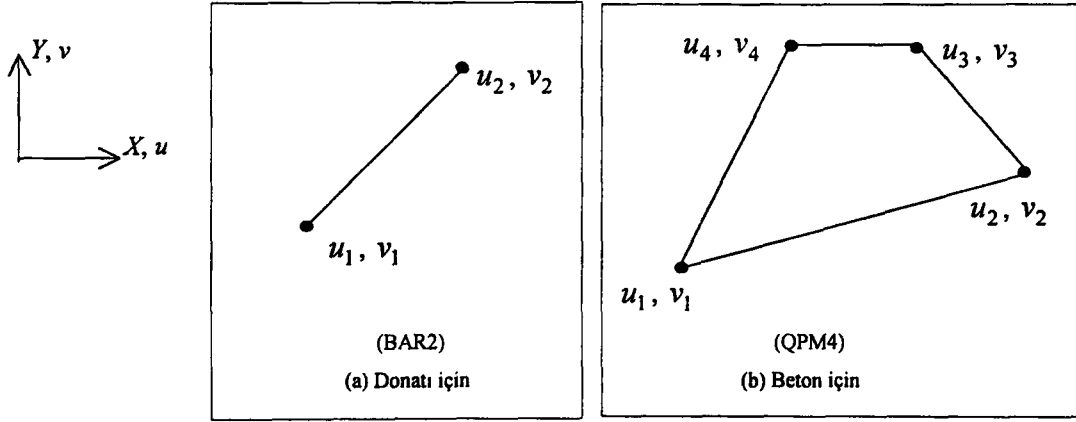
5.3 Sayısal Örnek Üretmekte Kullanılan Sonlu Eleman Tipleri ve Önerilen Malzeme Modeli

Sayısal çözümler, LUSAS (Powerful FE technology for specialist applications) programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.2’de bağ elemanlarındaki eğilme şekil değiştirmeleri, meydana gelmesi beklenen çatlaklar ve çatlak bölgeleri görülmektedir.



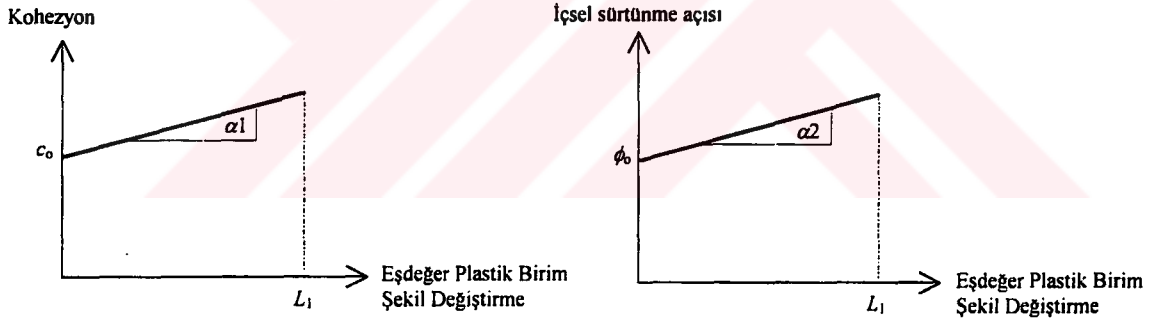
Şekil 5.2 (a) Şekil değiştirmiş durum ve çatlak bölgeleri
(b) Sonlu eleman modeli

Program, son derece geniş sonlu eleman tiplerini kullanma olanağı tanımaktadır. Seçilen eleman tipleri (Şekil 5.3), beton için QPM4 (2 boyutlu izoparametrik eleman), donatı için ise BAR2 (1 boyutlu izoparametrik çubuk eleman) dir.



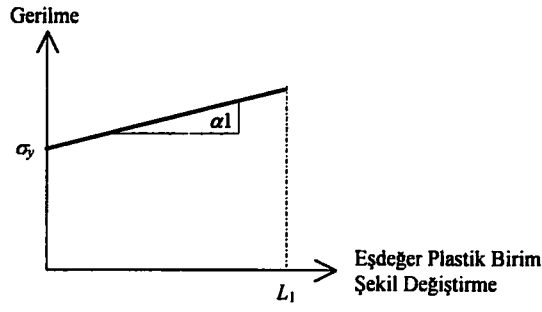
Şekil 5.3 Sonlu eleman tipleri

Malzeme modeli olarak beton için malzemenin sünek davranışını betimleyen Drucker-Prager modeli seçilmiştir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 Drucker-Prager malzeme modeli

Bölüm 4.12.1'de de belirtildiği üzere, kohezyon, $c = 2.80 - 3.40 \text{ MPa}$, içsel sürtünme açısı ise $\phi = 25^\circ - 35^\circ$ arasında değiştirilmek sureti ile uygun değerler parametrik olarak araştırılmıştır. Gerçekleştirilen parametrik çalışmada içsel sürtünme açısının dayanımı fazla değiştirmedeği, kohezyon değerlerindeki değişimin daha etkili olduğu görülmüştür (Böl. 4.12.1, Şekil 4.32, 4.34). Çelik malzeme için ise von Mises modeli seçilmiştir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 von Mises malzeme modeli

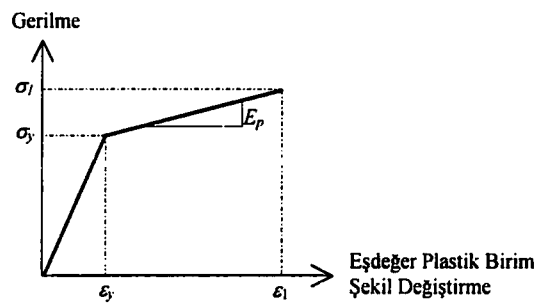
Lusas yapısal analiz programının verilerinden olan eşdeğer plastik birim şekil değiştirme limit değeri L_1 ve $\sigma - \varepsilon$ eğrisinin eğimini ifade eden C parametreleri,

$$L_1 = \varepsilon_1 - \frac{\sigma_1}{E} \quad (5.3)$$

$$C = \frac{E_p}{\left(1 - \frac{E_p}{E}\right)} \quad (5.4)$$

olarak tarif edilmektedir. Burada E_p Şekil 5.6'dan izlenebileceği gibi, iki parçalı $\sigma - \varepsilon$ modelinin yatık kolunun eğimidir:

$$E_p = \frac{\sigma_1 - \sigma_y}{\varepsilon_1 - \varepsilon_y} \quad (5.5)$$

Şekil 5.6 $\sigma - \varepsilon$ eğrisi

5.4 Önerilen Çözüm Yöntemi

Bölüm 3.2’de belirtildiği üzere bağ elemanının **eşdeğer birim dönme momenti**, anılan tüm parametrelerin bir fonksiyonu olarak, $\eta^e = \eta^e(d, b, h, \ell, L, t, E, G, \mu)$ şeklinde istatistik yaklaşımla tesbit edilecek çarpan olmak üzere, L açıklıklı, kesiti L boyunca sabit fiktif çubuğun birim dönme momentinin (η^e) katı olarak tanımlanmıştır (Bağıntı 3.19-3.20). Ayrıca η^e - **eşdeğerlik çarpanı**, kat yüksekliği h , kiriş yüksekliği d , kiriş serbest açıklığı ℓ , perde genişliği b ve a_0, a_1, a_2, a_3 gibi sabit katsayılarla bağlı bir kuvvet fonksiyonu olarak ifade edilmiştir (Bağıntı 3.21).

Söz konusu bağıntılar elastik aşama için yeterli kalırken elastik ötesi davranışı ifade edebilmek için yeni bir tanım yapmak gerekecektir. Bu bölümde, **zorlanma derecesi** olarak anılacak $\frac{\sigma_c}{f_c}$ oranı, analizin her safhasında dikkate alınarak, bağ elemanı rijitliğine etkisi irdelenecektir; σ_c , bağ elemanı mesnet kesitlerinde beklenen maksimum beton gerilmesidir. Bu durumda, zorlanma derecesinin de eklenmesi ile eşdeğerlik çarpanı;

$$\eta^p = a_0 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{a_1} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{a_2} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{a_3} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{a_4} \quad (5.6)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Dikkate alınan boşluklu perdeye ait tüm geometrik ve malzeme özelliklerini içeren η^p eşdeğerlik çarpanı, aşağıdaki yaklaşım çerçevesinde belirlenmiştir:

(α) Söz konusu sistem sonlu eleman yöntemi ile $h = 3 \text{ m}$, $L = 6 \text{ m}$, $b = 3.0, 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 4.0, 4.2, 4.4, 4.6 \text{ (m)}$, $d = 0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00, 1.20 \text{ (m)}$ değerleri dikkate alınıp modellenerek çözümü yapılmış ve gerilme-şekil değiştirme durumu belirlenmiştir. En çok zorlanan perde-bağ elemanı birleşim noktaları referans noktalar olarak dikkate alınmıştır. Elde edilen gerilmelerden yola çıkılarak zorlanma dereceleri belirlenmiştir.

(β) Hesaplarda, yukarıda açıklanan Drucker-Prager malzeme modeli ve parametreleri dikkate alınmıştır ($c = 3.40 \text{ MPa}$, $\phi = 35^\circ$).

(γ) Bağ elemanı eşdeğeri(fiktif) çubuğun birim dönme momentinin,

$$m_{i\theta} = \frac{6EI}{L} \frac{L^2}{(L^2 + 3.9d^2)} \quad (5.7)$$

ile hesaplanabildiği bilinmektedir (Böl. 3.2). Kademeli olarak artırılan yükler altında gerçek sistemin birim dönme momenti ise,

$$m'_{i\theta} = \frac{M_i}{\theta_i} \quad (5.8)$$

dir. Burada θ_i perde ve giriş eksenlerinin kesim noktasında okunan dönme miktarlarıdır

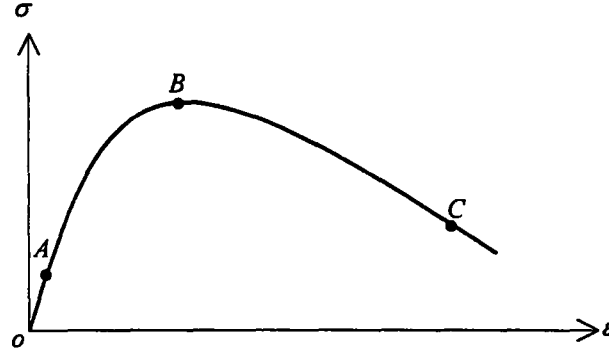
ve yaklaşık olarak $\frac{\Delta_{Y_{i+1}} - \Delta_{Y_i}}{\Delta_{X_{i+1}} - \Delta_{X_i}}$ şeklinde hesaplanabilir. Bu durumda η^P - eşdeğerlik

çarpımı, $m'_{i\theta} = \eta^P m_{i\theta}$ bağıntısı yardımıyla kolaylıkla belirlenebilir.

(α) da hesaplanan zorlanma dereceleri dikkate alınarak, (5.6) bağıntısı yardımı ile η^P değerlerini verecek doğru ifadeler sayısal yaklaşımla aranmıştır.

Betonarme yapı elemanlarının artan yükler altında davranışlarının doğrusal olmadığı bir gerçektir. Ancak uygulamada halen doğrusal davranış kabulünü esas alan yapısal çözümlemelerin ağırlığı sürmektedir; daha bir müddet süreceği de açıktır. Bunun nedeni, doğrusal olmayan davranışın beraberinde getireceği çözüm zorluğudur. Günümüzde her ne kadar bilgisayar teknikleri gelişmiş olsa da, çözüm süresinin oldukça uzun olması ve üretilen sonuçların yorumlanabilir seviyede düzenlenmesinin güçlüğü ve zaman alması nedeniyle, anılan varsayım geçerliliğini korumaktadır.

Betonun gerilme-birim şekil değiştirme özelliklerini, birçok değişken etkilemektedir (Böl.4.12.1). Dolayısıyla beton için genel kabul görmüş tek bir $\sigma - \varepsilon$ eğrisi tanımlamak güçtür. Sadece genel bir fikir vermesi açısından, betonarme kesitlerde gerilme-birim şekil değiştirme ($\sigma - \varepsilon$) eğrisinin, ortalama Şekil 5.7’de verildiği gibi alınabileceği düşünülebilir (Ersoy, 1985).



Şekil 5.7 Betonarme kesitte $\sigma - \varepsilon$ eğrisi

Eğride, A noktası ilk çatlakların kesit rijitliğinde etkin olmaya başladığı noktayı (ki sayısal-analitik gözlemlere göre, bu, yaklaşık olarak, $\sigma_c / f_c \cong 0.40$ zorlanma derecesine karşı gelmektedir), B noktası, maksimum gerilmelerin meydana geldiği safhayı (ki sayısal-analitik gözlemlere göre, bu, yaklaşık olarak, $\sigma_c / f_c \cong 0.80$ zorlanma derecesine karşı gelmektedir), C noktası ise mekanizma safhasını (kırılma anı) ifade etmektedir. OA bölgesinde eğrinin eğimi çok az değiştiğinden, eğrinin bu kısmı yaklaşık doğru kabul edilebilir. Ayrıca artan yük etkisinde çatlaklar geliştikçe eğilme rijitliği yavaş yavaş azalmaktadır. Çoğunlukla A noktası orantılılık sınırı olarak da anılır (Böl.4.4). Gerilmelerin bu sınırın altında kalması şartı ile gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi doğrusaldır. Bu bölgede eşdeğer rijitlik çarpanı için (3.26) veya (3.27) bağıntıları önerilebilir (Böl.3.2). AB bölgesinde, eğilme rijitliği hızla azalmaya devam ederken gerilmeler maksimum düzeye ulaşmaktadır. BC bölgesinde ise artık gerilmeler azalmakta buna karşın şekil değiştirme büyük bir hızla artmaktadır ve kesit C noktasında yük taşıma özelliğini kaybetmektedir (mekanizma durumu).

oA bölgesi için söz konusu eşdeğer rijitlik çarpanı, gerçekleştirilen sayısal çalışmalar sonucunda, Bölüm 3.2’de belirtildiği şekilde tesbit edilmiştir (Çizelge 3.1, 3.2). Zorlanma derecesinin, $0.40 \leq \sigma_c / f_c \leq 0.80$ aralığında bulunması durumunda, eşdeğerlik çarpanları yukarıda anlatılan yaklaşım çerçevesinde,

AB bölgesi için,

$$\eta^p = 1.507 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{0.0281} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.6896} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.5124} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.345} \quad (5.9)$$

şeklinde tesbit edilmiştir. (5.9) bağıntısının korelasyon katsayısı, Ek-1’de verilen örnek veriler (sample data) için, $r = 0.99$ olarak bulunmuştur; bu, pratik olarak oldukça yüksek bir hassasiyet demektir.

(5.9) bağıntısı, pratik amaçlarla, üsler yuvarlatılarak,

$$\eta^p = 1.5 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{0.03} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.70} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.51} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.35} \quad (5.10)$$

şeklinde alınabilir.

Bu noktada, tasarımcının elinde, bu yaklaşımı kullanmak için iki seçenek vardır:

(i)Yapıdaki zorlanma derecesi için bir öngörüde bulunur; örneğin, yerinde döküm betonlar için malzeme katsayısı, normal şantiyeler için, $\gamma_{mc} = 1.5$ olduğuna göre, $\sigma_c / f_c = 1/1.5 = 0.67$ için η^p yi, diğer parametrelere de bağlı olarak hesaplar ve analizde kullanabilir.

(ii) Ön boyutlandırması yapılmış sistemin ilk analizini η^e eşdeğerlik çarpanını kullanarak gerçekleştirir. Bağ kirişlerindeki (σ_c / f_c) -zorlanma derecelerini hesaplar; bu zorlanma dereceleri için η^p leri tesbit eder. η^p lerin bu değerleri için analizi tekrarlar. Yeniden (σ_c / f_c) değerlerini kontrol eder. Bu iterasyona, (σ_c / f_c) ler pratik olarak sabitleşinceye kadar devam eder. Zahmetli gibi gözükmekle beraber, bu yaklaşımın* daha güvenilir olduğu açıktır.

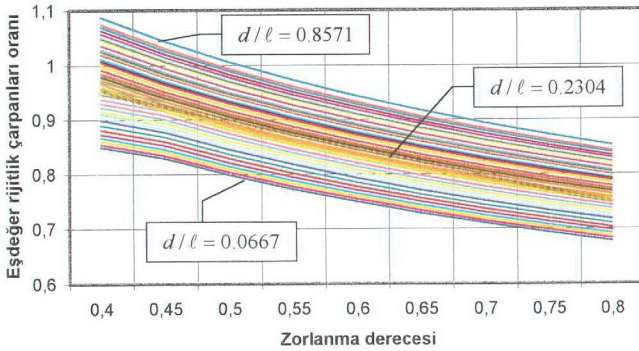
Ek-1’de, $h=3\text{ m}$, $L=6\text{ m}$, $b=3.0, 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 4.0, 4.2, 4.4, 4.6\text{ (m)}$, $d=0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00, 1.20\text{ (m)}$ değerleri için modellenerek çözümü yapılmış olan sistemler için çizelgeler hazırlanmıştır (Çizelge 5.1-5.54); bu çizelgeler, araştırmacıların kullanabilmeleri için, disket ortamında bu çalışmaya eklenmiştir. Çizelgelerde; birinci sütunda yükleme durumları, ikinci sütunda referans noktalarındaki zorlanma dereceleri (σ_c / f_c) , üçüncü sütunda dönme miktarları (θ) , dördüncü sütunda birim dönme momentleri $(m'_{i\theta_i})$ ve nihayet beşinci sütunda plastik safha için geçerli olan eşdeğerlik çarpanları (η_{FE}^p) verilmiştir.

Sayısal çalışmalar sonucu elde edilen eşdeğerlik çarpanları, kiriş yüksekliği arttıkça azalma eğilimindedir (Çizelge 5.1-5.54), ayrıca elastik safhada $(\sigma_c / f_c \leq 0.40)$ sabit ve Böl.3.2’de elastik hesaplara bulunan değerlere oldukça yakın düşmektedir. Gerçekleştirilen çalışmayı daha anlaşılır yorumlayabilmek için, η^p / η^e oranı, (5.10) ve (3.27)’den

$$\frac{\eta^p}{\eta^e} = 0.80 \cdot \left(\frac{d}{\ell} \right)^{0.09} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.35} \quad (5.11)$$

bulunmuş ve $\eta^p / \eta^e - (\sigma_c / f_c, d / \ell)$ eğrileri, Şekil 5.8’de çizilerek gösterilmiştir.

* Bu ikinci yaklaşım, sayın Prof.Dr.Tuncer ÇELİK’in katkıları ile belirlenmiştir.



Şekil 5.8 Farklı d/ℓ değerleri için eşdeğer rijitlik çarpanları oranının (η^p / η^e) zorlanma derecesine (σ_c / f_c) bağlı değişimi

Uygulamalarda, boşluk genişliği kapı veya pencere, kimi kez koridor genişliğine karşı gelir; bu yüzden d/ℓ nin pratik değişim aralığı 0.25~0.50 gibidir. Bu durumda; zorlanma derecesinin 0.40~0.80 arasında değişmesi durumunda η^p düzeltme çarpanı yerine η^e düzeltme çarpanı kullanmakla yapılan hata, pratik olarak,

d/ℓ	σ_c / f_c		
	0.40	0.60	0.80
0.25	%2.7	%15.5	%23.6
0.50	-%3.6	%10.1	%18.7

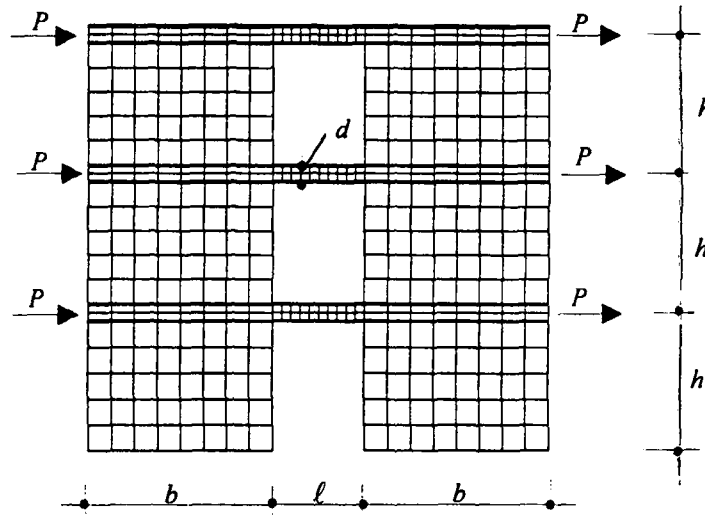
olmaktadır. Yapılan hatalar önemlidir. Bunun pratik anlamı, σ_c / f_c zorlanma derecesinin %40'ı aşması söz konusu boşluklu perdelerde, bağ elemanlarının plastikleşmesinin mutlaka dikkate alınması olacaktır. Tasarımcı, yapıdan beklediği σ_c / f_c performansını öngörebilir; bu takdirde, öngörülen σ_c / f_c değerine ve d/ℓ oranına karşı gelen η^p yi kullanmakla amacına ulaşabilir.

5.5 Sayısal Örnekler

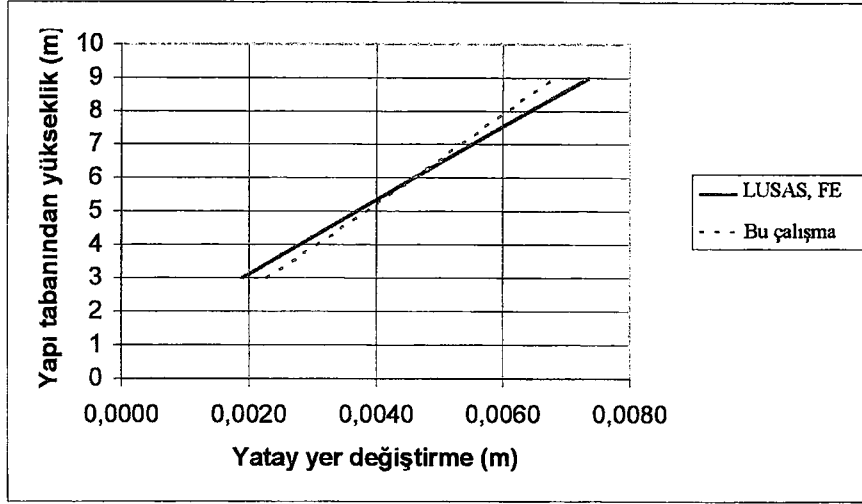
Önerilen yaklaşım, yalnız eleman bazında değil çerçeve bazında da sınanmak üzere aşağıdaki örnekler çözülmüştür.

Örnek 1:

Şekil 5.9’da, sonlu eleman ağı, yükleme durumu ve boyutları ile verilen sistemin LUSAS programı ile plastik analizi yapılmıştır. Analizde beton için QPM4 (2 boyutlu izoparametrik eleman), donatı için ise BAR2 (1 boyutlu izoparametrik çubuk eleman) sonlu eleman tipleri kullanılmıştır. Malzeme modeli olarak beton için Drucker-Prager, donatı çeliği için ise von Mises kriteri seçilmiştir. Drucker-Prager akma kriterinin ihtiyaç duyduğu parametreler; kohezyon, c ve içsel sürtünme açısı, ϕ , sırasıyla 3.4 MPa ve 35° olarak alınmıştır. Ayrıca bağ elemanlarında basınç ve çekme donatıları birbirine eşit ($A_s = A_s'$) 10.12 cm^2 , kayma donatıları (A_{sv}) ise 1.08 cm^2 olarak hesaba katılmıştır. Tasarımcı tarafından belirlenecek keyfi bir zorlanma derecesi için bağ elemanı rijitliklerinin çubuk eşdeğerleri belirlenerek, sistem bu defa çubuk sistem olarak modellenerek çözülmüş, şekil değiştirmiş durumu belirlenmiştir. Gerçek(LUSAS, FE) ve fiktif(bu çalışma) sistemler için kat ötelemelerinin yapı yüksekliğine bağlı değişimleri Şekil 5.10’den izlenebilir.



Şekil 5.9 Boşluklu perde örneği, $d=0.60m$, $b=3m$, $\ell = 3m$

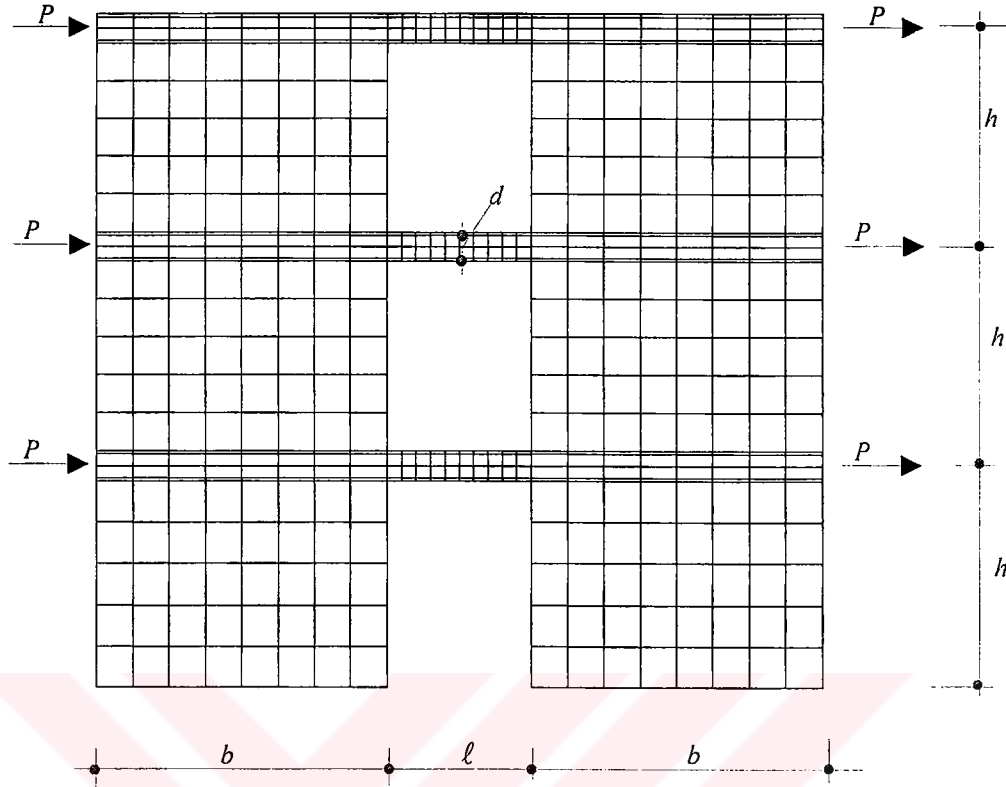


Şekil 5.10 $(\sigma_c / f_c)=0.72$ için kat ötelemeleri

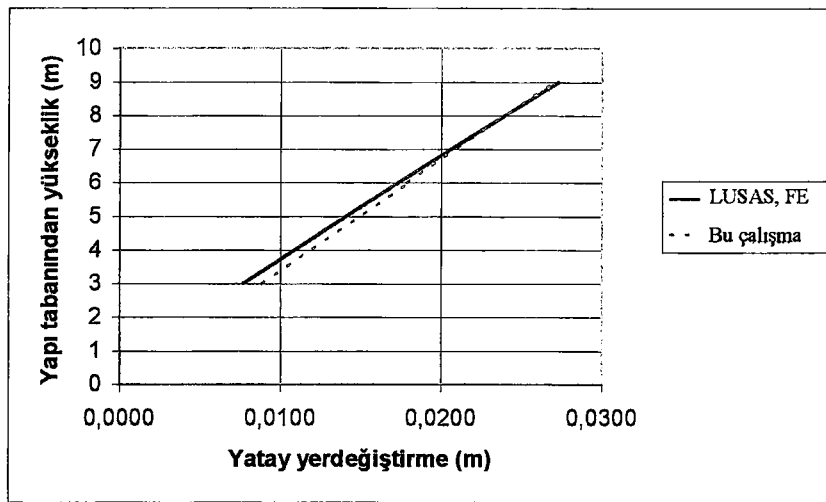
Örnek 2:

Şekil 5.11'de sonlu eleman ağı, yükleme durumu ve boyutları ile verilen sistemin **LUSAS** programı ile örnek1'de olduğu gibi plastik analizi yapılmıştır. Analizde benzer şekilde, beton için QPM4 (2 boyutlu izoparametrik), donatı için ise BAR2 (1 boyutlu izoparametrik çubuk) sonlu eleman tipleri kullanılmıştır. Malzeme modeli olarak beton için Drucker-Prager, donatı çeliği için ise von Mises kriteri seçilmiştir. Drucker-Prager akma kriterinin ihtiyaç duyduğu parametreler; kohezyon, c ve içsel sürtünme açısı, ϕ , sırasıyla 3.4 MPa ve 35° olarak alınmıştır. Ayrıca bağ elemanlarında basınç ve çekme donatıları birbirine eşit ($A_s = A_s'$) 6.48 cm^2 , kayma donatıları (A_{sw}) ise 1.08 cm^2 olarak hesaba katılmıştır.

Belirli bir zorlanma derecesi için bağ elemanı rijitliklerinin çubuk eşdeğerleri belirlenerek, sistem bu defa çubuk sistem şeklinde çözülmüş, şekil değiştirmiş durumu belirlenmiştir. Gerçek(LUSAS, FE) ve fiktif(bu çalışma) sistemler için kat ötelemelerinin yapı yüksekliğine bağlı değişimleri Şekil 5.12'den izlenebilir.



Şekil 5.11 Boşluklu perde örneği, $d=0.40m$, $b=3m$, $\ell=3m$

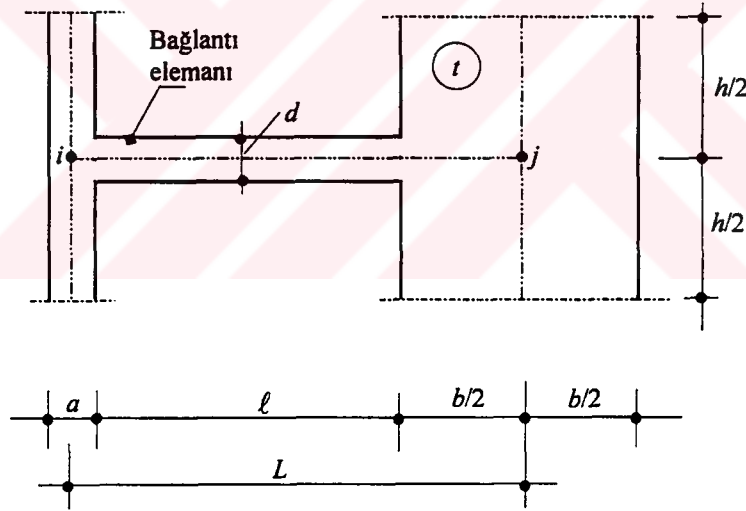


Şekil 5.12 $(\sigma_c / f_c)=0.45$ için kat ötelemeleri

5.6 Bir Perde ile Bir Kolonu Birleştiren Bağ Elemanları

Bu bölümde, bir perde ile bir kolonu birleştiren bağ elemanlarının rijitliği; rijitliğe etkisi olan başlıca geometrik ve malzeme büyüklükleri, doğrusal-elastik ve plastik ortamda dikkate alınarak belirlenmiştir. Bölüm 3.2 ve 5.4’de ana hatları ile verilmiş olan yaklaşım çerçevesinde, üretilen sonlu eleman çözümleri SPSS paket programının verileri olarak alınmak suretiyle tüm geometrik ve mekanik parametreleri içeren korelasyon formülleri araştırılmıştır. Ancak söz konusu formüllerde kolon genişliği, (a) nın etkisi dikkate alınmamıştır.

Şekil 5.13’de, kolon-perde sisteminin hesaplarda dikkate alınan geometrik büyüklükleri işaret edilmiştir.



Şekil 5.13

Söz konusu sistem, sonlu eleman yöntemi ile $h = 3 \text{ m}$, $L = 4.5 \text{ m}$, $b = 3.0, 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 4.0, 4.2, 4.4, 4.6 \text{ (m)}$, $d = 0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00, 1.20 \text{ (m)}$ değerleri dikkate alınarak oluşturulan veri dizinleri için modellenerek çözümü yapılmış ve gerilme-şekil değiştirme

durumları belirlenmiştir. Çözümde aşağıda belirtilen sınır şartları dikkate alınmış ve eşdeğerlik çarpanları doğrusal-elastik ve plastik ortam için ayrı ayrı araştırılmıştır.

a) $\theta_j = 1$, $\theta_i = 0$ durumu:

Bu durumda, j -düğümünde meydana gelecek birim dönme momenti miktarı $\bar{m}'_{j\theta_j}$ ve eşdeğerlik çarpanları η_{jj}^e, η_{jj}^p , ile i -düğümünde meydana gelecek birim dönme momenti miktarı $\bar{m}'_{i\theta_i}$ ve eşdeğerlik çarpanları η_{ij}^e, η_{ij}^p , hesap özeti diskette verilmiştir.

b) $\theta_i = 1$, $\theta_j = 0$ durumu:

i -düğümünde meydana gelecek birim dönme momenti miktarı $\bar{m}'_{i\theta_i}$ ve eşdeğerlik çarpanları η_{ii}^e, η_{ii}^p , hesap özeti diskette verilmiştir.

Bölüm 5.4'de gözlendiği gibi; yaklaşık olarak, $\sigma_c / f_c \cong 0.40$ zorlanma derecesine kadar davranışın doğrusal-elastik kabulü pratik olarak yeterlidir. Betonda maksimum gerilmelerin meydana geldiği safha yine, yaklaşık olarak, $\sigma_c / f_c \cong 0.80$ zorlanma derecesine karşı gelmektedir.

Davranışın doğrusal-elastik kabul edilebileceği bölge için (oA bölgesi; Böl.5.4, Şekil 5.7, $\sigma_c / f_c \leq 0.40$), eşdeğerlik çarpanları, anılan yöntemle,

$$\eta_{jj}^e = 1.1698 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{2.4180} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{0.4801} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.5115} \quad (5.12)$$

$$\eta_{ii}^e = 1.1844 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{-0.4777} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{0.4946} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.2275} \quad (5.13)$$

$$\eta_{ij}^e = 0.8372 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{7.8284} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{-2.4225} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.4011} \quad (5.14)$$

ve pratik amaçla, üsler yuvarlatılarak,

$$\eta_{ij}^e = 1.17 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{2.42} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{0.48} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.51} \quad (5.15)$$

$$\eta_{ii}^e = 1.18 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{-0.48} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{0.50} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.23} \quad (5.16)$$

$$\eta_{ij}^e = 0.84 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{7.83} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{-2.42} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.40} \quad (5.17)$$

olarak elde edilmiştir. (5.12), (5.13) ve (5.14) bağıntılarının korelasyon katsayıları, ekte (diskette) verilen örnek veriler için, sırasıyla, $r = 0.99$, $r = 0.75$, $r = 0.98$ olarak bulunmuştur; görüldüğü üzere, korelasyon oldukça iyidir.

Bölüm 5.4, Şekil 5.7’de görüldüğü gibi, AB bölgesi için söz konusu eşdeğerlik çarpanları, gerçekleştirilen sayısal çalışmalar sonucunda,

$$\eta_{ij}^p = 0.7461 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{2.1935} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{0.5203} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.4382} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.6479} \quad (5.18)$$

$$\eta_{ii}^p = 0.6243 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{-3.7823} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.8811} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.2352} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.6469} \quad (5.19)$$

$$\eta_{ij}^p = 0.5697 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{7.5909} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{-2.3781} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.3313} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.5887} \quad (5.20)$$

ve pratik amaçla, üsler yuvarlatılarak,

$$\eta_{ij}^p = 0.75 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{2.19} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{0.52} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.44} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.65} \quad (5.21)$$

$$\eta_{ii}^p = 0.62 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{-3.78} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.88} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.24} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.65} \quad (5.22)$$

$$\eta_{ij}^p = 0.57 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{7.59} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{-2.38} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.33} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.59} \quad (5.23)$$

şeklinde elde edilmiştir. (5.18), (5.19) ve (5.20) bağıntılarının korelasyon katsayıları, ekte (diskette) verilen örnek veriler için, sırasıyla, $r = 0.99$, $r = 0.85$, $r = 0.97$ bulunmuştur; korelasyon tatminkârdır.

Ekte (diskette), $h = 3 \text{ m}$, $L = 4.5 \text{ m}$, $b = 3.0, 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 4.0, 4.2, 4.4, 4.6 \text{ (m)}$, $d = 0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00, 1.20 \text{ (m)}$ ile oluşturulan veri dizinleri için modellenerek bulunan çözümler çizelgeler halinde özetlenmiştir (Çizelge 5.55-5.216); çizelgelerde; birinci sütunda yükleme durumları, ikinci sütunda zorlanma dereceleri, üçüncü sütunda dönme miktarları, dördüncü sütunda birim dönme momenti miktarları ve beşinci sütunda plastik safha için geçerli olan eşdeğerlik çarpanları verilmiştir.

Çubuk sistemlerin çözümünde, bağ elemanlarına ait rijitlik matrisleri,

$$\underline{k}^e = \underline{\eta}^e \underline{k}^e \quad (5.24)$$

$$\underline{k}^p = \underline{\eta}^p \underline{k}^e \quad (5.25)$$

şeklinde alınmalıdır. Burada $\underline{k}^e$, açıklığı L olan, sabit kesitli bağ elemanlarının rijitlik matrisini, $\underline{\eta}^e$ ve $\underline{\eta}^p$ sırasıyla, elastik ve zorlanma derecesine göre belirlenen plastik eşdeğerlik çarpanları matrislerini ifade etmektedir:

$$\underline{\eta}^e = \begin{bmatrix} \eta_{ii}^e & \eta_{ij}^e \\ \eta_{ji}^e & \eta_{jj}^e \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

$$\underline{\eta}^p = \begin{bmatrix} \eta_{ii}^p & \eta_{ij}^p \\ \eta_{ji}^p & \eta_{jj}^p \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

$\underline{\eta}^e$ ve $\underline{\eta}^p$ eşdeğerlik çarpanları matrislerinde, $\eta_{ij} = \eta_{ji}$ olarak düşünülebilir.

6 SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada; Bölüm 1.3’de ayrıntılarıyla açıklandığı üzere, boşluklu perdeli sistemlerde bağ elemanlarının rijitliği; rijitliğe etkisi olan başlıca geometrik ve malzeme büyüklükleri, doğrusal-elastik ve plastik ortamda dikkate alınarak belirlenmiştir. Üretilen sonlu eleman çözümleri SPSS paket programının verileri olarak alınmak suretiyle tüm geometrik ve mekanik parametreleri içeren regresyon bağıntıları araştırılmış ve bunların hassasiyetleri sınanmıştır. Elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1) Elastik davranışın geçerli olduğu durumlarda,

$$\eta^e = \frac{m'_{i\theta_i}}{m_{i\theta_i}} = \frac{L^3 + 3.9d^2L}{8x^3 + 12\ell x^2 + (6\ell^2 + 7.8d^2)x + \ell^3 + 3.9d^2\ell} \quad (3.20)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanabilecek perde sonsuz rijit parçalarının başlangıç noktası ile boşluk kenarı arasında kalan x mesafesi (yumuşama derinliği), boşluk oranı küçüldükçe (bağ elemanı çubuk karakterinden uzaklaştıkça ($d/\ell > 1/4$) artmaktadır (Böl.3.2, Çizelge 3.1).

2) Boşluklu perdelerin çerçeve olarak modellenmesinde bağ elemanlarının çubuk eşdeğerlerinin belirlenmesi için kullanılmak üzere, yapı davranışının bu noktalardaki tüm geometrik ve mekanik parametrelerini dikkate alarak, yeterli hassasiyette yaklaşım ifadeleri bulunmuştur. Bu çalışmada, yapı elemanlarının doğrusal-elastik ve plastik davranışı varsayımı altında elde edilen eşdeğerlik çarpanları hassasiyetlerinin, yapı mühendisliği ihtiyaçları bakımından neredeyse kapalı ifadeler derecesinde yüksek olduğu görülmüştür (Böl. 3, Böl. 5).

3) Yapılan geniş bantlı çözümler, (d/ℓ) nin değişim aralığı sınırlandırılırsa; $d/\ell \leq 1/4$ (bağ elemanının çubuk karakterine yaklaşması), $d/\ell > 1/4$ (bağ elemanının çubuk karakterinden uzaklaşması), hassasiyeti daha yüksek eşdeğerlik katsayılarının elde edilebileceğini göstermiştir. Dolayısı ile genel bir bağıntı olan,

$$\eta^e = 1.9210 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{0.0282} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.6824} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.5860} \quad (3.26)$$

veya üsler yuvarlatılarak,

$$\eta^e = 1.9 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{0.03} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.70} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.60} \quad (3.27)$$

yerine, çubuk teorisinin geçerli olduğu durumlarda ($d/\ell \leq 1/4$) kullanılmak üzere,

$$\eta^e = 2.6965 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{0.1118} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.8526} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.3591} \quad (3.28)$$

veya üsler yuvarlatılarak,

$$\eta^e = 2.7 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{0.112} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.85} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.36} \quad (3.29)$$

bağıntıları önerilebilir.

Ayrıca, (3.26) bağıntısında, değeri 1.00 - 1.022 arasında değişen $(h/\ell)^{0.0282}$ çarpanı yaklaşık “1” (bir) alınabilir:

$$\eta^e = 1.9210 \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.6824} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.5860} \quad (6.1)$$

Görüldüğü üzere, elastik durumda (evrede), (h/ℓ) değerinin bağ elemanı rijitliğine etkisi pratik olarak terkedilebilir.

4) Perdeli sistemlerde, bilindiği üzere, yatay yükler etkisinde en çok zorlanan kesimler bağ elemanları ile perdelerin birleştiği mesnet kesimleridir. Sistemin elastik teoriye göre çözümlenmesi durumunda bu kesimlerde gerçek değerlerden uzaklaşan eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri elde edilmektedir. Gerçeğe yakın değerler elde edebilmek için sistemin plastik teoriye göre çözümlenmesi; bağ elemanlarında meydana gelmesi muhtemel plastik şekil değiştirmelerin dikkate alınması gerekmektedir.

Beton ve betonarme elemanlara plastisite teorisinin uygulanması, öncelikle uygun bir akma kriterinin seçimine bağlıdır. Bu çalışmada önerilen plastik model, çelik için von Mises, beton için ise, stabil çatlak gelişiminde hasarlı yüzeyler arası sürtünme kuvvetlerinin ve kohezyonun önem kazandığı granüler malzemelerde oldukça uygun sonuçlar veren Drucker-Prager malzeme modelidir. Drucker-Prager akma kriterinin ihtiyaç duyduğu parametreler için, $c = 3.40 \text{ MPa}$ ve $\phi = 35^\circ$ değerleri seçilmiştir. Söz konusu kriter kullanılarak, beton ve betonarme elemanlarda gerçekleştirilen örnek çözüm sonuçlarının tatminkâr olduğu gözlenmiştir (Polat vd., 1996; Köksal ve Doran, 1997; Doran vd., 1998). Ayrıca deneysel verilerle uyum gösteren çeşitli sonlu eleman analizleri baz alınarak, malzemenin kohezyonu c için,

$$c = 0.23 \ln(E_o d_{\max}^2) - 0.60 \quad (4.127)$$

bağıntısı önerilmiştir (Doran vd., 1998).

5) Uygun malzeme modeli belirlendikten sonra, anılan geometrik ve mekanik özelliklere sahip sonlu eleman modellerinin plastik analizlerinin gerçekleştirildiği Bölüm 5.4'de, **zorlanma derecesi** olarak anılan $\frac{\sigma_c}{f_c}$ oranı, yapı davranışının her safhasında dikkate alınarak, bağ elemanı rijitliğine etkisi irdelenmiş ve plastik durumda geçerli olacak,

$$\eta^P = 1.507 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{0.0281} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.6896} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.5124} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.345} \quad (5.9)$$

veya, üsler yuvarlatılarak,

$$\eta^p = 1.5 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{0.03} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.70} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.51} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.35} \quad (5.10)$$

bağıntıları önerilmiştir.

Ayrıca, (5.9) bağıntısında değeri 1.00 - 1.022 arasında değişen $(h/\ell)^{0.0281}$ çarpanı yaklaşık “1” (bir) alınabilir. Bu durumda eşdeğerlik çarpanı,

$$\eta^p = 1.507 \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.6896} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.5124} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.345} \quad (6.2)$$

veya üsler yuvarlatılarak,

$$\eta^p = 1.5 \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.7} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.51} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.35} \quad (6.3)$$

şeklini alacaktır. Görüldüğü üzere, plastik durumda (evrede), (h/ℓ) değerinin bağ elemanı rijitliğine etkisi pratik olarak terkedilebilir.

6) Plastik durum için verilen bağıntılar, gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinde maksimum gerilmeye kadar olan bölge (AB bölgesi; Böl.5.4, Şekil 5.7) için geçerlidir. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin tepe noktası (B noktası; Böl.5.4, Şekil 5.7) aşıldıktan sonra yumuşama davranışının etkin olduğu BC bölgesi için herhangi bir çalışma yapılmamıştır (Bu araştırmanın gelecekte yapılması düşünülmektedir).

7) Bölüm 5.2’de belirtildiği gibi, davranışa bağ elemanı hakim olduğundan, örnek modellerde, betonarme perde donatıları ihmal edilmiştir. Bu çalışmanın, hipotetik de olsa, perde donatıları da dikkate alınarak genişletilmesi düşünülmektedir.

8) Bölüm 5.4’de önerildiği gibi, tasarımcının elinde, anılan yaklaşımı kullanmak için iki seçenek bulunmaktadır; bunlardan ikincisine göre; tasarımcı, ön boyutlandırması yapılmış sistemin ilk analizini η^e eşdeğerlik çarpanını kullanarak gerçekleştirir. Bağ kirişlerindeki (σ_c / f_c) -zorlanma derecelerini hesaplar; bu zorlanma dereceleri için η^p leri tesbit eder. η^p lerin bu değerleri için analizi tekrarlar. Yeniden (σ_c / f_c) değerlerini kontrol eder. Bu iterasyona, (σ_c / f_c) ler pratik olarak sabitleşinceye kadar devam eder.

Bu seçeneğin, daha güvenilir olması açısından, gelecek çalışmalara konu alınması düşünülmektedir.

9) Kolon-perde sistemler için, anılan yöntemle araştırılan regresyon bağıntıları, zorlanma derecesinin %40’ın altında kaldığı $(\sigma_c / f_c \leq 0.40)$ bölge için,

$$\eta_{jj}^e = 1.1698 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{2.4180} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{0.4801} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.5115} \quad (5.12)$$

$$\eta_{ii}^e = 1.1844 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{-0.4777} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{0.4946} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.2275} \quad (5.13)$$

$$\eta_{ij}^e = 0.8372 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{7.8284} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{-2.4225} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.4011} \quad (5.14)$$

yada pratik amaçla, üsler yuvarlatılarak,

$$\eta_{jj}^e = 1.17 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{2.42} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{0.48} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.51} \quad (5.15)$$

$$\eta_{ii}^e = 1.18 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{-0.48} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{0.50} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.23} \quad (5.16)$$

$$\eta_{ij}^e = 0.84 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{7.83} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{-2.42} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.40} \quad (5.17)$$

olarak elde edilmiştir.

10) Kolon-perde sistemlerde, AB bölgesi (Böl.5.4, Şekil 5.7; $0.40 \leq \sigma_c / f_c \leq 0.80$) için geçerli olan eşdeğerlik çarpanları, gerçekleştirilen sayısal çalışmalar sonucunda,

$$\eta_{jj}^p = 0.7461 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{2.1935} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{0.5203} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.4382} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.6479} \quad (5.18)$$

$$\eta_{ii}^p = 0.6243 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{-3.7823} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.8811} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.2352} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.6469} \quad (5.19)$$

$$\eta_{ij}^p = 0.5697 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{7.5909} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{-2.3781} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.3313} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.5887} \quad (5.20)$$

yada pratik amaçla, üsler yuvarlatılarak,

$$\eta_{jj}^p = 0.75 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{2.19} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{0.52} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.44} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.65} \quad (5.21)$$

$$\eta_{ii}^p = 0.62 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{-3.78} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{1.88} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.24} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.65} \quad (5.22)$$

$$\eta_{ij}^p = 0.57 \left(\frac{h}{\ell} \right)^{7.59} \left(\frac{b}{\ell} \right)^{-2.38} \left(\frac{d}{\ell} \right)^{-0.33} \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-0.59} \quad (5.23)$$

şeklinde belirlenmiştir.

11) (5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17) ve (5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23) regresyon bağıntıları incelendiğinde, gerek doğrusal-elastik, gerekse plastik durumda, verilen bağıntıların korelasyonu oldukça tatminkâr gözükmemektedir. Ancak söz konusu bağıntıların (3.26, 3.27) ve (5.9, 5.10) bağıntılarından en önemli farkı, (h/ℓ) çarpanlarının ihmal edilemeyeceğidir.

12) Kolon-perde sistemlerde, bağ elemanları için üretilen bağıntıların korelasyon katsayıları yüksek çıksa da, eşdeğer rijitlik hesabına ilave düzeltme matrisleri getirdiğinden, boşluklu perde sistemlerdeki kadar sade ve kullanışlı gözükmemektedir. Bununla beraber, plastik davranış safhalarını dikkate alabilmek açısından, yapılan yaklaşım özgün ve pratiktir. Bu konunun, daha geniş bir veri tabanı gözönüne alınarak irdelenmesinin, gelecek çalışmalara konu alınması düşünülmektedir.

13) Elastik aşama için (3.26, 3.27), plastik aşama için ise (5.9, 5.10) bağıntıları yardımıyla, belirli zorlanma dereceleri için hesaplanan eşdeğerlik çarpanlarının oranlarını ifade eden grafikler incelendiğinde (Böl.5.4, Şekil 5.8); farklı d/ℓ oranları için elde edilen eğri ailesinin oluşturduğu bant genişliğinin zorlanma derecesi ile pratik olarak değişmediği gözlenmiştir. $0.40 \leq \sigma_c / f_c \leq 0.80$ arasında kalan bölgede (AB bölgesi; Böl.5.4, Şekil 5.7), (η^p / η^e) oranının doğrusal değiştiği kabul edilebilir ve (5.11) bağıntısı yerine korelasyon katsayısı, $r = 0.99$ olan doğrusal bir bağıntı önerilebilir:

$$\frac{\eta^p}{\eta^e} = 1.015 - 0.027 \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right) \quad (6.4)$$

14) Zorlanma derecesi büyüdükçe (η^p / η^e) oranının hızla azalması, plastik durumda bağ elemanı rijitliğinin azalması anlamına gelmektedir. Bağ elemanı rijitliğindeki bu azalma, zorlanan kesitlerde meydana gelen plastik şekil değiştirmelerin rijitliğe etkisini gösterir.

15) Ekteki(disketteki) sayısal veriler ve Böl.5.4, Şekil 5.8 incelendiğinde, zorlanma derecesi %40'ın altında kalması koşuluyla, pratik olarak davranış doğrusal-elastik kabul edilebilir.

KAYNAKLAR

Al-Mahaidi, R., S., Nilson, A., H., (1975), "Coupled Shear Wall Analysis by Lagrange Multipliers", Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.101(ST11): 2359-2366.

Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü, (1997), Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY).

Beck, H., (1962), "Contribution to the Analysis of Coupled Shear Walls", ACI Journal, Proceedings, 59: 1055-1070.

Bedard, C. and Kotsovos, M.D., (1986), "Fracture Process of Concrete for NLFEA Methods", Journal of Structural Engineering, ASCE, 112(3): 573-587.

Bolander, J., Wight, J., K., (1991), "Finite Element Modeling of Shear-Wall-Dominant Buildings", Journal of Structural Engineering, 117(6): 1719-1739.

Chaallal, O., (1992), "Finite Element Model for Seismic RC Coupled Walls Having Slender Coupling Beams", Journal of Structural Engineering, 118(10): 2936-2943.

Chatfield, C., Statistics for Technology, (1994) , Chapman and Hall, London.

Chen, W.F., Han, D.J., (1988), Plasticity for Structural Engineers, Springer-Verlag New York Inc.

Chitty, L., (1947), "On the Cantilever Composed of a Number of Parallel Beams Interconncted by Cross Bars", London Edinburg and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 38: 685-699.

Coul, A., ve Irwin, A.W., (1969), "Design of Connecting Beams in Coupled Shear Walls", ACI Journal, Proceedings: 205-209.

Çakıroğlu, A., Çetmeli, E., (1965), "Taşıyıcı Olan Boşluklu Duvarların Yatay Kuvvetlere Göre Hesabı", İ.T.Ü. Dergisi, 23(4): 1-10.

Çakıroğlu, A., (1978), "Sonsuz Rijit Kısımları Bulunan Çubukların I. ve II.Mertebe Teorilerine Ait Birim Deplasman Sabitleri", İ.T.Ü. Dergisi, 36(5): 35-43.

Çakıroğlu, A., Balıoğlu İ., (1999), "Perde Bağ Kirişlerinin Plastik Şekil Değiştirmeleri ", İMO, Teknik Dergi, 10(1): 1851-1867.

Demir, F., (1998), Betonarme Yapı Elemanlarında Sonlu Eleman Yönteminin Uygulamaları, Doktora Tezi, İ.T.Ü Fenbilimleri Enstitüsü.

Doran, B., Köksal, H.O., Polat, Z., Karakoç, C., (1998), "Betonarme Elemanlarda Sonlu Eleman Uygulamalarında Drucker-Prager Akma Kriteri Kullanılması", İMO, Teknik Dergi, 9(2): 1617-1625.

Ersoy, U., (1985), Betonarme-Temel İlkeler ve Taşıma gücü, Cilt 1, Evrim Yayınevi, İstanbul.

Gajer, G., and Dux, P., (1990), "Crack Band Based Model for FEM Analysis of Concrete Structures", Journal of Structural Engineering, 116(6): 1696-1714.

Girijavallabhan, C. V., (1969), "Analysis of Shear Walls with Opening", J. Struct. Div., : 2093-2103.

Hoel, P.G., (1984), Introduction to Mathematical Statistics, Wiley, New York.

İnan, M., (1973), Cisimlerin Mukavemeti, Ofset Matbaacılık Ltd. Şti.

Karakoç, C., ve Köksal, H.O., (1995), "Oktahedral Bağlantılar ve Düzgün Yayılı Çatlak Kavramı Kullanılarak Beton Elemanlarda Yapılan Sonlu Eleman Uygulamaları ve Sonuçları", İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, II. Teknik Kongre, 1995, 461-470.

Khatri, D., Anderson, J.C., (1995), "Analysis of Reinforced Concrete Shear Wall Components Using the ADINA Nonlinear Concrete Model", Computers and Structures, 56(23).

Köksal H., O., Doran, B., (1997), "Beton ve Betonarme Elemanlarda Doğrusal Olmayan Oktahedral Elastik ve Plastik Bağlantılar Kullanılarak Yapılan Sonlu Eleman Uygulamaları", İMO, Teknik Dergi, 8(3): 1445-1455.

Köksal, O., (1992), Non-linear Finite Element Analysis of Concrete Members, M.S. Thesis, Boğaziçi Üniversitesi.

Kwan H., K., A., (1993), "Mixed Finite Element Method for Analysis of Coupled Shear/Core Walls", Journal of Structural Engineering, 119(5): 1388-1401.

Lefas, I.D., Kotsovos, M.D., (1990), "NLFE Analysis of RC Structural Walls and Design Implications", Journal of Structural Engineering, 116(1): 146-163.

Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., Onate, E., (1989), "A Plastic-Damage Model for Concrete", International Journal of Solids and Structures, 25(3): 299-326.

LUSAS, Finite Element System, Ver.13.0, United Kingdom.

MacLeod, I. A., (1969), "New Rectangular Finite Element for Shear Wall Analysis", J. Struct. Div., ASCE: 399-409.

Muto, K., (1974), A Seismic Design Analysis of Buildings.

Oller, S., Onate, E., Oliver, J., Lubliner, J., (1990), "Finite Element Nonlinear Analysis of Concrete Structures Using a Plastic-Damage Model", *Engineering Fracture Mechanics*, 35: 219-231.

Pala, S., Özmen, G., (1995), "Effective Stiffness of Coupling Beams in Structural Walls", *Computer and Structures*, 54(5): 925-931.

Park, H., Klingner, R.E., (1997), "Nonlinear Analysis of RC Members Using Plasticity With Multiple Failure Criteria", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 123(5): 643-651.

Paulay, T., (1971), "Coupling Beams of Reinforced Concrete Shear Walls", *Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 97(ST3): 843-861.

Paulay, T., (1970), "An Elasto-Plastic Analysis of Coupled Shear Walls", *ACI Journal*, Title No.67-60: 915-922.

Polat, Z., Doran, B., Köksal, H.O., (2000), "Drucker-Prager Akma Kriteri Kullanılarak Betonda Doğrusal Olmayan Davranışın İncelenmesi", *Y.T.Ü. Dergisi*, 2000(1): 1-10.

Rosman, R., (1964), "Approximate Analysis of Shear Walls Subject to Lateral Loads", *ACI Journal, Proceedings*, 61: 717-733.

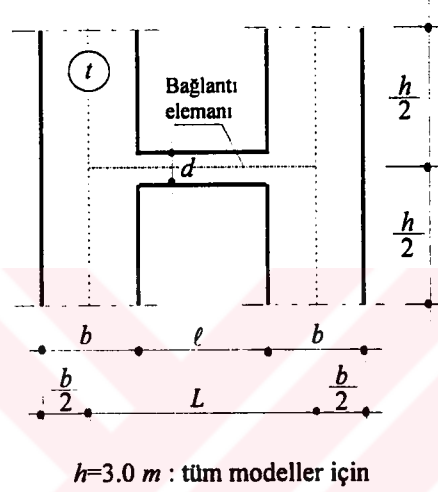
Schwaighofer, J., Microys, H., F., (1969), "Analysis of Shear Walls Using Standard Computer Programs", *ACI Journal*, Title No.66-89: 1005-1007.

Subedi, K.,N., (1991), "RC-Coupled Shear Wall Structures. I:Analysis of Coupling Beams", *Journal of Structural Engineering*, 117(3): 667-679.

TSE-TS500, (2000), *Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları*.

EK-1 PERDE-PERDE BAĞ ELEMANLARI İÇİN ÜRETİLEN SAYISAL (FE) SONUÇLAR HAKKINDA AÇIKLAMA

Ekli diskette çizelgeler(Çizelge 5.1-5.54) halinde verilen, perde-perde bağ elemanları için üretilen sayısal sonuçlar aşağıda örneklenmiştir.



Çizelge 5.17: $d=0.40 \text{ m}$, $b=4.4 \text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta}$	η_{FE}^p
8,80E+01	-4,01E-01	-2,15E-04	-1,23E+06	2,60E+01
8,90E+01	-4,07E-01	-2,19E-04	-1,22E+06	2,59E+01
9,00E+01	-4,14E-01	-2,21E-04	-1,22E+06	2,58E+01
9,10E+01	-4,20E-01	-2,25E-04	-1,21E+06	2,57E+01
9,20E+01	-4,26E-01	-2,28E-04	-1,21E+06	2,57E+01
9,30E+01	-4,32E-01	-2,31E-04	-1,21E+06	2,56E+01
9,40E+01	-4,38E-01	-2,34E-04	-1,20E+06	2,55E+01
9,50E+01	-4,44E-01	-2,40E-04	-1,19E+06	2,52E+01
9,60E+01	-4,50E-01	-2,43E-04	-1,18E+06	2,51E+01
9,70E+01	-4,56E-01	-2,46E-04	-1,18E+06	2,51E+01
9,80E+01	-4,62E-01	-2,49E-04	-1,18E+06	2,50E+01
9,90E+01	-4,69E-01	-2,52E-04	-1,18E+06	2,49E+01
1,00E+02	-4,75E-01	-2,56E-04	-1,17E+06	2,49E+01
1,01E+02	-4,81E-01	-2,59E-04	-1,17E+06	2,48E+01
1,02E+02	-4,87E-01	-2,62E-04	-1,17E+06	2,48E+01
1,03E+02	-4,93E-01	-2,65E-04	-1,17E+06	2,47E+01
1,04E+02	-5,00E-01	-2,68E-04	-1,17E+06	2,47E+01

Çizelge 5.17: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta}$	η_{FE}^p
1,05E+02	-5,06E-01	-2,71E-04	-1,16E+06	2,47E+01
1,06E+02	-5,13E-01	-2,76E-04	-1,15E+06	2,44E+01
1,07E+02	-5,20E-01	-2,79E-04	-1,15E+06	2,44E+01
1,08E+02	-5,26E-01	-2,82E-04	-1,15E+06	2,44E+01
1,09E+02	-5,33E-01	-2,85E-04	-1,15E+06	2,43E+01
1,10E+02	-5,39E-01	-2,90E-04	-1,14E+06	2,41E+01
1,11E+02	-5,46E-01	-2,93E-04	-1,14E+06	2,41E+01
1,12E+02	-5,53E-01	-2,96E-04	-1,14E+06	2,41E+01
1,13E+02	-5,60E-01	-2,99E-04	-1,14E+06	2,41E+01
1,14E+02	-5,67E-01	-3,04E-04	-1,12E+06	2,38E+01
1,15E+02	-5,74E-01	-3,07E-04	-1,12E+06	2,38E+01
1,16E+02	-5,80E-01	-3,12E-04	-1,11E+06	2,36E+01
1,17E+02	-5,87E-01	-3,15E-04	-1,11E+06	2,36E+01
1,18E+02	-5,95E-01	-3,17E-04	-1,12E+06	2,36E+01
1,19E+02	-6,02E-01	-3,23E-04	-1,11E+06	2,34E+01
1,20E+02	-6,09E-01	-3,25E-04	-1,11E+06	2,35E+01
1,21E+02	-6,16E-01	-3,31E-04	-1,10E+06	2,33E+01
1,22E+02	-6,23E-01	-3,33E-04	-1,10E+06	2,33E+01
1,23E+02	-6,30E-01	-3,39E-04	-1,09E+06	2,31E+01
1,24E+02	-6,38E-01	-3,41E-04	-1,09E+06	2,31E+01
1,25E+02	-6,45E-01	-3,47E-04	-1,08E+06	2,29E+01
1,26E+02	-6,52E-01	-3,49E-04	-1,08E+06	2,29E+01
1,27E+02	-6,60E-01	-3,53E-04	-1,08E+06	2,29E+01
1,28E+02	-6,67E-01	-3,56E-04	-1,08E+06	2,29E+01
1,29E+02	-6,75E-01	-3,62E-04	-1,07E+06	2,27E+01
1,30E+02	-6,82E-01	-3,68E-04	-1,06E+06	2,25E+01
1,31E+02	-6,90E-01	-3,71E-04	-1,06E+06	2,25E+01
1,32E+02	-6,98E-01	-3,74E-04	-1,06E+06	2,25E+01
1,33E+02	-7,05E-01	-3,76E-04	-1,06E+06	2,25E+01
1,34E+02	-7,13E-01	-3,82E-04	-1,05E+06	2,23E+01
1,35E+02	-7,20E-01	-3,88E-04	-1,04E+06	2,21E+01
1,36E+02	-7,28E-01	-3,88E-04	-1,05E+06	2,23E+01
1,37E+02	-7,36E-01	-3,94E-04	-1,04E+06	2,21E+01
1,38E+02	-7,43E-01	-4,00E-04	-1,03E+06	2,19E+01
1,39E+02	-7,51E-01	-4,03E-04	-1,03E+06	2,19E+01
1,40E+02	-7,59E-01	-4,06E-04	-1,03E+06	2,19E+01
1,41E+02	-7,67E-01	-4,12E-04	-1,03E+06	2,18E+01
1,42E+02	-7,75E-01	-4,18E-04	-1,02E+06	2,16E+01
1,43E+02	-7,83E-01	-4,18E-04	-1,03E+06	2,18E+01
1,44E+02	-7,91E-01	-4,24E-04	-1,02E+06	2,16E+01
1,45E+02	-7,99E-01	-4,29E-04	-1,01E+06	2,15E+01
1,46E+02	-8,05E-01	-4,32E-04	-1,01E+06	2,15E+01
1,47E+02	-8,12E-01	-4,35E-04	-1,01E+06	2,15E+01
1,48E+02	-8,20E-01	-4,41E-04	-1,01E+06	2,13E+01
1,49E+02	-8,28E-01	-4,47E-04	-1,00E+06	2,12E+01
1,50E+02	-8,36E-01	-4,53E-04	-9,94E+05	2,11E+01

Çizelge 5.17: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta}$	η_{FE}^p
1,51E+02	-8,47E-01	-4,59E-04	-9,87E+05	2,09E+01
1,52E+02	-8,56E-01	-4,65E-04	-9,81E+05	2,08E+01
1,53E+02	-8,64E-01	-4,74E-04	-9,69E+05	2,05E+01
1,54E+02	-8,70E-01	-4,82E-04	-9,58E+05	2,03E+01
1,55E+02	-8,78E-01	-4,88E-04	-9,52E+05	2,02E+01
1,56E+02	-8,77E-01	-5,03E-04	-9,31E+05	1,97E+01
1,57E+02	-8,78E-01	-5,12E-04	-9,20E+05	1,95E+01
1,58E+02	-8,80E-01	-5,29E-04	-8,95E+05	1,90E+01
1,59E+02	-8,81E-01	-5,44E-04	-8,77E+05	1,86E+01

Çizelge 5.22: $d=0.60\text{ m}$, $b=3.6\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta}$	η_{FE}^p
63,0000	-0,4051	-2,86E-04	-1,32E+06	8,48E+00
64,0000	-0,4131	-2,92E-04	-1,31E+06	8,43E+00
65,0000	-0,4211	-2,98E-04	-1,31E+06	8,39E+00
66,0000	-0,4291	-3,04E-04	-1,30E+06	8,35E+00
67,0000	-0,4373	-3,10E-04	-1,30E+06	8,32E+00
68,0000	-0,4458	-3,15E-04	-1,29E+06	8,30E+00
69,0000	-0,4542	-3,21E-04	-1,29E+06	8,26E+00
70,0000	-0,4626	-3,27E-04	-1,28E+06	8,24E+00
71,0000	-0,4710	-3,32E-04	-1,28E+06	8,22E+00
72,0000	-0,4794	-3,38E-04	-1,28E+06	8,20E+00
73,0000	-0,4878	-3,43E-04	-1,28E+06	8,18E+00
74,0000	-0,4963	-3,51E-04	-1,26E+06	8,10E+00
75,0000	-0,5050	-3,57E-04	-1,26E+06	8,09E+00
76,0000	-0,5136	-3,62E-04	-1,26E+06	8,08E+00
77,0000	-0,5224	-3,68E-04	-1,26E+06	8,06E+00
78,0000	-0,5314	-3,76E-04	-1,25E+06	7,99E+00
79,0000	-0,5403	-3,81E-04	-1,24E+06	7,98E+00
80,0000	-0,5492	-3,89E-04	-1,23E+06	7,91E+00
81,0000	-0,5582	-3,95E-04	-1,23E+06	7,90E+00
82,0000	-0,5671	-4,00E-04	-1,23E+06	7,89E+00
83,0000	-0,5761	-4,08E-04	-1,22E+06	7,83E+00
84,0000	-0,5853	-4,14E-04	-1,22E+06	7,82E+00
85,0000	-0,5952	-4,22E-04	-1,21E+06	7,76E+00
86,0000	-0,6048	-4,27E-04	-1,21E+06	7,75E+00
87,0000	-0,6146	-4,35E-04	-1,20E+06	7,69E+00
88,0000	-0,6243	-4,43E-04	-1,19E+06	7,64E+00
89,0000	-0,6340	-4,49E-04	-1,19E+06	7,63E+00
90,0000	-0,6440	-4,54E-04	-1,19E+06	7,63E+00
91,0000	-0,6539	-4,62E-04	-1,18E+06	7,58E+00

Çizelge 5.22: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta}$	η_{FE}^p
92,0000	-0,6643	-4,70E-04	-1,17E+06	7,53E+00
93,0000	-0,6745	-4,76E-04	-1,17E+06	7,52E+00
94,0000	-0,6848	-4,84E-04	-1,17E+06	7,48E+00
95,0000	-0,6952	-4,89E-04	-1,17E+06	7,47E+00
96,0000	-0,7055	-4,97E-04	-1,16E+06	7,43E+00
97,0000	-0,7161	-5,08E-04	-1,15E+06	7,35E+00
98,0000	-0,7266	-5,14E-04	-1,15E+06	7,34E+00
99,0000	-0,7374	-5,22E-04	-1,14E+06	7,30E+00
100,0000	-0,7482	-5,27E-04	-1,14E+06	7,30E+00
101,0000	-0,7589	-5,38E-04	-1,13E+06	7,23E+00
102,0000	-0,7696	-5,43E-04	-1,13E+06	7,23E+00
103,0000	-0,7805	-5,51E-04	-1,12E+06	7,19E+00
104,0000	-0,7916	-5,59E-04	-1,12E+06	7,15E+00
105,0000	-0,8019	-5,65E-04	-1,12E+06	7,15E+00
106,0000	-0,8109	-5,76E-04	-1,10E+06	7,09E+00
107,0000	-0,8202	-5,81E-04	-1,10E+06	7,09E+00
108,0000	-0,8295	-5,92E-04	-1,09E+06	7,02E+00
109,0000	-0,8398	-5,97E-04	-1,09E+06	7,02E+00
110,0000	-0,8502	-6,08E-04	-1,09E+06	6,96E+00
111,0000	-0,8581	-6,19E-04	-1,08E+06	6,90E+00
112,0000	-0,8691	-6,30E-04	-1,07E+06	6,84E+00
113,0000	-0,8738	-6,41E-04	-1,06E+06	6,79E+00

Çizelge 5.27: $d=0.60\text{ m}$, $b=4.6\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta}$	η_{FE}^p
75,0000	-0,4050	-1,77E-04	-3,81E+06	2,44E+01
76,0000	-0,4115	-1,80E-04	-3,81E+06	2,44E+01
77,0000	-0,4181	-1,83E-04	-3,80E+06	2,43E+01
78,0000	-0,4247	-1,85E-04	-3,79E+06	2,43E+01
79,0000	-0,4313	-1,88E-04	-3,78E+06	2,43E+01
80,0000	-0,4380	-1,91E-04	-3,78E+06	2,42E+01
81,0000	-0,4447	-1,93E-04	-3,77E+06	2,42E+01
82,0000	-0,4514	-1,96E-04	-3,76E+06	2,41E+01
83,0000	-0,4582	-1,99E-04	-3,75E+06	2,41E+01
84,0000	-0,4652	-2,03E-04	-3,72E+06	2,39E+01
85,0000	-0,4721	-2,05E-04	-3,74E+06	2,40E+01
86,0000	-0,4790	-2,09E-04	-3,71E+06	2,38E+01
87,0000	-0,4859	-2,10E-04	-3,73E+06	2,39E+01
88,0000	-0,4929	-2,14E-04	-3,70E+06	2,37E+01
89,0000	-0,4998	-2,15E-04	-3,72E+06	2,38E+01
90,0000	-0,5070	-2,20E-04	-3,69E+06	2,36E+01
91,0000	-0,5141	-2,21E-04	-3,70E+06	2,38E+01

Çizelge 5.27: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta}$	η_{FE}^p
92,0000	-0,5213	-2,25E-04	-3,68E+06	2,36E+01
93,0000	-0,5288	-2,26E-04	-3,70E+06	2,37E+01
94,0000	-0,5364	-2,30E-04	-3,67E+06	2,36E+01
95,0000	-0,5441	-2,34E-04	-3,65E+06	2,34E+01
96,0000	-0,5517	-2,36E-04	-3,67E+06	2,35E+01
97,0000	-0,5594	-2,40E-04	-3,64E+06	2,34E+01
98,0000	-0,5671	-2,44E-04	-3,62E+06	2,32E+01
99,0000	-0,5751	-2,45E-04	-3,64E+06	2,34E+01
100,0000	-0,5830	-2,49E-04	-3,62E+06	2,32E+01
101,0000	-0,5909	-2,53E-04	-3,60E+06	2,31E+01
102,0000	-0,5988	-2,54E-04	-3,62E+06	2,32E+01
103,0000	-0,6067	-2,58E-04	-3,60E+06	2,31E+01
104,0000	-0,6146	-2,62E-04	-3,58E+06	2,29E+01
105,0000	-0,6228	-2,63E-04	-3,60E+06	2,31E+01
106,0000	-0,6309	-2,67E-04	-3,58E+06	2,30E+01
107,0000	-0,6393	-2,71E-04	-3,56E+06	2,28E+01
108,0000	-0,6477	-2,75E-04	-3,54E+06	2,27E+01
109,0000	-0,6564	-2,75E-04	-3,56E+06	2,28E+01
110,0000	-0,6650	-2,79E-04	-3,54E+06	2,27E+01
111,0000	-0,6737	-2,83E-04	-3,53E+06	2,26E+01
112,0000	-0,6824	-2,87E-04	-3,52E+06	2,26E+01
113,0000	-0,6913	-2,88E-04	-3,54E+06	2,27E+01
114,0000	-0,7003	-2,92E-04	-3,53E+06	2,26E+01
115,0000	-0,7093	-2,95E-04	-3,52E+06	2,26E+01
116,0000	-0,7182	-2,99E-04	-3,48E+06	2,23E+01
117,0000	-0,7273	-3,03E-04	-3,47E+06	2,22E+01
118,0000	-0,7366	-3,07E-04	-3,46E+06	2,22E+01
119,0000	-0,7458	-3,07E-04	-3,48E+06	2,23E+01
120,0000	-0,7550	-3,11E-04	-3,47E+06	2,23E+01
121,0000	-0,7635	-3,15E-04	-3,47E+06	2,22E+01
122,0000	-0,7707	-3,18E-04	-3,46E+06	2,22E+01
123,0000	-0,7784	-3,22E-04	-3,45E+06	2,21E+01
124,0000	-0,7860	-3,26E-04	-3,44E+06	2,21E+01
125,0000	-0,7947	-3,29E-04	-3,44E+06	2,20E+01
126,0000	-0,8036	-3,32E-04	-3,40E+06	2,18E+01
127,0000	-0,8126	-3,38E-04	-3,37E+06	2,16E+01
128,0000	-0,8217	-3,41E-04	-3,37E+06	2,16E+01
129,0000	-0,8325	-3,46E-04	-3,35E+06	2,15E+01
130,0000	-0,8432	-3,51E-04	-3,33E+06	2,14E+01
131,0000	-0,8542	-3,56E-04	-3,31E+06	2,13E+01
132,0000	-0,8597	-3,60E-04	-3,30E+06	2,12E+01

Çizelge 5.28: $d=0.80\text{ m}$, $b=3.0\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta}$	η_{FE}^p
54,0000	-0,4010	-3,31E-04	-1,47E+06	4,08E+00
55,0000	-0,4094	-3,39E-04	-1,46E+06	4,07E+00
56,0000	-0,4180	-3,47E-04	-1,45E+06	4,05E+00
57,0000	-0,4267	-3,55E-04	-1,45E+06	4,03E+00
58,0000	-0,4353	-3,62E-04	-1,44E+06	4,02E+00
59,0000	-0,4442	-3,66E-04	-1,45E+06	4,04E+00
60,0000	-0,4530	-3,74E-04	-1,44E+06	4,02E+00
61,0000	-0,4620	-3,81E-04	-1,44E+06	4,01E+00
62,0000	-0,4710	-3,92E-04	-1,42E+06	3,97E+00
63,0000	-0,4800	-3,99E-04	-1,42E+06	3,96E+00
64,0000	-0,4892	-4,06E-04	-1,42E+06	3,95E+00
65,0000	-0,4983	-4,14E-04	-1,41E+06	3,94E+00
66,0000	-0,5076	-4,21E-04	-1,41E+06	3,93E+00
67,0000	-0,5168	-4,28E-04	-1,41E+06	3,93E+00
68,0000	-0,5261	-4,33E-04	-1,41E+06	3,93E+00
69,0000	-0,5355	-4,47E-04	-1,39E+06	3,87E+00
70,0000	-0,5448	-4,53E-04	-1,39E+06	3,87E+00
71,0000	-0,5542	-4,60E-04	-1,39E+06	3,87E+00
72,0000	-0,5639	-4,70E-04	-1,38E+06	3,84E+00
73,0000	-0,5737	-4,77E-04	-1,38E+06	3,84E+00
74,0000	-0,5837	-4,87E-04	-1,37E+06	3,81E+00
75,0000	-0,5940	-4,93E-04	-1,37E+06	3,81E+00
76,0000	-0,6042	-5,00E-04	-1,37E+06	3,81E+00
77,0000	-0,6145	-5,10E-04	-1,36E+06	3,78E+00
78,0000	-0,6248	-5,20E-04	-1,35E+06	3,76E+00
79,0000	-0,6352	-5,30E-04	-1,34E+06	3,74E+00
80,0000	-0,6457	-5,37E-04	-1,34E+06	3,74E+00
81,0000	-0,6564	-5,47E-04	-1,33E+06	3,71E+00
82,0000	-0,6671	-5,57E-04	-1,33E+06	3,69E+00
83,0000	-0,6780	-5,63E-04	-1,33E+06	3,69E+00
84,0000	-0,6889	-5,77E-04	-1,31E+06	3,65E+00
85,0000	-0,6997	-5,87E-04	-1,30E+06	3,63E+00
86,0000	-0,7109	-5,93E-04	-1,30E+06	3,63E+00
87,0000	-0,7222	-6,03E-04	-1,30E+06	3,61E+00
88,0000	-0,7335	-6,13E-04	-1,29E+06	3,60E+00
89,0000	-0,7449	-6,23E-04	-1,29E+06	3,58E+00
90,0000	-0,7564	-6,33E-04	-1,28E+06	3,56E+00
91,0000	-0,7679	-6,43E-04	-1,27E+06	3,55E+00
92,0000	-0,7791	-6,53E-04	-1,27E+06	3,53E+00
93,0000	-0,7888	-6,63E-04	-1,26E+06	3,51E+00
94,0000	-0,7987	-6,73E-04	-1,26E+06	3,50E+00
95,0000	-0,8089	-6,87E-04	-1,25E+06	3,47E+00
96,0000	-0,8190	-6,97E-04	-1,24E+06	3,45E+00
97,0000	-0,8292	-7,07E-04	-1,24E+06	3,44E+00

Çizelge 5.28: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta}$	η_{FE}^p
98,0000	-0,8394	-7,17E-04	-1,23E+06	3,43E+00
99,0000	-0,8490	-7,30E-04	-1,22E+06	3,40E+00
100,0000	-0,8532	-7,40E-04	-1,22E+06	3,39E+00
101,0000	-0,8591	-7,50E-04	-1,21E+06	3,38E+00

Çizelge 5.35: $d=0.80\text{ m}$, $b=4.4\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta}$	η_{FE}^p
52,0000	-0,4022	-2,25E-04	-5,56E+06	1,55E+01
53,0000	-0,4105	-2,30E-04	-5,53E+06	1,54E+01
54,0000	-0,4190	-2,34E-04	-5,55E+06	1,54E+01
55,0000	-0,4277	-2,39E-04	-5,53E+06	1,54E+01
56,0000	-0,4364	-2,44E-04	-5,50E+06	1,53E+01
57,0000	-0,4451	-2,48E-04	-5,52E+06	1,54E+01
58,0000	-0,4537	-2,54E-04	-5,48E+06	1,53E+01
59,0000	-0,4624	-2,58E-04	-5,50E+06	1,53E+01
60,0000	-0,4714	-2,63E-04	-5,47E+06	1,52E+01
61,0000	-0,4808	-2,69E-04	-5,43E+06	1,51E+01
62,0000	-0,4900	-2,74E-04	-5,43E+06	1,51E+01
63,0000	-0,4992	-2,80E-04	-5,40E+06	1,50E+01
64,0000	-0,5086	-2,85E-04	-5,41E+06	1,51E+01
65,0000	-0,5186	-2,91E-04	-5,36E+06	1,49E+01
66,0000	-0,5286	-2,97E-04	-5,32E+06	1,48E+01
67,0000	-0,5386	-3,02E-04	-5,32E+06	1,48E+01
68,0000	-0,5486	-3,08E-04	-5,29E+06	1,47E+01
69,0000	-0,5587	-3,14E-04	-5,29E+06	1,47E+01
70,0000	-0,5689	-3,20E-04	-5,26E+06	1,46E+01
71,0000	-0,5792	-3,25E-04	-5,23E+06	1,46E+01
72,0000	-0,5895	-3,31E-04	-5,23E+06	1,46E+01
73,0000	-0,5998	-3,36E-04	-5,20E+06	1,45E+01
74,0000	-0,6101	-3,42E-04	-5,20E+06	1,45E+01
75,0000	-0,6205	-3,48E-04	-5,17E+06	1,44E+01
76,0000	-0,6310	-3,54E-04	-5,15E+06	1,43E+01
77,0000	-0,6416	-3,59E-04	-5,15E+06	1,43E+01
78,0000	-0,6525	-3,69E-04	-5,07E+06	1,41E+01
79,0000	-0,6638	-3,75E-04	-5,07E+06	1,41E+01
80,0000	-0,6750	-3,80E-04	-5,05E+06	1,41E+01
81,0000	-0,6863	-3,86E-04	-5,02E+06	1,40E+01
82,0000	-0,6977	-3,92E-04	-5,03E+06	1,40E+01
83,0000	-0,7090	-3,98E-04	-5,00E+06	1,39E+01
84,0000	-0,7205	-4,08E-04	-4,96E+06	1,38E+01
85,0000	-0,7320	-4,14E-04	-4,93E+06	1,37E+01
86,0000	-0,7426	-4,20E-04	-4,91E+06	1,37E+01

Çizelge 5.35: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta}$	η_{FE}^p
87,0000	-0,7518	-4,25E-04	-4,92E+06	1,37E+01
88,0000	-0,7614	-4,31E-04	-4,89E+06	1,36E+01
89,0000	-0,7715	-4,41E-04	-4,85E+06	1,35E+01
90,0000	-0,7819	-4,48E-04	-4,83E+06	1,34E+01
91,0000	-0,7921	-4,54E-04	-4,80E+06	1,34E+01
92,0000	-0,8025	-4,60E-04	-4,80E+06	1,34E+01
93,0000	-0,8129	-4,67E-04	-4,78E+06	1,33E+01
94,0000	-0,8237	-4,73E-04	-4,78E+06	1,33E+01
95,0000	-0,8346	-4,85E-04	-4,70E+06	1,31E+01

Çizelge 5.37: $d=1.00\text{ m}$, $b=3.0\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta}$	η_{FE}^p
72,0000	-0,4033	-4,26E-04	-2,53E+06	3,74E+00
73,0000	-0,4100	-4,37E-04	-2,51E+06	3,72E+00
74,0000	-0,4168	-4,44E-04	-2,50E+06	3,69E+00
75,0000	-0,4236	-4,50E-04	-2,51E+06	3,71E+00
76,0000	-0,4304	-4,56E-04	-2,50E+06	3,69E+00
77,0000	-0,4373	-4,67E-04	-2,48E+06	3,67E+00
78,0000	-0,4444	-4,74E-04	-2,47E+06	3,65E+00
79,0000	-0,4515	-4,80E-04	-2,48E+06	3,66E+00
80,0000	-0,4586	-4,86E-04	-2,47E+06	3,65E+00
81,0000	-0,4658	-4,98E-04	-2,45E+06	3,62E+00
82,0000	-0,4730	-5,04E-04	-2,44E+06	3,60E+00
83,0000	-0,4803	-5,11E-04	-2,45E+06	3,61E+00
84,0000	-0,4878	-5,22E-04	-2,41E+06	3,57E+00
85,0000	-0,4953	-5,28E-04	-2,42E+06	3,58E+00
86,0000	-0,5028	-5,40E-04	-2,39E+06	3,53E+00
87,0000	-0,5103	-5,46E-04	-2,40E+06	3,55E+00
88,0000	-0,5180	-5,52E-04	-2,39E+06	3,53E+00
89,0000	-0,5256	-5,63E-04	-2,38E+06	3,51E+00
90,0000	-0,5338	-5,71E-04	-2,36E+06	3,49E+00
91,0000	-0,5418	-5,82E-04	-2,35E+06	3,48E+00
92,0000	-0,5498	-5,89E-04	-2,34E+06	3,46E+00
93,0000	-0,5581	-5,96E-04	-2,35E+06	3,47E+00
94,0000	-0,5663	-6,09E-04	-2,32E+06	3,42E+00
95,0000	-0,5750	-6,16E-04	-2,32E+06	3,43E+00
96,0000	-0,5836	-6,29E-04	-2,29E+06	3,38E+00
97,0000	-0,5922	-6,36E-04	-2,29E+06	3,39E+00
98,0000	-0,6008	-6,49E-04	-2,27E+06	3,35E+00
99,0000	-0,6095	-6,57E-04	-2,27E+06	3,35E+00
100,0000	-0,6184	-6,64E-04	-2,26E+06	3,34E+00
101,0000	-0,6273	-6,77E-04	-2,25E+06	3,32E+00

Çizelge 5.37: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta}$	η_{FE}^p
102,0000	-0,6363	-6,89E-04	-2,22E+06	3,28E+00
103,0000	-0,6455	-6,97E-04	-2,22E+06	3,29E+00
104,0000	-0,6553	-7,10E-04	-2,20E+06	3,25E+00
105,0000	-0,6650	-7,18E-04	-2,20E+06	3,25E+00
106,0000	-0,6748	-7,31E-04	-2,18E+06	3,21E+00
107,0000	-0,6848	-7,44E-04	-2,16E+06	3,20E+00
108,0000	-0,6948	-7,52E-04	-2,15E+06	3,18E+00
109,0000	-0,7049	-7,66E-04	-2,14E+06	3,16E+00
110,0000	-0,7153	-7,79E-04	-2,12E+06	3,13E+00
111,0000	-0,7257	-7,87E-04	-2,12E+06	3,13E+00
112,0000	-0,7361	-8,01E-04	-2,10E+06	3,10E+00
113,0000	-0,7465	-8,14E-04	-2,09E+06	3,08E+00
114,0000	-0,7564	-8,23E-04	-2,08E+06	3,07E+00
115,0000	-0,7646	-8,36E-04	-2,07E+06	3,06E+00
116,0000	-0,7733	-8,50E-04	-2,05E+06	3,02E+00
117,0000	-0,7822	-8,59E-04	-2,05E+06	3,03E+00
118,0000	-0,7911	-8,72E-04	-2,03E+06	3,00E+00
119,0000	-0,8001	-8,86E-04	-2,02E+06	2,98E+00
120,0000	-0,8091	-9,00E-04	-2,00E+06	2,95E+00
121,0000	-0,8181	-9,09E-04	-2,00E+06	2,96E+00
122,0000	-0,8274	-9,23E-04	-1,98E+06	2,93E+00
123,0000	-0,8363	-9,37E-04	-1,97E+06	2,92E+00
124,0000	-0,8389	-9,52E-04	-1,95E+06	2,89E+00

Çizelge 5.42: $d=1.00\text{ m}$, $b=4.0\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta}$	η_{FE}^p
59,0000	-0,4073	-2,45E-04	-5,80E+06	8,57E+00
60,0000	-0,4151	-2,50E-04	-5,75E+06	8,50E+00
61,0000	-0,4229	-2,52E-04	-5,78E+06	8,55E+00
62,0000	-0,4313	-2,59E-04	-5,76E+06	8,51E+00
63,0000	-0,4396	-2,65E-04	-5,69E+06	8,41E+00
64,0000	-0,4478	-2,72E-04	-5,67E+06	8,38E+00
65,0000	-0,4561	-2,74E-04	-5,69E+06	8,41E+00
66,0000	-0,4645	-2,80E-04	-5,64E+06	8,34E+00
67,0000	-0,4730	-2,86E-04	-5,62E+06	8,31E+00
68,0000	-0,4815	-2,92E-04	-5,57E+06	8,24E+00
69,0000	-0,4901	-2,95E-04	-5,63E+06	8,32E+00
70,0000	-0,4987	-3,01E-04	-5,59E+06	8,25E+00
71,0000	-0,5072	-3,07E-04	-5,53E+06	8,18E+00
72,0000	-0,5160	-3,13E-04	-5,52E+06	8,16E+00
73,0000	-0,5246	-3,20E-04	-5,48E+06	8,09E+00
74,0000	-0,5334	-3,22E-04	-5,53E+06	8,18E+00

Çizelge 5.42: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta}$	η_{FE}^p
75,0000	-0,5424	-3,28E-04	-5,48E+06	8,10E+00
76,0000	-0,5513	-3,35E-04	-5,44E+06	8,03E+00
77,0000	-0,5604	-3,41E-04	-5,42E+06	8,01E+00
78,0000	-0,5696	-3,48E-04	-5,38E+06	7,95E+00
79,0000	-0,5789	-3,54E-04	-5,37E+06	7,93E+00
80,0000	-0,5882	-3,56E-04	-5,39E+06	7,96E+00
81,0000	-0,5976	-3,63E-04	-5,35E+06	7,90E+00
82,0000	-0,6071	-3,69E-04	-5,34E+06	7,89E+00
83,0000	-0,6165	-3,76E-04	-5,30E+06	7,83E+00
84,0000	-0,6260	-3,82E-04	-5,29E+06	7,81E+00
85,0000	-0,6359	-3,89E-04	-5,25E+06	7,75E+00
86,0000	-0,6459	-3,96E-04	-5,21E+06	7,70E+00
87,0000	-0,6559	-4,02E-04	-5,19E+06	7,68E+00
88,0000	-0,6659	-4,06E-04	-5,20E+06	7,69E+00
89,0000	-0,6759	-4,12E-04	-5,19E+06	7,67E+00
90,0000	-0,6859	-4,19E-04	-5,15E+06	7,61E+00
91,0000	-0,6968	-4,28E-04	-5,10E+06	7,53E+00
92,0000	-0,7079	-4,35E-04	-5,08E+06	7,50E+00
93,0000	-0,7188	-4,39E-04	-5,08E+06	7,51E+00
94,0000	-0,7297	-4,46E-04	-5,06E+06	7,48E+00
95,0000	-0,7386	-4,54E-04	-5,02E+06	7,41E+00
96,0000	-0,7476	-4,62E-04	-4,98E+06	7,36E+00
97,0000	-0,7567	-4,70E-04	-4,96E+06	7,33E+00
98,0000	-0,7659	-4,74E-04	-4,96E+06	7,33E+00
99,0000	-0,7751	-4,82E-04	-4,93E+06	7,29E+00
100,0000	-0,7844	-4,91E-04	-4,89E+06	7,23E+00
101,0000	-0,7938	-4,99E-04	-4,85E+06	7,16E+00
102,0000	-0,8032	-5,04E-04	-4,86E+06	7,19E+00
103,0000	-0,8127	-5,12E-04	-4,82E+06	7,12E+00

Çizelge 5.46: $d=1.20\text{ m}$, $b=3.0\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta}$	η_{FE}^p
56,0000	-0,4054	-3,95E-04	-3,40E+06	3,03E+00
57,0000	-0,4138	-4,05E-04	-3,38E+06	3,01E+00
58,0000	-0,4223	-4,12E-04	-3,37E+06	3,01E+00
59,0000	-0,4309	-4,24E-04	-3,35E+06	2,99E+00
60,0000	-0,4397	-4,31E-04	-3,34E+06	2,98E+00
61,0000	-0,4485	-4,37E-04	-3,34E+06	2,98E+00
62,0000	-0,4574	-4,48E-04	-3,32E+06	2,96E+00
63,0000	-0,4664	-4,60E-04	-3,28E+06	2,93E+00
64,0000	-0,4754	-4,67E-04	-3,30E+06	2,94E+00
65,0000	-0,4844	-4,78E-04	-3,26E+06	2,91E+00

Çizelge 5.46: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta}$	η_{FE}^p
66,0000	-0,4934	-4,85E-04	-3,26E+06	2,91E+00
67,0000	-0,5028	-4,97E-04	-3,24E+06	2,89E+00
68,0000	-0,5121	-5,05E-04	-3,23E+06	2,88E+00
69,0000	-0,5216	-5,17E-04	-3,21E+06	2,86E+00
70,0000	-0,5312	-5,24E-04	-3,21E+06	2,86E+00
71,0000	-0,5413	-5,37E-04	-3,17E+06	2,82E+00
72,0000	-0,5513	-5,45E-04	-3,17E+06	2,83E+00
73,0000	-0,5615	-5,58E-04	-3,14E+06	2,80E+00
74,0000	-0,5719	-5,66E-04	-3,14E+06	2,80E+00
75,0000	-0,5825	-5,80E-04	-3,10E+06	2,77E+00
76,0000	-0,5930	-5,88E-04	-3,09E+06	2,76E+00
77,0000	-0,6037	-5,97E-04	-3,10E+06	2,76E+00
78,0000	-0,6146	-6,11E-04	-3,06E+06	2,73E+00
79,0000	-0,6255	-6,20E-04	-3,06E+06	2,73E+00
80,0000	-0,6364	-6,35E-04	-3,02E+06	2,70E+00
81,0000	-0,6476	-6,44E-04	-3,01E+06	2,68E+00
82,0000	-0,6590	-6,58E-04	-2,99E+06	2,67E+00
83,0000	-0,6707	-6,68E-04	-2,98E+06	2,66E+00
84,0000	-0,6828	-6,83E-04	-2,96E+06	2,64E+00
85,0000	-0,6947	-6,93E-04	-2,94E+06	2,62E+00
86,0000	-0,7066	-7,08E-04	-2,91E+06	2,59E+00
87,0000	-0,7187	-7,18E-04	-2,91E+06	2,59E+00
88,0000	-0,7311	-7,34E-04	-2,87E+06	2,56E+00
89,0000	-0,7424	-7,44E-04	-2,88E+06	2,57E+00
90,0000	-0,7520	-7,59E-04	-2,84E+06	2,54E+00
91,0000	-0,7622	-7,70E-04	-2,83E+06	2,53E+00
92,0000	-0,7723	-7,85E-04	-2,81E+06	2,51E+00
93,0000	-0,7826	-7,96E-04	-2,80E+06	2,50E+00
94,0000	-0,7930	-8,11E-04	-2,78E+06	2,48E+00
95,0000	-0,8036	-8,23E-04	-2,77E+06	2,47E+00

Çizelge 5.49: $d=1.20\text{ m}$, $b=3.6\text{ m}$

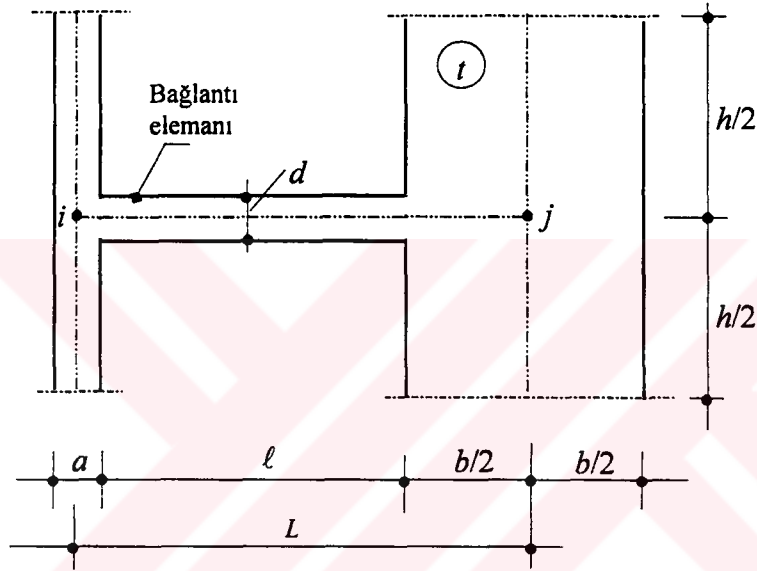
Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta}$	η_{FE}^p
69,0000	-0,4001	-2,95E-04	-5,62E+06	5,02E+00
70,0000	-0,4068	-3,01E-04	-5,59E+06	4,98E+00
71,0000	-0,4136	-3,07E-04	-5,54E+06	4,94E+00
72,0000	-0,4204	-3,13E-04	-5,53E+06	4,93E+00
73,0000	-0,4272	-3,18E-04	-5,50E+06	4,90E+00
74,0000	-0,4341	-3,24E-04	-5,49E+06	4,89E+00
75,0000	-0,4409	-3,30E-04	-5,45E+06	4,86E+00
76,0000	-0,4479	-3,36E-04	-5,42E+06	4,83E+00
77,0000	-0,4549	-3,38E-04	-5,47E+06	4,88E+00

Çizelge 5.49: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$m'_{i\theta i}$	η_{FE}^p
78,0000	-0,4620	-3,44E-04	-5,44E+06	4,85E+00
79,0000	-0,4690	-3,50E-04	-5,43E+06	4,85E+00
80,0000	-0,4761	-3,55E-04	-5,41E+06	4,82E+00
81,0000	-0,4835	-3,62E-04	-5,37E+06	4,79E+00
82,0000	-0,4908	-3,68E-04	-5,36E+06	4,78E+00
83,0000	-0,4981	-3,74E-04	-5,33E+06	4,75E+00
84,0000	-0,5055	-3,80E-04	-5,32E+06	4,74E+00
85,0000	-0,5128	-3,86E-04	-5,28E+06	4,71E+00
86,0000	-0,5202	-3,92E-04	-5,26E+06	4,69E+00
87,0000	-0,5277	-3,98E-04	-5,25E+06	4,68E+00
88,0000	-0,5351	-4,04E-04	-5,22E+06	4,65E+00
89,0000	-0,5427	-4,10E-04	-5,21E+06	4,65E+00
90,0000	-0,5504	-4,13E-04	-5,23E+06	4,66E+00
91,0000	-0,5582	-4,20E-04	-5,20E+06	4,63E+00
92,0000	-0,5661	-4,26E-04	-5,19E+06	4,63E+00
93,0000	-0,5740	-4,33E-04	-5,15E+06	4,60E+00
94,0000	-0,5818	-4,39E-04	-5,15E+06	4,59E+00
95,0000	-0,5897	-4,46E-04	-5,12E+06	4,56E+00
96,0000	-0,5977	-4,52E-04	-5,08E+06	4,53E+00
97,0000	-0,6056	-4,59E-04	-5,08E+06	4,53E+00
98,0000	-0,6138	-4,66E-04	-5,04E+06	4,50E+00
99,0000	-0,6221	-4,73E-04	-5,03E+06	4,49E+00
100,0000	-0,6307	-4,80E-04	-5,00E+06	4,46E+00
101,0000	-0,6394	-4,88E-04	-4,96E+06	4,43E+00
102,0000	-0,6482	-4,95E-04	-4,95E+06	4,42E+00
103,0000	-0,6571	-5,02E-04	-4,92E+06	4,39E+00
104,0000	-0,6663	-5,06E-04	-4,94E+06	4,41E+00
105,0000	-0,6754	-5,14E-04	-4,91E+06	4,38E+00
106,0000	-0,6845	-5,22E-04	-4,87E+06	4,34E+00
107,0000	-0,6938	-5,29E-04	-4,86E+06	4,33E+00
108,0000	-0,7031	-5,37E-04	-4,82E+06	4,30E+00
109,0000	-0,7124	-5,45E-04	-4,81E+06	4,29E+00
110,0000	-0,7218	-5,53E-04	-4,77E+06	4,26E+00
111,0000	-0,7304	-5,61E-04	-4,74E+06	4,23E+00
112,0000	-0,7376	-5,65E-04	-4,76E+06	4,25E+00
113,0000	-0,7453	-5,74E-04	-4,72E+06	4,21E+00
114,0000	-0,7531	-5,82E-04	-4,71E+06	4,20E+00
115,0000	-0,7610	-5,90E-04	-4,68E+06	4,17E+00
116,0000	-0,7690	-5,98E-04	-4,65E+06	4,14E+00
117,0000	-0,7770	-6,07E-04	-4,63E+06	4,13E+00
118,0000	-0,7849	-6,16E-04	-4,60E+06	4,10E+00
119,0000	-0,7929	-6,20E-04	-4,61E+06	4,11E+00
120,0000	-0,8011	-6,29E-04	-4,58E+06	4,09E+00
121,0000	-0,8092	-6,37E-04	-4,55E+06	4,06E+00
122,0000	-0,8175	-6,46E-04	-4,54E+06	4,05E+00
123,0000	-0,8242	-6,55E-04	-4,51E+06	4,02E+00

EK-2 KOLON-PERDE BAĞ ELEMANLARI İÇİN ÜRETİLEN SAYISAL(FE) SONUÇLAR HAKKINDA AÇIKLAMA

Ekli diskette çizelgeler(Çizelge 5.55-5.216) halinde verilen, kolon-perde bağ elemanları için üretilen sayısal sonuçlar aşağıda örneklendirilmiştir.



$\theta_j = 1, \theta_i = 0$ durumu

Çizelge 5.79: $d=0.60\text{ m}, b=4.2\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{j\theta}$	η_{jj}^p
5,10E+01	-3,99E-01	7,24E-04	1,06E+06	5,23E+00
5,20E+01	-4,09E-01	7,43E-04	1,05E+06	5,20E+00
5,30E+01	-4,19E-01	7,63E-04	1,04E+06	5,16E+00
5,40E+01	-4,30E-01	7,83E-04	1,03E+06	5,12E+00
5,50E+01	-4,40E-01	8,03E-04	1,03E+06	5,09E+00
5,60E+01	-4,51E-01	8,23E-04	1,02E+06	5,05E+00
5,70E+01	-4,62E-01	8,44E-04	1,01E+06	5,02E+00
5,80E+01	-4,75E-01	8,65E-04	1,01E+06	4,98E+00
5,90E+01	-4,89E-01	8,87E-04	9,98E+05	4,94E+00
6,00E+01	-5,03E-01	9,09E-04	9,90E+05	4,90E+00
6,10E+01	-5,17E-01	9,34E-04	9,80E+05	4,85E+00

Çizelge 5.79: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{j\theta}$	η_{jj}^p
6,20E+01	-5,32E-01	9,61E-04	9,67E+05	4,79E+00
6,30E+01	-5,47E-01	9,89E-04	9,55E+05	4,73E+00
6,40E+01	-5,62E-01	1,02E-03	9,44E+05	4,67E+00
6,50E+01	-5,75E-01	1,05E-03	9,31E+05	4,61E+00
6,60E+01	-5,86E-01	1,08E-03	9,19E+05	4,55E+00
6,70E+01	-5,96E-01	1,11E-03	9,07E+05	4,49E+00
6,80E+01	-6,07E-01	1,14E-03	8,96E+05	4,43E+00
6,90E+01	-6,18E-01	1,17E-03	8,84E+05	4,37E+00
7,00E+01	-6,29E-01	1,20E-03	8,72E+05	4,32E+00
7,10E+01	-6,41E-01	1,24E-03	8,61E+05	4,26E+00
7,20E+01	-6,52E-01	1,27E-03	8,50E+05	4,21E+00
7,30E+01	-6,64E-01	1,31E-03	8,39E+05	4,15E+00
7,40E+01	-6,75E-01	1,34E-03	8,29E+05	4,10E+00
7,50E+01	-6,86E-01	1,37E-03	8,19E+05	4,06E+00
7,60E+01	-6,98E-01	1,41E-03	8,10E+05	4,01E+00
7,70E+01	-7,09E-01	1,44E-03	7,99E+05	3,96E+00
7,80E+01	-7,21E-01	1,48E-03	7,89E+05	3,91E+00
7,90E+01	-7,32E-01	1,52E-03	7,79E+05	3,86E+00
8,00E+01	-7,44E-01	1,56E-03	7,69E+05	3,81E+00
8,10E+01	-7,57E-01	1,60E-03	7,58E+05	3,75E+00
8,20E+01	-7,71E-01	1,65E-03	7,48E+05	3,70E+00
8,30E+01	-7,84E-01	1,69E-03	7,37E+05	3,65E+00
8,40E+01	-7,97E-01	1,73E-03	7,27E+05	3,60E+00
8,50E+01	-8,10E-01	1,78E-03	7,16E+05	3,55E+00
8,60E+01	-8,23E-01	1,83E-03	7,06E+05	3,50E+00
8,70E+01	-8,37E-01	1,87E-03	6,96E+05	3,45E+00
8,80E+01	-8,50E-01	1,92E-03	6,87E+05	3,40E+00
8,90E+01	-8,64E-01	1,97E-03	6,77E+05	3,35E+00
9,00E+01	-8,75E-01	2,02E-03	6,68E+05	3,31E+00

Çizelge 5.82: $d=0.80\text{ m}$, $b=3.0\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{j\theta}$	η_{jj}^p
3,10E+01	-3,89E-01	8,76E-04	1,06E+06	2,33E+00
3,20E+01	-4,04E-01	9,16E-04	1,05E+06	2,30E+00
3,30E+01	-4,20E-01	9,56E-04	1,04E+06	2,27E+00
3,40E+01	-4,36E-01	9,98E-04	1,02E+06	2,24E+00
3,50E+01	-4,52E-01	1,04E-03	1,01E+06	2,22E+00
3,60E+01	-4,70E-01	1,08E-03	9,98E+05	2,19E+00
3,70E+01	-4,91E-01	1,13E-03	9,85E+05	2,16E+00
3,80E+01	-5,13E-01	1,17E-03	9,73E+05	2,14E+00
3,90E+01	-5,34E-01	1,22E-03	9,62E+05	2,11E+00

Çizelge 5.82: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{j\theta_j}$	η_{jj}^p
4,00E+01	-5,57E-01	1,27E-03	9,45E+05	2,07E+00
4,10E+01	-5,77E-01	1,33E-03	9,28E+05	2,04E+00
4,20E+01	-5,93E-01	1,38E-03	9,11E+05	2,00E+00
4,30E+01	-6,09E-01	1,44E-03	8,94E+05	1,96E+00
4,40E+01	-6,26E-01	1,51E-03	8,77E+05	1,92E+00
4,50E+01	-6,43E-01	1,57E-03	8,61E+05	1,89E+00
4,60E+01	-6,60E-01	1,63E-03	8,46E+05	1,86E+00
4,70E+01	-6,77E-01	1,70E-03	8,32E+05	1,82E+00
4,80E+01	-6,94E-01	1,76E-03	8,17E+05	1,79E+00
4,90E+01	-7,11E-01	1,83E-03	8,03E+05	1,76E+00
5,00E+01	-7,28E-01	1,90E-03	7,90E+05	1,73E+00
5,10E+01	-7,46E-01	1,97E-03	7,76E+05	1,70E+00
5,20E+01	-7,63E-01	2,05E-03	7,61E+05	1,67E+00
5,30E+01	-7,79E-01	2,13E-03	7,45E+05	1,64E+00
5,40E+01	-7,96E-01	2,22E-03	7,29E+05	1,60E+00
5,50E+01	-8,12E-01	2,31E-03	7,14E+05	1,57E+00
5,60E+01	-8,29E-01	2,41E-03	6,99E+05	1,53E+00
5,70E+01	-8,44E-01	2,50E-03	6,84E+05	1,50E+00
5,80E+01	-8,49E-01	2,60E-03	6,70E+05	1,47E+00
5,90E+01	-8,56E-01	2,71E-03	6,54E+05	1,44E+00
6,00E+01	-8,63E-01	2,82E-03	6,38E+05	1,40E+00
6,10E+01	-8,68E-01	2,94E-03	6,22E+05	1,36E+00
6,20E+01	-8,69E-01	3,07E-03	6,06E+05	1,33E+00

Çizelge 5.90: $d=0.80\text{ m}$, $b=4.6\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{j\theta_j}$	η_{jj}^p
4,90E+01	-3,82E-01	5,45E-04	2,70E+06	5,92E+00
5,00E+01	-3,92E-01	5,60E-04	2,68E+06	5,87E+00
5,10E+01	-4,02E-01	5,76E-04	2,66E+06	5,83E+00
5,20E+01	-4,12E-01	5,91E-04	2,64E+06	5,79E+00
5,30E+01	-4,22E-01	6,07E-04	2,62E+06	5,74E+00
5,40E+01	-4,32E-01	6,23E-04	2,60E+06	5,70E+00
5,50E+01	-4,43E-01	6,40E-04	2,58E+06	5,66E+00
5,60E+01	-4,56E-01	6,56E-04	2,56E+06	5,62E+00
5,70E+01	-4,69E-01	6,73E-04	2,54E+06	5,58E+00
5,80E+01	-4,83E-01	6,90E-04	2,52E+06	5,53E+00
5,90E+01	-4,97E-01	7,09E-04	2,50E+06	5,48E+00
6,00E+01	-5,12E-01	7,29E-04	2,47E+06	5,41E+00
6,10E+01	-5,26E-01	7,50E-04	2,44E+06	5,35E+00
6,20E+01	-5,41E-01	7,71E-04	2,41E+06	5,29E+00
6,30E+01	-5,56E-01	7,92E-04	2,39E+06	5,24E+00

Çizelge 5.90: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{j\theta}$	η_{jj}^p
6,40E+01	-5,66E-01	8,14E-04	2,36E+06	5,17E+00
6,50E+01	-5,76E-01	8,37E-04	2,33E+06	5,11E+00
6,60E+01	-5,86E-01	8,60E-04	2,30E+06	5,05E+00
6,70E+01	-5,97E-01	8,83E-04	2,28E+06	4,99E+00
6,80E+01	-6,07E-01	9,07E-04	2,25E+06	4,94E+00
6,90E+01	-6,18E-01	9,31E-04	2,22E+06	4,88E+00
7,00E+01	-6,28E-01	9,55E-04	2,20E+06	4,83E+00
7,10E+01	-6,38E-01	9,79E-04	2,18E+06	4,77E+00
7,20E+01	-6,49E-01	1,00E-03	2,15E+06	4,72E+00
7,30E+01	-6,59E-01	1,03E-03	2,13E+06	4,67E+00
7,40E+01	-6,69E-01	1,05E-03	2,11E+06	4,62E+00
7,50E+01	-6,81E-01	1,08E-03	2,08E+06	4,56E+00
7,60E+01	-6,92E-01	1,11E-03	2,06E+06	4,51E+00
7,70E+01	-7,04E-01	1,14E-03	2,03E+06	4,45E+00
7,80E+01	-7,15E-01	1,17E-03	2,01E+06	4,40E+00
7,90E+01	-7,27E-01	1,20E-03	1,98E+06	4,35E+00
8,00E+01	-7,38E-01	1,23E-03	1,96E+06	4,30E+00
8,10E+01	-7,50E-01	1,26E-03	1,93E+06	4,24E+00
8,20E+01	-7,62E-01	1,29E-03	1,91E+06	4,19E+00
8,30E+01	-7,74E-01	1,32E-03	1,88E+06	4,13E+00
8,40E+01	-7,87E-01	1,36E-03	1,86E+06	4,07E+00
8,50E+01	-8,00E-01	1,39E-03	1,83E+06	4,02E+00
8,60E+01	-8,13E-01	1,43E-03	1,81E+06	3,96E+00
8,70E+01	-8,26E-01	1,47E-03	1,78E+06	3,91E+00
8,80E+01	-8,39E-01	1,50E-03	1,76E+06	3,85E+00
8,90E+01	-8,53E-01	1,55E-03	1,73E+06	3,79E+00
9,00E+01	-8,67E-01	1,59E-03	1,70E+06	3,73E+00
9,10E+01	-8,72E-01	1,63E-03	1,67E+06	3,67E+00
9,20E+01	-8,75E-01	1,68E-03	1,64E+06	3,61E+00

Çizelge 5.91: $d=1.00\text{ m}$, $b=3.0\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{j\theta}$	η_{jj}^p
3,20E+01	-3,95E-01	8,12E-04	1,77E+06	2,11E+00
3,30E+01	-4,10E-01	8,48E-04	1,75E+06	2,09E+00
3,40E+01	-4,25E-01	8,83E-04	1,73E+06	2,07E+00
3,50E+01	-4,41E-01	9,21E-04	1,71E+06	2,04E+00
3,60E+01	-4,57E-01	9,58E-04	1,69E+06	2,02E+00
3,70E+01	-4,78E-01	9,97E-04	1,67E+06	1,99E+00
3,80E+01	-4,99E-01	1,04E-03	1,65E+06	1,97E+00
3,90E+01	-5,19E-01	1,08E-03	1,63E+06	1,94E+00
4,00E+01	-5,40E-01	1,12E-03	1,61E+06	1,92E+00

Çizelge 5.91: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{j\theta_j}$	η_{ij}^p
4,10E+01	-5,61E-01	1,16E-03	1,59E+06	1,90E+00
4,20E+01	-5,77E-01	1,21E-03	1,57E+06	1,87E+00
4,30E+01	-5,92E-01	1,26E-03	1,54E+06	1,84E+00
4,40E+01	-6,07E-01	1,31E-03	1,52E+06	1,81E+00
4,50E+01	-6,22E-01	1,36E-03	1,49E+06	1,78E+00
4,60E+01	-6,37E-01	1,41E-03	1,47E+06	1,75E+00
4,70E+01	-6,53E-01	1,47E-03	1,44E+06	1,72E+00
4,80E+01	-6,68E-01	1,52E-03	1,42E+06	1,69E+00
4,90E+01	-6,84E-01	1,58E-03	1,40E+06	1,67E+00
5,00E+01	-7,00E-01	1,63E-03	1,38E+06	1,64E+00
5,10E+01	-7,15E-01	1,69E-03	1,36E+06	1,62E+00
5,20E+01	-7,30E-01	1,76E-03	1,33E+06	1,59E+00
5,30E+01	-7,44E-01	1,82E-03	1,31E+06	1,56E+00
5,40E+01	-7,59E-01	1,90E-03	1,28E+06	1,53E+00
5,50E+01	-7,73E-01	1,97E-03	1,26E+06	1,50E+00
5,60E+01	-7,87E-01	2,05E-03	1,23E+06	1,47E+00
5,70E+01	-8,01E-01	2,13E-03	1,20E+06	1,44E+00
5,80E+01	-8,17E-01	2,22E-03	1,17E+06	1,40E+00
5,90E+01	-8,32E-01	2,32E-03	1,15E+06	1,37E+00
6,00E+01	-8,37E-01	2,42E-03	1,12E+06	1,33E+00
6,10E+01	-8,39E-01	2,52E-03	1,09E+06	1,30E+00
6,20E+01	-8,41E-01	2,63E-03	1,06E+06	1,27E+00

Çizelge 5.99: $d=1.00\text{ m}$, $b=4.6\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{j\theta_j}$	η_{ij}^p
5,10E+01	-3,85E-01	5,34E-04	4,29E+06	5,12E+00
5,20E+01	-3,95E-01	5,50E-04	4,26E+06	5,08E+00
5,30E+01	-4,04E-01	5,65E-04	4,22E+06	5,04E+00
5,40E+01	-4,14E-01	5,80E-04	4,19E+06	5,00E+00
5,50E+01	-4,24E-01	5,95E-04	4,16E+06	4,96E+00
5,60E+01	-4,37E-01	6,11E-04	4,12E+06	4,92E+00
5,70E+01	-4,50E-01	6,27E-04	4,09E+06	4,88E+00
5,80E+01	-4,63E-01	6,43E-04	4,06E+06	4,84E+00
5,90E+01	-4,76E-01	6,60E-04	4,03E+06	4,80E+00
6,00E+01	-4,89E-01	6,76E-04	3,99E+06	4,76E+00
6,10E+01	-5,03E-01	6,93E-04	3,96E+06	4,72E+00
6,20E+01	-5,17E-01	7,11E-04	3,93E+06	4,68E+00
6,30E+01	-5,31E-01	7,29E-04	3,89E+06	4,64E+00
6,40E+01	-5,45E-01	7,49E-04	3,85E+06	4,59E+00
6,50E+01	-5,54E-01	7,68E-04	3,81E+06	4,54E+00
6,60E+01	-5,63E-01	7,88E-04	3,77E+06	4,49E+00

Çizelge 5.99: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{j\theta j}$	η^p_{jj}
6,70E+01	-5,72E-01	8,09E-04	3,73E+06	4,45E+00
6,80E+01	-5,82E-01	8,29E-04	3,69E+06	4,40E+00
6,90E+01	-5,91E-01	8,50E-04	3,65E+06	4,35E+00
7,00E+01	-6,01E-01	8,71E-04	3,61E+06	4,31E+00
7,10E+01	-6,10E-01	8,93E-04	3,58E+06	4,27E+00
7,20E+01	-6,20E-01	9,15E-04	3,54E+06	4,22E+00
7,30E+01	-6,29E-01	9,37E-04	3,50E+06	4,18E+00
7,40E+01	-6,38E-01	9,61E-04	3,47E+06	4,13E+00
7,50E+01	-6,48E-01	9,85E-04	3,43E+06	4,09E+00
7,60E+01	-6,58E-01	1,01E-03	3,39E+06	4,04E+00
7,70E+01	-6,67E-01	1,03E-03	3,35E+06	3,99E+00
7,80E+01	-6,78E-01	1,06E-03	3,31E+06	3,94E+00
7,90E+01	-6,89E-01	1,09E-03	3,26E+06	3,89E+00
8,00E+01	-7,01E-01	1,12E-03	3,22E+06	3,84E+00
8,10E+01	-7,13E-01	1,15E-03	3,17E+06	3,78E+00
8,20E+01	-7,24E-01	1,18E-03	3,13E+06	3,73E+00
8,30E+01	-7,36E-01	1,21E-03	3,08E+06	3,67E+00
8,40E+01	-7,48E-01	1,25E-03	3,03E+06	3,61E+00
8,50E+01	-7,59E-01	1,29E-03	2,98E+06	3,55E+00
8,60E+01	-7,70E-01	1,32E-03	2,92E+06	3,49E+00
8,70E+01	-7,81E-01	1,36E-03	2,87E+06	3,42E+00
8,80E+01	-7,92E-01	1,41E-03	2,82E+06	3,36E+00
8,90E+01	-8,03E-01	1,45E-03	2,76E+06	3,29E+00
9,00E+01	-8,14E-01	1,50E-03	2,70E+06	3,22E+00
9,10E+01	-8,25E-01	1,55E-03	2,64E+06	3,15E+00

Çizelge 5.100: $d=1.20\text{ m}$, $b=3.0\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{j\theta j}$	η^p_{jj}
3,60E+01	-4,00E-01	7,68E-04	2,67E+06	1,97E+00
3,70E+01	-4,13E-01	7,98E-04	2,64E+06	1,95E+00
3,80E+01	-4,27E-01	8,30E-04	2,61E+06	1,93E+00
3,90E+01	-4,41E-01	8,62E-04	2,58E+06	1,91E+00
4,00E+01	-4,59E-01	8,96E-04	2,55E+06	1,88E+00
4,10E+01	-4,77E-01	9,30E-04	2,51E+06	1,86E+00
4,20E+01	-4,95E-01	9,64E-04	2,48E+06	1,84E+00
4,30E+01	-5,13E-01	9,99E-04	2,45E+06	1,81E+00
4,40E+01	-5,31E-01	1,03E-03	2,43E+06	1,79E+00
4,50E+01	-5,50E-01	1,07E-03	2,40E+06	1,77E+00
4,60E+01	-5,65E-01	1,11E-03	2,37E+06	1,75E+00
4,70E+01	-5,77E-01	1,14E-03	2,35E+06	1,73E+00
4,80E+01	-5,89E-01	1,18E-03	2,32E+06	1,71E+00

Çizelge 5.100: Devamı

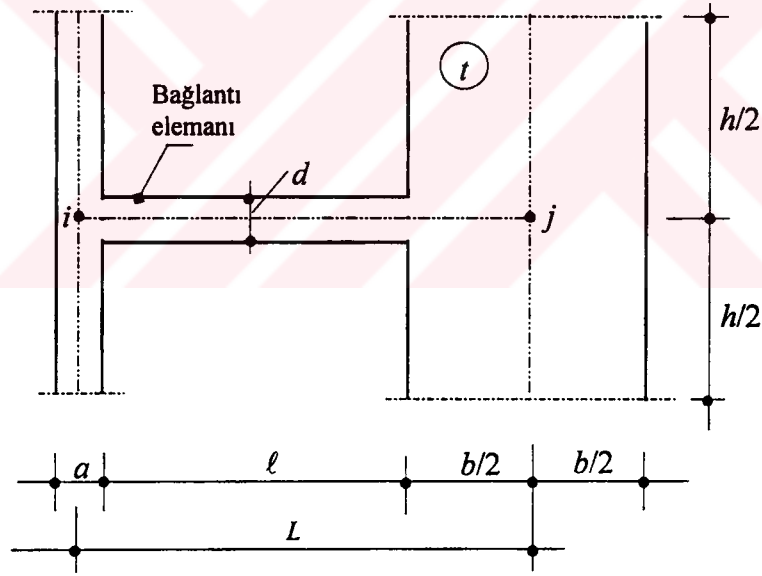
Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{j\theta_j}$	η_{jj}^p
4,90E+01	-6,01E-01	1,22E-03	2,29E+06	1,69E+00
5,00E+01	-6,14E-01	1,27E-03	2,25E+06	1,67E+00
5,10E+01	-6,27E-01	1,31E-03	2,22E+06	1,64E+00
5,20E+01	-6,40E-01	1,36E-03	2,19E+06	1,62E+00
5,30E+01	-6,53E-01	1,40E-03	2,15E+06	1,59E+00
5,40E+01	-6,66E-01	1,45E-03	2,12E+06	1,57E+00
5,50E+01	-6,77E-01	1,51E-03	2,08E+06	1,54E+00
5,60E+01	-6,89E-01	1,56E-03	2,04E+06	1,51E+00
5,70E+01	-7,00E-01	1,62E-03	2,01E+06	1,48E+00
5,80E+01	-7,11E-01	1,68E-03	1,97E+06	1,45E+00
5,90E+01	-7,23E-01	1,75E-03	1,93E+06	1,42E+00
6,00E+01	-7,33E-01	1,81E-03	1,89E+06	1,39E+00
6,10E+01	-7,44E-01	1,89E-03	1,84E+06	1,36E+00
6,20E+01	-7,55E-01	1,97E-03	1,80E+06	1,33E+00
6,30E+01	-7,67E-01	2,05E-03	1,75E+06	1,29E+00
6,40E+01	-7,77E-01	2,15E-03	1,70E+06	1,26E+00
6,50E+01	-7,87E-01	2,25E-03	1,65E+06	1,22E+00
6,60E+01	-7,93E-01	2,39E-03	1,58E+06	1,16E+00

Çizelge 5.106: $d=1.20\text{ m}$, $b=4.2\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{j\theta_j}$	η_{jj}^p
5,20E+01	-4,05E-01	6,11E-04	4,85E+06	3,58E+00
5,30E+01	-4,15E-01	6,28E-04	4,81E+06	3,56E+00
5,40E+01	-4,27E-01	6,46E-04	4,77E+06	3,52E+00
5,50E+01	-4,40E-01	6,64E-04	4,72E+06	3,49E+00
5,60E+01	-4,53E-01	6,82E-04	4,68E+06	3,46E+00
5,70E+01	-4,66E-01	7,00E-04	4,64E+06	3,43E+00
5,80E+01	-4,79E-01	7,18E-04	4,60E+06	3,40E+00
5,90E+01	-4,92E-01	7,37E-04	4,56E+06	3,37E+00
6,00E+01	-5,06E-01	7,56E-04	4,52E+06	3,34E+00
6,10E+01	-5,19E-01	7,75E-04	4,48E+06	3,32E+00
6,20E+01	-5,33E-01	7,94E-04	4,45E+06	3,29E+00
6,30E+01	-5,44E-01	8,14E-04	4,41E+06	3,26E+00
6,40E+01	-5,53E-01	8,34E-04	4,38E+06	3,24E+00
6,50E+01	-5,62E-01	8,54E-04	4,34E+06	3,21E+00
6,60E+01	-5,71E-01	8,77E-04	4,29E+06	3,17E+00
6,70E+01	-5,80E-01	8,99E-04	4,25E+06	3,14E+00
6,80E+01	-5,89E-01	9,22E-04	4,21E+06	3,11E+00
6,90E+01	-5,98E-01	9,45E-04	4,16E+06	3,08E+00
7,00E+01	-6,07E-01	9,70E-04	4,12E+06	3,04E+00
7,10E+01	-6,16E-01	9,95E-04	4,07E+06	3,01E+00
7,20E+01	-6,25E-01	1,02E-03	4,02E+06	2,97E+00

Çizelge 5.106: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{ij}$	η_{ij}^p
7,30E+01	-6,35E-01	1,05E-03	3,96E+06	2,93E+00
7,40E+01	-6,44E-01	1,08E-03	3,91E+06	2,89E+00
7,50E+01	-6,54E-01	1,11E-03	3,85E+06	2,85E+00
7,60E+01	-6,64E-01	1,14E-03	3,79E+06	2,80E+00
7,70E+01	-6,73E-01	1,18E-03	3,72E+06	2,75E+00
7,80E+01	-6,82E-01	1,22E-03	3,66E+06	2,70E+00
7,90E+01	-6,91E-01	1,26E-03	3,59E+06	2,65E+00
8,00E+01	-7,00E-01	1,30E-03	3,52E+06	2,60E+00
8,10E+01	-7,09E-01	1,34E-03	3,45E+06	2,55E+00
8,20E+01	-7,18E-01	1,38E-03	3,38E+06	2,50E+00
8,30E+01	-7,27E-01	1,43E-03	3,30E+06	2,44E+00
8,40E+01	-7,36E-01	1,48E-03	3,23E+06	2,39E+00
8,50E+01	-7,46E-01	1,54E-03	3,15E+06	2,33E+00
8,60E+01	-7,56E-01	1,60E-03	3,07E+06	2,27E+00
8,70E+01	-7,67E-01	1,66E-03	2,98E+06	2,20E+00



$\theta_j = 1$, $\theta_i = 0$ durumu

Çizelge 5.133: $d=0.60\text{ m}$, $b=4.2\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{ij}$	η_{ij}^p
5,10E+01	-3,99E-01	6,51E-04	4,30E+05	2,13E+00
5,20E+01	-4,09E-01	6,69E-04	4,27E+05	2,11E+00
5,30E+01	-4,19E-01	6,88E-04	4,23E+05	2,10E+00
5,40E+01	-4,30E-01	7,06E-04	4,20E+05	2,08E+00

Çizelge 5.133: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{i\theta_j}$	η_{ij}^p
5,50E+01	-4,40E-01	7,25E-04	4,17E+05	2,07E+00
5,60E+01	-4,51E-01	7,43E-04	4,14E+05	2,05E+00
5,70E+01	-4,62E-01	7,62E-04	4,11E+05	2,04E+00
5,80E+01	-4,75E-01	7,81E-04	4,08E+05	2,02E+00
5,90E+01	-4,89E-01	8,02E-04	4,05E+05	2,01E+00
6,00E+01	-5,03E-01	8,22E-04	4,02E+05	1,99E+00
6,10E+01	-5,17E-01	8,42E-04	3,99E+05	1,97E+00
6,20E+01	-5,32E-01	8,64E-04	3,95E+05	1,96E+00
6,30E+01	-5,47E-01	8,87E-04	3,91E+05	1,94E+00
6,40E+01	-5,62E-01	9,10E-04	3,88E+05	1,92E+00
6,50E+01	-5,75E-01	9,34E-04	3,84E+05	1,90E+00
6,60E+01	-5,86E-01	9,58E-04	3,80E+05	1,88E+00
6,70E+01	-5,96E-01	9,82E-04	3,76E+05	1,86E+00
6,80E+01	-6,07E-01	1,01E-03	3,72E+05	1,84E+00
6,90E+01	-6,18E-01	1,03E-03	3,69E+05	1,83E+00
7,00E+01	-6,29E-01	1,06E-03	3,65E+05	1,81E+00
7,10E+01	-6,41E-01	1,09E-03	3,61E+05	1,79E+00
7,20E+01	-6,52E-01	1,12E-03	3,57E+05	1,77E+00
7,30E+01	-6,64E-01	1,14E-03	3,53E+05	1,75E+00
7,40E+01	-6,75E-01	1,17E-03	3,49E+05	1,73E+00
7,50E+01	-6,86E-01	1,20E-03	3,45E+05	1,71E+00
7,60E+01	-6,98E-01	1,23E-03	3,41E+05	1,69E+00
7,70E+01	-7,09E-01	1,26E-03	3,38E+05	1,67E+00
7,80E+01	-7,21E-01	1,29E-03	3,34E+05	1,65E+00
7,90E+01	-7,32E-01	1,32E-03	3,30E+05	1,63E+00
8,00E+01	-7,44E-01	1,36E-03	3,26E+05	1,61E+00
8,10E+01	-7,57E-01	1,40E-03	3,21E+05	1,59E+00
8,20E+01	-7,71E-01	1,44E-03	3,16E+05	1,56E+00
8,30E+01	-7,84E-01	1,48E-03	3,11E+05	1,54E+00
8,40E+01	-7,97E-01	1,52E-03	3,07E+05	1,52E+00
8,50E+01	-8,10E-01	1,56E-03	3,02E+05	1,49E+00
8,60E+01	-8,23E-01	1,60E-03	2,97E+05	1,47E+00
8,70E+01	-8,37E-01	1,65E-03	2,93E+05	1,45E+00
8,80E+01	-8,50E-01	1,69E-03	2,88E+05	1,43E+00
8,90E+01	-8,64E-01	1,74E-03	2,84E+05	1,40E+00
9,00E+01	-8,75E-01	1,79E-03	2,79E+05	1,38E+00
9,10E+01	-8,80E-01	1,83E-03	2,75E+05	1,36E+00

Çizelge 5.136: $d=0.80\text{ m}$, $b=3.0\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{i\theta}$	η_{ij}^p
3,10E+01	-3,89E-01	4,77E-04	6,29E+05	1,38E+00
3,20E+01	-4,04E-01	4,98E-04	6,22E+05	1,36E+00
3,30E+01	-4,20E-01	5,20E-04	6,15E+05	1,35E+00
3,40E+01	-4,36E-01	5,42E-04	6,09E+05	1,34E+00
3,50E+01	-4,52E-01	5,65E-04	6,02E+05	1,32E+00
3,60E+01	-4,70E-01	5,87E-04	5,96E+05	1,31E+00
3,70E+01	-4,91E-01	6,11E-04	5,90E+05	1,29E+00
3,80E+01	-5,13E-01	6,34E-04	5,83E+05	1,28E+00
3,90E+01	-5,34E-01	6,58E-04	5,77E+05	1,27E+00
4,00E+01	-5,57E-01	6,82E-04	5,72E+05	1,25E+00
4,10E+01	-5,77E-01	7,08E-04	5,65E+05	1,24E+00
4,20E+01	-5,93E-01	7,35E-04	5,58E+05	1,22E+00
4,30E+01	-6,09E-01	7,63E-04	5,51E+05	1,21E+00
4,40E+01	-6,26E-01	7,91E-04	5,44E+05	1,19E+00
4,50E+01	-6,43E-01	8,19E-04	5,37E+05	1,18E+00
4,60E+01	-6,60E-01	8,48E-04	5,30E+05	1,16E+00
4,70E+01	-6,77E-01	8,78E-04	5,24E+05	1,15E+00
4,80E+01	-6,94E-01	9,08E-04	5,17E+05	1,14E+00
4,90E+01	-7,11E-01	9,40E-04	5,11E+05	1,12E+00
5,00E+01	-7,28E-01	9,73E-04	5,04E+05	1,11E+00
5,10E+01	-7,46E-01	1,01E-03	4,97E+05	1,09E+00
5,20E+01	-7,63E-01	1,04E-03	4,90E+05	1,08E+00
5,30E+01	-7,79E-01	1,08E-03	4,83E+05	1,06E+00
5,40E+01	-7,96E-01	1,11E-03	4,75E+05	1,04E+00
5,50E+01	-8,12E-01	1,16E-03	4,67E+05	1,02E+00
5,60E+01	-8,29E-01	1,20E-03	4,57E+05	1,00E+00

Çizelge 5.144: $d=0.80\text{ m}$, $b=4.6\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{i\theta}$	η_{ij}^p
5,00E+01	-3,92E-01	5,50E-04	1,16E+06	2,54E+00
5,10E+01	-4,02E-01	5,65E-04	1,15E+06	2,52E+00
5,20E+01	-4,12E-01	5,81E-04	1,14E+06	2,50E+00
5,30E+01	-4,22E-01	5,97E-04	1,13E+06	2,49E+00
5,40E+01	-4,32E-01	6,13E-04	1,12E+06	2,47E+00
5,50E+01	-4,43E-01	6,29E-04	1,12E+06	2,45E+00
5,60E+01	-4,56E-01	6,45E-04	1,11E+06	2,43E+00
5,70E+01	-4,69E-01	6,61E-04	1,10E+06	2,42E+00
5,80E+01	-4,83E-01	6,77E-04	1,09E+06	2,40E+00
5,90E+01	-4,97E-01	6,94E-04	1,09E+06	2,38E+00
6,00E+01	-5,12E-01	7,12E-04	1,08E+06	2,36E+00
6,10E+01	-5,26E-01	7,30E-04	1,07E+06	2,34E+00
6,20E+01	-5,41E-01	7,49E-04	1,06E+06	2,32E+00

Çizelge 5.144: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{i\theta_j}$	η_{ij}^p
6,30E+01	-5,56E-01	7,68E-04	1,05E+06	2,30E+00
6,40E+01	-5,66E-01	7,88E-04	1,04E+06	2,28E+00
6,50E+01	-5,76E-01	8,09E-04	1,03E+06	2,26E+00
6,60E+01	-5,86E-01	8,30E-04	1,02E+06	2,23E+00
6,70E+01	-5,97E-01	8,52E-04	1,01E+06	2,21E+00
6,80E+01	-6,07E-01	8,74E-04	9,97E+05	2,19E+00
6,90E+01	-6,18E-01	8,96E-04	9,87E+05	2,16E+00
7,00E+01	-6,28E-01	9,19E-04	9,77E+05	2,14E+00
7,10E+01	-6,38E-01	9,41E-04	9,67E+05	2,12E+00
7,20E+01	-6,49E-01	9,65E-04	9,56E+05	2,10E+00
7,30E+01	-6,59E-01	9,89E-04	9,47E+05	2,08E+00
7,40E+01	-6,69E-01	1,01E-03	9,37E+05	2,06E+00
7,50E+01	-6,81E-01	1,04E-03	9,27E+05	2,03E+00
7,60E+01	-6,92E-01	1,07E-03	9,15E+05	2,01E+00
7,70E+01	-7,04E-01	1,09E-03	9,03E+05	1,98E+00
7,80E+01	-7,15E-01	1,12E-03	8,91E+05	1,95E+00
7,90E+01	-7,27E-01	1,15E-03	8,79E+05	1,93E+00
8,00E+01	-7,38E-01	1,18E-03	8,68E+05	1,90E+00
8,10E+01	-7,50E-01	1,21E-03	8,57E+05	1,88E+00
8,20E+01	-7,62E-01	1,25E-03	8,45E+05	1,85E+00
8,30E+01	-7,74E-01	1,28E-03	8,33E+05	1,83E+00
8,40E+01	-7,87E-01	1,32E-03	8,20E+05	1,80E+00
8,50E+01	-8,00E-01	1,35E-03	8,07E+05	1,77E+00
8,60E+01	-8,13E-01	1,39E-03	7,93E+05	1,74E+00
8,70E+01	-8,26E-01	1,43E-03	7,80E+05	1,71E+00
8,80E+01	-8,39E-01	1,48E-03	7,66E+05	1,68E+00
8,90E+01	-8,53E-01	1,52E-03	7,53E+05	1,65E+00
9,00E+01	-8,67E-01	1,57E-03	7,38E+05	1,62E+00
9,10E+01	-8,72E-01	1,62E-03	7,22E+05	1,58E+00

Çizelge 5.145: $d=1.00\text{ m}$, $b=3.0\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{i\theta_j}$	η_{ij}^p
3,20E+01	-3,95E-01	4,25E-04	1,09E+06	1,30E+00
3,30E+01	-4,10E-01	4,43E-04	1,08E+06	1,29E+00
3,40E+01	-4,25E-01	4,62E-04	1,07E+06	1,28E+00
3,50E+01	-4,41E-01	4,80E-04	1,06E+06	1,27E+00
3,60E+01	-4,57E-01	4,99E-04	1,05E+06	1,25E+00
3,70E+01	-4,78E-01	5,18E-04	1,04E+06	1,24E+00
3,80E+01	-4,99E-01	5,38E-04	1,03E+06	1,23E+00
3,90E+01	-5,19E-01	5,58E-04	1,02E+06	1,22E+00
4,00E+01	-5,40E-01	5,77E-04	1,01E+06	1,21E+00

Çizelge 5.145: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{i\theta}$	η_{ij}^p
4,10E+01	-5,61E-01	5,97E-04	1,00E+06	1,20E+00
4,20E+01	-5,77E-01	6,17E-04	9,96E+05	1,19E+00
4,30E+01	-5,92E-01	6,40E-04	9,85E+05	1,17E+00
4,40E+01	-6,07E-01	6,62E-04	9,74E+05	1,16E+00
4,50E+01	-6,22E-01	6,85E-04	9,63E+05	1,15E+00
4,60E+01	-6,37E-01	7,09E-04	9,53E+05	1,14E+00
4,70E+01	-6,53E-01	7,32E-04	9,42E+05	1,12E+00
4,80E+01	-6,68E-01	7,56E-04	9,32E+05	1,11E+00
4,90E+01	-6,84E-01	7,81E-04	9,22E+05	1,10E+00
5,00E+01	-7,00E-01	8,05E-04	9,13E+05	1,09E+00
5,10E+01	-7,15E-01	8,31E-04	9,02E+05	1,08E+00
5,20E+01	-7,30E-01	8,58E-04	8,91E+05	1,06E+00
5,30E+01	-7,44E-01	8,86E-04	8,80E+05	1,05E+00
5,40E+01	-7,59E-01	9,15E-04	8,69E+05	1,04E+00
5,50E+01	-7,73E-01	9,45E-04	8,57E+05	1,02E+00
5,60E+01	-7,87E-01	9,81E-04	8,41E+05	1,00E+00
5,70E+01	-8,01E-01	1,02E-03	8,25E+05	9,84E-01
5,80E+01	-8,17E-01	1,06E-03	8,09E+05	9,65E-01
5,90E+01	-8,32E-01	1,10E-03	7,92E+05	9,44E-01
6,00E+01	-8,37E-01	1,14E-03	7,73E+05	9,22E-01
6,10E+01	-8,39E-01	1,19E-03	7,55E+05	9,01E-01
6,20E+01	-8,41E-01	1,24E-03	7,38E+05	8,80E-01

Çizelge 5.153: $d=1.00\text{ m}$, $b=4.6\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{i\theta}$	η_{ij}^p
5,30E+01	-4,04E-01	5,26E-04	1,73E+06	2,06E+00
5,40E+01	-4,14E-01	5,39E-04	1,72E+06	2,05E+00
5,50E+01	-4,24E-01	5,53E-04	1,71E+06	2,04E+00
5,60E+01	-4,37E-01	5,67E-04	1,70E+06	2,02E+00
5,70E+01	-4,50E-01	5,81E-04	1,69E+06	2,01E+00
5,80E+01	-4,63E-01	5,95E-04	1,68E+06	2,00E+00
5,90E+01	-4,76E-01	6,09E-04	1,67E+06	1,99E+00
6,00E+01	-4,89E-01	6,23E-04	1,66E+06	1,98E+00
6,10E+01	-5,03E-01	6,38E-04	1,64E+06	1,96E+00
6,20E+01	-5,17E-01	6,54E-04	1,63E+06	1,95E+00
6,30E+01	-5,31E-01	6,70E-04	1,62E+06	1,93E+00
6,40E+01	-5,45E-01	6,86E-04	1,61E+06	1,92E+00
6,50E+01	-5,54E-01	7,03E-04	1,59E+06	1,90E+00
6,60E+01	-5,63E-01	7,20E-04	1,58E+06	1,88E+00
6,70E+01	-5,72E-01	7,38E-04	1,57E+06	1,87E+00
6,80E+01	-5,82E-01	7,56E-04	1,55E+06	1,85E+00

Çizelge 5.153: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{ij}$	η_{ij}^p
6,90E+01	-5,91E-01	7,74E-04	1,54E+06	1,83E+00
7,00E+01	-6,01E-01	7,94E-04	1,52E+06	1,81E+00
7,10E+01	-6,10E-01	8,13E-04	1,51E+06	1,80E+00
7,20E+01	-6,20E-01	8,33E-04	1,49E+06	1,78E+00
7,30E+01	-6,29E-01	8,53E-04	1,48E+06	1,76E+00
7,40E+01	-6,38E-01	8,76E-04	1,46E+06	1,74E+00
7,50E+01	-6,48E-01	9,00E-04	1,44E+06	1,72E+00
7,60E+01	-6,58E-01	9,25E-04	1,42E+06	1,69E+00
7,70E+01	-6,67E-01	9,51E-04	1,40E+06	1,67E+00
7,80E+01	-6,78E-01	9,77E-04	1,38E+06	1,64E+00
7,90E+01	-6,89E-01	1,01E-03	1,35E+06	1,62E+00
8,00E+01	-7,01E-01	1,04E-03	1,33E+06	1,59E+00
8,10E+01	-7,13E-01	1,07E-03	1,31E+06	1,56E+00
8,20E+01	-7,24E-01	1,10E-03	1,28E+06	1,53E+00
8,30E+01	-7,36E-01	1,14E-03	1,26E+06	1,50E+00
8,40E+01	-7,48E-01	1,18E-03	1,23E+06	1,47E+00
8,50E+01	-7,59E-01	1,23E-03	1,20E+06	1,43E+00
8,60E+01	-7,70E-01	1,27E-03	1,17E+06	1,39E+00
8,70E+01	-7,81E-01	1,32E-03	1,14E+06	1,36E+00
8,80E+01	-7,92E-01	1,37E-03	1,11E+06	1,32E+00
8,90E+01	-8,03E-01	1,42E-03	1,08E+06	1,29E+00
9,00E+01	-8,14E-01	1,48E-03	1,05E+06	1,25E+00
9,10E+01	-8,25E-01	1,54E-03	1,02E+06	1,22E+00

Çizelge 5.154: $d=1.20\text{ m}$, $b=3.0\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{ij}$	η_{ij}^p
3,50E+01	-3,87E-01	3,76E-04	1,72E+06	1,27E+00
3,60E+01	-4,00E-01	3,91E-04	1,70E+06	1,26E+00
3,70E+01	-4,13E-01	4,06E-04	1,69E+06	1,25E+00
3,80E+01	-4,27E-01	4,20E-04	1,67E+06	1,24E+00
3,90E+01	-4,41E-01	4,35E-04	1,66E+06	1,23E+00
4,00E+01	-4,59E-01	4,50E-04	1,65E+06	1,22E+00
4,10E+01	-4,77E-01	4,66E-04	1,63E+06	1,21E+00
4,20E+01	-4,95E-01	4,81E-04	1,62E+06	1,20E+00
4,30E+01	-5,13E-01	4,97E-04	1,61E+06	1,19E+00
4,40E+01	-5,31E-01	5,12E-04	1,59E+06	1,18E+00
4,50E+01	-5,50E-01	5,28E-04	1,58E+06	1,17E+00
4,60E+01	-5,65E-01	5,44E-04	1,57E+06	1,16E+00
4,70E+01	-5,77E-01	5,60E-04	1,56E+06	1,15E+00
4,80E+01	-5,89E-01	5,76E-04	1,55E+06	1,15E+00
4,90E+01	-6,01E-01	5,93E-04	1,54E+06	1,14E+00

Çizelge 5.154: Devamı

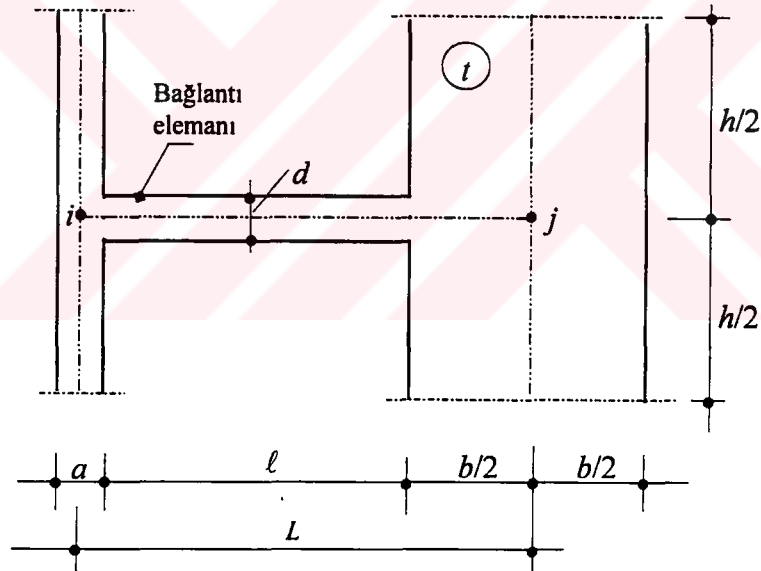
Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{i\theta_j}$	η_{ij}^p
5,00E+01	-6,14E-01	6,10E-04	1,53E+06	1,13E+00
5,10E+01	-6,27E-01	6,28E-04	1,51E+06	1,12E+00
5,20E+01	-6,40E-01	6,47E-04	1,50E+06	1,11E+00
5,30E+01	-6,53E-01	6,65E-04	1,49E+06	1,10E+00
5,40E+01	-6,66E-01	6,84E-04	1,47E+06	1,09E+00
5,50E+01	-6,77E-01	7,03E-04	1,46E+06	1,08E+00
5,60E+01	-6,89E-01	7,24E-04	1,44E+06	1,07E+00
5,70E+01	-7,00E-01	7,45E-04	1,43E+06	1,06E+00
5,80E+01	-7,11E-01	7,67E-04	1,41E+06	1,04E+00
5,90E+01	-7,23E-01	7,89E-04	1,40E+06	1,03E+00
6,00E+01	-7,33E-01	8,13E-04	1,38E+06	1,02E+00
6,10E+01	-7,44E-01	8,39E-04	1,36E+06	1,00E+00
6,20E+01	-7,55E-01	8,69E-04	1,33E+06	9,86E-01
6,30E+01	-7,67E-01	9,00E-04	1,31E+06	9,68E-01
6,40E+01	-7,77E-01	9,32E-04	1,28E+06	9,50E-01

Çizelge 5.160: $d=1.20\text{ m}$, $b=4.2\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{i\theta_j}$	η_{ij}^p
5,00E+01	-3,86E-01	4,54E-04	2,27E+06	1,67E+00
5,10E+01	-3,96E-01	4,67E-04	2,25E+06	1,66E+00
5,20E+01	-4,05E-01	4,79E-04	2,24E+06	1,65E+00
5,30E+01	-4,15E-01	4,92E-04	2,22E+06	1,64E+00
5,40E+01	-4,27E-01	5,04E-04	2,21E+06	1,63E+00
5,50E+01	-4,40E-01	5,17E-04	2,19E+06	1,62E+00
5,60E+01	-4,53E-01	5,30E-04	2,18E+06	1,61E+00
5,70E+01	-4,66E-01	5,43E-04	2,17E+06	1,60E+00
5,80E+01	-4,79E-01	5,55E-04	2,16E+06	1,59E+00
5,90E+01	-4,92E-01	5,68E-04	2,14E+06	1,58E+00
6,00E+01	-5,06E-01	5,81E-04	2,13E+06	1,58E+00
6,10E+01	-5,19E-01	5,94E-04	2,12E+06	1,57E+00
6,20E+01	-5,33E-01	6,07E-04	2,11E+06	1,56E+00
6,30E+01	-5,44E-01	6,21E-04	2,10E+06	1,55E+00
6,40E+01	-5,53E-01	6,36E-04	2,08E+06	1,54E+00
6,50E+01	-5,62E-01	6,50E-04	2,07E+06	1,53E+00
6,60E+01	-5,71E-01	6,65E-04	2,05E+06	1,52E+00
6,70E+01	-5,80E-01	6,81E-04	2,04E+06	1,51E+00
6,80E+01	-5,89E-01	6,97E-04	2,02E+06	1,49E+00
6,90E+01	-5,98E-01	7,13E-04	2,00E+06	1,48E+00
7,00E+01	-6,07E-01	7,30E-04	1,98E+06	1,47E+00
7,10E+01	-6,16E-01	7,48E-04	1,97E+06	1,45E+00
7,20E+01	-6,25E-01	7,66E-04	1,95E+06	1,44E+00

Çizelge 5.160: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{i\theta_j}$	η_{ij}^P
7,30E+01	-6,35E-01	7,85E-04	1,93E+06	1,42E+00
7,40E+01	-6,44E-01	8,07E-04	1,90E+06	1,40E+00
7,50E+01	-6,54E-01	8,31E-04	1,87E+06	1,38E+00
7,60E+01	-6,64E-01	8,55E-04	1,84E+06	1,36E+00
7,70E+01	-6,73E-01	8,84E-04	1,81E+06	1,34E+00
7,80E+01	-6,82E-01	9,15E-04	1,77E+06	1,31E+00
7,90E+01	-6,91E-01	9,48E-04	1,73E+06	1,28E+00
8,00E+01	-7,00E-01	9,86E-04	1,68E+06	1,24E+00
8,10E+01	-7,09E-01	1,03E-03	1,64E+06	1,21E+00
8,20E+01	-7,18E-01	1,07E-03	1,59E+06	1,17E+00
8,30E+01	-7,27E-01	1,12E-03	1,54E+06	1,14E+00
8,40E+01	-7,36E-01	1,17E-03	1,49E+06	1,10E+00
8,50E+01	-7,46E-01	1,22E-03	1,45E+06	1,07E+00
8,60E+01	-7,56E-01	1,27E-03	1,40E+06	1,04E+00
8,70E+01	-7,67E-01	1,33E-03	1,36E+06	1,00E+00



$\theta_i = 1, \theta_j = 0$ durumu

Çizelge 5.187: $d=0.60\text{ m}, b=4.2\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{i\theta_i}$	η_{ii}^P
8,10E+01	-3,94E-01	5,06E-04	3,34E+05	1,65E+00
8,20E+01	-4,00E-01	5,16E-04	3,31E+05	1,64E+00
8,30E+01	-4,07E-01	5,26E-04	3,29E+05	1,63E+00
8,40E+01	-4,13E-01	5,36E-04	3,27E+05	1,62E+00
8,50E+01	-4,19E-01	5,47E-04	3,24E+05	1,60E+00

Çizelge 5.187: Devamı

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{i\theta i}$	η_{ii}^p
8,60E+01	-4,26E-01	5,57E-04	3,22E+05	1,59E+00
8,70E+01	-4,32E-01	5,68E-04	3,19E+05	1,58E+00
8,80E+01	-4,39E-01	5,79E-04	3,17E+05	1,57E+00
8,90E+01	-4,45E-01	5,90E-04	3,15E+05	1,56E+00
9,00E+01	-4,52E-01	6,01E-04	3,12E+05	1,55E+00
9,10E+01	-4,59E-01	6,12E-04	3,10E+05	1,53E+00
9,20E+01	-4,66E-01	6,24E-04	3,07E+05	1,52E+00
9,30E+01	-4,73E-01	6,36E-04	3,05E+05	1,51E+00
9,40E+01	-4,80E-01	6,49E-04	3,02E+05	1,49E+00
9,50E+01	-4,88E-01	6,62E-04	2,99E+05	1,48E+00
9,60E+01	-5,06E-01	6,75E-04	2,96E+05	1,47E+00
9,70E+01	-5,23E-01	6,90E-04	2,93E+05	1,45E+00
9,80E+01	-5,42E-01	7,08E-04	2,89E+05	1,43E+00
9,90E+01	-5,61E-01	7,29E-04	2,83E+05	1,40E+00
1,00E+02	-5,80E-01	7,49E-04	2,78E+05	1,38E+00
1,01E+02	-6,80E-01	9,64E-04	2,18E+05	1,08E+00
1,02E+02	-6,79E-01	9,35E-04	2,27E+05	1,12E+00
1,03E+02	-6,99E-01	9,56E-04	2,25E+05	1,11E+00
1,04E+02	-7,12E-01	9,63E-04	2,25E+05	1,11E+00
1,05E+02	-7,26E-01	9,70E-04	2,25E+05	1,12E+00
1,06E+02	-7,43E-01	9,84E-04	2,25E+05	1,11E+00

Çizelge 5.190: $d=0.80\text{ m}$, $b=3.0\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{i\theta i}$	η_{ii}^p
1,13E+02	-4,03E-01	5,09E-04	6,44E+05	1,41E+00
1,14E+02	-4,14E-01	5,16E-04	6,40E+05	1,40E+00
1,15E+02	-4,26E-01	5,24E-04	6,36E+05	1,39E+00
1,16E+02	-4,37E-01	5,32E-04	6,31E+05	1,39E+00
1,17E+02	-4,49E-01	5,40E-04	6,27E+05	1,38E+00
1,18E+02	-4,61E-01	5,48E-04	6,23E+05	1,37E+00
1,19E+02	-4,73E-01	5,57E-04	6,19E+05	1,36E+00
1,20E+02	-4,85E-01	5,66E-04	6,14E+05	1,35E+00
1,21E+02	-4,97E-01	5,75E-04	6,10E+05	1,34E+00
1,22E+02	-5,09E-01	5,84E-04	6,04E+05	1,33E+00
1,23E+02	-5,22E-01	5,95E-04	5,98E+05	1,31E+00
1,24E+02	-5,36E-01	6,09E-04	5,90E+05	1,29E+00
1,25E+02	-5,48E-01	6,23E-04	5,81E+05	1,27E+00

Çizelge 5.198: $d=0.80\text{ m}$, $b=4.6\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{i\theta}$	η_{ii}^p
8,80E+01	-3,70E-01	3,12E-04	8,16E+05	1,79E+00
8,90E+01	-3,86E-01	3,19E-04	8,08E+05	1,77E+00
9,00E+01	-4,02E-01	3,26E-04	7,99E+05	1,75E+00
9,10E+01	-4,18E-01	3,36E-04	7,85E+05	1,72E+00
9,20E+01	-4,38E-01	3,58E-04	7,45E+05	1,63E+00
9,30E+01	-4,58E-01	3,80E-04	7,09E+05	1,56E+00
9,40E+01	-4,74E-01	3,86E-04	7,05E+05	1,55E+00
9,50E+01	-4,90E-01	3,88E-04	7,09E+05	1,56E+00
9,60E+01	-5,06E-01	3,93E-04	7,08E+05	1,55E+00
9,70E+01	-6,28E-01	5,00E-04	5,62E+05	1,23E+00
9,80E+01	-6,63E-01	5,26E-04	5,39E+05	1,18E+00
9,90E+01	-6,55E-01	5,47E-04	5,24E+05	1,15E+00
1,00E+02	-6,74E-01	6,99E-04	4,14E+05	9,09E-01
1,01E+02	-6,93E-01	7,02E-04	4,17E+05	9,14E-01
1,02E+02	-7,13E-01	7,04E-04	4,19E+05	9,20E-01
1,03E+02	-7,31E-01	6,89E-04	4,33E+05	9,50E-01
1,04E+02	-7,56E-01	7,04E-04	4,28E+05	9,38E-01
1,05E+02	-7,82E-01	7,09E-04	4,29E+05	9,40E-01

Çizelge 5.199: $d=1.00\text{ m}$, $b=3.0\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{i\theta}$	η_{ii}^p
1,16E+02	-3,95E-01	3,27E-04	1,31E+06	1,56E+00
1,17E+02	-4,06E-01	3,31E-04	1,30E+06	1,55E+00
1,18E+02	-4,18E-01	3,36E-04	1,30E+06	1,55E+00
1,19E+02	-4,29E-01	3,40E-04	1,29E+06	1,54E+00
1,20E+02	-4,41E-01	3,45E-04	1,28E+06	1,53E+00
1,21E+02	-4,53E-01	3,50E-04	1,27E+06	1,52E+00
1,22E+02	-4,65E-01	3,56E-04	1,26E+06	1,51E+00
1,23E+02	-4,77E-01	3,63E-04	1,25E+06	1,49E+00
1,24E+02	-4,89E-01	3,76E-04	1,22E+06	1,45E+00
1,25E+02	-4,96E-01	3,76E-04	1,23E+06	1,46E+00
1,26E+02	-6,01E-01	4,53E-04	1,03E+06	1,23E+00
1,27E+02	-4,96E-01	4,66E-04	1,01E+06	1,20E+00
1,28E+02	-5,72E-01	4,74E-04	9,96E+05	1,19E+00
1,29E+02	-6,08E-01	5,20E-04	9,15E+05	1,09E+00
1,30E+02	-6,16E-01	5,39E-04	8,90E+05	1,06E+00
1,31E+02	-6,29E-01	5,74E-04	8,42E+05	1,00E+00
1,32E+02	-6,41E-01	5,83E-04	8,36E+05	9,97E-01
1,33E+02	-6,55E-01	6,15E-04	7,98E+05	9,52E-01
1,34E+02	-6,65E-01	6,32E-04	7,83E+05	9,34E-01
1,35E+02	-6,77E-01	6,59E-04	7,56E+05	9,01E-01
1,36E+02	-6,90E-01	6,79E-04	7,39E+05	8,81E-01

Çizelge 5.207: $d=1.00\text{ m}$, $b=4.6\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{i\theta i}$	η_{ii}^p
9,10E+01	-4,08E-01	2,17E-04	1,54E+06	1,84E+00
9,20E+01	-4,24E-01	2,21E-04	1,54E+06	1,83E+00
9,30E+01	-4,83E-01	4,35E-04	7,89E+05	9,41E-01
9,40E+01	-4,19E-01	1,98E-04	1,75E+06	2,09E+00
9,50E+01	-4,81E-01	3,09E-04	1,13E+06	1,35E+00
9,60E+01	-5,05E-01	3,36E-04	1,06E+06	1,26E+00
9,70E+01	-5,20E-01	3,42E-04	1,05E+06	1,25E+00
9,80E+01	-5,33E-01	3,40E-04	1,06E+06	1,27E+00
9,90E+01	-5,46E-01	3,47E-04	1,05E+06	1,26E+00
1,00E+02	-5,59E-01	3,52E-04	1,05E+06	1,25E+00
1,01E+02	-5,84E-01	3,76E-04	9,92E+05	1,18E+00
1,02E+02	-6,04E-01	3,57E-04	1,05E+06	1,26E+00
1,03E+02	-6,33E-01	3,69E-04	1,03E+06	1,23E+00
1,04E+02	-6,63E-01	3,74E-04	1,02E+06	1,22E+00
1,05E+02	-6,96E-01	3,73E-04	1,04E+06	1,24E+00
1,06E+02	-7,40E-01	3,75E-04	1,04E+06	1,24E+00
1,07E+02	-8,05E-01	3,77E-04	1,05E+06	1,25E+00

Çizelge 5.208: $d=1.20\text{ m}$, $b=3.0\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{i\theta i}$	η_{ii}^p
1,20E+02	-4,30E-01	2,27E-04	2,38E+06	1,76E+00
1,21E+02	-4,42E-01	2,29E-04	2,37E+06	1,75E+00
1,22E+02	-4,54E-01	2,32E-04	2,37E+06	1,75E+00
1,23E+02	-4,66E-01	2,35E-04	2,35E+06	1,74E+00
1,24E+02	-4,79E-01	2,44E-04	2,28E+06	1,68E+00
1,25E+02	-4,86E-01	2,44E-04	2,30E+06	1,70E+00
1,26E+02	-5,29E-01	4,30E-04	1,32E+06	9,72E-01
1,27E+02	-5,15E-01	3,23E-04	1,76E+06	1,30E+00
1,28E+02	-5,58E-01	4,39E-04	1,31E+06	9,69E-01
1,29E+02	-5,73E-01	4,22E-04	1,37E+06	1,02E+00
1,30E+02	-6,71E-01	4,48E-04	1,30E+06	9,64E-01

Çizelge 5.214: $d=1.20\text{ m}$, $b=4.2\text{ m}$

Yük durumu	σ_c/f_c	θ	$\bar{m}'_{i\theta i}$	η_{ii}^p
9,90E+01	-3,89E-01	1,66E-04	2,68E+06	1,98E+00
1,00E+02	-4,03E-01	1,68E-04	2,67E+06	1,97E+00
1,01E+02	-4,14E-01	1,53E-04	2,97E+06	2,19E+00
1,02E+02	-4,34E-01	1,72E-04	2,67E+06	1,97E+00

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi	04.04.1970	
Doğum Yeri	Ankara	
Lise	1983-1987	Özel Marmara Lisesi
Lisans	1987-1991	Yıldız Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1991-1993	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı
Doktora	1993-2001	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı
Çalıştığı kurum	1991-Devam ediyor	YTÜ İnşaat Fakültesi İnşaat Müh.Böl. Yapı Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi