

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONARME KOLONLARDA
KUŞATMA ETKİSİ VE
SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

İnşaat Müh. Şirzat AKGÜN

FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. H. Orhun KÖKSAL (YTÜ)

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
ÖNSÖZ	xvi
ÖZET	xvii
ABSTRACT	xviii
1. GİRİŞ	1
2. KUŞATILMAMIŞ ve KUŞATILMIŞ BETON DAVRANIŞ MODELLERİ	2
2.1 Hognestad Modeli.....	2
2.2 Sheikh ve Üzümeri Modeli	3
2.2.1 Kuşatılmış beton mukavemetindeki artış ve K_s (Kuşatma parametresi) hesabı	4
2.2.2 Etkin kuşatılmış beton alanı	5
2.2.3 Etriye aralığının etkin kuşatılmış beton hacmine etkisi	6
2.2.5 K_s parametresinin denklemi	8
2.2.6 ϵ_{s1} parametresinin hesaplanması.....	9
2.2.7 ϵ_{s2} parametresinin hesaplanması.....	9
2.2.8 ϵ_{s85} parametresinin hesabı	10
2.3 Saatçioğlu ve Razvi Modeli	10
2.3.1 Dairesel kesitler	12
2.3.2 Kare kesitler	12
2.3.3 Dikdörtgen kesitler	15
2.3.4 Betondaki en büyük birim kısalma	17
2.3.5 Kuşatılmış beton gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi	18
2.4 Mander, Priestly ve Park Modeli.....	20
2.4.1 Etkin kuşatma gerilmesi ve kuşatma etkinlik katsayısı	26
2.4.1.1 Fretli ve spiralli kuşatma donatılı kesitler için kuşatma etkinlik katsayısı	26
2.4.1.2 Dikdörtgensel kuşatma donatılı kesitler için kuşatma etkinlik katsayısı	27
2.4.2 Kuşatılmış beton taşıma gücü	29
2.4.3 Betondaki en büyük birim kısalma	30
3. BETON VE ÇELİK İÇİN AKMA/KIRILMA YÜZEYLERİ VE KRİTERLERİ	31
3.1 Gerilme Hali.....	31
3.1.1 Haigh-Westergaard gerilme uzayı.....	36
3.2 Akma/Kırılma Kriteri Kavramı	39

3.2.1	Von Mises akma kriteri.....	40
3.3	İzotropik Hasar Teorisinin Kullanılması ve İrdelenmesi.....	44
4.	SONLU ELEMENLAR METODU	51
4.1	Yer Değiştirme ve Şekil Değiştirme Bağlılıkları	51
4.2	Virtüel İş Teoremi	53
4.3	Sonlu Eleman Denkleminin Elde Edilmesi.....	54
4.4	Newton- Raphson Metodu	56
4.5	Kolonların Lusas Sonlu Elemanlar Analizi Programında Modellenmesi.....	57
5.	DENEYSEL DATA SONUÇLARININ SONLU ELEMENLAR ANALİZİ SONUÇLARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI	66
5.1	Kolon Numunelerine Ait Karakteristik Özellikler	66
5.2	Kolon Numunelerinin Sonlu Elemanlar Analizi Programında Modellenmesi	68
5.3	Sonuçlar	74
6.	NÜMERİK MODELLEME	76
6.1	İncelenen Kolon Numuneleri	76
6.1.1	Fiktif kolonlar.....	78
6.1.2	Kuşatma basıncının belirlenmesinde etkili olan parametreler	78
6.2	Analiz Sonuçları	79
6.2.1	Boyuna donatı çapının kuşatma basıncına olan etkisinin deney ve analiz sonuçları için irdelenmesi	80
	Lusas sonlu elemanlar analizi programında modellenen kolonların; göçme yükü ve kuşatma basıncı değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.	80
6.2.2	Boyuna donatı akma dayanımının kuşatma basıncına etkisi.....	99
6.2.3	Etriye çapının kuşatma basıncına etkisi.....	102
6.2.3.1	Etriye çapı sabit, beton mukavemeti değişken olan kolonların incelenmesi	102
6.2.3.2	Beton mukavemeti sabit, etriye çapları değişken olan kolonların incelenmesi ..	109
6.2.4	Etriye aralığı değişiminin incelenmesi	117
6.2.5	Etriye akma dayanımının kuşatma basıncına etkisi.....	125
6.2.6	Boyuna donatı konfigürasyonunun kuşatma basıncına etkisi	127
6.3	Analiz Sonuçlarına Uygun Bağlılığın Kurulması.....	132
6.3.1	Boyuna donatı çapı değişiminin denklem (6.2) ile karşılaştırılması	132
6.3.2	Boyuna donatı akma dayanımı değişiminin denklem (6.2) ile karşılaştırılması .	134
6.3.3	Etriye çapı değişiminin denklem (6.2) ile karşılaştırılması	136
6.3.4	Boyuna donatı konfigürasyonu değişiminin denklem (6.2) ile karşılaştırılması	140
7.	İRDELEME VE SONUÇ.....	141
	KAYNAKLAR.....	146
	İNTERNET KAYNAKLARI.....	147
	ÖZGEÇMİŞ.....	148

SİMGE LİSTESİ

A	Malzeme parametresi
A_{co}	Beton çekirdek alanı
A_d	Hasarlı alan
A_{ec}	Kuşatılmış beton alanı
A_{et}	Etkin kuşatılmış beton alanı
A_{sp}	Kuşatma donatısı kesit alanı
A_0	Hasarsız alan
$\{a\}$	Katsayılar matrisi
B	Etriye merkezinden etriye merkezine olan boyut
b_c	Yanal donatı ağırlık merkezinden itibaren çekirdek betonun x doğrultusundaki uzunluğu
b'_{co}	Kesit genişliği doğrultusunda en dış kuşatma donatısı dıştan dışa mesafe
C_i	En dış kuşatma donatısı merkezleri arasındaki mesafe
C_{ijkl}	Elastik malzeme sabiti
d	Hasar oranı
$\{d\}$	Eleman düğüm noktası deplasmanları
d_c	Yanal donatı ağırlık merkezinden itibaren çekirdek betonun y doğrultusundaki uzunluğu
d_e	Elemandaki kuşatma basıncının okunduğu doğrultudaki boyut
d_{max}	Beton karışımındaki maksimum agrega boyutu
d_s	Çekirdek çapı
$[D]$	Malzemenin elastisite matrisi
$\underline{\underline{D}}^{(e)}$	e elemanına ait elastisite matrisi
$\underline{\underline{D}}_0$	Hasarın olmadığı durumdaki tansör
e_1	Birim vektörü
E_c	Betonun elastisite modülü
E_{sec}	Sekant elastisite modülü
e_j	Gerilme yönü
f	Elemana etkiyen kuvvet
f_c	Beton basınç dayanımı
f_{cc}	Kuşatılmış betonun basınç dayanımı
f_c'	Kuşatılmamış betonun en büyük basınç dayanımı
f_{ck}	Beton karakteristik basınç dayanımı
f_{cp}	Kuşatılmamış betonun basınç dayanımı
f_s	Maksimum dayanıma ulaşan kuşatılmış betonun yanal donatı gerilme değeri
f_t	Betonun tek eksenli çekme dayanımı
f_{t1}	Sıvı kuşatma gerilmesi
f_{t2}	Elastik ve izotropik malzeme kuşatma etkisi altındaki eksenel yük dayanımı
f_{u2}	Elastik ve izotropik malzeme eksenel yük dayanımı
f_{yh}	Yanal donatı akma dayanımı
G_f	Betonun kırılma enerjisi
H	Etriye merkezinden etriye merkezine olan mesafe
h'_{co}	Kesit yüksekliği doğrultusunda en dış kuşatma donatısı dıştan dışa mesafe
h_x	x doğrultusundaki eleman boyutu
h_y	y doğrultusundaki eleman boyutu
h_z	z doğrultusundaki eleman boyutu
I_1	Gerilme tansörünün birinci invaryantı
I_2	Gerilme tansörünün ikinci invaryantı
I_3	Gerilme tansörünün üçüncü invaryantı

J_1	Deviatorik gerilme tansörünün birinci invaryantı
J_2	Deviatorik gerilme tansörünün ikinci invaryantı
J_3	Deviatorik gerilme tansörünün üçüncü invaryantı
K_s	Kuşatma katsayısı
k	Kesme kuvveti etkisi altındaki akma gerilmesi
$[k]$	Eleman rijitlik matrisi
k_e	Kuşatma etkinlik katsayısı
k_1	Poisson oranına bağlı kuşatma gerilmesi katsayısı
k_2	Azaltma katsayısı
l^*	Sonlu elemanın karakteristik uzunluğu
$M(\tau)$	Hasar değişim fonksiyonu
n	Parabol veya üçgen sayısı
$[N]$	Şekil fonksiyonu
p	Hidrostatik gerilme
r'	t zamanındaki hasar eşiği
r^*	Başlangıç anındaki hasar eşiği
S_{ij}	Deviatorik gerilme tansörü
S_{11}	1 yönündeki asal gerilme
S_{22}	2 yönündeki asal gerilme
S_{33}	3 yönündeki asal gerilme
s	Etriye aralığı
s'	Kuşatma donatıları arasındaki temiz mesafe
s_{ij}	Deviatorik gerilme bileşeni
s_l	Yanal desteklenmiş boyuna donatılar arasındaki mesafe
T	Gerilme tansörü
$t^{(i)}$	i yönündeki gerilme vektörü
$t^{(1)}$	1 yönündeki gerilme vektörü
$t^{(2)}$	2 yönündeki gerilme vektörü
$t^{(3)}$	3 yönündeki gerilme vektörü
u	x doğrultusundaki öteleme tipi yer değiştirme bileşeni
U	Gerçek deplasman
v	y doğrultusundaki öteleme tipi yer değiştirme bileşeni
w	z doğrultusundaki öteleme tipi yer değiştirme bileşeni
ΔS	Eleman yüzey alanı
α_1	Kuşatma donatısı ile kesitin kenarı arasındaki açı
β	Sabit bir sayı
δu	Virtüel deplasman
$\delta \varepsilon$	Virtüel deformasyon
δ_{ij}	Kronocker deltası
ε	Gerçek deformasyon
$\underline{\varepsilon}$	Birim şekil değiştirme tansörü
ε_c	Betonun birim şekil değiştirmesi
ε_c	Betonun en büyük gerilmesine karşılık gelen birim şekil değiştirme
ε_{co}	Betonda maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalma
ε_{cu}	Betonun en büyük birim kısalması
ε_{ccu}	Enine donatıda oluşan ilk kopma değeri
ε_{su}	Maksimum gerilmedeki donatı birim şekil değiştirmesi
ε_{sl}	Betonun maksimum gerilmesine karşılık gelen minimum birim deformasyon

ε_{s2}	Betonun maksimum gerilmesine karşılık gelen maksimum birim deformasyon
ε_{s85}	Betondaki maksimum gerilmenin %85'ine karşılık gelen birim deformasyon
ε_{00}	Kuşatılmamış betonda maksimum gerilmeye karşılık gelen birim deformasyon
ε_1	Betondaki en büyük birim deformasyon
$\phi(x, y)$	Deplasman fonksiyonu
λ	Çekirdek beton etrafındaki boyuna donatı dağılımına ve kesit konfigürasyonuna bağlı parametre
λ^*	Etkin kuşatılmış beton alanının çekirdek beton alanına oranı
ζ	Normal boyunca orjinden düzleme kadar ölçülen mesafe
μ	Poisson oranı
η	Kesit ebatlarının etkisini gösteren parametre
θ	Etkin kuşatılmış beton alanını tanımlayan eğrinin başlangıç eğiminin açısı
θ_x	x doğrultusundaki dönme tipi yer değiştirme bileşeni
θ_y	y doğrultusundaki dönme tipi yer değiştirme bileşeni
θ_z	z doğrultusundaki dönme tipi yer değiştirme bileşeni
ρ	Vektör uzunluğu
ρ_{co}	Boyuna donatı alanının beton çekirdek alanına oranı
ρ_s	Yanal donatı hacimsel oranı
σ	Gerilme
$\underline{\sigma}$	Gerilme tansörü
σ_{oct}	Oktahedral normal gerilme
σ_n	Normal gerilme
σ_{ij}	Gerilme vektörü bileşeni
σ_1	Kuşatılmış betonun basınç dayanımı
σ_3	Düzgün yayılı kuşatma basıncı
σ_{3ex}	x doğrultusundaki eşdeğer kuşatma gerilmesi
σ_{3ey}	y doğrultusundaki eşdeğer kuşatma gerilmesi
σ_{3x}	x doğrultusundaki kuşatma gerilmesi
σ_{3y}	y doğrultusundaki kuşatma gerilmesi
σ_3	Kuşatılmış betona etkiyen etkin kuşatma gerilmesi
τ	Kayma gerilmesi
τ^*	Başlangıç hasar eşiği değeri
τ_{oct}	Oktahedral kayma gerilmesi
τ_y	Maksimum kayma gerilmesi
ΣA_{shx}	x doğrultusundaki toplam kuşatma donatısı kesit alanı
ΣA_{shy}	y doğrultusundaki toplam kuşatma donatısı kesit alanı

KISALTMA LİSTESİ

CEB	Comite Euro-International du Beton
GY	Göçme Yüğü
KB	Kuşatma Basıncı
LVDT	Lineer değışken yerdeğıştirme ölçen alet
YK	Yay Katsayısı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Hognestad modeli (1951)	2
Şekil 2.2 Shamim A. Sheikh ve S. M. Üzümeri modeli (1982).....	3
Şekil 2.3 Etriye seviyesindeki kuşatılmamış beton alanı (Sheikh S. A. ve Üzümeri S. M., 1982)	5
Şekil 2.4 Kuşatılmamış beton alanı için öneriler (Sheikh S. A. ve Uzumeri S. M., 1982).....	5
Şekil 2.5 Etriyeler arasındaki kuşatılmamış alan (Sheikh S. A. ve Uzumeri S. M., 1982).....	7
Şekil 2.6 Kritik kesit hesabı (Sheikh S. A. ve Üzümeri S. M., 1982)	7
Şekil 2.7 k_1 için önerilen bağıntı (Saatçioğlu ve Razvi, 1992).....	11
Şekil 2.8 Dairesel kolonlarda yanal kuşatma basıncı (Saatçioğlu ve Razvi, 1992).....	12
Şekil 2.9 Kare kolonlarda yanal kuşatma basıncı dağılımları (Saatçioğlu ve Razvi, 1992)	13
Şekil 2.10 Yanal kuşatma basıncının dağılımı ile ortalama ve eşdeğer kuşatma basınç ifadeleri (Saatçioğlu ve Razvi, 1992).....	14
Şekil 2.11 Dikdörtgen kesitlerde kuşatma gerilmelerinin dağılımı (Saatçioğlu ve Razvi, 1992)	16
Şekil 2.12 Kuşatılmış beton gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi (Saatçioğlu ve Razvi, 1992)	19
Şekil 2.13 Kuşatılmış ve kuşatılmamış betonun tekil yükleme altındaki gerilme-birim şekil değiştirme modeli (Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., 1988).....	20
Şekil 2.14 Yanal kuşatma basıncı (Whittaker A., 2003).....	21
Şekil 2.15 Yanal donatı seviyesinde kuşatılmamış beton alanları (Sheikh S. A. ve Uzumeri S. M., 1982)	22
Şekil 2.16 Kuşatılmamış beton alanının elde edilişi için yapılan kabul (Sheikh S. A. ve Uzumeri S. M., 1982)	22
Şekil 2.17 Mander beton modelinde kuşatılmamış beton alanı elde edilişi için yapılan kabul	23
Şekil 2.18 Fretli donatılı kesitlerde etkin olarak kuşatılmış çekirdek (Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., 1988).....	24
Şekil 2.19 Etriyeli kuşatma donatılı kesitlerde etkin kuşatılmış beton çekirdek alanı (Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., 1988).....	25
Şekil 2.20 Kuşatılmış dikdörtgen kesitler için yanal kuşatma gerilmelerinden elde edilen dayanım değerleri (Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., 1988)	29
Şekil 3.1 Düzlemdeki kesitte ΔS alanı üzerinde normal n olan f yüzey kuvvetleri [1]	31
Şekil 3.2 Gerilme vektörü (M. Bakioğlu vd., 1995).....	32
Şekil 3.3 Gerilme bileşenleri [1].....	32

Şekil 3.4 Haigh-Westergaard gerilme uzayı (Chen W. F., Han D. J., 1987)	36
Şekil 3.5 Bir noktadaki gerilme halinin deviatorik düzlem üzerinde izdüşümü (Chen W. F., Han D. J., 1987)	38
Şekil 3.6 Oktahedral gerilmeler [3]	40
Şekil 3.7 Çekme durumunda $\sigma_3=0$ düzleminde akma kriteri	43
Şekil 3.8 Akma yüzeyi ile $\sigma_x - \tau_{xy}$ düzleminin kesişimi (Chen W. F., Han D. J., 1987)	44
Şekil 3.9 Hasar sonucu kesitte oluşan boşluklar (Kachanov, 1986).....	46
Şekil 3.10 Tek eksenli gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi (Oliver vd., 1990).....	48
Şekil 3.11 Farklı eleman boyutları için hasar fonksiyonunun değişimi (Oliver vd.,1990).....	49
Şekil 3.12 Hasar oranını belirlemek için kullanılan M fonksiyonu (Köksal, 1998).....	50
Şekil 4.1 Öteleme ve dönme bileşenlerinin koordinat ekseninde gösterimi (T. Köksal, 1995).....	52
Şekil 4.2 Newton Raphson yöntemi	56
Şekil 4.3 Boyuna donatıların sonlu elemanlara bölünmesi.....	57
Şekil 4.4 Betonun sonlu elemanlara bölünmesi	58
Şekil 4.5 Donatı kesit alanının programa girilmesi	59
Şekil 4.6 Donatı malzeme özellikleri (elastik)	60
Şekil 4.7 Donatı malzeme özellikleri (plastik).....	61
Şekil 4.8 Beton malzeme özellikleri (elastik)	62
Şekil 4.9 Hasar modelinin seçimi ve hasar değerlerinin programa girilmesi.....	64
Şekil 4.10 Analiz sonucu oluşan kuvvetlerin kolondaki dağılımı	65
Şekil 5.1 Deney düzeneği (Köksal vd., 2006).....	66
Şekil 5.2 Test edilen kolon numunelerine ait donatı detayı ve kesit özellikleri (Köksal vd., 2006)	67
Şekil 5.3 C1L4S8 ve C1L4S12 kolon numuneleri (Köksal vd., 2006)	68
Şekil 5.4 C1L8S8 ve C1L8S12 kolon numuneleri (Köksal vd., 2006)	69
Şekil 5.5 Betonarme kolonun sonlu elemanlar programında hatalı ve hatasız olarak sonlu elemanlara ayrılması (Köksal vd., 2006).....	69
Şekil 5.6 Deney sonuçlarından elde edilen üç LVDT'nin ortalama okumaları ile geometrik hatalar etkisinde modellenen kolonların sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre eksenel yük-eksenel kısalma eğrilerinin karşılaştırılması (Köksal vd., 2006)	71
Şekil 5.7 İdeal kolondaki sonlu elemanlar analizi sonuçları ile ağır hasar görmüş bölgeye yerleştirilen kritik LVDT okumalarının karşılaştırılması (Köksal vd., 2006)	73

Şekil 5.8: (a) Şiddetli oturmuş kenar (b) Komşu kenardaki makro çatlaklar (Köksal vd., 2006)	74
Şekil 6.1 S tipi kolonun donatı konfigürasyonu (Chung vd., 2002)	76
Şekil 6.2 Claeson, kolon donatı konfigürasyonları.....	77
Şekil 6.3 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi.....	86
Şekil 6.4 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi.....	87
Şekil 6.5 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi.....	88
Şekil 6.6 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi.....	89
Şekil 6.7 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı $64,5\text{mm}^2$, etriye aralığı 100mm olan kolonların farklı beton mukavemetlerindeki GY-YK değişimi	90
Şekil 6.8 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı $64,5\text{mm}^2$, etriye aralığı 100mm olan kolonların farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi.....	91
Şekil 6.9 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı $64,5\text{mm}^2$, etriye aralığı 55mm olan kolonların farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi	92
Şekil 6.10 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı $64,5\text{mm}^2$, etriye aralığı 55mm olan kolonların farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi.....	93
Şekil 6.11 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı 258mm^2 , etriye aralığı 55mm olan kolonların, farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi	94
Şekil 6.12 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı 258mm^2 , etriye aralığı 55mm olan kolonların farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi.....	95
Şekil 6.13 Dört ve sekiz donatılı, etriye çapları 8mm ve 12mm olan kolonlar için GY-YK değişimi.....	96
Şekil 6.14 Dört ve sekiz donatılı, etriye çapları 8mm ve 12mm olan kolonlar için KB-YK değişimi.....	96
Şekil 6.15 Dört donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi	97
Şekil 6.16 Dört donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi.....	99
Şekil 6.17 Model A33 kolonunun, boyuna donatı farklı akma dayanımları için GY-YK değişimi.....	99
Şekil 6.18 Model A33 kolonunun, boyuna donatı farklı akma dayanımları için KB-YK değişimi.....	100
Şekil 6.19 Model A91 kolonunun, boyuna donatı farklı akma dayanımları için GY-YK değişimi.....	101
Şekil 6.20 Model A91 kolonunun, boyuna donatı farklı akma dayanımları için KB-YK değişimi.....	101

Şekil 6.21 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi	102
Şekil 6.22 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişiminin incelenmesi	105
Şekil 6.23 Sekiz donatılı, etriye çapı 8mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi	106
Şekil 6.24 Sekiz donatılı, etriye çapı 8mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi	107
Şekil 6.25 Sekiz donatılı, etriye çapı 12mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi	108
Şekil 6.26 Sekiz donatılı, etriye çapı 12mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi	109
Şekil 6.27 Sekiz donatılı, beton dayanımı 20 MPa olan kolonlarda farklı etriye çapları için GY-YK değişimi	111
Şekil 6.28 Sekiz donatılı, beton dayanımı 20 MPa olan kolonlarda farklı etriye çapları için KB-YK değişimi	112
Şekil 6.29 Sekiz donatılı, beton dayanımı 39 MPa olan kolonlarda farklı etriye çapları için GY-YK değişimi	112
Şekil 6.30 Sekiz donatılı, beton dayanımı 39 MPa olan kolonlarda farklı etriye çapları için KB-YK değişimi	113
Şekil 6.31 Sekiz donatılı, beton dayanımı 54 MPa olan kolonlarda farklı etriye çapları için GY-YK değişimi	113
Şekil 6.32 Sekiz donatılı, beton dayanımı 54 MPa olan kolonlarda farklı etriye çapları için KB-YK değişimi	114
Şekil 6.33 Sekiz donatılı, beton dayanımı 20 MPa, etriye aralığı 55mm olan kolonda farklı etriye çapları için GY-YK değişimi	114
Şekil 6.34 Sekiz donatılı, beton dayanımı 20 MPa, etriye aralığı 55mm olan kolonda farklı etriye çapları için KB-YK değişimi	115
Şekil 6.35 Sekiz donatılı, beton dayanımı 39 MPa, etriye aralığı 55mm olan kolonda farklı etriye çapları için GY-YK değişimi	115
Şekil 6.36 Sekiz donatılı, beton dayanımı 39 MPa, etriye aralığı 55mm olan kolonda farklı etriye çapları için KB-YK değişimi	116
Şekil 6.37 Sekiz donatılı, beton dayanımı 54 MPa, etriye aralığı 55mm olan kolonda farklı etriye çapları için GY-YK değişimi	116

Şekil 6.38 Sekiz donatılı, beton dayanımı 54 MPa, etriye aralığı 55mm olan kolonda farklı etriye çapları için KB-YK değişimi.....	117
Şekil 6.39 Sekiz donatılı, etriye çapı 6mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi.....	119
Şekil 6.40 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi	120
Şekil 6.41 Sekiz donatılı, etriye çapı 8mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi	121
Şekil 6.42 Sekiz donatılı, etriye çapı 8mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi	122
Şekil 6.43 Sekiz donatılı, etriye çapı 12mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi	123
Şekil 6.44 Sekiz donatılı, etriye çapı 12mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi	124
Şekil 6.45 Kolon numunelerinin Mander vd., (1988) beton modeline göre etriye akma dayanımlarının incelenmesi	127
Şekil 6.46 Fiktif dört boyuna donatılı kolonlar	128
Şekil 6.47 Fiktif dört boyuna donatılı kolonlarda GY-YK değişimi	129
Şekil 6.48 Fiktif dört boyuna donatılı kolonlarda KB-YK değişimi	130
Şekil 6.49 Fiktif dört boyuna donatılı kolonlar ile sekiz boyuna donatılı kolonların KB değerlerinin karşılaştırılması.....	131
Şekil 6.50 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi	132
Şekil 6.51 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi	134
Şekil 6.52 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi	135
Şekil 6.53 Denklem (6.2) ile beton mukavemeti 20MPa olan, etriye çapları değişen kolonların karşılaştırılması	136
Şekil 6.54 Denklem (6.2) ile beton mukavemeti 39MPa olan, etriye çapları değişen kolonların karşılaştırılması	137
Şekil 6.55 Denklem (6.2) ile beton mukavemeti 54MPa olan, etriye çapları değişen kolonların karşılaştırılması	137
Şekil 6.56 Denklem (6.2) ile beton mukavemeti 20MPa olan, etriye aralığı 55mm, etriye çapları değişen kolonların karşılaştırılması	138
Şekil 6.57 Denklem (6.2) ile beton mukavemeti 39MPa olan, etriye aralığı 55mm, etriye çapları değişen kolonların karşılaştırılması	138

Şekil 6.58 Denklem (6.2) ile beton mukavemeti 54MPa olan, etriye aralığı 55mm, etriye çapları değişen kolonların karşılaştırılması	139
Şekil 6.59 Dört boyuna donatılı ve sekiz boyuna donatılı kolonların KB değerlerinin denklem (6.2) ile karşılaştırılması	140

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 6.1 Numune özellikleri	79
Çizelge 6.2 Genel sonuç tablosu.....	81
Çizelge 6.3 Sekiz donatılı, etriye çapı 6mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi	86
Çizelge 6.4 Sekiz donatılı, etriye çapı 6mm, boyuna donatı alanı 2 katına çıkarılan kolonların farklı beton mukavemetlerinde GY-YK değişimi	87
Çizelge 6.5 Sekiz donatılı, etriye çapı 6mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi	88
Çizelge 6.6 Sekiz donatılı, etriye çapı 6mm, boyuna donatı alanı 2 katına çıkarılan kolonların farklı beton mukavemetlerinde KB-YK değişimi.....	89
Çizelge 6.7 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı $64,5\text{mm}^2$, etriye aralığı 100mm olan kolonların farklı beton mukavemetlerindeki GY-YK değişimi	90
Çizelge 6.8 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı $64,5\text{mm}^2$, etriye aralığı 100mm olan kolonların farklı beton mukavemetlerindeki KB-YK değişimi	91
Çizelge 6.9 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı $64,5\text{mm}^2$, etriye aralığı 55mm olan kolonların farklı beton mukavemetlerindeki GY-YK değişimi	92
Çizelge 6.10 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı $64,5\text{mm}^2$, etriye aralığı 55mm olan kolonların farklı beton mukavemetlerindeki KB-YK değişimi	93
Çizelge 6.11 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı 258mm^2 , etriye aralığı 55mm olan kolonların farklı beton mukavemetlerindeki GY-YK değişimi	94
Çizelge 6.12 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı 258mm^2 , etriye aralığı 55mm olan kolonların farklı beton mukavemetlerindeki KB-YK değişimi.....	95
Çizelge 6.13 Dört donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi.....	97
Çizelge 6.14 Dört donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi.....	98
Çizelge 6.15 Sekiz donatılı, etriye çapı 6mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi	102
Çizelge 6.16 Sekiz donatılı, etriye çapı 6mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi	104
Çizelge 6.17 Sekiz donatılı, etriye çapı 8mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi	105
Çizelge 6.18 Sekiz donatılı, etriye çapı 8mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi	106

Çizelge 6.19 Sekiz donatılı, etriye çapı 12mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi	107
Çizelge 6.20 Sekiz donatılı, etriye çapı 12mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi	108
Çizelge 6.21 Sekiz donatılı, etriye çapı 6mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi	118
Çizelge 6.22 Sekiz donatılı, etriye çapı 6mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi	119
Çizelge 6.23 Sekiz donatılı, etriye çapı 8mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi	120
Çizelge 6.24 Sekiz donatılı, etriye çapı 8mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi	121
Çizelge 6.25 Sekiz donatılı, etriye çapı 12mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi	122
Çizelge 6.26 Sekiz donatılı, etriye çapı 12mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi	123
Çizelge 6.27 Etriye akma mukavemetinin göçme yüküne etkisi	125
Çizelge 6.28 Etriye akma mukavemetinin kuşatma basıncına etkisi	126
Çizelge 6.29 Numune özellikleri	127
Çizelge 6.30 Dört boyuna donatılı, etriye çapı 6mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi	128
Çizelge 6.31 Dört boyuna donatılı, etriye çapı 6mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi	129

ÖNSÖZ

Literatürde bulunan mevcut beton modellerinin, yapılan sonlu elemanlar analizleri sonucunda kolonlardaki kuşatma basıncının hesabında yetersiz kaldığı görülmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, betonarme kolonların, aksel yük etkisi altındaki kuşatma basınçları araştırılmıştır. Kuşatma basıncına etkiyen parametreler detaylı olarak incelenmiştir.

Lisansüstü eğitimim boyunca bana her konuda yardımcı olan, manevi desteğini esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. Hasan Orhun KÖKSAL'a, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen saygıdeğer aileme teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Ülkemizin deprem kuşağı üzerinde bulunması nedeniyle yapıların depreme karşı dayanıklı olarak tasarlanması gerekmektedir. 1974 yılında hazırlanan yönetmeliğin zayıf kalması, 1998 yılında yeni bir yönetmeliğin yürürlüğe girmesine neden olmuştur. Performansa dayalı tasarım kavramının 1990'lı yıllarla birlikte hızlı bir gelişim göstermesi ve yapısal çözümleme programlarına girmesi ile 1998 deprem yönetmeliğine ilave olarak, 2005 yılında hazırlanan yeni deprem yönetmeliği taslağında kendine yer bulmuştur.

Mander vd., (1988) beton modelinin yeni Türk deprem yönetmeliği taslağına girdiği görülmektedir. Literatürde bulunan beton modelleri kronolojik sırayla; Hognestad beton modeli (1951), Kent ve Park beton modeli (1971), Sheikh ve Üzümeri beton modeli (1982), Geliştirilmiş Kent ve Park beton modeli (1982), Mander vd., (1988) beton modeli, Saatçioğlu ve Razvi beton modeli (1992)'dir.

Bu beton modelleri arasından yalnız Saatçioğlu-Razvi beton modeli (1992) ile Mander vd., (1988) beton modeli kuşatma basıncını hesaplamaktadır.

Bu tez çalışmasında betonarme kolonların kuşatma basıncına etkiyen parametreler sırasıyla boyuna donatı çapı, boyuna donatı akma dayanımı, yanal donatı çapı, yanal donatı aralığı, yanal donatı akma dayanımı ve boyuna donatı konfigürasyonunun değişimi ele alınarak incelenmiştir.

Bu çalışmada, Heon-Soo Chung vd., (2002) ile Claeson'un makalelerinden alınan kolonların kuşatma basınçları; Mander vd., (1988) beton modeliyle ve Lusas sonlu elemanlar analizi programıyla karşılaştırmalı olarak hesaplanmıştır.

Sonlu elemanlar analizi sonucunda, kuşatma basınçlarının ele alınan her kolon için değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Ancak, Mander vd., (1988) beton modelinde, kuşatma basıncı değerinin beton basınç mukavemetine bağlı olmadığı görülmektedir.

Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Laboratuvarında yapılan deneylerde; betonarme kare kolonlara eş merkezli eksenel yük verilip, LVDT okumaları elde edilmiştir. Bu kolonlar, Lusas sonlu elemanlar analizi programında modellenip, deney dataları ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Kuşatılmış betonarme kolonlar, beton modeli, kuşatma basıncı, sonlu elemanlar analizi.

ABSTRACT

As the situation of our country in earthquake region it is necessary to build strength structures against seismic forces. The pourness of the code prepared in 1974 caused the take effect of the new code in 1998. The fast improvement of the performance based design in 1990's and the enterance of the structural analyses programmes to the code of earthquakes caused a need for a new code, which has been prepared in 2005 as preliminary.

It is seen that the concrete model of Mander et al. has entered the new Turkish earthquake code. The models of concrete in the chronology in order; Hognestad concrete model (1951), Kent and Park concrete model (1971), Sheikh and Uzumeri concrete model (1982), Modified Kent and Park concrete model (1982), Saatçioğlu and Ravzi concrete model (1992), Mander et al., (1988) concrete model.

The confinement pressure is only calculated in the concrete models of Saatçioğlu and Razvi (1992), Mander et al. (1988) between the models which has been mentioned before.

In this study, the effect of the reinforcement columns to confinement pressure are in order; concrete strength, diameter of longitudinal reinforcement, the yield strength of longitudinal reinforcement, diameter of lateral reinforcement, space between lateral reinforcement, the yield strength of lateral reinforcement and variation of the configuration of longitudinal reinforcement examined.

In this study, the confinement pressure of columns in the articles of Heon-Soo Chung et all. (2002) and Claeson had been calculated with the comparison of Mander concrete model (1988) and Lusas software finite element analyses program.

It is shown that at the end of the result of the finite element analyses varied for each column.

On the other hand, the value of the confinement pressure doesn't depend on the compressive strength in the Mander et al. (1988) concrete model.

The reinforcement square columns tested with concentric loading to get LVDT readings at the structural laboratory of Yıldız Technical University as comparing with the experimental data and 3D finite element analyses of this columns.

Keywords: Reinforced concrete columns, concrete model, confinement pressure, finite element analyses.

1. GİRİŞ

Yapıların depreme karşı dayanıklı olabilmesi için, taşıyıcı elemanlara gelen yatay yükler etkisi altında gerekli dayanımı göstermeleri gerekmektedir. Bu yüzden yapıdaki perde ve kolonların yeterli dayanımlarının yanında bu dayanımlarını sürdürebilmeleri için sünek olmaları gerekmektedir. Kolonların yeterli süneklikte olabilmelerini sağlamak için yatay donatı kullanılır. Yatay donatıların kuşatma basıncını artırdığı bilinen bir gerçektir.

Literatürde gerilme birim şekil-değiştirme eğrilerini veren beton modelleri arasından yalnız kuşatma basıncı değerini hesaplayan az sayıda beton modeli bulunmaktadır (Saatçioğlu vd. 1992, Mander vd. 1988). Anılan modellerdeki kuşatma basıncının hesabında, kuşatma basıncına etkiyen bir çok parametre bulunmakta ancak bu parametrelerin kuşatma basıncının hesabında etkinlik dereceleri konusu pek açık değildir.

Bu tez çalışmasının amacı, betonarme kolonlarda yanal kuşatma basıncına etkiyen parametrelerin ayrıntılı olarak araştırılıp, kuşatma basıncına olan etkilerinin incelenmesi ve bu amaçla yapılan sonlu eleman analizleri ile kuşatma basıncının mevcut modellerle hesaplanarak, karşılaştırılmasıdır.

Çalışmanın ilk aşamasında, literatürdeki mevcut analitik modeller incelenmiştir. İkinci aşama olarak, kolonların sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi ve kullanılan yazılım programına gerekli veri girişi hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde, çelik için kullanılan akma kriteri, beton için seçilen hasar modeli açıklanmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise betonarme kolonlar için analiz sonuçları ve kuşatma basıncına etkiyen parametreler detaylı olarak irdelenmiştir.

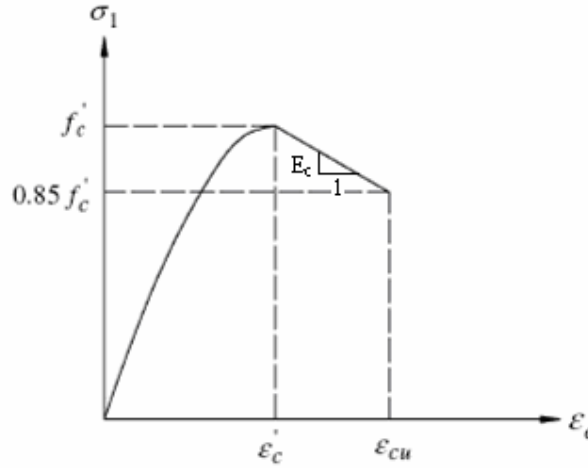
Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Laboratuvarında FRP'li kolonlar üzerindeki çalışmaya ait eksenel yük altındaki kare kolonların davranışları (Turgay T., Doktora tez çalışması; Köksal vd., 2006); kolonların imalatı sırasında oluşabilecek hatalar ve bu hatalar ile ideal kolonların sonlu elemanlar analizi programında birlikte modellenerek, karşılaştırmaları yapılmıştır.

2. KUŞATILMAMIŞ ve KUŞATILMIŞ BETON DAVRANIŞ MODELLERİ

2.1 Hognestad Modeli

Hognestad tarafından kuşatılmamış beton için önerilen model, Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Modelde, σ - ϵ eğrisinin tepe noktasına kadar olan kısım ikinci derecen bir parabol, eğimi azalan parça ise, bir doğru olarak kabul edilmiştir. Maksimum gerilme genelde kolonlardaki boyut etkisi nedeni ile beton silindir dayanımının %85’i olarak alınır ($f_c = 0.85f_{ck}$). Maksimum gerilmeye karşı gelen birim kısalma, $\epsilon_{co} = 0.002$ alınabilir. Modeldeki elastisite modülü E_c için Hognestad tarafından aşağıdaki denklem önerilmiştir.

$$E_c = \tan \alpha = 12680 + 460f_c \text{ (MPa)} \quad (2.1)$$



Şekil 2.1 Hognestad modeli (1951)

Eğrinin tepe noktasına kadar olan kısmı

$$f_c = f'_c \left[\left(\frac{2\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

ile ifade edilmiştir.

Kuşatılmamış betonun en büyük gerilmesine karşılık gelen ϵ'_c birim şekil değiştirmesi

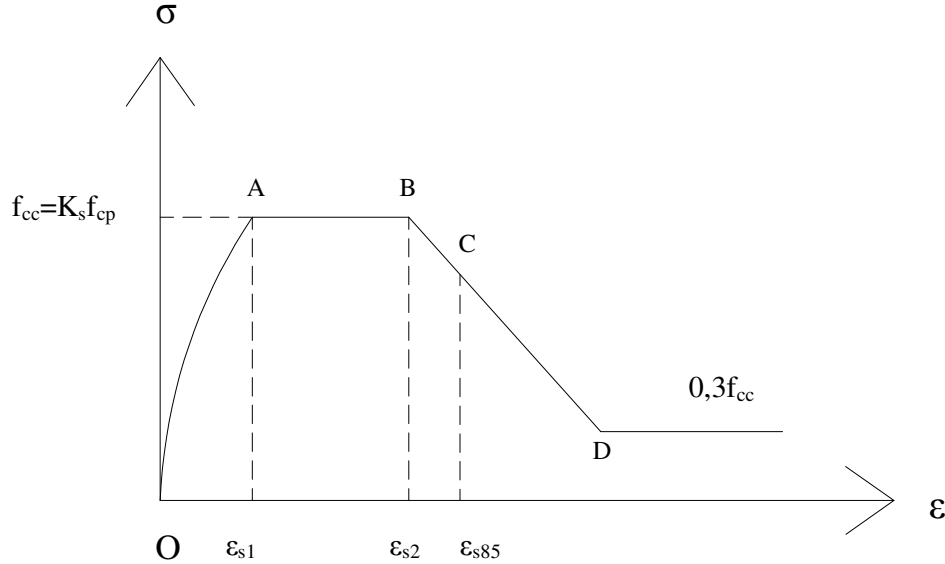
$$\varepsilon'_c = \frac{2 f'_c}{E_c} \quad (2.3)$$

olarak tanımlanmıştır.

f'_c 'den $0.85 f'_c$ 'ye kadar olan ikinci kısım bir doğru ile ifade edilmiştir.

En büyük beton birim kısalması genellikle ε_{cu} değeri 0,0038 olarak alınmaktadır (Ersoy ve Özcebe, 2001).

Bu model daha sonra anlatılacak olan Sheikh-Üzümeri modeli, geliştirilmiş Kent ve Park modeli ve Saatçioğlu-Razvi beton modelinin de temelini oluşturmaktadır.



Şekil 2.2 Shamim A. Sheikh ve S. M. Üzümeri modeli (1982)

2.2 Sheikh ve Üzümeri Modeli

Eğri dört kısımdan oluşmaktadır. Bu modelin en önemli özelliği AB olarak öngörülen çeliğe benzer bir akma bölgesinin varlığıdır. Yazarlar bu bölge ile kuşatma etkisi ile meydana gelecek olan sünek davranışı ifade etmeyi amaçlamış olmalıydı. OA bölümü ikinci derece parabol, f_{cc} ve ε_{s1} noktalarını içerir. f_{cc} kuşatılmış betonun basınç mukavemetini göstermekte ve $f_{cc} = K_s x f_{cg}$ formülüyle hesaplanır. Burada K_s : Kuşatmanın sağladığı mukavemet artım parametresi (Kuşatma katsayısı), f_{cg} : Kuşatılmamış beton basınç mukavemetidir.

ε_{s1} ve ε_{s2} maximum gerilmeye denk gelen sırasıyla minimum ve maximum birim deformasyon değerleridir.

ε_{s85} : Maximum gerilmenin geri yükleme bölümünde %85'e düştüğü anda oluşan birim deformasyon değeridir. AB ve BC bölümleri doğrusal bölgelerdir. C noktasından itibaren doğru, aynı eğimle, gerilme değeri maximum gerilmenin %30' una düştüğü ana kadar (D noktası) devam eder. D noktasından sonra betonun davranışı yatay bir doğruyla gösterilir. Ve C noktasından sonraki beton davranışının önerildiği gibi olduğu doğrulanmıştır. Anılan σ - ε eğrisini tam olarak tanımlamak için f_{cc} , ε_{s1} , ε_{s2} , ε_{s85} değerlerinin bilinmesi gerekmektedir.

2.2.1 Kuşatılmış beton mukavemetindeki artış ve Ks (Kuşatma parametresi) hesabı

Örtü beton herhangi bir kuşatma donatısına sahip değildir. Kuşatma etkisinin olmaması sonucunda, örtü betonda gerilme ve şekil değiştirmelerin birbirinin aynı olduğu kabul edilir. Yanal donatının dışında bulunan örtü betonun yanal şekil değiştirmesine herhangi bir sınırlama konulmadığı için, beton tek eksenli dayanıma eriştiği zaman kabuk şeklinde dökülecektir. Çekirdek betonda ise küçük deformasyonlarda yanal donatı tarafından sağlanan kuşatma etkisi ihmal edilebilir.

Beton mukavemeti ve doğrusal yanal donatı tarafından sağlanan yanal kuşatma ilişkisi aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmiştir:

$$f_{cc} = f_{cp} + f(\rho_s, s, f'_s, \lambda, \eta) \quad (2.1)$$

ρ_s = Toplam yanal donatı hacminin çekirdek beton hacmine oranı

s = Etriye aralığı

f'_s = Yanal donatı gerilmesi

λ = Çekirdek beton etrafındaki boyuna donatı dağılımına ve kesit konfigürasyonuna bağlı parametre

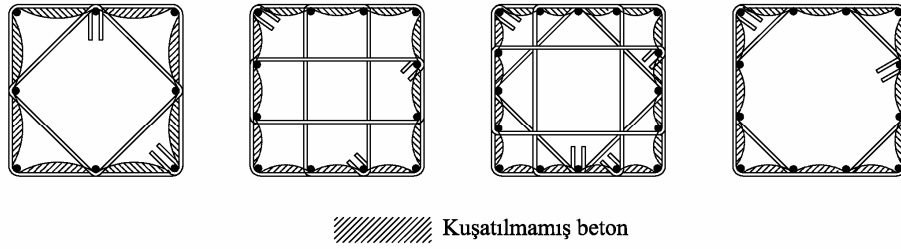
η = Kesit ebatlarının etkisi

Kuşatılmış beton mukavemetindeki artış; “Efektif (Etkin) Olarak Kuşatılmış” beton alanı üzerinden hesaplanmaktadır. Bu alan, etriye merkez çizgisiyle sınırlanmış sözde çekirdek alandan daha küçüktür; donatı konfigürasyonu ve etriye aralığına bağlı olarak hesaplanmaktadır (Sheikh S. A. ve Uzumeri S. M., 1982).

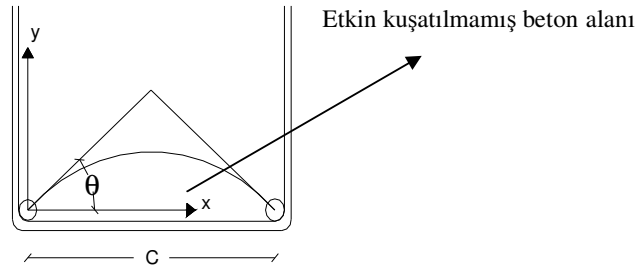
2.2.2 Etkin kuşatılmış beton alanı

Etkin kuşatılmış beton çekirdeği, çekirdek betonu alanı içerisindeki bir bölgeyi ifade eder. Etriye seviyesindeki (yüzeyindeki) etkin kuşatılmış beton bölgesi, etriyelerle sarılmış boyuna donatı düzeni ile belirlenebilir ve çekirdek beton alanından daima küçüktür. Etriye konfigürasyonuna ve boyuna donatılar arasındaki mesafeye bağlı olarak, etriye seviyesindeki çekirdek betonun bir kısmı kuşatılmamış gibi davranış gösterir. Değişik etriye ve donatı konfigürasyonları Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Şekil 2.3’den de anlaşılabacağı gibi boyuna donatının artmasıyla bölünmüş alan sayısı da artmaktadır.

Sheikh S. A. ve Üzümeri S. M., (1982) tarafından, bölünmüş alan sayesinde, kuşatma etkisinin düzgün yayıldığı kabul edilmiştir.



Şekil 2.3 Etriye seviyesindeki kuşatılmamış beton alanı
(Sheikh S. A. ve Üzümeri S. M., 1982)



Şekil 2.4 Kuşatılmamış beton alanı için öneriler (Sheikh S. A. ve Uzumeri S. M., 1982)

Etkin olarak kuşatılmamış beton alanı Şekil 2.4'deki gibi gösterilebilir. Bu modelde, etkin kuşatılmış ve kuşatılmamış beton bölgelerinin ayrılış şekli, boyuna donatılar arasında çizilen yay sıralarının dizilişi şeklindedir. Yayın bir üçgenle ikinci derece parabol arasında yer aldığı varsayılmakta ve yatayla θ açısı yapan doğruya teğet olduğu kabul edilmektedir. Gerilmelerin tamamına yakını kuvvetin uygulandığı doğrultudadır. Basınç ve çekme bölgelerini ayıran θ açısı 45° ye yakındır. Yayın kesin şekli bilinmediğinden dolayı, kuşatılmamış bölge alanı $\frac{C^2}{\alpha}$ ile ifade edilebilir.

α : Bir katsayı (Eğrilerin kesin şekliyle tanımlanan bir değer)

$$\text{Etkin kuşatılmış betonun alanı; } A_{C0} - \sum_{i=1}^n \frac{C_i^2}{\alpha} \text{ olarak yazılabilir.} \quad (2.4)$$

A_{C0} : Etriye ile sarılan çekirdek beton alanı

n :Yay sayısı

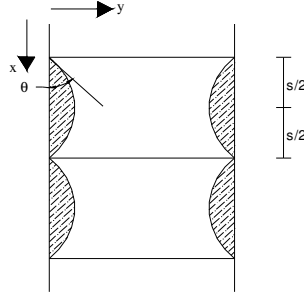
C : Boyuna donatı merkezleri arasındaki mesafe

λ = Etkin kuşatılmış beton alanının, etriye ile sınırlanan çekirdek beton alanına oranı olarak kabul edilirse:

$$\lambda = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n C_i^2}{\alpha \times A_{C0}} \text{ şeklinde yazılabilir.} \quad (2.5)$$

2.2.3 Etriye aralığının etkin kuşatılmış beton hacmine etkisi

Kuşatmanın etkinliğini kaybettiği kısım, kolonun yüksekliği boyunca da mevcuttur (Şekil 2.5). Etriyeler arası mesafe arttıkça, kuşatma etkisi azalmaktadır. Kuşatılmış ve kuşatılmamış beton bölgelerini ayıran eğrinin, düşey kesitte de ikinci derece parabol olduğu kabul edilir.

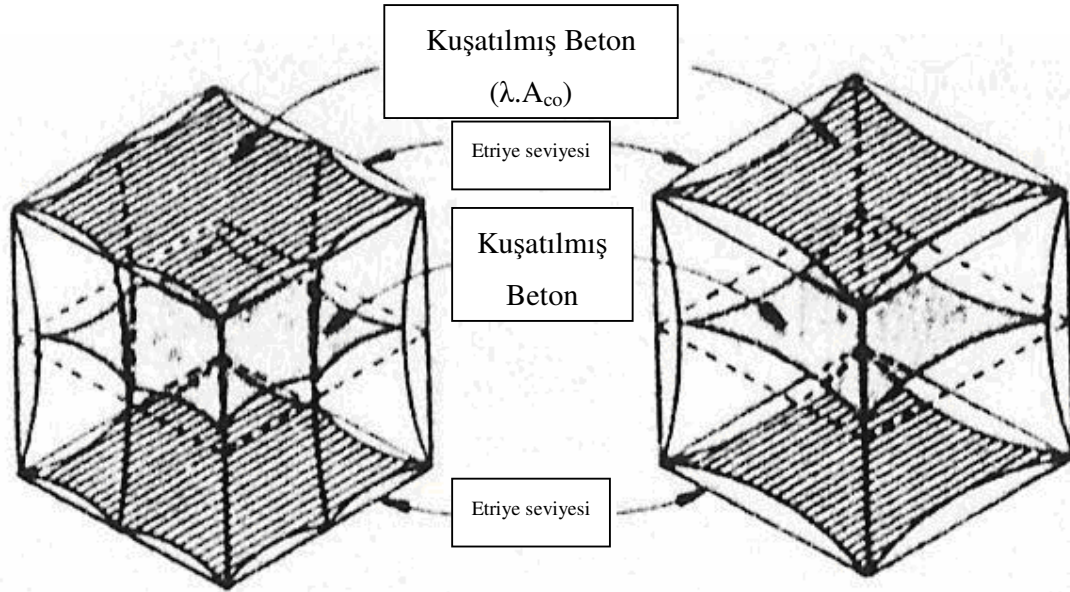


Şekil 2.5 Etriyeler arasındaki kuşatılmamış alan (Sheikh S. A. ve Uzumeri S. M., 1982)

Bu durumda eğrinin kesin şekli çok önemli değildir. Kolonun mukavemeti etrilyeler arasındaki en küçük alan tarafından belirlenmektedir. Büyük donatı açıklıkları, betonun kuşatma etkisinde kalan alanını küçültmektedir (Sheikh S. A. ve Uzumeri S. M., 1982).

Üç boyutlu düşünüldüğünde (Şekil 2.6), eğrilerin şekilleri tam bilinmediğinden, iki etriye arasında istenen bir kesitin etkin kuşatılmış beton kesitinin kesin alanını bulmak zordur.

Fakat herhangi bir kesit alanı:



Şekil 2.6 Kritik kesit hesabı (Sheikh S. A. ve Üzümeri S. M., 1982)

$$A_{C0} = B \times H_i \rightarrow \text{Çekirdek beton alanı}$$

Etriye yüzeyinden etkin kuşatılmış beton alanı: $\lambda \times A_{c0}$ (2.6)

Etriye yüzeyinden A_{c0} daki azalma ile etriyeler arasındaki kesit alanı:

$$(B - 2y_m) \times (H - 2y_m) \quad (2.7)$$

Herhangi bir kesitte kuşatılmış beton alanı: $A_{ec} = \lambda \times (B - 2y_m)(H - 2y_m)$ (2.8)

B ve H: Etriye boyutları (Etriye merkezinden etriye merkezine).

y_m : y değerinin etriye dizilişine göre maksimum değeridir; $y = 0.25s \times \tan \theta$ olarak verilmiştir.

O halde:

$$A_{ec} = \lambda(B - 0.5s \times \tan \theta)(H - 0.5s \times \tan \theta) = \lambda^* A_{c0} \quad (2.9)$$

şeklinde yazılabilir.

λ^* : Herhangi bir kesitteki etkin kuşatılmış beton alanının çekirdek beton alanına oranı olarak tarif edilebilir. Bu parametre; konfigürasyon etkisini içerirken, kesitteki konfigürasyon ve etriye mesafeleri etkilerini de birleştirmektedir. Boyuna ve yanal donatı dağılımının, kuşatmaya olan etkisini yansıtmaktadır.

2.2.4 Kuşatma basıncının etkisi

Kuşatılmış beton mukavemetinin artışında kuşatma basıncı etkisi görülmekte ve $(\rho_s \times f'_s)^\nu$ ile orantılı olduğu kabul edilmektedir (Sheikh S. A. ve Uzumeri S. M., 1982).

f'_s : Maksimum dayanıma ulaşan kuşatılmış betonun yanal donatı gerilme değeri.

ν : Birden küçük bir sabit sayı.

Kuşatılmış beton mukavemetindeki artış $= \beta(\rho_s \times f'_s)^\nu$ olarak yazılabilir (β bir sabit sayı).

2.2.5 K_s parametresinin denklemi

Modelde, yanal donatıya göre K_s parametresinin hesabı özetlenirse;

Kuşatma etkisindeki beton mukavemetindeki artış:

$$P_{add} = A_{ec} \times \beta \times (\rho_s f'_s)^\nu \quad (2.10)$$

$$K_s = 1,0 + \frac{A_{ec}}{P_{occ}} \beta(\rho_s f'_s)^v \quad (2.11)$$

$$K_s = 1 + \frac{1}{P_{occ}} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n C_i^2}{\alpha \times A_{co}}\right) \left(1 - \frac{0.5s}{B} \tan \theta\right) \left(1 - \frac{0.5s}{H} \tan \theta\right) B \times H \times \beta(\rho_s \times f'_s)^v \quad (2.12)$$

Kare kesitler için bu denklem;

$$K_s = 1 + \frac{1}{P_{occ}} \left(1 - \frac{nC^2}{\alpha \times B^2}\right) \left(1 - \frac{0.5s}{B} \tan \theta\right)^2 B^2 \times \beta(\rho_s \times f'_s)^v \quad (2.13)$$

$$K_s = 1 + \frac{B^2}{140P_{occ}} \left[\left(1 - \frac{nC^2}{5,5 \times B^2}\right) \left(1 - \frac{s}{2B}\right)^2 \right] \sqrt{\rho_s f'_s} \quad (P_{occ}: \text{kN}) \quad (2.14)$$

2.2.6 ε_{s1} parametresinin hesaplanması

ε_{s1} : Maksimum beton gerilmesine denk gelen minimum birim deformasyondur ve Soliman ve Yu tarafından;

$$\varepsilon_{s1} = 80 K_s f'_c \times 10^{-6} \quad (f'_c = \text{MPa}) \quad (2.15)$$

olarak verilmiştir.

2.2.7 ε_{s2} parametresinin hesaplanması

ε_{s2} : Maksimum beton gerilmesine denk gelen maksimum birim deformasyondur. ε_{s2} değeri yanal donatıyla elde edilen düktilitenin göstergesidir. Sargin ve Vallenas ε_{s2} bulunuşu için basit denklemler önermişlerdir. Fakat, bu denklemlerde donatı dağılımı (dizilişi) göz önüne alınmamıştır.

Modeli oluşturan araştırmacı tarafından, bu denklemlerin 24 numune üzerinde uygulamasıyla; etriye aralığının denklemlerde bahsedildiğinden daha önemli olduğu ortaya çıkmıştır. Bu sonuçla Sargin'in modeli temel alınarak yeni bir ε_{s2} formülü önerilmiştir. Bu formülde; donatı konfigürasyonu ve etriye aralığı, yanal donatı miktarı ve malzeme özellikleri göz önünde bulundurulmaktadır. Sargin ve Vallenas'ın denklemlerinden elde edilen sonuçlar birbirlerinden tam olarak farklı değildir. Önerilen denklemler şöyledir:

$$\text{SI birim sistemine göre: } \frac{\varepsilon_{s2}}{\varepsilon_{00}} = 1 + \frac{248}{C} \left(1 - 5,0 \left(\frac{s}{B} \right)^2 \right) \frac{\rho_s f'_s}{\sqrt{f'_c}} \quad C(\text{mm}), P(\text{Mpa}) \quad (2.16)$$

ε_{00} : Kuşatmasız betonda maksimum gerilmeye denk gelen birim deformasyon

(Genelde 0,0022).

2.2.8 ε_{s85} parametresinin hesabı

ε_{s85} : Maksimum beton gerilmesinin %85'e düştüğü anda birim deformasyon değeridir.

$$\varepsilon_{s85} = \frac{0,85}{z} + \varepsilon_{s2} \quad \text{veya} \quad \varepsilon_{s85} = 0,225 \cdot \rho_s \cdot \sqrt{\frac{B}{s}} + \varepsilon_{s2} \quad (2.17)$$

2.3 Saatçioğlu ve Razvi Modeli

Yanal kuşatma basıncı ile eksenel basıncın aynı anda etkimesi sonucu üç eksenli gerilme hali oluşur. Kesite etkileyen yanal kuşatma basıncı sebebiyle oluşacak yanal şekil değiştirmeler, beton kesitin basınç altında yanal genişleme eğilimine karşı koyar. Doğrusal elastik ve izotropik bir malzeme için aşağıda verilen eşitlikler, belirli bir yanal şekil değiştirme için, eksenel yük ve üç eksenli gerilme arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir (Saatçioğlu ve Razvi, 1992).

$$\frac{-\mu \times f_{u2}}{E} = \frac{f_{t1} - \mu \times (f_{t2} + f_{t1})}{E} \quad (2.18)$$

$$f_{t2} = f_{u2} + k'_1 \cdot f_{t1} \quad (2.19)$$

Bu eşitliklerde

$$k'_1 = \frac{1 - \mu}{\mu} \quad (2.20)$$

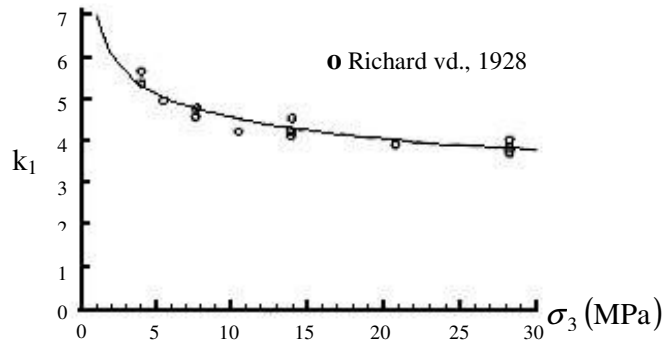
Bağıntı (2.20)'de k'_1 , μ Poisson oranına bağlı bir fonksiyon, f_{t1} , f_{t2} ve f_{u2} , 1 ve 2 yönlerinde etkileyen üç eksenli ve eksenel gerilme halindeki gerilmeler ve E , elastisite modülüdür.

Betonarme kesitlerde elastisite modülü ve poisson oranı, malzemenin doğrusal davranmayışı nedeni ile yüklemeye bağlı olarak değişir. Buna ek olarak, gerilme şekil değiştirme ilişkisi ve poisson oranı üç ana eksen doğrultusunda da farklı olabilir. Bu nedenle, önceden doğrusal

elastik ve izotropik malzeme için verilen eşitlikler beton için kabul edilemez. Buna rağmen Bağntı (2.19) ile verilen ifadeye benzer bir bağntı, malzemenin eksenel yük altındaki dayanımına ve yanal kuşatma basıncına bağlı olarak betonun üç eksenli dayanımı için yazılabilir.

$$\sigma_1 = f'_c + k_1 \cdot \sigma_3 \quad (2.21)$$

Burada σ_1 ve f'_c sırası ile kuşatılmış betonun ve kuşatılmamış betonun dayanımıdır. Bağntı (2.21)'deki k_1 ile k'_1 aynı değildir. Fakat k_1 , k'_1 gibi Poisson oranına bağlı bir fonksiyon olarak kabul edilebilir. k_1 katsayısının σ_3 yanal basıncına bağlı olarak değişimi en iyi deneysel verilere dayanılarak elde edilebilir. Sargılı beton dayanımı, kuşatma basıncı σ_3 'ün etkisi dikkate alınarak ifade edilir. Şekil 2.7'de deney numunelerinin değişik yanal sıvı basınç seviyelerine göre değişimini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi k_1 , yanal basıncın büyük değerleri için küçük ve daha da büyüyen yanal basınç değerlerinde ise sabitleşen değerler aldığı görülmektedir. Aşağıda verilen eşitlik deneysel verilerin istatistiksel değerlendirilmesi sonucunda elde edilmiş olup, k_1 katsayısının yanal basınç ile değişimini ifade etmektedir.



Şekil 2.7 k_1 için önerilen bağntı (Saatçioğlu ve Razvi, 1992)

$$k_1 = 6.70 \times (\sigma_3)^{-0.17} \quad (2.22)$$

Bu eşitlikte σ_3 MPa olarak düzgün yayılı kuşatma basıncıdır.

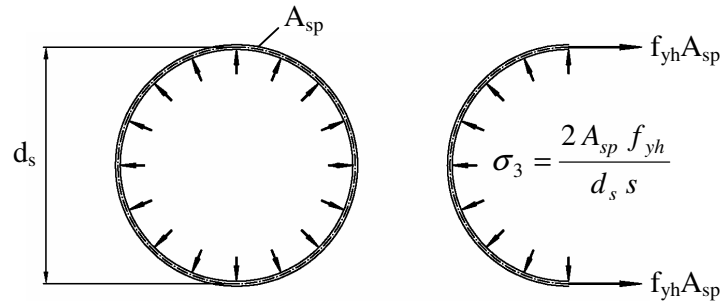
Kuşatılmamış beton dayanımı f'_c , standart silindir deneyinden elde edilen değerden farklı olabilir. Bu nedenle, bu değer kolon elemanın sahip olduğu özelliklere sahip numuneler ile yapılacak deneysel çalışma sonucunda tespit edilmesi en doğrusudur. Böyle bir verinin

olmaması durumunda standart silindir numune deney sonuçlarının uygun görülecek bir düzeltme katsayısı dikkate alınarak kullanılabilir. Düzeltme katsayısı mevcut kaynaklarda 0.85 ile 1.0 arasında verilmektedir (Saatçioğlu ve Razvi, 1992).

2.3.1 Dairesel kesitler

Düzgün yayılı kuşatma basıncı durumu için bağıntı (2.21) geçerlidir. Sık adımlarla yerleştirilmiş spiral kuşatma donatısının ve kolon boyuna donatısının mevcudiyeti ile de beton çekirdek etrafında sağlanacak kuşatma basıncı düzgün yayılı olarak kabul edilebilir (Saatçioğlu ve Razvi, 1992).

Söz konusu basınç, statik kuvvetlerin yatay denge şartı yardımıyla, şekil 2.8’de görüldüğü gibi hesaplanabilir.



Şekil 2.8 Dairesel kolonlarda yanıl kuşatma basıncı (Saatçioğlu ve Razvi, 1992)

Eğer yanıl kuşatma basıncı σ_3 , kuşatma donatısı akma dayanımı sınır değerine bağılı olarak hesaplanır ve k_1 de Bağıntı (2.22) ile elde edilir ise, spiral kuşatma donatılı dairesel kesitler için kuşatılmış beton dayanımı hesaplanmış olur ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma_1 = f'_c + (6.7 \sigma_3^{-0.17}) \sigma_3 \quad (2.23)$$

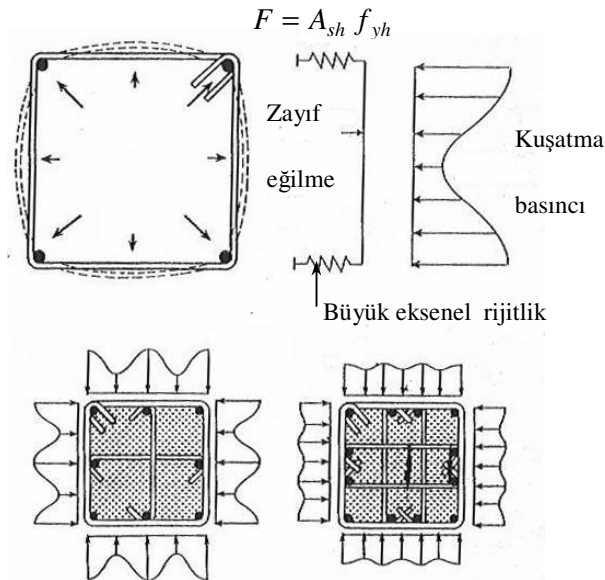
2.3.2 Kare kesitler

Spiral kuşatma donatılı dairesel kesitlerde düzgün yayılı kuşatma basıncı kuşatma donatısındaki gerilmeden hesaplanır. Kare veya dikdörtgensel olarak kuşatılmış kesitlerde ise bu basıncı belirlemek güçtür. Bu nedenle, Saatçioğlu ve Razvi (1992) eşdeğer yanıl basıncı temel alarak, malzeme ve kesit özelliklerini içeren spiral kuşatma donatılı kesitlerde kullanılan hesap yöntemine benzer bir yaklaşım kullanmışlardır.

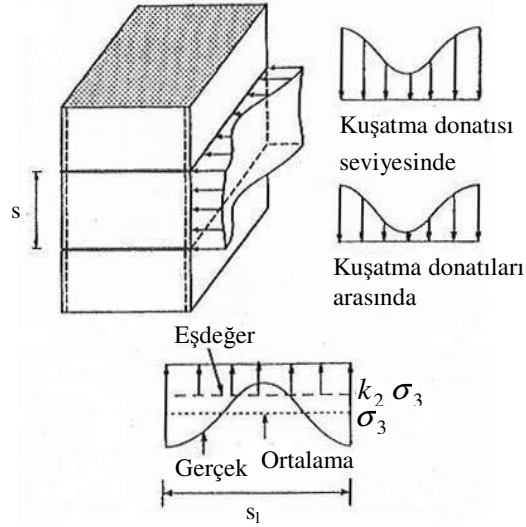
Kare kesitlerde kuşatma basıncı, kuşatma donatısı tarafından uygulanacak kuşatma kuvvetine bağlı olarak değişir. Kuşatma donatısı, eksenel rijitliğinin büyük olması nedeni ile köşe noktalarda büyük yanal kuşatma kuvvetleri, yanal olarak desteklenmemiş yerlerde ise zayıf eğilme rijitliği nedeni ile küçük kuşatma kuvvetleri meydana getirir. Köşe noktalardaki kuşatma kuvvetleri sırası ile kuşatma donatısının kesit alanına ve akma dayanımına bağlıdır. Köşelerin arasında kalan yerlerde ise bu kuvvetler, kuşatma donatısı çapına ve yanal desteklenmemiş uzunluğa bağlı olarak kuşatma donatısı eğilme rijitliği ile ilişkilidir.

Bu nedenle, kuşatma donatısının eğilme rijitliği sayesinde meydana gelecek kuşatma kuvvetleri köşe noktalarda meydana gelecek kuşatma kuvvetleri ile karşılaştırıldığında çok küçük olmaktadır. Eğer kesitte çiroz etriyeler de kullanılır ise kesit orta kısımlarındaki boyuna donatılar da yanal olarak desteklenmiş olur ve böylece orta kısımlarda da yanal olarak desteklenmiş boyuna donatılar sayesinde büyük yanal kuşatma etkisi elde edilebilir. Şekil 2.9'da çeşitli kuşatma donatı düzenleri için yanal kuşatma basınç dağılımları gösterilmiştir.

Betonun yanal olarak kuşatılması üç boyutta gerçekleştirilen bir olay olması nedeni ile kesitsel düzeye, iki boyutlu olarak indirgenemez (Saatçioğlu ve Razvi, 1992). Bu nedenle yanal kuşatma basıncının eleman boyunca olan değişimlerinin de dikkate alınması daha doğru olmaktadır. Bu durum Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Kare kolonlarda yanal kuşatma basıncı dağılımları (Saatçioğlu ve Razvi, 1992)



Şekil 2.10 Yanal kuşatma basıncının dağılımı ile ortalama ve eşdeğer kuşatma basınç ifadeleri (Saatçioğlu ve Razvi, 1992)

Köşe noktalarda boyuna donatının yanıl olarak tutulması sayesinde düşey doğrultu boyunca meydana gelecek kuşatma basıncı, kuşatma donatısının konma mesafesinin sık olması sonucunda düzgün doğrusal olarak kabul edilebilir. Bu durum boyuna donatının burkulmasına kadar geçerli olmaktadır (Saatçioğlu ve Razvi, 1992).

Kare bir kolonda dört adet boyuna donatı olması ve kuşatma donatısı konma mesafesinin büyük olması durumunda kesit orta kısımlarındaki kuşatma basıncının azalması daha fazla olacaktır. Bu durumda kuşatma basıncının düzgün yayılı olarak dağıldığını kabul etmek kuşatma etkisini yanlış tahmin edilmesine neden olur. Ayrıca, ortalama basınç dağılımı kabulü de gerçek kuşatma etkisini yansıtmamaktadır (Saatçioğlu ve Razvi, 1992). Bu durumda eşdeğer kuşatma basıncı, ortalama kuşatma basıncını k_2 ile tanımlanacak bir azaltma katsayısına bağlı olarak tanımlanmıştır (Şekil 2.10). Böylece Bağntı (2.21) aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\sigma_1 = f'_c + k_1 \sigma_{3e} \quad (2.24)$$

Bu bağntıda

$$\sigma_{3e} = k_2 \sigma_3 \quad (2.25)$$

ve σ_3 de

$$\sigma_3 = \frac{\sum A_{sh} f_{yh} \sin \alpha_1}{s b_{co}} \quad (2.26)$$

dir. Bu durumda k_1 'de

$$k_1 = 6.7 \sigma_{3e}^{-0.17} \quad (2.27)$$

olarak dikkate alınmalıdır. Bağntı (2.26)'daki α_1 kuşatma donatısı ile b_{co} arasında kalan açıdır. Eğer kuşatma donatısının doğrultusu, b_{co} 'a dik ise $\alpha_1 = 90^\circ$ alınmalıdır.

k_2 katsayısını hesap etmek amacı ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Sonuç olarak bu katsayı, yanal desteklenmiş boyuna donatılar arasındaki mesafe s_l 'ye, kuşatma donatısı konma mesafesi s 'ye ve Bağntı (2.26) ile tanımlanan ortalama yanal kuşatma basıncı σ_3 'e bağlı olarak

$$k_2 = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_{co}}{s}\right) \left(\frac{b_{co}}{s_l}\right) \left(\frac{1}{\sigma_3}\right)} \leq 1.0 \quad (2.28)$$

ifade edilmektedir. Bu eşitlikler, boyuna donatı burkulmasının engellendiği durumlarda geçerli olduğu ifade edilmiştir. Daha önceden yapılan deneysel veriler dikkate alındığı zaman, ACI yönetmeliğine göre tasarlanmış kolonlar boyuna donatının burkulmasını engelleyecek düzeyde yeterli olduğu ve belirtilen bu şartı sağladığı görülmüştür

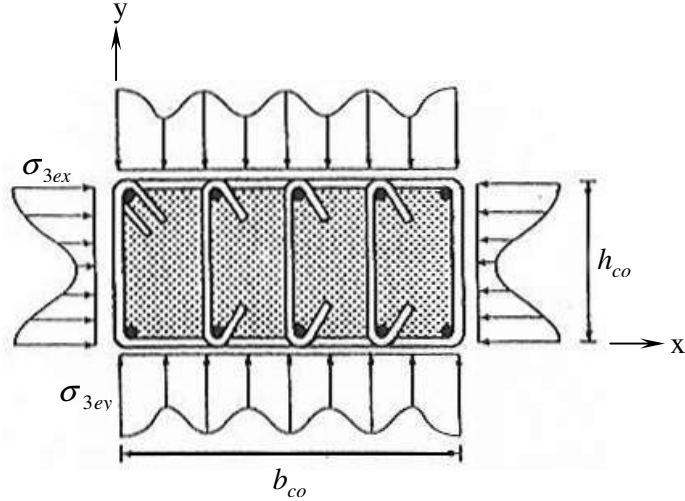
(Saatçioğlu ve Razvi, 1992).

2.3.3 Dikdörtgen kesitler

Dikdörtgen kesitli kolon elemanlar iki kenarı boyunca farklı kuşatma donatı miktarına sahip olabilmektedir. Bu nedenle, bu kenarlar boyunca farklı büyüklükte kuşatma basınçları oluşur. Dairesel ve kare kesitler için belirtilen hesap yöntemi, dikdörtgen kesitli kolon elemanlarda da kullanılabilir. Dikdörtgen kesitli elemanlarda uzun kenara etkiyen kuşatma basıncı, kısa kenara etkiyen kuşatma basıncına göre beton dayanımı üzerinde daha çok etkili olmaktadır. Deneysel verilerin incelenmesi sonucunda dikdörtgen kesitli kolon elemanın uzun ve kısa kenarlarına etkiyen kuşatma basıncının kenar uzunlukları ile orantılı olduğu çıkartılmaktadır (Saatçioğlu ve Razvi, 1992). Bu sonuca göre Bağntı (2.29) eşdeğer kuşatma basıncının hesaplanmasında kullanılmıştır.

$$\sigma_{3e} = \frac{\sigma_{3ey} b_{co} + \sigma_{3ex} h_{co}}{b_{co} + h_{co}} \quad (2.29)$$

Bu bağıntıda Şekil 2.11’de görüleceği gibi σ_{3ey} ve σ_{3ex} kolon çekirdek alanına etkiyen ve sırasıyla b_{co} ve h_{co} kenarlarına dik olarak yayıldığı kabul edilen eşdeğer kuşatma gerilmeleridir. Ayrıca bu bağıntı farklı kuşatma gerilme değerlerine sahip kare kesitli kolon kesitler için de kullanılabilir.



Şekil 2.11 Dikdörtgen kesitlerde kuşatma gerilmelerinin dağılımı (Saatçioğlu ve Razvi, 1992)

Dikdörtgen kesitlerde Bağntı (2.28) ile verilen k_2 azaltma katsayısı her iki yön için de ayrı ayrı hesaplanmalıdır.

$$k_{2x} = 0.26 \sqrt{\left(\frac{h_{co}}{s}\right) \left(\frac{h_{co}}{s_{lx}}\right) \left(\frac{1}{\sigma_{3x}}\right)} \leq 1.0 \quad (2.30)$$

$$k_{2y} = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_{co}}{s}\right) \left(\frac{b_{co}}{s_{ly}}\right) \left(\frac{1}{\sigma_{3y}}\right)} \leq 1.0 \quad (2.31)$$

Bağıntı (2.30) ve Bağntı (2.31)’de verilen s_{ly} ve s_{lx} sırası ile b_{co} ve h_{co} kenarları boyunca yanal olarak desteklenmemiş komşu iki boyuna donatı arasındaki donatı merkezinden donatı merkezine, en büyük mesafedir. Ayrıca σ_{3x} ve σ_{3y} kuşatma gerilmeleri Bağntı (2.26) kullanılarak,

$$\sigma_{3x} = \frac{\sum A_{shx} f_{yh} \sin \alpha_1}{s h_{co}} \quad (2.32)$$

$$\sigma_{3y} = \frac{\sum A_{shy} f_{yh} \sin \alpha_1}{s b_{co}} \quad (2.33)$$

olarak dikkate alınmalıdır. Bağntı (2.32) ve Bağntı (2.33)'deki $\sum A_{shx}$ ve $\sum A_{shy}$ sırası ile x ve y doğrultularındaki toplam kuşatma donatısı kesit alanıdır (Şekil 2.10).

2.3.4 Betondaki en büyük birim kısılma

Kuşatılmamış beton tek eksenli basınç altında gevrek bir davranış göstermektedir. Betonun şekil değiştirme özelliği, beton kesitin kuşatılması ile arttırılabilir. Kuşatılmış beton kuşatılmamış betona göre, eksenel taşıma gücüne daha büyük şekil değiştirme değerinde ulaşır ve bu noktadan sonra dayanımında daha küçük azalma olacak şekilde bir davranış gösterir.

En büyük gerilme değeri kuşatma etkisinin etkinliğine bağlı olarak değişmektedir. Bağntı (2.34)'de verilen ifade daha önceden de belirtildiği gibi Balmer vd., (1949) ve Mander vd., (1988) tarafından da kullanılmıştır. Saatçioğlu ve Razvi (1992) beton modelinde deneysel sonuçlar ile iyi uyum sağladığı vurgulanarak betonda oluşacak en büyük gerilmeye karşılık gelen birim şekil değiştirme değerini hesaplamak için kullanılmıştır. Sonuç olarak ε_1 için etkin yanal kuşatma gerilmesine bağlı olarak

$$\varepsilon_1 = \varepsilon'_c \left(1 + 5 \frac{k_1 \sigma_{3e}}{f'_c} \right) \quad (2.34)$$

verilmiştir. Bu bağntıda ε'_c , kuşatılmamış beton için en büyük gerilme değerine karşılık gelen birim şekil değiştirmesidir. Bu değer en doğru deneysel olarak elde edilmelidir. Ancak, bu tür verilerin olmaması durumunda 0.002 olarak alınması uygundur (Saatçioğlu ve Razvi, 1992).

Kuşatılmış betonun en büyük eksenel gerilmeden sonraki şekil değiştirme özelliği boyuna donatının yük altındaki davranışından önemli ölçüde etkilenir. Boyuna donatılar betonun içinde burkulmaya karşı tutulurlar. Fakat, kaplama betonunun boyuna doğrultuda etkiyen yük altında dökülmesi sonucunda, boyuna donatılar burkulmaya eğimli bir hale gelirler. Bu durumda kuşatma donatısının varlığı daha da önem kazanır. Eğer kuşatma donatısının miktarı,

boyuna donatının yanıl desteklenmemiş boyuna da bağılı olarak yeterli ise boyuna donatıların burkulması önlenmiş olur (Saatçioğlu ve Razvi, 1992). Böylece, kesitteki kuşatma donatısı miktarı ρ_s , kuşatılmış betonun en büyük gerilme değeriinden sonraki davranışı üzerinde önemli bir etken olduğu vurgulanmıştır. Deneysel verilerin regresyon değeriendirmesi sonucunda kuşatılmış betonun, dayanımının %85'ine ulaştığı andaki birim şekil değeriştirme için aşağıdaki ifade verilmektedir.

$$\varepsilon_{85} = 260 \rho_s \varepsilon_1 + \varepsilon_{cu} \quad (2.35)$$

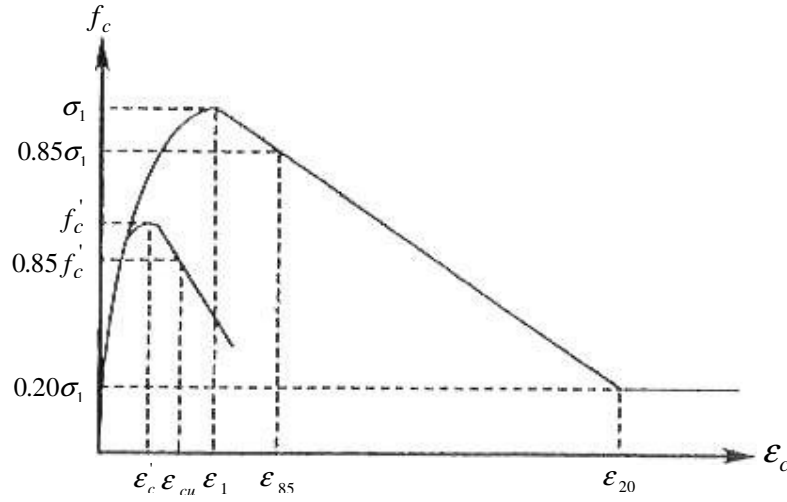
Bu bağıntıda

$$\rho_s = \frac{\sum A_{sh}}{s(b_{co} + h_{co})} \quad (2.36)$$

olarak kuşatma donatısı hacimsel oranı ve ε_{cu} kuşatılmamış betonun en büyük gerilmesinin %85'ine ulaştığı andaki birim şekil değeriştirme değeriidir. Bu değeri en doğru olarak deneysel sonuçlara göre elde edilmelidir. Bu tip verilerin yokluğunda 0,0038 olarak alınabilir. Bağıntı (2.35) kuşatma donatı miktarı %2'den küçük olan kesitlere ait deneysel sonuçlardan elde edilmiş olup %2 değeri Bağıntı (2.35)'in geçerlilik üst sınırı olarak kabul edilebilir (Saatçioğlu ve Razvi, 1992).

2.3.5 Kuşatılmış beton gerilme-birim şekil değeriştirme ilişkisi

Kuşatılmış beton için önerilen gerilme-şekil değeriştirme ilişkisi Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Kuşatılmış beton gerilme-birim şekil değeriştirme ilişkisi, betonun en büyük gerilme değeriine kadar bir eğri ve kabul edilen en büyük birim şekil değeriştirme değeriine kadar da bir doğru ile ifade edilmiştir. Kuşatılmış beton dayanımının %20'sinin sonrası kalıcı dayanım seviyesi olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2.12 Kuşatılmış beton gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi
(Saatçioğlu ve Razvi, 1992)

Gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisinin eğri ile temsil edilen kısmı için aşağıda verilen bağıntı önerilmektedir.

$$f_c = \sigma_1 \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_1} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_1} \right)^2 \right]^{1/(1+2K)} \quad (2.37)$$

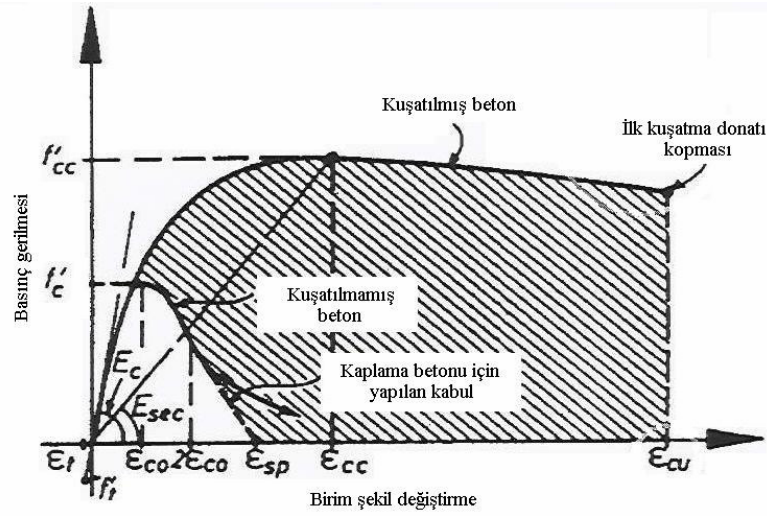
Bu bağıntıda

$$K = \frac{k_1 \sigma_{3e}}{f'_c} \quad (2.38)$$

olarak tanımlanmıştır. Saatçioğlu ve Razvi beton modeli, yanıl kuşatma basıncının sıfır veya ihmal edilebilir bir değerde olması durumunda Hognestad (1951) tarafından önerilen kuşatılmamış beton modeli haline gelmektedir (Saatçioğlu ve Razvi, 1992).

Ayrıca, Saatçioğlu ve Razvi (1992) tarafından önerilen bu beton modelinin, eksenel ve eksantrik basınç altındaki kolonlar için yapılan deneysel verilere dayandırılarak, hesapla bulunan sonuçların deneysel sonuçları iyi bir yaklaşımla tahmin edebildiğini vurgulamıştır.

2.4 Mander, Priestly ve Park Modeli



Şekil 2.13 Kuşatılmış ve kuşatılmamış betonun tekil yükleme altındaki gerilme-birim şekil değıştirme modeli (Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., 1988)

Mander vd., dairesel ve dikdörtgen yanal donatıya sahip kuşatılmış beton kesitler için birleştirilmiş σ - ϵ yaklaşımını önermişlerdir. Şekil 2.13'de gösterilen model Popovics tarafından 1973 yılında önerilmiştir. Statik ve monotonik yükleme için beton basınç gerilmesi f_c şu şekilde hesaplanır:

$$f_c = \frac{f'_{cc} \cdot x \cdot r}{r - 1 + x^r} \quad (2.39)$$

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \quad (2.40)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (2.41)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (2.42)$$

$$E_c = 5000 \sqrt{f'_{co}} \text{ MPa} \quad (2.43)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} \quad (2.44)$$

f'_{cc} : Kuşatılmış betonun basınç mukavemeti,

ε_c : Beton birim deformasyonu,

ε_{co} : Kuşatılmamış betonda tasarım mukavemetindeki birim şekil değiştirme değeri (0.002),

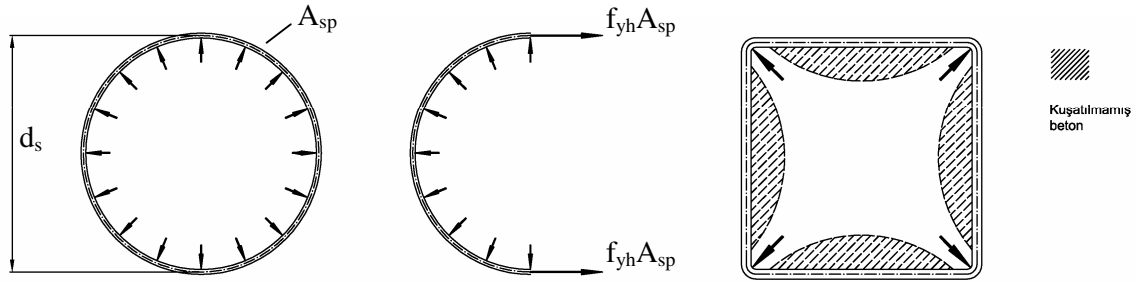
E_c : Beton elastisite modülüdür.

Örtü betonun davranışını belirlemek için, ε_c nin $2\varepsilon_{co}$ dan büyük olduğu noktadan, kırılma noktasına (ε_{sp}) kadar inen düz bir çizgi çekmek uygun olacaktır.

Şekil 2.9'da görüldüğü gibi fretler ve dairesel etriyeler, geometrik özelliğinden dolayı aksel basınç altında beton genişlerken çekme etkisinde kalırlar ve bu durum çevreledikleri beton kesit üzerinde sürekli bir çizgisel kuşatma yükü oluşturur. Betona etkiyen maksimum etkin yanal basınç değerini (σ_3), kuşatma donatısı kendi akma mukavemeti f_{yh} 'a ulaştığı zaman alır. Bu değer,

$$\sigma_3 = \frac{2f_{yh}A_{sp}}{d_s s} \quad (2.45)$$

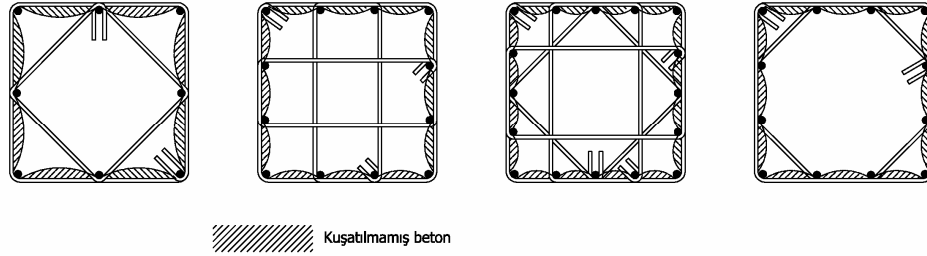
eşitliği ile bulunur. Burada d_s çekirdek çapı, A_{sp} kuşatma donatısı kesit alanı, s sargı adımıdır.



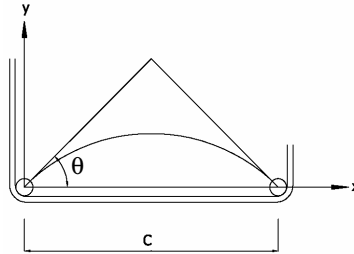
Şekil 2.14 Yanal kuşatma basıncı (Whittaker A., 2003)

Genişleyen beton, yanal donatıyı kenarlardan dışarı doğru açmaya zorlayacaktır. Fretler etriyelere göre daha sürekli ve etkin bir kuşatma etkisi yaratmaktadırlar. Sargının dikdörtgen olduğu durumlarda eğilme şekil değiştirmesi hakimdir. Bu nedenle köşelerde sargı etkisi belirginken bu etki, sargı donatısının ve çirozlar arası mesafenin ortasına yaklaşıldıkça azalmaktadır. Dikdörtgen sargı donatısının kullanıldığı durumlarda betona uygulanan basınç düzgün yayılı değildir ve bundan dolayı, büyük şekil değiştirmelerde örtü betonu düştükten sonra çekirdek betonun bazı kısımları yük taşımakta daha az etkin olmaktadır. Etriyelerin etkinliği çirozların kullanılması ile arttırılabilir.

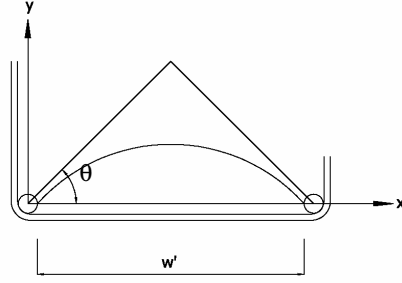
Çeşitli donatı konfigürasyonlarına sahip kolon kesitlerinde kuşatma etkisinin azaldığı beton alanları Şekil 2.15’de gösterilmiştir. Boyuna donatıların artmasıyla betondaki etkin olmayan alanların azaldığı görülmektedir. Taralı olmayan alanlarda gerilmelerin düzgün olarak yayıldığı kabul edilebilir. Etkin olarak çalışmayan beton kesit alanı Şekil 2.16’da görüldüğü gibi tahmin edilebilir. Mander modelinde, Sheikh ve Üzümeri modelindeki yaklaşıma benzer olarak, Şekil 2.17’de de görüldüğü gibi, donatı çubuklarından çizilen teğetler ve eğriler ile etkin ve etkin olmayan kesit sınırları belirlenmiştir (Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., 1988). Bu eğri bir üçgen ile başlangıç eğimi θ olan ikinci derece parabol arasında düşünülebilir. θ açısının 45° ’ye yakın olduğu gözlenmiştir.



Şekil 2.15 Yanal donatı seviyesinde kuşatılmamış beton alanları
(Sheikh S. A. ve Uzumeri S. M., 1982)



Şekil 2.16 Kuşatılmamış beton alanının elde edilişi için yapılan kabul
(Sheikh S. A. ve Uzumeri S. M., 1982)



Şekil 2.17 Mander beton modelinde kuşatılmamış beton alanı elde edilişi için yapılan kabul

Kuşatma donatı seviyesinde etkin olarak kuşatılmış beton çekirdek alanı; taralı alan için yapılan kabule bağlı olarak, Eşitlik (2.46)'daki α katsayısının üçgen için 4'e veya parabol için 6'ya eşit alınmasıyla hesaplanabilir (Sheikh S. A. ve Uzumeri S. M., 1982).

$$A_{et} = A_{co} - \sum_{i=1}^n \frac{C_i^2}{\alpha} \quad (2.46)$$

Burada A_{co} en dış kuşatma donatısının kapadığı beton çekirdek alanı, n parabol veya üçgen sayısı ve C ise en dış kuşatma donatısı merkezleri arasındaki mesafedir (Şekil 2.11, Şekil 2.17). Eğer λ , etkin olarak kuşatılmış beton alanı A_{et} 'nin çekirdek beton alanı A_{co} 'a oranı olarak tanımlanır ise bu katsayı

$$\lambda = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n C_i^2}{\alpha A_{co}} \quad (2.47)$$

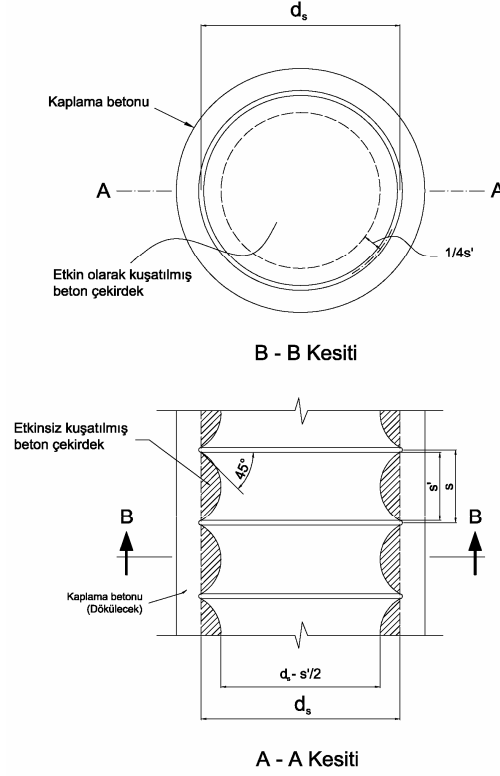
olarak yazılır.

Ayrıca kolon eleman boyunca yanal kuşatma donatısı aralığının artması ile birlikte bu doğrultuda etkin kuşatma gerilmesinde azalma meydana gelir. Şekil 2.18'deki taralı alanlar düşey kolon kesiti boyunca etkin olarak kuşatılmamış beton alanlarını temsil etmektedir. Kolon eleman boyunca hem düşey hem de yatay doğrultuda etkin olarak kuşatılmış ve kuşatılmamış beton alanlarının ikinci derece eğri ile birbirlerinden ayrıldığı kabul edilmiştir. Bu kabul için, seçilen eğrinin şeklinin pek bir önemi yoktur. Bir kolonun taşıma gücünü iki kuşatma donatısı arasında kalan en küçük beton kesit alanı belirlemektedir. Kolon yüksekliği boyunca yerleştirilen yanal donatılar arası mesafenin artması daha küçük etkin beton kesit anlamına gelir. Ancak etkin olarak kuşatılmış beton kesit alanını kesin olarak hesaplamamanın çok zor olduğu açıktır.

Buna rağmen bu alan aşağıdaki basit alan bağıntısı ile dikkate alınabilir:

$$A_{co} = B.H \quad (2.48)$$

$$A_{et} = \lambda.A_{co} \quad (2.49)$$



Şekil 2.18 Fretli donatılı kesitlerde etkin olarak kuşatılmış çekirdek
(Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., 1988)

Şekil 2.19'da B ve H değerleri, dikdörtgen kesitli kolonlarda birbirine dik iki doğrultudaki en dış kuşatma donatısı merkezleri arasında kalan mesafeler olarak ifade edilmiştir. Kuşatma donatı seviyesindeki çekirdek alanı A_{co} 'da yapılacak azaltma ihmal edilirse, iki kuşatma donatısı arasındaki etkin olarak kuşatılmış alan

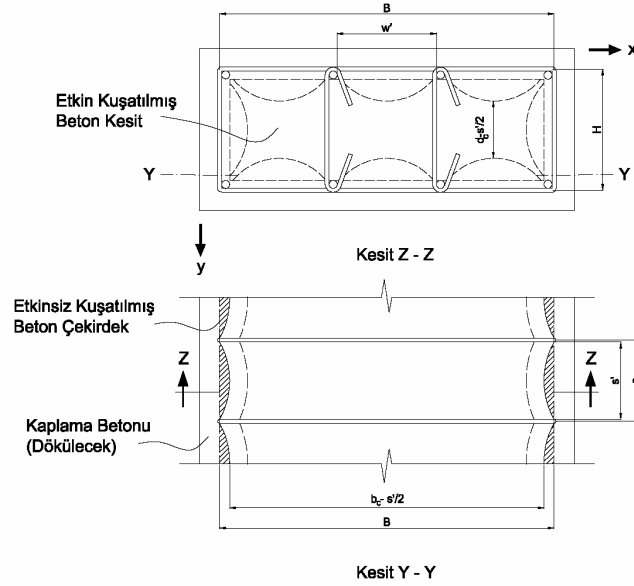
$$(B - 2y_m) \cdot (H - 2y_m) \quad (2.50)$$

olarak ifade edilir. Sonuç olarak etkin kuşatılmış alan,

$$A_{et} = \lambda (B - 2y_m) (H - 2y_m) \quad (2.51)$$

olarak bulunur. Kuşatma donatı sıraları arasındaki düşey mesafenin yarısı y 'nin en büyük

değeri olarak $y_m = 0,25s \tan \theta$ 'dır (Şekil 2.18).



Şekil 2.19 Etriyeli kuşatma donatılı kesitlerde etkin kuşatılmış beton çekirdek alanı
(Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., 1988)

Böylece etkin kuşatılmış beton kesit alanı, çekirdek alanına bağlı olarak

$$A_{et} = \lambda (B - 0,5s \tan \theta) (H - 0,5s \tan \theta) \quad (2.52)$$

elde edilir.

Bağıntı (2.47), bağıntı (2.52)'de yerine yazılır ise;

$$A_{et} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n C_i^2}{\alpha A_{co}} \right) (B - 0,5s \tan \theta) (H - 0,5s \tan \theta) \quad (2.53)$$

olarak bulunur (Sheikh S. A. ve Uzumeri S. M., 1982). Boyuna donatı yerleşiminin her iki yönde de eşit olarak dağıtıldığı bir kesitte bir önceki eşitlik

$$A_{et} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n C_i^2}{\alpha A_{co}} \right) (B - 0,5s \tan \theta)^2 \quad (2.54)$$

haline gelir.

2.4.1 Etkin kuşatma gerilmesi ve kuşatma etkinlik katsayısı

Etkin olmayan kuşatılmış beton alanı, kuşatma donatısının orta kısımlarına gittikçe artar. Sonuçta orta seviyedeki etkin kuşatılmış beton alanı, A_{et} giderek küçülecektir. Bu gerçeğin yansıtılabilmesi için etkin kuşatma yanal gerilmesi

$$\sigma_3' = \sigma_3 k_e \quad (2.55)$$

olarak dikkate alınmıştır. Burada σ_3 , kuşatılmış beton çekirdeğe etkiyen düzgün doğrusal olarak yayılı kuşatma gerilmesi,

$$k_e = \frac{A_{et}}{A_{co}} \quad (2.56)$$

kuşatma etkinlik katsayısı, A_{et} etkin kuşatılmış beton kesit alanı,

$$A_{co}' = A_{co} (1 - \rho_{co}) \quad (2.57)$$

beton çekirdek alanı ve ρ_{co} ise boyuna donatı alanının beton çekirdek alanına oranıdır.

2.4.1.1 Fretli ve spiralli kuşatma donatılı kesitler için kuşatma etkinlik katsayısı

Mander vd., modellerinde kuşatma donatısının tutma etkisinin gelişimi Şekil 2.17'de görüleceği gibi başlangıç eğimi 45° olan ikinci derece bir eğri olarak kabul edip, iki kuşatma donatısının orta seviyesindeki etkin kuşatılmış beton kesitin alanı A_{et} 'yi aşağıdaki gibi ifade etmişlerdir.

$$A_{et} = \frac{\pi}{4} \left(d_s - \frac{s'}{2} \right)^2 \quad (2.58)$$

Burada s' kuşatma donatıları arasındaki temiz mesafe ve d_s kuşatma donatısının merkezine göre çapıdır. Ayrıca beton çekirdek alanı

$$A_{co}' = \frac{\pi}{4} d_s^2 (1 - \rho_{co}) \quad (2.59)$$

ile elde edilebilir. Böylece Eşitlik (2.56)'da yukarıda belirtilen değişkenler yerine yazılır ise fretli donatılı kesitler için kuşatma etkinlik katsayısı,

$$k_e = \frac{\left(d_s - \frac{s'}{2d_s}\right)^2}{1 - \rho_{co}} \quad (2.60)$$

olarak bulunur. Benzer olarak spiral donatılı kesitler için de

$$k_e = \frac{1 - \frac{s'}{2d_s}}{1 - \rho_{co}} \quad (2.61)$$

eşitliği ile elde edilebilir.

Yanal kuşatma basıncı Eşitlik (2.45) ile daha önce ifade edilmişti. Eğer ρ_s kuşatma donatısı hacminin kuşatılmış beton çekirdek hacmine oranı olarak tanımlanırsa

$$\rho_s = \frac{A_{sp} \pi d_s}{\frac{\pi}{4} d_s^2 s} \quad (2.62)$$

ve Eşitlik (2.62), Eşitlik (2.45)'de yerine yazılır ise, yanal kuşatma gerilmesi

$$\sigma_3 = \frac{1}{2} \rho_s f_{yh} \quad (2.63)$$

elde edilir. Böylece kuşatılmış betona etkiyecek etkin kuşatma gerilmesi

$$\sigma'_3 = \frac{1}{2} k_e \rho_s f_{yh} \quad (2.64)$$

elde edilir. Bu eşitlikte k_e değişkeni Eşitlik (2.60) veya Eşitlik (2.61)'den alınmalıdır.

2.4.1.2 Dikdörtgensel kuşatma donatılı kesitler için kuşatma etkinlik katsayısı

Şekil 2.18'de kuşatma donatısı tutma etkisinin beton yüzey üzerindeki dağılımı, başlangıç eğimi 45° olan ikinci derece bir eğri ile ifade edilmiştir. Kuşatma donatısının tutma etkisi düşeyde yanal donatılar arasında ve yatayda da boyuna donatılar arasında oluşmaktadır. Yanal kuşatma donatı seviyesindeki etkin olarak kuşatılmış kesit alanı, ikinci derece eğriler ile ifade edilmiş olan etkin olmayan kuşatılmış kesit alanlarının çıkartılması ile bulunur.

Etkin olmayan kuşatılmış kesit alanlarının toplam değeri, betonarme kesitte bulunan n adet boyuna donatı sayısına göre,

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{w_i^2}{6} \quad (2.65)$$

olur. Daha önceden de Eşitlik (2.53)'de ifade edilmiş olan iki kuşatma donatısının orta noktasındaki etkili kuşatılmış beton çekirdek alanı;

$$A = \left(b_c d_c - \sum_{i=1}^n \frac{w_i^2}{6} \right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c} \right) \quad (2.66)$$

Burada b_c ve d_c yanal donatı ağırlık merkezinden itibaren çekirdek betonun x ve y doğrultusundaki uzunluklarıdır. Kuşatma etkinlik katsayısı dikdörtgensel yanal kuşatma donatılı kesitler için;

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{w_i^2}{6BH} \right) (B - 0,5s') (H - 0,5s')}{(1 - \rho_{co})} \quad (2.67)$$

olarak elde edilir. Dikdörtgen betonarme kesitlerde her iki yönde farklı miktarda kuşatma donatısı olabilir. Bu durumda her iki yöndeki etkin kuşatma gerilmesini ifade etmek için

$$\rho_x = \frac{A_{sx}}{sd_c} \quad (2.68)$$

ve

$$\rho_y = \frac{A_{sy}}{sd_c} \quad (2.69)$$

kullanılır. x ve y yönlerindeki kuşatma donatı miktarları tanımlanarak bu yönlerdeki beton yüzeylerine etkiyecek kuşatma gerilmeleri sırasıyla x yönünde

$$\sigma_{3x} = \frac{A_{sx}}{sH} f_{yh} = \rho_x f_{yh} \quad (2.70)$$

ve y yönünde

$$\sigma_{3y} = \frac{A_{sy}}{sB} f_{yh} = \rho_y f_{yh} \quad (2.71)$$

eşitlikleri ile bulunur. Böylece Eşitlik (2.55)'den her iki yöndeki etkin kuşatma gerilmeleri sırası ile,

$$\sigma'_{3x} = k_e \rho_x f_{yh} \quad (2.72)$$

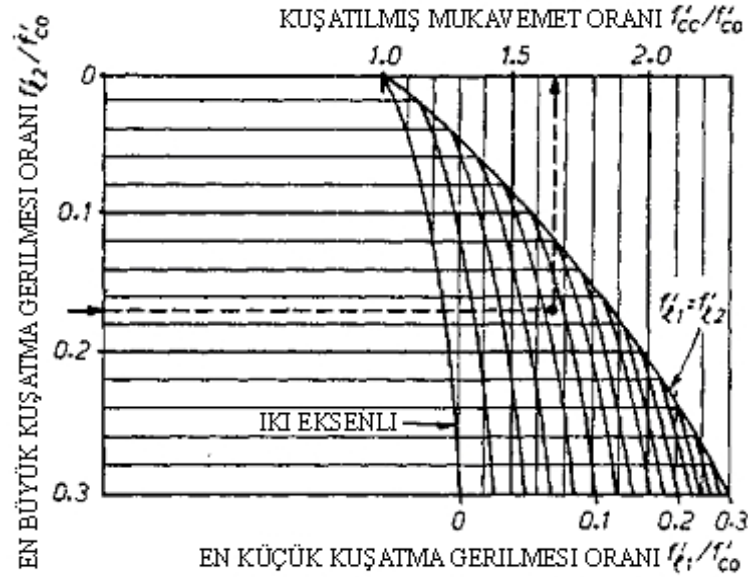
ve

$$\sigma'_{3y} = k_e \rho_y f_{yh} \quad (2.73)$$

olarak elde edilmiş olur (Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., 1988).

2.4.2 Kuşatılmış beton taşıma gücü

Kuşatılmış betonun taşıma gücünü bulmak için, beş değişkenli, çok eksenli, kırılma yüzeyinin tanımlandığı, üç eksenli deney verileri ile çok iyi uyum sağlayan, William ve Warnke modeli kullanılmıştır.



Şekil 2.20 Kuşatılmış dikdörtgen kesitler için yanal kuşatma gerilmelerinden elde edilen dayanım değerleri (Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., 1988)

Şekil 2.20'de çok eksenli kırılma kriterinin genel çözümü, iki yanal kuşatma etkisiyle tanımlanmıştır. Kuşatılmış çekirdek beton, eşit etkin yanal kuşatma gerilmesiyle f'_l üç eksenli basınca maruz bırakıldığında, kuşatılmış beton mukavemeti;

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1,254 + 2,254 \sqrt{1 + \frac{7,94 f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}} \right) \quad (2.74)$$

ile ifade edilmektedir.

2.4.3 Betondaki en büyük birim kısalma

Eğilmeye çalışan betonarme elemanlarda meydana gelecek plastik mafsalların en büyük dönme kapasitelerini hesaplayabilmek için, betonun en büyük birim kısalması ϵ_{ccu} değerini tahmin etmek gerekir (Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., 1988). Betondaki en büyük birim şekil değiştirme değeri ϵ_{ccu} enine donatıda oluşan ilk kopma anındaki değerdir.

Bu çalışmada, betondaki en büyük birim şekil değiştirmesi ϵ_{ccu} için Priestley (2000) tarafından önerilen ve Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., (1988) tarafından yapılan deneysel verilerden okunan ϵ_{ccu} değerleri ile de iyi bir uygunluk gösteren

$$\epsilon_{ccu} = 0,004 + 1.4 \frac{\rho_s f_{yh} \epsilon_{su}}{f_{cc}} \quad (2.75)$$

bağıntısı dikkate alınmıştır.

Burada,

ρ_s : Hacimsel donatı oranı,

f_{yh} : Yanal donatı akma gerilmesi,

ϵ_{su} : Maksimum gerilmedeki donatı birim şekil değiştirmesidir.

3. BETON VE ÇELİK İÇİN AKMA/KIRILMA YÜZEYLERİ VE KRİTERLERİ

3.1 Gerilme Hali

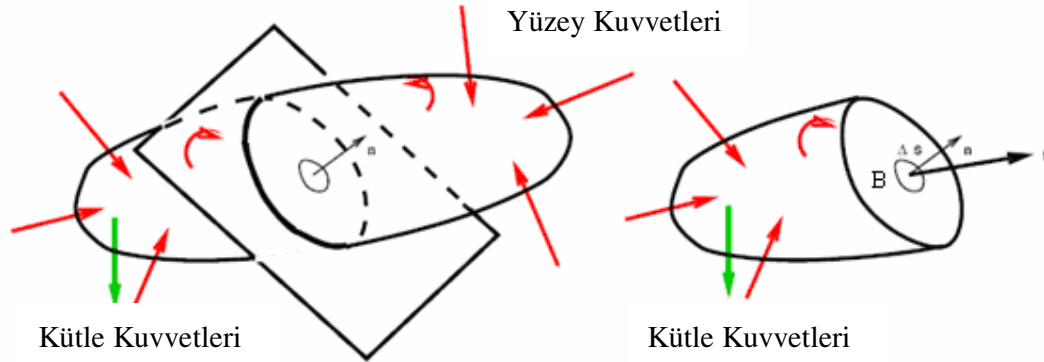
Malzeme üzerinde gözönüne alınması gereken kuvvetler ikiye ayrılır. Bunlar iç ve dış kuvvetlerdir.

Dış kuvvetler de kütle ve yüzey kuvvetleri olmak üzere ikiye ayrılır. Şekil 3.1'deki gibi düzlem boyunca, dış kuvvetlerin etkisi altında bulunan dengedeki bir malzemeyi keselim.

Herhangi bir kesit üzerindeki birim alana etkiyen kuvvet, gerilme olarak ifade edilir.

Bu tanım gereği, yüzey alanı ΔS olan Şekil 3.1'de B noktasındaki elemana etkiyen kuvvet f ise, B noktasındaki gerilme vektörü aşağıdaki şekilde tanımlanır;

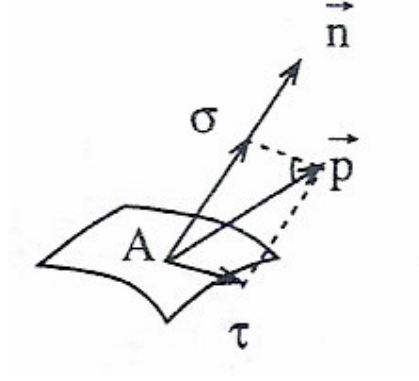
$$t = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{f}{\Delta S} \quad (3.1)$$



Şekil 3.1 Düzlemdeki kesitte ΔS alanı üzerinde normali n olan f yüzey kuvvetleri [1]

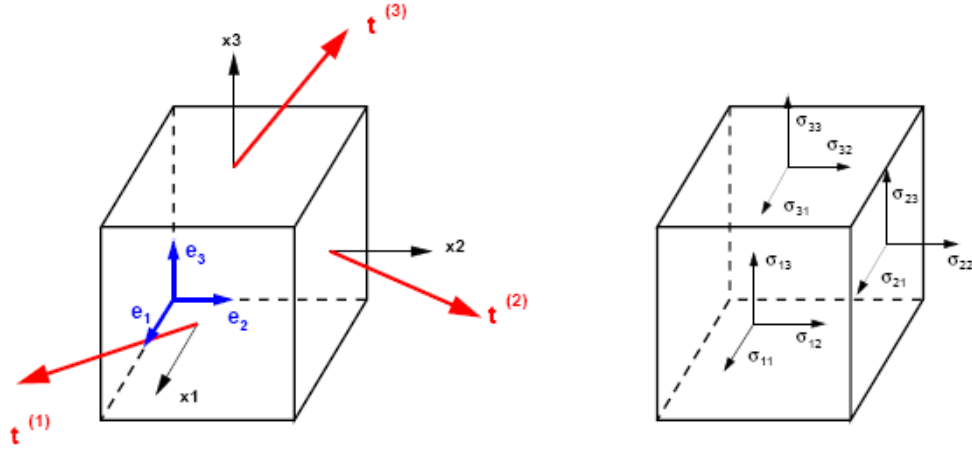
Gerilme vektörü bulunduğu yüzeye dik olmayabilir (Şekil 3.2). Bu vektör kesite ait biri normal doğrultuya paralel diğeri yüzeyin teğet düzlemi içinde olmak üzere iki bileşene ayrılabilir. Kesit yüzeyine dik olan gerilme bileşenine, normal gerilme; yüzeyin teğet düzlemi içinde bulunan gerilme bileşenine ise kayma gerilmesi adı verilir.

Eğik kesite ait gerilme vektörü yüzeyin normali ile çakışırsa kayma gerilmesi $\tau=0$ olur. Bu duruma ait gerilmeye asal gerilme adı verilir.



Şekil 3.2 Gerilme vektörü (M. Bakioğlu vd., 1995)

B noktasındaki gerilme halinin ifade edilebilmesi için üç vektörel veya bunları ifade eden dokuz skaler büyüklüğe ihtiyaç vardır. Bu bağlamda, B noktasındaki gerilme hali ikinci dereceden bir tensör ile gösterilir. Şekil 3.3'deki gerilme haline ait dokuz bileşen gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Gerilme bileşenleri [1]

Matris formda bu bileşenler yazılırsa,

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$\sigma_{12} = \tau_{xy}$, $\sigma_{13} = \tau_{xz}$, $\sigma_{23} = \tau_{yz}$ dir.

Elemanın moment dengesi dikkate alındığında,

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{yz} = \tau_{zy} \text{ dir.}$$

Form yeniden düzenlenirse,

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \vec{t}_1 \\ \vec{t}_2 \\ \vec{t}_3 \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

simetrik tansörü elde edilmiş olur.

t_i ve onun üç bileşenini Şekil 3.3'deki e_i koordinat sisteminde ayırırsak,

$$t^{(i)} = \sigma_{ij} e_j \quad (3.4)$$

$$t^{(1)} = \sigma_{11} \vec{e}_1 + \sigma_{12} \vec{e}_2 + \sigma_{13} \vec{e}_3$$

$$t^{(2)} = \sigma_{21} \vec{e}_1 + \sigma_{22} \vec{e}_2 + \sigma_{23} \vec{e}_3 \quad (3.5)$$

$$t^{(3)} = \sigma_{31} \vec{e}_1 + \sigma_{32} \vec{e}_2 + \sigma_{33} \vec{e}_3$$

olarak bulunur.

t : Gerilme vektörü,

σ_{ij} : Gerilme vektörü bileşeni

e_j : Gerilme yönünü ifade etmektedir.

$$t^{(n)} = n \left(e_1 t^{(1)} + e_2 t^{(2)} + e_3 t^{(3)} \right) \quad (3.6)$$

Parantez içindeki terim, Cauchy gerilme tensörünü ifade etmektedir.

$$\sigma = e_1 t^{(1)} + e_2 t^{(2)} + e_3 t^{(3)} = e_i t^{(i)} \quad (3.7)$$

Dikdörtgen sistemde tansörel bileşeni ifade etmek için bağıntı (3.7)'deki ifadenin düzenlenmesi gerekir.

$$\sigma = e_i \sigma_{ij} e_j \quad (3.8)$$

$$t^{(n)} = n * \sigma$$

veya

$$t^{(n)} = n * \sigma_{ij} e_i e_j = \sigma_{ij} (n * e_i) e_j = (\sigma_{ij} n_i) e_j \quad (3.9)$$

$$t_j = \sigma_{ij} n_i \quad (3.10)$$

$$\sigma_{ij} n_j = \sigma n_i \quad (3.11)$$

(3.11) bağıntısı aşağıdaki üç denklemi ifade etmektedir.

$$\sigma_{11} n_1 + \sigma_{12} n_2 + \sigma_{13} n_3 = \sigma n_1$$

$$\sigma_{21} n_1 + \sigma_{22} n_2 + \sigma_{23} n_3 = \sigma n_2 \quad (3.12)$$

$$\sigma_{31} n_1 + \sigma_{32} n_2 + \sigma_{33} n_3 = \sigma n_3$$

veya Von Karman'ın notasyonunda yazılırsa,

$$(\sigma_x - \sigma) n_x + \tau_{xy} n_y + \tau_{xz} n_z = 0$$

$$\tau_{yx} n_x + (\sigma_y - \sigma) n_y + \tau_{yz} n_z = 0 \quad (3.13)$$

$$\tau_{zx} n_x + \tau_{zy} n_y + (\sigma_z - \sigma) n_z = 0$$

σ değerlerinin bulunabilmesi için katsayılar determinantının sıfıra eşit olması gerekir.

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma \end{vmatrix} = 0 \quad (3.14)$$

Yukarıdaki determinantın çözümden üç kök bulunur. Bunlar sırasıyla σ_1 , σ_2 ve σ_3 'tür.

Kısaltılmış notasyonda (3.13) ve (3.14) bağıntıları aşağıdaki form halinde yazılırsa,

$$(\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}) n_j = 0 \quad (3.15)$$

$$\text{ve } |\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}| = 0 \quad (3.16)$$

(3.14) bağıntısı açıldığı zaman aşağıdaki denklem ortaya çıkar.

$$\sigma^3 - I_1 \sigma^2 + I_2 \sigma - I_3 = 0 \quad (3.17)$$

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (3.18)$$

$$I_2 = \begin{vmatrix} \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{13} \\ \sigma_{31} & \sigma_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{vmatrix}$$

$$I_2 = \begin{vmatrix} \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xz} \\ \tau_{zx} & \sigma_z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{vmatrix} \quad (3.19)$$

$$I_3 = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} \quad (3.20)$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$I_2 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1 \quad (3.21)$$

$$I_3 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$$

Deviatorik gerilme (3.22) bağıntısı ile ifade edilir.

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - p \delta_{ij} \quad (3.22)$$

Burada,

p : Hidrostatik gerilme

S_{ij} : Deviatorik gerilme tansörüdür.

$$\delta_{ij} : \text{Kronecker deltası} \left(\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \forall i = j \\ 0, & \forall i \neq j \end{cases} \right)$$

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} (\sigma_{11} - p) & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & (\sigma_{22} - p) & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & (\sigma_{33} - p) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$|S_{ij} - s \delta_{ij}| = 0 \quad (3.24)$$

$$S^3 - J_1 S^2 - J_2 S - J_3 = 0 \quad (3.25)$$

Deviatorik gerilme invaryantları ise aşağıdadır.

$$J_1 = S_{ii} = S_{11} + S_{22} + S_{33} = 0$$

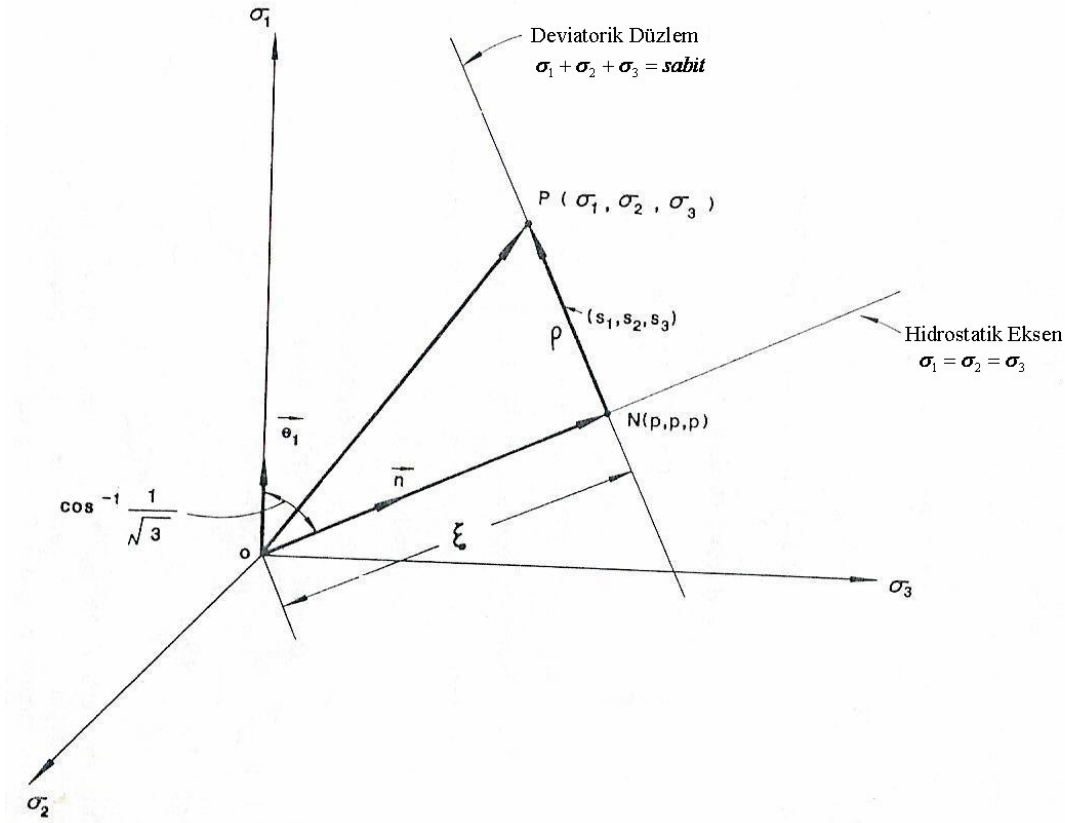
$$J_2 = \frac{1}{6} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] \quad (3.26)$$

$$J_3 = \frac{1}{3} (S_{11}^3 + S_{22}^3 + S_{33}^3) = S_{11} S_{22} S_{33}$$

Burada S_{11} , S_{22} ve S_{33} asal gerilmelerdir.

3.1.1 Haigh-Westergaard gerilme uzayı

Üç boyutlu gerilme uzayındaki bir noktada gerilme durumunu ifade etmek için; σ_1 , σ_2 , σ_3 asal gerilmeleri alınır. Bir ucu orjinden geçen ON doğrusu, koordinat eksenleriyle aynı açığı yapar. Bu doğru üzerindeki her nokta aynı gerilme durumuna sahiptir ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$).



Şekil 3.4 Haigh-Westergaard gerilme uzayı (Chen W. F., Han D. J., 1987)

Bu doğrudan geçen eksen hidrostatik eksen olarak adlandırılır. ON doğrusuna dik olan düzleme de deviatorik düzlem adı verilir. Deviatorik gerilme, $s_1 = \left(\frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{3} \right) = 0$ iken, doğru üzerindeki her nokta hidrostatik gerilme sayılır.

Bu düzlemde,

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sqrt{3}\xi \quad (3.27)$$

ξ : ON normali boyunca orjinden düzleme kadar ölçülen mesafedir.

0 noktasından geçen deviatorik düzleme π düzlemi denir ve

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0 \text{ dır.}$$

OP gerilme vektörü iki bileşene ayrılır. ON bileşeninde birim vektör doğrultusundaki vektör,

$$\vec{n} = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \quad (3.28)$$

Diğer bileşen NP ise ON doğrusuna diktir (π düzlemine paraleldir).

$$|ON| = OP * n = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) * \left(\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \quad (3.29)$$

$$NP = OP - ON \quad (3.30)$$

$$ON = |ON| * n = (p, p, p) \quad (3.31)$$

(3.31) bağıntısını (3.30) bağıntısının içine koyarsak,

$$NP = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) - (p, p, p) = [(\sigma_1 - p), (\sigma_2 - p), (\sigma_3 - p)] \quad (3.32)$$

elde ederiz.

$S_{ij} = \sigma_{ij} - p\delta_{ij}$ denklemini (3.32) bağıntısında kullanarak aşağıdaki bağıntıyı buluruz.

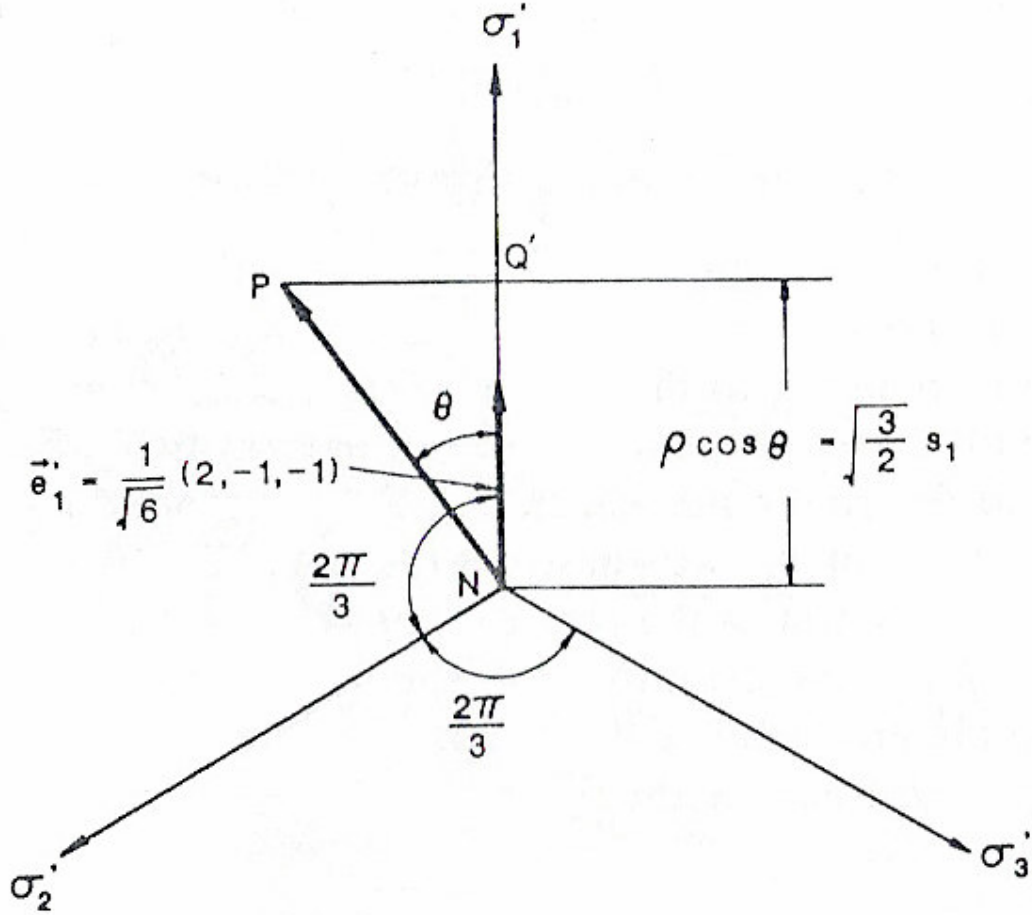
$$NP = (s_1, s_2, s_3) \quad (3.33)$$

NP vektörünün uzunluğu aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir.

$$\rho = |NP| = \sqrt{(s_1^2 + s_2^2 + s_3^2)} = \sqrt{2J_2} \quad (3.34)$$

ON ve NP vektörleri sırasıyla hidrostatik bileşenler, $p\delta_{ij}$ ve deviatorik gerilme bileşenleri (s_{ij})'yi ifade eder. Bu gerilme durumu Şekil 3.4'de gösterilmiştir.

Şekil 3.5'de NP vektörünün ve deviatorik düzlemde σ_i koordinat eksenlerinin izdüşümleri gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Bir noktadaki gerilme halinin deviatorik düzlem üzerinde izdüşümü
(Chen W. F., Han D. J., 1987)

σ_1' eksenine doğrultusundaki e_1' birim vektörünün bileşenleri

$$e_1' = \frac{1}{\sqrt{6}} (2, -1, 1) \quad (3.35)$$

Asal gerilmeler ise aşağıda belirtilen formdadır.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} p \\ p \\ p \end{Bmatrix} + \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{J_2} \begin{Bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{Bmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{Bmatrix} \xi \\ \xi \\ \xi \end{Bmatrix} + \sqrt{\frac{2}{3}} \rho \begin{Bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3.36)$$

3.2 Akma/Kırılma Kriteri Kavramı

Akma kriteri, bileşik gerilmeye maruz bir malzemenin elastik sınırlarını gösteren bir matematiksel bağıntıdır. Basit çekme durumunda elastik limit σ_0 iken, basit kesme deneyinde elastik limit τ_0 olmaktadır. Elastik davranış sınırı veya akma gerilmesi σ_{ij} gerilme durumunun bir fonksiyonu olarak ifade edilir.

Genel olarak herhangi bir akma sınır durumu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir,

$$f(\sigma_{ij}, k_1, k_2, \dots) = 0 \quad (3.11)$$

$k_1, k_2, \dots$ parametreleri, σ_0 ve τ_0 gibi deney sonuçlarına göre belirlenen malzeme sabitleridir.

İzotropik malzemeler için asal gerilmelerin doğrultuları önemsizdir. Bu nedenle akma kriteri, aşağıdaki bağıntıyla ifade edilebilir.

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, k_1, k_2, \dots) = 0 \quad (3.12)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 'ün gerilme sabitleri sırasıyla I_1 , J_2 ve J_3 olan kombinasyonu şeklinde ifade edilebilir;

$$f(I_1, J_2, J_3, k_1, k_2, \dots) = 0 \quad (3.13)$$

I_1 , σ_{ij} gerilme tansörünün (σ_{ij}) ilk invariantı, J_2 ve J_3 ise S_{ij} 'nin ikinci ve üçüncü invariantlarıdır. S_{ij} , deviatorik gerilme tansörüdür. Bu invariantlar Haigh-Westergaard koordinatlarıyla gösterilirse,

$$f(\xi, \rho, \theta, k_1, k_2, \dots) = 0 \quad (3.14)$$

Hidrostatik basınç etkisi olmadığı zaman, metaller için akma fonksiyonu genellikle aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$f(J_2, J_3, k_1, k_2, \dots) = 0 \quad (3.15)$$

Basit çekme etkisi sonucu ortaya çıkan gerilme-şekil değiştirme eğrisi, bileşik gerilme durumu hakkında bir bilgi vermez. Akma yüzeyinin belirlenebilmesi için çok sayıda deney yapılması gerekmektedir.

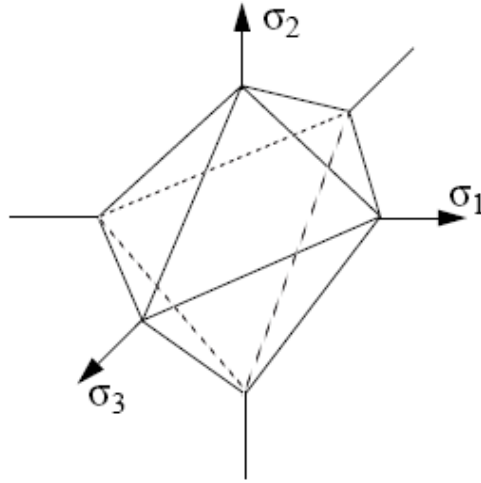
Bu tez çalışmasında sonlu elemanlar analizi programında çelik için kullanılan Von Mises akma kriteri ve beton için kullanılan izotropik hasar modeli açıklanacaktır.

3.2.1 Von Mises akma kriteri

Maksimum kayma gerilmesi kriteri basit olmasına rağmen, orta (ara) asal gerilmelerin $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ etkisini yansıtmaz. Oktahedral kayma gerilmesi veya şekil değiştirme enerjisinin bozulması; basınca maruz kalmayan malzemelerin akmasına neden olur.

Oktahedral gerilme ve şekil değiştirme enerjisi kavramları kısaca özetlenmiştir.

Gerilmedeki her bir asal eksenle eşit açılar yapan düzlemin normaline oktahedral gerilme adı verilir.



Şekil 3.6 Oktahedral gerilmeler [3]

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3} I_1 = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \quad (3.16)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3.17)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]} \quad (3.18)$$

σ_{oct} , oktahedral normal gerilmesini; τ_{oct} ise oktahedral kayma gerilmesini ifade eder.

Şekil değiştirme enerjisi, bir malzemede biçim değiştirmeye neden olan enerjiyi, malzeme sabiti olarak kullanan kriterdir.

Gerilmeyi, şekil değiştirme enerjisinden türetilen bir ifade ile gösterelim.

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \epsilon_{ij}} \quad (3.19)$$

Şekil değiştirme enerjisi ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$W(\epsilon_{ij}) = \frac{1}{2} C_{ijkl} \epsilon_{ij} \epsilon_{kl} \quad (3.20)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (3.21)$$

C_{ijkl} : Elastik malzeme sabitidir.

Şekil değiştirme enerjisini gerilme bileşenleriyle ifade edersek aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$W(\sigma_{ij}) = \frac{1}{2} S_{ijkl} \sigma_{ij} \sigma_{kl} \quad (3.22)$$

Bu duruma çözüm olarak, maksimum kayma gerilmesine uygun bir alternatif olan Von Mises akma kriteridir. Bu kriter, kayma gerilmesi kritik olan k değerine ulaştığı anda akmanın başladığını ifade eder.

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3}} J_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} k \quad (3.23)$$

Basit formda yazılırsa;

$$f(J_2) = J_2 - k^2 = 0 \quad (3.24)$$

elde edilir.

Asal gerilmeler cinsinden yazılırsa;

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 6k^2 \quad (3.25)$$

bağıntısı elde edilir.

k : Kesme kuvveti etkisi altındaki akma gerilmesini göstermektedir.

Tek eksenli gerilme deneyi için; $\sigma_1 = \sigma_0$ ve $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ yazılırsa,

$$k = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (3.26)$$

sonucuna ulaşılır.

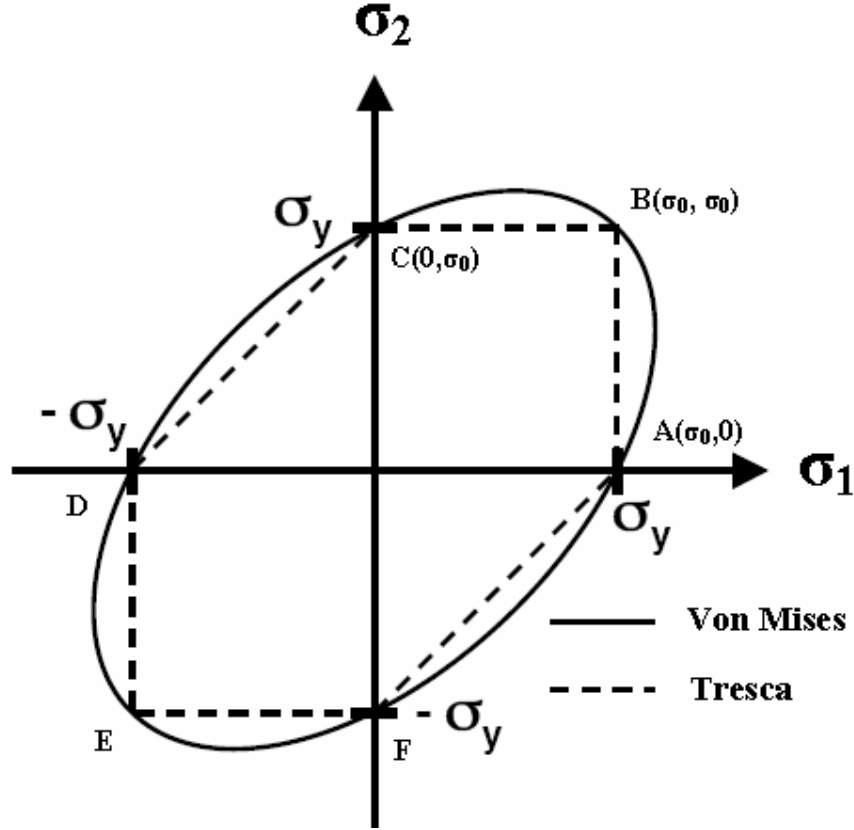
Basınç etkisinden bağımsız izotropik malzemelerin akma kriteri, denklem 3.15'teki genel forma sahip olması gerekir. Bu formda ifade edilebilmesi için en uygun denklem (3.24)'dür.

Bu denklem deviatorik düzlemle kesişen, yarıçapı $\sqrt{2}k$ olan , dairesel bir silindiri temsil eder.

$$\rho = \sqrt{2}k \quad (3.27)$$

İki eksenli gerilme durumunda von Mises kriteri, $\sigma_3 = 0$ koordinat düzlemi ile dairesel silindirin kesişimiyle ifade edilmektedir.

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 = \sigma_0^2 \quad (3.28)$$



Şekil 3.7 Çekme durumunda $\sigma_3=0$ düzleminde akma kriteri

Tresca kriteri ise maksimum kayma gerilmesinin τ_y gerilmesini geçtiği durumda malzemenin aktığını ifade eder.

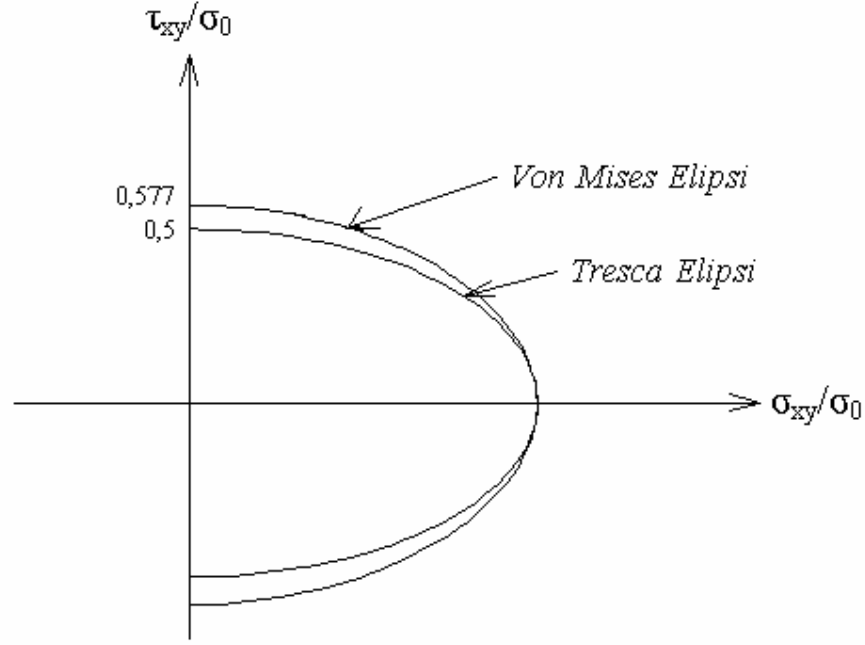
$$\text{Max}\left(\frac{1}{2}|\sigma_1 - \sigma_2|, \frac{1}{2}|\sigma_2 - \sigma_3|, \frac{1}{2}|\sigma_3 - \sigma_1|\right) = k \quad (3.29)$$

Tek eksenli gerilme halinde $\sigma_1 = \sigma_0$ ve $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ olduğundan,

$$k = \frac{\sigma_0}{2}$$

olur.

Şekil 3.6'da bu kesişim gösterilmektedir. Von Mises yüzeyi ile $\sigma_x - \tau_{xy}$ düzleminin kesişimi de bir elipstir (Şekil 3.8) ve;



Şekil 3.8 Akma yüzeyi ile $\sigma_x - \tau_{xy}$ düzleminin kesişimi (Chen W. F., Han D. J., 1987)

$$\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2 = \sigma_0^2 \quad (3.30)$$

olarak ifade edilmektedir.

3.3 İzotropik Hasar Teorisinin Kullanılması ve İrdelenmesi

Betondaki doğrusal davranıştan sapmanın en önemli nedeni; çekme gerilmeleri altında daha döküm aşamasından beri mevcut durumda olan mikro çatlakların gelişmeleri ve ilerlemeleridir. Nihai durumda bunlar birleşerek kırılmaya neden olacak tek bir makro çatlak oluştururlar.

Beton davranışı modelleri kapsamında; 1960 yılından itibaren çatlak gelişimini ifade etmek için çok sayıda çalışma yapılmıştır. 1968 yılında Rashid tarafından ortaya atılan düzgün yayılı çatlak yaklaşımı, 1980'li yılların başına kadar literatürde geniş bir uygulama alanı bulmuştur.

1979 yılının başında Bazant&Cedolin tarafından daha sonra ise 1983 yılında Bazant ve Oh tarafından yapılan çalışmalarda, bu şekildeki analizlerin, seçilen sonlu eleman boyutuna bağlı olacağı gösterilmiştir. Bu bağımlılıktan kurtulmanın başlıca yolunun betonun kırılma enerjisi G_f değerini bir malzeme sabiti olarak kullanmak olduğunu ileri sürmüştür. G_f , birim alandaki çatlak yüzeyinin oluşması için gerekli enerji miktarıdır. Bazant&Oh betondaki temsili zigzag

şeklinde gelişen bir çatlağı tam olarak dikkate almanın mümkün olduğu bir boyut önermişlerdir. Bu ise beton karışımında kullanılan en küçük agrega çapının 2 ile 5 katı arasında bir değerdir.

Kotsovas, 1986 yılında doğrusal olmayan sonlu eleman analizlerinde beton için optimum bir boyut olduğunu ve bunun her agrega çapının yaklaşık 3 katı ile ifade edilebileceğini belirtmiştir. Böyle bir boyut kullanmak analizlerin çözüm etkinliğini ve ekonomisini de sağlamaktadır.

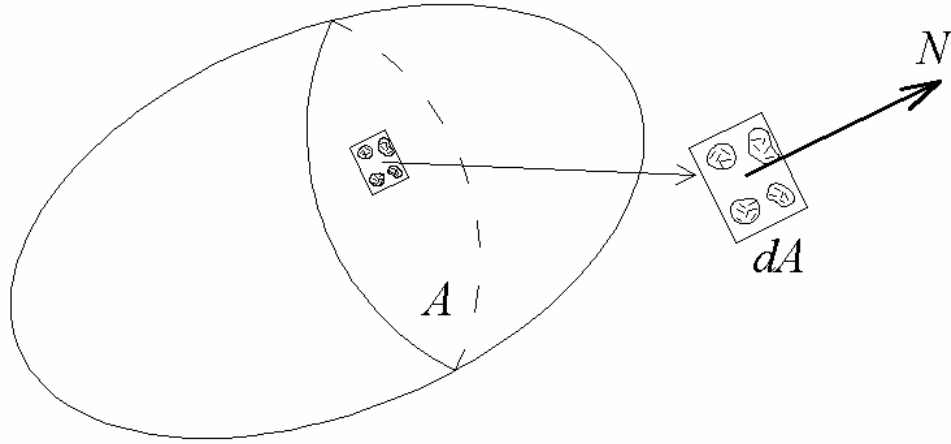
1990'lı yıllarda son derece karmaşık ve deneysel olarak ölçülmesi zor olan G_I , G_{II} , G_{III} parametrelerinin bir arada kullanıldığı kırılma mekaniği yaklaşımları yerine, 1986'da Kachanov tarafından önerilen hasar modelinin beton için kullanılması benimsenir olmuştur.

Hasarın oluşumu sırasında malzemenin mekanik yapısının değişimi (sünme, mikro çatlakların oluşumuyla meydana gelen plastik hasar, yorulma, çelikte pekleşme, kimyasal değişikliklerin yol açtığı hasar, yük altındaki betonda oluşan çatlaklar) genellikle geri döndürülememekte ve bu durum da düzensizliğin artmasına neden olmaktadır (Kachanov, 1986).

Hasarı tanımlamak için kullanılan değişken; skaler bir sayı, bir vektör, ikinci ya da dördüncü dereceden bir tansör olabilir. Skaler hasar değişkeni, malzemede oluşan mikro çatlakların hacimsel değişimine bağlı olduğundan ve uygulamadaki basitliğinden dolayı izotropik hasarı tanımlamada yaygın şekilde kullanılmaktadır (Köksal ve Karakoç, 1999).

İzotropik hasar modellerinde, doğrusal olmayan davranış, tek bir d değişkeniyle tanımlanmıştır. Bu değişken, hasarı, malzemenin sekant rijitliğindeki kayıp olarak ölçer ve 0 ile 1 arasında bir değere sahiptir, $0 \leq d \leq 1$. Şekil 3.9'da normali N olan A alanlı bir kesit gösterilmiştir. Hasar sonucu kesitin belli bir kesimi kırılacaktır. Bu alan kaybını A_d , ve hasarsız durumu da A_0 ile gösterdiğimizizde, hasar şu şekilde tanımlanabilir;

$$d = \frac{A_d}{A_0} \quad (3.31)$$



Şekil 3.9 Hasar sonucu kesitte oluşan boşluklar (Kachanov, 1986)

Malzemedeki rijitlik değişimi, $\sigma - \varepsilon$ düzleminde şekil 3.10'da gösterilmiştir. İzotropik hasar modelleri için bünye denklemi (3.32) bağıntısıyla verilmiştir.

$$\underline{\sigma} = (1 - d) \underline{D}_0 \underline{\varepsilon} \quad (3.32)$$

Burada $\underline{\sigma}$ ve $\underline{\varepsilon}$ sırasıyla gerilme ve birim şekil değiştirme tansörleri, $\underline{D}_0$ ise hasarın olmadığı durumdaki tansördür (Kachanov, 1986). Modelde malzeme rijitliği sadece skaler bir faktörle değiştiğinden izotropi korunmaktadır. Ayrıca denklem elastik ve elastik olmayan parçalara ayrılarak aşağıdaki şekilde de yazılabilir;

$$\underline{\sigma} = (1 - d) \underline{D}_0 \underline{\varepsilon} = \underline{D}_0 \underline{\varepsilon} - d \underline{D}_0 \underline{\varepsilon} = \underline{\sigma}_0 - \underline{\sigma}_i$$

$$\underline{\sigma}_0 = \underline{D}_0 \underline{\varepsilon} \quad (3.33)$$

$$\underline{\sigma}_i = d \underline{\sigma}_0 = d \underline{D}_0 \underline{\varepsilon}$$

Denklem 3.32 ile tanımlanan model, d değeri deformasyonun her aşamasında hesaplanabilirse tamamen kararlıdır. Bu bağlamda aşağıdaki tanımlamalar yapılmalıdır (Oliver vd., 1990);

(a) Birim şekil değiştirme tansörünün ($\underline{\varepsilon}$) ya da alternatif olarak hasarın sıfır olduğu durumdaki gerilme tansörüne ($\underline{\sigma}_0$) ait uygun bir norm olan τ , eşdeğer birim şekil değiştirme olarak adlandırılır ve deformasyonun farklı durumlarını karşılaştırmak için kullanılır. Böylece yükleme, geri yükleme ve yeniden yükleme gibi kavramları tanımlamak uygun olmaktadır.

τ normu, skaler bir fonksiyondur (pozitif değerler alır ve hasarsız durum için sıfır olmalıdır).

(b) Hasar kriteri, $F(\tau, r) \leq 0$ 'ın en genel hali aşağıda verilmiştir;

$$F(\tau^t, r^t) = \tau^t - r^t \leq 0 \quad \forall t \geq 0 \quad (3.34)$$

burada τ^t , (a) maddesinde tanımlanmış norm, r^t , t zamanındaki hasar eşiğidir. r^* başlangıç anındaki değer olarak tanımlanırsa $r^t \geq r^0 = r^*$ olmalıdır. Hasar, τ normu, t zamanındaki hasar eşiği değerine ulaştığı anda meydana gelmektedir. G fonksiyonu uygun bir monotonik skaler fonksiyon olarak alındığında, denklem 3.34'ü aşağıdaki şekilde yazmak daha doğru olacaktır;

$$\bar{F}(\tau^t, r^t) = G(\tau^t) - G(r^t) \leq 0 \quad \forall t \geq 0 \quad (3.35)$$

(c) Hasar eşiği, hasar değişkeni ve iç değişkenlerin değişimi aşağıdaki şekilde gösterilebilir;

$$r^t = \max(r^0, \max \tau^s) \quad 0 \leq s \leq t \quad (3.36)$$

$$d^t = G(r^t) \quad (3.37)$$

Hasar değişimini tanımlayan $M(\tau)$ skaler fonksiyonu monotonik olmalı ve 0 ile 1 arasında değerler almalıdır. Oliver vd. hasar için aşağıdaki fonksiyonu önermişlerdir;

$$M(\tau^t) = 1 - \frac{\tau^*}{\tau^t} \exp \left\{ A \left(1 - \frac{\tau^*}{\tau^t} \right) \right\}; 0 < \tau^* \leq \tau^t \quad (3.38)$$

burada τ^* , başlangıç hasar eşiği değeridir. $\tau(\varepsilon)$ fonksiyonu seçildikten sonra bu değer tek eksenli çekme deneyinden elde edilen sonuçlarla kolaylıkla hesaplanabilmektedir (Oliver vd., 1990);

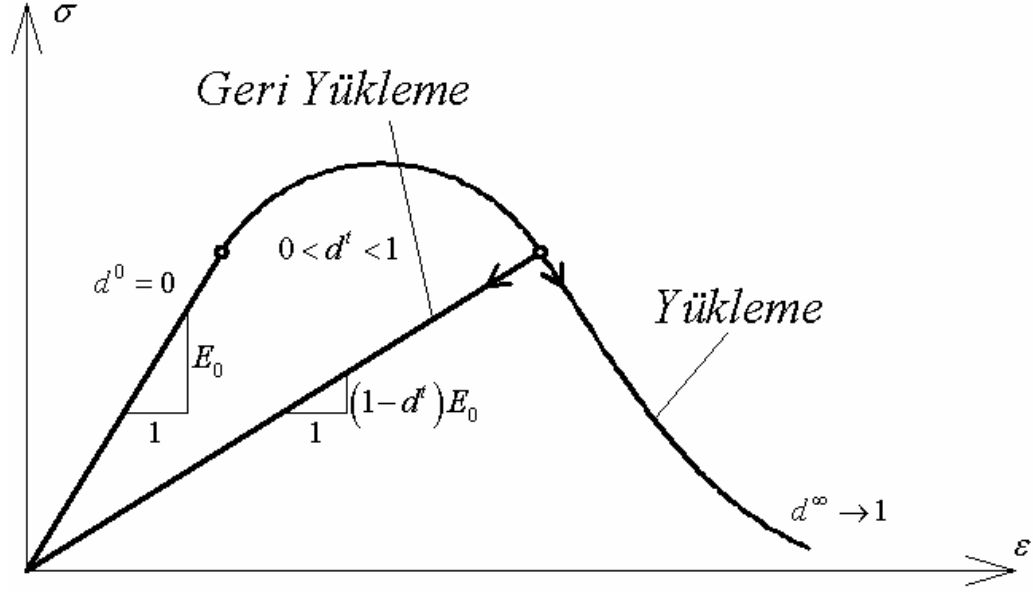
$$\tau^* = \frac{f_t}{\sqrt{E_0}} \quad (3.39)$$

τ^* : Başlangıç hasar eşiği değeri,

f_t : Beton çekme gerilmesidir.

$$f_t = 0,35\sqrt{f_c} \quad (3.40)$$

f_c : Betonun 28 günlük silindirik basınç dayanımıdır.



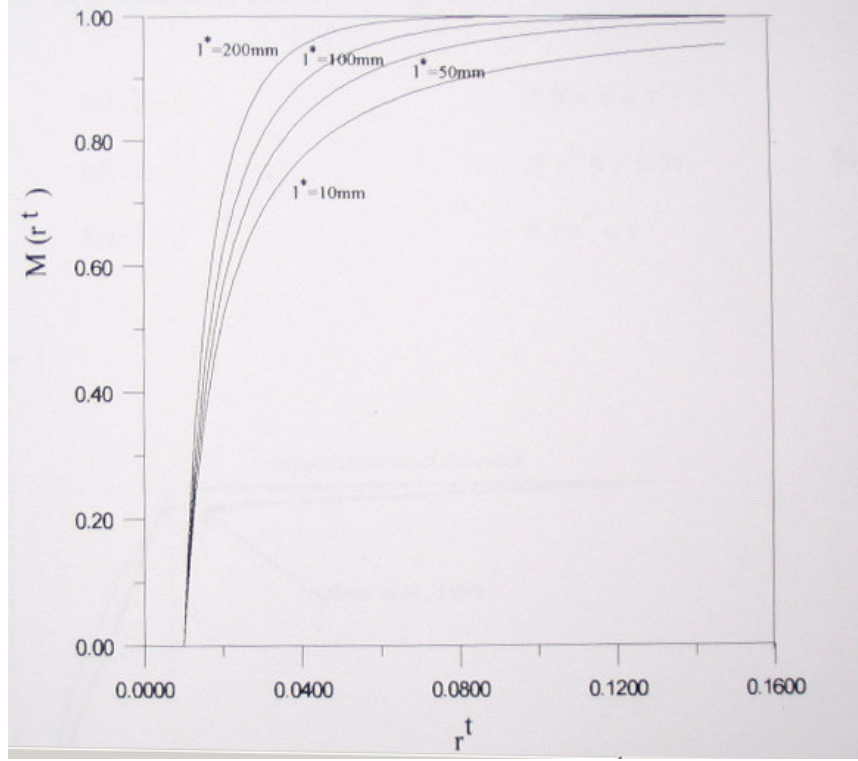
Şekil 3.10 Tek eksenli gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi (Oliver vd., 1990)

Denklem (3.38)'deki A , malzeme parametresi, sonlu elemanlar ağında kullanılan, elemanın maksimum boyutunu dolaylı olarak sınırlayan bir faktördür.

Analiz sonuçlarının boyut etkisine olan bağımlılığından kurtulmak için Oliver vd., 1990 yılında A parametresini ileri sürmüşlerdir.

$$A = \left(\frac{G_f E_0}{l^* (f_t)^2} - \frac{1}{2} \right)^{-1} \geq 0 \quad (3.41)$$

burada l^* , sonlu elemanın karakteristik uzunluğudur ve eleman hacminin küpkökü olarak bulunabilir. A , yine G_f 'e bağlı bir şekilde ifade edilmiştir. Bu modelde hasar gelişim fonksiyonu karakteristik boyut ile değişir bir halde tasarlanmıştır. Küçük elemanda hasarın daha hızlı, büyük elemanlarda ise optimum boyuta göre daha yavaş geliştiği düşünülmüştür.



Şekil 3.11 Farklı eleman boyutları için hasar fonksiyonunun değişimi (Oliver vd.,1990)

(3.38) denklemiyle tanımlanmış hasar fonksiyonu τ 'nın farklı aralıkları için aşağıdaki değerleri alır;

$$M(\tau) = 0 \quad 0 < \tau < \tau^*$$

$$M(\tau) = \frac{1}{4} \left(\frac{\tau}{\tau^*} - 1 \right) \quad \tau^* \leq \tau \leq 5\tau^* \quad (3.42)$$

$$M(\tau) = 1 \quad 5\tau^* < \tau$$

Kırılma enerjisi olarak tanımlanan G_f ise (3.43) bağıntısıyla ele alınmıştır.

$$G_f = 15.5 d_{\max} \frac{f_t^2}{E_0} \quad (3.43)$$

$d_{\max}$, beton karışımındaki maksimum agrega boyutudur.

Bu tez çalışmasında (3.39) denkleminde yer alan başlangıç elastisite modülü, E_0 ;

$$E_0 = 4750\sqrt{f_c} \quad (3.44)$$

olarak ele alınmıştır.

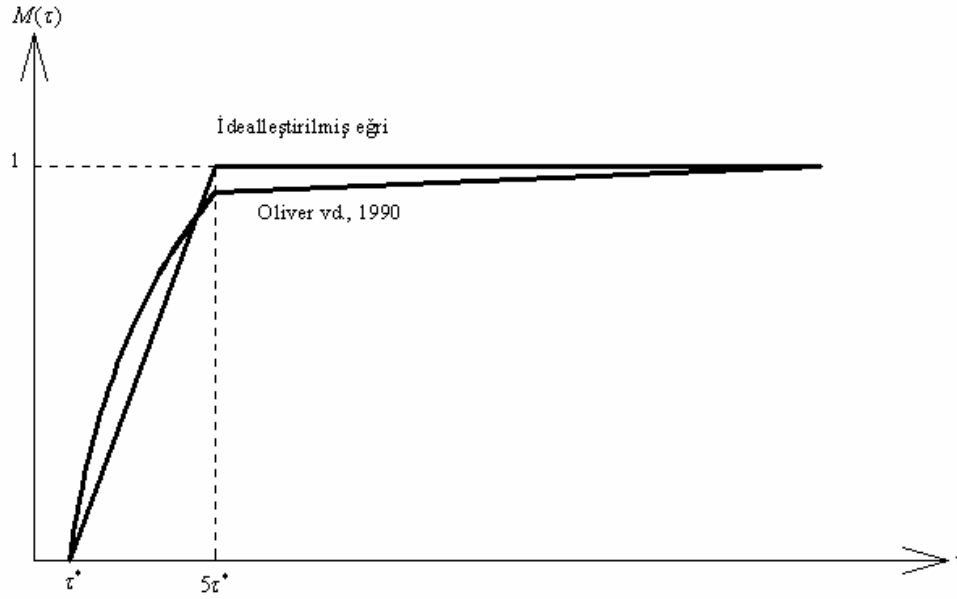
A parametresi ise, Lusas sonlu elemanlar analizi programında Köksal vd., 2004 yılındaki çalışmasında bulunan bağıntı ele alınmıştır.

$$A = \frac{l^*}{310}, \text{ (Köksal vd., 2004)} \quad (3.45)$$

$$l^* = \sqrt[3]{h_x h_y h_z} \quad (3.46)$$

h_x , h_y ve h_z , eleman boyutlarıdır.

Optimum boyut, Köksal (1998) tarafından bilineer bir ilişkiyle ileri sürülmüştür (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Hasar oranını belirlemek için kullanılan M fonksiyonu (Köksal, 1998)

4. SONLU ELEMANLAR METODU

Kendine daha geniş bir uygulama alanı bulan sonlu elemanlar yöntemi, inşaat mühendisliğindeki problemlerin çözümü için oldukça sık kullanılır. Sonlu elemanlar yöntemi, çözüm aranan sistemi elemanlara bölerek işlem yapar. Sistem sonlu sayıda elemana ayrılabilir veya tek parça olarak da düşünülebilir. Lineer elastik analizlerde ayrılan eleman sayısı ne kadar artarsa, gerçek sonuca daha çok yaklaşılmakta fakat problemin çözüm süresi uzamaktadır. Ayrılan her bir elemana sonlu eleman denir ve birleştikleri köşe noktaları düğüm noktalarını oluşturur. Eleman düğüm noktalarındaki aranan büyüklüklerin sayısal değerleri düğüm noktası serbestlikleri olarak tanımlanır. Elemanın yer değiştirme şeklini tanımlayan fonksiyonlara şekil fonksiyonu adı verilir.

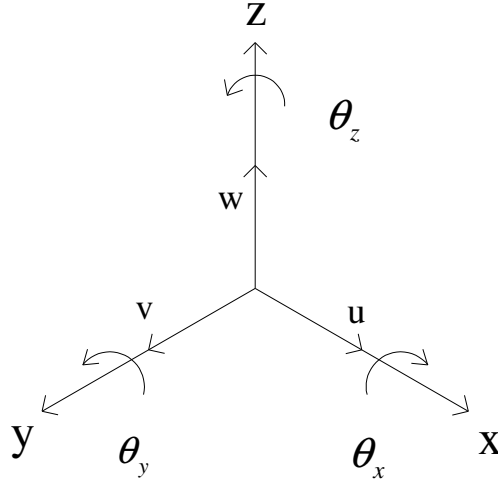
Sonlu elemanlar metodu geometrik ve malzeme olarak doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlere, statik ve dinamik problemlere de uygulanabilmektedir. Ayrıca sınır şartlarının ve yükün doğrusal olmadığı durumlar için de uygundur. Seçilen her bir elemanın düzgün ve simetrik olması çözümü hızlandırır.

4.1 Yer Değiştirme ve Şekil Değiştirme Bağlılıkları

Yer değiştirme bileşenleri, öteleme ve dönme tipi olarak ikiye ayrılır.

Öteleme tipi: u , v , w .

Dönme tipi: θ_x , θ_y , θ_z .



Şekil 4.1 Öteleme ve dönme bileşenlerinin koordinat ekseninde gösterimi
(T. Köksal, 1995)

Yer değiştirme- şekil değiştirme bağıntıları ikinci mertebe terimleri de dahil olmak üzere,

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (4.3)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \left[\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right] \quad (4.4)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} + \left[\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial z} \right] \quad (4.5)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} + \left[\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial z} \right] \quad (4.6)$$

İkinci mertebe terimler geometrik nonlineeritenin söz konusu olduğu durumlarda kullanılır.

Bu çalışmada küçük yer değiştirmeler söz konusu olduğunda dikkate alınmayacaktır.

4.2 Virtüel İş Teoremi

Bir sistemin sürekliliğini bozmadan keyfi bir yerdeğiştirme uygulandığında, sistemdeki iç ve dış kuvvetlerin işinin hesaplanarak karşılaştırılması prensibin temelini oluşturur. Bu prensibe göre sistem denge konumundayken; dış kuvvetlerin virtüel işi, iç kuvvetlerin virtüel işine eşit olmalıdır.

$$\delta U = \iiint_V \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dV \quad (4.7)$$

Yukarıdaki bağıntıda gerilmeler gerçek, deformasyonlar ise virtüeldir. Burada,

u : Gerçek deplasman

δU : Virtüel deplasman

ε : Gerçek deformasyon

$\delta \varepsilon$: Virtüel deformasyon'dur.

Malzeme için kabul edilen bünyesel bağıntılar ise

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (4.8)$$

şeklinde gösterilebilir. Bu bağıntıda, $[D]$, malzemenin bünyesel davranışını gösteren bağıntıları içermektedir.

$$\delta U = \iiint_V \{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} dV \quad (4.9)$$

Dış kuvvetlerin virtüel işi,

$$\delta W = \iiint_V \{\delta u\}^T \{X\} dV + \iint_S \{\delta u\}^T \{p\} dS \quad (4.10)$$

Dengede ve dış yüklerin etkisi altında, geometrik şartlara uygun olarak, bir sisteme keyfi ve küçük bir deplasman verilirse; dış kuvvetlerin işindeki bu değişme, sistemin şekil değiştirme enerjisindeki değişime eşittir. İç kuvvetlerin virtüel işi, dış kuvvetlerin virtüel işine eşittir (T. Köksal, 1995).

$$\delta U = \delta W$$

$$\int_V \{\delta \epsilon\}^T \{\sigma\} dV = \int_V \{\delta u\}^T \{X\} dV + \int_S \{\delta u\}^T \{p\} dS \quad (4.11)$$

4.3 Sonlu Eleman Denkleminin Elde Edilmesi

Herhangi bir e_i elemanının içinde veya sınırları üzerinde bulunan (i) noktasındaki deplasman vektörünü {u} olarak tanımlayalım.

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \\ w(x, y) \end{Bmatrix} = [\phi(x, y)] \{a\} \quad (4.12)$$

$[\phi(x, y)]$: Seçilen deplasman fonksiyonu,

$\{a\}$: Katsayılar matrisidir.

$\{a\}$ katsayılarının sayısı, bir elemandaki düğüm noktalarının deplasman parametrelerinin toplam sayısına eşit olmalıdır.

$$\{d\} = [A] \{a\} \quad (4.13)$$

$$\{a\} = [A]^{-1} \{d\} \quad (4.14)$$

$[A]$: Eleman düğüm noktası deplasmanları {d} ile, polinom sabitleri {a}, arasındaki bağı veren matristir.

$\{B\} = [A]^{-1}$ diyelim.

$$\{a\} = [B] \{d\} \quad (4.15)$$

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \\ w(x, y) \end{Bmatrix} = [\phi(x, y)] [B] \{d\} \quad (4.16)$$

$$[\phi(x, y)] [B] = [N] \quad (4.17)$$

Bu bağıntıda;

$$\{u\} = [N]\{d\} \quad (4.18)$$

$$\{\delta u\} = [N]\{\delta d\} \quad (4.19)$$

$\{d\}$: Düğüm noktasındaki deplasman parametreleridir.

$[N]$: Şekil fonksiyonudur.

Deplasman parametresi sayısı kadar şekil fonksiyonu elde edilir.

Şekil değiştirmeler ise;

$$\{\varepsilon\} = [\Delta]\{u\} \quad (4.20)$$

$$\{\varepsilon\} = [\Delta][N]\{d\} \quad (4.21)$$

$$\{\varepsilon\} = [\Delta N]\{d\} \quad (4.22)$$

ifadeleri elde edilir.

$$\{\delta u\}^T = \{\delta d\}^T [N]^T \quad (4.23)$$

$$\{\delta \varepsilon\}^T = \{\delta d\}^T [\Delta N]^T \quad (4.24)$$

ifade edilir ve bağıntı (4.12)'de yerine yazılırsa,

$$\int_V \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dV = \int_V \{\delta u\}^T \{X\} dV + \int_S \{\delta u\}^T \{p\} dS \quad (4.25)$$

$$\{\delta d\}^T \left(\int_V [\Delta N]^T [D] [\Delta N] dV \{d\} - \int_V [N]^T \{X\} dV - \int_S [N]^T \{p\} dS \right) = 0 \quad (4.26)$$

elde edilir. Bağıntı (4.26)'yı tekrar düzenlersek,

$$[k]\{d\} = \{r_e\} \quad (4.27)$$

bağıntısı elde edilmiş olur.

$$[k] = \int_V [\Delta N]^T [D] [\Delta N] dV \quad (4.28)$$

$[k]$: Eleman rijitlik matrisidir.

Elemanlar tarafından yapının düğüm noktalarına uygulanan yüklerin vektörü ise

$$\{r_e\} = \int_V [N]^T \{X\} dV + \int_S [N]^T \{p\} dS \quad (4.29)$$

şeklinde yazılır (T. Köksal, 1995).

4.4 Newton- Raphson Metodu

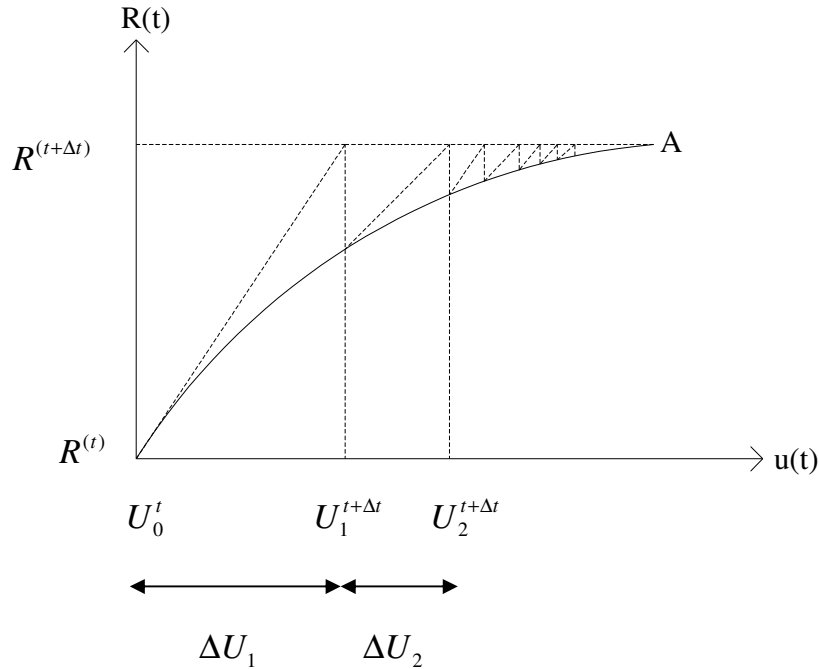
Newton-Raphson metodu, her çözümünden önce, sisteme uygulanan yük ile sistemin elemanları üzerinde etkili olan kuvvetin farkını alarak, yük vektörünü hesaplar. Uygulanacak yük varsa iterasyon devam eder. Her adımda rijitlik hesaplanmak zorundadır. Şekil 4.2’de A noktası, gerçek çözüm olarak kabul edilir.

$$K_{i-1}^{t+\Delta t} \Delta U_i = R^{t+\Delta t} - F_{(i-1)}^{t+\Delta t} \quad (4.30)$$

$$U_i^{t+\Delta t} = U_{i-1}^{t+\Delta t} + \Delta U_i \quad (4.31)$$

İterasyona başlamak için gerekli başlangıç koşulları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$U_0^{t+\Delta t} = U^t, K_0^{t+\Delta t} = K^t, F_0^{t+\Delta t} = F^t$$



Şekil 4.2 Newton Raphson yöntemi

Yöntemdeki ilk adım hesabı, aşağıdaki gibidir.

$i=1$ için;

$$U_1^{t+\Delta t} = U_0^{t+\Delta t} + \Delta U_1 \quad (1. \text{ Adım})$$

$$U_2^{t+\Delta t} = U_1^{t+\Delta t} + \Delta U_2 \quad (2. \text{ Adım})$$

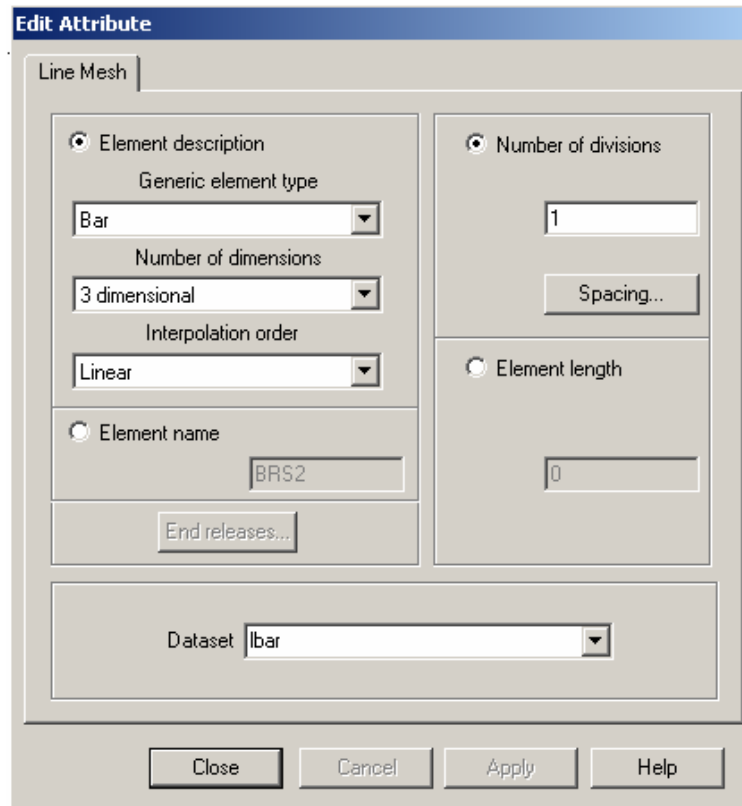
$$U_3^{t+\Delta t} = U_2^{t+\Delta t} + \Delta U_3 \quad (3. \text{ Adım})$$

$$U_n^{t+\Delta t} = U_{n-1}^{t+\Delta t} + \Delta U_n \quad (n. \text{ Adım})$$

şeklinde devam ederek, yakınsama koşulu sağlanıncaya kadar iterasyon devam eder.

4.5 Kolonların Lusas Sonlu Elemanlar Analizi Programında Modellenmesi

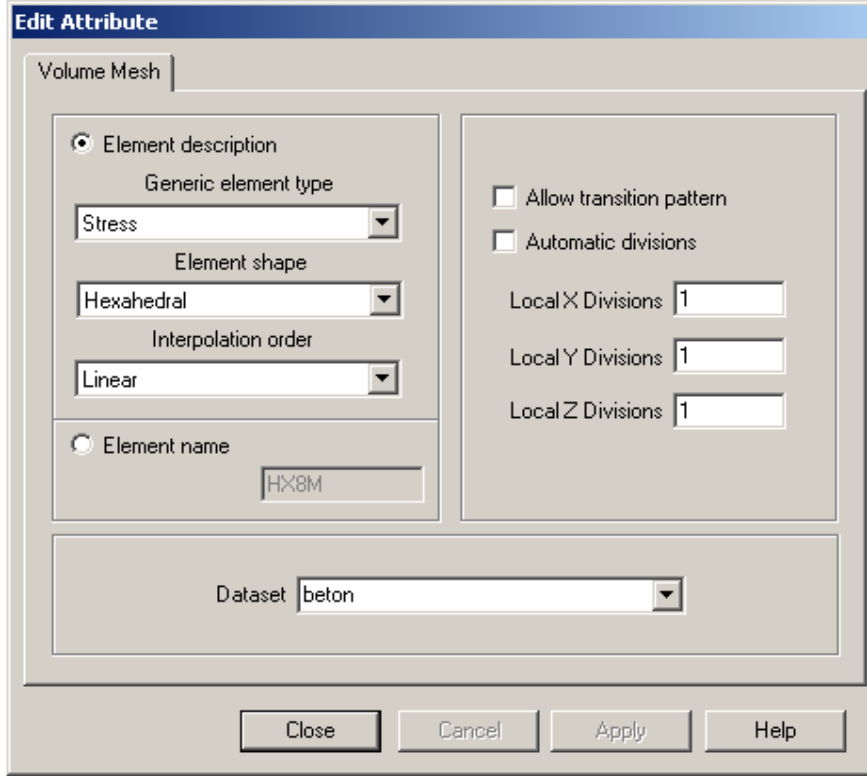
Analize başlamadan önce modellenen kolonların uygun sonlu eleman ağına bölünmesi gerekmektedir. Boyuna donatı ve etriye donatısı “Line Mesh” ile elemanlara bölünürken (Şekil 4.3), beton ise “Volume Mesh” olarak programa girilmiştir (Şekil 4.4).



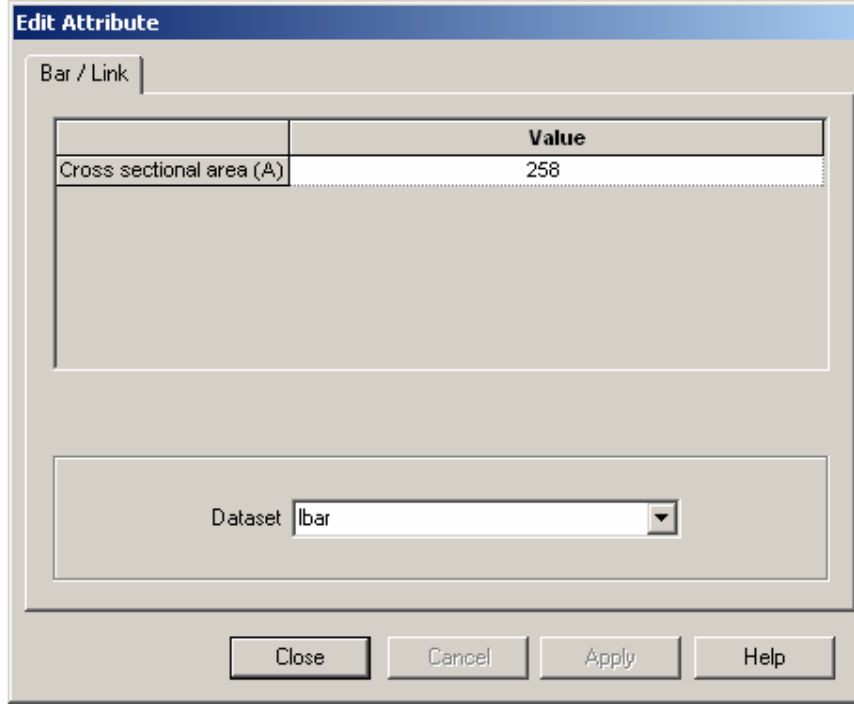
Şekil 4.3 Boyuna donatıların sonlu elemanlara bölünmesi

Lusas programında donatılar üç boyutlu bar eleman olarak modellenmiştir. Beton hacim için ise eleman şekli sekizgen olan “Hexahedral Stress Element” kullanılmıştır.

Kolonlar modellenirken, simetri şartından yararlanılarak dört eşit parçaya bölünmüştür. Tüm elemanlar istenilen sayıda eşit sonlu elemanlara ayrılabilir fakat çözüm süresinin uzunluğu göz önünde tutulduğunda elemanları mümkün olduğu kadar daha az sayıya bölmek gerekmektedir.



Şekil 4.4 Betonun sonlu elemanlara bölünmesi



Şekil 4.5 Donatı kesit alanının programa girilmesi

Donatıların kesit alanları modellemeye başlamadan önce programın çalıştırılmasıyla çıkan, başlangıç menüsündeki seçilen alan birimine göre girilir. Bu çalışmada donatılar mm^2 olarak kesitleri tanımlanmıştır. Boyuna donatı kesit alanı 258mm^2 olan fiktif kolon, Şekil 4.5'te görülmektedir.

Donatılar ve beton için izotropik malzeme modeli uygun görülmüştür. Modellenen tüm donatılarda; elastisite modülü $2 \times 10^5 \text{ MPa}$, poisson oranı $0,3$, kütle yoğunluğu 0 , akma gerilmesi ise 420MPa alınmıştır. “Von Mises Stress potential” kırılma kriteri programda dikkate alınmıştır. Pekleşme ise hesaplarda dikkate alınmamıştır.

Edit Attribute

Isotropic

Using the following properties:

☒ Plastic ☐ Creep ☐ Damage ☐ Viscous ☐ Two phase

Elastic Plastic

	Value
Young's modulus	200E3
Poisson's ratio	0,3
Mass density	0

☐ Thermal expansion

☐ Dynamic properties

Dataset

OK Cancel Apply Help

Şekil 4.6 Donatı malzeme özellikleri (elastik)

Edit Attribute

Isotropic

Using the following properties:

☒ Plastic ☐ Creep ☐ Damage ☐ Viscous ☐ Two phase

Elastic Plastic

Model: Stress potential Stress potential type: von Mises

Section shape: Circular hollow section

	Value
Initial uniaxial yield stress	420

☐ Heat fraction

Advanced...

☐ Hardening

☒ Total strain
☐ Plastic strain
☐ Hardening gradient

	Stress	Total strain
1		
2		

	Stress	Total strain
1		
2		

Dataset: Ibar

OK Cancel Apply Help

Şekil 4.7 Donatı malzeme özellikleri (plastik)

Betonda elastisite modülü aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır.

$$E_0 = 4750\sqrt{f_c} \quad (4.31)$$

f_c : Betonun basınç dayanımıdır ve programda MPa olarak girilmiştir.

Poisson oranı beton için 0,2 alınmıştır. Programda beton için kütle yoğunluğu değeri sıfır girilmiştir.

Edit Attribute

Isotropic

Using the following properties:

☐ Plastic ☐ Creep ☒ Damage ☐ Viscous ☐ Two phase

Elastic **Damage**

	Value
Young's modulus	29663
Poisson's ratio	0,2
Mass density	0

☐ Thermal expansion

☐ Dynamic properties

Dataset: beton

OK Cancel Apply Help

Şekil 4.8 Beton malzeme özellikleri (elastik)

Betonun malzeme modeli olarak, Lusas yazılım paketi içinde olan, beton elemanlar için geliştirilen Oliver'in hasar modeli kullanıldı. Analiz yapmadan önce başlangıçta üç parametre tanımlanmıştır. Bunlar sırasıyla,

1) τ^* , başlangıç hasar eşiği değeridir.

$$\tau^* = \frac{f_t}{\sqrt{E_0}} \quad (4.32)$$

f_c : Betonun 28 günlük silindirik basınç dayanımıdır.

$$f_t = 0,35\sqrt{f_c} \quad (4.33)$$

f_t : Beton çekme gerilmesi.

2) Malzeme parametresi, A , sonlu elemanlar ağında kullanılan elemanın maksimum boyutunu dolaylı olarak sınırlayan bir faktördür.

$$A = \left(\frac{G_f}{l^*} \frac{E_0}{f_t^2} - \frac{1}{2} \right)^{-1} \geq 0 \text{ (Oliver vd., 1990)} \quad (4.34)$$

Burada l^* , sonlu elemanın karakteristik uzunluğudur. G_f ise kırılma enerjisi olarak tanımlanır.

$$G_f = 15.5 d_{\max} \frac{f_t^2}{E_0} \quad (4.35)$$

$d_{\max}$, beton karışımındaki maksimum agrega boyutudur.

A için önceden yapılan çalışmadan (Köksal vd., 2004) elde edilen son haliyle ifade edilirse,

$$A = \frac{l^*}{310} \quad (4.36)$$

Bazant ve Oh tarafından önerilen, malzeme parametresini temsil eden, ağ boyutu kullanılmıştır.

$$l^* = \sqrt[3]{h_x h_y h_z} \quad (4.37)$$

h_x , h_y ve h_z , sekiz düğüm noktalı katı elemanın boyutlarıdır.

Çelik elemanlar için, Stress potential tipi Von Misses akma kriteri ideal elastoplastik davranışı benimsenip, programda ele alındı. Çelik boyuna donatılar ve etriyeler için üç boyutlu bar eleman kullanıldı.

3) Hasar oranı; çekme ve basınçta, başlangıçta hasara sebep olan gerilmelerin oranıdır.

$$\text{Hasar oranı} = \frac{f_c}{f_t} \quad (4.38)$$

olarak hesaplanır.

Edit Attribute

Isotropic

Using the following properties:

☐ Plastic ☐ Creep ☒ Damage ☐ Viscous ☐ Two phase

Elastic Damage

Law: Oliver

Model type: 0

Number of user values: 0

Number of state variables: 3

	Value
Initial damage threshold	0,0127
Material parameter A	0,2849
Damage ratio	17,81

Dataset: beton

OK Cancel Apply Help

Şekil 4.9 Hasar modelinin seçimi ve hasar değerlerinin programa girilmesi

Kolonun alt yüzeyi sabit olduğu için ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır. Deneylerde kolonun üst yüzeyine konulan metal plakanın yatay hareketi engellediği düşünülerek, üst yüzey x ve y yönünde tutulu olarak mesnetleri atanmıştır.

Bu çalışmada sadece üç boyutlu çubuk eleman olarak donatı kullanılmış olsaydı, düğüm noktalarının dışında beton kısma herhangi bir etki söz konusu olmayacaktı. Bu duruma çözüm olarak birim alanda tanımlanan yaylar aracılığı ile etriyelerin kuşatma basınçlarının hesaplanabilmesi mümkün olmuştur.

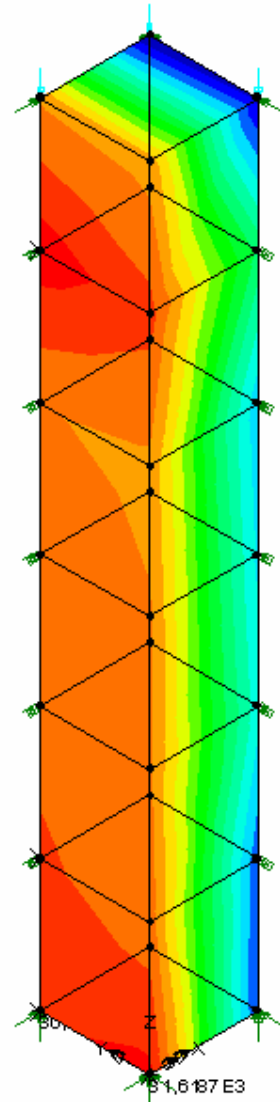
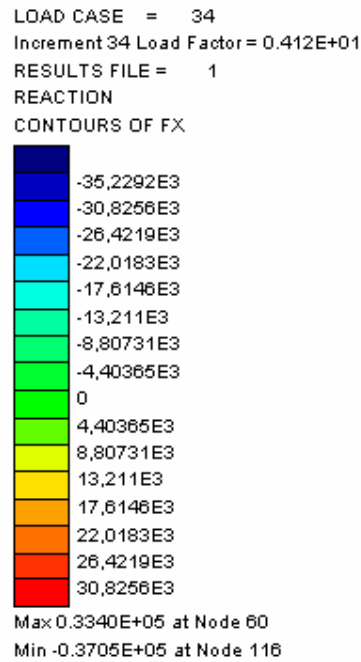
Etriyelerdeki kuşatma etkisinin tam olarak ifade edilmesi amacıyla beton elemanın yanal yüzeyine yay tanımlanmıştır. Yay katsayısı değeri 0'dan 150'ye kadar 10'ar 10'ar arttırılarak, kolonların kuşatma basıncı değerleri hesaplanmıştır.

Yükleme kolonun üst yüzeyine düzgün yayılı yük olarak yapılmıştır.

Her yay katsayısı değeri için analiz sonrasında kolonun göçme yükü değeri programdan okunmuştur. Ayrıca deneydeki göçme yükünü verecek şekilde yay katsayısı değeri, parametrik bir çalışmayla sonlu eleman analizleri yapılarak, belirlenmeye çalışılmıştır.

Kuşatma basıncı; Şekil 4.10'da kolonun renk kartelasındaki değerlerin ortalaması alınıp, etriyenin kontrol ettiği alana bölünerek hesaplanır.

$$\text{Kuşatma Basıncı} = \frac{\text{Ortalama Yük}}{s * d_e} \quad (4.39)$$



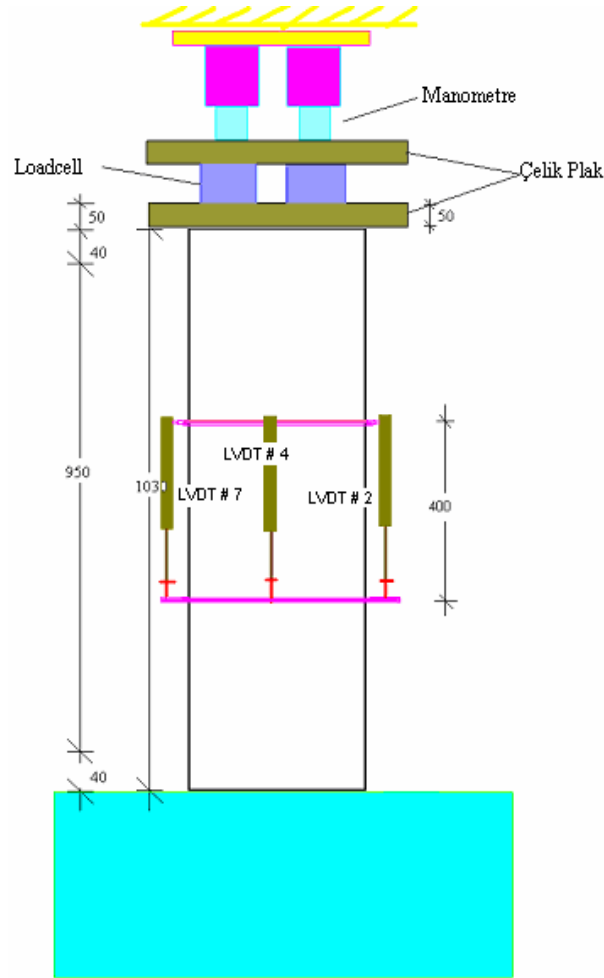
Şekil 4.10 Analiz sonucu oluşan kuvvetlerin kolondaki dağılımı

5. DENEYSEL DATA SONUÇLARININ SONLU ELEMANLAR ANALİZİ SONUÇLARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI

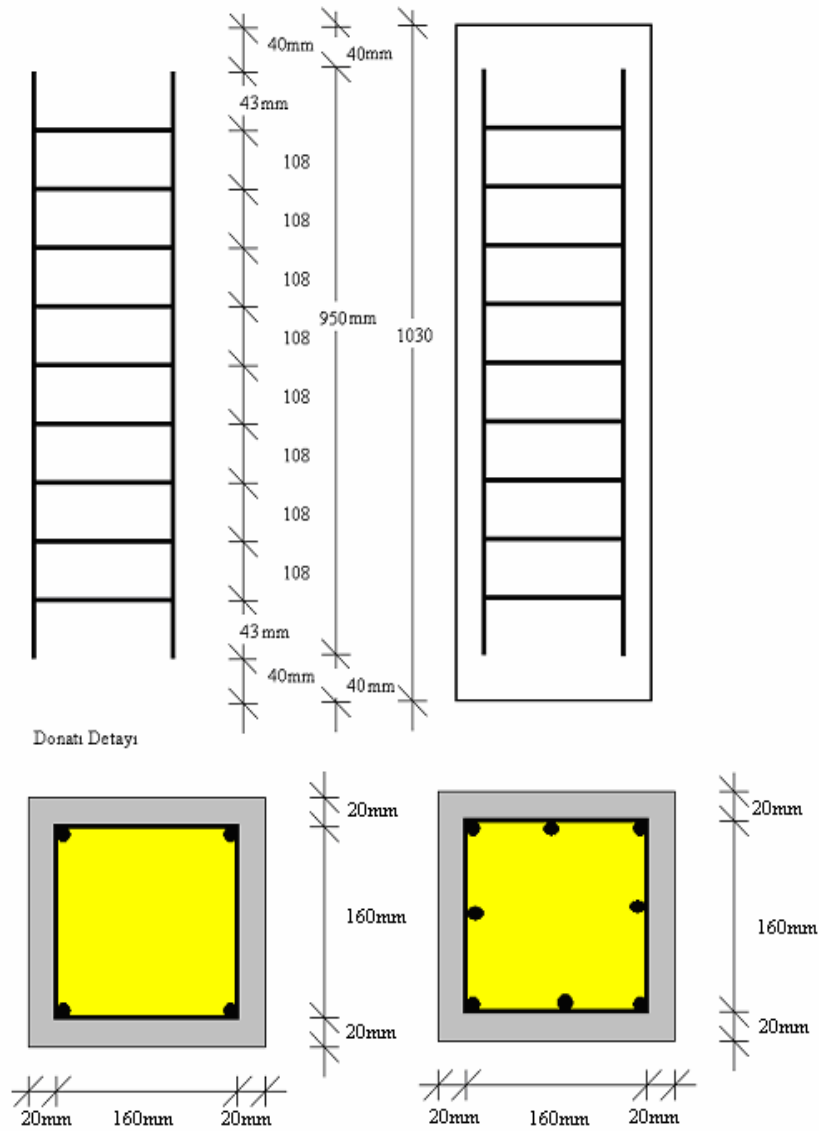
Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı laboratuvarında doktora tez çalışması kapsamında (Turgay, T., 2006) hazırlanan kare kolonların deneyleri yapılmıştır.

5.1 Kolon Numunelerine Ait Karakteristik Özellikler

Deneye tabi tutulan tüm kolonlar C16 beton sınıfındadır. C1, C2 ve C3 tipi olarak adlandırılan kolonlar sırasıyla 30, 60 ve 90 günde test edildi. Bu tez çalışmasında; 30 günde test edilen, etriye ile kuşatılan 4 adet C1 kolonu ele alınmıştır. Bu kolonlar sırasıyla C1L4S8, C1L4S12, C1L8S8 ve C1L8S12 olarak adlandırılmıştır. L4 ve L8 sırasıyla kolon kesitinde 4 ve 8 adet boyuna donatı olduğunu, S8 ve S12 ise sırasıyla etriye çapları 8mm ve 12mm kolonları ifade etmektedir. Tüm kolon numunelerinin etriye aralığı 100mm’ dir (Köksal vd., 2006).



Şekil 5.1 Deney düzeneği (Köksal vd., 2006)



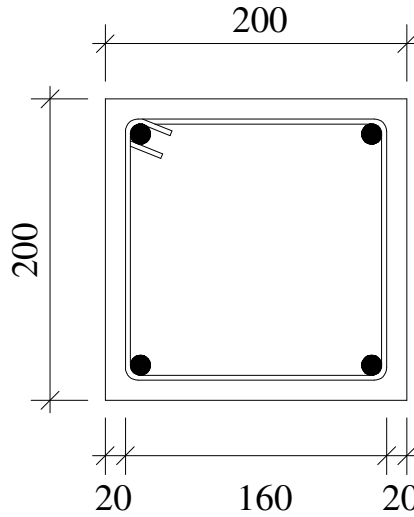
Şekil 5.2 Test edilen kolon numunelerine ait donatı detayı ve kesit özellikleri
(Köksal vd., 2006)

5.2 Kolon Numunelerinin Sonlu Elemanlar Analizi Programında Modellenmesi

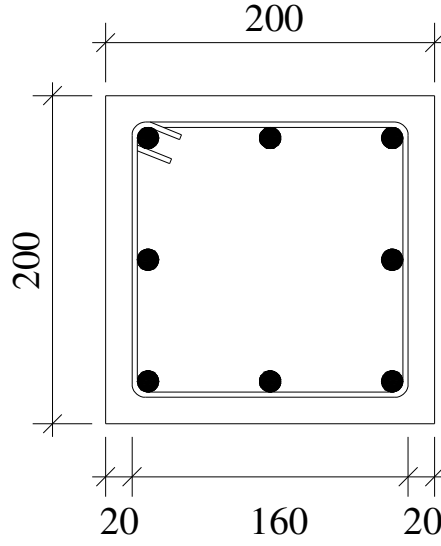
Kolonlar; sekiz noktalı, eşparametrik, sürekli katı eleman kullanılarak modellenmiştir. Boyuna ve yanal donatılar iki düğüm noktalı, üç boyutlu çubuk eleman kullanılarak sonlu elemanlara bölündü. Sistemin simetri ve yüklemenin üniform olmasından faydalanılarak, eşmerkezli yüklenen 3 boyutlu betonarme kolonlar ¼ kesit simetrisi kullanılarak modellendi. Kolonun üst yüzeyi x ve y doğrultusunda tutulu, alt yüzey ise ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır (Köksal vd., 2006).

Deney kolonları; Lusas sonlu elemanlar analizi programında modellenirken, (5.1) bağıntısı kullanılarak elastisite modülü hesaplanmıştır. Denklem (5.1)'deki elastisite modülü olarak kabul edilen E değeri CEB-FIB, (1990) kodundan alınan aşağıdaki ifade ile belirlenir.

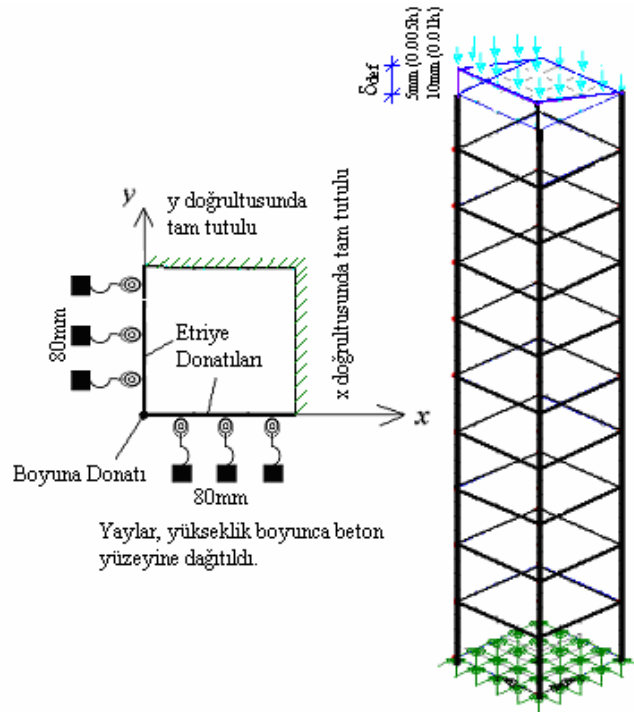
$$E = \alpha * 21500 * \left(\frac{f_c}{10} \right)^{1/3} \quad (5.1)$$



Şekil 5.3 C1L4S8 ve C1L4S12 kolon numuneleri (Köksal vd., 2006)



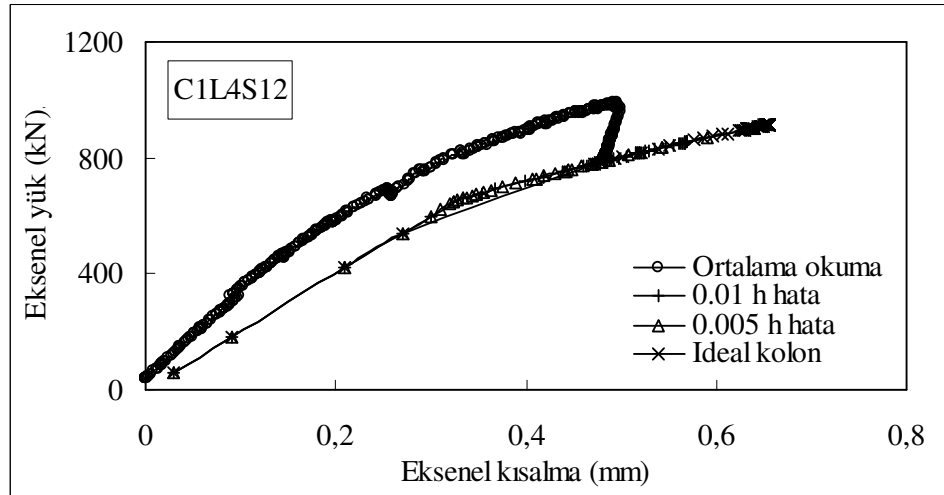
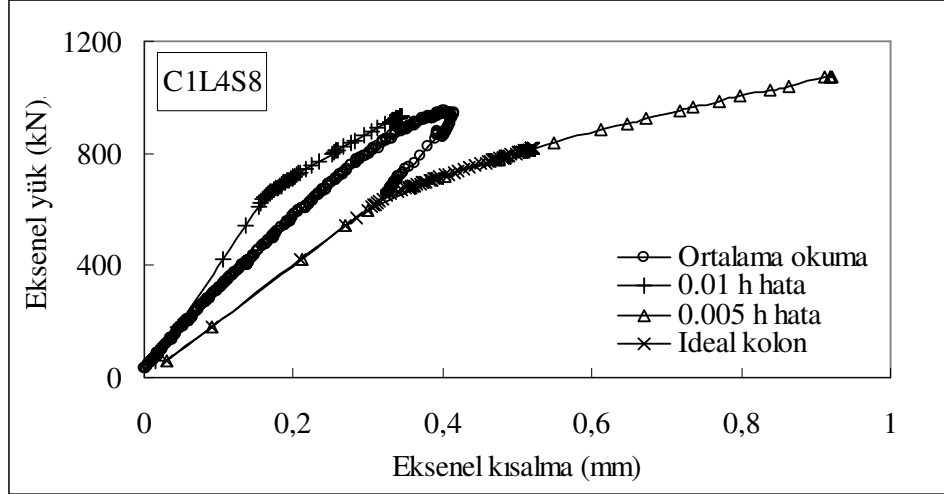
Şekil 5.4 C1L8S8 ve C1L8S12 kolon numuneleri (Köksal vd., 2006)

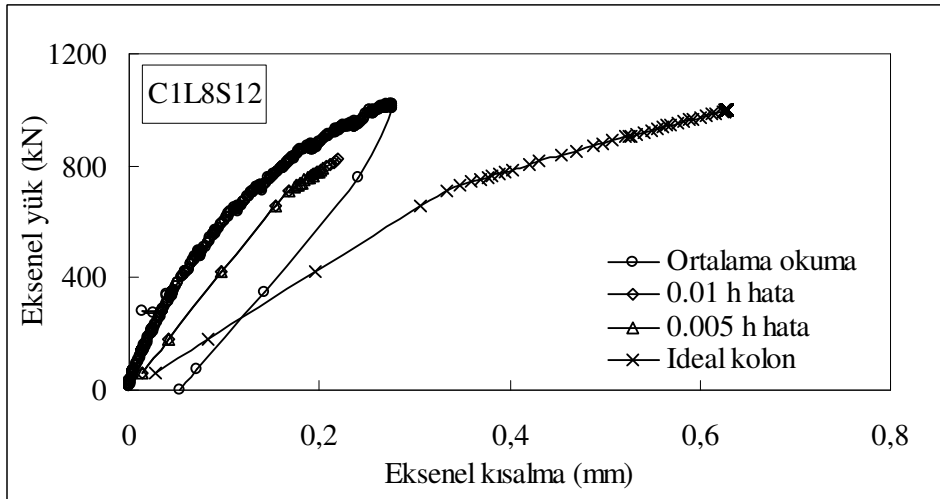
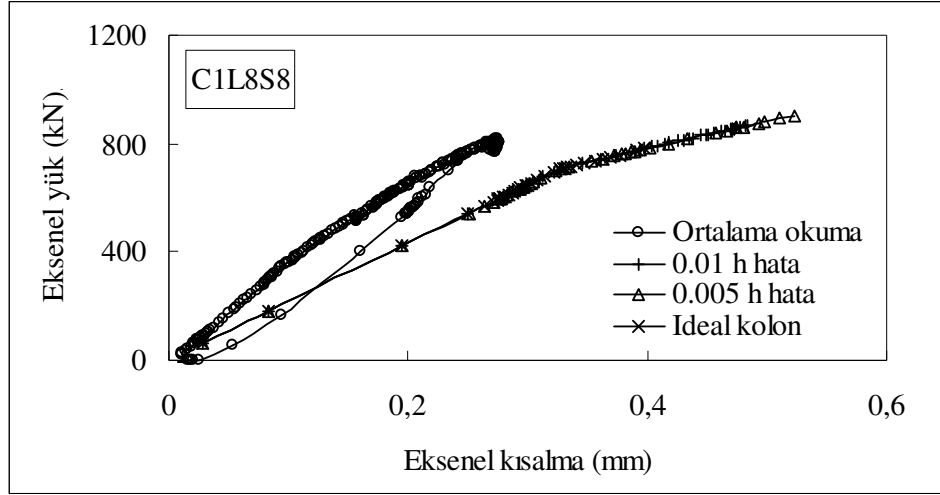


Şekil 5.5 Betonarme kolonun sonlu elemanlar programında hatalı ve hatasız olarak sonlu elemanlara ayrılması (Köksal vd., 2006)

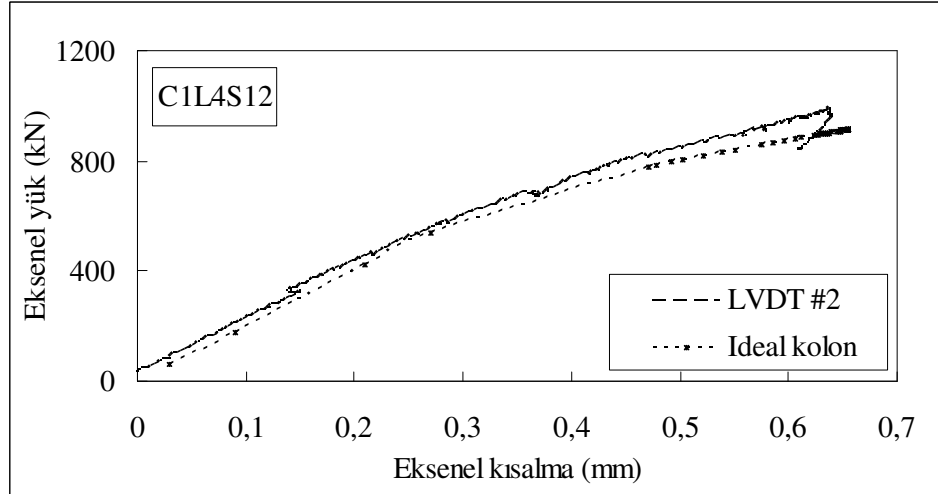
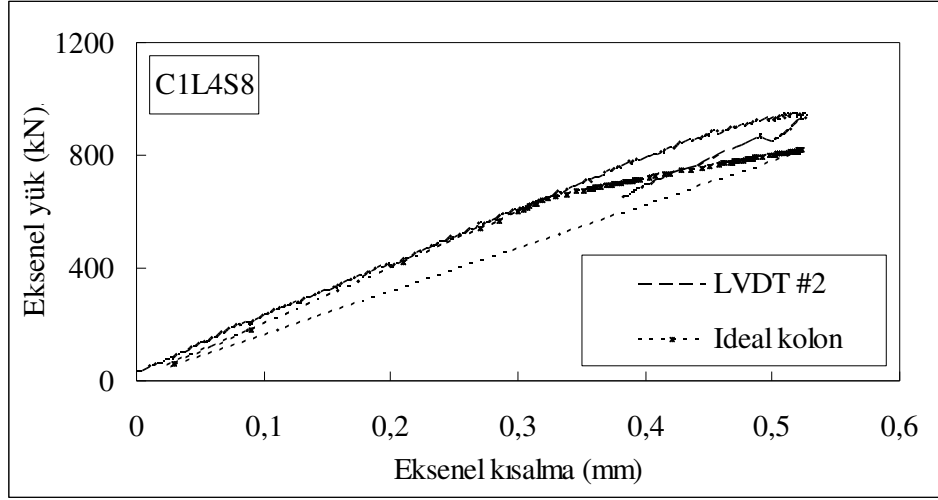
Şekil 5.5'te deney sırasında okumaları yapan üç LVDT'nin ortalama değerlerini ifade eden eğriler ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen %1 ve %0,5 hata oranı içeren kolonların aksel yük altındaki kısalma eğrileri görülmektedir (Köksal vd., 2006).

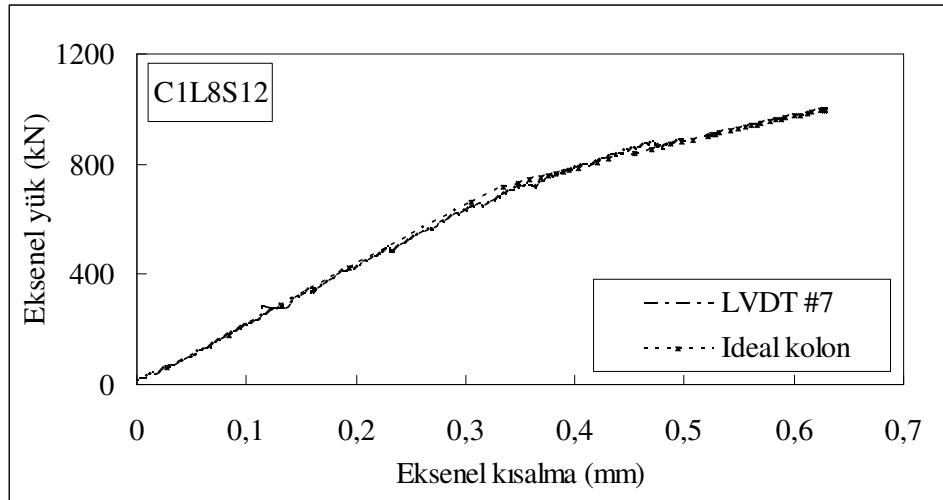
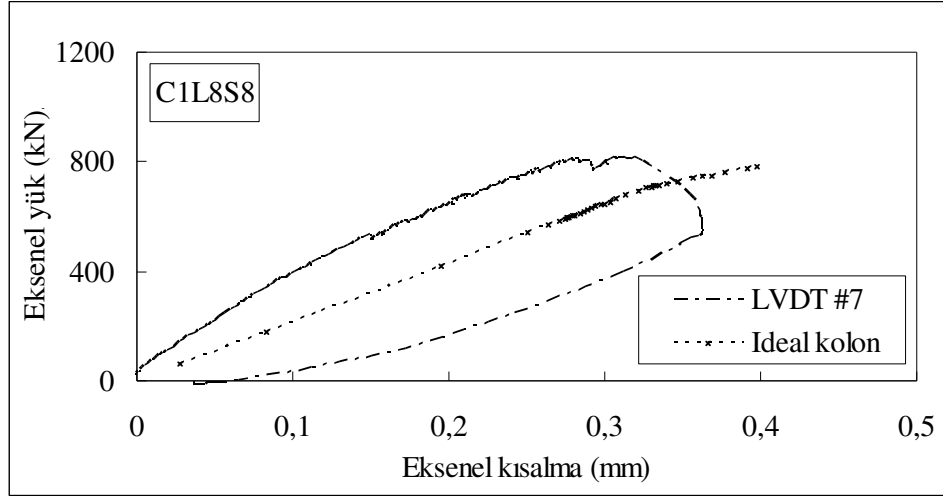
%1 ve %0,5 hata oranı içeren kolonların aksel yük-eksel kısalma eğrileri ile deney sonuçlarından elde edilen, ortalama okumalar yapan LVDT sonuçlarına çok yakındır (Şekil 5.6).





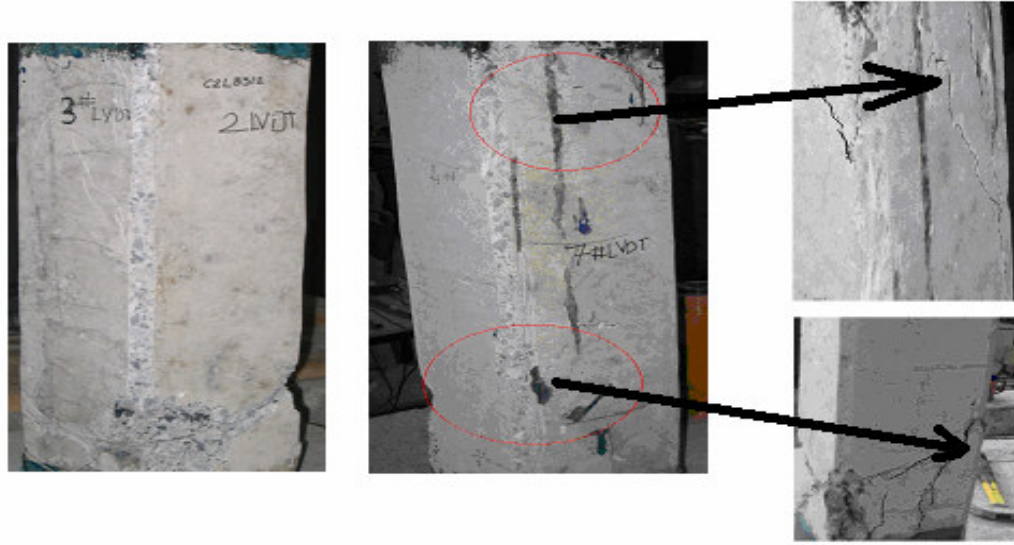
Şekil 5.6 Deney sonuçlarından elde edilen üç LVDT'nin ortalama okumaları ile geometrik hatalar etkisinde modellenen kolonların sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre eksenel yük-eksenel kısalma eğrilerinin karşılaştırılması (Köksal vd., 2006)





Şekil 5.7 İdeal kolondaki sonlu elemanlar analizi sonuçları ile ağır hasar görmüş bölgeye yerleştirilen kritik LVDT okumalarının karşılaştırılması (Köksal vd., 2006)

Özellikle maximum yükün yaklaşık olarak %75'ine ulaşıldığı zaman, plastik deformasyonlar daha da genişler, çatlaklar kararsız olarak büyümeye başlar ve makro çatlakların hasardaki yeri ortaya çıkar. Kritik LVDT'den elde edilen okumalarla, sonlu elemanlar analizindeki hatasız olarak modellenen ideal kolon sonuçları birbirine yakındır (Şekil 5.7). Çıplak gözle sınırlı hasar gözlenebildiğinden, ağır hasar gören kenarın yerleşimi farklı olsa bile, kritik LVDT kolonun bu hasarlı kenarını temsil eder. Deney kolonunun göçme yüküne yakın oturması devam ettiğinde, kolonun bitişik kenarındaki makro çatlaklar hacim genişlemesinden dolayı ortaya çıkar (Köksal vd., 2006).



Şekil 5.8: (a) Şiddetli oturmuş kenar (b) Komşu kenardaki makro çatlaklar (Köksal vd., 2006)

Benzer yaklaşım Mander vd., (1988) tarafından da benimsenmiştir. Dört potansiyometredeki ortalama okumaların yerine, hasar bölgesindeki bazı kritik potansiyometrelerdeki ölçü uzunluğu ele alınmıştır (Köksal vd., 2006).

Ancak burası açıktır ki, kolondaki maksimum kısalmaları elde etmek için sınırlanmış hasar bölgesine konulan kritik LVDT'nin kesin yeri hakkında bazı belirsizlikler vardır .

5.3 Sonuçlar

Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı laboratuvarında testleri yapılan dört adet kolonun deney dataları ile üç boyutlu olarak modellenen test kolonlarının sonlu elemanlar analizi sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, eksenel deformasyonun ölçülmesindeki bazı belirsizlikler çalışılmıştır.

Bu amaçla, göçme yüküne yakın olan LVDT okumalarının ortalamaları kullanılırken, göçme yükünün yaklaşık olarak %75 değerini aldığı, kararsız çatlağın yayılmaya başlamasından sonra kolonun şiddetli oturmuş kenarındaki hasarın yığılmasını gösteren kritik LVDT okumaları tercih edilmiştir.

Bu durumda sonlu eleman analizi sonuçları ile deneysel veriler iyi uyum sağlamaktadır.

Diğer taraftan göçme bölgesindeki kritik LVDT'nin kesin olarak yerinin belirlenmesinde bazı belirsizlikler vardır. Kolonun hasarlı bölgesindeki LVDT için alternatif yerler, kolondaki oturma ölçülerek planlanabilir. Bu sonuçla, eksenel kısaltmaların belirlenmesi için bazı ortalama değerlerin kullanılması ihtimali olsa bile, betonarme kolonların eksenel deformasyonunun ölçülmesi için kritik LVDT yerinin tanımlanmasına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.

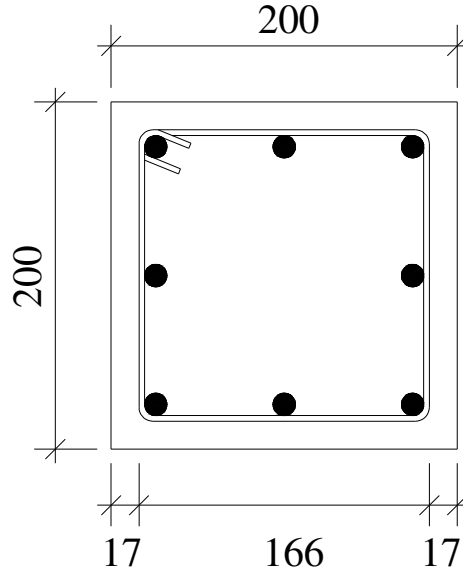
Kolonların üst yüzeyindeki karşılıklı iki kenarın arasında çok küçük yükseklik farkı olması; sonlu eleman analizi sonuçları ile LVDT ortalamalarının birbirine yakın çıkmasını sağlar. Kolon numunelerindeki bu tür hataların hazırlık aşaması sırasında olması mümkündür ve kolonlar hazırlanırken dikkatle kontrol edilmelidir (Köksal vd., 2006).

6. NÜMERİK MODELLEME

6.1 İncelenen Kolon Numuneleri

Kolon modellerinin büyük çoğunluğu, 2002 yılında Heon-Soo Chung vd. tarafından yapılan deneylerden ve Claeson'un makalesinden alınan kolonlardan oluşmaktadır. Kuşatma basıncına etkiyen parametreleri araştırmak için fiktif kolonlar üretilmiştir.

Chung vd. deney numunelerinin isimlendirmelerinde ilk harf beton kalitesini ifade etmektedir. L (düşük), M (orta) ve H (yüksek) sırasıyla basınç dayanımları 20, 39 ve 54 MPa olan beton sınıflarını gösterir. Bu harfin ardından gelen rakam donatı sayısını belirtmektedir. Bu numunelerde boyuna donatı alanı 129mm^2 dir. Ardından gelen S, C, D ve R harfleri ise yanal donatı konfigürasyonunu belirtmektedir. S harfi, basit tip yanal donatıyı ifade ederken, C, D ve R karmaşık tip yanal donatı konfigürasyonları için kullanılmıştır. Bu çalışmada sadece S (basit) tipi donatı düzenine sahip kolonlar analizlerdeki avantajları nedeniyle seçilmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 S tipi kolonun donatı konfigürasyonu (Chung vd., 2002)

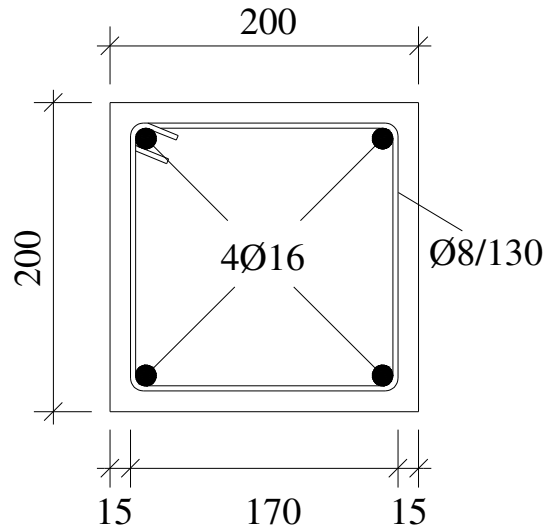
Yanal donatı şeklini belirten harflerden sonra gelen 55 sayısı, yanal donatı akma mukavemetini ifade etmektedir (550MPa). S (six), E (eight) ve T (twelve) harfleri sırasıyla 6mm, 8mm ve 12mm olarak yanal donatı çapını göstermektedir. Son olarak etriyeler arası

mesafeyi gösteren 55 ve 10 sayıları, sırasıyla 5,5cm ve 10cm'yi belirtmektedir.

Deneylerde kolon numunelerinin boyu 60 cm'dir.

Deneyler boyunca numunelerde kullanılan boyuna donatıların akma mukavemeti 420MPa'dır. Kuşatma etkisinin tam olarak anlaşılabilmesi için ayrıca boyuna donatı akma mukavemeti 550MPa olan fiktif kolonlar da üretilmiştir.

Claeson deneylerinden alınan iki kolon modeli ise Model A33 ve Model A91 olarak adlandırılmıştır. Bu iki kolon numunesi de 80cm yüksekliğindedir ve basit donatı konfigürasyonuna sahip olacak şekilde düzenlenmiştir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2 Claeson, kolon donatı konfigürasyonları

Bu kolonlarda boyuna donatı çapı 16mm, yanal donatı çapı 8mm, etriye aralığı ise 130mm'dir. A harfinden sonra gelen 33 ve 91 sırasıyla 33MPa ve 91MPa olarak beton mukavemetini göstermektedir. Donatı dayanımları 420MPa alınmıştır.

Sonlu elemanlar analizinde, kolon davranışının tam olarak incelenebilmesi amacıyla yay katsayısı değeri 0'dan 150'ye kadar incelenip, göçme yükü ve kuşatma basıncı değerleri hesaplanmıştır.

6.1.1 Fiktif kolonlar

Kuşatma etkisini ifade eden parametreleri incelemek amacıyla fiktif kolonlar Lusas sonlu elemanlar analizi programında modellenmiştir. Bu kolonlarda beton mukavemeti, boyuna donatı çapları, boyuna donatı akma dayanımları, etriye donatısının akma dayanımları, etriye donatısının çapları ve boyuna donatı konfigürasyonu değiştirilerek bir çok analiz yapılmıştır.

Fiktif sekiz donatılı kolonlarda boyuna donatı alanı $64,5\text{mm}^2$ ve 258mm^2 alınmıştır. Sonuç tablolarında numune isimleri “F-L8S55S10” ve “F-2L8S55S10” şeklinde gösterilmiştir. Boyuna donatı alanı $64,5\text{mm}^2$ olduğu zaman F-L8S55S10 şeklinde, boyuna donatı alanının 258mm^2 olduğu durumda ise F-2L8S55S10 olarak adlandırılmıştır. Boyuna donatı akma dayanımlarının da incelenmesi amacıyla, yapılan sonlu elemanlar analizinde Claeson’un kolonları (Model A33 ve Model A91); 220 N/mm^2 , 420 N/mm^2 , 550 N/mm^2 ve 700 N/mm^2 değerleri için incelenmiştir.

Etriye çapı 12mm olan kolonları incelemek amacıyla “F-L8S55T10” fiktif kolon üretilmiştir.

Boyuna donatı konfigürasyonunun kuşatma basıncına olan etkisini incelemek amacıyla sekiz boyuna donatılı kolonlar, aynı boyuna donatı alanına sahip fiktif dört donatılı kolon olarak sonlu elemanlar analizi programında modellenmiştir. Bu kolonlar “2F-L8S55S10” şeklinde adlandırılmıştır.

6.1.2 Kuşatma basıncının belirlenmesinde etkili olan parametreler

- Beton basınç mukavemeti
- Boyuna donatı çapı
- Boyuna donatı akma dayanımı
- Yanal donatı çapı
- Yanal donatı aralığı
- Yanal donatı akma dayanımı
- Boyuna donatı konfigürasyonunun değişimi

Bu tez çalışması kapsamında, kuşatma basıncına etkileyen parametreler belirlenmiş ve bu parametreler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Lusas sonlu elemanlar analiz programında (Chung vd., 2002), Claeson’un ve fiktif kolonların modellenmesi yapıldıktan sonra, analiz

yapılarak göçme yükü ve kuşatma basınçları belirlenmiştir.

6.2 Analiz Sonuçları

Kolon numunelerine ait karakteristik özellikler Çizelge 6.1’de gösterilmiştir. Sonlu eleman analiz sonuçları ile Chung ve Claeson’un deney sonuçları ve bu tez çalışmasında ele alınan mevcut iki beton modelinin (Mander vd., 1988 ve Saatçioğlu vd., 1992) karşılaştırılması yapılmıştır (Çizelge 6.2).

Çizelge 6.1 Numune özellikleri

Numune	f_c (MPa)	Etriye Aralığı (mm)	Boyuna Donatı		
			Sayısı	Alanı (mm ²)	Oranı
Model A33	33	130	4	200	0,0200
Model A91	91	130	4	200	0,0200
L8S55S10	20	100	8	129	0,0258
M8S55S10	39	100	8	129	0,0258
H8S55S10	54	100	8	129	0,0258
F - L8S55S10	20	100	8	64,5	0,0129
F - M8S55S10	39	100	8	64,5	0,0129
F - H8S55S10	54	100	8	64,5	0,0129
F - 2L8S55S10	20	100	8	258	0,0516
F - 2M8S55S10	39	100	8	258	0,0516
F - 2H8S55S10	54	100	8	258	0,0516
L8S55S55	20	55	8	129	0,0258
M8S55S55	39	55	8	129	0,0258
H8S55S55	54	55	8	129	0,0258
F - L8S55S55	20	55	8	64,5	0,0129
F - M8S55S55	39	55	8	64,5	0,0129
F - H8S55S55	54	55	8	64,5	0,0129
F - 2L8S55S55	20	55	8	258	0,0516
F - 2M8S55S55	39	55	8	258	0,0516
F - 2H8S55S55	54	55	8	258	0,0516

6.2.1 Boyuna donatı çapının kuşatma basıncına olan etkisinin deney ve analiz sonuçları için irdelenmesi

Lusas sonlu elemanlar analizi programında modellenen kolonların; göçme yükü ve kuşatma basıncı değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir. Yay atanan yüzeylerde düğüm noktalarında oluşan mesnetlenmenin burkulma modunu değiştirdiği ve yükte bir atlamaya sebep olduğu düşünülmektedir. Bu durum, Euler burkulma analogisine benzeşim yapılarak, aşağıda anlatılmıştır.

İki ucu mafsallı bir çubukta, kritik burkulma yüküne ‘‘Euler Burkulma Yüğü’’ adı verilir.

$$P_{ki} = \frac{\pi^2 E I}{s^2} \quad (6.1)$$

Yükün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerinde; burkulma boyu azalınca, kolonun taşıyabileceği yükte artmaktadır.

L8S55S10, M8S55S10 ve H8S55S10 kolonlarındaki boyuna donatı alanı yarıya düşürüldüğünde; analiz sonuçlarına göre, göçme yükü değerlerinde yaklaşık olarak sırasıyla; %41, %18 ve %5 oranında azalma olduğu görülmektedir (Çizelge 6.2). Boyuna donatı alanı iki katına çıkarıldığında, göçme yükü değerlerinde beton dayanımı 20MPa olan L8S55S10 kolonunda %34 oranında ve beton mukavemeti 39MPa olan M8S55S10 kolonunda %15 oranında artma olduğu görülmektedir. H8S55S10 kolonunda ise %3 oranında azalma olduğu görülmektedir. Boyuna donatı alanı yarıya düşen kolonlar F-L8S55S10, F-M8S55S10 ve F-H8S55S10 şeklinde adlandırılan fiktif kolonlardır. Boyuna donatı alanı yarıya düşürüldüğünde, L8S55S10, M8S55S10 ve H8S55S10 kolonlarında sırasıyla; %64, %49 ve %17 oranında kuşatma basıncı değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar itibarıyla, boyuna donatı alanı yarıya düşürüldüğünde; kuşatma basıncı değerlerinin azaldığı ama bu azalma oranının, beton mukavemeti arttıkça düştüğü görülmektedir.

L8S55S10, M8S55S10 ve H8S55S10 kolonlarında boyuna donatı alanı iki katına çıkarıldığında sırasıyla kuşatma basınçları değerlerinde sırasıyla; %52, %19 ve %11 oranında artma olduğu görülmektedir. Bu sonuca göre beton mukavemeti arttıkça, kuşatma basıncı değerlerindeki artma oranının düştüğü görülmektedir.

L8S55S55, M8S55S55 ve H8S55S55 kolonlarındaki boyuna donatı alanı iki katına çıkarıldığında; göçme yükleri değerlerinde sırasıyla; %30, %32 ve %3 artma görülmektedir. Kuşatma basınçları değerinde ise %70, %51 ve %5 oranında artma olduğu görülmektedir.

L8S55S55, M8S55S55 ve H8S55S55 kolonlarındaki boyuna donatı alanını yarıya düşürdüğümüzde, göçme yükleri değerlerinde sırasıyla; %33 azalma, %3 artma ve %16 azalma olduğu görülmektedir. Kuşatma basınçları değerinde ise %36 azalma, %45 artma ve %7 artma olduğu görülmektedir.

Mander vd., (1988) ve Saatçioğlu vd., (1992) beton modellerinde ise kuşatma basıncı değerinin beton mukavemetine bağlı olmadığı görülmektedir.

Çizelge 6.2 Genel sonuç tablosu

Numune	YK (N/mm ²)	Göçme Yüğü (kN)			Kuşatma Basıncı (N/mm ²)		
		Deney	Model	Mander	Mander	Saatçioğlu	Model
Model A33	70	1650	1656,8	1170,0	0,65	0,61	1,27
Model A91	105	3920	3928,0	2466,7	0,65	0,61	3,30
L8S55S10	110	995,0	1159,2	1117,4	0,83	0,69	1,10
M8S55S10	90	1401,0	1387,2	1536,1	0,83	0,69	0,97
H8S55S10	90	1580,0	1882,0	1864,1	0,83	0,69	1,06
F – L8S55S10	49	-	684,8	847,3	0,79	0,68	0,39
F – M8S55S10	58	-	1136,0	1265,5	0,79	0,68	0,49
F – H8S55S10	72	-	1787,2	1593,4	0,79	0,68	0,88
F – 2L8S55S10	367	-	1758,0	1695,4	0,92	0,70	2,27
F – 2M8S55S10	140	-	1636,8	2115,0	0,92	0,70	1,20
F – 2H8S55S10	128	-	1829,6	2443,4	0,92	0,70	1,19
L8S55S55	140	1075,6	957,2	1267,0	2,18	1,26	1,06
M8S55S55	70	1550,3	1151,6	1707,2	2,18	1,26	0,55
H8S55S55	90	1721,5	1636,8	2043,0	2,18	1,26	0,88
F – L8S55S55	61	-	642,0	990,4	2,06	1,24	0,68
F – M8S55S55	62	-	1186,4	1428,2	2,06	1,24	0,80
F – H8S55S55	60	-	1380,0	1763,1	2,06	1,24	0,94
F – 2L8S55S55	446	-	1369,2	1855,9	2,40	1,28	3,50
F – 2M8S55S55	71	-	1697,2	2300,5	2,40	1,28	1,13
F – 2H8S55S55	119	-	1692,4	2638,0	2,40	1,28	0,99
C1L4S8	70	700,1	521,2	581,3	0,76	0,80	0,40
C1L4S12	60	743,3	553,6	566,7	0,84	1,23	0,37
C1L8S8	50	574,8	584,0	619,5	1,11	0,80	0,30
C1L8S12	40	768,9	608,4	601,3	1,18	1,23	0,25

1) L8S55S10 ve F-2L8S55S10 kolonlarını, Lusas sonlu elemanlar analizi programında aynı yay katsayısı değeriyle ($k=110$) modellenen çözüm sonuçları karşılaştırıldığında:

Lusas programındaki kuşatma basıncı değeri $1,10\text{N/mm}^2$ den $0,45\text{N/mm}^2$ değerine inmiştir. Boyuna donatı alanı 2 kat artınca, kuşatma basıncı değeri %59 oranında azalmıştır.

Mander beton modelinde kuşatma basıncı değeri $0,83\text{ N/mm}^2$ den $0,92\text{ N/mm}^2$ ye; Saatçioğlu beton modelinde ise $0,69\text{N/mm}^2$ den $0,70\text{N/mm}^2$ ye çıkmıştır.

Deneydeki göçme yükü $995,0\text{kN}$ 'dur. Modeldeki göçme yükü ise $k=110$ yay katsayısı için $1159,2\text{kN}$ 'dur. Boyuna donatı alanı 2 katına çıkarıldığında, göçme yükü değeri modelde 1758kN 'a yükselmiştir.

Boyuna donatı alanı 2 katına çıkarıldığında, aynı yay katsayısı için modeldeki göçme yükü değeri %52 oranında artmıştır.

2) M8S55S10 ve F-2M8S55S10 kolonlarını, Lusas sonlu elemanlar analizi programında aynı yay katsayısıyla ($k=90$) modellenen çözüm sonuçları karşılaştırıldığında:

Lusas programındaki kuşatma basıncı değeri $0,97\text{N/mm}^2$ den $0,57\text{N/mm}^2$ değerine inmiştir. Boyuna donatı alanı 2 kat artınca, kuşatma basıncı değeri %41 oranında azalmıştır.

Mander beton modelinde kuşatma basıncı değeri $0,83\text{N/mm}^2$ den $0,92\text{N/mm}^2$ ye; Saatçioğlu beton modelinde ise $0,69\text{N/mm}^2$ den $0,70\text{N/mm}^2$ ye çıkmıştır.

Deneydeki göçme yükü 1401kN 'dur. Modeldeki göçme yükü ise $k=90$ yay katsayısı için $1387,2\text{kN}$ 'dur. Boyuna donatı alanı 2 katına çıkarıldığında, göçme yükü değeri $1118,8\text{kN}$ elde edilmiştir.

Boyuna donatı alanı 2 katına çıkarıldığında, aynı yay katsayısı için modeldeki göçme yükü değeri %19 oranında azalmıştır.

3) H8S55S10 ve 2H8S55S10 kolonlarını, Lusas sonlu elemanlar analizi programında aynı yay katsayısıyla ($k=90$) modellenen çözüm sonuçları karşılaştırıldığında:

Lusas programındaki kuşatma basıncı değeri $1,06\text{N/mm}^2$ den $0,74\text{N/mm}^2$ değerine inmiştir. Boyuna donatı alanı 2 kat artınca, kuşatma basıncı değeri %30 oranında azalmıştır.

Mander beton modelinde kuşatma basıncı değeri $0,83\text{N/mm}^2$ den $0,92\text{N/mm}^2$ ye; Saatçioğlu beton modelinde ise $0,69\text{N/mm}^2$ den $0,70\text{N/mm}^2$ ye çıkmıştır.

Deneydeki göçme yükü 1580,0kN'dur. Modeldeki göçme yükü ise $k=90$ yay katsayısı için 1882,0kN'dur. Boyuna donatı alanı 2 katına çıkarıldığında, aynı yay katsayısı değeri için 1538,8kN elde edilmiştir.

Boyuna donatı alanı 2 katına çıkarıldığında, aynı yay katsayısı için modeldeki göçme yükü değeri %18 oranında azalmıştır.

Etriye aralığını 100mm'den 55mm'ye indirip, boyuna donatı alanını 2 katına çıkardığımızda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

4) L8S55S55 ve F-2L8S55S55 kolonlarını, Lusas sonlu elemanlar analizi programında aynı yay katsayısıyla ($k=140$) modellenen çözüm sonuçları karşılaştırıldığında:

Lusas programındaki kuşatma basıncı değeri $1,06\text{N/mm}^2$ den $0,55\text{N/mm}^2$ değerine inmiştir. Boyuna donatı alanı 2 katına çıkarıldığında, kuşatma basıncı değeri %48 oranında azalmıştır.

Mander beton modelinde kuşatma basıncı değeri $2,18\text{N/mm}^2$ den $2,40\text{N/mm}^2$ ye; Saatçioğlu beton modelinde ise $1,26\text{N/mm}^2$ den $1,28\text{N/mm}^2$ ye çıkmıştır.

Deneydeki göçme yükü 1075,6kN'dur. Modeldeki göçme yükü ise $k=140$ yay katsayısı için 957,2kN'dur. Boyuna donatı alanı 2 katına çıkarıldığında 790,8kN elde edilmiştir.

Boyuna donatı alanı 2 katına çıkarıldığında, aynı yay katsayısı için modeldeki göçme yükü değeri %17 oranında azalmıştır.

5) M8S55S55 ve F-2M8S55S55 kolonlarını, Lusas sonlu elemanlar analizi programında aynı yay katsayısıyla ($k=70$) modellenen çözüm sonuçları karşılaştırıldığında:

Lusas programındaki kuşatma basıncı değeri $0,55\text{N/mm}^2$ den $0,47\text{N/mm}^2$ değerine inmiştir. Boyuna donatı alanı 2 kat artınca, kuşatma basıncı değeri %14 oranında azalmıştır.

Mander beton modelinde kuşatma basıncı değeri $2,18\text{N/mm}^2$ den $2,40\text{N/mm}^2$ ye; Saatçioğlu beton modelinde ise $1,26\text{N/mm}^2$ den $1,28\text{N/mm}^2$ değerine çıkmıştır.

Deneydeki göçme yükü 1550,3kN'dur. Modeldeki göçme yükü ise $k=70$ yay katsayısı için 1151,6kN'dur. Boyuna donatı alanı 2 katına çıkarıldığında 1425,2kN elde edilmiştir.

Boyuna donatı alanı 2 katına çıkarıldığında, aynı yay katsayısı için modeldeki göçme yükü değeri %19 oranında artmıştır.

6) H8S55S55 ve F-2H8S55S55 kolonlarını, Lusas sonlu elemanlar analizi programında aynı yay katsayısıyla ($k=90$) modellenen çözüm sonuçları karşılaştırıldığında:

Lusas programındaki kuşatma basıncı değeri $0,88\text{N/mm}^2$ 'den $0,93\text{N/mm}^2$ değerine yükselmiştir.

Boyuna donatı alanı 2 katına çıkarıldığında, kuşatma basıncı değeri %5 oranında artmıştır.

Mander beton modelinde kuşatma basıncı değeri $2,18\text{N/mm}^2$ 'den $2,40\text{N/mm}^2$ 'ye; Saatçioğlu beton modelinde ise $1,26\text{N/mm}^2$ den $1,28\text{N/mm}^2$ değerine çıkmıştır.

Deneydeki göçme yükü $1721,5\text{kN}$ 'dur. Modeldeki göçme yükü ise $k=90$ yay katsayısı için $1636,8\text{kN}$ 'dur. Boyuna donatı alanı 2 katına çıkarıldığında $2400,0\text{kN}$ elde edilmiştir.

Boyuna donatı alanı 2 katına çıkarıldığında, aynı yay katsayısı için modeldeki göçme yükü değeri %32 oranında artmıştır.

7) C1L4S8 kolonu ile C1L8S8 kolonunu karşılaştırdığımızda; deney göçme yükü $700,1\text{kN}$ 'dan $574,8\text{kN}$ 'a düşmüştür. Sonlu eleman analizi sonucunda göçme yükü, $521,2\text{kN}$ 'dan $584,0\text{kN}$ 'a ve Mander vd., (1988) beton modeline göre hesap yapıldığında $581,3\text{kN}$ 'dan $619,5\text{kN}$ 'a yükselmiştir. Kuşatma basınçları; sonlu eleman analizi sonucunda $0,40\text{N/mm}^2$ 'den $0,30\text{N/mm}^2$ 'ye düşmüştür. Mander vd., (1988) beton modelinde ise $0,76\text{N/mm}^2$ 'den $1,11\text{N/mm}^2$ 'ye yükselmiştir.

C1L4S12 kolonu ile C1L8S12 kolonunu karşılaştırdığımızda; deney göçme yükü $743,3\text{kN}$ 'dan $768,9\text{kN}$ 'a, sonlu eleman analizi sonucunda, $553,6\text{kN}$ 'dan $608,4\text{kN}$ 'a yükselmiştir. Mander vd., (1988) beton modeline göre hesap yapıldığında $566,7\text{kN}$ 'dan $601,3\text{kN}$ 'a yükselmiştir. Kuşatma basınçları; sonlu eleman analizi sonucunda $0,37\text{N/mm}^2$ 'den $0,25\text{N/mm}^2$ 'ye düşmüştür. Mander vd., (1988) beton modelinde ise $0,84\text{N/mm}^2$ 'den $1,18\text{N/mm}^2$ 'ye yükselmiştir.

Etriye çapı 8mm ve etriye çapı 12mm olan deney kolonlarının kuşatma basıncı değerleri karşılaştırıldığında; Lusas sonlu elemanlar analizi programında modellenen kolonların kuşatma basınçları sekiz boyuna donatılı konfigürasyonda düşerken, Mander vd., (1988) beton modelinde kuşatma basıncı değerleri yükselmektedir.

L8S55S10 kolonunda yükün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerine kadar, en düşük göçme yüküne ve en düşük kuşatma basıncına sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.5).

Yükün sıçrama yaptığı $k=110$ değerinden sonra, bu kolon en yüksek kuşatma basıncı değerine ulaşmaktadır ($k=120$ için $KB=6,297\text{N/mm}^2$) ve bu değer $k=150$ 'ye kadar $5,9\text{N/mm}^2$ ile $6,0\text{N/mm}^2$ arasında değişmektedir.

F-2L8S55S10 kolonunda ise göçme yükü ve kuşatma basıncı değerlerinde sıçrama olmamıştır (Şekil 6.4 ve Şekil 6.6). Çizelge 6.6'da verilen tüm yay katsayısı değerlerinde, en düşük kuşatma basıncına sahip kolon olduğu görülmektedir. Bu kolonun göçme yükünün sıçrama yaptığı yay katsayısı değeri araştırılmış ve $k=368$ değerinde göçme yükünde ve kuşatma basıncı değerinde sıçrama olduğu görülmüştür.

M8S55S10 kolonunun beton dayanımı 39N/mm^2 olmasına rağmen, yükün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerinden itibaren ($k=100$), en yüksek göçme yüküne ve kuşatma basıncı değerine ulaşmaktadır.

F-2M8S55S10 kolonunda ise $k=150$ yay katsayısı değerinde, göçme yükünde ve kuşatma basıncında sıçrama görülmektedir (Çizelge 6.4, Çizelge 6.6, Şekil 6.4 ve Şekil 6.6).

En yüksek beton dayanımına sahip olan H8S55S10 kolonunda ise bu durum tam tersidir. $k=0$ değerinde en yüksek kuşatma basıncına sahip olan bu kolon, diğer kolonların göçme yüklerinin sıçrama yaptığı yay katsayısı değerinden sonra en düşük kuşatma basıncına sahip olduğu görülmektedir (Şekil 6.3).

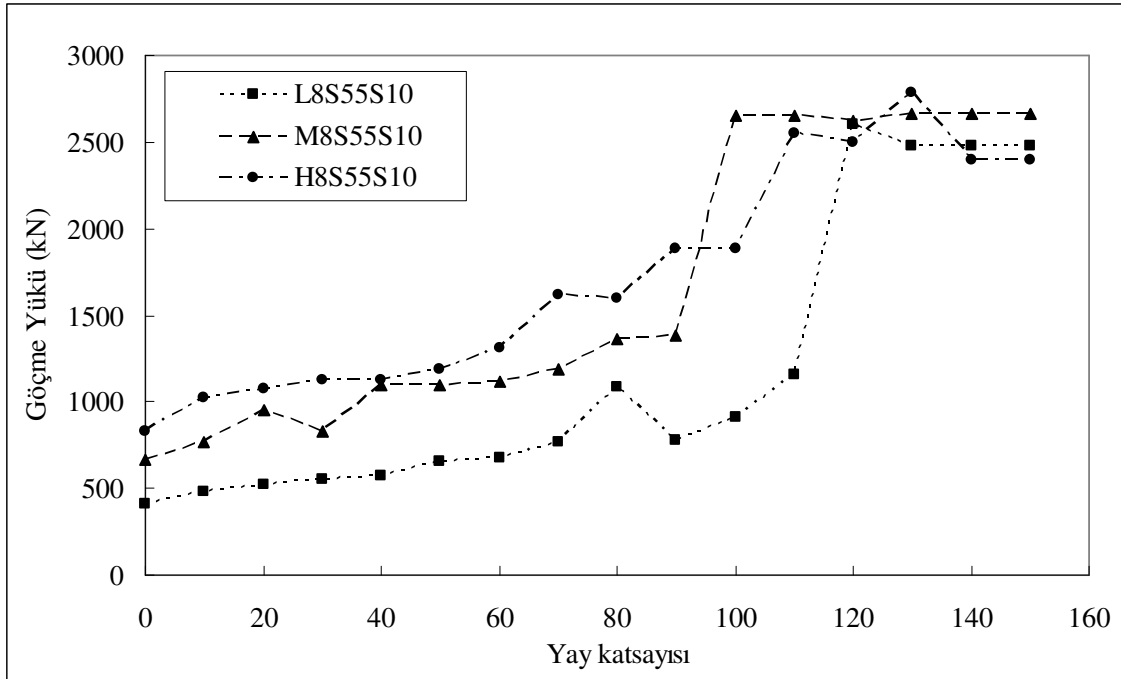
F-2H8S55S10 kolonunda ise $k=130$ yay katsayısı değerinde, göçme yükünde ve kuşatma basıncında sıçrama görülmektedir.

Yay katsayısı değerinin artması, yüksek mukavemetli betonun kuşatma basıncı değerini düşürmektedir.

Boyuna donatı alanı 2 katına çıktığında, sıçrama olan yay katsayısı değerlerinde de artış görülmektedir.

Çizelge 6.3 Sekiz donatılı, etriye çapı 6mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

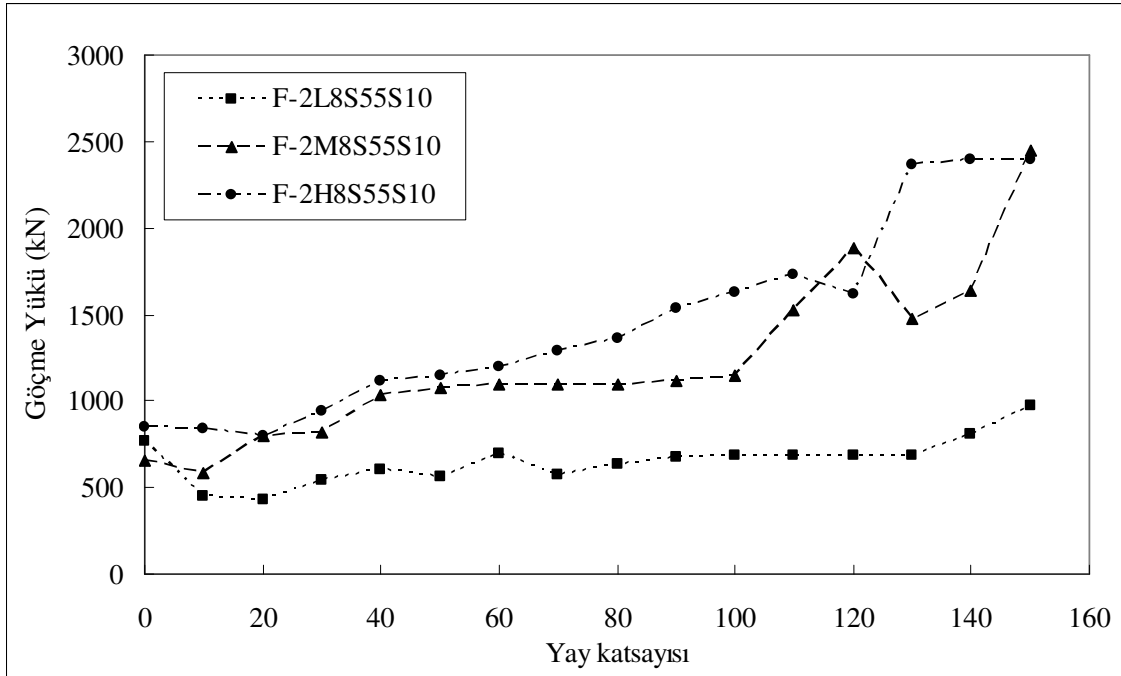
	L8S55S10	M8S55S10	H8S55S10
YK	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)
0	409,6	666,4	826,4
10	476,4	768,8	1024,0
20	522,0	952,0	1077,6
30	557,6	834,0	1125,2
40	574,8	1095,6	1121,6
50	660,0	1098,4	1187,2
60	679,6	1116,0	1312,0
70	770,8	1186,0	1616,8
80	1085,2	1358,8	1594,8
90	773,2	1387,2	1882,0
100	907,6	2651,2	1879,6
110	1159,2	2648,8	2545,6
120	2596,8	2622,4	2502,4
130	2475,6	2662,8	2786,0
140	2474,0	2662,4	2400,0
150	2473,2	2662,0	2400,0



Şekil 6.3 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

Çizelge 6.4 Sekiz donatılı, etriye çapı 6mm, boyuna donatı alanı 2 katına çıkarılan kolonların farklı beton mukavemetlerinde GY-YK değişimi

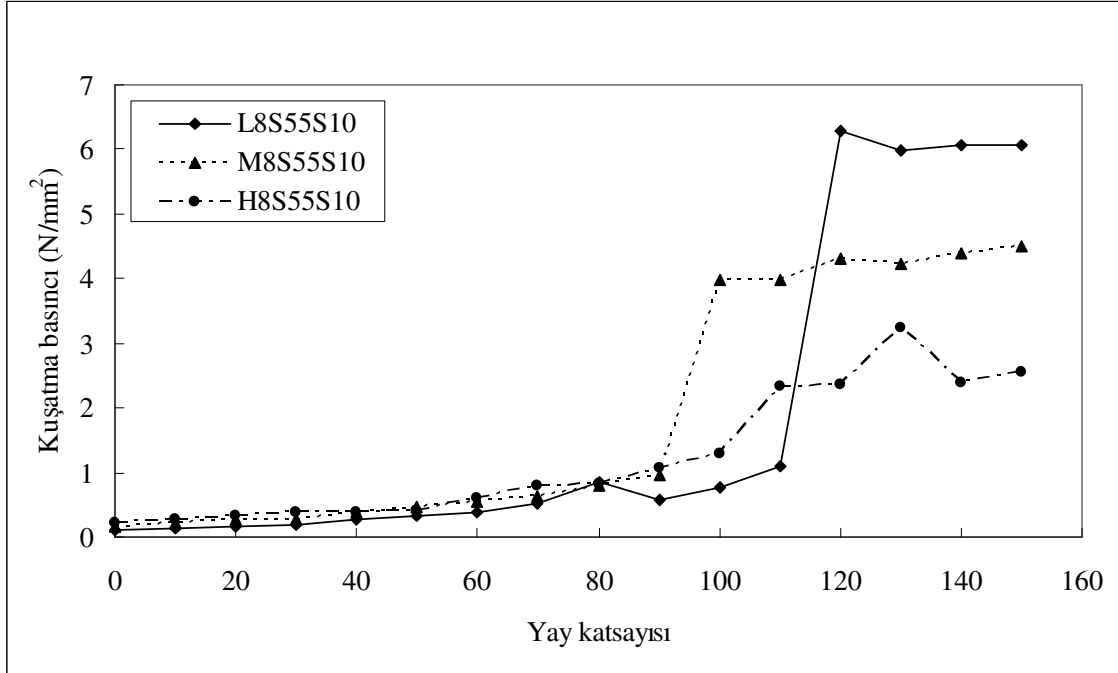
	F-2L8S55S10	F-2M8S55S10	F-2H8S55S10
YK	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)
0	770,0	650,4	847,2
10	448,8	585,2	836,0
20	432,4	795,6	796,0
30	540,0	814,4	941,6
40	605,6	1032,0	1115,6
50	564,8	1075,6	1147,6
60	696,4	1096,8	1195,2
70	577,2	1100,0	1290,8
80	631,2	1096,8	1362,4
90	674,8	1118,8	1538,8
100	684,8	1150,8	1628,4
110	688,0	1528,0	1726,0
120	681,6	1882,4	1620,0
130	689,6	1477,2	2362,8
140	806,8	1636,8	2400,0
150	976,4	2447,6	2400,0



Şekil 6.4 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

Çizelge 6.5 Sekiz donatılı, etriye çapı 6mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

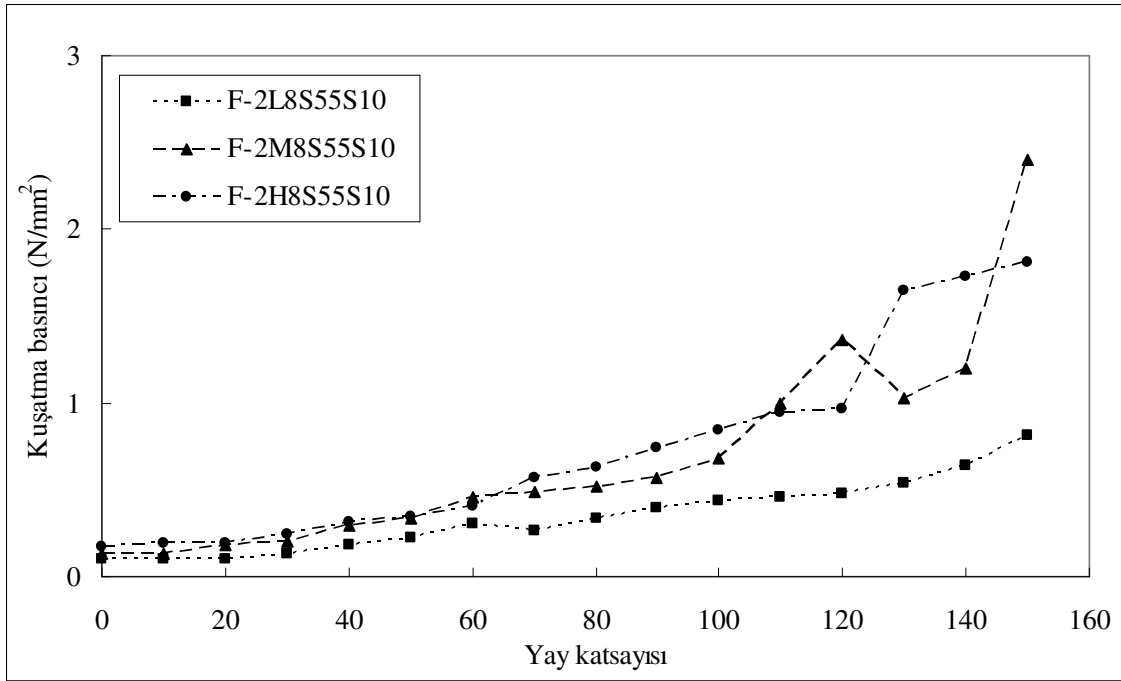
	L8S55S10	M8S55S10	H8S55S10
YK	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)
0	0,104	0,166	0,209
10	0,134	0,211	0,279
20	0,157	0,272	0,322
30	0,187	0,270	0,380
40	0,272	0,390	0,393
50	0,329	0,472	0,425
60	0,372	0,562	0,612
70	0,518	0,631	0,797
80	0,847	0,793	0,818
90	0,589	0,965	1,059
100	0,764	3,976	1,283
110	1,100	3,971	2,337
120	6,297	4,304	2,356
130	5,983	4,224	3,238
140	6,067	4,391	2,385
150	6,059	4,513	2,553



Şekil 6.5 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

Çizelge 6.6 Sekiz donatılı, etriye çapı 6mm, boyuna donatı alanı 2 katına çıkarılan kolonların farklı beton mukavemetlerinde KB-YK değişimi

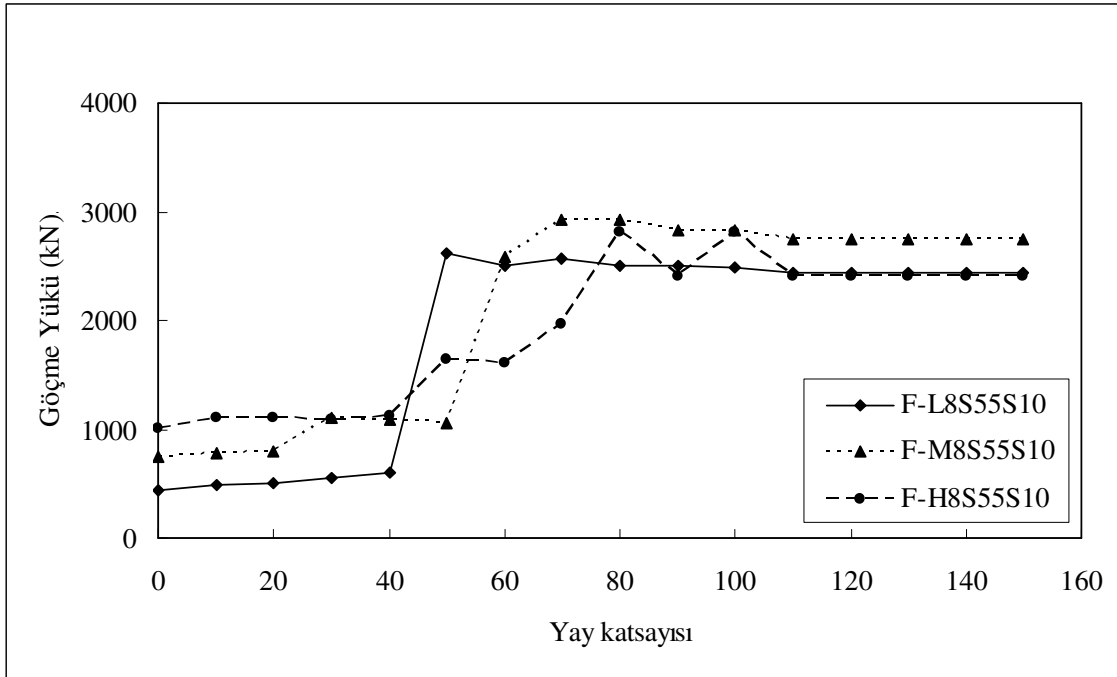
	F-2L8S55S10	F-2M8S55S10	F-2H8S55S10
YK	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)
0	0,104	0,135	0,176
10	0,104	0,131	0,189
20	0,102	0,179	0,192
30	0,135	0,201	0,241
40	0,181	0,292	0,319
50	0,223	0,338	0,343
60	0,307	0,457	0,402
70	0,268	0,485	0,565
80	0,337	0,517	0,630
90	0,393	0,567	0,741
100	0,433	0,681	0,840
110	0,453	0,992	0,946
120	0,482	1,367	0,961
130	0,543	1,027	1,645
140	0,637	1,204	1,727
150	0,815	2,403	1,808



Şekil 6.6 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

Çizelge 6.7 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı $64,5\text{mm}^2$, etriye aralığı 100mm olan kolonların farklı beton mukavemetlerindeki GY-YK değişimi

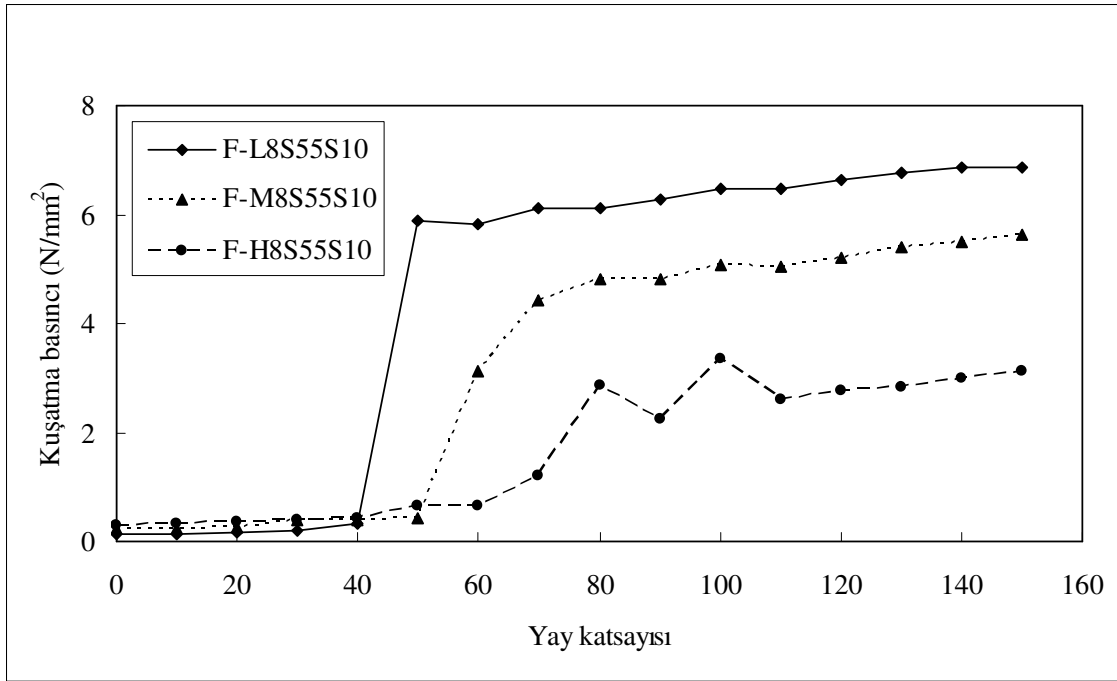
	F-L8S55S10	F-M8S55S10	F-H8S55S10
YK	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)
0	435,2	752,4	1004,0
10	486,8	782,0	1102,4
20	504,0	791,2	1107,2
30	556,4	1104,4	1090,8
40	605,6	1086,4	1114,8
50	2624,0	1050,4	1644,8
60	2501,2	2592,0	1603,6
70	2567,6	2930,0	1971,2
80	2498,0	2930,4	2815,2
90	2496,0	2827,6	2400,0
100	2494,4	2827,6	2815,2
110	2444,8	2753,2	2400,0
120	2443,6	2752,8	2400,0
130	2442,4	2752,4	2400,0
140	2441,2	2752,0	2400,0
150	2440,4	2751,6	2400,0



Şekil 6.7 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı $64,5\text{mm}^2$, etriye aralığı 100mm olan kolonların farklı beton mukavemetlerindeki GY-YK değişimi

Çizelge 6.8 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı $64,5\text{mm}^2$, etriye aralığı 100mm olan kolonların farklı beton mukavemetlerindeki KB-YK değişimi

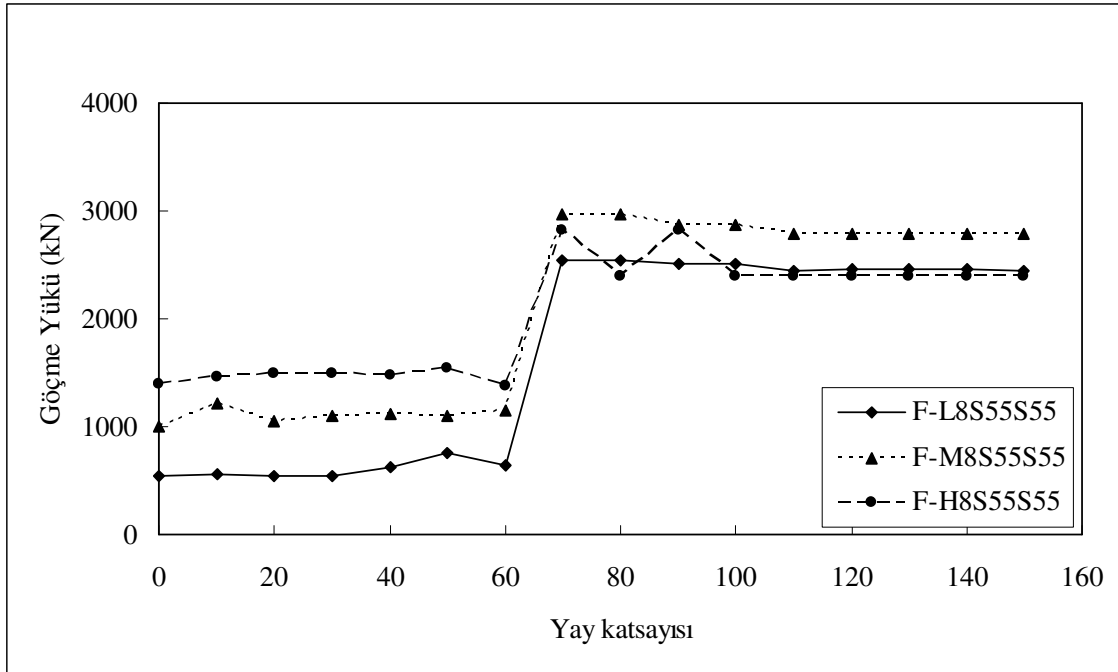
	F-L8S55S10	F-M8S55S10	F-H8S55S10
YK	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)
0	0,116	0,219	0,299
10	0,143	0,233	0,338
20	0,171	0,262	0,369
30	0,207	0,387	0,378
40	0,313	0,397	0,409
50	5,902	0,422	0,637
60	5,819	3,136	0,659
70	6,123	4,425	1,210
80	6,111	4,810	2,863
90	6,287	4,829	2,233
100	6,467	5,078	3,363
110	6,465	5,039	2,588
120	6,644	5,218	2,764
130	6,768	5,382	2,841
140	6,847	5,502	2,984
150	6,863	5,630	3,107



Şekil 6.8 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı $64,5\text{mm}^2$, etriye aralığı 100mm olan kolonların farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

Çizelge 6.9 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı $64,5\text{mm}^2$, etriye aralığı 55mm olan kolonların farklı beton mukavemetlerindeki GY-YK değişimi

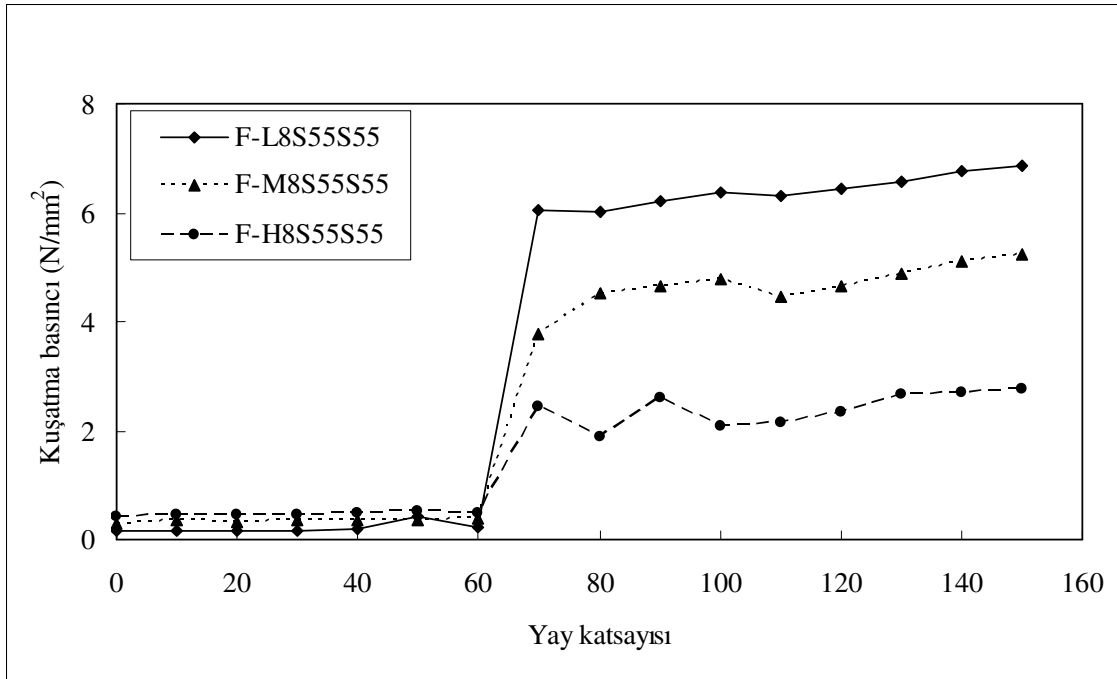
	F-L8S55S55	F-M8S55S55	F-H8S55S55
YK	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)
0	545,6	993,6	1390,0
10	552,0	1205,6	1465,2
20	544,8	1051,2	1498,4
30	540,0	1092,8	1489,6
40	626,0	1118,0	1479,6
50	750,8	1096,4	1544,8
60	636,0	1140,0	1380,0
70	2541,6	2973,6	2827,2
80	2540,4	2974,0	2400,0
90	2510,4	2865,6	2827,2
100	2508,8	2865,6	2400,0
110	2449,2	2787,2	2400,0
120	2453,6	2786,8	2400,0
130	2452,4	2786,4	2400,0
140	2451,2	2786,0	2400,0
150	2450,4	2785,6	2400,0



Şekil 6.9 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı $64,5\text{mm}^2$, etriye aralığı 55mm olan kolonların farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

Çizelge 6.10 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı $64,5\text{mm}^2$, etriye aralığı 55mm olan kolonların farklı beton mukavemetlerindeki KB-YK değişimi

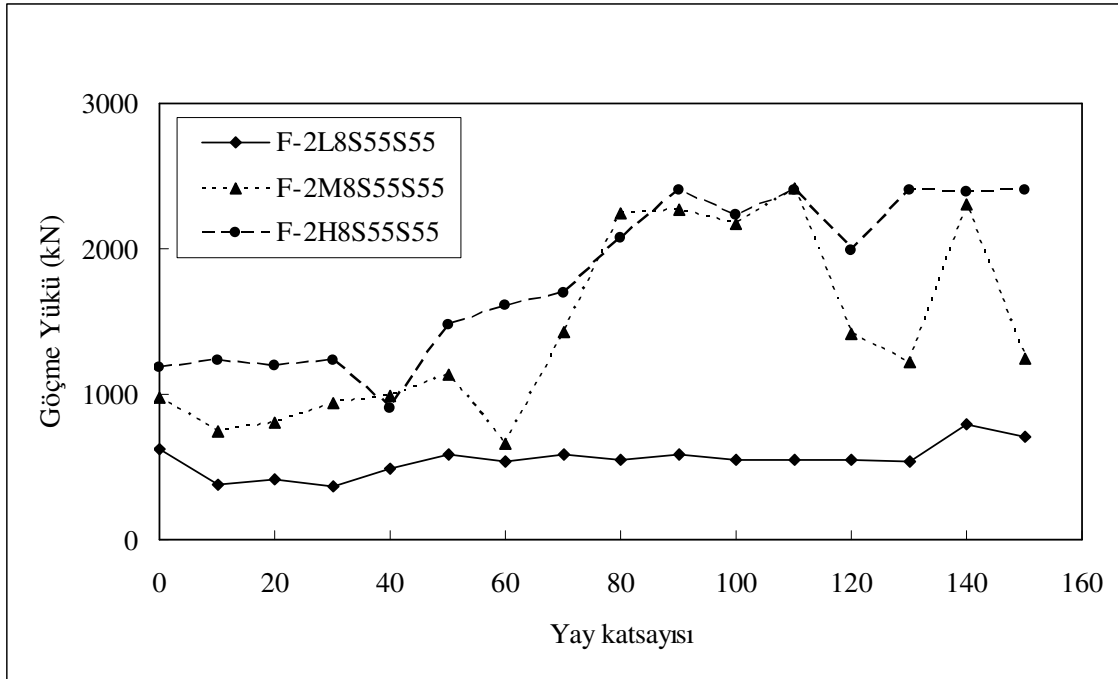
	F-L8S55S55	F-M8S55S55	F-H8S55S55
YK	Kuşatma Basıncı (N/mm^2)	Kuşatma Basıncı (N/mm^2)	Kuşatma Basıncı (N/mm^2)
0	0,153	0,288	0,416
10	0,157	0,350	0,440
20	0,163	0,324	0,465
30	0,173	0,345	0,468
40	0,201	0,371	0,492
50	0,414	0,373	0,536
60	0,242	0,405	0,493
70	6,058	3,757	2,425
80	6,032	4,534	1,879
90	6,205	4,636	2,599
100	6,364	4,780	2,069
110	6,296	4,450	2,142
120	6,452	4,642	2,342
130	6,578	4,864	2,656
140	6,780	5,108	2,697
150	6,857	5,245	2,749



Şekil 6.10 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı $64,5\text{mm}^2$, etriye aralığı 55mm olan kolonların farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

Çizelge 6.11 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı 258mm^2 , etriye aralığı 55mm olan kolonların farklı beton mukavemetlerindeki GY-YK değişimi

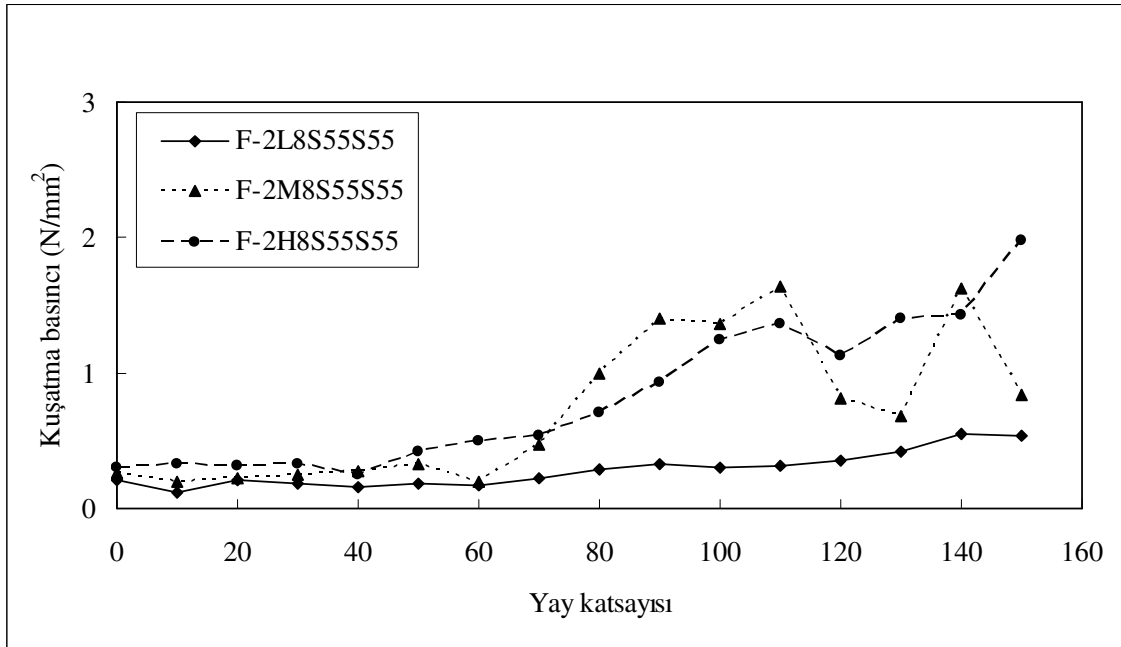
	F-2L8S55S55	F-2M8S55S55	F-2H8S55S55
YK	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)
0	622,4	974,4	1186,8
10	376,8	741,6	1228,8
20	412,8	800,0	1195,6
30	360,0	934,0	1229,2
40	487,6	990,8	900,0
50	590,4	1134,8	1478,8
60	536,0	660,0	1615,6
70	584,0	1425,2	1692,4
80	546,0	2242,0	2070,4
90	582,0	2264,8	2400,0
100	545,2	2170,0	2236,0
110	553,2	2415,6	2400,0
120	550,4	1418,4	1986,0
130	540,0	1214,4	2400,0
140	790,8	2302,4	2388,8
150	707,6	1244,4	2400,0



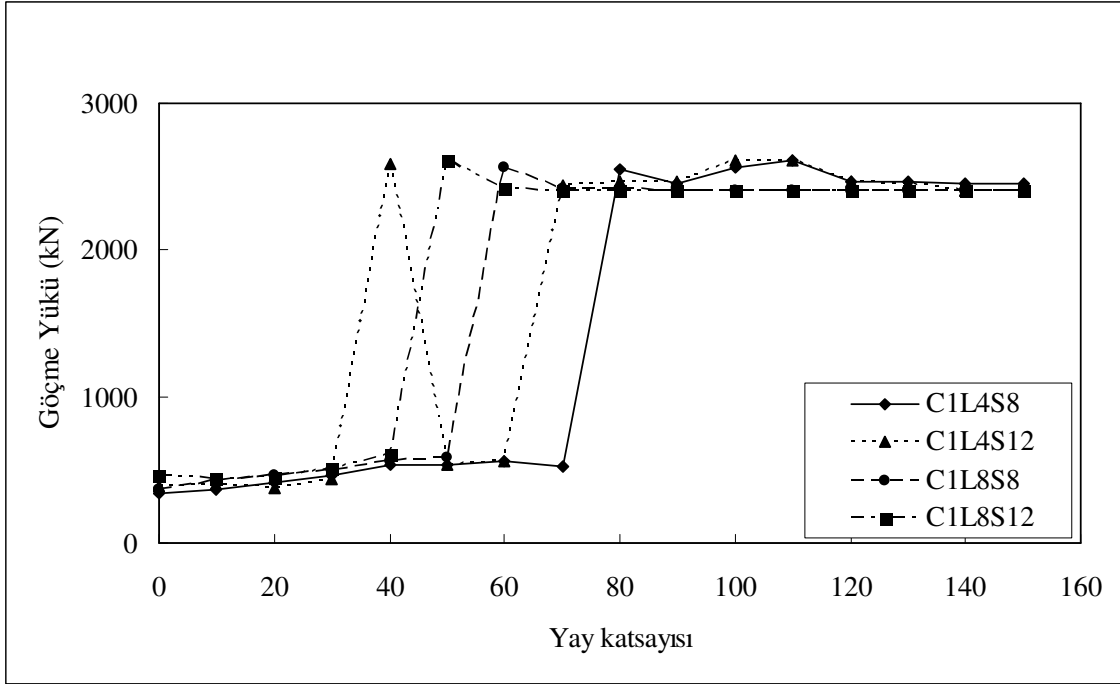
Şekil 6.11 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı 258mm^2 , etriye aralığı 55mm olan kolonların, farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

Çizelge 6.12 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı 258mm^2 , etriye aralığı 55mm olan kolonların farklı beton mukavemetlerindeki KB-YK değişimi

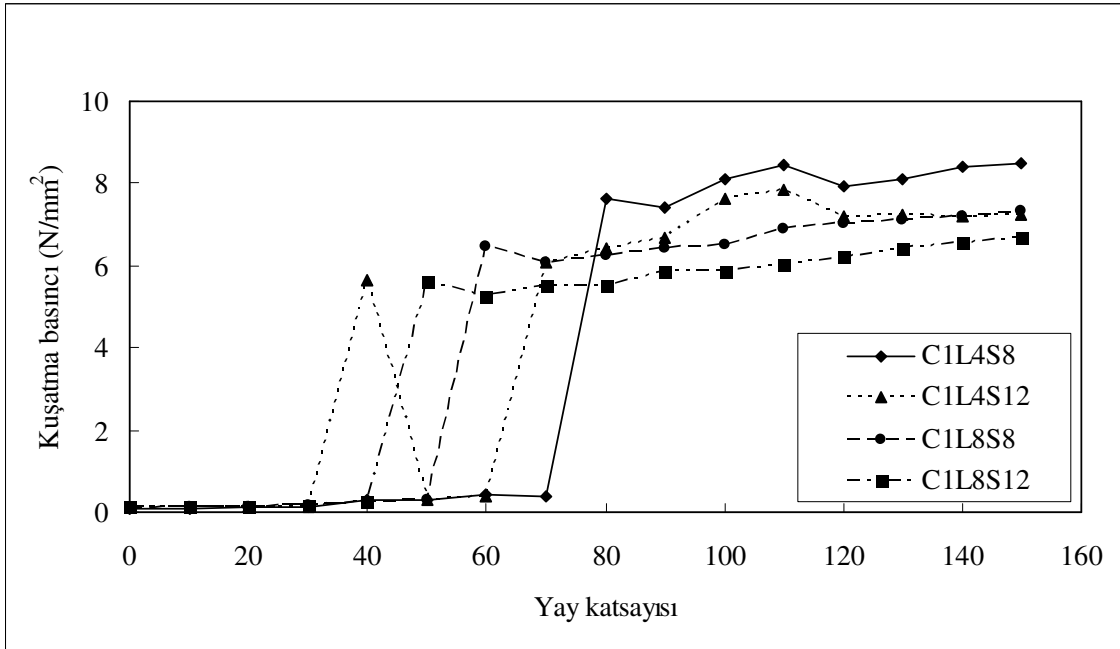
	F-2L8S55S55	F-2M8S55S55	F-2H8S55S55
YK	Kuşatma Basıncı (N/mm^2)	Kuşatma Basıncı (N/mm^2)	Kuşatma Basıncı (N/mm^2)
0	0,210	0,257	0,307
10	0,112	0,196	0,323
20	0,214	0,217	0,320
30	0,180	0,254	0,332
40	0,154	0,271	0,253
50	0,187	0,329	0,413
60	0,171	0,196	0,496
70	0,222	0,469	0,538
80	0,287	0,996	0,704
90	0,323	1,402	0,930
100	0,306	1,362	1,246
110	0,319	1,641	1,360
120	0,353	0,816	1,122
130	0,419	0,683	1,396
140	0,548	1,622	1,428
150	0,538	0,836	1,974



Şekil 6.12 Sekiz donatılı, boyuna donatı alanı 258mm^2 , etriye aralığı 55mm olan kolonların farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi



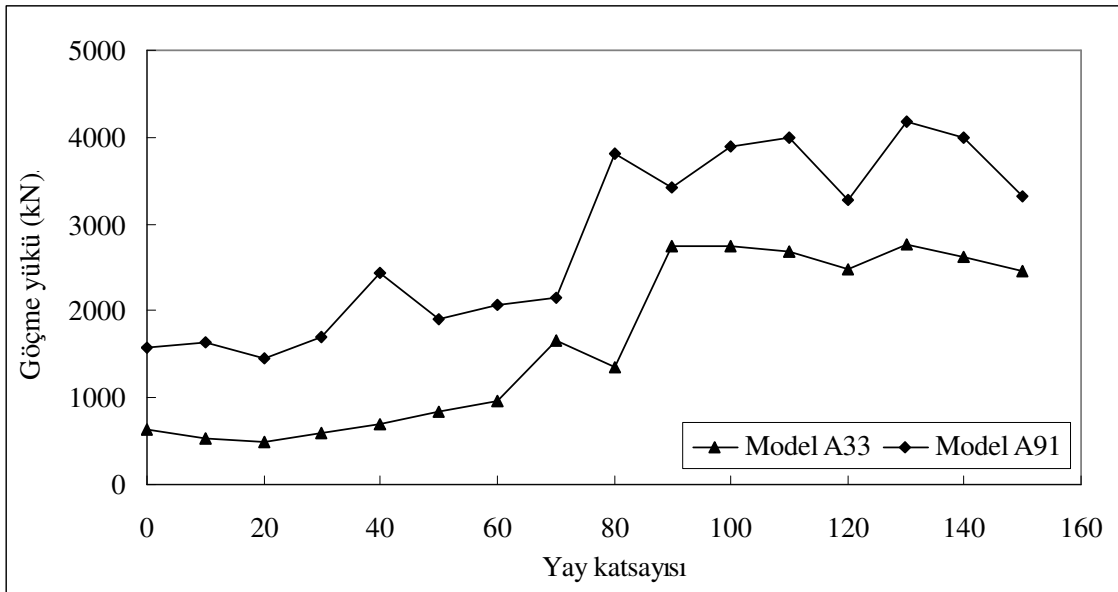
Şekil 6.13 Dört ve sekiz donatılı, etriye çapları 8mm ve 12mm olan kolonlar için GY-YK değişimi



Şekil 6.14 Dört ve sekiz donatılı, etriye çapları 8mm ve 12mm olan kolonlar için KB-YK değişimi

Çizelge 6.13 Dört donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

	Model A33	Model A91
YK	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)
0	644,8	1585,2
10	535,2	1645,6
20	495,6	1445,2
30	590,4	1690,8
40	702,4	2439,6
50	848,8	1897,2
60	956,0	2066
70	1656,8	2144,4
80	1360,0	3807,6
90	2745,2	3430,0
100	2746,0	3895,6
110	2678,4	4004,0
120	2481,2	3273,6
130	2775,2	4172,0
140	2619,6	3998,4
150	2452,0	3323,2



Şekil 6.15 Dört donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

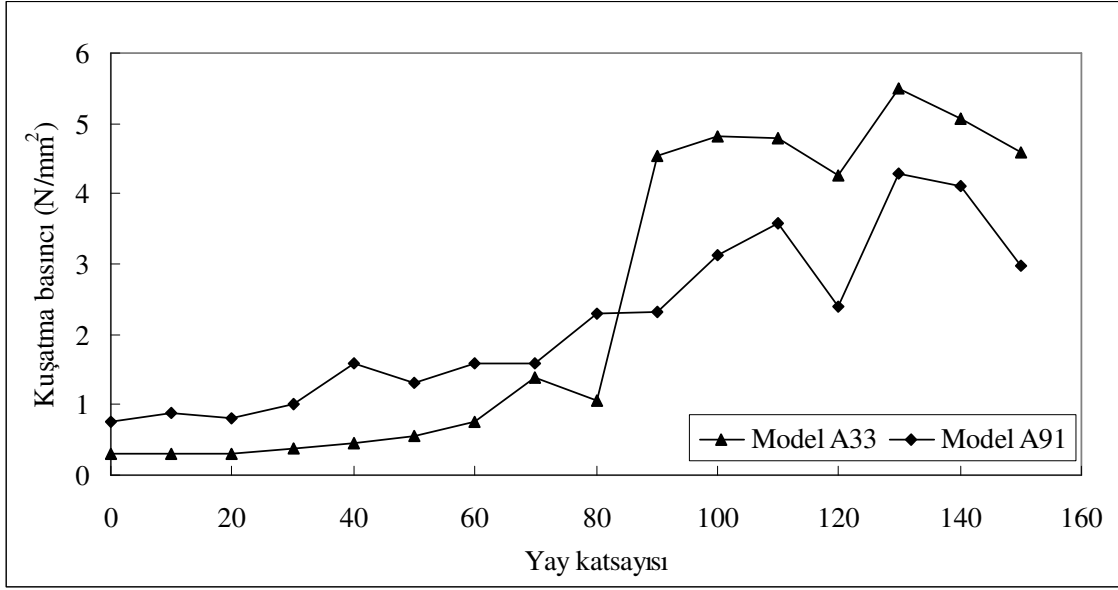
Beton dayanımı 91 N/mm^2 olan Model A91 kolonunun sonlu eleman analiz sonuçlarına göre, beton dayanımı 33 N/mm^2 olan Model A33 kolonundan daha yüksek değerlerde göçme yüküne ulaştığı görülmektedir (Şekil 6.15). Beton mukavemeti arttıkça, betonun dayanımının yükseldiği aşıkardır.

İncelemeye alınan her iki kolonun kuşatma basınçları oranı arasında, göçme yükünün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerine kadar, 2 ile 3 kat arasında bir değişme olduğu; göçme yükünün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerinden sonra, kuşatma basınçları oranı arasında 0,51 ile 0,81 değerleri arasında bir değişme olduğu görülmektedir (Çizelge 6.14). Betonun mukavemeti ve yay katsayısı değeri arttıkça, kuşatma basıncı değeri azalmaktadır.

Kolonun beton mukavemeti arttıkça, betonun dayanımının ve sünekliğinin beraberinde arttığı, belli bir noktadan sonra dayanım artmasına rağmen sünekliğin aynı ölçüde artmadığı; yüksek mukavemetli betonların dayanımının yüksek olmasına rağmen sünekliğinin az olduğu bilinen bir gerçektir. Bu nedenle belli bir yay katsayısı değerinden sonra beton mukavemeti yüksek olan kolonun kuşatma basıncının da düşmesi beklenir (Çizelge 6.14, Şekil 6.16).

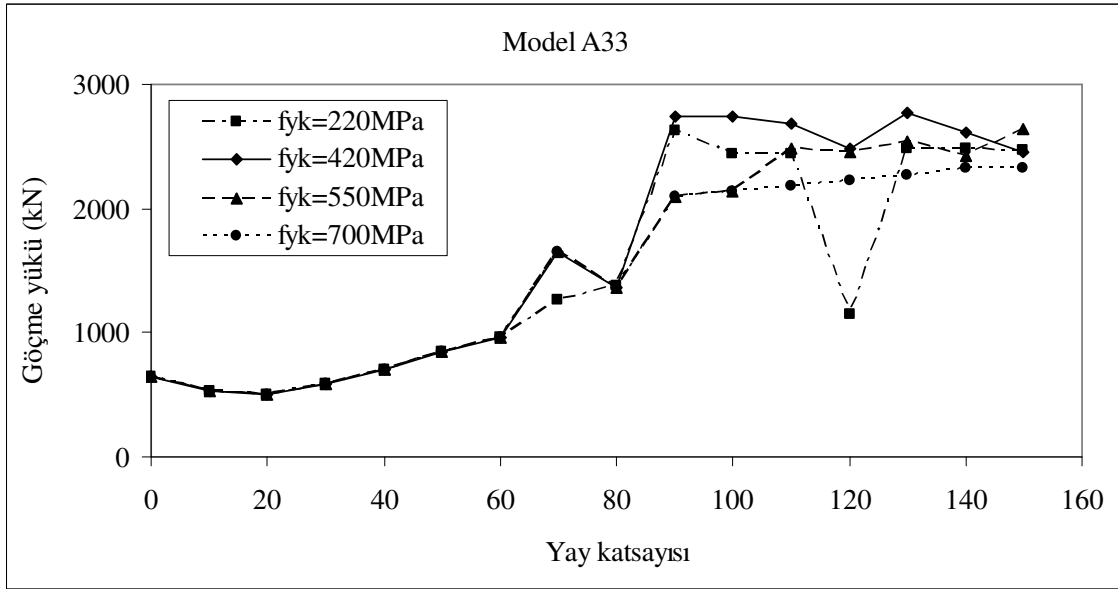
Çizelge 6.14 Dört donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

	Model A33	Model A91	
YK	Kuşatma Basıncı (N/mm^2)	Kuşatma Basıncı (N/mm^2)	Kuşatma Basınçları Oranı (A91/A33)
0	0,312	0,763	2,44
10	0,290	0,886	3,06
20	0,299	0,810	2,71
30	0,384	1,011	2,63
40	0,459	1,592	3,47
50	0,558	1,308	2,34
60	0,766	1,580	2,06
70	1,377	1,578	1,15
80	1,063	2,288	2,15
90	4,542	2,332	0,51
100	4,818	3,124	0,65
110	4,778	3,572	0,75
120	4,260	2,401	0,56
130	5,485	4,290	0,78
140	5,061	4,113	0,81
150	4,590	2,966	0,65

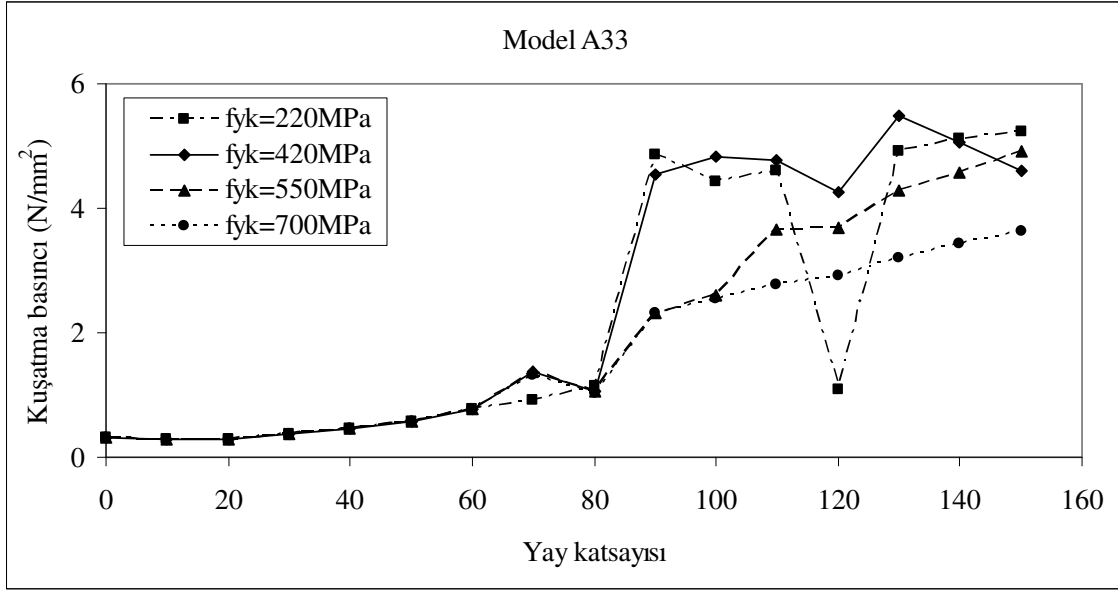


Şekil 6.16 Dört donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

6.2.2 Boyuna donatı akma dayanımının kuşatma basıncına etkisi



Şekil 6.17 Model A33 kolonunun, boyuna donatı farklı akma dayanımları için GY-YK değişimi



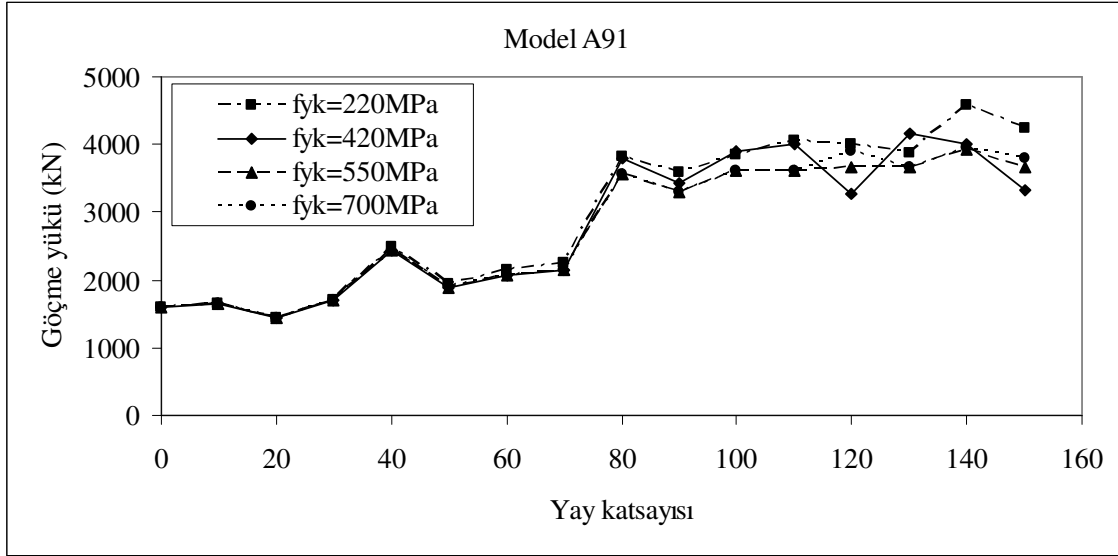
Şekil 6.18 Model A33 kolonunun, boyuna donatı farklı akma dayanımları için KB-YK değişimi

Model A33 kolonu boyuna donatılarının akma dayanımını 220N/mm^2 , 420N/mm^2 , 550N/mm^2 ve 700N/mm^2 için incelediğimizde, sonlu elemanlar analizi sonucunda yükün sıçrama yapmadan önceki yay katsayısı değerine ($k=60$) kadar, göçme yükleri ve kuşatma basıncı değerleri aynıdır (Şekil 6.17 ve Şekil 6.18). Yükün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerinden itibaren ($k=60$); akma dayanımı 220N/mm^2 ve 420N/mm^2 olan kolonların, akma dayanımı 550N/mm^2 ve 700N/mm^2 olan kolonlardan daha yüksek bir değerde göçme yüküne ve kuşatma basıncına ulaşıldığı görülmektedir.

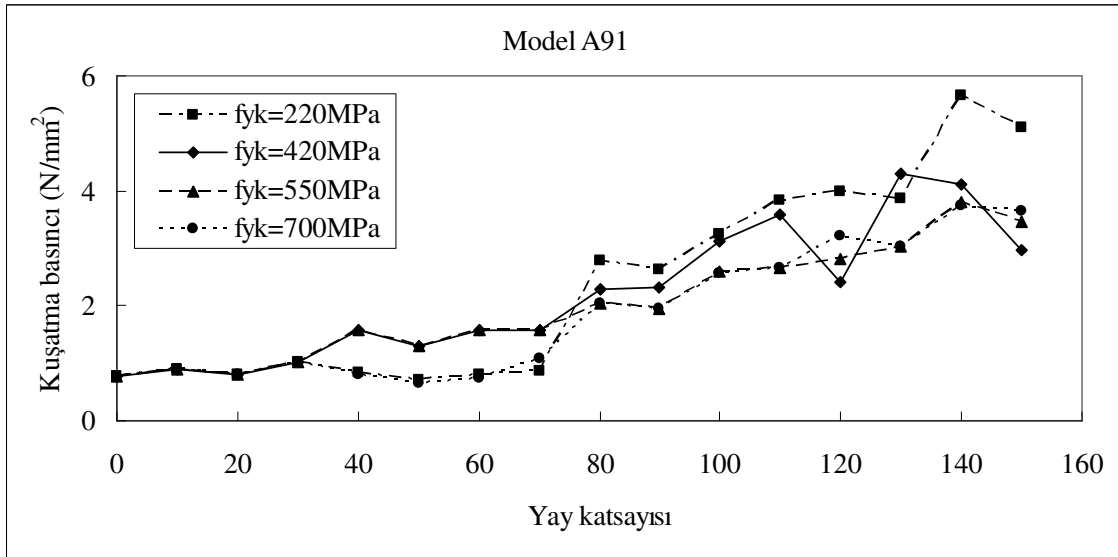
Model A91 kolonunda, yükün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerine kadar ($k=80$), göçme yükleri değerleri aynıdır (Şekil 6.19). Göçme yükünün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerinden itibaren, her iki kolonun göçme yükü ve kuşatma basıncı eğrilerinin Model A33'teki kolonlara kıyasla daha da yakınlığı görülmektedir (Şekil 6.20).

Yükün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerinden sonra; boyuna donatı akma dayanımı yüksek olan kolonların, boyuna donatı akma dayanımı düşük olan kolonlara nazaran daha düşük göçme yükü ve kuşatma basıncı değerleri aldığı görülmektedir.

Model A33 kolonu ile Model A91 kolonunu kıyaslırsak; Model A91 kolonunda beton mukavemetinin artması sonucu, boyuna donatı akma dayanımları farklı olan kolonların birbirine yakın göçme yükü değerleri ve kuşatma basıncı değerleri aldığı görülmektedir (Şekil 6.19 ve Şekil 6.20).



Şekil 6.19 Model A91 kolonunun, boyuna donatı farklı akma dayanımları için GY-YK değişimi



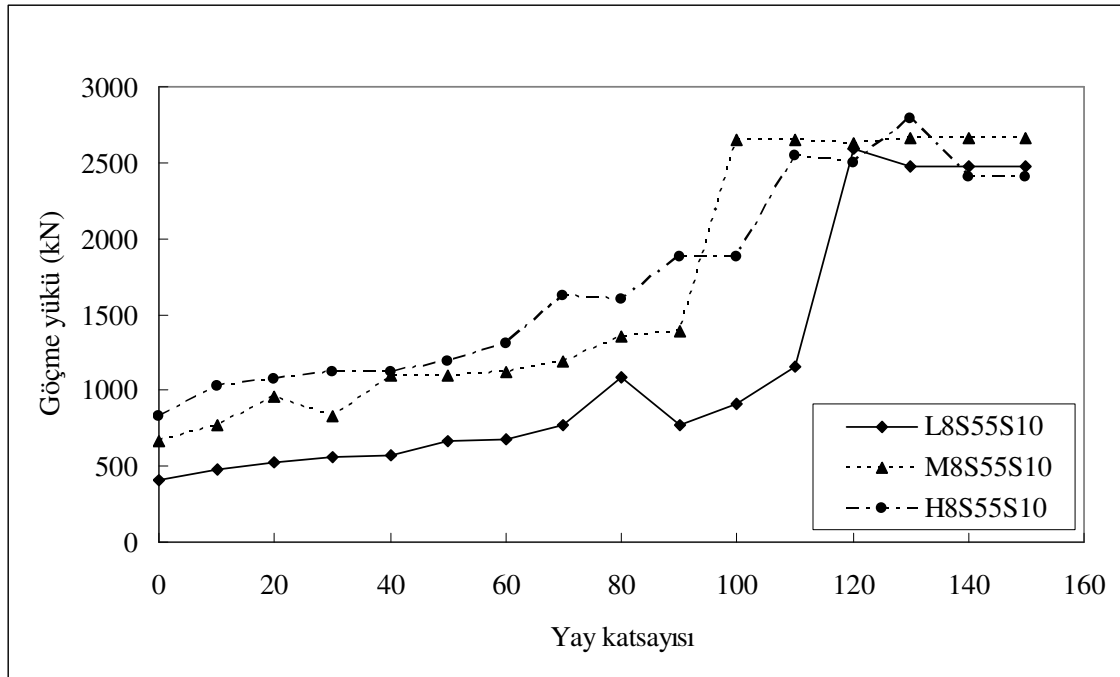
Şekil 6.20 Model A91 kolonunun, boyuna donatı farklı akma dayanımları için KB-YK değişimi

6.2.3 Etriye çapının kuşatma basıncına etkisi

6.2.3.1 Etriye apı sabit, beton mukavemeti değişken olan kolonların incelenmesi

Çizelge 6.15 Sekiz donatılı, etriye çapı 6mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

	L8S55S10	M8S55S10	H8S55S10
YK	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)
0	409,6	666,4	826,4
10	476,4	768,8	1024,0
20	522,0	952,0	1077,6
30	557,6	834,0	1125,2
40	574,8	1095,6	1121,6
50	660,0	1098,4	1187,2
60	679,6	1116,0	1312,0
70	770,8	1186,0	1616,8
80	1085,2	1358,8	1594,8
90	773,2	1387,2	1882,0
100	907,6	2651,2	1879,6
110	1159,2	2648,8	2545,6
120	2596,8	2622,4	2502,4
130	2475,6	2662,8	2786,0
140	2474,0	2662,4	2400,0
150	2473,2	2662,0	2400,0



şekil 6.21 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

Sonlu elemanlar analiz sonucuna göre Çizelge 6.15'deki kolonların verilen yay katsayısı değerine göre göçme yükü değerleri belirlenmiştir. Beklendiği üzere, beton mukavemeti yükseldikçe, kolonların taşıyabileceği yükte artmaktadır. Yükleme sıçrama yaptığı yay katsayısı değerinden sonra her üç kolonda aynı seviyedeki değerlere ulaşmaktadır. Beton dayanımı 39MPa olan M8S55S10 kolonu sıçramadan sonra genelde en büyük göçme yükü değerine ulaşmaktadır. Sadece $k=130$ değerinde H8S55S10 kolonu en yüksek göçme yükü değerlerine ulaşmaktadır.

Kuşatma basınçlarının karşılaştırılmasında bu durum biraz daha farklıdır. Yükleme sıçrama yaptığı yay katsayısı değerine kadar, beton mukavemeti yüksek olan kolonların kuşatma basıncı daha yüksektir (Çizelge 6.16). Sıçrama anından itibaren bu durum tam tersine dönmektedir. Beton mukavemeti daha düşük olan L8S55S10 kolonunun kuşatma basıncı değeri, diğer iki kolona nazaran daha yüksektir. Bu da beton mukavemetinin belli bir değere kadar azalması sonucunda, kolonun sünekliğini arttırdığı şeklinde açıklanabilir. Yüksek mukavemetli betonların dayanımı her zaman daha yüksektir. Kolonun taşıyabileceği maksimum yük değerine geldikten sonra, normal dayanımlı betona kıyasla daha az sünektirler.

Etriye çapının kuşatma basıncına etki eden bir faktör olup olmadığını anlamak için Çizelge 6.1'deki kolonların (Model A33 ve Model A91 hariç) etriye çapları; 6mm, 8mm ve 12mm alınıp, incelenmiştir. Etriye çapının 6mm'den, 8mm ve 12mm'ye çıkardığımızda, göçme yükü ve kuşatma basıncı değerlerinde yükselme gözlenmiştir.

Çizelge 6.15 incelendiğinde; L8S55S10 kolonu göçme yükünün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerine kadar, en düşük göçme yüküne ve en düşük kuşatma basıncına sahip olduğu görülmektedir. Yükleme sıçrama yaptığı $k=110$ değerinden sonra, bu kolon en yüksek kuşatma basıncı değerine ulaşmaktadır ($k=120$ için $KB=6,297\text{N/mm}^2$) ve bu değer $k=150$ 'ye kadar $5,9\text{N/mm}^2$ ile $6,0\text{N/mm}^2$ arasında değişmektedir.

En yüksek mukavemetli H8S55S10 kolonunda bu durum tam tersidir. $k=0$ değerinde en yüksek kuşatma basıncına sahip olan bu kolon, diğer kolonların göçme yüklerinin sıçrama yaptığı yay katsayısı değerinden sonra en düşük kuşatma basıncına sahip olduğu görülmektedir (Şekil 6.22).

Yay katsayısı değerinin artması, yüksek mukavemetli betonun kuşatma basıncı değerini düşürmektedir.

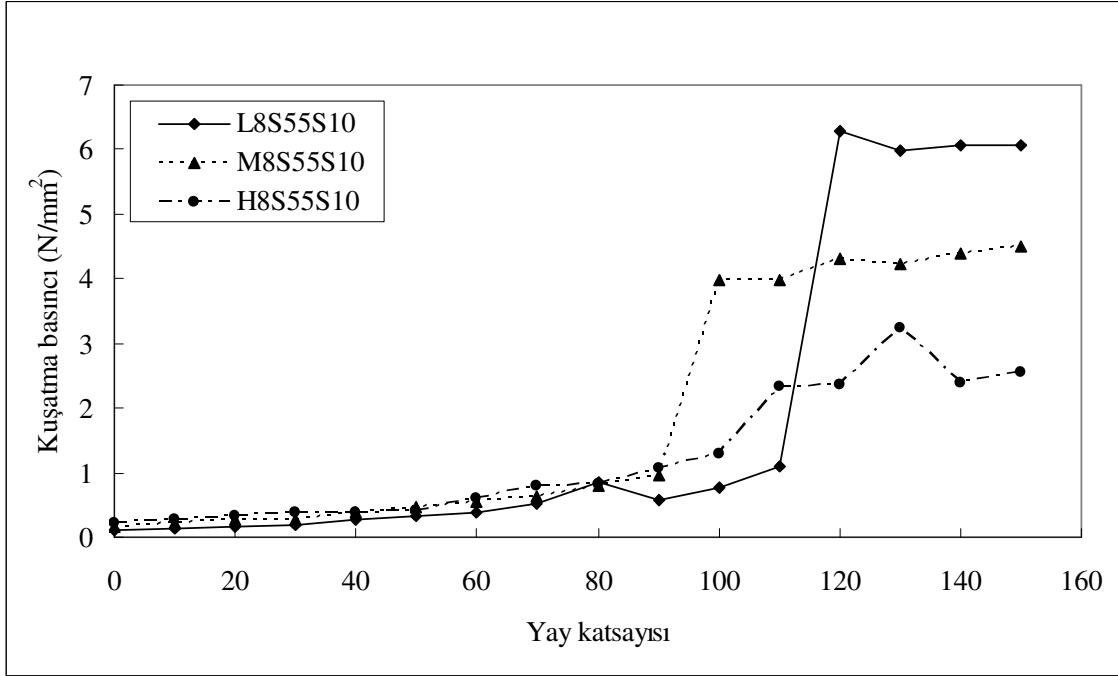
Etriye çapı 8mm olan kolonlar incelendiğinde H8S55E10 kolonunun belli bir yay katsayısı değerinde ($k=130$) en yüksek göçme yüküne ulaştığı görülmektedir (Çizelge 6.17 ve Şekil 6.23). $k=80$ değerine kadar beton mukavemeti en yüksek olan kolonların eğrileri üst tarafta yer almaktadır fakat göçme yükünün sıçrama yaptığı $k=80$ değerinden sonra, L8S55E10 kolonunun en yüksek kuşatma basıncı değerleri aldığı Şekil 6.24’de görülmektedir.

Etriye çapı 12mm olan F-L8S55T10 kolonu için $k=70$ değerinde hem göçme yükünde hem de kuşatma basıncı değerinde sıçrama yaptığı görülmektedir (Şekil 6.25 ve Şekil 6.26).

Etriye çubuklarının kalınlığı arttıkça, yay sabitinin her bir kırılma durumu için kuşatma basıncı değerlerinde sapmalar görülmektedir. Bu da malzemenin doğrusal olmayan davranışından kaynaklanabilir.

Çizelge 6.16 Sekiz donatılı, etriye çapı 6mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

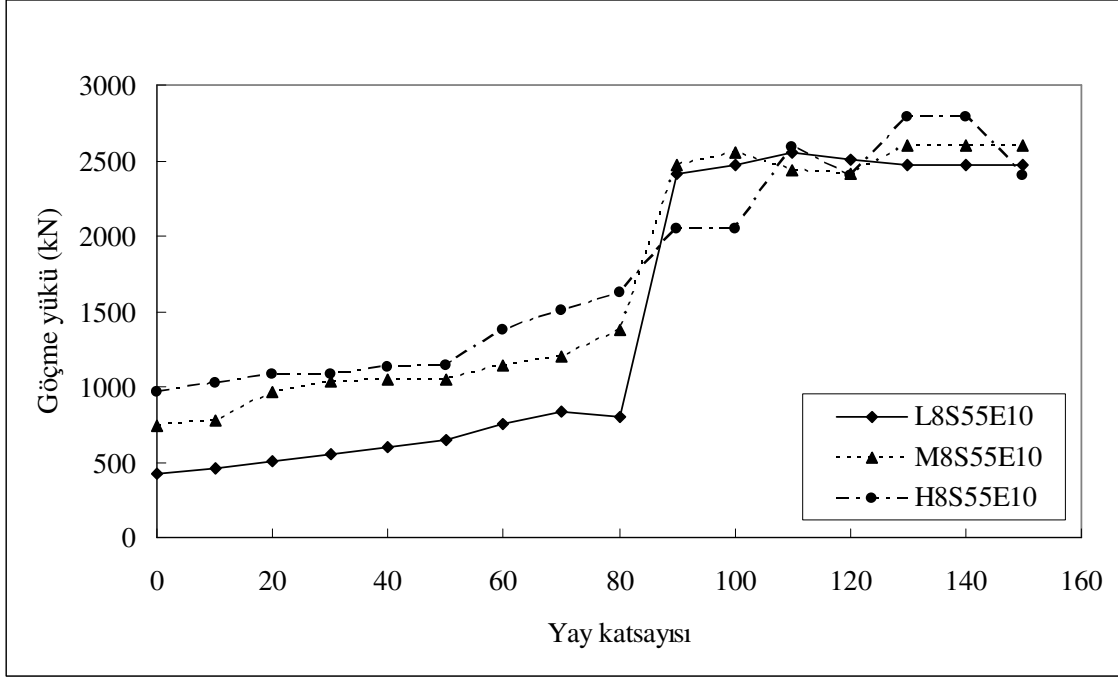
	L8S55S10	M8S55S10	H8S55S10
YK	Kuşatma Basıncı (N/mm²)	Kuşatma Basıncı (N/mm²)	Kuşatma Basıncı (N/mm²)
0	0,104	0,166	0,209
10	0,134	0,211	0,279
20	0,157	0,272	0,322
30	0,187	0,270	0,380
40	0,272	0,390	0,393
50	0,329	0,472	0,425
60	0,372	0,562	0,612
70	0,518	0,631	0,797
80	0,847	0,793	0,818
90	0,589	0,965	1,059
100	0,764	3,976	1,283
110	1,100	3,971	2,337
120	6,297	4,304	2,356
130	5,983	4,224	3,238
140	6,067	4,391	2,385
150	6,059	4,513	2,553



Şekil 6.22 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişiminin incelenmesi

Çizelge 6.17 Sekiz donatılı, etriye çapı 8mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

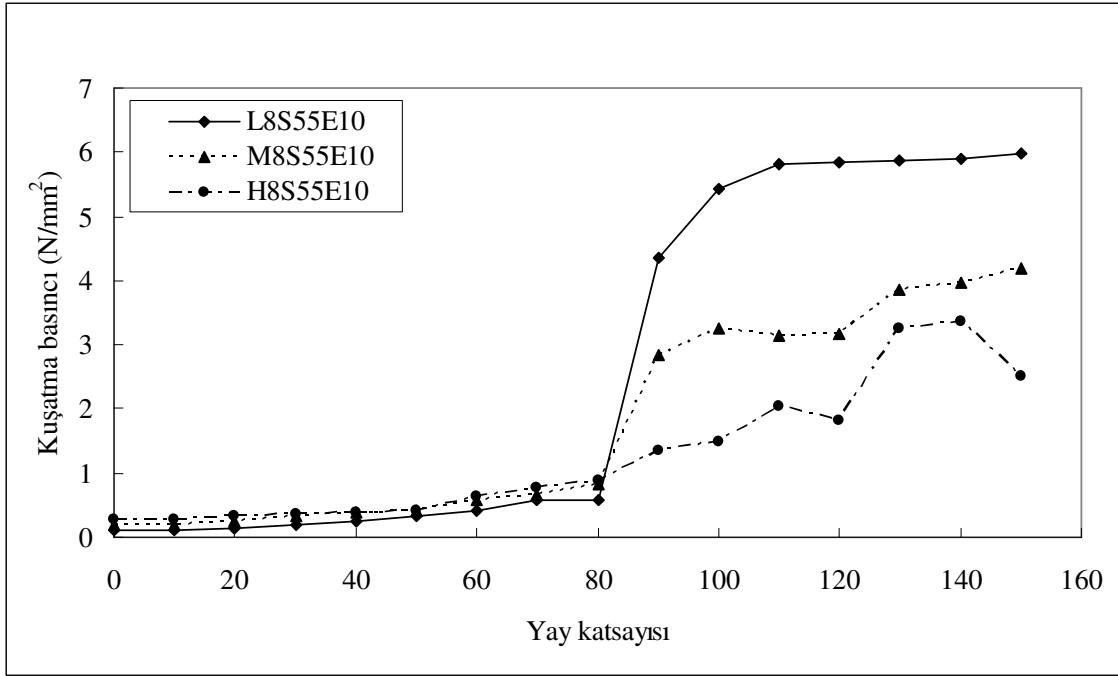
	L8S55E10	M8S55E10	H8S55E10
YK	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)
0	420,0	741,2	968,4
10	454,8	782,0	1029,2
20	511,2	961,2	1078,4
30	556,8	1037,2	1084,4
40	605,6	1050,0	1131,6
50	645,2	1048,8	1140,0
60	753,2	1138,4	1376,0
70	840,8	1204,4	1509,6
80	797,6	1376,8	1618,4
90	2416,4	2470,8	2041,2
100	2465,6	2558,8	2044,4
110	2556,8	2438,8	2584,4
120	2502,4	2408,4	2400,0
130	2474,8	2599,2	2785,6
140	2473,6	2598,8	2785,6
150	2472,4	2598,4	2400,0



Şekil 6.23 Sekiz donatılı, etriye çapı 8mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

Çizelge 6.18 Sekiz donatılı, etriye çapı 8mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

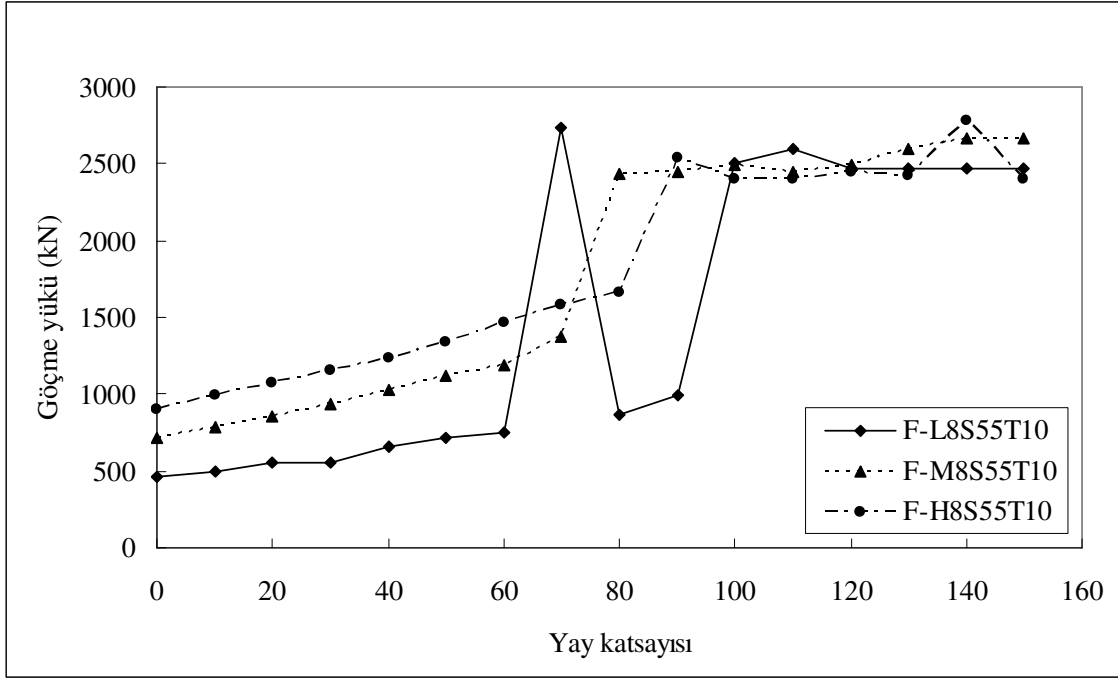
	L8S55E10	M8S55E10	H8S55E10
YK	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)
0	0,100	0,185	0,267
10	0,122	0,200	0,286
20	0,144	0,254	0,332
30	0,185	0,335	0,352
40	0,248	0,378	0,386
50	0,327	0,411	0,427
60	0,418	0,580	0,637
70	0,568	0,651	0,779
80	0,573	0,823	0,876
90	4,353	2,852	1,342
100	5,433	3,248	1,476
110	5,827	3,149	2,036
120	5,831	3,178	1,812
130	5,868	3,859	3,239
140	5,903	3,964	3,350
150	5,989	4,180	2,507



Şekil 6.24 Sekiz donatılı, etriye çapı 8mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

Çizelge 6.19 Sekiz donatılı, etriye çapı 12mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

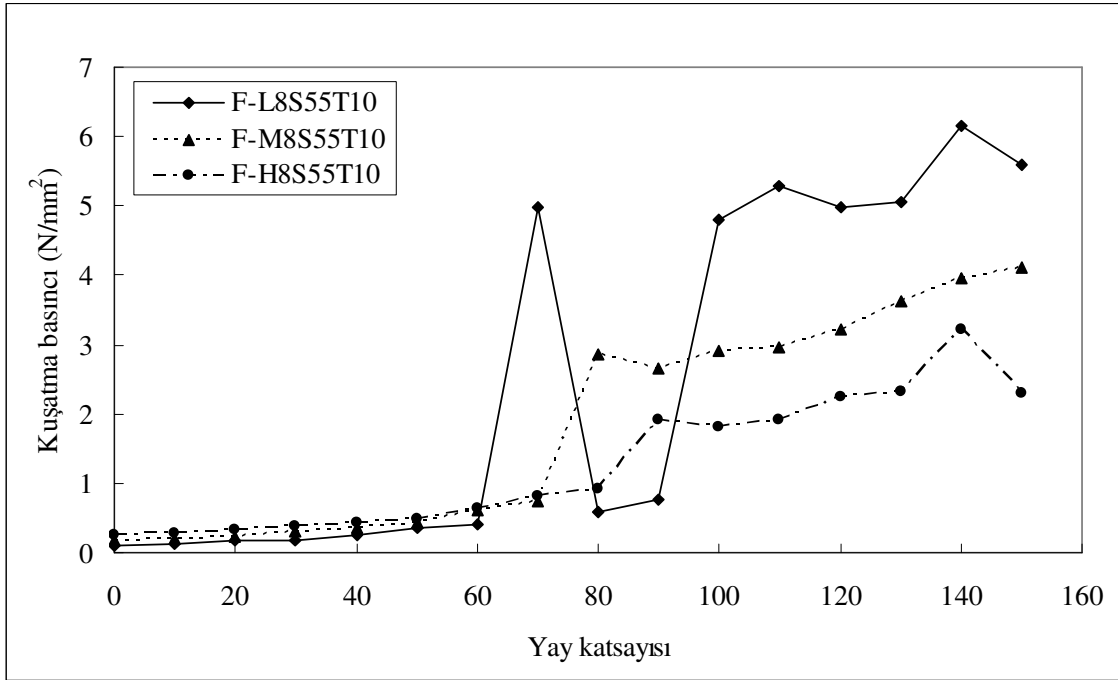
	F-L8S55T10	F-M8S55T10	F-H8S55T10
YK	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)
0	458,8	712,0	900,0
10	496,8	786,8	990,8
20	551,6	858,4	1068,8
30	552,0	930,0	1148,8
40	656,8	1024,4	1238,4
50	712,0	1114,4	1339,2
60	746,8	1187,2	1462,8
70	2735,2	1378,8	1586,0
80	860,4	2429,2	1666,4
90	994,4	2448,8	2536,8
100	2503,2	2491,6	2400,0
110	2592,4	2443,2	2400,0
120	2474,0	2494,4	2440,4
130	2472,8	2598,4	2428,4
140	2471,6	2661,2	2784,8
150	2470,8	2660,8	2400,0



Şekil 6.25 Sekiz donatılı, etriye çapı 12mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

Çizelge 6.20 Sekiz donatılı, etriye çapı 12mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

	F-L8S55T10	F-M8S55T10	F-H8S55T10
YK	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)
0	0,100	0,191	0,261
10	0,137	0,212	0,290
20	0,169	0,242	0,323
30	0,182	0,315	0,373
40	0,257	0,360	0,432
50	0,368	0,447	0,491
60	0,407	0,615	0,641
70	4,983	0,741	0,817
80	0,595	2,858	0,912
90	0,767	2,658	1,913
100	4,797	2,901	1,814
110	5,292	2,965	1,915
120	4,987	3,216	2,241
130	5,058	3,636	2,312
140	6,146	3,954	3,226
150	5,593	4,123	2,306



Şekil 6.26 Sekiz donatılı, etriye çapı 12mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

6.2.3.2 Beton mukavemeti sabit, etriye çapları değişken olan kolonların incelenmesi

Etriye çapları sırasıyla 6mm, 8mm ve 12mm için kıyaslama yapıldığında; etriye çapı en büyük olan kolonun göçme yükü daha büyük olarak bulunmuştur. Etriye çapı 12mm olan kolonun göçme yükünün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerine kadar en büyük göçme yükü ve kuşatma basıncı değerine sahip olduğu görülmektedir. $k=70$ değerinde göçme yükünün ve kuşatma basıncının sıçrama yaptığı görülmektedir. $k=80$ değerinde ani bir düşme, $k=90$ değerinden sonra yükün tekrar sıçrama yaptığı görülmektedir (Şekil 6.27). $k=120$ değerinden itibaren her üç kolonun da göçme yükü değerleri birbirine çok yakındır.

Yay sabitini 70 değerinde sabit tutarak, L8S55S10 kolonu için etriye çapını sırasıyla 6mm, 8mm ve 12mm olarak arttırdığımızda, etriye çapı 12mm olan kolonda bir sıçrama yaptığını görüyoruz. Bu sıçramanın normalde görülmemesi gerekiyor. Etriye çapının belirlediği bir kuşatma basıncı değerinden çok beton basınç mukavemetinin belirlediği bir yay sabiti ve yanal kuşatma basıncı değeri mevcut olmalıdır.

Betona yataklık eden kuvvetli çelik malzenin kalınlığı ve tesiri arttıkça, malzemenin uygulayacağı değer düşüyor. Kuşatma etkisi, yay sabitinin etriye etrafındaki belirli bir alana düzgün olarak dağıtılması şeklinde modellendiğini de gözden kaçırmamak gerekir. Daha kalın çapa sahip güçlü etriye çubukları, yay sabitinin her bir kırılma durumu için kuşatma basıncı değerlerinin en yüksek değerine ulaşmasını engelleyebilir. Bu da malzemenin doğrusal olmayan davranışından kaynaklanabilir.

Etriye çaplarına göre kıyaslandığında, beton mukavemeti 39N/mm^2 olan M8S55S10 kolonunun göçme yükü değerleri L8S55S10 kolonuna göre daha yüksektir. Şekil 6.29'da etriye çapı 6mm olan kolonun göçme yükü, sıçrama yaptıktan sonra en yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Kuşatma basıncı değerlerinde de bu durum görülmektedir.

H8S55S10 kolonunda tüm etriye çapları için göçme yükü ve kuşatma basınçları eğrilerinin birbirlerine yakın oldukları görülmektedir (Şekil 6.31 ve Şekil 6.32).

Etriye çapının arttırılarak kuşatma etkisinin incelenmesi sonucunda, göçme yükünün ve kuşatma basıncı değerlerinin arttığı görülür. Ancak beton mukavemeti yükseldikçe eğriler birbirine yaklaştığı için bu etki de azalmaya başlar.

Etriye aralığı 55mm olan kolonlarda bu kıyaslama yapıldığında, etriye çapının önemi anlaşılmaktadır. Göçme yükünün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerine kadar her üç kolonda birbirine yakın göçme yükü ve kuşatma basıncı değerlerine sahiptir (Şekil 6.33 ve Şekil 6.34). Etriye çapı 8mm ve 12mm olan kolonlarda göçme yükünün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerinden sonra daha yüksek değerlerde göçme yüküne ve kuşatma basıncına sahip olduğu görülmektedir.

M8S55S55 ve H8S55S55 kolonlarında etriye çapı arttıkça, başlangıçtaki yay katsayısı değerlerinde göçme yükü azalmaktadır. Etriye çapı 6mm olan kolonun adım adım daha yüksek göçme değerlerine ulaştığı görülmektedir (Şekil 6.35 ve Şekil 6.36).

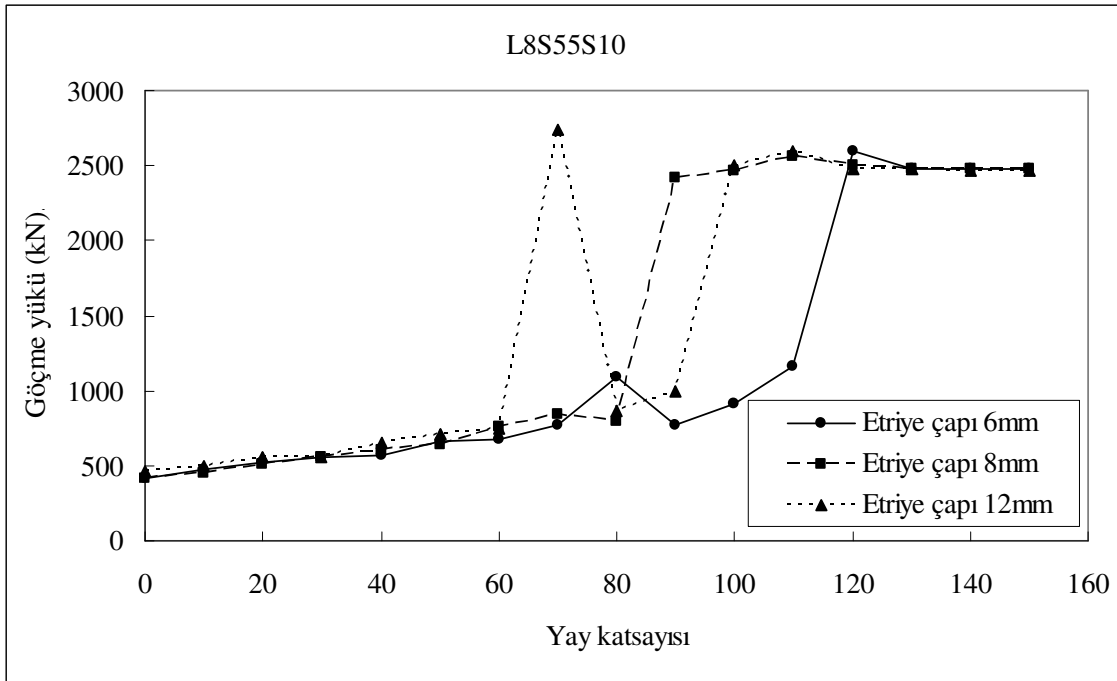
Kuşatma basınçları değerlerinde, göçme yükünün sıçrama yapıp yükseldiği noktadan itibaren etriye çapı 6mm olan kolonun en yüksek noktaya ulaştığı görülmektedir. Bu noktadan sonra zigzaglar görülmektedir (Şekil 6.36 ve Şekil 6.38).

C1L4S8 kolonu ile C1L4S12 kolonunu karşılaştırdığımızda; deney göçme yükü 700,1kN'dan 743,3kN'a, sonlu eleman analizi sonucunda, 521,2kN'dan 553,6kN'a yükselmiştir. Fakat Mander vd., (1988) beton modeline göre hesap yapıldığında 581,3kN'dan 566,7kN'a düşmüştür.

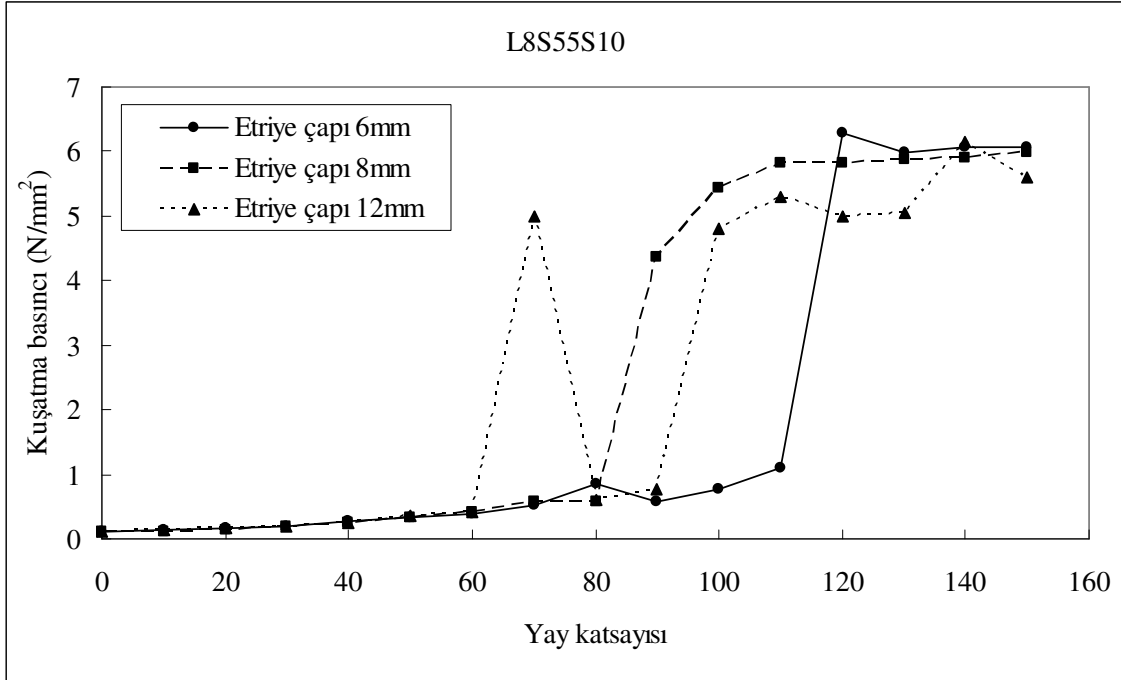
Kuşatma basınçları; sonlu eleman analizi sonucunda $0,40\text{N/mm}^2$ 'den $0,37\text{N/mm}^2$ 'ye düşerken, Mander vd., (1988) beton modelinde ise $0,76\text{N/mm}^2$ 'den $0,84\text{N/mm}^2$ 'ye yükselmiştir.

C1L8S8 kolonu ile C1L8S12 kolonunu karşılaştırdığımızda; deney göçme yükü $574,8\text{kN}$ 'dan $768,9\text{kN}$ 'a, sonlu eleman analizi sonucunda, $584,0\text{kN}$ 'dan $608,4\text{kN}$ 'a yükselmiştir. Fakat Mander vd., (1988) beton modeline göre hesap yapıldığında $619,5\text{kN}$ 'dan $601,3\text{kN}$ 'a düşmüştür. Kuşatma basınçları; sonlu eleman analizi sonucunda $0,30\text{N/mm}^2$ 'den $0,25\text{N/mm}^2$ 'ye düşerken, Mander vd., (1988) beton modelinde ise $1,11\text{N/mm}^2$ 'den $1,18\text{N/mm}^2$ 'ye yükselmiştir.

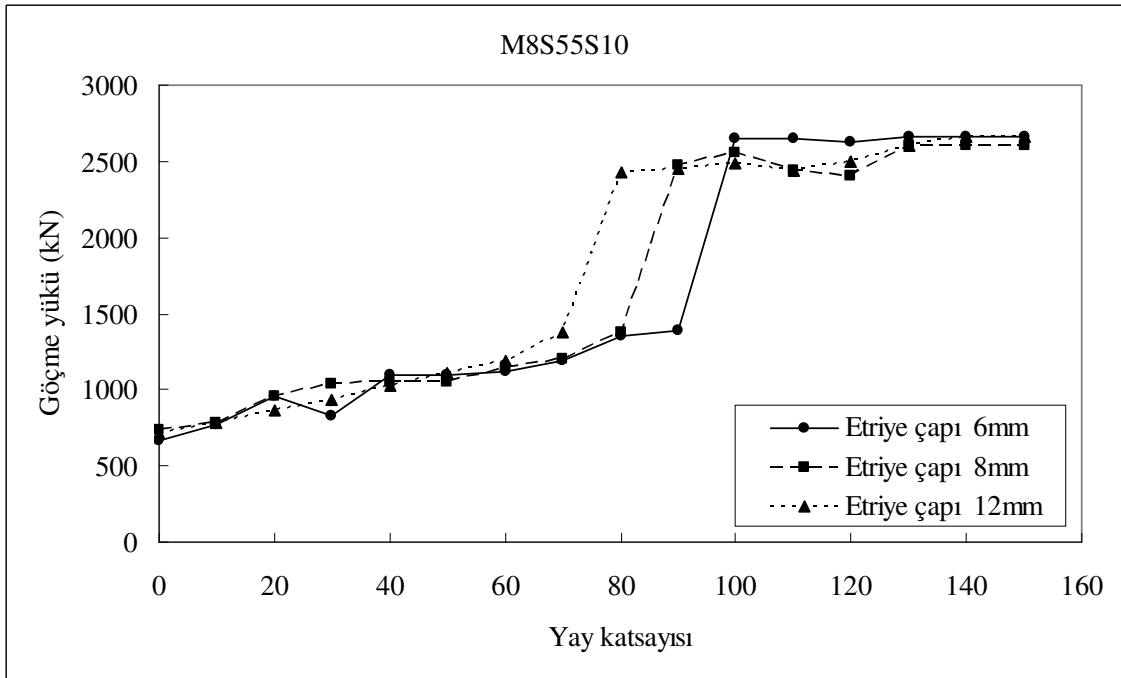
Etriye çapları 8mm ve 12mm olan deney kolonlarını göçme yüklerine göre karşılaştırdığımızda; deney sonuçlarının sonlu eleman analizleri sonuçlarıyla uyumlu olduğu fakat Mander vd., (1988) beton modeliyle uyumlu olmadığı görülmektedir. Sonlu eleman analizi sonucunda kuşatma basıncı düşerken, Mander vd., (1988) beton modelinde ise kuşatma basıncı yükselmektedir.



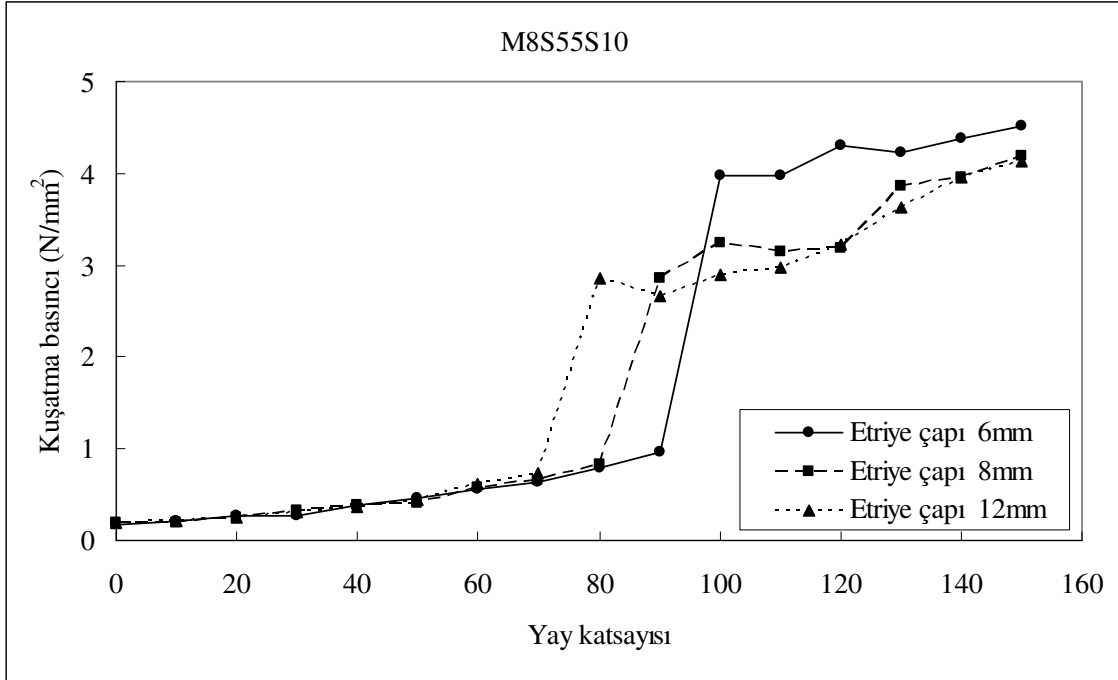
Şekil 6.27 Sekiz donatılı, beton dayanımı 20 MPa olan kolonlarda farklı etriye çapları için GY-YK değişimi



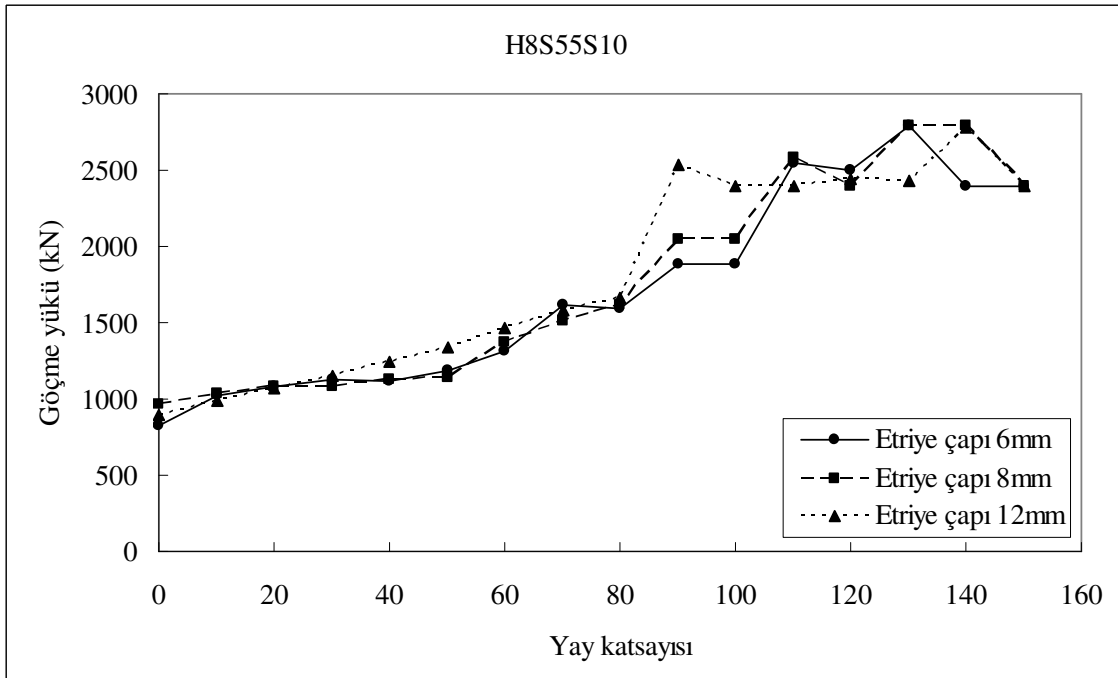
Şekil 6.28 Sekiz donatılı, beton dayanımı 20 MPa olan kolonlarda farklı etriye çapları için KB-YK değişimi



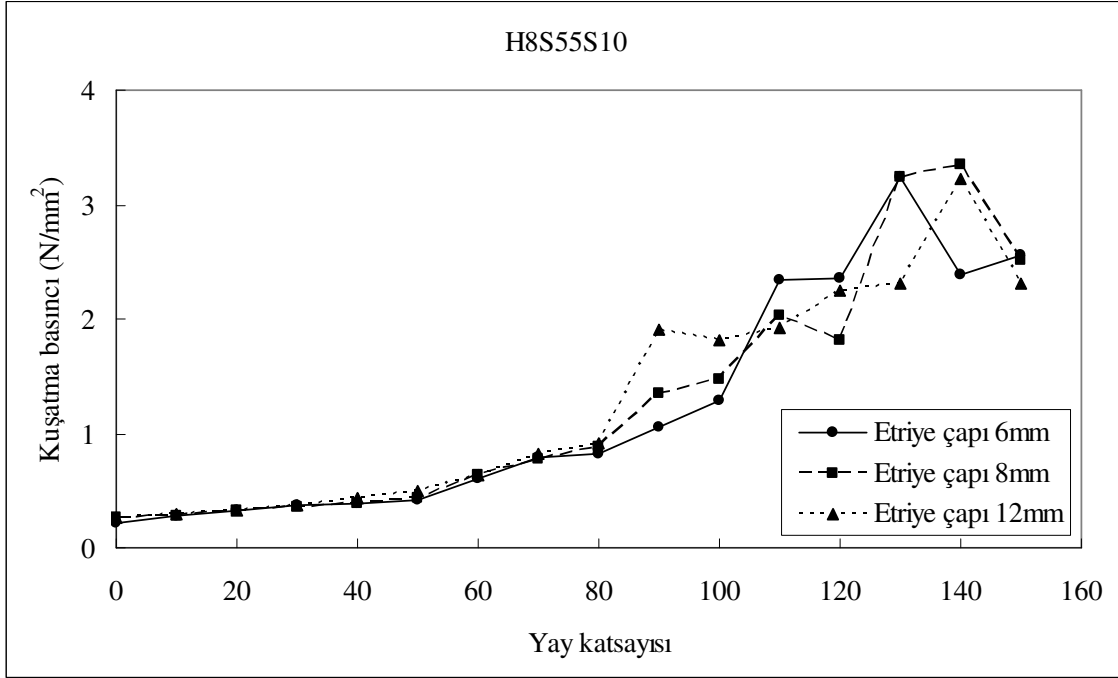
Şekil 6.29 Sekiz donatılı, beton dayanımı 39 MPa olan kolonlarda farklı etriye çapları için GY-YK değişimi



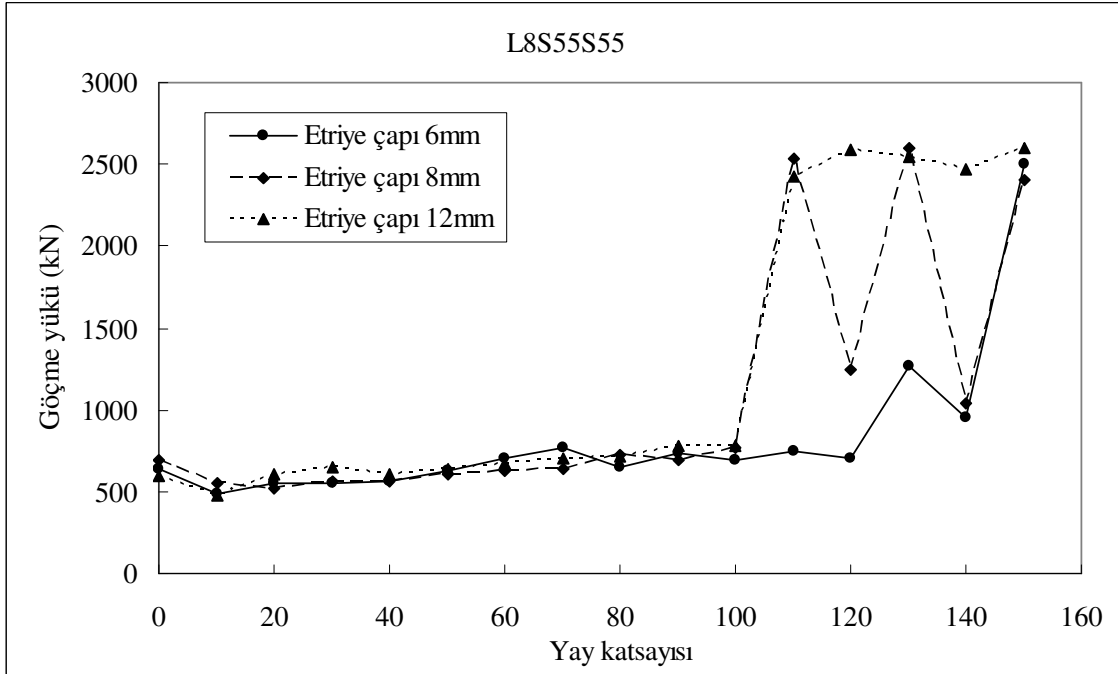
Şekil 6.30 Sekiz donatılı, beton dayanımı 39 MPa olan kolonlarda farklı etriye çapları için KB-YK değişimi



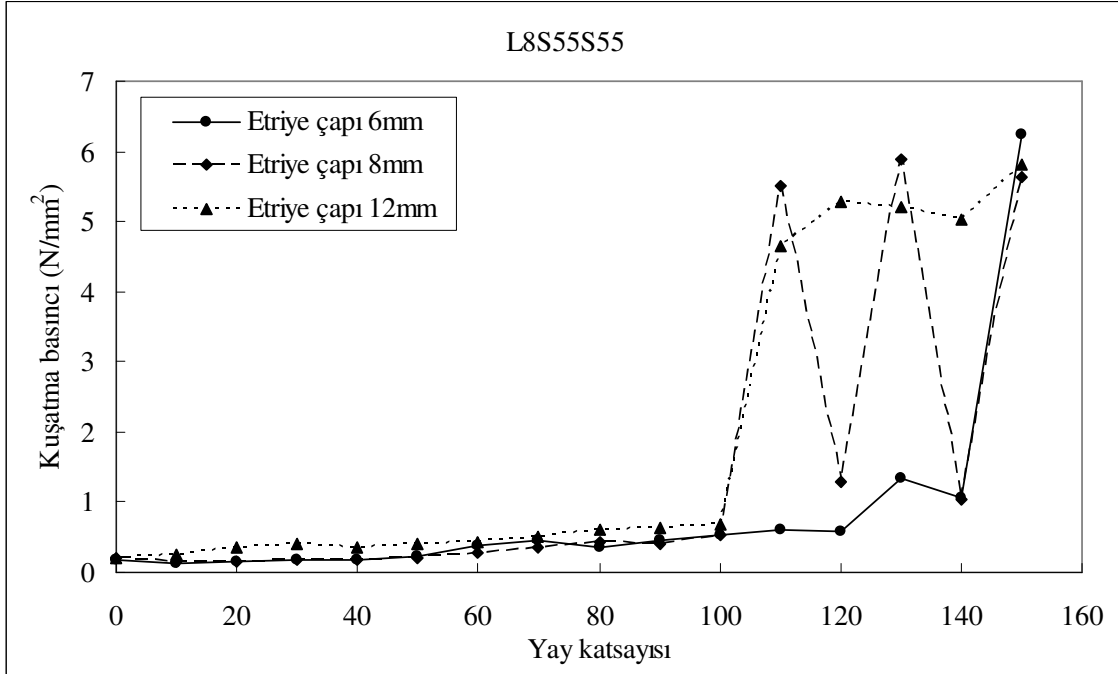
Şekil 6.31 Sekiz donatılı, beton dayanımı 54 MPa olan kolonlarda farklı etriye çapları için GY-YK değişimi



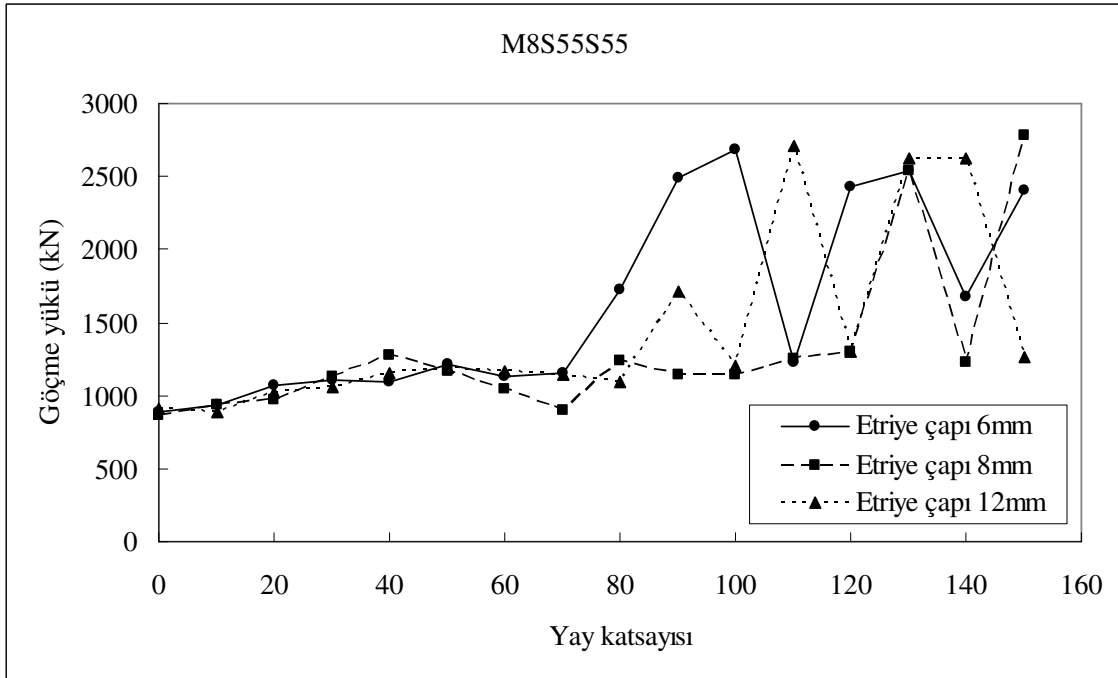
Şekil 6.32 Sekiz donatılı, beton dayanımı 54 MPa olan kolonlarda farklı etriye çapları için KB-YK değişimi



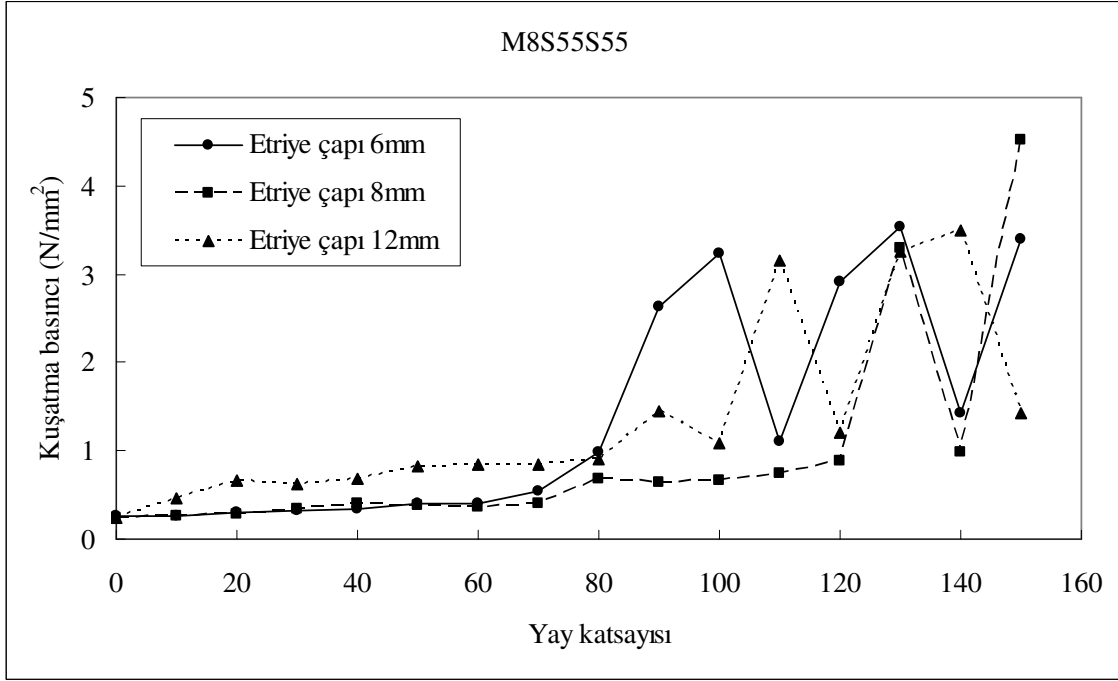
Şekil 6.33 Sekiz donatılı, beton dayanımı 20 MPa, etriye aralığı 55mm olan kolonda farklı etriye çapları için GY-YK değişimi



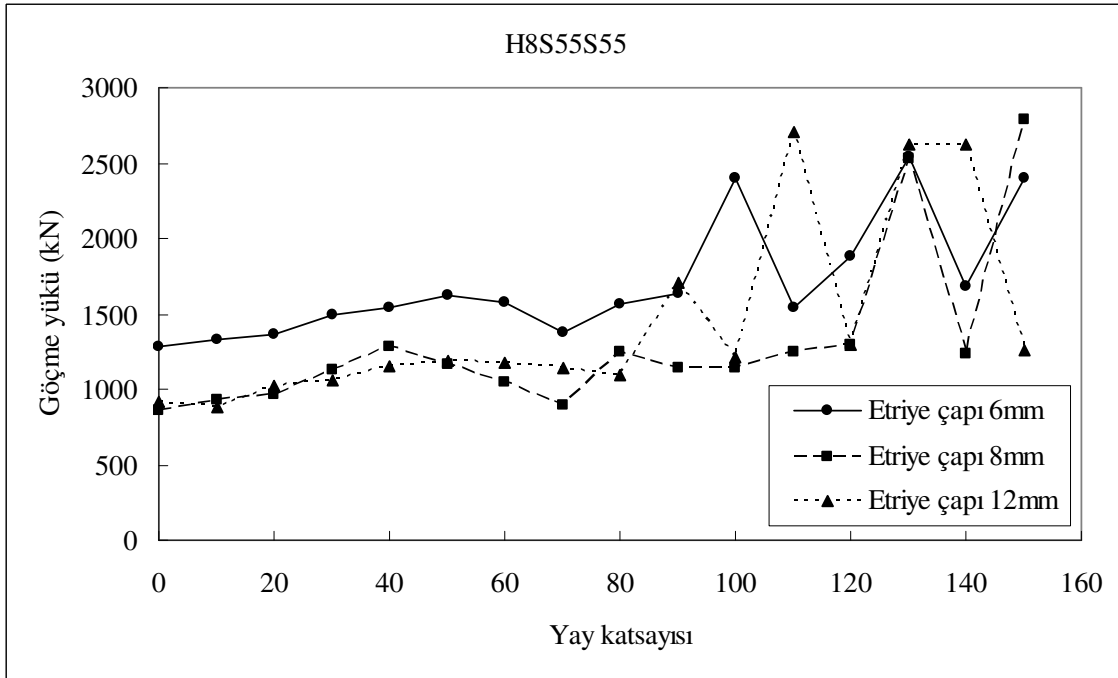
Şekil 6.34 Sekiz donatılı, beton dayanımı 20 MPa, etriye aralığı 55mm olan kolonda farklı etriye çapları için KB-YK değişimi



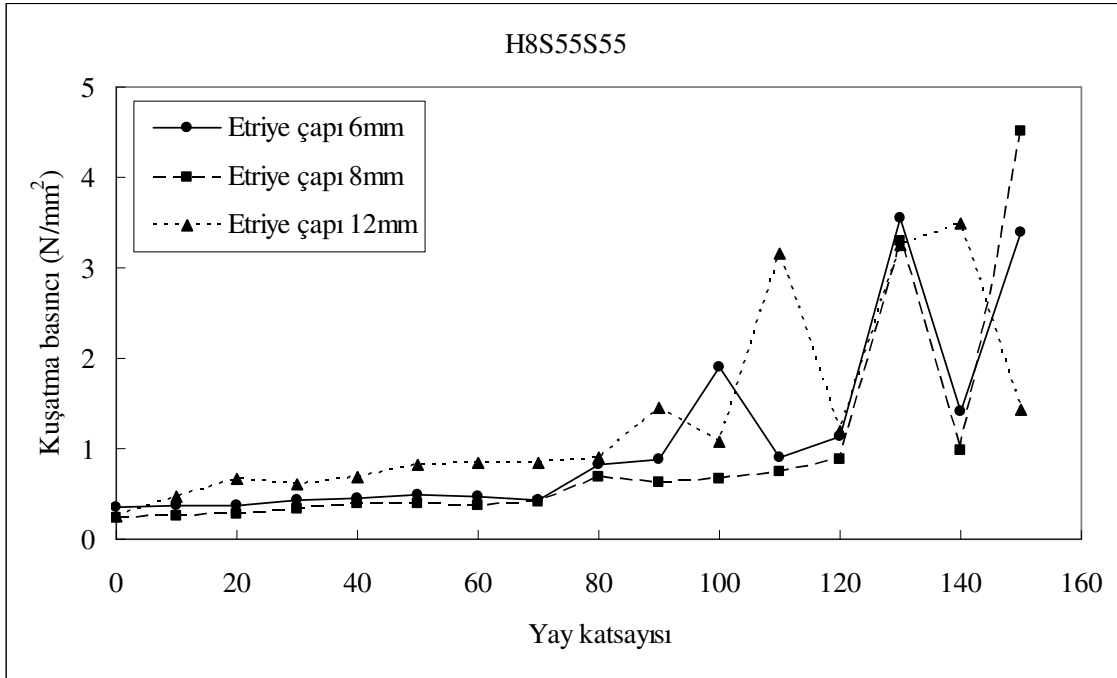
Şekil 6.35 Sekiz donatılı, beton dayanımı 39 MPa, etriye aralığı 55mm olan kolonda farklı etriye çapları için GY-YK değişimi



Şekil 6.36 Sekiz donatılı, beton dayanımı 39 MPa, etriye aralığı 55mm olan kolonda farklı etriye çapları için KB-YK değişimi



Şekil 6.37 Sekiz donatılı, beton dayanımı 54 MPa, etriye aralığı 55mm olan kolonda farklı etriye çapları için GY-YK değişimi



Şekil 6.38 Sekiz donatılı, beton dayanımı 54 MPa, etriye aralığı 55mm olan kolonda farklı etriye çapları için KB-YK değişimi

6.2.4 Etriye aralığı değişiminin incelenmesi

Etriye aralığı 55mm olan kolonların başlangıçtaki yay katsayısı değerlerinde daha fazla yük taşıyabilme özelliğine sahip olduğu görülmektedir. Yük sıçrama yaptıktan sonra etriye aralığı 100mm olan kolonların göçme yüklerinin daha fazla olduğu ama beton mukavemeti 54MPa olan H8S55S10 kolonunda bu durum gözlenememektedir.

Kuşatma basıncı değerleri karşılaştırıldığında, etriye aralığı 55mm olan kolonun ilk baştaki yay katsayısı değerlerinde daha yüksek kuşatma basıncı değerleri aldığı fakat daha sonra etriye aralığı 100mm olan kolonun kuşatma basıncı değerlerinin yükseldiği ($k=50$ 'de) görülmektedir.

Etriye aralığı 55mm olan kolonlarda daha büyük yay katsayısı değerlerinde yükün ve kuşatma basıncı değerlerinin sıçrama yaptığı görülmektedir. Kuşatma basıncında sıçrama olduktan sonra beton mukavemeti yükseldikçe, kuşatma basıncı değerlerindeki artış da azalmaktadır (Şekil 6.36 ve Şekil 6.38).

L8S55S55 kolonundaki sıçramadaki yay katsayısı değeri 150'dir. M8S55S55 ve H8S55S55 kolonlarında iki defa tekrar eden inişli-çıkışlı bir durum söz konusudur. Sıçramadan sonraki

durumda M8S55S55 kolonunun kuşatma basıncı değeri H8S55S55 kolonundan daha yüksektir.

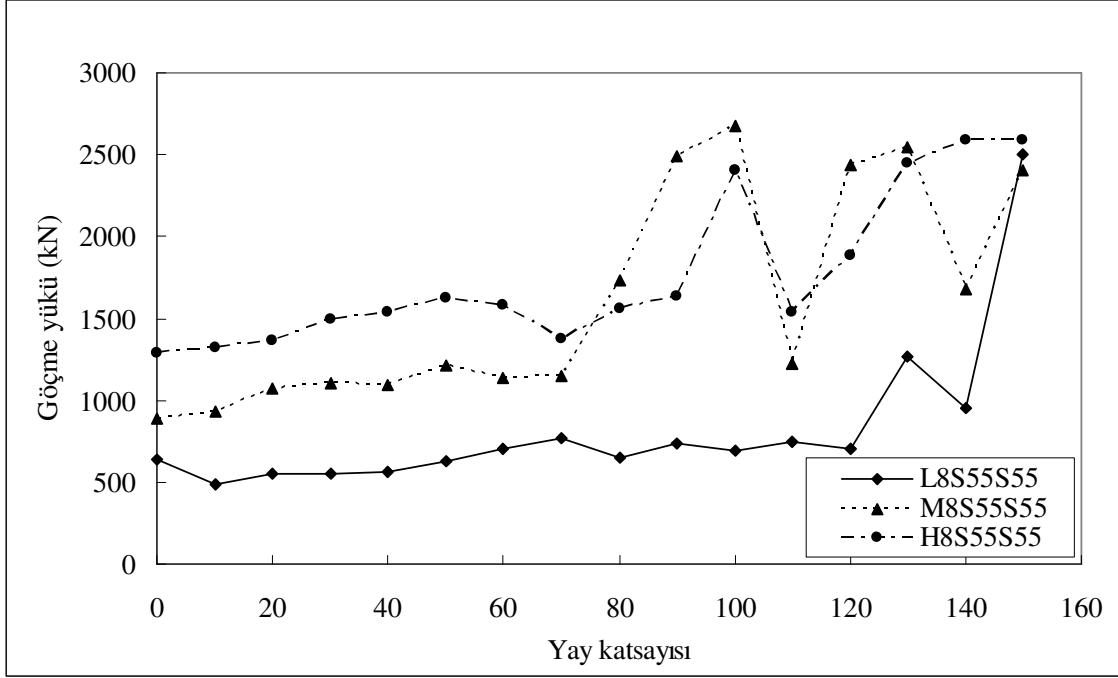
Etriye çapı 8mm, etriye aralığı 55mm olan kolonları incelediğimizde, daha yüksek yay katsayısı değerlerinde sıçrama olduğu; beton mukavemeti arttıkça, sıçramalardaki zigzaglarında azaldığı görülmektedir.

Etriye aralığı 100mm olan L8S55E10 kolonundaki sıçrama bir defa görülmekte, etriye aralığı 55mm olan L8S55E55 kolonunda sıçrama 3 defa tekrar etmektedir.

Etriye çapı 12mm, etriye aralığı 10cm olan F-L8S55T10 kolonundaki sıçrama iki defa görülmesine karşın, F-L8S55T55 kolonunda bir defa görülmektedir. Başlangıçtaki yay katsayısı değerlerinde, F-L8S55T55 kolonundaki kuşatma basınçları F-L8S55T10 kolonuna kıyasla 2 kat daha yüksektir. Daha sonraki yay katsayısı değerlerinde F-L8S55T10 kolonundaki kuşatma basıncı değerleri yükselmeye başlamıştır (Çizelge 6.20). Kolonun sıçrama yaptıktan sonraki yay katsayısı değerlerindeki durum incelendiğinde, F-M8S55T55 ve F-H8S55T55 kolonlarındaki kuşatma basıncı değerlerinin azaldığı, F-L8S55T55 kolonundaki kuşatma basıncı değerinin ise yükseldiği görülmektedir (Şekil 6.44).

Çizelge 6.21 Sekiz donatılı, etriye çapı 6mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

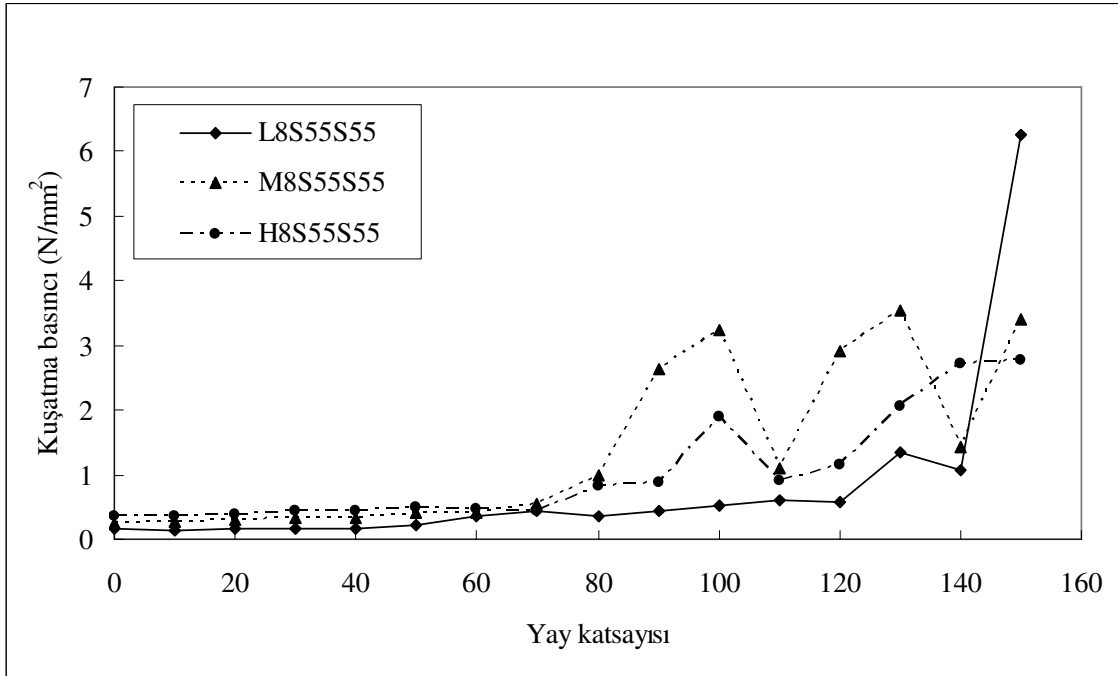
	L8S55S55	M8S55S55	H8S55S55
YK	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)
0	639,6	886,4	1285,6
10	491,6	932,0	1326,0
20	549,2	1072,8	1366,0
30	547,2	1100,4	1489,6
40	558,4	1097,2	1543,2
50	632,4	1216,4	1628,8
60	707,6	1135,6	1580,0
70	774,0	1151,6	1380,0
80	647,2	1729,6	1563,2
90	734,4	2489,2	1636,8
100	690,4	2678,4	2402,0
110	748,0	1226,8	1542,4
120	698,8	2432,4	1888,0
130	1264,0	2543,2	2449,2
140	957,2	1680,8	2584,8
150	2498,0	2402,0	2584,8



Şekil 6.39 Sekiz donatılı, etriye çapı 6mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

Çizelge 6.22 Sekiz donatılı, etriye çapı 6mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

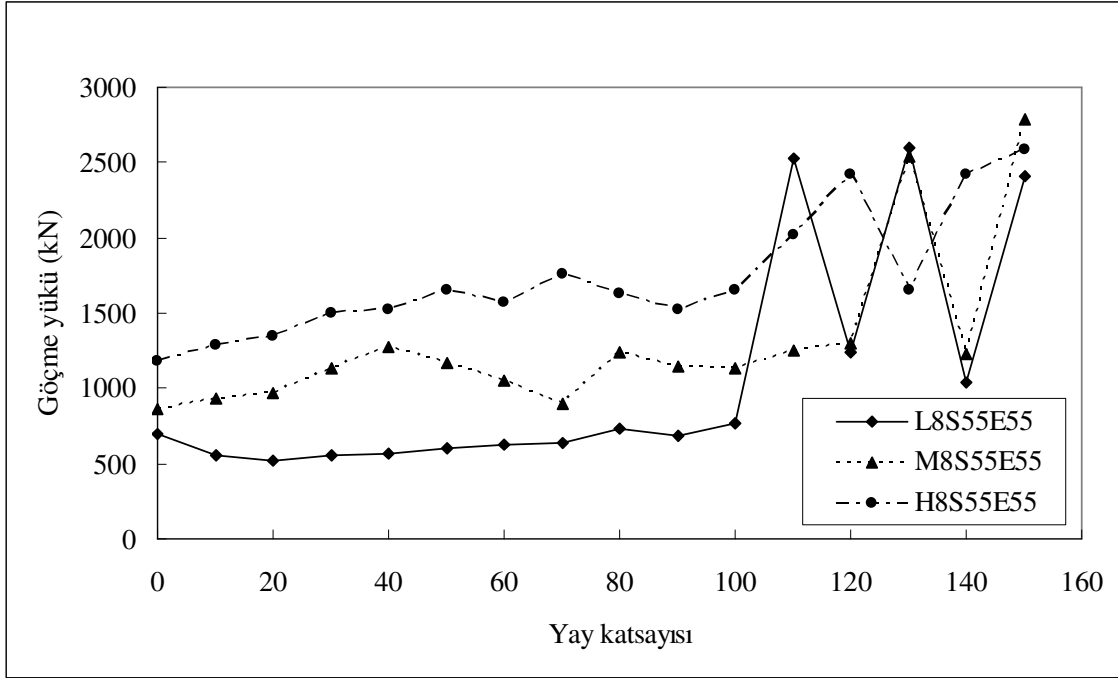
	L8S55S55	M8S55S55	H8S55S55
YK	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)
0	0,175	0,252	0,349
10	0,138	0,268	0,364
20	0,159	0,309	0,379
30	0,165	0,321	0,430
40	0,178	0,340	0,451
50	0,220	0,409	0,482
60	0,369	0,402	0,480
70	0,445	0,548	0,439
80	0,366	0,986	0,823
90	0,449	2,634	0,879
100	0,534	3,239	1,899
110	0,613	1,110	0,893
120	0,570	2,913	1,146
130	1,338	3,541	2,050
140	1,060	1,419	2,709
150	6,247	3,401	2,774



Şekil 6.40 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

Çizelge 6.23 Sekiz donatılı, etriye çapı 8mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

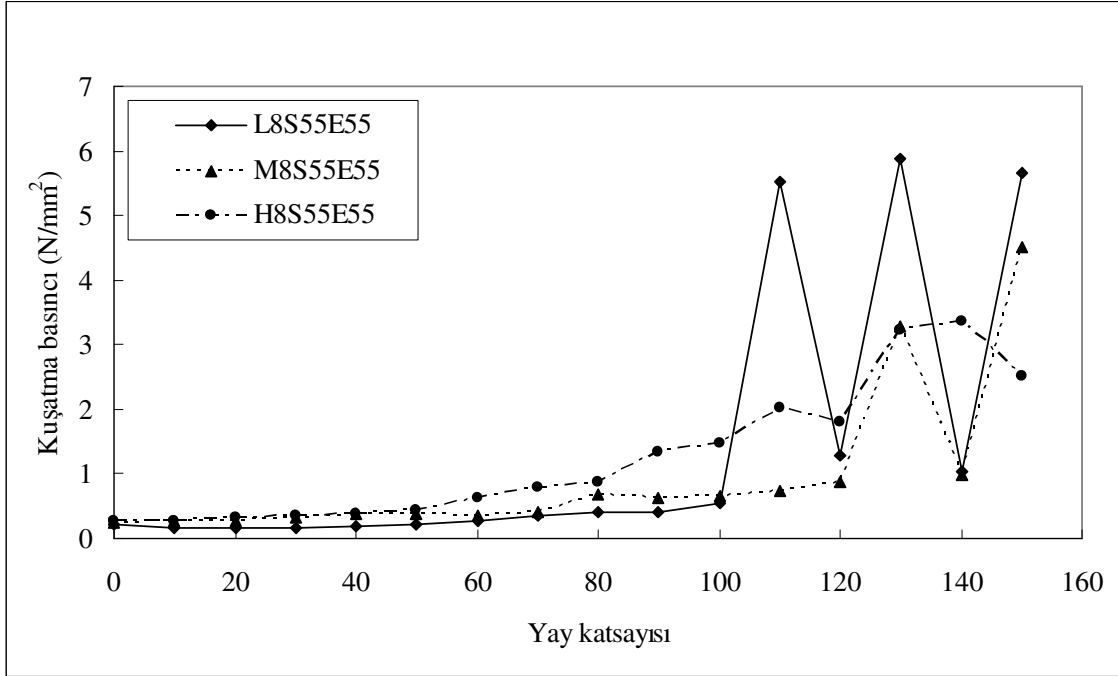
	L8S55E55	M8S55E55	H8S55E55
YK	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)
0	695,2	862,4	1176,0
10	553,6	930,4	1292,4
20	519,6	968,4	1342,8
30	558,8	1129,2	1501,2
40	564,8	1280,8	1519,2
50	605,6	1165,6	1650,8
60	624,8	1049,6	1568,0
70	639,2	900,0	1765,6
80	728,0	1242,8	1632,8
90	690,0	1143,6	1522,8
100	765,2	1137,2	1652,4
110	2533,2	1248,0	2024,0
120	1245,2	1294,0	2420,0
130	2600,4	2534,8	1657,6
140	1038,0	1230,0	2416,4
150	2406,4	2787,2	2584,8



Şekil 6.41 Sekiz donatılı, etriye çapı 8mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

Çizelge 6.24 Sekiz donatılı, etriye çapı 8mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

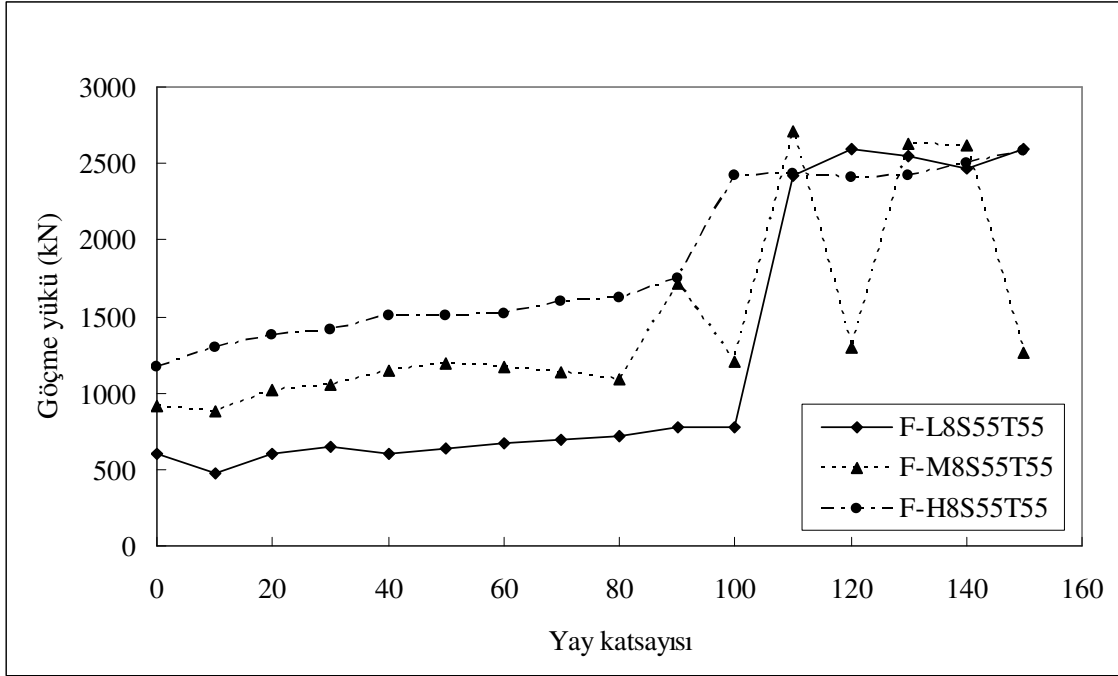
	L8S55E55	M8S55E55	H8S55E55
YK	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)
0	0,206	0,241	0,324
10	0,156	0,261	0,357
20	0,154	0,282	0,374
30	0,170	0,337	0,419
40	0,180	0,396	0,443
50	0,209	0,391	0,488
60	0,284	0,367	0,466
70	0,351	0,405	0,619
80	0,423	0,683	0,715
90	0,417	0,634	0,825
100	0,533	0,658	0,915
110	5,517	0,747	1,187
120	1,279	0,879	1,961
130	5,890	3,292	1,103
140	1,029	0,979	2,048
150	5,647	4,509	2,719



Şekil 6.42 Sekiz donatılı, etriye çapı 8mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

Çizelge 6.25 Sekiz donatılı, etriye çapı 12mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

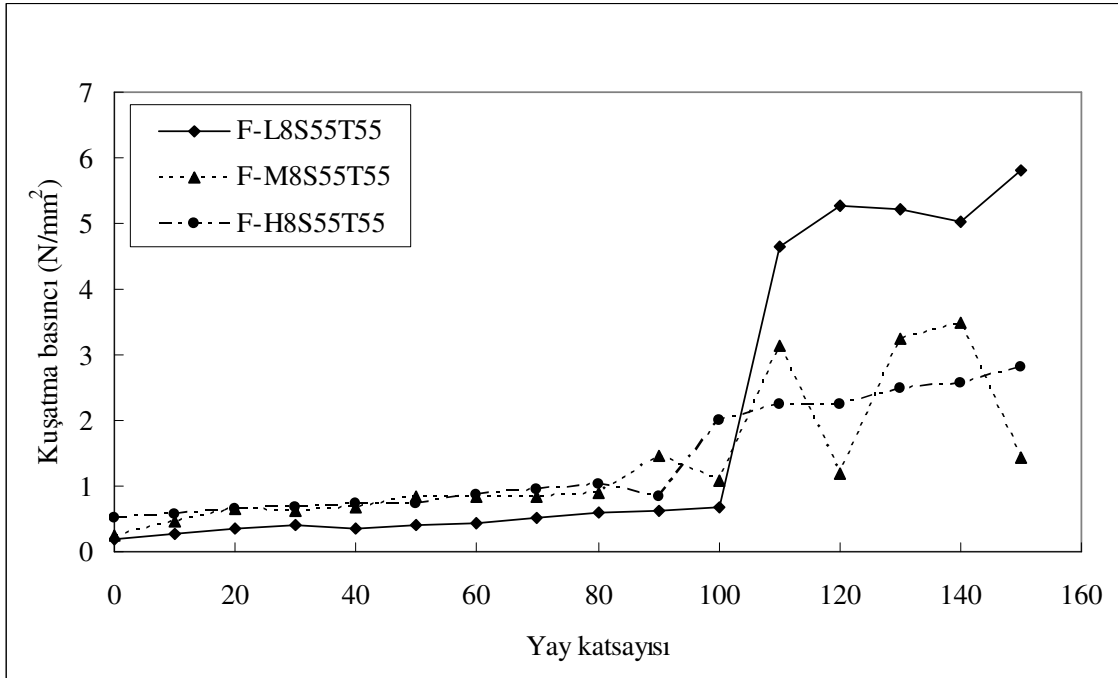
	F-L8S55T55	F-M8S55T55	F-H8S55T55
YK	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)
0	597,6	916,4	1168,0
10	475,6	883,6	1296,0
20	605,6	1024,0	1376,8
30	647,6	1059,6	1411,6
40	604,8	1152,0	1505,2
50	642,8	1192,0	1501,2
60	670,8	1172,0	1519,6
70	699,6	1138,8	1592,8
80	718,4	1094,0	1618,8
90	778,0	1710,0	1752,4
100	780,0	1206,8	2424,4
110	2425,6	2705,2	2429,6
120	2590,4	1298,4	2404,4
130	2547,2	2628,4	2419,2
140	2468,8	2620,0	2506,4
150	2597,2	1264,4	2584,0



Şekil 6.43 Sekiz donatılı, etriye çapı 12mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

Çizelge 6.26 Sekiz donatılı, etriye çapı 12mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

	F-L8S55T55	F-M8S55T55	F-H8S55T55
YK	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)
0	0,202	0,248	0,510
10	0,261	0,472	0,564
20	0,359	0,661	0,652
30	0,403	0,617	0,671
40	0,354	0,680	0,721
50	0,392	0,826	0,722
60	0,428	0,843	0,854
70	0,506	0,841	0,949
80	0,596	0,900	1,021
90	0,626	1,453	0,846
100	0,670	1,086	1,995
110	4,639	3,148	2,242
120	5,278	1,196	2,236
130	5,208	3,255	2,491
140	5,030	3,499	2,577
150	5,819	1,430	2,802



Şekil 6.44 Sekiz donatılı, etriye çapı 12mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

6.2.5 Etriye akma dayanımının kuşatma basıncına etkisi

Çizelge 6.27 Etriye akma mukavemetinin göçme yüküne etkisi

Numune	Göçme Yüğü (kN)				
	Model	Deney	Mander (S220)	Mander (S420)	Mander (S550)
Model A33	1656,8	1650	1111,5	1144,5	1165,4
Model A91	3928,0	3920	2405,8	2439,9	2461,8
L8S55S10	1159,2	995,0	710,7	958,0	1117,4
M8S55S10	1387,2	1401,0	1125,9	1374,7	1536,1
H8S55S10	1182,0	1580,0	1451,8	1702,1	1864,1
F – L8S55S10	684,8	-	602,4	751,6	847,3
F – M8S55S10	1136,0	-	1016,7	1167,9	1265,5
F – H8S55S10	1787,2	-	1343,4	1495,2	1593,4
F – 2L8S55S10	1758,0	-	942,4	1399,7	1695,4
F – 2M8S55S10	1636,8	-	1357,0	1817,0	2115,0
F – 2H8S55S10	1829,6	-	1683,7	2144,6	2443,4
L8S55S55	957,2	1075,6	781,6	1079,6	1267,0
M8S55S55	1151,6	1550,3	1200,7	1510,4	1707,2
H8S55S55	1636,8	1721,5	1528,9	1842,7	2043,0
F – L8S55S55	642,0	-	669,7	867,6	990,4
F – M8S55S55	1186,4	-	1088,2	1296,7	1428,2
F – H8S55S55	1380,0	-	1416,3	1628,4	1763,1
F – 2L8S55S55	1369,2	-	1019,4	1530,8	1855,9
F – 2M8S55S55	1697,2	-	1439,6	1964,5	2300,5
F – 2H8S55S55	1692,4	-	1768,1	2297,8	2638,0
C1L4S8	521,2	700,1	538,6	581,3	607,3
C1L4S12	553,6	743,3	522,5	566,7	593,4
C1L8S8	584,0	574,8	560,7	619,5	654,3
C1L8S12	608,4	768,9	542,6	601,3	635,9

Kolon numunelerinde sadece etriye akma mukavemeti değerinin değiştirilmesiyle yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda, göçme yükünde ve kuşatma basıncında herhangi bir değişme olmamıştır.

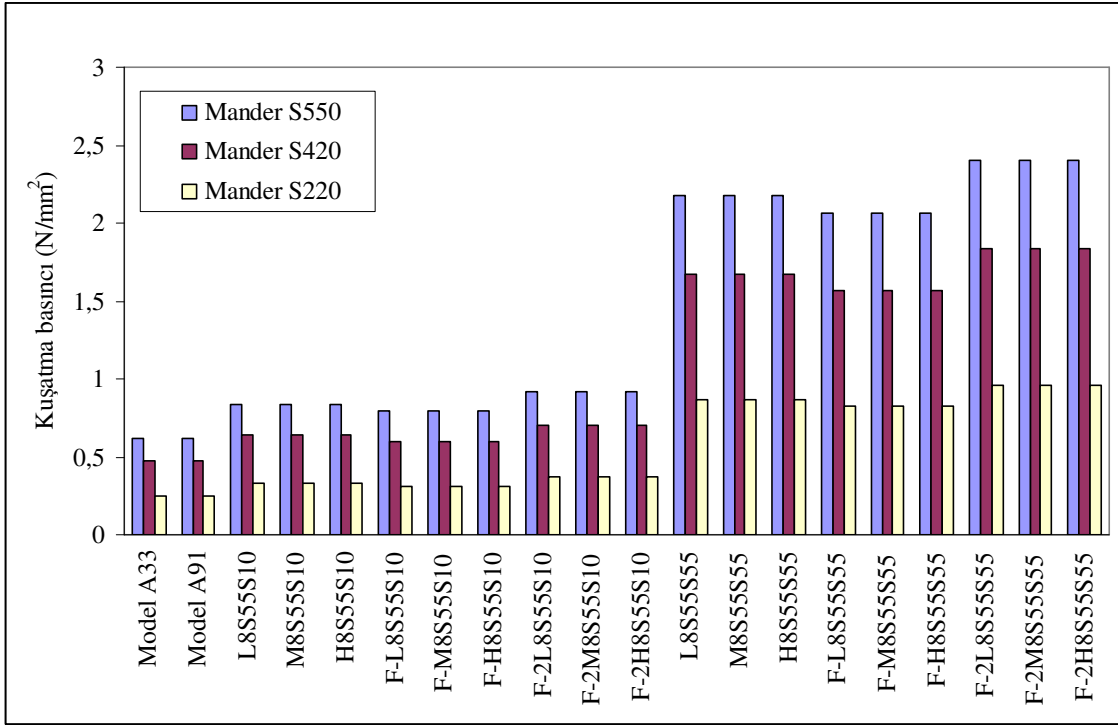
Mander vd., (1988) beton modelinde sadece etriye akma mukavemeti değerinin artırılmasıyla, göçme yükünün ve kuşatma basıncının yükseldiği görülmüştür (Çizelge 6.27 ve Çizelge 6.28).

Mander vd., (1988) beton modelinde beton mukavemeti değiştiği halde kuşatma basınçları aynı çıkmıştır (Çizelge 6.28).

C1L4S8 kolonu ile C1L4S12 kolonlarını incelediğimizde; Mander vd., (1988) beton modelinde etriye çapı 8mm olan C1L4S8 kolonunun Çizelge 6.27'deki 220MPa, 420MPa ve 550MPa etriye akma dayanımları için göçme yk değerleri, C1L4S12 kolonundan daha büyüktür. Aynı durum, C1L8S8 kolonu ile C1L8S12 kolonunu karşılaştırdığımızda da geçerlidir.

Çizelge 6.28 Etriye akma mukavemetinin kuşatma basıncına etkisi

Numune	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)			
	Model	Mander (S220)	Mander (S420)	Mander (S550)
Model A33	1,27	0,25	0,47	0,62
Model A91	3,30	0,25	0,47	0,62
L8S55S10	1,10	0,33	0,64	0,83
M8S55S10	0,97	0,33	0,64	0,83
H8S55S10	1,06	0,33	0,64	0,83
F – L8S55S10	0,39	0,31	0,60	0,79
F – M8S55S10	0,49	0,31	0,60	0,79
F – H8S55S10	0,88	0,31	0,60	0,79
F – 2L8S55S10	2,27	0,37	0,70	0,92
F – 2M8S55S10	1,20	0,37	0,70	0,92
F – 2H8S55S10	1,19	0,37	0,70	0,92
L8S55S55	1,06	0,87	1,67	2,18
M8S55S55	0,55	0,87	1,67	2,18
H8S55S55	0,88	0,87	1,67	2,18
F – L8S55S55	0,68	0,82	1,57	2,06
F – M8S55S55	0,80	0,82	1,57	2,06
F – H8S55S55	0,94	0,82	1,57	2,06
F – 2L8S55S55	3,50	0,96	1,83	2,40
F – 2M8S55S55	1,13	0,96	1,83	2,40
F – 2H8S55S55	0,99	0,96	1,83	2,40
C1L4S8	0,40	0,40	0,76	1,00
C1L4S12	0,37	0,44	0,84	1,11
C1L8S8	0,30	0,58	1,11	1,46
C1L8S12	0,25	0,62	1,18	1,55



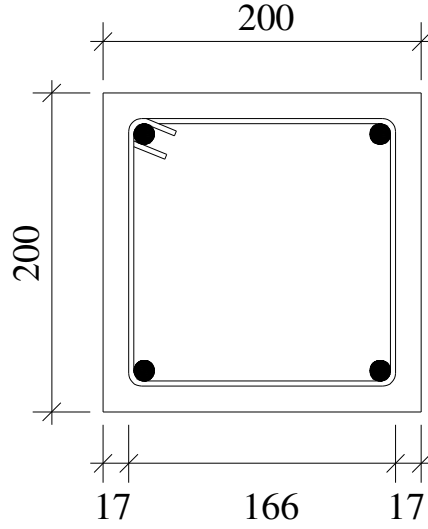
Şekil 6.45 Kolon numunelerinin Mander vd., (1988) beton modeline göre etriye akma dayanımlarının incelenmesi

6.2.6 Boyuna donatı konfigürasyonunun kuşatma basıncına etkisi

Boyuna donatı konfigürasyonu değişiminin, kuşatma basıncına etkiyen bir parametre olup olmadığını öğrenmek için sekiz boyuna donatılı kolonlar, aynı boyuna donatı alanına sahip fiktif dört donatılı kolonlar olarak, sonlu elemanlar analizi programında modellenmiştir. Bu kolonlar 2F-L8S55S10, 2F-M8S55S10 ve 2F-H8S55S10 şeklinde adlandırılmıştır.

Çizelge 6.29 Numune özellikleri

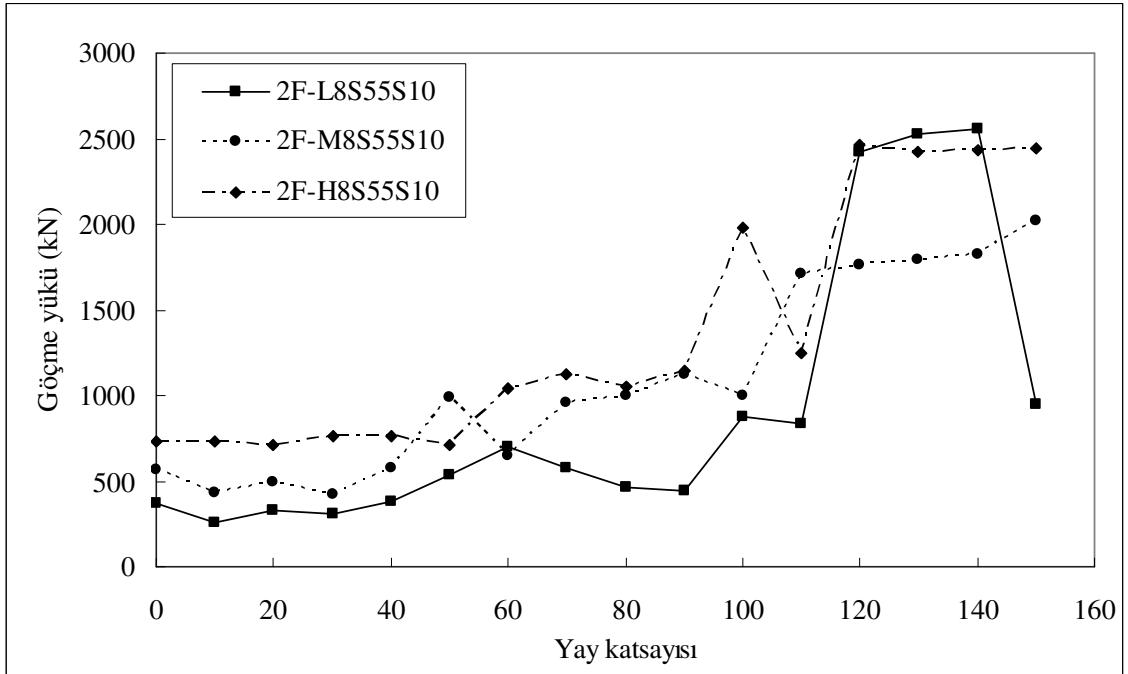
Numune	f_c (MPa)	Etriye Aralığı (mm)	Boyuna Donatı		
			Sayısı	Alanı (mm ²)	Oranı
L8S55S10	20	100	8	129	0,0258
M8S55S10	39	100	8	129	0,0258
H8S55S10	54	100	8	129	0,0258
2F - L8S55S10	20	100	4	258	0,0258
2F - M8S55S10	39	100	4	258	0,0258
2F - H8S55S10	54	100	4	258	0,0258



Şekil 6.46 Fiktif dört boyuna donatılı kolonlar

Çizelge 6.30 Dört boyuna donatılı, etriye çapı 6mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için GY-YK değişimi

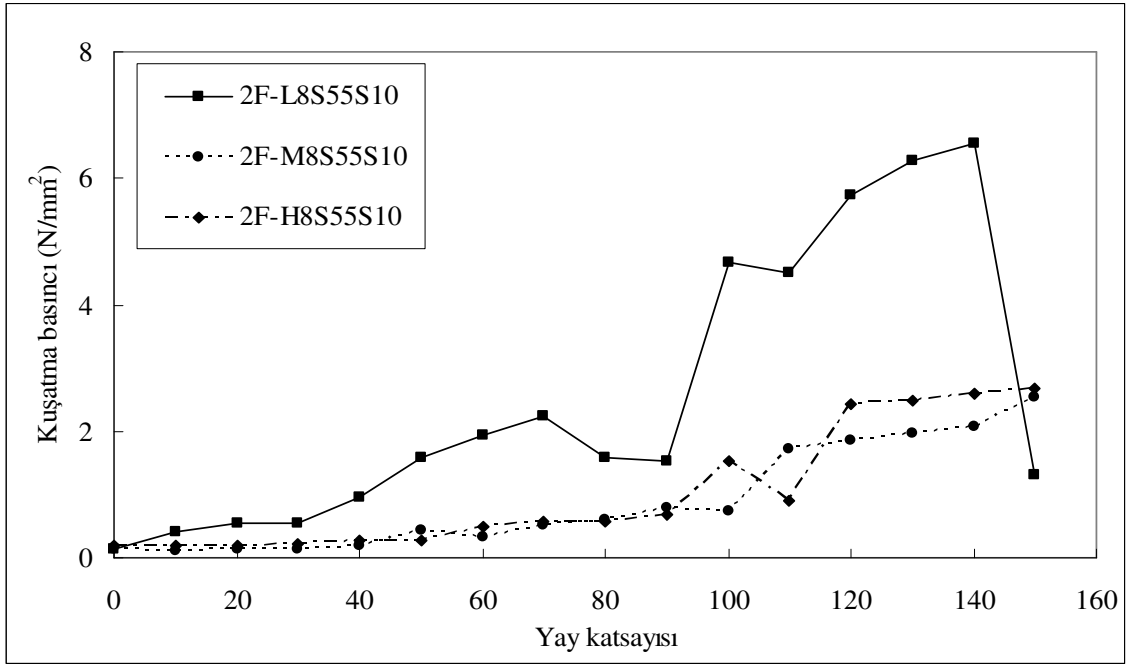
	2F-L8S55S10	2F-M8S55S10	2F-H8S55S10
YK	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)
0	372,4	568,4	729,2
10	257,4	435,6	727,2
20	334,0	499,6	706,4
30	304,4	420,0	760,0
40	377,4	576,8	758,0
50	535,2	985,6	712,4
60	704,0	650,8	1038,4
70	576,8	957,2	1126,0
80	459,6	1002,8	1053,6
90	444,4	1125,6	1143,2
100	876,0	1004,0	1978,4
110	838,8	1710,8	1244,0
120	2423,6	1764,0	2461,6
130	2521,2	1789,2	2420,4
140	2556,4	1825,2	2435,2
150	947,2	2018,8	2440,8



Şekil 6.47 Fiktif dört boyuna donatılı kolonlarda GY-YK değişimi

Çizelge 6.31 Dört boyuna donatılı, etriye çapı 6mm olan kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

	2F-L8S55S10	2F-M8S55S10	2F-H8S55S10
YK	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)	Kuşatma Basıncı (N/mm ²)
0	0,134	0,148	0,184
10	0,403	0,116	0,198
20	0,542	0,138	0,192
30	0,553	0,125	0,228
40	0,946	0,204	0,262
50	1,573	0,426	0,265
60	1,933	0,336	0,498
70	2,241	0,528	0,581
80	1,589	0,603	0,574
90	1,521	0,790	0,672
100	4,666	0,739	1,533
110	4,513	1,708	0,898
120	5,726	1,861	2,429
130	6,267	1,952	2,495
140	6,546	2,070	2,581
150	1,300	2,535	2,668



Şekil 6.48 Fiktif dört boyuna donatılı kolonlarda KB-YK değişimi

Beton dayanımı düşük olan kolonun daha erken yay katsayısı değerlerinde göçme yükünün sıçrama yaptığı görülmektedir. 2F-L8S55S10 kolonu $k=100$, 2F-M8S55S10 kolonu $k=110$, 2F-H8S55S10 kolonu $k=120$ yay katsayısı değerinde sıçrama yaptığı görülmektedir (Şekil 6.47). Yükün sıçrama yapmadan önce beton mukavemeti büyük olan kolonun kuşatma basıncı daha fazlayken, sıçramadan sonra 2F-L8S55S10 kolonu ile 2F-H8S55S10 kolonunun göçme yükü değerleri birbirine yakındır.

Beton mukavemeti en düşük olan 2F-L8S55S10 kolonunun, en büyük kuşatma basıncı değerine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 6.48). 2F-M8S55S10 kolonu ile 2F-H8S55S10 kolonlarının kuşatma basıncı değerleri birbirine çok yakındır.

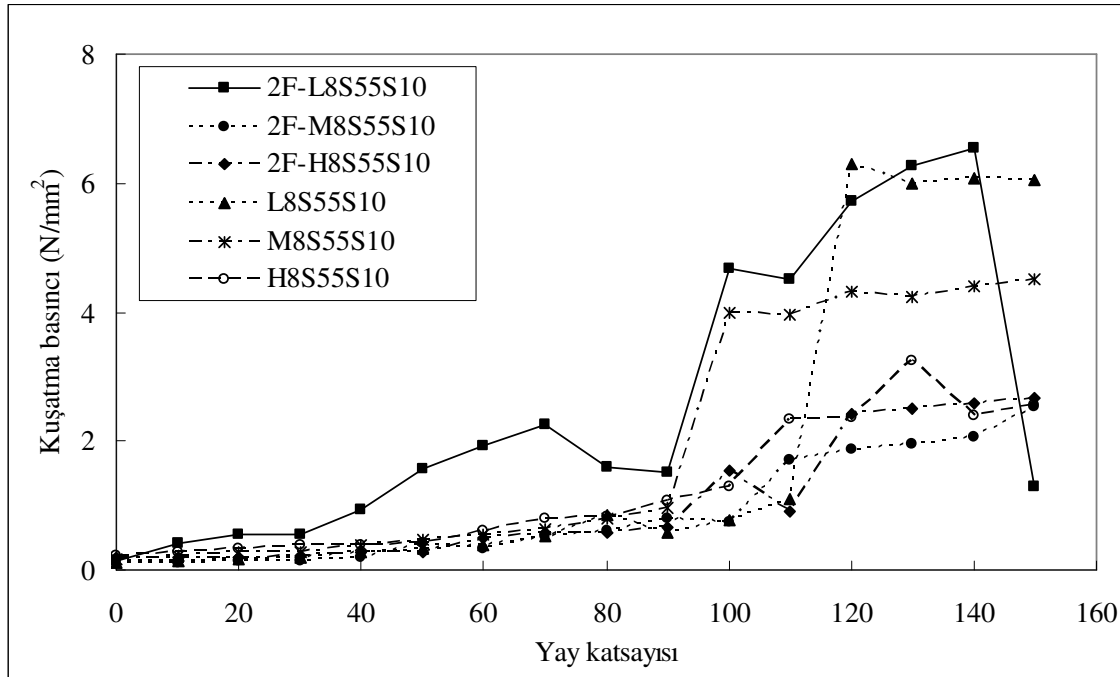
Dört boyuna donatılı kolonlarla sekiz boyuna donatılı kolonları karşılaştırdığımızda; beton dayanımı 20MPa olan 2F-L8S55S10 kolonunun, sekiz boyuna donatılı L8S55S10 kolonuna kıyasla daha erken sıçrama yaptığı görülmektedir (Şekil 6.49). Beton dayanımı 39MPa ve 54MPa olan, dört boyuna donatılı kolonların daha geç sıçrama yaptığı görülmektedir.

Beton mukavemeti 20MPa olan kolonları karşılaştırdığımızda; sıçramadan önce dört boyuna donatılı kolonların kuşatma basıncı değeri daha yüksektir. Sekiz boyuna donatılı kolondaki yükün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerinden sonra ($k=120$ 'den itibaren), dört boyuna donatılı kolonlar ile sekiz boyuna donatılı kolonların kuşatma basıncı değerleri birbirlerine yakın değerler almaktadır.

Beton mukavemeti 39MPa olan kolonları karşılaştırdığımızda; incelenen tüm yay katsayısı değerlerinde sekiz boyuna donatılı kolonların daha yüksek kuşatma basıncı değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

Beton mukavemeti 54MPa olan kolonları karşılaştırdığımızda; sıçramadan önce sekiz boyuna donatılı kolonların kuşatma basıncı değeri daha yüksektir. Sıçramadan sonra; her iki donatı konfigürasyonunda da, kuşatma basıncı değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir.

Beton mukavemeti arttıkça; dört ve sekiz boyuna donatılı kolonların birbirlerine yakın kuşatma basıncı değerleri aldığı ve sıçramadan önce sekiz boyuna donatılı kolonların daha yüksek kuşatma basıncı değerlerine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 6.49 Fiktif dört boyuna donatılı kolonlar ile sekiz boyuna donatılı kolonların KB değerlerinin karşılaştırılması

Donatı sayısı arttıkça, yükün sıçrama yaptıktan sonraki yay katsayısı değerlerinde kuşatma basıncının daha yüksek değerlere ulaşıldığı görülmektedir. Boyuna donatı kesit alanını sabit tutarak, kolondaki boyuna donatı sayısını arttırdığımızda kuşatma basıncının artması beklenen durumdur. Sheikh-Üzümeri (1982) beton modeli ve Mander vd., (1988) beton modelinde de bu durum geçerlidir.

6.3 Analiz Sonuçlarına Uygun Bağıntının Kurulması

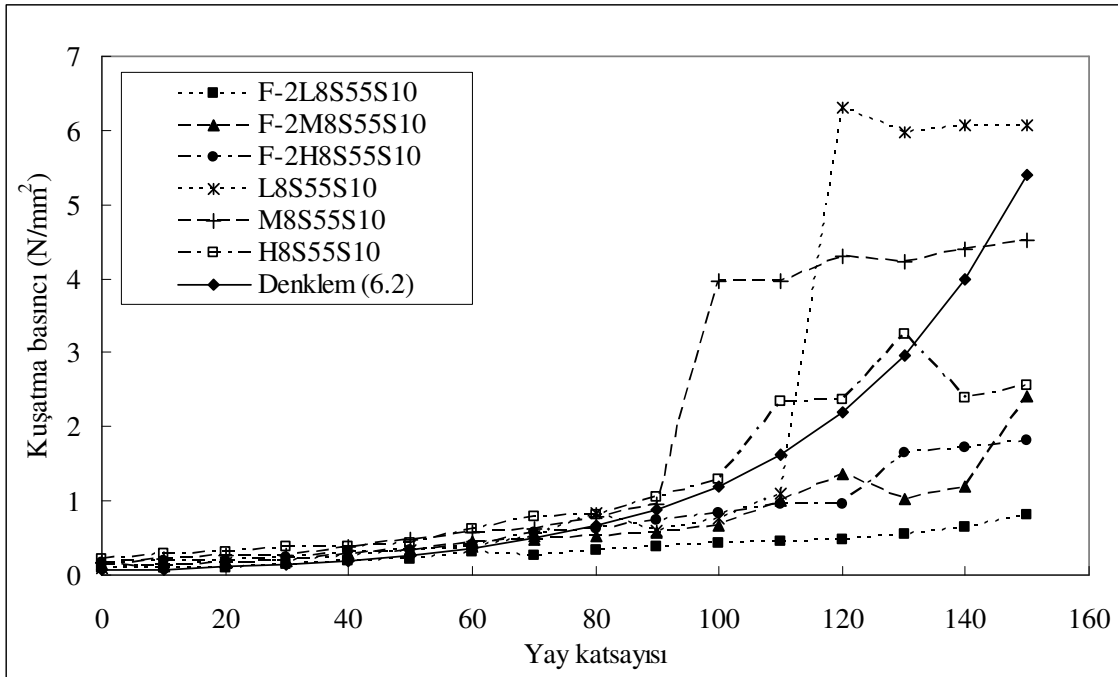
Bu tez çalışması kapsamında incelenen kolonların sonlu eleman analizleri sonuçlarına uygun olarak, aşağıdaki bağıntı kurulmuştur.

$$y=0,06^{k*0,03} \quad (6.2)$$

y: Kuşatma basıncı (N/mm^2)

k: Yay katsayısı

6.3.1 Boyuna donatı çapı değişiminin denklem (6.2) ile karşılaştırılması



Şekil 6.50 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

L8S55S10, M8S55S10 ve H8S55S10 kolonlarında; kuşatma basıncının sıçrama yapmadan önceki durumu için, beton mukavemeti yüksek olan kolonun kuşatma basıncı daha yüksektir. Sıçrama yaptıktan sonraki yay katsayısı değerlerinde beton mukavemeti düşük olan kolonun kuşatma basıncının daha yüksek değer aldığı görülmektedir (Şekil 6.50).

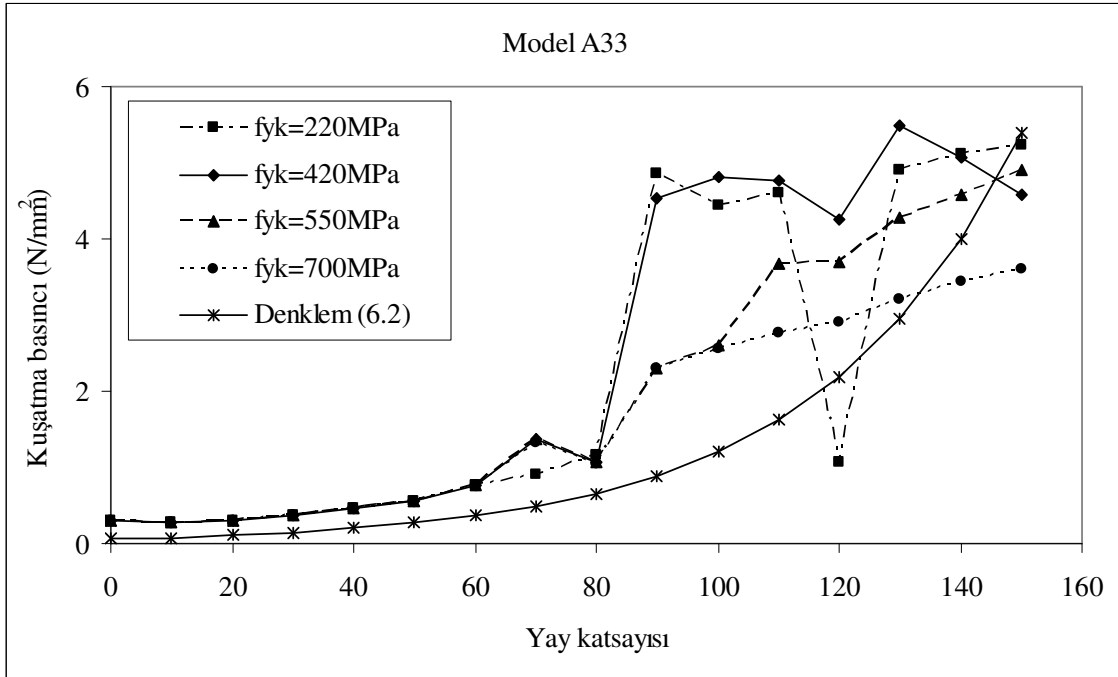
Boyuna donatı alanı iki katına çıkarılan kolonlarda sıçramanın daha az olduğu görülmektedir. Beton mukavemeti arttıkça, (F-2M8S55S10 ve F-2H8S55S10 kolonları için) kuşatma basıncındaki sıçramanın biraz daha belirginleştiği görülmektedir.

Önerilen denklem (6.2)'nin, Şekil 6.50'de çizilen kolon kuşatma basıncı eğrileriyle, yay katsayısının sıçrama yapmadan önceki durumu için uyumlu olduğu görülmektedir. Sıçramadan sonraki durum için ($k=150$), beton mukavemeti düşük olan L8S55S10 ve M8S55S10 kolonların eğrileriyle yakınlaşmaktadır.

Yükün sıçrama yapmadan önceki yay katsayısı değerlerinde, tüm kolonların denklem (6.2) ile uyumlu olduğu görülmektedir. Yükün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerinden sonra, boyuna donatı alanı 129mm^2 olan L8S55S10, M8S55S10 ve H8S55S10 kolonlarına daha yakın bir davranış sergilediği görülmektedir.

Sadece eksenel yüke maruz, aynı beton kesit alanına sahip kolonun boyuna donatı alanını iki katına çıkardığımızda; kolonun yük taşıyabilme kapasitesinin ve kuşatma basıncı değerinin artması beklenir. Sonlu elemanlar analizi sonucunda başlangıçtaki yay katsayısı değerlerinde bu durum gerçekleşmektedir. Kuşatma basıncının sıçrama yaptıktan sonraki değerlerinde bu durum tam tersine dönmektedir. Boyuna donatı alanı ve beton mukavemeti küçük olan kolonun kuşatma basıncı değeri yükselmektedir. Bu da aynı beton kesit alanı içinde boyuna donatı alanı artan kolonun, doğrusal olmayan davranışa yöneldiğini ifade etmektedir.

6.3.2 Boyuna donatı akma dayanımı değişiminin denklem (6.2) ile karşılaştırılması



Şekil 6.51 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

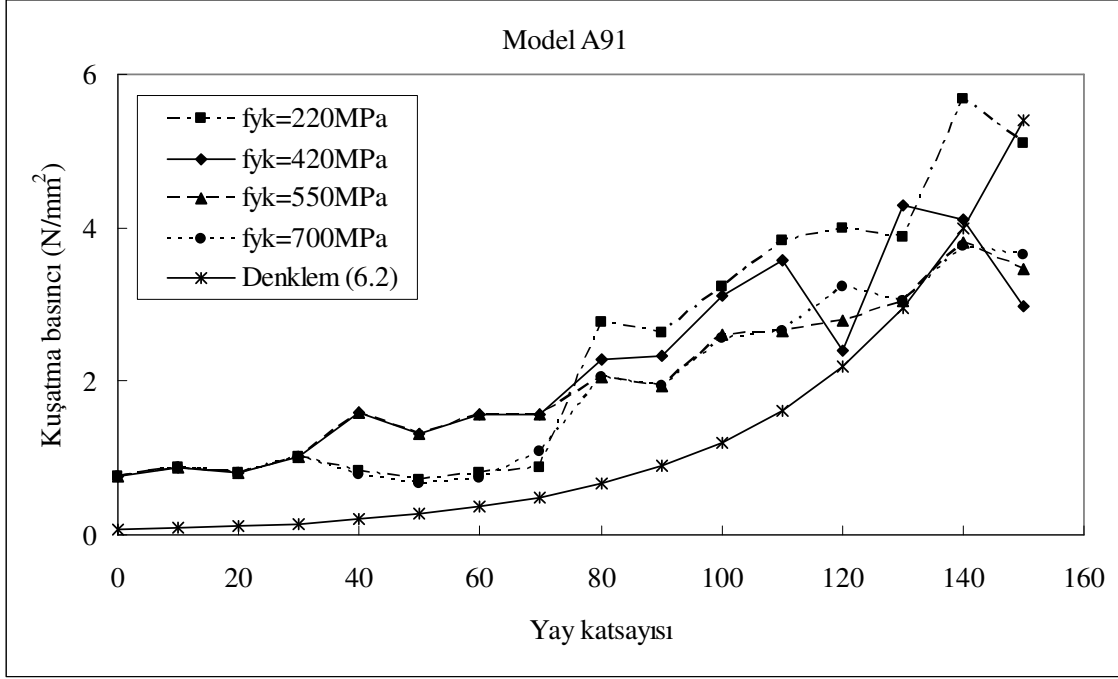
Model A33 ve Model A91 kolonlarında; kuşatma basıncının sıçrama yapmadan önceki yay katsayısı değerlerinde, boyuna donatı akma dayanımları farklı olan kolonların kuşatma basıncı değerleri aynı çıkmaktadır.

Yükün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerinden sonra; boyuna donatı akma dayanımı yüksek olan kolonların, boyuna donatı akma dayanımı düşük olan kolonlara nazaran daha düşük göçme yükü ve kuşatma basıncı değerleri aldığı görülmektedir.

Model A91 kolonunda, kuşatma basıncının sıçrama yaptığı yay katsayısı değerinden itibaren; boyuna donatı akma dayanımı farklı olan kolonların kuşatma basıncı eğrilerinin, Model A33'teki kolonlara kıyasla daha da yakınlığı görülmektedir (Şekil 6.52).

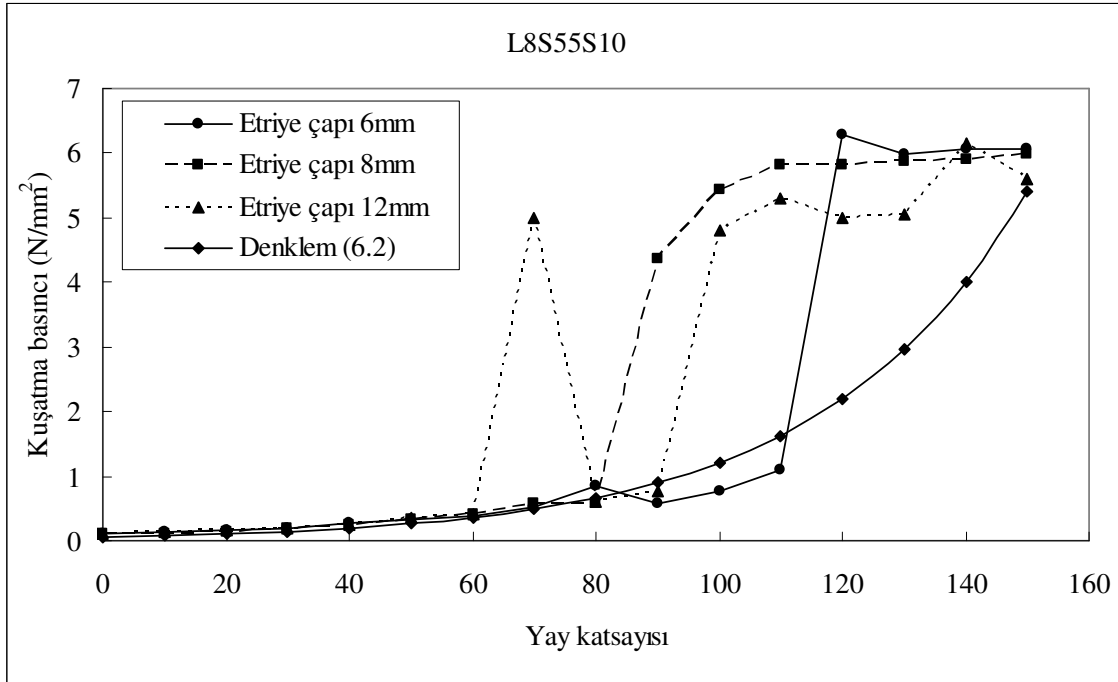
Başlangıçtaki yay katsayısı değerleri için; Model A91 kolonundaki eğriler ile Denklem (6.2) eğrisi arasındaki mesafe, Model A33 kolonuna kıyasla daha fazla açılmaktadır.

Boyuna donatı akma dayanımının artması, kolonun kuşatma basıncını belli bir yay katsayısı değerinden sonra azaltmaktadır. Betonla birlikte çalışan çelik malzemenin akma dayanımı arttıkça, malzemenin uygulayacağı değer düşüyor. Bu durum malzemenin doğrusal olmayan davranışından kaynaklanabilir. Sıçramadan sonraki yay sabitinin her bir kırılma durumu için kuşatma basıncı değerlerinin en yüksek değerine ulaşmasını engelleyebilir.



Şekil 6.52 Sekiz donatılı kolonlarda farklı beton mukavemetleri için KB-YK değişimi

6.3.3 Etriye çapı değişiminin denklem (6.2) ile karşılaştırılması

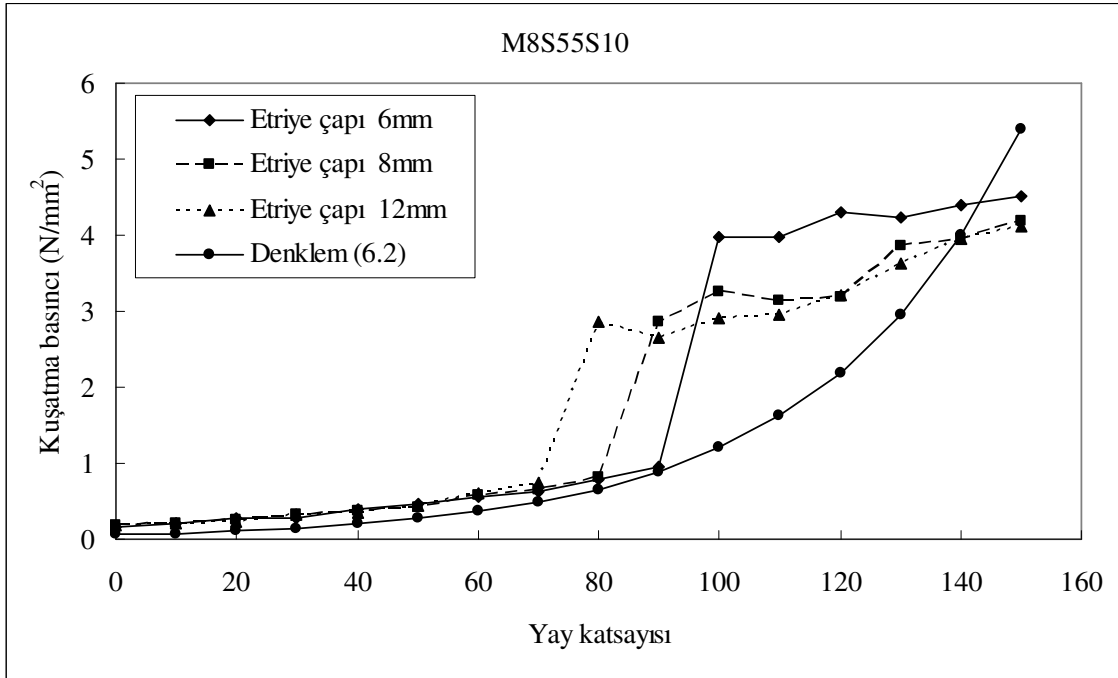


Şekil 6.53 Denklem (6.2) ile beton mukavemeti 20MPa olan, etriye çapları değişen kolonların karşılaştırılması

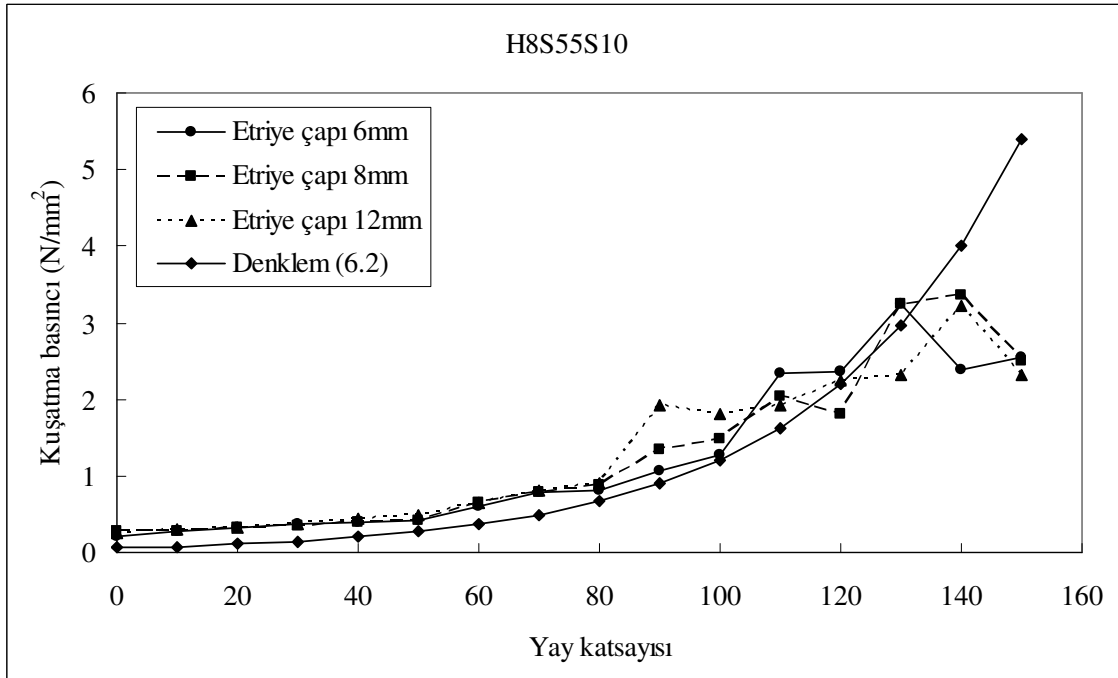
Etriye çapları 6mm ve 8mm olan kolonların eğrileri ile Denklem (6.2)'nin belirlediği eğrinin, kolonun sıçrama yaptığı kuşatma basıncı değerine kadar oldukça uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 6.53). $k=150$ yay katsayısı değerinden itibaren eğrilerin birbirine yaklaştığı görülmektedir.

Etriye çapı 12mm olan kolonda, $k=70$ 'teki kuşatma basıncı değerinde bir sıçrama görülmekte, sonra ani olarak azalıp, tekrar sıçrama yapan bir durumdadır. Sıçramadan sonraki kuşatma basınçları değerleri incelendiğinde ($k=100$ 'den itibaren), etriye çapı 12mm olan kolonun en düşük kuşatma basıncı değerleri aldığı görülmektedir. Betonla birlikte çalışan kuvvetli çelik malzemenin kalınlığı arttıkça, malzemenin uygulayacağı değer düşmektedir. Kuşatma etkisi, modelde yay sabitinin etriye etrafındaki belirli bir alana düzgün olarak dağıtılması şeklinde ifade edilmiştir. Daha kalın çapa sahip güçlü etriye çubukları, yay sabitinin her bir kırılma durumu için kuşatma basıncı değerlerinin en yüksek değerine ulaşmasını engelleyebilir. Bu da malzemenin doğrusal olmayan davranışından kaynaklanabilir.

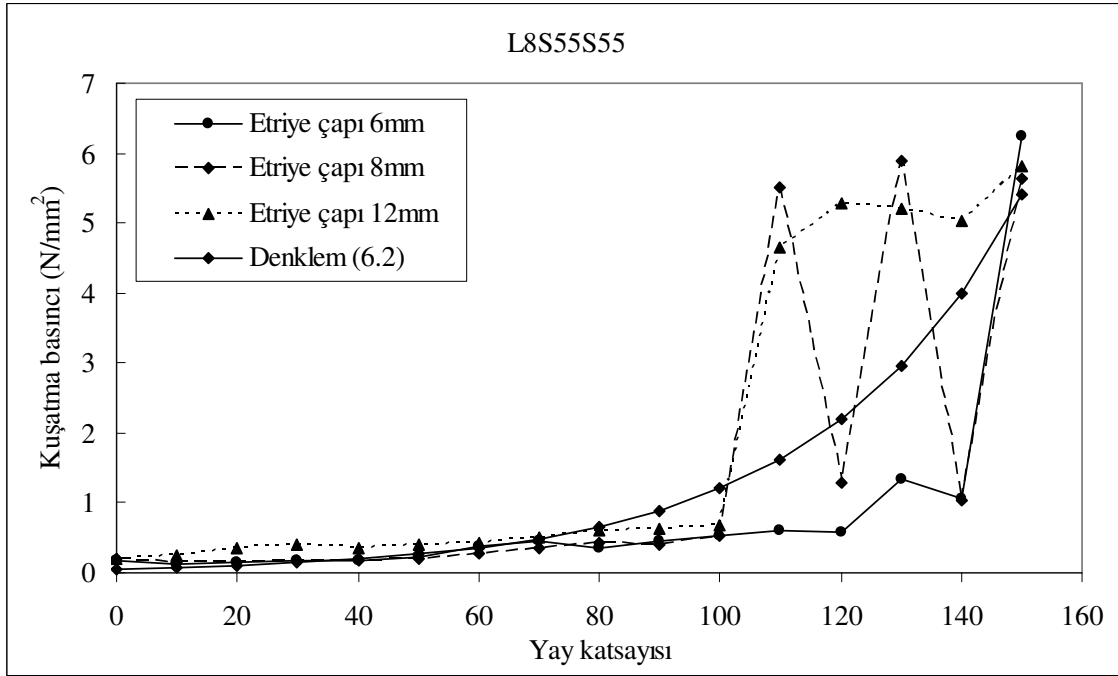
Beton mukavemeti yükseldikçe, etriye çap eğrilerinin önerilen denklem (6.2) ile daha da yaklaştığı görülmektedir (Şekil 6.54 ve Şekil 6.55).



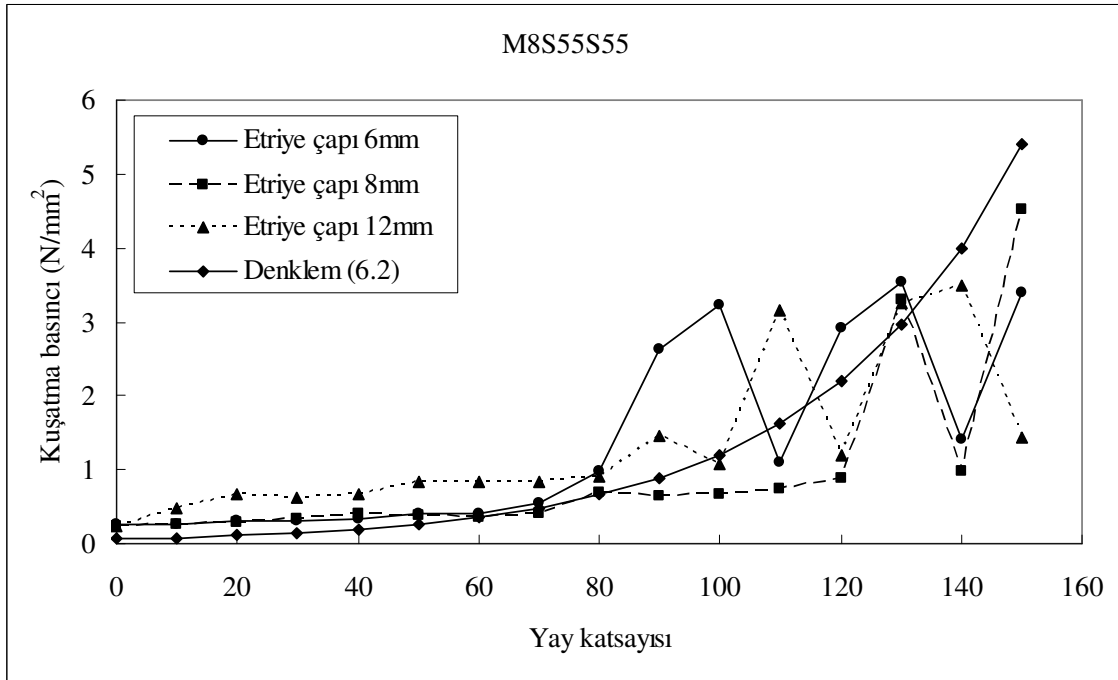
Şekil 6.54 Denklem (6.2) ile beton mukavemeti 39MPa olan, etriye çapları değişen kolonların karşılaştırılması



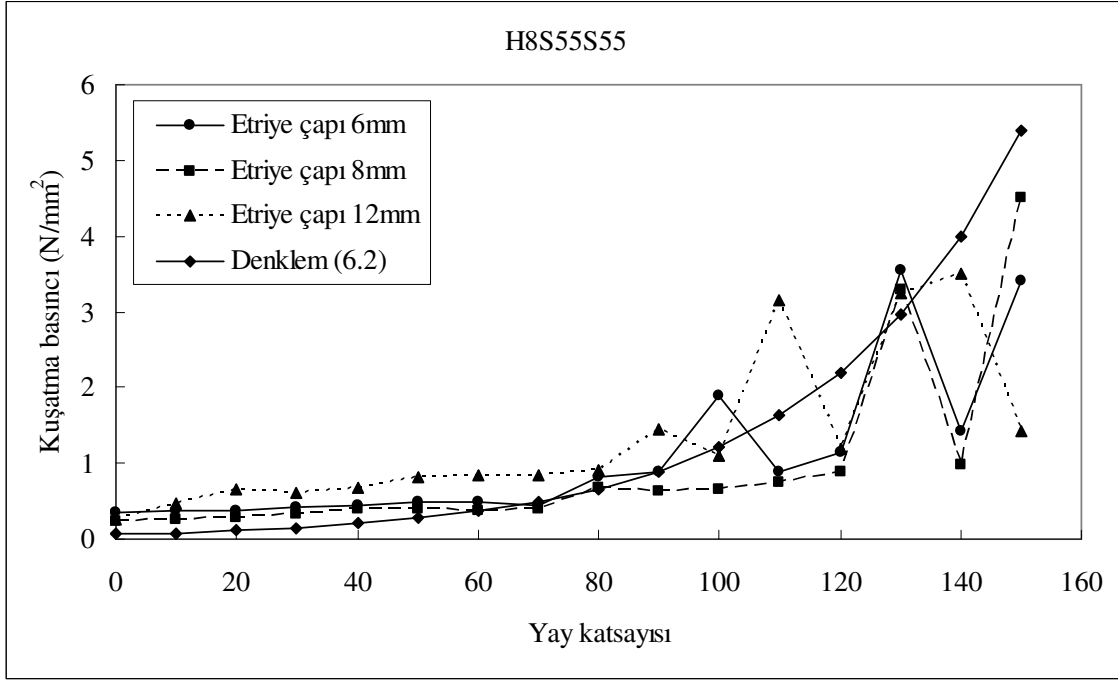
Şekil 6.55 Denklem (6.2) ile beton mukavemeti 54MPa olan, etriye çapları değişen kolonların karşılaştırılması



Şekil 6.56 Denklem (6.2) ile beton mukavemeti 20MPa olan, etriye aralığı 55mm, etriye çapları değişen kolonların karşılaştırılması



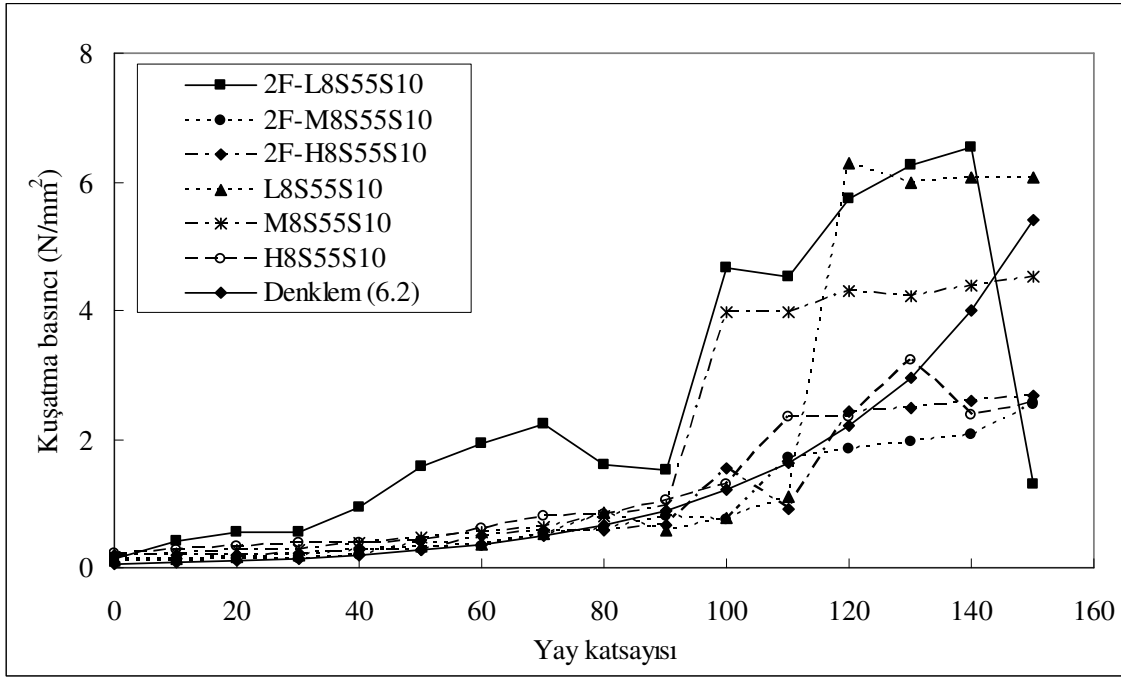
Şekil 6.57 Denklem (6.2) ile beton mukavemeti 39MPa olan, etriye aralığı 55mm, etriye çapları değişen kolonların karşılaştırılması



Şekil 6.58 Denklem (6.2) ile beton mukavemeti 54MPa olan, etriye aralığı 55mm, etriye çapları değişen kolonların karşılaştırılması

6.3.4 Boyuna donatı konfigürasyonu değişiminin denklem (6.2) ile karşılaştırılması

Yükün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerine kadar; denklem (6.2)'deki eğrinin, dört boyuna donatılı 2F-L8S55S10 kolonu hariç diğer tüm kolonlarla paralel bir davranış gösterdiği görülmektedir. Yükün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerinden sonra sekiz boyuna donatılı L8S55S10 ve M8S55S10 kolonlarının, denklem (6.2) ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 6.59 Dört boyuna donatılı ve sekiz boyuna donatılı kolonların KB değerlerinin denklem (6.2) ile karşılaştırılması

7. İRDELEME VE SONUÇ

İncelemeye alınan betonarme kolonların sonlu eleman analizleri yapıldıktan sonra göçme yükü ve kuşatma basıncı değerleri; kuşatma basıncına etki eden her bir parametre için araştırılmıştır.

Kuşatma basıncına etki eden her bir parametre için, günümüzde kendine geniş bir uygulama alanı bulan Mander vd., (1988) beton modeliyle, üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, sonlu eleman analizi sonuçlarına uygun bir bağıntı önerilmiştir.

Bu tez çalışmasında ulaşılan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1) Yapılan sonlu eleman analizleri sonucunda; etriye aralığı 100mm olan kolonların boyuna donatı alanı yarıya düşürüldüğünde; kuşatma basıncı değerlerinin azaldığı ama bu azalma oranının, beton mukavemeti arttıkça düştüğü görülmektedir. Boyuna donatı alanı iki katına çıkarıldığında ise kuşatma basıncı değerlerindeki artma oranının beton mukavemeti arttıkça, azaldığı görülmektedir.

2) İncelemeye alınan Model A33 ve Model A91 kolonunun boyuna donatı akma dayanımlarını sırasıyla 220N/mm^2 , 420N/mm^2 , 550N/mm^2 ve 700N/mm^2 için incelediğimizde; sıçrama yapmadan önceki yay katsayısı değerine kadar, göçme yükleri ve kuşatma basınçları aynı çıkmaktadır. Yüken sıçrama yaptığı yay katsayısı değerinden sonra; boyuna donatı akma dayanımı yüksek olan kolonların, boyuna donatı akma dayanımı düşük olan kolonlara nazaran daha düşük göçme yükü ve kuşatma basıncı değerleri aldığı görülmektedir.

Beton mukavemeti arttıkça, boyuna donatı akma dayanımının kolonun göçme yükü ve kuşatma basıncı üzerindeki rölatif etkisi azalmaktadır.

3) Etriye çaplarının değişimini beton mukavemetlerine göre karşılaştırılacak olursa; göçme yükünün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerine kadar, beton mukavemeti yüksek olan kolonların kuşatma basıncı daha yüksektir (Çizelge 6.16). Sıçrama anından itibaren bu durum tam tersine dönmektedir. Beton mukavemeti daha düşük olan L8S55S10 kolonunun kuşatma basıncı değeri, diğer iki kolona nazaran daha yüksektir. Bu da beton mukavemetinin belli bir değere kadar azalması sonucunda, kolonun sünekliğini arttırdığı şeklinde açıklanabilir. Beton basınç dayanımı ile kolonun taşıma gücündeki artışlar birbiriyle doğru orantılıdır.

Kolonun taşıyabileceği maksimum yük değerine geldikten sonra, normal dayanımlı betona kıyasla daha az sünekler.

3a) L8S55S10 kolonu göçme yükünün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerine kadar, en düşük göçme yüküne ve en düşük kuşatma basıncına sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 6.15).

En yüksek mukavemetli H8S55S10 kolonunda bu durum tam tersidir. $k=0$ değerinde en yüksek kuşatma basıncına sahip olan bu kolon, diğer kolonların göçme yüklerinin sıçrama yaptığı yay katsayısı değerinden sonra en düşük kuşatma basıncına sahip olduğu görülmektedir (Şekil 6.22).

Yay katsayısı değerinin artması; yüksek mukavemetli betonun kuşatma basıncı değerini düşürmekte, düşük mukavemetli betonun kuşatma basıncı değerini artırmaktadır.

3b) Etriye çapı 8mm olan kolonlar incelendiğinde H8S55E10 kolonunun belli bir yay katsayısı değerinde ($k=130$) en yüksek göçme yüküne ulaştığı görülmektedir (Çizelge 6.17 ve Şekil 6.23). $k=80$ değerine kadar beton mukavemeti en yüksek olan kolonların eğrileri üst tarafta yer almaktadır fakat göçme yükünün sıçrama yaptığı $k=80$ değerinden sonra, L8S55E10 kolonunun en yüksek kuşatma basıncı değerleri aldığı Şekil 6.24'de görülmektedir.

3c) Etriye çapı 12mm olan F-L8S55T10 kolonu için $k=70$ değerinde hem göçme yükünde hem de kuşatma basıncı değerinde sıçrama yaptığı görülmektedir (Şekil 6.25 ve Şekil 6.26).

Etriye çubuklarının kalınlığı arttıkça, yay sabitinin her bir kırılma durumu için kuşatma basıncı değerlerinde sapmalar görülmektedir. Bu da malzemenin doğrusal olmayan davranışından kaynaklanabilir.

3d) Etriye çapları sırasıyla 6mm, 8mm ve 12mm için kıyaslama yapılırsa; etriye çapı en büyük olan kolonun göçme yükü daha yüksek çıkmaktadır. Etriye çapı 12mm olan kolonun göçme yükünün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerine kadar en büyük göçme yükü ve kuşatma basıncı değerine sahip olduğu görülmektedir. $k=70$ değerinde göçme yükünün ve kuşatma basıncının sıçrama yaptığı görülmektedir. $k=80$ değerinde ani bir düşme, $k=90$ değerinden sonra yükün tekrar sıçrama yaptığı görülmektedir (Şekil 6.27). $k=120$ değerinden itibaren her üç kolonun da göçme yükü değerleri birbirine çok yakındır.

Yay sabitini 70 değerinde sabit tutarak, L8S55S10 kolonu için etriye çapını sırasıyla 6mm, 8mm ve 12mm olarak arttırdığımızda, etriye çapı 12mm olan kolonda bir sıçrama yaptığını görüyoruz. Bu sıçramanın normalde görülmemesi gerekiyor. Etriye çapının belirlediğı bir kuşatma basıncı değerinden çok beton basınç mukavemetinin belirlediğı bir yay sabiti ve yanal kuşatma basıncı değeri mevcut olmalıdır.

Betona yataklık eden kuvvetli elik malzenin kalınlığı ve tesiri arttıkça, malzemenin uygulayacağı değer düşüyor. Kuşatma etkisi, yay sabitinin etriye etrafındaki belirli bir alana düzgün olarak dağıtılması şeklinde modellendiğini de gözden kaçırmamak gerekir. Daha kalın çapa sahip güçlü etriye çubukları, yay sabitinin her bir kırılma durumu için kuşatma basıncı değerlerinin en yüksek değerine ulaşmasını engelleyebilir. Bu da malzemenin doğrusal olmayan davranışından kaynaklanabilir.

Etriye çaplarına göre kıyaslandığında, beton mukavemeti 39N/mm^2 olan M8S55S10 kolonunun göçme yükü değerleri L8S55S10 kolonuna göre daha yüksektir. Şekil 6.29’da etriye çapı 6mm olan kolonun göçme yükü, sıçrama yaptıktan sonra en yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Kuşatma basıncı değerlerinde de bu durum görülmektedir.

H8S55S10 kolonunda tüm etriye çapları için göçme yükü ve kuşatma basınçları eğrilerinin birbirlerine yakın oldukları görülmektedir (Şekil 6.31 ve Şekil 6.32).

Etriye çapının arttırılarak kuşatma etkisinin incelenmesi sonucunda, göçme yükünün ve kuşatma basıncı değerlerinin arttığı görülür. Ancak beton mukavemeti yükseldikçe eğriler birbirine yaklaştığı için bu etki de azalmaya başlar.

Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Laboratuvarında doktora tez çalışması kapsamında (Turgay T., 2006) deneyleri yapılan C1L4S8, C1L4S12, C1L8S8 ve C1L8S12 kolonlarının etriye donatı çapı değişimi dikkate alınarak karşılaştırdığımızda, etriye çapları 8mm ve 12mm olan deney kolonları göçme yükleri değerlerinin; deney sonuçları ve sonlu eleman analizleri sonuçlarıyla uyumlu olduğu fakat Mander vd., (1988) beton modeliyle uyumlu olmadığı görülmektedir. Etriye apı 8mm’den 12mm’ye çıkarıldığında; kuşatma basınçları sonlu eleman analizi sonucunda düşerken, Mander vd., (1988) beton modelinde ise yükselmektedir.

4) Etriye aralığı 55mm olan kolonlarda bu kıyaslama yapıldığında, etriye çapının önemi anlaşılmaktadır. Göçme yükünün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerine kadar her üç kolonda birbirine yakın göçme yükü ve kuşatma basıncı değerlerine sahiptir (Şekil 6.33 ve Şekil 6.34).

Etriye çapı 8mm ve 12mm olan kolonlarda göçme yükünün sıçrama yaptığı yay katsayısı değerinden sonra daha yüksek değerlerde göçme yüküne ve kuşatma basıncına sahip olduğu görülmektedir.

M8S55S55 ve H8S55S55 kolonlarında etriye çapı arttıkça, başlangıçtaki yay katsayısı değerlerinde göçme yükü azalmaktadır. Etriye çapı 6mm olan kolonun adım adım daha yüksek göçme değerlerine ulaştığı görülmektedir (Şekil 6.35 ve Şekil 6.37).

Kuşatma basınçları değerlerinde, göçme yükünün sıçrama yapıp yükseldiği noktadan itibaren etriye çapı 6mm olan kolonun en yüksek noktaya ulaştığı görülmektedir.

Bu noktadan sonra zigzaglar görülmektedir (Şekil 6.36 ve Şekil 6.38).

5) Kolon numunelerinde sadece etriye akma mukavemeti değerinin değiştirilmesiyle yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda, göçme yükünde ve kuşatma basıncında herhangi bir değişme olmamıştır.

Mander vd., (1988) beton modelinde sadece etriye akma mukavemeti değerinin artırılmasıyla, göçme yükünün ve kuşatma basıncının yükseldiği görülmüştür (Çizelge 6.27 ve Çizelge 6.28).

Mander vd., (1988) beton modelinde beton mukavemeti değiştiği halde kuşatma basınçları aynı çıkmıştır (Çizelge 6.28).

Yanal donatı akma dayanımı sabit olan kolonların etriye çapı arttıkça, Mander vd., (1988) beton modelinde göçme yükü değeri azalmaktadır.

6) Beton mukavemeti arttıkça; dört ve sekiz boyuna donatılı kolonların birbirlerine yakın kuşatma basıncı değerleri aldığı ve sıçramadan önce sekiz boyuna donatılı kolonların daha yüksek kuşatma basıncı değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

Donatı sayısı arttıkça, yükün sıçrama yaptıktan sonraki yay katsayısı değerlerinde kuşatma basıncının daha yüksek değerlere ulaşıldığı görülmektedir. Boyuna donatı kesit alanını sabit tutarak, kolondaki boyuna donatı sayısını arttırdığımızda kuşatma basıncının artması beklenen durumdur. Sheikh-Üzümeri (1982) beton modeli ve Mander vd., (1988) beton modelinde de bu durum geçerlidir.

7) Bu tez çalışmasında, kuşatma basıncı üzerinde önemle duran Saatçioğlu&Razvi beton modeli (1992) ve Mander-Priestly ve Park'ın önerdiği beton modelleri (1988), kuşatma basıncına etkiyen parametreler ve sonlu eleman analiz sonuçları ayrıntılı olarak incelendikten sonra analiz sonuçlarına uygun bir bağıntı kurulmuştur.

8) Yapılan deneyler, literatür araştırması ve sonlu eleman analizlerinin karşılaştırılması sonucunda eksenel yüke maruz betonarme kolonların eksenel yük-kısalma eğrilerini elde etmek için deney tekniklerinin değerlendirilmesi yapılmıştır.

Kolonlarda dış merkezliğin oluşmaması için deneyden önce kolona küçük bir miktarda yük verilip, LVDT'lerin okuduğu şekil değiştirme değerlerinin öncelikli olarak kontrol edilmesi gerekmektedir. Deney başlangıcında görülen farklı okumalar, kolondaki yüklemenin eksantrik yükleme olduğu anlamındadır.

Göçme yükünün yaklaşık olarak %75 değerini aldığı, kararsız çatlağın yayılmaya başlamasından sonra kolonun şiddetli oturmuş kenarındaki hasarın yığılmasını gösteren kritik LVDT okumaları tercih edilmiştir.

Bu durumda sonlu eleman analizi sonuçları ile deney dataları iyi uyum sağlamaktadır.

Betonarme kolonlarda eksenel deformasyon ölçümlerinin yapılacağı LVDT yerlerinin tahmini yeniden irdelenmelidir.

9) Kolonların üst yüzeyindeki karşılıklı iki kenarın arasında çok küçük yükseklik farkı bile olması; sonlu eleman analizi sonuçlarını oldukça değiştirmektedir. İmalat sırasında ortaya çıkan; 0,05 ve 0,001 oranında üst yüzeyleri hatalı olan deney kolonlarının sonlu elemanlar analizi programında modellenmesi ile deney sırasındaki LVDT okumaları sonucunda oluşan eksenel yük-kısalma eğrilerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Gerek analiz sonucu gerekse deney sonuçlarının birbirlerine uyumlu olduğu görülmektedir. Kolon numunelerindeki bu tür hataların hazırlık aşaması boyunca olması mümkün olduğundan kolonların hazırlanırken dikkatle kontrol edilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Bakioğlu, M., Kadioğlu, N., Engin, H. (1998), “Mukavemet Problemleri”, Beta Yayınevi, İstanbul.
- CEB-FIB., (1990), Model Code, “Comité Euro-International du Béton (CEB)”, Lausanne, Switzerland.
- Chen, W.F. ve Han, D.J. (1988), “Plasticity for Structural Engineers”, Springer-Verlag NY, USA.
- Craddock, J. (2003), “Nonlinear Problems”, Southern Illinois University, Carbondale, USA.
- Ersoy, U. ve Özcebe, G. (2001), “Betonarme”, Evrim Yayınevi, İstanbul.
- Hognestad, E., (1951), "A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members", Bulletin Series No.399, University of Illinois Eng. Exp. Station, Urbana.
- Kachanov, L.M. (1986), “Introduction to continuum damage mechanics”, Mechanics of elastic stability, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, Hollanda.
- Kent, D.C. ve Park, R., (1971), "Flexural Members with Confined Concrete", Journal of the Structural Division, Proc. of the American Society of Civil Engineers, 97(ST7): 1969-1990.
- Köksal, H.O., (1998)“Modeling of Concrete Fracture”, Boğaziçi Üniversitesi FBE, 283 syf, İstanbul.
- Köksal, H.O. ve Karakoç, C., (1999), “An Isotropic Damage Model for Concrete”, Materials and Structures, Vol.32, No.222, 611-617.
- Köksal, H. O., Karakoç, C., Polat, Z., Turgay, T., Akgün, Ş., (2006), “Evaluation on experimental procedures for confined RC columns using 3D finite element analyses”, Wessex Institute, United Kingdom (not just published but presented in Belgium).
- Köksal, T., (1995), “Sonlu Elemanlar Metodu”, Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.
- LUSAS Modeller (v13.6) User Manual v13, FEA Ltd., UK.
- Mander, J.B., Priestly, M.J.N. ve Park, R., (1988), "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", Journal of the Structural Engineering, ASCE, 114(8):1804-1826.
- Mander, J.B., Priestly, M.J.N. ve Park, R., (1988), "Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete", Journal of the Structural Engineering, ASCE, 114(8):1827-1849.
- Oliver J, Cervera M, Oller S, Lubliner J, (1990), “Isotropic damage models and smeared crack analysis of concrete”, In N. Bićanić et al. (ed) Proc. SCI-C Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures, pp. 945-957.
- Razvi, S. ve Saatcioglu, M., (1999), "Confinement Model for High-Strength Concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, 125(3): 281-289.
- Razvi, S.R. ve Saatcioglu, M., (1989), "Confinement of Reinforced Concrete Columns with Welded Wire Fabric", ACI Structural Journal, 85(5):615-623.
- Saatcioglu, M. ve Razvi, S.R., (1992), "Strength and Ductility of Confined Concrete", Journal of the Structural Engineering, ASCE, 118(6):1590-1607.

Sheikh, S.A., (1982), "A Comparative Study of Confinement Models", ACI Journal, 79(4): 296-305.

Sheikh, S.A. ve Uzumeri, S.M., (1980), "Strength and Ductility of Tied Concrete Columns", Journal of the Structural Division, ASCE, 106(ST5):1079-1102.

Sheikh, S.A. ve Uzumeri, S.M., (1982), "Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns", Journal of the Structural Division, Proc. of the American Society of Civil Engineers, 108(ST12):2703-2722.

Turgay, T., (Çalışma halen sürmektedir), "Doktora Tezi", Yıldız Teknik Üniversitesi FBE, İstanbul.

İNTERNET KAYNAKLARI

[1] <http://ocw.mit.edu/ocwWeb/Aeronautics-and-Astronautics/16-21Spring/LectureNotes>

[2] <http://ocw.mit.edu/ocwWeb/Civil-and-Environmental-Engineering/1-054Spring2004/LectureNotes/index.htm>

[3] <http://www.me.mtu.edu/~mavable>

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi: 26.03.1982

Doğum yeri: Eskişehir

Yüksek Lisans
2004 – 2006

Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programı

Lisans
2000 – 2004

Trakya Üniversitesi
Çorlu Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü

1999 – 2000

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü

Lise

1995 – 1999

Ankara Sincan Süper Lisesi