

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BETONARME KOLONLARIN DENEYSEL  
SONUÇLARININ DOĞRUSAL OLMAYAN SONLU  
ELEMEN ÇÖZÜMLEMELERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI**

**İnşaat Müh. Muzaffer BALCI**

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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Güray ARSLAN (YTÜ)**

**İSTANBUL, 2009**

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	iv
KISALTIMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	x
ÖNSÖZ .....	xi
ÖZET .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	10
2.1 Genel .....	10
2.2 Sonlu Elemanlar Yönteminde Problem Çözümünde İzlenecek Adımlar .....	12
2.3 Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Elemanlar .....	12
2.3.1 Tek Boyutlu Elemanlar .....	13
2.3.2 İki Boyutlu Elemanlar .....	13
2.3.3 Üç Boyutlu Elemanlar.....	13
2.3.4 Dönel Elemanlar .....	14
2.3.5 İzoparametrik Elemanlar .....	14
2.4 Genel Sonlu Eleman Denklemleri .....	15
2.5 Sonlu Elemanlar Yönteminin Diğer Yöntemlere Göre Avantajları ve Dezavantajları.....	16
3. DENEY ÇALIŞMASININ TANITIMI .....	17
4. SONLU ELEMAN MODELİ OLUŞTURULMASI.....	20
4.1 Beton ve Donatı için Malzeme Modelleri.....	20
4.1.1 Drucker - Prager Malzeme Modeli .....	20
4.1.2 Donatı Çelikleri İçin Genel Olarak Kullanılan $\sigma$ - $\epsilon$ Modelleri.....	22
4.2 ANSYS Genel Bilgiler.....	24
4.2.1 Ana Menüler.....	24
4.2.2 Model Oluşturma (Modelling Menüsü) .....	25
4.2.3 Eleman Tiplerinin Belirlenmesi (Element Type Menüsü).....	26
4.2.4 Eleman Sabitlerinin Belirlenmesi (Real Constants Menüsü).....	27
4.2.5 Modelin Sonlu Elemanlara Bölünmesi (Meshing Menüsü).....	28
4.2.6 Malzeme Özellikleri (Material Props Menüsü).....	29

4.2.7	Sınır Koşulları ve Yük Tanımlama (Define Loads menüsü) .....	31
4.2.8	Çözümleme (Analysis Type Menüsü) .....	32
4.3	Betonarme Kolonların Sonlu Eleman Modellemeleri .....	35
4.3.1	Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması.....	35
4.3.2	Kolonların Mesnet Şartları ve Yüklenmesi.....	42
5.	DEPREM YÖNETMELİĞİ BETONARME ELEMAN HASAR SINIRLARI İLE SONLU ELEMAN ÇÖZÜMLEMELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI .....	45
5.1	Sonlu Eleman Çözümlenmeleri ile Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	45
5.2	Deprem Yönetmeliği Performans Sınır Değerleri.....	48
5.3	Deprem Yönetmeliği Performans Sınır Değerleri ile Sonlu Eleman Çözümleme Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	49
5.3.1	Minimum Hasar Sınırı (MN).....	49
5.3.2	Kesit Güvenlik Sınırı (GV).....	58
5.3.3	Kesit Göçme Sınırı (GÇ).....	62
6.	SONUÇLAR .....	71
	KAYNAKLAR.....	73
	ÖZGEÇMİŞ.....	75

## SİMGE LİSTESİ

$a^e$	Düğüm noktası serbestliklerinden (bilinmeyenlerinden) oluşan vektör
$A_g$	Kolon brüt kesit alanı
$A_s$	Enine donatının kesit alanı
$A_{st}$	Boyuna donatı toplam alanı
$B$	Düğüm noktası serbestliklerini şekil değiştirmelere bağlayan matris
$b$	Hacim kuvvetlerinden oluşan vektör (birim hacme gelen kuvvetler)
$c$	Malzemenin kohezyonu
$D$	Elastisite matrisi
$E_p$	Donatı çeliğinin plastisite modülü
$f_c$	Beton basınç dayanımı
$f_{ci}$	$\epsilon_{ci}$ şekil değişiminde oluşan beton gerilmesi
$f_p$	Düğüm noktası yüklerinden oluşan vektör
$f_{su}$	Boyuna donatı kopma dayanımı
$f_{yh}$	Boyuna donatı akma dayanımı
$f_{yk}$	Boyuna donatı karakteristik akma dayanımı
$f_{yv}$	Enine donatı akma dayanımı
$h_{ji}$	Kat yüksekliği
$I_1$	Gerilme tansörünün birinci invaryantı
$J_2$	Deviyatör tansörünün ikinci invaryantı
$K$	Malzeme sabiti
$N$	Şekil fonksiyonları matrisi
$P$	Eksenel yük
$s$	Yüzey kuvvetlerinden oluşan vektör (birim alana gelen kuvvetler)
$s$	Enine donatı aralığı
$s'$	İki etriye arasındaki net mesafe
$\delta_{ji}$	İlgili kattaki en büyük görelî kat ötelemesi
$(\epsilon_{cg})_{GC}$	Kesit göçme sınırı için etriye içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirmesi
$(\epsilon_{cg})_{GV}$	Kesit güvenlik sınırı için etriye içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirmesi
$\epsilon_{coc}$	Sargılı beton maksimum gerilmesine karşılık gelen birim şekil değişimi
$(\epsilon_{cu})_{MN}$	Kesit minimum hasar sınırı için kesitin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirmesi

$(\epsilon_s)_{GC}$	Kesit göçme sınırı için donatı çeliği birim şekil değiştirmesi
$(\epsilon_s)_{GV}$	Kesit güvenlik sınırı için donatı çeliği birim şekil değiştirmesi
$(\epsilon_s)_{MN}$	Minimum hasar sınırı için donatı çeliği birim şekil değiştirmesi
$\epsilon_{si}$	Donatı şekil değişimi
$\epsilon_{sh}$	Donatı çeliği pekleşme başlangıcı şekil değişimi
$\epsilon_{su}$	Donatı çeliği kopma şekil değişimi
$\epsilon_{sy}$	Donatı çeliği akma şekil değişimi
$\epsilon_0$	İlkel şekil değiştirme vektörü (örneğin sıcaklık değişimi)
$\sigma_s$	Kesitin alt kısmındaki donatılarda oluşan gerilmesi
$\sigma_0$	İlkel gerilme vektörü
$\sigma_{2e}$	Sargı donatı etkisiyle kesitte oluşan eşdeğer yanal basınç
$\rho_s$	Sargı donatısı hacimsel yüzdesi
$\rho_{sm}$	Kesitte bulunması gereken enine donatı hacımsal oranı
$\alpha$	Malzeme sabiti
$\phi$	Malzemenin içsel sürtünme açısı

## **KISALTMA LİSTESİ**

CEB	Comite Euro-International du Beton (Uluslararası Avrupa Beton Komitesi)
DBYBHY	Deprem Bölgelerin Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
FIB	Federation Internationale de la Precontrainte (Uluslararası Öngerilme Federasyonu)
LVDT	Linear variable differential transformer

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 U1, U2, U3 ve U4 deneysel kolonların yükleme şekli ve enkesitleri .....	2
Şekil 1.2 Deneysel kolonların yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri (Soesianawati vd., 1986).....	3
Şekil 1.3 U7 ve U8 deneysel kolonların yükleme şekli ve enkesitleri.....	4
Şekil 1.4 Deneysel kolonların yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri (Zahn vd., 1986).....	5
Şekil 1.5 U3, U4, U6 ve U7 deneysel kolonların yükleme şekli.....	5
Şekil 1.6 U3, U4, U6 ve U7 deneysel kolonların enkesitleri .....	5
Şekil 1.7 Deneysel kolonların yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri (Saatçioğlu ve Özcebe, 1989)6	
Şekil 2.1 Bir sonlu eleman modelindeki düğüm noktalar ve elemanlar .....	11
Şekil 2.2 Tek boyutlu elemanlar.....	13
Şekil 2.3 İki boyutlu elemanlar.....	13
Şekil 2.4 Üç boyutlu elemanlar .....	14
Şekil 3.1 Analitik çözümü yapılan kolonların boykesiti.....	18
Şekil 3.2 Analitik çözümü yapılan kolonların enkesiti.....	18
Şekil 3.3 Deney düzeneği ve ölçüm aletlerinin yerleşimi.....	19
Şekil 4.1 Drucker - Prager kriteri (Chen, 1982) .....	21
Şekil 4.3 Doğal sertlikteki bir çeliğin $\sigma$ - $\epsilon$ ilişkisi (Ersoy ve Özcebe 1998).....	22
Şekil 4.4 Donatı çeliği için elasto-plastik davranış modeli (CEB/FIB, 1978).....	23
Şekil 4.5 Donatı çeliği için pekleşmeli davranış modeli (Gündüz, 1990) .....	23
Şekil 4.6 ANSYS utility menü .....	24
Şekil 4.7 ANSYS main menü.....	24
Şekil 4.8 ANSYS main menü (modeling).....	25
Şekil 4.9 ANSYS model oluşturma nesneleri .....	25
Şekil 4.10 Eleman type menüsü .....	26
Şekil 4.11 Solid65 elemanı.....	26
Şekil 4.12 Link8 elemanı .....	27
Şekil 4.13 Solid45 elemanı.....	27
Şekil 4.14 Real constants menüsü.....	28
Şekil 4.15 Meshing menüsü .....	28
Şekil 4.16 Material props menüsü .....	29
Şekil 4.17 İki doğrulu pekleşmeli malzeme davranışı.....	29
Şekil 4.18 Çok doğrulu pekleşmeli malzeme davranışı.....	29
Şekil 4.19 İki doğrulu izotropik pekleşmeli malzeme davranışı .....	30
Şekil 4.20 Çok doğrulu izotropik pekleşmeli malzeme davranışı.....	30

Şekil 4.21 Define loads menüsü .....	31
Şekil 4.22 ANSYS programı çözüm seçenekleri menüsü.....	32
Şekil 4.23 Analysis type menüsü.....	32
Şekil 4.24 ANSYS programında solution controls menüsü.....	33
Şekil 4.25 Newton - Raphson yönteminde çözümün ilerleyişi .....	34
Şekil 4.26 Değiştirilmiş Newton - Raphson Yöntemi .....	34
Şekil 4.27 Sonlu eleman ağına bölünmüş deney kolonu ve eleman tipleri.....	35
Şekil 4.28 Sonlu eleman modelindeki enine ve boyuna donatı elemanlar.....	36
Şekil 4.29 Kolonu oluşturan eleman sabitleri numaraları.....	37
Şekil 4.30 Beton malzeme parametrelerinin girilmesi.....	40
Şekil 4.31 Solid65 elemanında oluşabilecek çatlaklar .....	41
Şekil 4.32 Donatı çeliği için verilen linear isotropic verileri grafiği.....	42
Şekil 4.33 Donatı çeliği için tanımlanan gerilme - şekil değiştirme eğrisi .....	42
Şekil 4.34 Modellenen kolonun mesnetlenmesi ve yüklenmesi.....	43
Şekil 4.35 Modellenen kolonun yerdeğıştirmesinin vektörel gösterimi .....	43
Şekil 4.36 Sonlu eleman modeli çözüm adımları .....	44
Şekil 4.37 Yatay yük yükleme adımları.....	44
Şekil 5.1 NC1, NC6, NC7 ve NC8 kolonları yatay yük-yerdeğıştirme eğrileri.....	46
Şekil 5.2 NC2, NC4, NC5 ve NC9 kolonları yatay yük-yerdeğıştirme eğrileri.....	47
Şekil 5.3 Kesit hasar bölgeleri (DBYBHY, 2007) .....	48
Şekil 5.4 Sargısız beton basınç birim şekil değıştirme-görelî kat ötelemesi oranı (MN).....	51
Şekil 5.5 NC1, NC2, NC4 ve NC5 kolonları $\varepsilon_{cu}$ ve $\varepsilon_s$ değışimleri (MN) .....	52
Şekil 5.6 NC6, NC7, NC8 ve NC9 kolonları $\varepsilon_{cu}$ ve $\varepsilon_s$ değışimleri (MN) .....	53
Şekil 5.7 Çözümlemesi yapılan kolonlara ait çatlaklar (MN).....	54
Şekil 5.8 NC1, NC2, NC4 ve NC5 kolonları $\varepsilon_{cu}$ ve $\varepsilon_s$ değışimleri (Donatı Akma).....	55
Şekil 5.9 NC6, NC7, NC8 ve NC9 kolonları $\varepsilon_{cu}$ ve $\varepsilon_s$ değışimleri (Donatı Akma).....	56
Şekil 5.10 Çözümlemesi yapılan kolonlara ait çatlaklar (Donatı akma).....	57
Şekil 5.11 NC1, NC4 ve NC5 kolonları $\varepsilon_{cg}$ ve $\varepsilon_s$ değışimleri (GV).....	60
Şekil 5.12 NC6, NC7, NC8 ve NC9 kolonları $\varepsilon_{cg}$ ve $\varepsilon_s$ değışimleri (GV).....	60
Şekil 5.13 Çözümlemesi yapılan kolonlara ait çatlaklar (GV).....	61
Şekil 5.14 $\varepsilon_{cg}$ - görelî kat ötelemesi oranı (GÇ).....	63
Şekil 5.15 $\varepsilon_s$ - görelî kat ötelemesi oranı (GÇ) .....	64

Şekil 5.16 NC1, NC4, NC5 ve NC6 kolonları $\varepsilon_{cg}$ ve $\varepsilon_s$ değişimleri (GÇ) .....	65
Şekil 5.17 NC7, NC8 ve NC9 kolonları $\varepsilon_{cg}$ ve $\varepsilon_s$ değişimleri (GÇ) .....	66
Şekil 5.18 Çözümlemesi yapılan kolonlara ait çatlak grafikleri (GÇ).....	67
Şekil 5.19 Sonlu eleman çözümlemesinde NC1, NC2, NC4 ve NC5 kolonları göçme anındaki beton basınç ve donatı çeliği birim şekil değiştirmeleri .....	68
Şekil 5.20 Sonlu eleman çözümlemesinde NC6, NC7, NC8 ve NC9 kolonları göçme anındaki beton basınç ve donatı çeliği birim şekil değiştirmeleri .....	69
Şekil 5.21 Çözümlemesi yapılan kolonların göçme anına ait çatlak grafikleri.....	70

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 Deneysel kolonlarının özellikleri (Soesianawati vd.,1986).....	3
Çizelge 1.2 Deneysel kolonlarının özellikleri (Zahn vd., 1986).....	4
Çizelge 1.3 Deneysel kolonlarının özellikleri (Saatçioğlu ve Özcebe, 1989).....	6
Çizelge 3.1 Deneysel kolonlarının özellikleri (Lin ve Lin, 2005).....	17
Çizelge 3.2 Kolonlara uygulanan aksenal yükler .....	18
Çizelge 4.1 Solid65 ve link8 elemanı için tanımlanan eleman sabitleri .....	36
Çizelge 4.2 NC1, NC2, NC4 ve NC5 kolonu malzeme özellikleri .....	37
Çizelge 4.3 NC6, NC7, NC8 ve NC9 kolonu malzeme özellikleri .....	39
Çizelge 5.1 Görelî kat ötelemesi sınırları.....	48
Çizelge 5.2 Kolonların kesit birim şekil değiştirmeleri (MN) .....	50
Çizelge 5.3 Kolonların sonlu eleman çözümlene sonuçları (MN) .....	50
Çizelge 5.4 Kolonların kesit birim şekil değiştirmeleri (GV).....	58
Çizelge 5.5 Kolonların sonlu eleman çözümlene sonuçları (GV).....	59
Çizelge 5.6 Kolonların kesit birim şekil değiştirmeleri (GÇ) .....	62
Çizelge 5.7 Kolonların sonlu eleman çözümlene sonuçları (Kesit Göçme Sınırı).....	62

## ÖNSÖZ

Son yıllarda teknolojinin hızla gelişip bilgisayar kapasitelerinin artması araştırmacıları daha çok bilgisayarlardan faydalanmaya itmiştir. Bilgisayarda yazılan programlar henüz tam olarak deneysel çalışmaların yerini tutmasa da büyük kolaylıklar sağladığı ve en azından yön gösterdiği bilinmektedir.

Bu çalışmada, literatürde kabul görmüş deneysel çalışmalardan geometrik ve malzeme özellikleri belirli kolonlar bilgisayar ortamında modellenerek doğrusal olmayan (plastik) sonlu eleman çözümlenmeleri yapılmıştır. Çözümlenmelerden bulunan sonuçların deneysel verilerle tutarlı olduğu düşünülerek kesit düzeyinde deprem yönetmeliği performans sınır değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma boyunca yardımları, gösterdikleri ilgi ve sabırları için Yrd. Doç. Dr. Güray ARSLAN'a ve destek olan herkese içtenlikle teşekkür ederim.

## ÖZET

Betonarme kolonların deprem performansının incelenmesinde, tek yönlü artan yüke maruz elemanın yatay yük-yerdeğiştirme eğrisinin tersinir yüke maruz elemanın yük-yerdeğiştirme zarf eğrisini temsil ettiği düşünülerek doğrusal olmayan sonlu eleman çözümleri yapıldı. Çözümlerinde, literatürde kabul görmüş yayınlardan yeterli deneysel verilere sahip sınırlı sayıda betonarme kolon seçilerek, bu kolonların çözümleri ile deney sonuçları karşılaştırıldı. Çözümü yapılan kolonların yatay yük ve yerdeğiştirme değerlerinin deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu söylenebilir. Bu tutarlılık göz önüne alınarak, Deprem Yönetmeliği'nde doğrusal elastik yöntemle yapılan hesap için tanımlanan görece kat öteleme sınır değerlerinde, çözümlenmeden bulunan ve yönetmelikteki kesit birim şekil değeri kapasiteleri karşılaştırıldı. Karşılaştırma sonucu, yönetmelikte tanımlanan kesit düzeyindeki birim şekil değeri çözümlerinin çözümlerinden oldukça büyük değerler verdiği söylenebilir.

## **ABSTRACT**

Finite element analyses have been carried out under the effect of monotonic lateral load to investigate the earthquake performance of R/C columns assuming that the monotonic lateral load-displacement curve is the envelope of the cyclic load-displacement curve. The results of finite element analyses have been compared with the results of experimental studies selected from literature. It is observed that the lateral load-displacement curves of analysed columns are compatible with the experimental results. Based on this lateral load-displacement curves; the drift limits and material strain limits, both are given by Turkish Seismic Design Code, as performance indicator are compared. It is observed that comparing to drift limits, material strain limits are nonconservative as performance indicator of R/C columns.

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda teknolojinin hızla gelişmesine paralel olarak bilgisayar kapasitelerinin artması araştırmacıları bilgisayarlardan daha çok faydalanmaya teşvik etmiştir. Bilgisayarda yazılan programlar henüz tam olarak deneysel çalışmaların yerini tutmasa da büyük kolaylıklar sağladığı veya en azından yön gösterdiği söylenebilir.

Homojen ve izotrop malzeme için geliştirilen sonlu eleman yönteminin betonarme yapı elemanlarına uygulanmasında genellikle çeşitli sorunlarla karşılaşılır. Bilindiği gibi betonarme, davranışı farklı olan beton ve donatıdan oluşur. Donatı, bir homojen malzeme olarak kabul edilebildiği için malzeme özellikleri kolaylıkla tanımlanabilir. Diğer taraftan beton, mekanik özellikleri oldukça geniş alana dağılan bir heterojen malzemedir. Bu iki malzemenin yük etkisinde etkileşimi, betonun çatlama ve çatlama sonrası davranışının tanımlanması gerçekçi bir model geliştirmede önemli güçlükler ortaya çıkarır. Bu güçlükler beton için gerilme-şekil değiştirme bağıntılarının oluşturulmasını karmaşıklaştırır. Beton ve donatı arasında şekil değiştirme uygunluk koşullarının sağlanması kolay bir iş değildir. Uygunluk koşullarını sağlamak için yapılan kabuller modelin davranışını etkiler. Davranış doğrusal olmadığı için, sayısal işlem hacmini arttıran adım adım çözümleme gerekli olur. Bu artış, kullanılan yaklaşım kriterleri ve sayısal stabilite problemleri, mühendislik problemlerinde birincil öneme sahip olan denge denklemlerinin sağlanmasını zorlaştırır (Akkaya ve Celep, 2007).

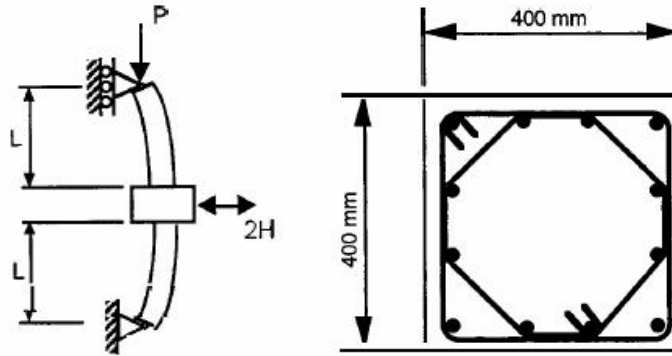
Bu çalışmada, literatürde kabul görmüş deneysel çalışmalardan geometrik ve malzeme özellikleri belirli kolonlar bilgisayar ortamında modellenerek doğrusal olmayan (plastik) sonlu eleman çözümlenmeleri yapılmıştır. Çözümlenmelerden bulunan sonuçların deneysel verilerle tutarlı olduğu düşünülerek kesit düzeyinde deprem yönetmeliği performans sınır değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Günümüzde, davranışı kesin matematiksel modellere oturtulmayan beton malzemesi ve betonarme yapı elemanları hakkında pek çok deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. Bu tezin hazırlanmasında faydalanılan çalışmalar kısaca özetlenecektir. Literatürde kabul görmüş bazı deneysel ve teorik çalışmalar şunlardır;

Hellesland ve Green (1972) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, sabit eksantrisite altında yükleme yapılmış, onarılmış betonarme kolonların yük taşıma kapasitesi ve yerdeğiştirmeler incelenmiştir. Dikdörtgen kesite sahip deney elemanları, dört ay boyunca devamlı sabit

eksenel yüke tabi tutulmuştur. Sonraki aşamada tersinir yükleme de uygulanmıştır. Kısa zamanlı yerdeğiştirme kontrollü yüklemeler sonucu göçmeye ulaşılmıştır. Bunun üzerine çalışmalar güçlendirme konusundan uzaklaşıp, onarım konusu üzerinde yoğunluk kazanmıştır. Öncelikle hasar görmüş bölgedeki beton yontularak eski demirler çıkarılmış, yeni demirler yerleştirilerek üzerine yeniden beton dökülmüştür. Onarılmış kolonlara maksimum kapasiteyle yerdeğiştirme kontrollü yükleme yapılmıştır. Söz konusu çalışmada birdöküm ve onarılmış elemanların deney sonuçları karşılaştırıldığında; onarılmış kolonların yük taşıma kapasitesi, tek yönlü ve tersinir yüklemeye tabi tutulmuş birdöküm kontrol elemanlarının kapasitelerinden yaklaşık %20 daha az olduğu gözlenmiştir. Onarılmış kolon ile birdöküm kolon karşılaştırıldığında, onarılmış kolonun servis yükünde yaptığı sehim önemli oranda daha büyüktür, servis yüklemesi altındaki onarılmış elemanın rijitliği, birdöküm elemana oranla ~ %50- %90 civarında olduğu görülmüştür.

Soesianawati vd. (1986) tarafından yapılan deneysel çalışmada, mesnet koşulları Şekil 1.1'de verilen 4 adet deneysel kolonun (U1, U2, U3 ve U4) sabit eksenel yük ve tersinir yatay tük etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Tüm kolonlarda 12 adet 16 mm çaplı boyuna donatı kullanılmıştır. Enine donatıların yerleşimi de Şekil 1.1'deki kolon enkesitinde görüldüğü gibidir. Yatay yükün uygulandığı bölgenin mesnete olan uzaklığı ( $L$ ) tüm kolonlarda 1.6 m'dir.



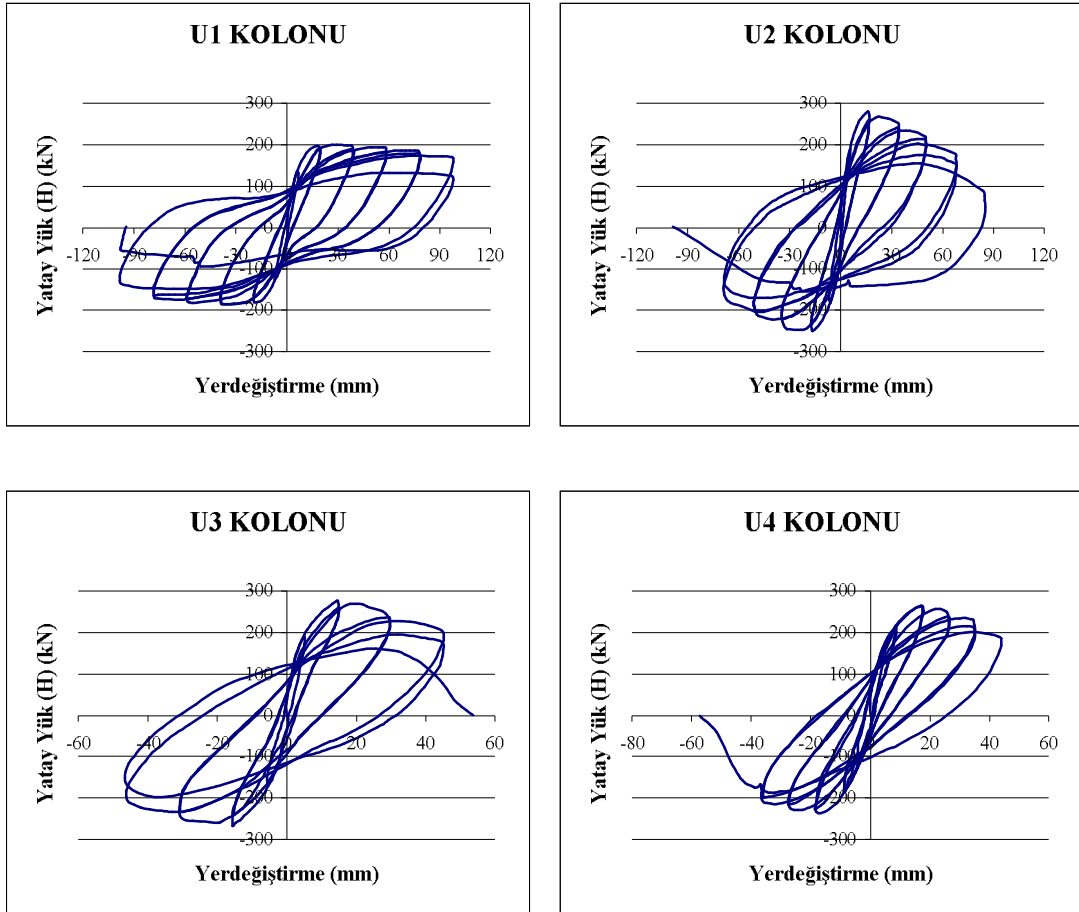
Şekil 1.1 U1, U2, U3 ve U4 deneysel kolonların yükleme şekli ve enkesitleri

U1 kolonuna uygulanan eksenel yük, kolonun eksenel yük kapasitesinin %10'una, diğer kolonlara uygulanan eksenel yük ise %30'una karşılık gelmektedir. Etriye aralığı, plastik mafsallık bölgesinde daha sık olarak tasarlanmıştır. Kolonların beton basınç dayanımı ( $f_c$ ), eksenel yük ( $P$ ), enine donatı aralığı ( $s$ ), boyuna donatı akma mukavemeti ( $f_{yh}$ ) ve enine donatı akma mukavemeti ( $f_{yv}$ ) Çizelge 1.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 Deneysel kolonlarının özellikleri (Soesianawati vd.,1986)

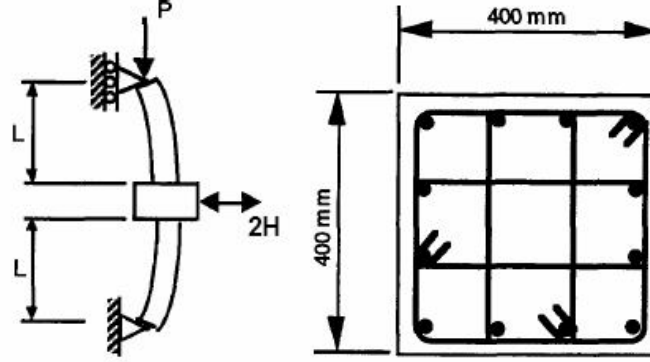
Kolon no.	$f_c$ (MPa)	$P$ (kN)	Enine donatı çapı (mm)	$s$ (mm)	$f_{yh}$ (MPa)	$f_{yv}$ (MPa)
U1	46.50	744	7	85/100	446	364
U2	44.00	2112	8	78/156	446	360
U3	44.00	2112	7	91/182	446	364
U4	40.00	1920	6	94/186	446	255

Deneysel kolonlara ait yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 1.2’de gösterilmiştir. Grafiklerde dikey eksen uygulanan yatay yükün yarısını (H), diğer bir ifade ile kesme kuvvetini, yatay eksen ise yatay yük etkisiyle açıklık ortasında oluşan yerdeğiştirmeyi göstermektedir.



Şekil 1.2 Deneysel kolonların yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri (Soesianawati vd., 1986)

Zahn vd. (1986) tarafından yapılan deneysel çalışmada, mesnet koşulları ve enine donatı yerleşimi Şekil 1.3’de verilen 2 adet deneysel kolonun (U7 ve U8) sabit aksenal yük ve tersinir tekrarlanır yatay yük etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Tüm kolonlarda 12 adet 16 mm çaplı boyuna donatı kullanılmıştır. Yatay yükün uygulandığı bölgenin mesnete olan uzaklığı (L) tüm kolonlarda 1.6 m’dir.



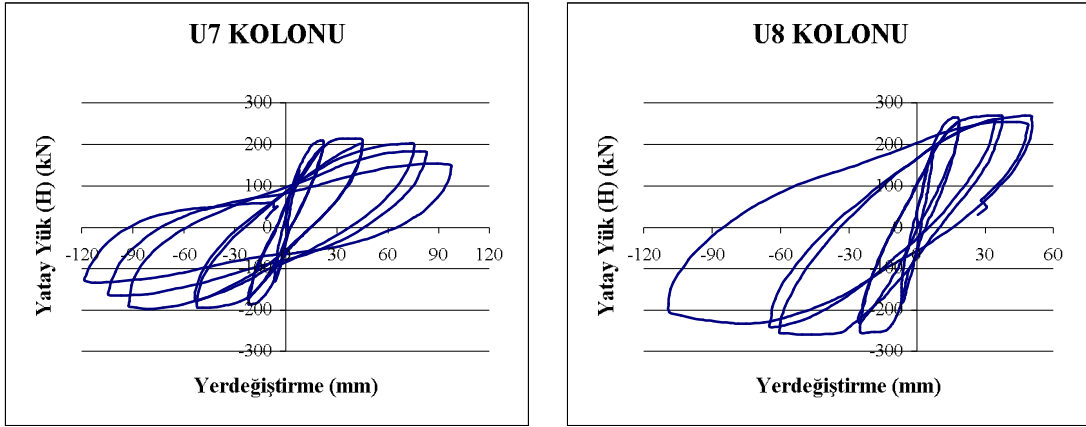
Şekil 1.3 U7 ve U8 deneysel kolonların yükleme şekli ve enkesitleri

Deneysel kolonların özellikleri Çizelge 1.2’de gösterilmiştir. U7 kolonuna uygulanan aksenal yük, kolonun aksenal yük kapasitesinin %23’üne, U8 kolonuna uygulanan aksenal yük ise %39’una karşılık gelmektedir. Enine donatı aralığı kolon boyunca 10 cm’dir. Kolonların beton basınç dayanımı, boyuna ve enine donatı akma mukavemetleri Çizelge 1.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.2 Deneysel kolonlarının özellikleri (Zahn vd., 1986)

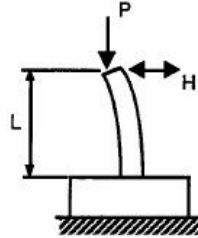
Kolon no	$f_c$ (MPa)	$P$ (kN)	Enine donatı çapı (mm)	$s$ (mm)	$f_{yh}$ (MPa)	$f_{yv}$ (MPa)
U7	28.30	1010	10	117	440	466
U8	40.10	2502	10	92	440	466

Deneysel kolonlara ait yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 1.4’de gösterilmiştir. Eğrilerde düşey eksen uygulanan yatay yükün yarısını (H), diğer bir ifade ile kesme kuvvetini, yatay eksen ise yatay yük etkisiyle açıklık ortasında oluşan yerdeğiştirmeyi göstermektedir.

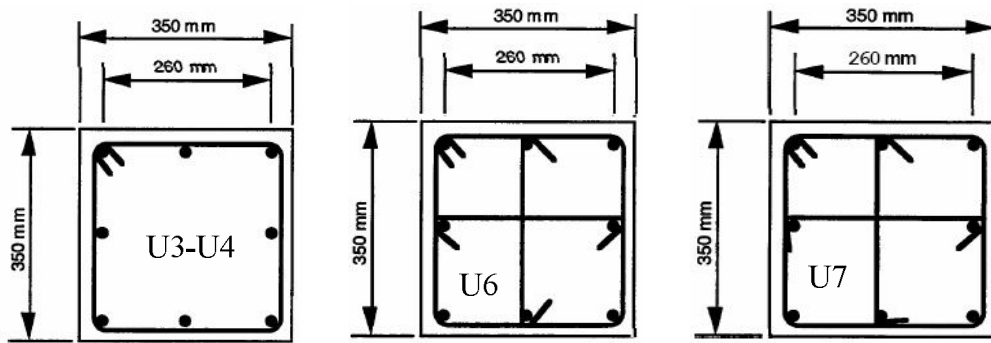


Şekil 1.4 Deneysel kolonların yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri (Zahn vd., 1986)

Saatçioğlu ve Özcebe (1989) tarafından yapılan deneysel çalışmada, mesnet koşulları Şekil 1.5'te görüldüğü gibi mesnetlenen 4 adet deneysel kolonun (U3, U4, U6 ve U7) sabit aksenal yük ve tersinir yatay yük etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Tüm kolonlarda 8 adet 25 mm çaplı boyuna donatı kullanılmıştır. Yatay yükün uygulandığı bölgenin mesnete olan uzaklığı (L) tüm kolonlarda 1.0 m'dir. Enine ve boyuna donatıların yerleşimi Şekil 1.6'da görülmektedir.



Şekil 1.5 U3, U4, U6 ve U7 deneysel kolonların yükleme şekli



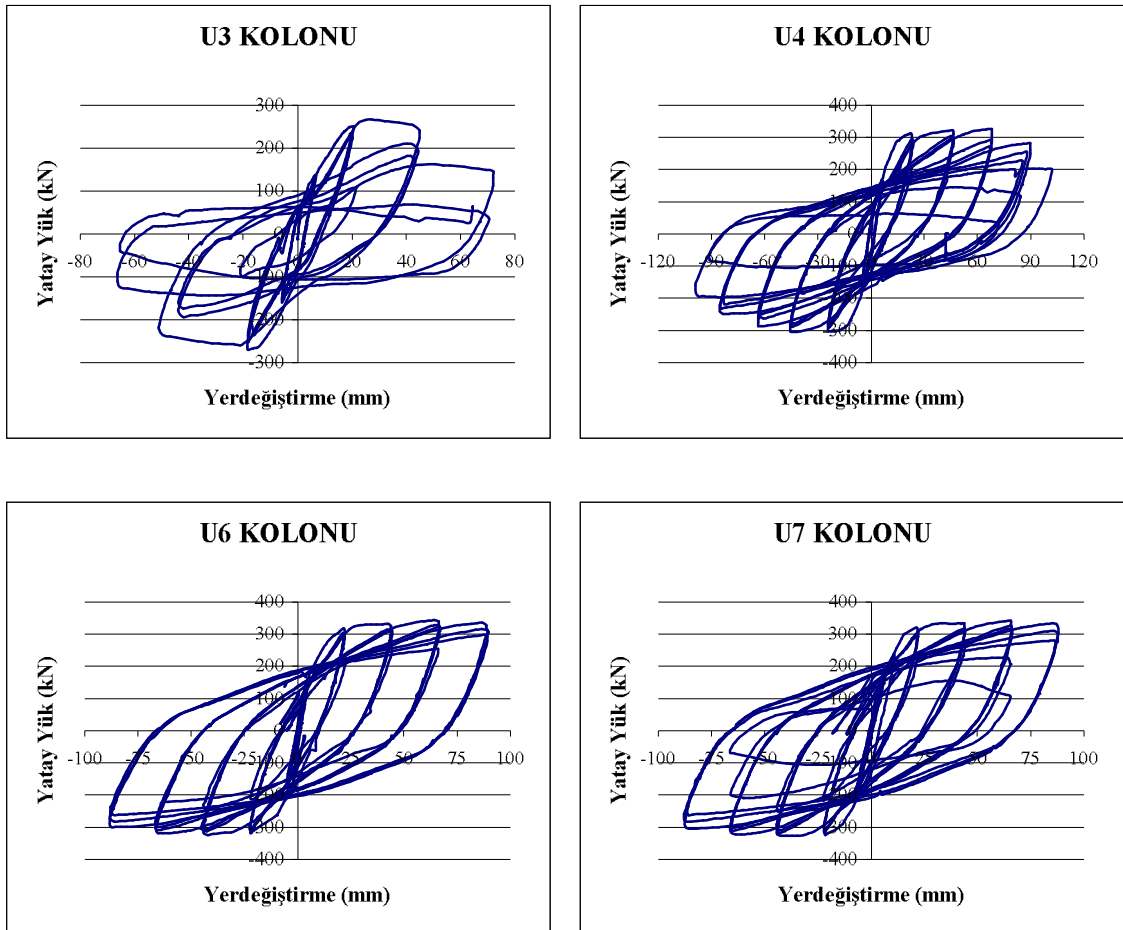
Şekil 1.6 U3, U4, U6 ve U7 deneysel kolonların enkesitleri

Deneysel kolonların ( $f_c$ ), ( $P$ ), ( $s$ ), ( $f_{yh}$ ) ve ( $f_{yv}$ ) değerleri Çizelge 1.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.3 Deneysel kolonlarının özellikleri (Saatçioğlu ve Özcebe, 1989)

Kolon no	$f_c$ (MPa)	$P$ (kN)	Enine donatı çapı (mm)	$s$ (mm)	$f_{yh}$ (MPa)	$f_{yv}$ (MPa)
U3	34.8	600	10.0	75	430	470
U4	32.0	600	10.0	50	438	470
U6	37.3	600	6.4	65	437	425
U7	39.0	600	6.4	65	437	425

Deneysel kolonların yatay yük-yerdeđiřtirme eđrileri Őekil 1.7’de gösterilmiřtir. Eđrilerde dűsey eksen uygulanan yatay yűkű, yatay eksen ise yatay yűk uygulandıđı noktada oluřan yerdeđiřtirmeyi gűstermektedir.



Őekil 1.7 Deneysel kolonların yatay yűk-yerdeđiřtirme eđrileri (Saatçiođlu ve Özcebe, 1989)

Yumak vd. (1991) yapılan deneysel çalışmada, çeşitli ankraj yöntemlerinin mantolanmış kolon davranışına etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmada, beş adet kolona (4 tanesi onarılmış, 1 tanesi birdöküm kontrol elemanı) aksenal yük ve tersinir yük uygulanmıştır. Söz konusu çalışmadaki kolon boyutları ve deney düzeneği, Suleiman vd. (1991) tarafından yapılan deneysel çalışmadaki eleman boyutları ve deney düzeneği ile aynıdır. Yumak vd. (1991) tarafından yapılan çalışma sonucunda; epoksi ve mekanik kenetlenme yöntemiyle mantolanmış kolonların beklenen yönde olumlu davranış sergiledikleri izlenimi edinilmiştir.

Suleiman vd. (1991) tarafından yapılan deneysel çalışmada, mantolanarak onarılmış ya da güçlendirilmiş betonarme kolonların aksenal yük ve tek eğrilikli eğilme altındaki davranışı incelenmiştir. Deneysel kolonlardan 2 kolon referans kolonu olarak deneye tabi tutulmuş, diğer 3 kolon ise, tek yönlü artan yük ya da tersinir yük uygulanmış, sonra bu kolonlar mantolanmış ve yeniden deneye tabi tutulmuştur. Deneysel kolonlardaki hasara bağlı olarak, onarım ve/veya güçlendirme uygulanmış ve buna uygun isim verilmiştir. Bunlara ek olarak 2 birdöküm referans kolonu deneye tabi tutulmuştur. Onarım ve/veya güçlendirme uygulanmamış durumda deneysel kolonların kesit boyutu 160x160 mm ve 4Ø12 boyuna, Ø4/100 enine donatıdır. Manto uygulanan kolonların kesit boyutu ise 230x230 mm ve 4Ø12 boyuna, Ø8/100 enine donatıdır. Deney kolonları I şeklinde imal edilmiş ve tek eğrilikli olarak deneye tabi tutulmuştur. Onarılan ve güçlendirilen kolonlarda mantolamanın etkisi dayanım, süneklik, enerji tüketimi ve rijitlik bakımından incelenmiştir. Deney sonuçlarından, güçlendirilen kolonların hem tek yönlü artan hem de tersinir yükler altında birdöküm kontrol kolonları kadar iyi davranış sergilediği görülmüştür. Onarım gören mantolu kolonlarda ise, hem rijitliğin, hem de dayanımın bir döküm kontrol kolonlarına oranla daha küçük olduğu gözlenmiştir.

Barbosa ve Riberio (1998) tarafından yapılan teorik çalışmada, ANSYS sonlu eleman programı kullanılarak betonarme kiriş için iki farklı modelleme yapılmıştır. Birinci modelde, beton solid65 elemanı ile tanımlanırken, donatı için link8 çubuk elemanları kullanılmış (ayrık donatı), ikinci modelde ise donatılar solid65 elemanlarının bünyesinde hacimsel oranlarla tanımlanmıştır (gizli donatı). Beton için her çözümde farklı malzeme modelleri oluşturulmuş ezilmeli doğrusal elastik, elastik tam plastik (Drucker - Prager), ezilme ihmal multilineer pekleşmeli (Von - Mises) ve ezilmeli multilineer pekleşmeli, donatı için ise iki modelle yetinilmiştir (doğrusal elastik, elastik - tam plastik). Bütün çözümlerinde yük-yerdeğiştirme eğrileri yükün düşük değerlerinde birbirlerine çok yakın sonuçlar vermiştir. Başlangıçtaki doğrusal ilişki, betonda çatlama başlayınca ani bir rijitlik kaybı gösterip

devamında yine yaklaşık doğrusal olarak devam etmiştir. Doğrusal elastik modeller kısa zamanda göçmeye ulaşmış ve bir çözüm elde edilememiştir. En iyi sonuçlar gizli donatı tekniğinin kullanıldığı modellerde, ayrıca ayırık donatılı modellemede ise elastoplastik malzeme modelinin ve özellikle ezilmenin ihmâl edildiği multilinear pekleşmeli modellerden elde edilmiştir.

Fanning (2001) tarafından yapılan teorik çalışmada, öngerilmeli iki ayırık donatılı kiriş ANSYS'te modellenmiş ve bulunan sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Beton için solid65, çelik ve öngerme kabloları için link8 elemanları kullanılmış, beton ve çeliğin birim uzamaları aynı kabul edilmiştir. Klasik kiriş, yakınsamayı kolaylaştırma ve deney elemanlarıyla uyum sağlayabilme amacıyla yerdeğiştirme kontrollü yüklenmiştir. ANSYS'in betonun doğrusal olmayan davranışını modellerken yaptığı kabulle, kullandığı elemanlar ve özellikle betonun içinde tanımlanan gizli çatlak modelinin gerçeğe ne kadar uyduğunu belirlemek için yapılmış, söz konusu çalışmadan elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve gizli çatlak modelinin betonarme sistemlerin eğilmeden göçmesinde kullanılabilecek uygun bir nümerik model olduğu sonucuna varmıştır.

Yavuzer (2005) tarafından yapılan teorik çalışmada, daha önce deneysel çalışması yapılmış dikdörtgen kesitli, monotonik yüklü basit mesnetli betonarme bir kirişin ANSYS sonlu eleman programı ile doğrusal olmayan (plastik, nonlinear) sonlu eleman çözümlemesi yapılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda bilgisayarda oluşturulan sonlu eleman modelinin gerçek davranışa oldukça yaklaştığı, ancak bilgisayar modelinin deney elemanına göre daha rijit davranıp daha az süneklik göstererek göçmeye ulaştığı görülmüştür.

Dede (2006) tarafından doğrusal olmayan sonlu eleman çözümlemesi ile yapılan teorik çalışmada, yüklemenin tersinir olarak uygulandığı betonarme çerçeve deneylerinin modellenmesi amaçlanmıştır. Modelleme için, beton ve çelik arasında tam aderans kabulü yapan ve çok eksenli gerilme durumu için kırılmayı modelleyebilen bir betonarme elemanı tipi bulunan ANSYS sonlu eleman programı kullanılmıştır. Yapılan çözümlemelerden, tersinir yükleme altındaki yapı elemanlarının yük - yerdeğiştirme geçmişinin modellenmesi sırasında, taşınabilecek maksimum yüke yaklaşıldığında çözümlemenin çözüme ulaşma problemi yaşadığı ve sonlandığı, ancak sonlanmadan önce elde edilen çözüm sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Günümüzde kullanılmakta olan genel amaçlı “Sonlu Elemanlar Yöntemi” yazılımlarından bazıları; ANSYS, NASTRAN, ABAQUS ve MARC’tir. Betonarmenin sonlu eleman çözümlemesi için farklı mühendislik alanlarında da en yaygın olarak kullanılan ANSYS yazılımıdır. ANSYS’in güçlü bir grafik kullanıcı ara yüzüne sahip olması, modelleme sırasında ihtiyaç duyulabilecek çok sayıda hazır elemanı bünyesinde barındırması ve yaygın bir şekilde kullanılması bu çalışmada da tercih edilmesine sebep olmuştur. Bölüm 2’de sonlu elemanlar yöntemi hakkında temel bilgiler verilecek, Bölüm 3’te deney numunesi ile ilgili bilgiler verilecek, Bölüm 4’te ANSYS sonlu elemanlar programı hakkında geniş ve ayrıntılı bilgiler verilecektir.

Doğrusal olmayan sonlu eleman yöntemi, 40 yılı aşkın bir süredir betonarmenin sayısal çözümleme alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bölüm 5’te, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik’te (DBYBHY, 2007) performans düzeylerine göre tanımlanan kesit hasar sınır değerleri ile sonlu eleman çözümlemesinden bulunan değerler karşılaştırılmıştır.

## 2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

### 2.1 Genel

Sonlu elemanlar yöntemi, son 40 yılda bilgisayarların hızlı gelişimine paralel olarak gelişen sayısal hesap yöntemleri içinde çok önemli bir yer tutmaktadır. Bu sayısal yaklaşım yöntemi her ne kadar orijinal olarak yapı sistemleri için geliştirilmiş ise de dayandığı esasların genelliği dolayısıyla yöntem akışkanlar mekaniği, zemin mekaniği, uçak mühendisliği nükleer mühendislik, kaya mekaniği, elektromanyetik alanlar, termal analiz ve daha sayabileceğimiz pek çok mühendislik ve fizik problemlerinin çözümünde araç olarak kullanılmaktadır (Aydoğan, 2003).

Karşılaştığımız mühendislik problemlerin küçük bir kısmının analitik çözümü mevcuttur. Bu, çözüm aranan bölgede çözüme ait matematiksel ifadelerin bulunabilmesi, yani sonsuz noktada çözümün bilinmesi anlamına gelmektedir. Analitik çözümler yalnızca fizik problemin bazı basitleştirilmiş ve sadeleştirilmiş matematik modelleri için elde edilebilir. Uygulamada karşılaşılan pek çok mühendislik problemi için kapalı çözüm bulmak mümkün değildir. Genellikle deneyimli mühendisler veya araştırmacılar problemin tabiatına çok uzak olmayan basitleştirmeler ve varsayımlar altında yaklaşık çözümlere ulaşmaktadırlar. Ancak, örneğin düzgün olmayan geometri, karışık sınır koşulları, üniform olmayan yüklemeler, lineer olmayan malzeme davranışı gibi nedenlerle bu gibi kapalı çözümlerin elde edilmesi çok güçleşmekte veya olanaksız hale gelmektedir. Sonlu elemanlar yönteminin kullanılması halinde bu gibi durumlara ait yaklaşık çözümler kolaylıkla elde edilebilmektedir (Aydoğan, 2003).

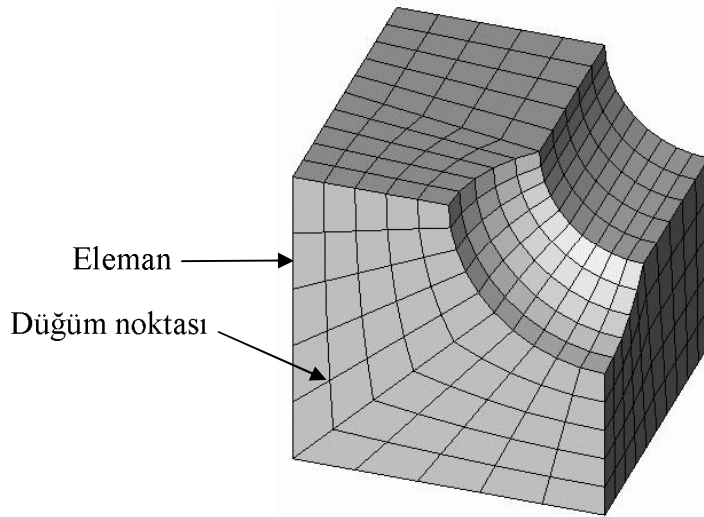
Sayısal yöntemlerin pek çoğunda çözüm, bilinmeyen büyüklüklerin bölge içinde belirli bazı ayrık noktadaki yaklaşık değerlerinin bulunmasına yöneliktir (Örneğin bir kirişin belirli noktalarında çökme değerlerinin bulunması gibi). Yani çözüm, bölgedeki bu seçilmiş noktalardaki değerlerin bulunması işlemine indirgenmektedir. Bölgede belirli bir sayıda noktayı seçme işlemine ayrıklaştırma denir. Bir bölgeyi ayrıklaştırmanın yolu onu küçük parçalara, ünitelere bölmektir. Bu küçük parçalar bir araya gelerek orijinal yapıyı temsil ederler. Böylece tüm yapıyı bir defada çözmek yerine, bu küçük üniteler için çözüm yapıp bir araya getirilerek orijinal bölgeye ait çözüm elde edilebilmektedir. Bu suretle küçük parçalar için yapılan basit yaklaşımlar ile bölgenin tümü için kabul edilebilir sonuçlar elde etmek mümkün olabilmektedir. Ancak daha iyi sonuç elde etmek için orijinal yapıyı daha

küçük ünitelere bölmek, yani daha çok sayısal veri işlemek gerekir ki, bu da mutlaka kapasiteli bilgisayarlar ve bilgisayar programları kullanımı gerektirir (Aydoğan, 2003).

Sonlu elemanlar yöntemindeki temel düşünce, karmaşık bir problemde, problemi basite indirgeyerek bir çözüm bulmaktır. Esas problemin daha basit bir probleme indirgenmiş olması nedeni ile kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmekte, ancak bu sonucun çözüm için daha fazla çaba harcayarak iyileştirilmesi ve kesin sonuca çok yaklaşılması, hatta kesin sonuca ulaşılması mümkün olmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminde, sistem sonlu sayıda elemana ayrılabilir veya tek parça olarak da düşünülebilir. Doğrusal elastik olmayan çözümlerde ayrılan eleman sayısı ne kadar artarsa, gerçek sonuca daha çok yaklaşıldığı düşünülmektedir. Ancak bu durumda boyut etkisi ortaya çıkmaktadır. Tasarımda optimum boyutta tanımlanan her bir elemana sonlu eleman denir ve birleştikleri köşe noktaları düğüm noktalarını oluşturur (Şekil 2.1).

Sonlu elemanlar yöntemi 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.



Şekil 2.1 Bir sonlu eleman modelindeki düğüm noktalar ve elemanlar

Sonlu elemanlar yönteminde yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan bir çok elemana bölünür. Elemanlar "nod" adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler. Bu şekilde cebrik bir denklem takımı elde edilir. Gerilme hesabında bu denklemler nodlardaki denge

denklemleridir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ise, bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminde temel fikir sürekli fonksiyonları bölgesel sürekli fonksiyonlar (genellikle polinomlar) ile temsil etmektir. Bunun anlamı bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün (örneğin, yerdeğiştirmenin) değeri o elemanın nodlarındaki değerler kullanılarak interpolasyon ile bulunur. Bu nedenle, sonlu elemanlar metodunda bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler nodlardaki değerlerdir. Bir varyasyonel prensip (örneğin; enerjinin minimum olması prensibi) kullanılarak büyüklük alanının nodlardaki değerleri için bir denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımının matris formundaki gösterimi

$$[K] \cdot [D] = [R] \quad (2.1)$$

şeklindedir. Burada  $[D]$  büyüklük alanının nodlardaki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör,  $[R]$  bilinen yük vektörü ve  $[K]$  ise bilinen sabitler matrisidir. Gerilme analizinde  $[K]$  rijitlik matrisi olarak bilinmektedir (Aydoğan, 2003).

## 2.2 Sonlu Elemanlar Yönteminde Problem Çözümünde İzlenecek Adımlar

Sonlu elemanlar yöntemi ile problem çözümünde yapılacak işlem sırası;

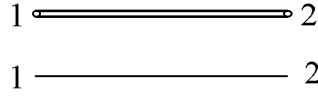
- Cismin sonlu elemanlara bölünmesi,
- İnterpolasyon fonksiyonlarının seçimi,
- Eleman rijitlik matrisinin teşkili,
- Sistem rijitlik matrisinin hesaplanması,
- Sisteme etki eden kuvvetlerin bulunması,
- Sınır şartlarının belirlenmesi,
- Sistem denklemlerinin çözümü, şeklinde özetlenebilir (Aydoğan, 2003).

## 2.3 Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Elemanlar

Sonlu eleman probleminin çözümünde ilk yapılacak işlem, eleman tipinin belirlenmesi ve çözüm bölgesinin elemanlara ayrılmasıdır. Çözüm bölgesinin geometrik yapısı belirlenerek bu geometrik yapıya en uygun gelecek elemanlar seçilmelidir. Seçilen elemanların çözüm bölgesini temsil etme oranında, elde edilecek neticeler gerçek çözüme yaklaşmış olacaktır. Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan elemanlar boyutlarına göre 5 kısıma ayrılabilir.

### 2.3.1 Tek Boyutlu Elemanlar

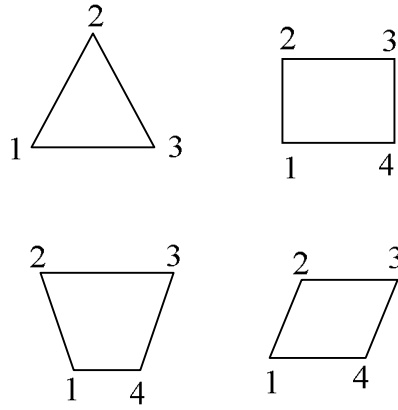
Bu elemanlar tek boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Tek boyutlu elemanlar

### 2.3.2 İki Boyutlu Elemanlar

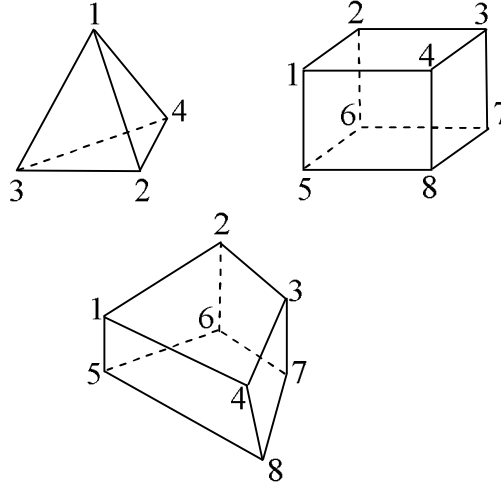
İki boyutlu (düzlem) problemlerinin çözümünde kullanılırlar. Üçgen elemanın altı, dokuz ve daha fazla düğüm ihtiva eden çeşitleri de vardır. Düğüm sayısı seçilecek interpolasyon fonksiyonunun derecesine göre belirlenir. Üçgen eleman, çözüm bölgesini aslına uygun olarak temsil etmesi bakımından kullanışlı bir eleman tipidir. İki üçgen elemanın birleşmesiyle meydana gelen dörtgen eleman, problemin geometrisine uyum sağladığı ölçüde kullanışlılığı olan bir elemandır, dört veya daha fazla düğümlü olabilir. Dörtgen eleman çoğu zaman özel hal olan dikdörtgen eleman şeklinde kullanılır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 İki boyutlu elemanlar

### 2.3.3 Üç Boyutlu Elemanlar

Bu grupta temel eleman üçgen piramittir. Bunun dışında dikdörtgenler prizması veya daha genel olarak altı yüzeyle elemanlar, üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipleridir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Üç boyutlu elemanlar

### 2.3.4 Dönel Elemanlar

Eksenel simetrik özellik gösteren problemlerin çözümünde dönel elemanlar kullanılır. Bu elemanlar bir veya iki boyutlu elemanların simetri eksenini etrafında bir tam dönme yapmasıyla oluşurlar. Gerçekte üç boyutlu olan bu elemanlar, eksenel simetrik problemleri iki boyutlu problem gibi çözme olanağı sağladığı için çok kullanışlıdır.

### 2.3.5 İzoparametrik Elemanlar

Çözüm bölgesinin sınırları eğri denklemleri ile tanımlanmışsa, kenarları doğru olan elemanların bu bölgeyi tam olarak tanımlaması mümkün değildir. Böyle durumlarda bölgeyi, gereken hassasiyette tanımlamak için elemanların boyutlarını küçültmek, dolayısıyla sayılarını artırmak gerekmektedir. Bu durum çözülmesi gereken denklem sayısını artırır, dolayısıyla gereken bilgisayar kapasitesinin ve zamanın artmasına sebep olur. Bu olumsuzluklardan kurtulmak için, çözüm bölgesinin eğri denklemleri ile tanımlanan sınırlarına uyum sağlayacak eğri kenarlı elemanlara ihtiyaç hissedilmektedir. Böylece hem çözüm bölgesi daha iyi tanımlanmakta hem de daha az sayıda eleman kullanılarak çözüm yapılabilir. Bu elemanlar üzerindeki düğüm noktaları bir fonksiyon ile tanımlanır. İzoparametrik sonlu elemanın özelliği, her noktasının konumunun ve yer değiştirmesinin aynı mertebeden aynı şekil (interpolasyon) fonksiyonu ile tanımlanabiliyor olmasıdır. İzoparametrik elemanlara eşparametrel elemanlar da denir.

## 2.4 Genel Sonlu Eleman Denklemleri

Sonlu eleman denklemleri için genel olarak kullanılabilen bir ifade yapı sistemlerinde çok kullanılan potansiyel enerjinin minimumu ilkesinden hareket edilerek elde edilebilir. Bu amaçla önce bazı tanımlar yapmaya gereksinim vardır. Bu tanımların çoğu matris formunda yapılacaktır.

Minimum potansiyel enerji ilkesi “bir yapıda geometrik sınır koşullarını sağlayan çözümler içinde denge denklemlerini sağlayan çözüme ait toplam potansiyel enerji minimumdur” şeklinde tanımlanabilir. Burada toplam potansiyel enerji  $\pi$  iki ayrı enerjini toplamı olarak ifade edilebilir: İç potansiyel enerji ( $U_i$ ) ve sisteme etkleyen dış yüklerden oluşan dış potansiyel enerji ( $U_e$ ). Yani  $\pi = U_i + U_e$  olup dış potansiyel enerji ters işaretli dış kuvvetlerin yaptığı işe eşit alınarak (zira yer değiştirme esnasında potansiyel enerjide bir azalma söz konusudur)  $-U_e = +W_e$  ile  $\pi = U_i - W_e$  yazılabilir. Toplamın minimumu varyasyon hesabından (Aydoğan, 2003),

$$\delta\pi = \delta U_i - \delta W_e = 0 \text{ veya } \delta U_i = \delta W_e \quad (2.2)$$

olarak elde edilir. Matris bağıntılar yardımıyla iş ifadeleri

$$\delta U_i = \int_V (\delta \varepsilon)^T \sigma dV \quad (2.3)$$

$$\delta W_e = \int_V (\delta u)^T b dV + \int_S (\delta u)^T s dS + \sum_{p=1}^N (\delta u)^T f_p \quad (2.4)$$

$$K^e a^e = f^e \quad (2.5)$$

burada

$$f^e = f_{\varepsilon_0}^e - f_{\sigma_0}^e + f_b^e + f_s^e + f_{PL}^e \quad (2.6)$$

olup eleman rijitlik matrisi  $K^e$  aşağıda verilmiştir.

$$K^e = \int_{V^e} B^T D B dV \quad (2.7)$$

Buradaki eleman eşdeğer tekil düğüm nokta kuvvetleri aşağıda gösterilmiştir (Aydoğan, 2003):

$$f_{\varepsilon_0}^e = \int_{V^e} B^T D \varepsilon_0 dV \quad (2.8)$$

$$f_{\sigma_0}^e = \int_{V^e} B^T \sigma_0 dV \quad (2.9)$$

$$f_b^e = \int_{V^e} N^T b dV \quad (2.10)$$

$$f_s^e = \int_{S^e} N^T s dS \quad (2.11)$$

$$f_{PL}^e = \sum N^T f_p \quad (2.12)$$

## 2.5 Sonlu Elemanlar Yönteminin Diğer Yöntemlere Göre Avantajları ve Dezavantajları

- Sonlu elemanlar yöntemi ile verilen şekil ne kadar karışık olursa olsun, şekle ve boyutlarına esneklik kazandırmaktadır.
- Çok bağlantılı bölgeler (yani bir veya çok delikli cisimler) veya köşeleri olan bölgeler zorluk çekilmeksizin incelenebilir.
- Değişik malzeme özellikleri ve geometrisinde farklı güçlükler ortaya çıkmaz. Geometri ve malzeme nonlineariteleri, kalıtsal olsa bile (örneğin zaman bağlı) malzeme özellikleri kolaylıkla göz önüne alınabilir.
- Genel rijitlik ile ilişkili kuvvet ve yerdeğiştirme bakımından formüle edilmiş neden sonuç ilişkisi problemidir. Bu durum sonlu elemanlar yöntemiyle problemin çözümünü kolaylaştırır.
- Sınır şartları kolayca uygulanır.
- Sonlu elemanlar yönteminin esnekliği sayesinde çok yönlü karmaşık yapılarda diğer problemlerdeki sonuç ilişkisinden daha etkin olarak kullanılır.

Yukarıda sıralanan bazı avantajlarının yanında kullanıcılar tarafından bilinen bazı dezavantajlarını da saymak gerekir;

- Ara yapının alt yapılara bölünmesinde tecrübe gerektirir.
- Çok sayıda veri girişi sebebiyle hata yapma olasılığı yüksektir.
- Sonuçlar düzenlenmediği takdirde bir dizi sayıdan oluşur ve yorumlanması zorlaşır.

Bu nedenlerden dolayı Sonlu Elemanlar Yöntemi yüksek hızlı ve yüksek kapasiteli gelişmiş bilgisayarlar sayesinde çok karmaşık yapıların incelenmesinde araştırmacılar tarafından en çok kullanılan yöntem olmuştur (Yozgat, 2007).

### 3. DENEY ÇALIŞMASININ TANITIMI

Bu bölümde; literatürde kabul görmüş yayınlardan doğrusal olmayan sonlu eleman çözümlenmeleri için yeterli deneysel verilere sahip Lin ve Lin (2005) tarafından deneyleri yapılmış kolonlara ait kesit ve malzeme özellikleri tanımlanmıştır.

#### Deney Kolonlarının Kesit ve Malzeme Özellikleri

Doğrusal olmayan sonlu eleman çözümlenmelerinin deneysel sonuçlarla uyumluluğunu karşılaştırmak için, Lin ve Lin (2005) tarafından deneyleri yapılmış kolonlar kullanılmıştır. Daha önce deneyleri yapılmış söz konusu çalışmadaki yirmi kolonun 10 tanesi kendinden yerleşen beton, diğer 10 tanesi ise normal beton kullanılarak üretilmiştir. Bu çalışmada, normal beton kullanılarak üretilen kolonlarda enine donatı aralığı, eksenel yük düzeyi, enine donatı akma mukavemeti değişken alınan 8 kolon numunesi (NC1, NC4, NC5, NC6, NC7, NC8 ve NC9) göz önüne alınmıştır. Tüm kolonların maksimum yatay yük ve yerdeğiştirme sonuçları mevcuttur. Bu kolonlardan sadece NC1, NC6, NC7 ve NC8 numaralı kolonların yatay yük-yerdeğiştirme eğrisi bilinmektedir. Kolonların eksenel yük düzeyleri ( $P$ ), beton mukavemeti ( $f_c$ ), enine donatı aralığı ( $s$ ), enine donatı yüzdesi ( $\rho_s$ ), enine donatı akma mukavemeti ( $f_{yv}$ ) ve boyuna donatı akma mukavemeti ( $f_{yh}$ ) Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Deneysel kolonlarının özellikleri (Lin ve Lin, 2005)

Kolon no	$f_c$ (MPa)	Eksenel Yük	$s$ (mm)	$\rho_s$	$f_{yv}$ (MPa)	$\rho_s f_{yv}$ (MPa)	$f_{yh}$ (MPa)
NC1	50.00	0.2* $P_o$	100	0.0113	452.1	5.11	438
NC2	50.50	0.4* $P_o$	100	0.0113	452.1	5.11	438
NC4	31.80	0.2* $P_o$	100	0.0113	452.1	5.11	438
NC5	57.60	0.2* $P_o$	100	0.0113	452.1	5.11	438
NC6	49.00	0.2* $P_o$	130	0.0087	452.1	3.93	438
NC7	50.60	0.2* $P_o$	70	0.0157	452.1	7.05	438
NC8	48.50	0.2* $P_o$	100	0.0116	365.2	4.24	438
NC9	49.10	0.2* $P_o$	100	0.0103	554.6	5.71	438

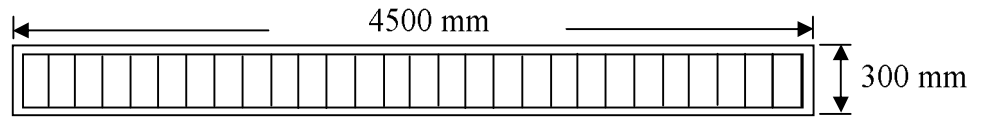
Not:  $P_o = 0.85 f_c (A_g - A_{st}) + A_{st} f_{yh}$

Deneysel kolonlara uygulanan aksenal yük değerleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

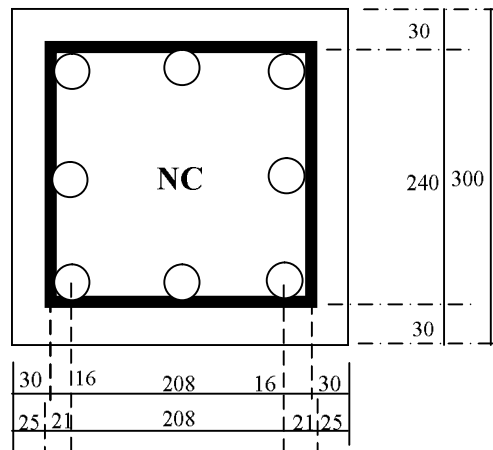
Çizelge 3.2 Kolonlara uygulanan aksenal yükler

Kolon no	Eksenal Yük (kN)
NC1	982.1
NC2	1978.8
NC4	711.6
NC5	1094.1
NC6	967.6
NC7	990.8
NC8	960.3
NC9	969.0

Kolonların uzunluğu 4500 mm, kesit boyutları 300x300 mm’dir (Şekil 3.1). Kolonlarda 8 adet 22 mm boyuna donatı, enine donatı olarak Ø10/70, Ø10/100 ve Ø10/130 mm kullanılmış ve kolon mesnet ve yatay yük uygulanan bölümlerinde enine donatı sıklaştırılması yapılmamıştır. Örtü beton kalınlığı 30 mm olacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3.2).

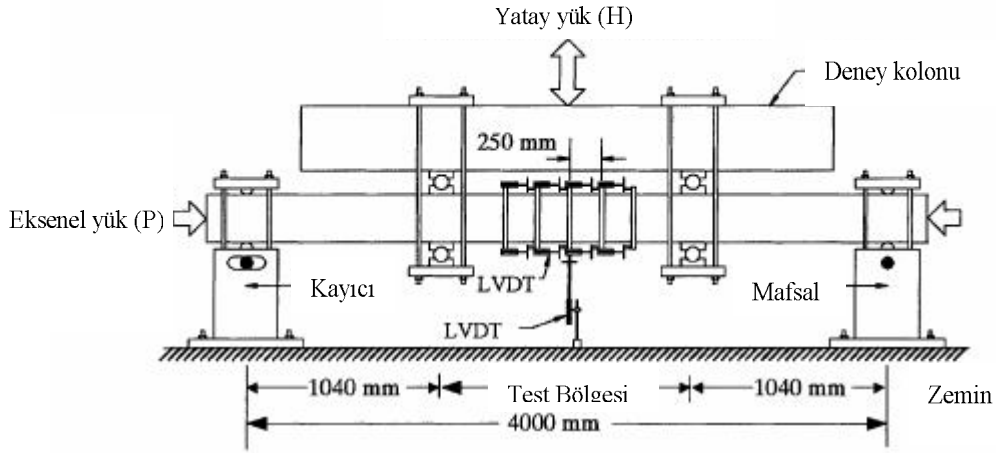


Şekil 3.1 Analitik çözümü yapılan kolonların boykesiti



Şekil 3.2 Analitik çözümü yapılan kolonların enkesiti

Lin ve Lin (2005) tarafından yapılan deneysel çalışmada, yer değiştirme kontrollü yük uygulanmış, yük ve açıklık ortası yerdeğiştirmeler LVDT (linear variable differential transformer) vasıtasıyla ölçülmüştür. Deneý düzeneğinin şematik görünüşü Őekil 3.3'de verilmiştir. Kolonların mesnetler arası açıklığı 4000 mm, mesnetlerin bir ucu kayıcı, diğeri sabit mesnet olmak üzere iki ucundan tutulmuştur. Betonarme çubuğun her iki ucuna sabit aksenal yüke maruz bırakılmış, her iki mesnetten 1040 mm uzaklıkta iki ayrı noktadan tersinir tekrarlanır yatay yük uygulanmıştır. Deneý düzeneğinde uygulanan yatay yükün kapasitesi 6000 kN'dur.



Őekil 3.3 Deneý düzeneęi ve ölçüm aletlerinin yerleşimi

## 4. SONLU ELEMEN MODELİ OLUŞTURULMASI

### 4.1 Beton ve Donatı için Malzeme Modelleri

Beton, basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı ise düşük bir malzemedir. Betonun sınıflandırılması betonun üretiminden sonraki 28. günde eksenel basınç altında denenmesiyle elde edilen basınç dayanımları belirleyici olur. Bu amaçla; taban çapı 150 mm, yüksekliği 300 mm olan silindir numuneler kullanılır. Beton numunelerin eksenel basınç altında denenmesiyle, betonun basınç altındaki davranışını yansıtan gerilme-şekil değiştirme ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) eğrileri elde edilir. Deneylerde uygulanan yük, silindir kesit alanına bölünerek gerilme hesaplanır. Birim şekil değişimi ise, silindir yüzeyinde üç ayrı noktada ölçülen şekil değiştirmelerden elde edilir.

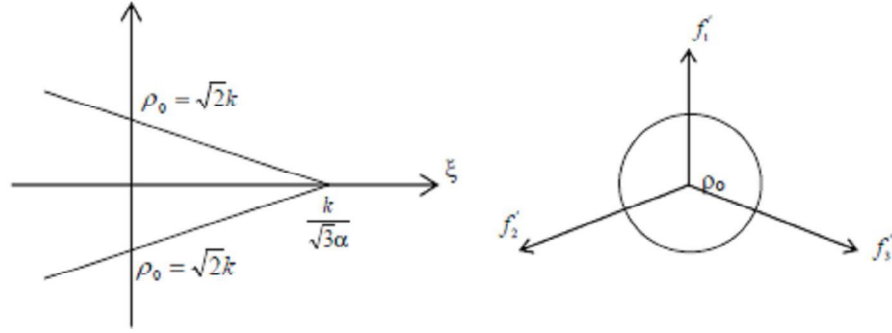
- Düşük dayanıma sahip betonlar daha büyük şekil değiştirme kapasitesine sahiptir.
- Beton en büyük gerilmeye ulaştığında ezilme birim şekil değişimi ( $\epsilon_{co}$ ) 0.002 ile 0.003 değerleri arasındadır.
- Betonun en büyük ezilme birim şekil değişimi ( $\epsilon_{cu}$ ) yüksek mukavemetli betonlarda 0.003 değerine, düşük mukavemetli betonlarda 0.005 değerlerine kadar artmaktadır.
- Yüksek mukavemetli betonlarda, düşük mukavemetli betonlara oranla beton elastisite modülü daha büyüktür, buna karşın düşük mukavemetli betonlar, yüksek mukavemetli betonlara oranla daha sünektir.
- Beton mukavemetinin yaklaşık %40'ına kadar  $\sigma$  -  $\epsilon$  eğrisinin doğrusal elastik bir davranış gösterdiği kabul edilebilir.

#### 4.1.1 Drucker - Prager Malzeme Modeli

Son yıllarda, malzemelerin bünye bağıntılarının belirlenmesinde kullanılan pek çok matematiksel model; betonun mekanik davranışını, plastik ve visko plastik teoriler yardımıyla ifade edebilmektedir. Bunlardan en çok kullanılanı ise; Drucker - Prager malzeme modelidir. Söz konusu modelde akma kriteri, Von - Mises kriterinin genelleştirilmiş şeklidir. Drucker - Prager malzeme modelinde akma kriteri, Von - Mises kriterinde hidrostatik gerilme etkisini ek bir terim ile dikkate alarak;

$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $\alpha$  ve  $k$ , malzeme sabitleri,  $I_1$  gerilme tansörünün birinci invariantı ve  $J_2$  ise deviyatör tansörünün ikinci invariantıdır.  $\alpha = 0$  olması durumunda kriter, Von - Mises kriteri ile aynı olacaktır (Chen, 1982). (4.1) eşitliğinin gösterdiği akma yüzeyi, asal gerilme uzayında bir dairesel konidir; meridyenleri ve  $\pi$ -düzlemindeki kesiti Şekil 4.1'de verildiği gibidir.

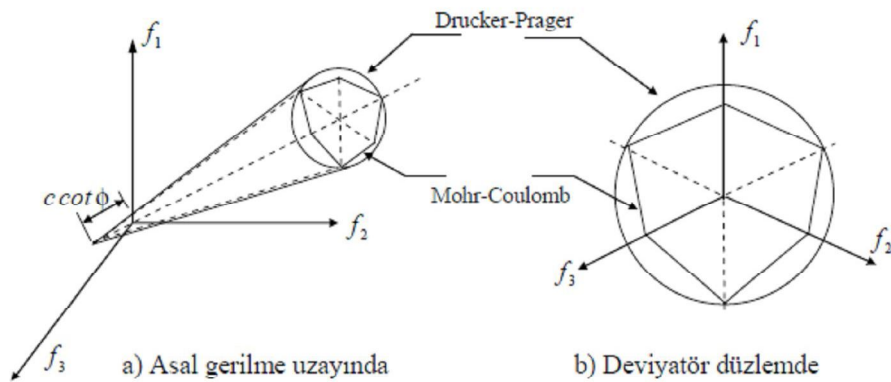


Şekil 4.1 Drucker - Prager kriteri (Chen, 1982)

Şekil 4.2'de görüldüğü gibi Drucker - Prager kriteri, Mohr - Coulomb kriterine oldukça yakındır; Drucker - Prager kriterinin dairesi, Mohr - Coulomb altıgenine dıştan çizilen bir sınır daire olarak düşünülürse, iki yüzey  $\theta=60^\circ$ ,  $\alpha$  ve  $k$  ile belirlenecek basınç meridyenine uygun olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}, \quad k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (4.2)$$

Burada  $\phi$  ve  $c$ , sırası ile, malzemenin içsel sürtünme açısını ve kohezyonunu ifade eden parametrelerdir. (4.3) eşitliğindeki sabitler ile belirlenen koni, Mohr-Coulomb akma yüzeyindeki altıgen piramidi çevreleyen bir dış zarf görünümündedir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Drucker - Prager ve Mohr - Coulomb kriterlerinin karşılaştırılması (Chen, 1982)

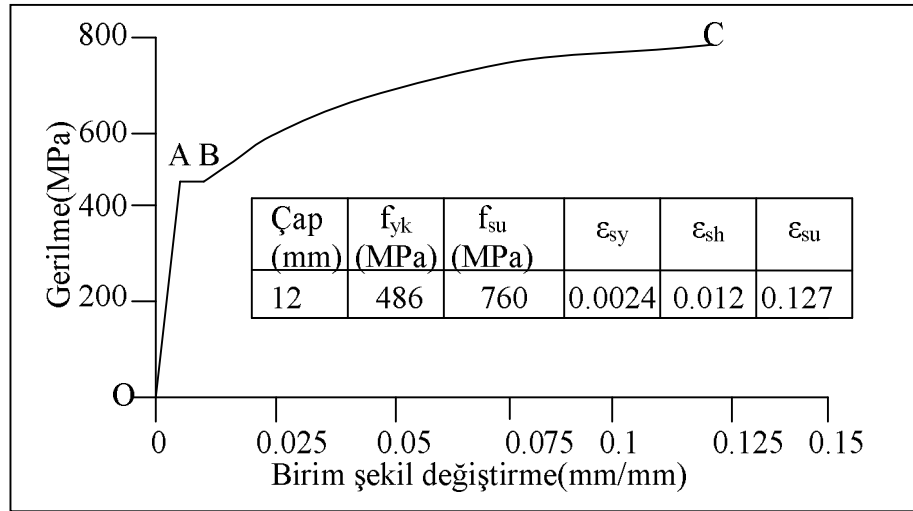
Ayrıca çekme meridyeninden ( $\rho$ ) geçen,  $\theta=0^\circ$  ile belirlenecek iç koniyi ifade eden sabitler;

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)}, \quad k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (4.3)$$

#### 4.1.2 Donatı Çelikleri İçin Genel Olarak Kullanılan $\sigma$ - $\epsilon$ Modelleri

Donatı çeliğinde basınç ve çekme altındaki davranışları bakımından  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrileri arasında önemli bir fark yoktur. Bu nedenle donatı çeliğinin çekme ve basınç altındaki davranışının özdeş olduğu varsayılır. Şekil 4.3'te doğal sertlikte işlem görmüş bir donatı çeliğinin deneysel olarak elde edilmiş gerilme-şekil değiştirme ilişkisi gösterilmiştir. Donatı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi üç aşamada tanımlanabilir (Aydemir, 2004).

- **OA** Elastik davranışı simgeleyen bu bölümde, karakteristik akma dayanımına ( $f_{yk}$ ) kadar gerilmeyle birim şekil değiştirme ilişkisi doğrusaldır.
- **AB** gerilme şekil değiştirme ilişkisinin ikinci bölümünde, artan birim şekil değiştirmelere karşın gerilmede herhangi bir artış oluşmamaktadır.
- **BC** gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin üçüncü bölümü, donatının pekleşmesi olarak adlandırılmaktadır. B noktasından sonra, çelikte pekleşme olmakta ve şekil değiştirme artışı ile birlikte çelikteki gerilme yeniden artmaya başlamaktadır. C noktasında donatı çeliği kopma dayanımı ve birim şekil değiştirme değerlerine ulaşılmaktadır.



Şekil 4.3 Doğal sertlikteki bir çeliğin  $\sigma$ - $\epsilon$  ilişkisi (Ersoy ve Özcebe 1998)

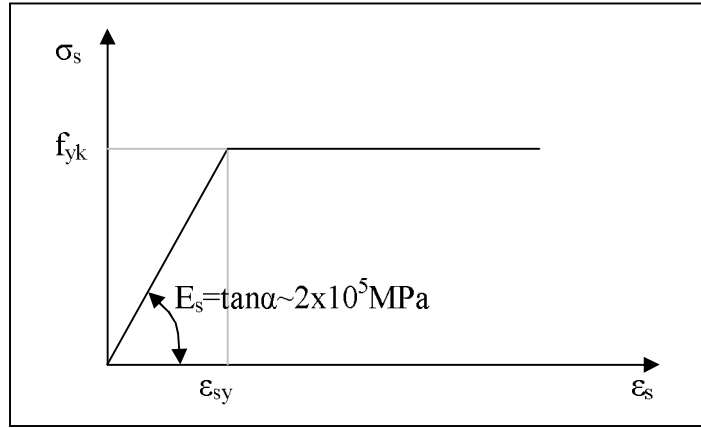
Şekil 4.3'te gösterilen deneysel gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi, genelde Şekil 4.4'te gösterildiği gibi elasto-plastik bir eğri ile idealize edilebilir. Pekleşme etkisi de dikkate alınacaksa, eğrinin akma noktasından sonraki düz bölümü Şekil 4.5'te görüldüğü gibi

değiştirilebilir. Bu değiştirilen eğri parçasının eğimi kullanılan çeliğin özelliklerine göre deneysel olarak belirlenmelidir (Gündüz, 1990).

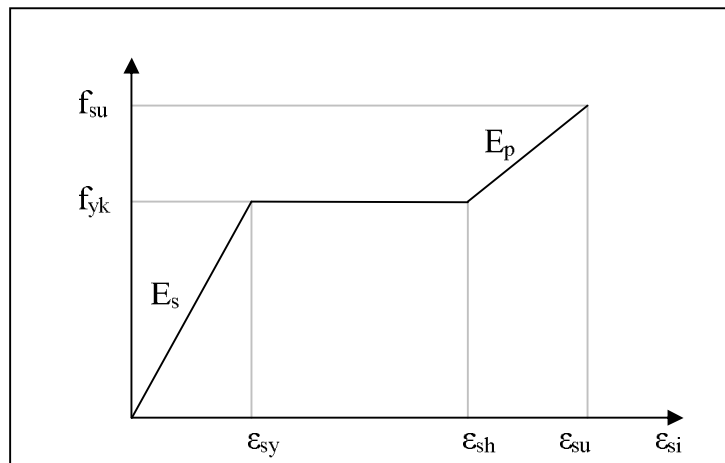
Pekleşmeli davranış modelinde, pekleşmeyi temsil eden bölümün eğimi ( $E_p$ ), (4.4) bağıntısıyla, pekleşme bölgesindeki birim şekil değiştirmeye karşılık gelen gerilme (4.5) bağıntısıyla tanımlanmıştır.

$$E_p = \frac{f_{su} - f_{yk}}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}} \quad (4.4)$$

$$\sigma_s = f_{yk} + (\varepsilon_{si} - \varepsilon_{sh}) \cdot E_p \leq f_{su} \quad (4.5)$$



Şekil 4.4 Donatı çeliği için elasto-plastik davranış modeli (CEB/FIB, 1978)



Şekil 4.5 Donatı çeliği için pekleşmeli davranış modeli (Gündüz, 1990)

## 4.2 ANSYS Genel Bilgiler

Özel problemlerin çözümü için genel bir programın kullanılabilir olması, sonlu elemanlar yönteminin güçlü ve çok amaçlı bir araç olmasına neden olmuş ve çok sayıda genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımları geliştirilmiştir. Bu yazılımlardan bazıları oldukça genel amaçlı olup, değişik mühendislik alanlarındaki problemlerin çözümü için çok az veya hiçbir değişikliğe gerek duyulmadan kullanılabilir. Bu paketlerden günümüzde yaygın olarak kullanılanlardan birisi de ANSYS'dir. ANSYS yazılımı mühendislerin mukavemet, titreşim, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi ile elektromanyetik alanlarında fiziğin tüm disiplinlerinin birbiri ile olan interaksyonunu modellemekte kullanılabilen genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Tez çalışmasında kolonlar sonlu elemanlar yöntemiyle çözümlenecektir. Çözümlemede ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır.

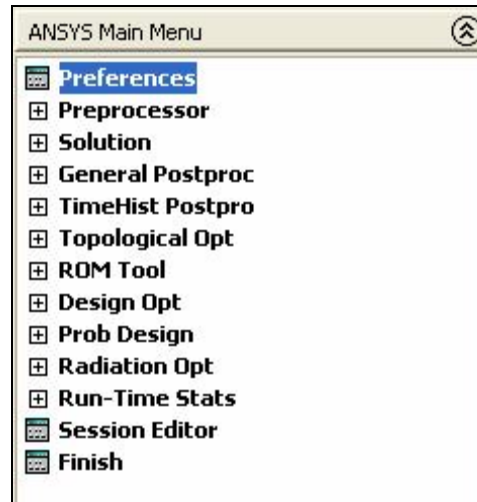
### 4.2.1 Ana Menüler

- **Utility Menü:** Ekranın üst kısmında; File, Select, ....., Help menülerinden oluşur (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 ANSYS utility menü

- **Main Menü:** Sol üst kısımda, Preferences, Preprocessor, Solution, General Postprocessor, ....., Finish alt menülerinden oluşur (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 ANSYS main menü

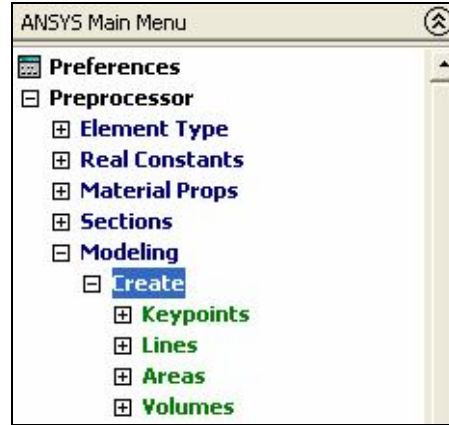
*Preprocessor:* Geometrik modelin kurulduğu, sonlu elemanlara ayırma (meshing) gibi işlemlerin yapıldığı, malzeme özelliklerinin tanımlandığı çözümden önceki en önemli hazırlık aşamasıdır.

*Solution:* Sınır şartlarının ve yüklerin girildiği, çözüm tipinin belirlendiği ve çözümün yapıldığı kısımdır.

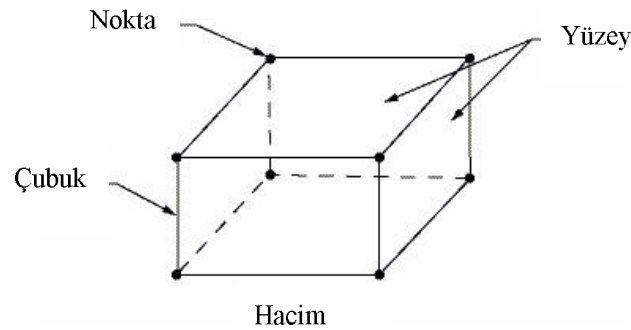
*General Postprocessor:* Sonuçların liste halinde veya görsel olarak okunabildiği ve değerlendirildiği aşamadır (Şekil 4.7).

#### 4.2.2 Model Oluşturma (Modelling Menü)

Sonlu eleman modeli, önce düğümlerin, sonra da elemanların oluşturulmasıyla meydana getirilebilir. Model oluşturma Şekil 4.8'de gösterildiği menü yardımıyla yapılır. *Keypoint*'ler (nokta), geometrik modelde geometrinin tanımlanması için gereken anahtar noktalardır. Sonlu eleman düğüm noktaları değildir. Geometriyi oluşturan çizgiler için gerekirler. *Line*'lar (çubuk), iki noktanın birleştirilmesiyle oluşan doğrudur. *Area* (yüzey), en az üç çubuktan oluşan kapalı bir yüzeydir. *Volume* (hacim), en az dört yüzeyden oluşan kapalı bir hacimdir (Şekil 4.9).



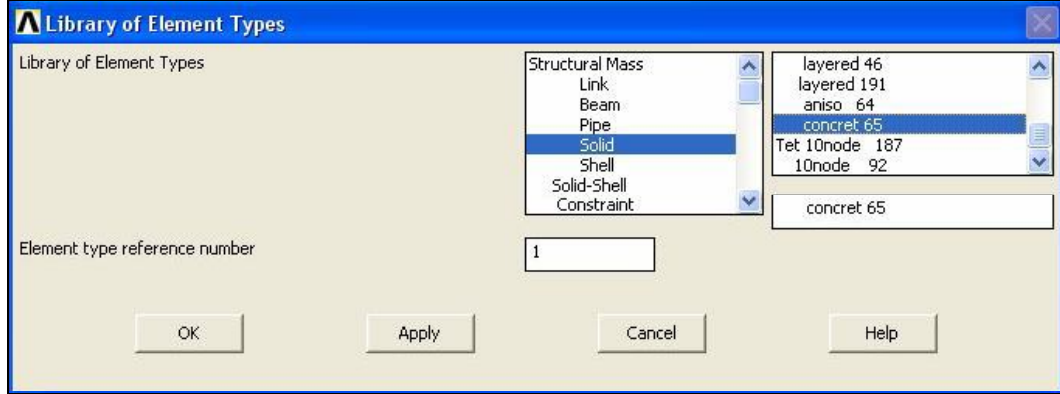
Şekil 4.8 ANSYS main menü (modeling)



Şekil 4.9 ANSYS model oluşturma nesnelere

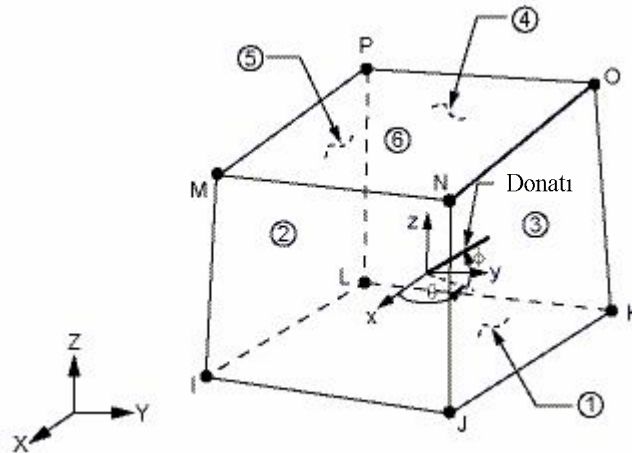
### 4.2.3 Eleman Tiplerinin Belirlenmesi (Element Type Menüsü)

ANSYS’de eklenen eleman tipine program tarafından bir numara verilmektedir. Tez çalışmasında beton için *solid65*, donatı için *link8*, mesnet plakası için ise *solid45* elemanı kullanılmıştır. Yapısal çözümlemede en çok, link, solid, plane, shell ve beam elemanlar kullanılmaktadır. Solid 65 elemanı beton malzemeyi detaylı tanımlayabilmek için ANSYS’de geliştirilmiş bir modeldir (Şekil 4.10).



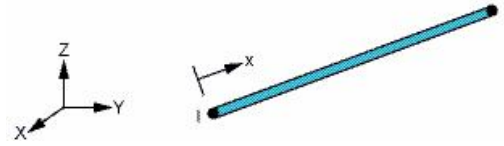
Şekil 4.10 Eleman type menüsü

Solid65 elemanı, beton ve betonarme elemanlar için ayrılmış, çekmede çatlama, basınçta ezilme, elastik ötesi (plastik) şekil değiştirme ve sünme özelliklerini barındıran 8 düğüm noktalı solid elemandır. Her düğüm noktasında x, y ve z yönlerinde 3 ötelenme serbestlik derecesine sahiptir. Donatısız olarak da kullanılabilceği gibi, bünyesinde üç farklı malzeme ve kesit özellikli donatı tanımlanabilir. Solid65 elemanı içerisindeki donatının yerleşimi Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



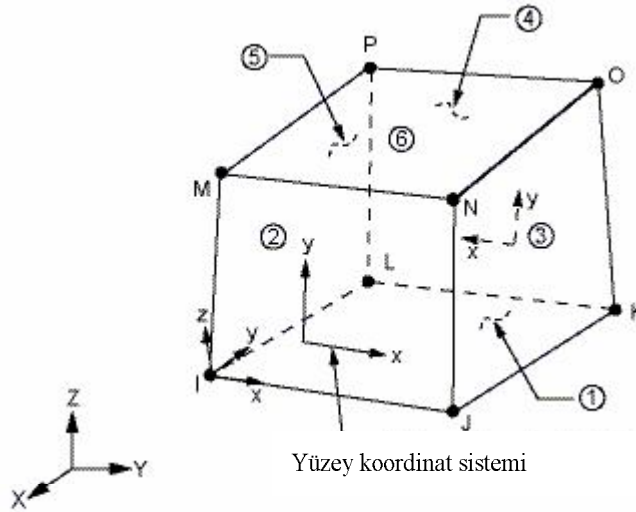
Şekil 4.11 Solid65 elemanı

Donatı elemanı, solid65 elemanı içerisinde tanımlanabileceği gibi ayrı olarak da tanımlanabilmektedir. Ayrı olarak modellenen donatı, ANSYS'de bulunan eleman tiplerinden Link8 elemanı ile tanımlanmaktadır. Link8 elemanının da her bir düğüm noktasında x, y, z yönlerinde üç ötelenme serbestlik derecesi vardır. Tek eksenli çekme ve basınç elemanıdır, eğilme hesaba katılmaz (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 Link8 elemanı

Deney elemanının mesnetlendiği ve yükün uygulandığı bölgelerde gerilme yığılmalarının önlenmesi amacıyla bu bölgelere solid45 çelik levla elemanları tanımlanabilmektedir. Solid45 elemanı da x, y ve z yönlerinde üç ötelenme serbestlik derecesine sahiptir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13 Solid45 elemanı

#### 4.2.4 Eleman Sabitlerinin Belirlenmesi (Real Constants Menüsü)

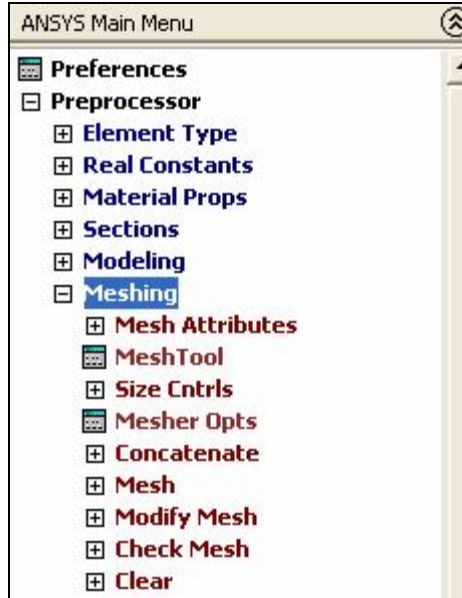
Eleman gerçek sabitleri, eleman kesit özellikleri gibi elemanın modelde tanımlanan eleman tiplerine ait enkesit alanı, kesit yüksekliği ve atalet momenti gibi kesit özellikleri bu menü yardımıyla tanımlanır (Şekil 4.14). ANSYS programında, tanımlanan her eleman sabiti otomatik olarak numaralandırır.



Şekil 4.14 Real constants menüsü

#### 4.2.5 Modelin Sonlu Elemanlara Bölünmesi (Meshing Menüsü)

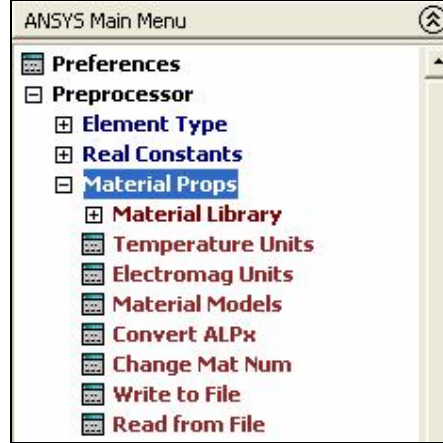
Mesh işlemi; çubuk, yüzey ve hacim elemanlarını uygun sonlu eleman nesnelere dönüştürülmesidir. Meshing menüsü içerisinde bulunan *mesh attributes* seçeneği kullanılarak seçilecek elemanlara malzeme özellikleri atanır. *Size cntrls* seçeneği ise sonlu eleman uzunluğunu tarif ettiğimiz bölümdür. Sonlu elemanlara bölme işlemi program tarafından otomatik veya manuel olarak yapılabilmektedir (Şekil 4.15). Sonlu elemanlara bölme işlemi sonrası eleman sayısının fazla olması daha doğru çözümler elde edilmesini sağlar fakat çözüm süresini uzatmaktadır. Bir hacim elemanı her ekseninde farklı sonlu eleman boyutlarına bölünmek istenirse; o zaman öncelikle hacim elemanını oluşturan çubuk elemanların sonlu eleman boyutları belirlenir. Daha sonra *volume sweep* seçeneği kullanılarak istenilen sonlu eleman boyutları hacim elemanına uygulanmış olur.



Şekil 4.15 Meshing menüsü

#### 4.2.6 Malzeme Özellikleri (Material Props Menüsü)

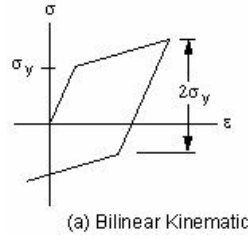
Malzeme özellikleri (Material Props) menüsü, modelde kullanılacak malzemelerin davranışlarının belirlendiği menüdür (Şekil 4.16). Program, tanımlanan her malzeme modeli için bir numara vermektedir. Doğrusal - elastik bir malzeme için izotropik, ortotropik veya anizotropik tanımlamalarından uygun olanı seçilebilir. Doğrusal olmayan bir malzeme için ise, elastik, inelastik veya viskoelastik davranış seçenekleri mevcuttur.



Şekil 4.16 Material props menüsü

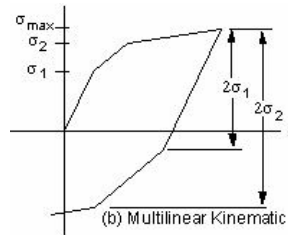
Malzemeye ait plastik davranışın tanımlanmasında bir kaç seçenek vardır. Bunlar;

- BKIN (Bilinear Kinematic Hardening)



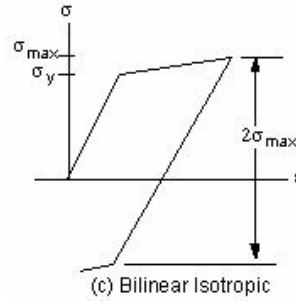
Şekil 4.17 İki doğrusal pekleşmeli malzeme davranışı

- MKIN (Multilinear Kinematic Hardening)



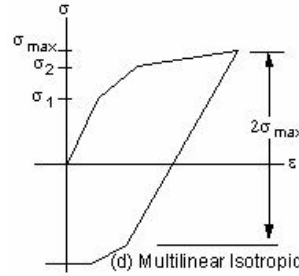
Şekil 4.18 Çok doğrusal pekleşmeli malzeme davranışı

- BISO(Bilinear Isotropic Hardening)



Şekil 4.19 İki doğrulu izotropik pekleşmeli malzeme davranışı

- MISO(Multilinear Isotropic Hardening)



Şekil 4.20 Çok doğrulu izotropik pekleşmeli malzeme davranışı

- Drucker - Prager

ANSYS programında Drucker - Prager malzeme modeli üç parametre ile tanımlanır. Bunlar, kohezyon değeri (sıfırdan büyük olmalı), iç sürtünme açısı ve genişleme açısıdır. Akmadan dolayı malzeme hacminde meydana gelen genişlemenin miktarı genişleme açısı ile kontrol edilebilir. Eğer genişleme açısı ile sürtünme açısı aynı ise akma kuralı “ilişkili akma kuralı (associated flow rule)” (plastik akma, akma kriterine bağlı veya ilişkilidir; ve plastik birim şekil değiştirme akma yüzeyine diktir) tipindedir. Eğer genişleme açısı sıfır ise (veya sürtünme açısından küçükse), akma sırasında malzeme hacminde artış yoktur veya azdır ve akma kuralı “ilişkisiz akma kuralı(nonassociated flow rule)” tipindedir (Calayır ve Karaton, 2002).

Drucker-Prager için gerekli üç sabit, ANSYS’te malzeme özellikleri menüsü veya TBDATA komutu yardımı ile girilir. Bu sabitler şunlardır:

C1: Kohezyon değeri,

C2: İç sürtünme açısı,

C3: Genişleme açısı.

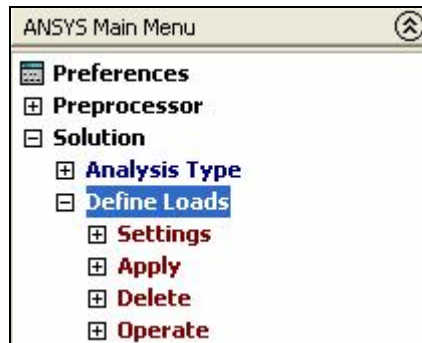
#### 4.2.7 Sınır Koşulları ve Yük Tanımlama (Define Loads menüsü)

ANSYS’de yük tanımlama (define loads) menüsü kullanılarak modeli oluşturan elemanlara (koypoint, node, line, volume) kuvvet veya moment atama işlemi yapılmaktadır. Aynı menü kullanılarak ilgili elemanlara yerdeğiştirme yükü de atanabilir. Yerdeğiştirme yükü olarak sıfır yükleme yapılması, sistemin o doğrultuda sabitlenmesi anlamına gelir.

Yük tanımlama menüsü kullanılarak elemanlar zamana bağlı yük atanması da mümkündür. Zamana bağlı yükleme yapılırken “Apply as” seçeneği olarak “New table” seçilir. Daha sonra oluşturulacak yükleme çizelgesi için isim verilir. Veri satırı sayısı (veri başlığı satırı dahil) verildikten sonra “Read from file” seçeneği seçilir. Yük dosyasının konumu seçilir ve başlık satırı sayısı belirtilir. Başlık satırı verilerden böylece ayırt edilmiş olur (Şekil 4.21).

ANSYS’de bir betonarme elemana tersinir yatay yük uygulaması yapılırken bir noktadan hem çekme hem basınç uygulanamaz. Çünkü betona çekme uygulandığında betonun çekme mukavemeti küçük olduğu için sistem çok küçük yükler altında çözüme ulaşmaktadır. Örneğin; betonarme kolona tersinir yük uygulamak istiyorsak öncelikle kolonun bir yüzünden basınç yükü uygulayıp çözüm başlatılır. Çözüm sonuca ulaştıktan sonra “solution” menüsünden ayrılmadan kolonun aynı yüzüne sıfır yükü uygulanır, tekrar çözüm yapılır. Çözüm sonuca ulaştıktan sonra “solution” menüsünden ayrılmadan kolonun diğer yüzüne basınç yükü uygulanıp yüklemelere bu şekilde devam edilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, her çözüm sonunda “solution menüsü”nün kapatılmamasıdır. “Solution menüsü” terk edilirse, çözüm sıfır zamanından başlatılmış olacaktır.

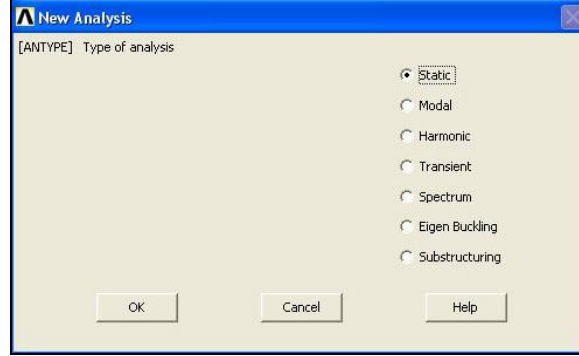
Çözümde kullanılmak üzere “statik”, “modal”, “transient” gibi çözüm yöntemleri belirlenir. ANSYS ile doğrusal ve doğrusal olmayan yapı / yapı elemanları çözümlemesi yapılabilmektedir. Çözüm tipi modele ve modelde kullanılan eleman tipine bağlıdır. Malzemenin plastik tanımlanması ile doğrusal olmayan çözümleme yapılmaktadır.



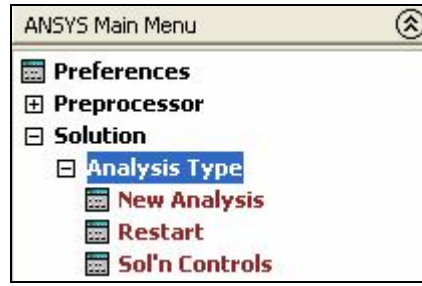
Şekil 4.21 Define loads menüsü

#### 4.2.8 Çözümleme (Analysis Type Menüsü)

Çözüm tipinin seçimi Şekil 4.22'deki menü yardımıyla yapılabilmektedir. Kullanıcı, çözümde ne tür çözüm tipini kullanacaksa bu menü yardımıyla seçimini yapabilmektedir. Çözüm tipi, modelde kullanılan malzeme modeline ve eleman tipine göre değişmektedir.

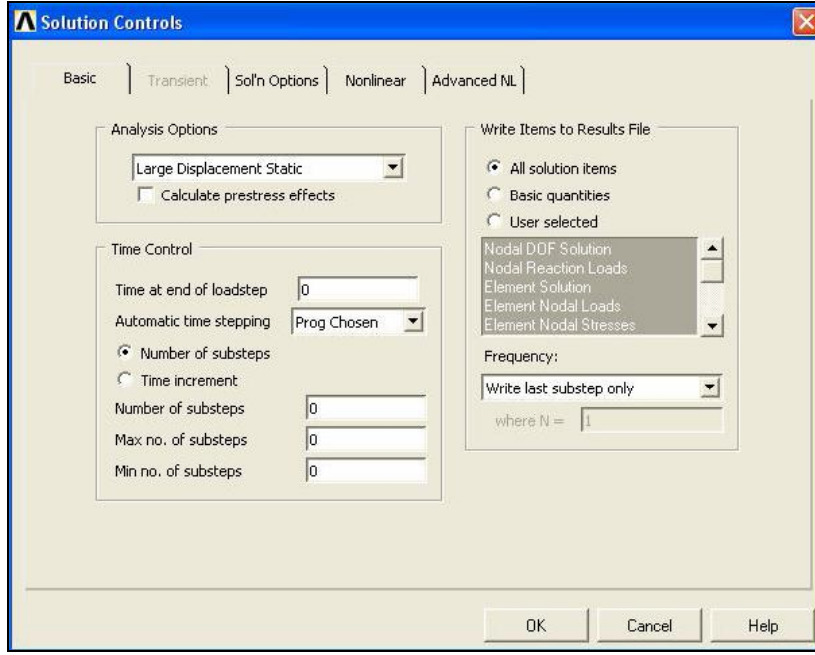


Şekil 4.22 ANSYS programı çözüm seçenekleri menüsü



Şekil 4.23 Analysis type menüsü

Şekil 4.23'de görünen *Solution Controls* sekmesi kullanılarak çözüm ile ilgili yük adımı, alt adım sayıları ve zaman (time) değeri gibi çözüme doğrudan etkiyecek ayarlar da yapılabilmektedir. Bu menü yardımıyla geometrik nonlineerlik durumu dikkate alınabilmektedir. Sonuç dosyasında yer alması istenilen veri grupları ve bu veri gruplarının hangi sıklıkla dosyaya kaydedileceği de bu menü yardımıyla belirlenir. Çözüm sırasında kullanılacak denklem sistemi çözüm yöntemi, doğrusal olmayan döngüye ait çeşitli seçenekler ve yakınsama kriterleri bu menü aracılığıyla verilebilmektedir. Çözümde "*Large Displacement*" seçeneği seçilerek geometrik nonlineerlik dikkate alınabilir (Şekil 4.24).



Şekil 4.24 ANSYS programında solution controls menüsü

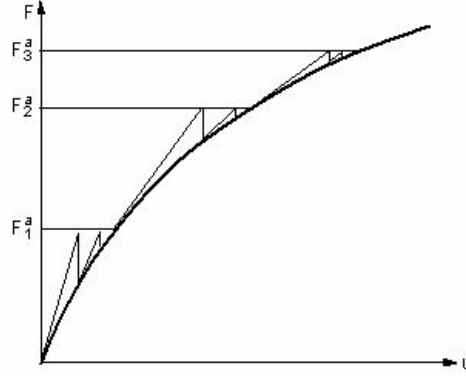
Tersinir yüklemde birden fazla yük adımı (*Load Step*) bulunmaktadır. Her bir yük adımında, yükün başlangıç değerinden itibaren belirli artış adımları (*substep*) ile yükleme yapılır. Şekil 4.24'teki parametreleri kısaca açıklayacak olursak;

- *Time step size*: Zaman adımı büyüklüğü
- *Minimum time step*: En küçük zaman adımı büyüklüğü
- *Maximum time step*: En büyük zaman adımı büyüklüğü
- *Number of substeps*: Artış adımı sayısı
- *Max. num. of substeps*: Maksimum artış adımı sayısı
- *Min. num. of substeps*: Minimum artış adımı sayısı olarak açıklanabilir.

ANSYS programı, geometrisi veya malzeme gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi doğrusal olmayan sistemlerin çözümünde çeşitli iterasyon prosedürleri kullanır. Herhangi bir seçim yapılmadığı takdirde otomatik olarak Newton - Raphson yöntemini kullanır.

ANSYS sonlu eleman programı, doğrusal olmayan çözümler için Newton - Raphson yöntemini kullanır. Newton - Raphson yada değişken rijitlik prosedürü olarak da bilinen bu yöntem, dış yükler etkisinde yerdeğiştirme yapan sistemin düğüm noktalarında oluşacak kuvvet farkını dikkate alır. İlk deplasmanlar yapının şekil değiştirme olmamış konumunda hesaplanan rijitlik matrisinden bulunur. Daha sonraki her iterasyon adımında yapının şekil

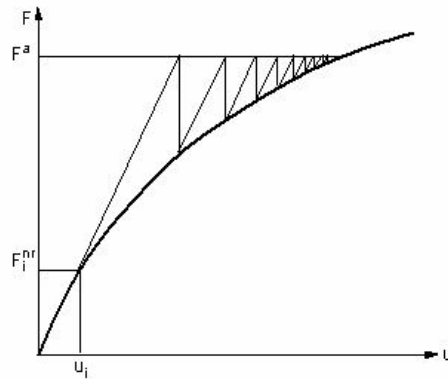
değiştirme olmuş hali dikkate alınarak teğet rijitlik matrisi hesaplanır. Newton - Raphson prosedürü dengelenmemiş yük vektörünü (uygulanan dış kuvvet ile elemanlar üzerindeki gerilmeyi oluşturan kuvvet arasındaki farkı) kullanarak doğrusal çözüm yapar. Yakınsama olup olmasına göre dengelenmemiş yük vektörü yeniden hesaplanır. Çözüm yakınsama sağlanıncaya kadar devam eder. Yakınsama sağlanamazsa daha küçük yük artışları kullanılır. Newton - Raphson yönteminde bir boyutlu bir sistem için çözümün ilerleme aşamaları Şekil 4.25'te görülmektedir.



Şekil 4.25 Newton - Raphson yönteminde çözümün ilerleyişi

Her iterasyon hesap adımında rijitlik matrislerinin yeniden kurulması zaman ve bellek sorunlarını beraberinde getirecektir. Bu sorunları azaltmak amacıyla, “Değiştirilmiş Newton Raphson Yöntemi” geliştirilmiştir. Bu yöntemde, her iterasyon için yükleme adımı başlangıcındaki sistem rijitliği kullanılır. Böylece her yük artışı için bir kereye mahsus oluşturulan ve depolanan rijitlik matrisi değişmemektedir.

ANSYS programında “Değiştirilmiş Newton Raphson” yöntemi özellikle “statik” ve “transient analizler” için önerilmektedir. Çözümü, Newton Raphson yöntemine göre daha zaman alıcı olmasına rağmen, daha az matris işlemi gerektirir (Şekil 4.26) (Dede, 2006).



Şekil 4.26 Değiştirilmiş Newton - Raphson Yöntemi

### 4.3 Betonarme Kolonların Sonlu Eleman Modellemeleri

Bu bölümde; literatürde kabul görmüş yayınlardan doğrusal olmayan sonlu eleman çözümlenmeleri için yeterli deneysel verilere sahip Lin ve Lin (2005) tarafından deneyleri yapılmış kolonların sonlu eleman çözümlenmeleri yapılacaktır. Söz konusu kolonlarının kesit ve malzeme özellikleri Bölüm 3’te tanımlanmıştır.

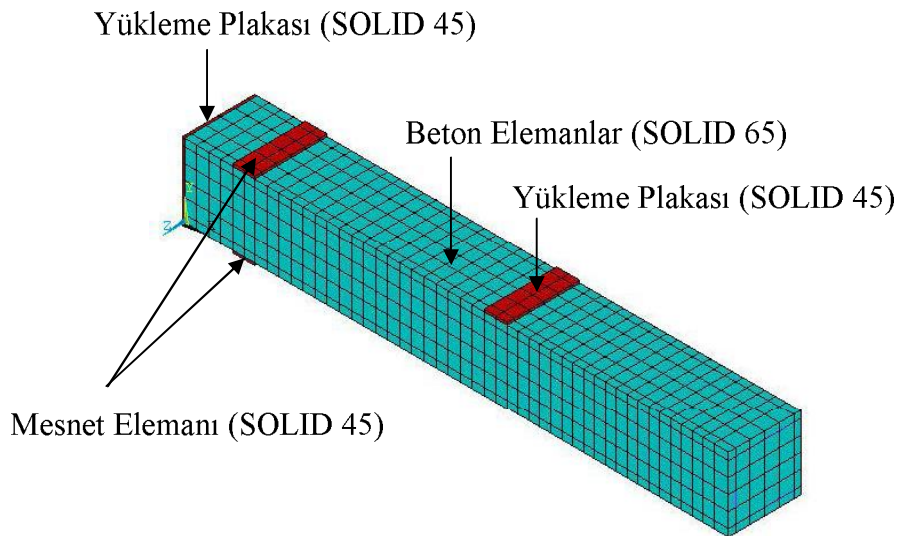
#### 4.3.1 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Sonlu eleman modeli oluşturulurken öncelikle noktalar tanımlanmıştır. Daha sonra bu noktalar yardımıyla yüzeysel elemanlar oluşturulmuş; yüzeysel elemanlar kullanılarak da hacim geometrik nesnesi oluşturulmuştur.

Deneysel kolonların yük uygulanış ve mesnetlenme biçimleri simetrik olmasından dolayı kolon elemanlarının yarısı modellenmiştir. Bu nedenle tez çalışmasındaki kolon elemanlar 2250 mm uzunluğunda, 300x300 mm kesitinde modellenmiştir.

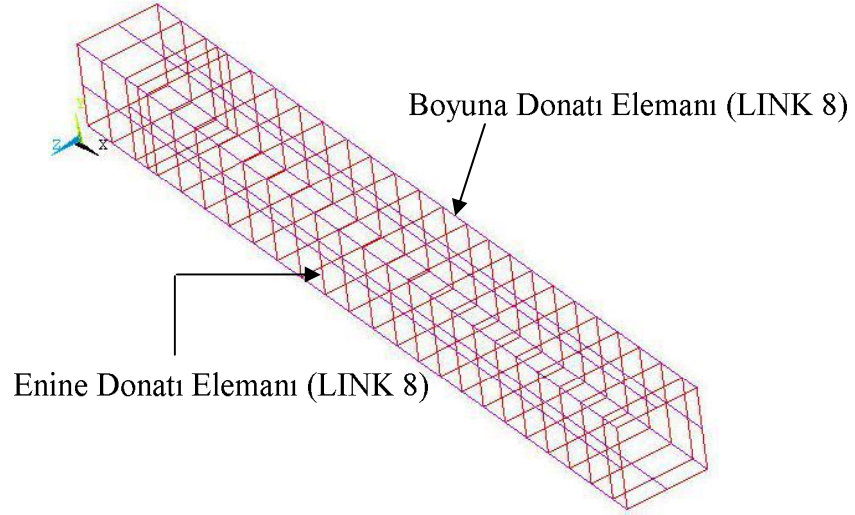
Model, deneysel kolonların özelliklerine (enine donatı aralığı, boyuna donatı) göre oluşturulmuştur. Her kolon modelindeki sonlu eleman sayısı ve düğüm noktası sayısı farklıdır.

Sonlu eleman modellerinde Şekil 4.27’de görüldüğü üzere kolon elemanlar, yük uygulama işleminin daha rahat yapılabilmesi için yatayda modellenmiştir. Sonlu eleman modeli 3 farklı eleman tipi kullanılarak oluşturulmuştur. Beton için “Solid 65” elemanı, boyuna ve enine donatılar için “Link 8” elemanı, mesnet bölgeleri ve yük uygulanan bölgelerde ise “Solid 45” çelik plaka elemanı kullanılmıştır.



Şekil 4.27 Sonlu eleman ağına bölünmüş deney kolonu ve eleman tipleri

Donatı elemanı, Şekil 4.28’de görüldüğü üzere solid65 elemanı içerisinde tanımlanmayıp ayrıık olarak tanımlanmıştır. Donatı elemanını tanımlamak için “link8” eleman tipi kullanılmıştır.



Şekil 4.28 Sonlu eleman modelindeki enine ve boyuna donatı elemanlar

Sonlu eleman modelinde kullanılan eleman sabitleri Çizelge 4.1’de tanımlanmıştır. Betonun eleman sabiti numarası “1”, boyuna donatının “2”, enine donatının ise “3” olarak tanımlanmıştır.

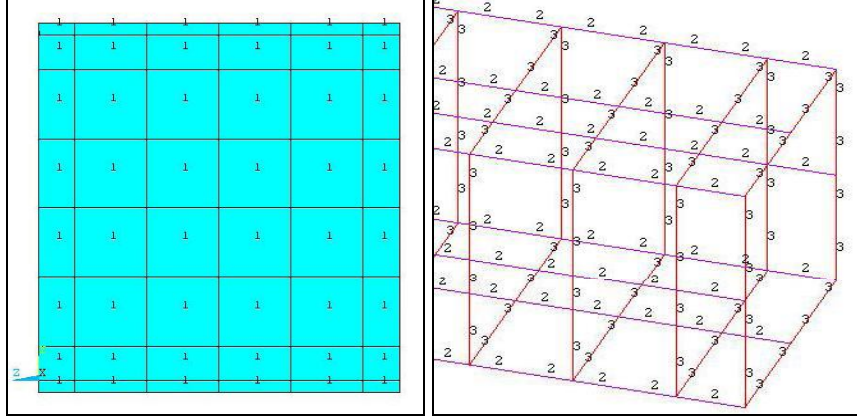
Çizelge 4.1 Solid65 ve link8 elemanı için tanımlanan eleman sabitleri

Real Constant Set (Eleman Sabiti)	Eleman Tipi	Donatı Özellikleri			
		Malzeme No	Hacim Oranı	$\theta$ açısı	$\Phi$ açısı
1	Solid65	1,3	-	-	-
			Kesit Alanı	Başlangıç Rijitliği	
2	Link8	4	380.13	0	
3	Link8	2	78.54	0	

Çizelge 4.1’deki terimler kısaca açıklanacak olursa;

- Hacim oranı: Solid65 malzemesi içerisindeki donatının hacimsel oranını göstermektedir. Çalışmamızda donatı, solid65 elemanı içerisinde dağınık olarak tanımlanmadığı için, bu değer 0 (sıfır) olarak sisteme girilmiştir.
- $\theta$  açısı: Donatının eleman içerisinde  $x - y$  düzleminde  $x$  eksenine ile yaptığı açıyı gösterir.
- $\Phi$  açısı: Donatının eleman içerisinde  $x - y$  düzlemiyle yaptığı açıyı gösterir.

Kolon elemanını oluşturan beton ve donatı malzemelerine ait eleman sabitleri Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Beton elemanı, sargılı ve sargısız beton olmak üzere iki adet malzeme numarası (material number), tek eleman sabiti ile tanımlanmıştır. Donatı elemanı tanımlanırken, boyuna donatı için eleman sabiti numarası olarak 2, enine donatı için eleman sabiti numarası olarak 3 numaralı eleman sabiti tanımlanmıştır.



Şekil 4.29 Kolonu oluşturan eleman sabitleri numaraları

Çizelge 4.2 NC1, NC2, NC4 ve NC5 kolonu malzeme özellikleri

Malzeme No	Eleman Tipi	Malzeme Özellikleri	Kolon No			
			NC1	NC2	NC4	NC5
1	Solid65	Linear Isotropik Pekleşmeli				
		EX (MPa)	30376	30493	26673	32097
		PRXY	0.3	0.3	0.3	0.3
		Drucker Prager				
		Beton				
		ShrCf-Op	0.5	0.5	0.5	0.5
		ShrCf-CI	1	1	1	1
		UnTensSt(MPa)	2.47	2.49	1.97	2.66
		UnCompSt(MPa)	-1	-1	-1	-1

2	Link8	Lineer Isotropik Pekleşmeli							
		EX (MPa)		200000	200000	200000	200000		
		PRXY		0.3	0.3	0.3	0.3		
		Multilineer Isotropik Pekleşmeli							
		1. Nokta	Şekil Değişirme	0.00226	0.00226	0.00226	0.00226		
			Gerilme (MPa)	452.1	452.1	452.1	452.1		
		2. Nokta	Şekil Değişirme	0.008	0.008	0.008	0.008		
			Gerilme (MPa)	452.1	452.1	452.1	452.1		
		3. Nokta	Şekil Değişirme	0.01	0.01	0.01	0.01		
			Gerilme (MPa)	453.8	453.8	453.8	453.8		
3	Solid65	Lineer Isotropik Pekleşmeli							
		EX (MPa)		30376	30493	26673	32097		
		PRXY		0.3	0.3	0.3	0.3		
		Drucker Prager							
		Beton							
		ShrCf-Op		0.5	0.8	0.5	0.55		
		ShrCf-CI		1	1	1	1		
		UnTensSt(MPa)		2.6	2.61	2.13	2.77		
		UnCompSt(MPa)		-1	-1	-1	-1		
		4	Link8	Lineer Isotropik Pekleşmeli					
				EX (MPa)		200000	200000	200000	200000
				PRXY		0.3	0.3	0.3	0.3
Multilineer Isotropik Pekleşmeli									
1. Nokta	Şekil Değişirme			0.00219	0.00219	0.00219	0.00219		
	Gerilme (MPa)			438	438	438	438		
2. Nokta	Şekil Değişirme			0.008	0.008	0.008	0.008		
	Gerilme (MPa)			438	438	438	438		
3. Nokta	Şekil Değişirme			0.01	0.01	0.01	0.01		
	Gerilme (MPa)			439.8	439.8	439.8	439.8		

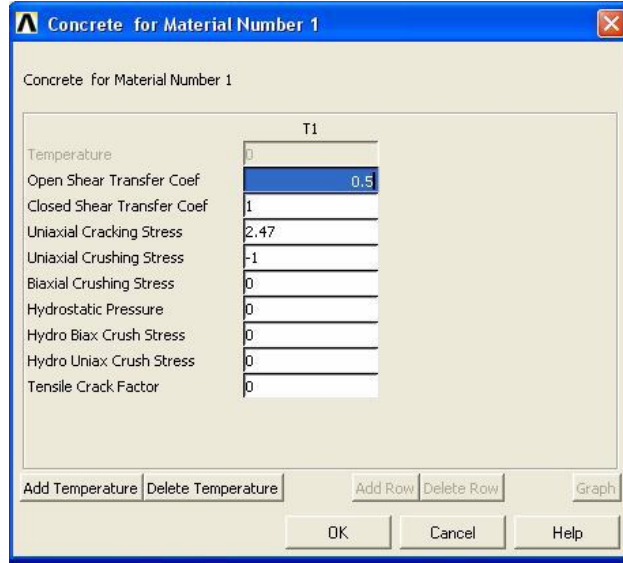
Sayısal çözümlenmesi yapılan betonarme kolonlarda betonun elastisite modülü; yüksek mukavemetli beton için ACI 363 (1998)'de tanımlanan  $3320\sqrt{f_c} + 6900$  (MPa), normal mukavemetli beton için ACI 318 (2005)'te tanımlanan  $4730\sqrt{f_c}$  (MPa) bağıntılarından bulunan değerler alınmıştır (Çizelge 4.2-4.3).

Çizelge 4.3 NC6, NC7, NC8 ve NC9 kolonu malzeme özellikleri

Malzeme No	Eleman Tipi	Malzeme Özellikleri	Kolon No				
			NC6	NC7	NC8	NC9	
1	Solid65	Lineer Isotropik Pekleşmeli					
		EX (MPa)	30140	30516	30021	30164	
		PRXY	0.3	0.3	0.3	0.3	
		Drucker Prager					
		Beton					
		ShrCf-Op	0.5	0.5	0.5	0.4	
		ShrCf-CI	1	1	1	1	
		UnTensSt(MPa)	2.45	2.49	2.44	2.45	
		UnCompSt(MPa)	-1	-1	-1	-1	
2	Link8	Lineer Isotropik Pekleşmeli					
		EX (MPa)	200000	200000	200000	200000	
		PRXY	0.3	0.3	0.3	0.3	
		Multilineer Isotropik Pekleşmeli					
		1. Nokta	Şekil Değişirme	0.00226	0.00226	0.00183	0.00277
			Gerilme (MPa)	452.1	452.1	365.2	554.6
		2. Nokta	Şekil Değişirme	0.008	0.008	0.008	0.008
			Gerilme (MPa)	452.1	452.1	365.2	554.6
		3. Nokta	Şekil Değişirme	0.01	0.01	0.01	0.01
			Gerilme (MPa)	453.8	453.8	375	556.4
3	Solid65	Lineer Isotropik Pekleşmeli					
		EX (MPa)	30140	30516	30021	30164	
		PRXY	0.3	0.3	0.3	0.3	
		Drucker Prager					
		Beton					
		ShrCf-Op	0.55	0.7	0.5	0.4	
		ShrCf-CI	1	1	1	1	
		UnTensSt(MPa)	2.53	2.61	2.57	2.58	
		UnCompSt(MPa)	-1	-1	-1	-1	

4	Link8	Lineer Isotropik Pekleşmeli					
		EX (MPa)		200000	200000	200000	200000
		PRXY		0.3	0.3	0.3	0.3
		Multilineer Isotropik Pekleşmeli					
		1. Nokta	Şekil Değişirme	0.00219	0.00219	0.00219	0.00219
			Gerilme (MPa)	438	438	438	438
		2. Nokta	Şekil Değişirme	0.008	0.008	0.008	0.008
			Gerilme (MPa)	438	438	438	438
		3. Nokta	Şekil Değişirme	0.01	0.01	0.01	0.01
			Gerilme (MPa)	439.8	439.8	439.8	439.8

Malzeme özelliklerinin gösterildiği çizelgelerde de görüleceği gibi, sonlu eleman modelini oluşturmak için 4 adet malzeme tanımı yapılmıştır. 1 numaralı malzeme sargısız betonu, 2 numaralı malzeme enine donatıları, 3 numaralı malzeme sargılı betonu ve 4 numaralı malzeme boyuna donatıları tanımlamak için kullanılacaktır.

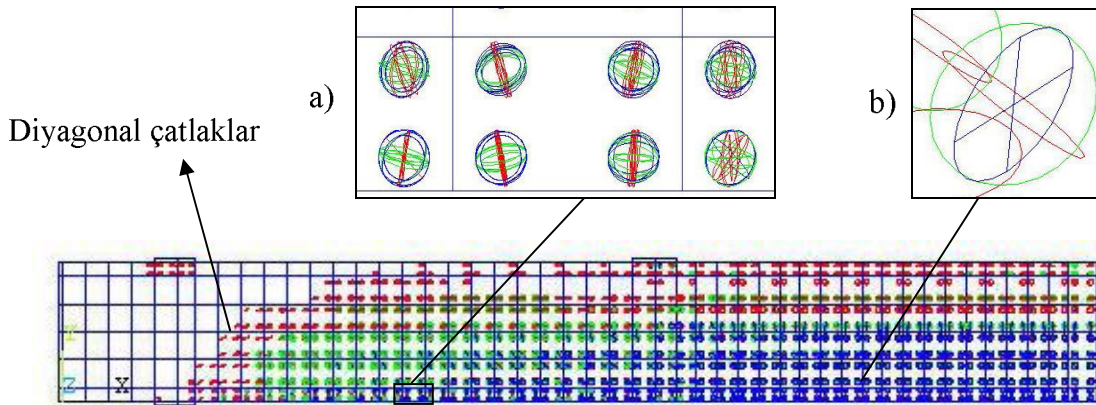


Şekil 4.30 Beton malzeme parametrelerinin girilmesi

Betonun davranışı, ANSYS bünyesinde bulunan Willam - Warnke modelini tanımlamak için kullanılan parametrelerin girilmesi suretiyle belirlenmiştir. Bunlar; açık ve kapalı çatlak için kayma transfer katsayısı (ShrCf - Op, ShrCf - Cl) değeri 0 - 1 arası değerler alabilmektedir. Değerin 0 olması çatlağın düzgün yüzeyli bir çatlak olduğu ve yüzeyler arasında bir transfer olmayacağı anlamına gelmektedir. 1 olması durumunda ise, pürüzlü bir çatlak olduğu ve tam transfer olacağını göstermektedir. Tek eksenli basınç dayanımı (UnCompSt) değeri yakınsama hatalarının engellenmesi için ezilme çatlağının kontrolünün engellenmesi

gerekmekte yani betonun ezilmesinin ihmal gerekmektedir. Geçmiş çalışmalarda da ANSYS ezilme çatlak modeli ile ilgili problemler olduğu ifade edilmiş ve bu özelliğin kullanılmamasının daha uygun olacağı belirtilmiştir. Bu yüzden bu değer -1 olarak ilgili menüde girilmiştir (Şekil 4.30).

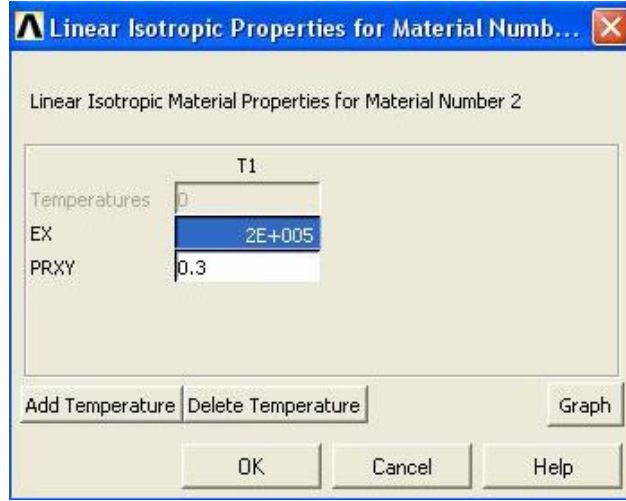
Şekil 4.31’de solid65 elemanında oluşan çatlaklar gösterilmiştir. Tüm çatlaklar çekme çatlaklarıdır. Basınç çatlak oluşmamasının sebebi “concrete” menüsünde betonun ezilme dayanımına -1 değeri girilmesi, yani ezilmenin ihmal edilmesinden kaynaklanmaktadır. Bir elemanın bir integrasyon noktasında asal çekme gerilmelerinin eksenlerle yaptığı açı değiştiğinde, bununla uyumlu olarak aynı noktada çok sayıda çatlak oluşabilmektedir (Şekil 4.31a). ANSYS çekme çatlaklarını dairelerle, basınç çatlaklarını ise, poligonlarla ifade etmektedir. Daire yüzeyinin oluşturduğu yüzey, çatlak yüzeyi olarak algılanmalıdır. Ayrıca bir çatlak kapandığında çatlak şekli üzerine bir X işareti koymaktadır (Şekil 4.31b’deki mavi renkli çatlakta olduğu gibi).



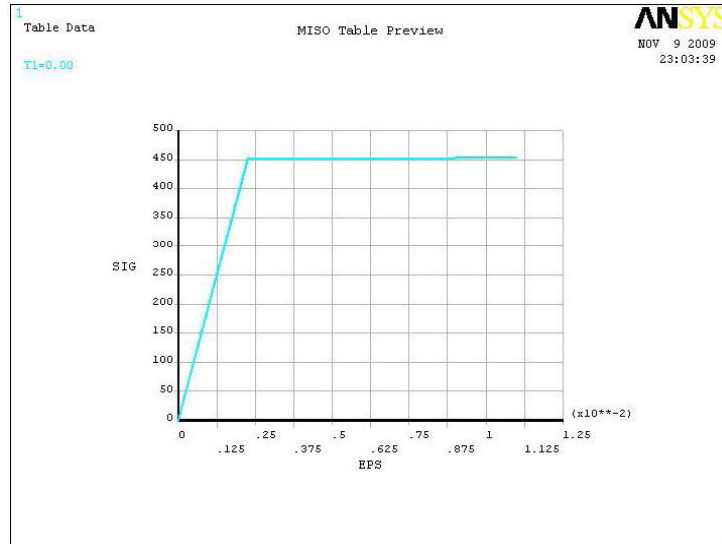
Şekil 4.31 Solid65 elemanında oluşabilecek çatlaklar

Donatı malzemesinin tanımı için “Linear Isotropic” ve “Multilinear Isotropic Hardening” malzeme modelleri kullanılmıştır. Elastisite modülü gerilme-birim deformasyon ilişkisinin verildiği eğrinin ilk eğimi olarak alınmıştır (Şekil 4.32).

Bu modelden elde edilen  $\sigma - \epsilon$  ilişkisi Şekil 4.33’de gösterilmiştir. Donatı çeliği için elastisite modülü  $E_s = 2.10^5 MPa$ , akma dayanımı boyuna donatı için  $f_{yh} = 438 MPa$ , enine donatı için  $f_{yv} = 452 MPa$  olarak verilmiştir.



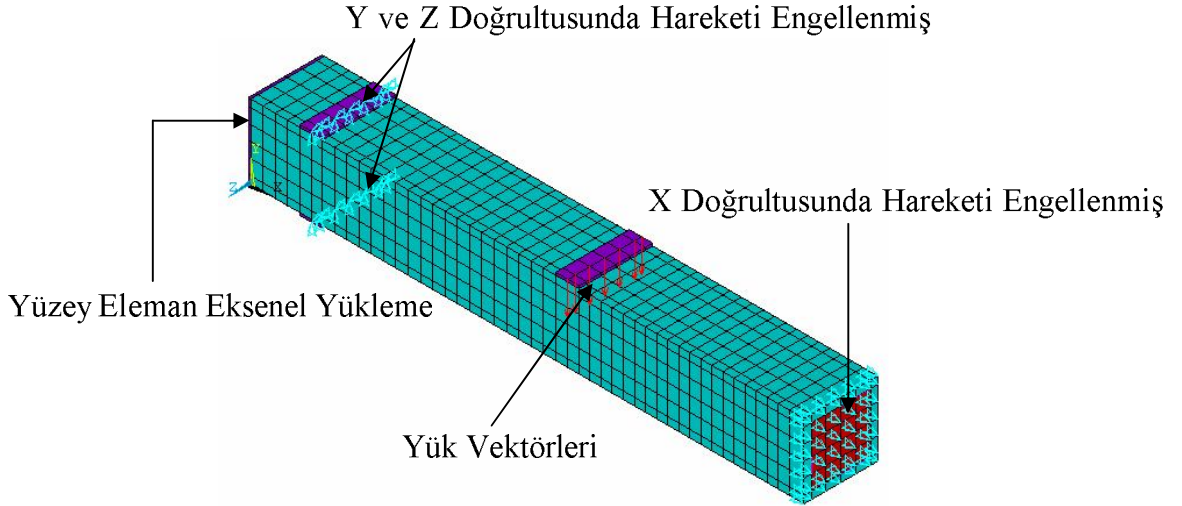
Şekil 4.32 Donatı çeliği için verilen linear isotropic verileri grafiği



Şekil 4.33 Donatı çeliği için tanımlanan gerilme - şekil değiştirme eğrisi

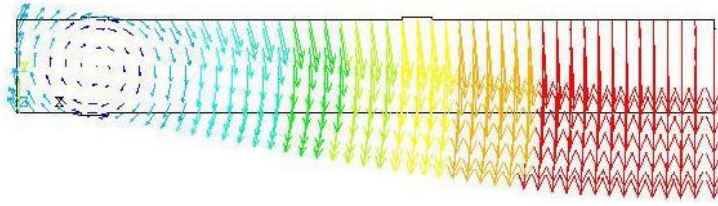
#### 4.3.2 Kolonların Mesnet Şartları ve Yüklenmesi

Modellenen kolonlar uç kısımlarından 250 mm içeriden mesnetlenmiştir. Sol taraftaki mesnetlenme yapılırken üstten 7 adet düğüm noktası  $y$  ve  $z$  doğrultusunda sabitlenmiş, alttan ise 7 adet düğüm noktası seçilmiş ve  $x$ ,  $y$  ve  $z$  doğrultusunda sabitlenmiştir. Mesnetlenen her noktada solid45 çelik elemanı tanımlanarak yükleme sonucu oluşacak gerilme yığılmalarının önüne geçilmiştir. Kolon, solundan aksenal yüklenmiştir. Kolona, mesnetlerden 1040 mm uzaklıktan 2 bölgeden yatay yük yüklenmesi yapılmıştır. Uzunluğunun yarısı modellenen kolonlarda, bölme işleminin yapıldığı kesite uygulanan mesnet şartları Şekil 4.34'te görülmektedir.



Şekil 4.34 Modellenen kolonun mesnetlenmesi ve yüklenmesi

Mesnetlenme biçimi Şekil 4.34'te gösterilen kolonun, yatay yük etkisinde yapacağı yerdeğiştirmenin NC1 kolonunda vektörel görünüm Şekil 4.35'te gösterilmiştir.

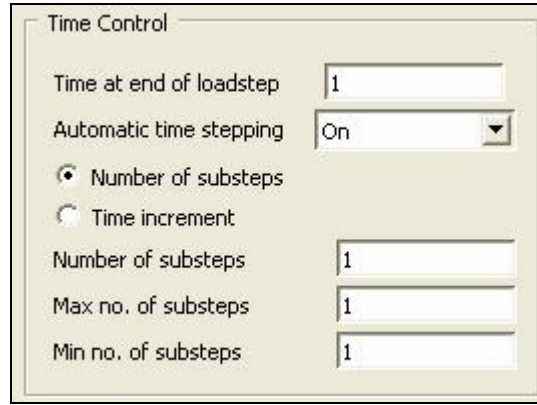


Şekil 4.35 Modellenen kolonun yerdeğiştirmesinin vektörel gösterimi

Doğrusal olmayan çözümlemelerde, sonlu elemanlar modeline etki eden toplam yük, yük adımı denilen küçük parçalara bölünmektedir. Doğrusal olmayan davranış nedeniyle, her yük adımından sonra her elemanda rijitlik değişimleri olmaktadır. Bu değişimlerin çözüme yansıtılması için, her yük adımından sonra rijitlik matrisi güncellenmektedir. Bu noktadan hareketle, daha doğru çözüm sonuçları elde etmek için yük adımlarının da gerçeğe yakın tayin edilmesi gerekmektedir. ANSYS'de yük adımlarının kontrolü için farklı yöntemler mevcuttur. Toplam yatay yük, kullanıcı tarafından yukarıda bahsedilen davranış esaslarına göre yük adımlarına ayrıldıktan sonra, bu adımların kaç parçaya bölüneceği ANSYS tarafından tayin edilebilmektedir. Yani ANSYS'in otomatik zaman adımlama (Automatic time stepping) özelliği sayesinde, yük artımları daha düşük verilerek yakınsama sağlanmaktadır. Ancak bunun için, programın uygulayacağı ilk alt adım sayısının ve ANSYS'in seçeceği alt adım sayısının minimum-maksimum değerlerinin kullanıcı tarafından sağlanması gerekmektedir. Herhangi bir sebepten dolayı yakınsama olmaması durumunda yük

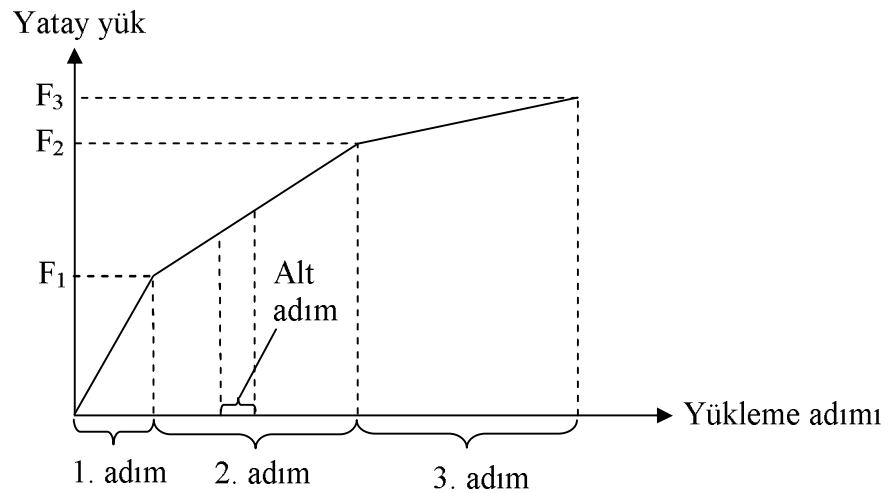
alt adım, belirlenen maksimum alt adım sayısı değerine kadar azaltılmaktadır. Yakınsamanın çabuk elde edildiği durumlarda ise alt adım sayısının minimum değeri kullanılmaktadır (Doğan, 2008).

Sonlu eleman çözümlenmesi yapılan tüm kolonlarda yük uygulama adımları uygulanışında; öncelikle deney verilerine bakılarak kolon elemanına sadece aksel yük uygulanmış ve sistem alt adım sayıları 1 alınarak modelin çözümü yapılmıştır (Şekil 4.36). Daha sonra “solution” menüsünden çıkmadan, sisteme yatay yükte uygulanarak çözüm sonuçlanmıştır.



Şekil 4.36 Sonlu eleman modeli çözüm adımları

Şekil 4.37’de görüldüğü gibi yatay yük 3 adımda modele uygulanmıştır. 1. adımda beton doğrusal davranış göstereceği için, daha az yükleme alt adımına ihtiyaç varken, çatlaklar oluşuktan ve doğrusal olmayan davranış başladıktan sonra yük adımlarının küçültülmesi gerekmektedir. Nitekim, yatay yükün uygulanmasında bu durum göz önüne alınmış ve yükleme adımları attıkça, alt adım sayıları da artırılarak model çözüme ulaştırılmıştır.



Şekil 4.37 Yatay yük yükleme adımları

## 5. DEPREM YÖNETMELİĞİ BETONARME ELEMAN HASAR SINIRLARI İLE SONLU ELEMAN ÇÖZÜMLEMELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

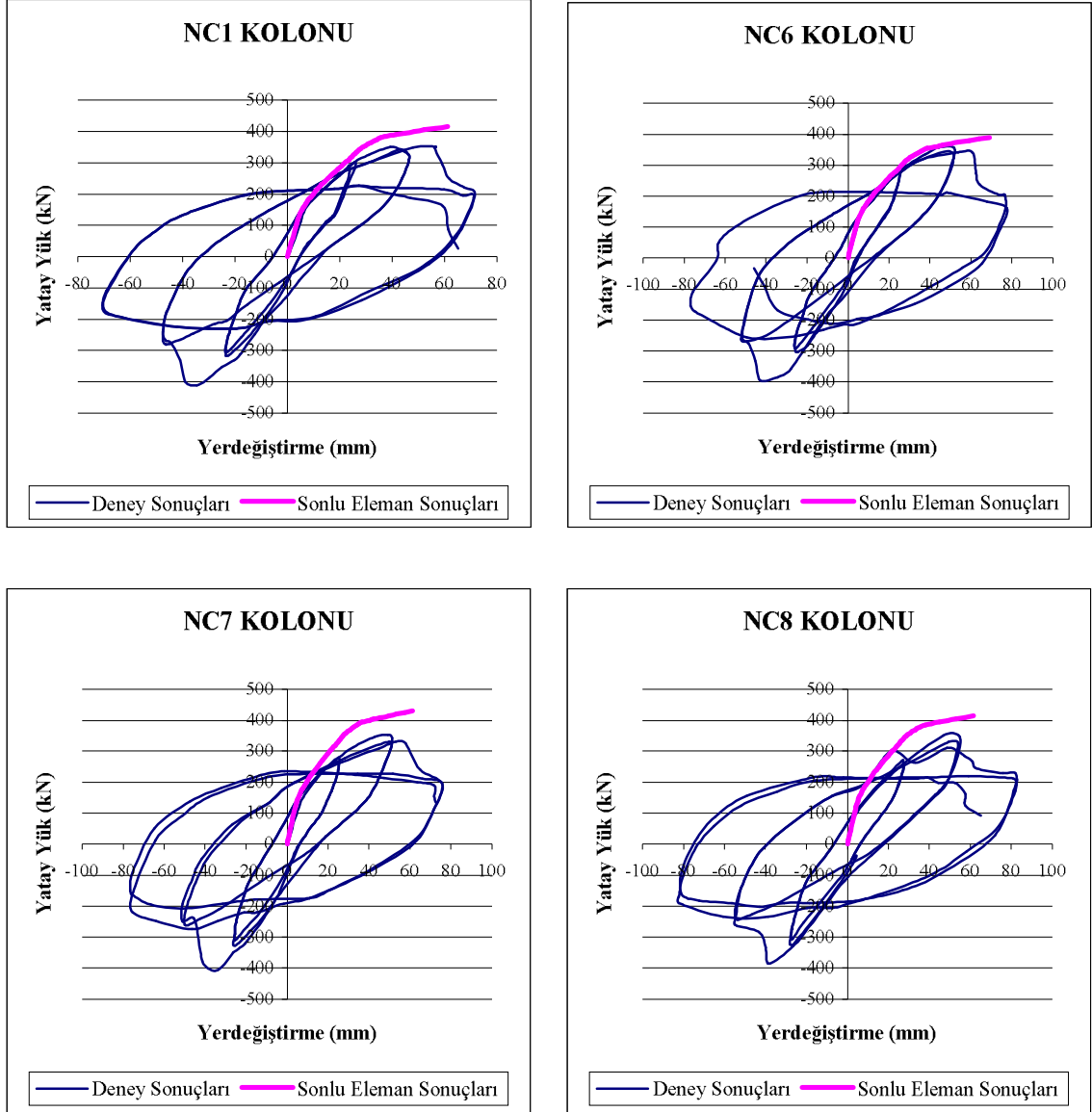
Bu bölümde; literatürde kabul görmüş yayınlardan sonlu eleman çözümleme için yeterli deneysel data'lara sahip betonarme kolonların çözümlenmeleri yapıldı ve sonlu eleman çözümlenmeleri deney sonuçları ile karşılaştırıldı. Betonun doğrusal olmayan davranışına ait matematiksel modellerin oluşturulabilmesi için, beton ve donatı çeliği davranışları iyi bilinmelidir. Bu çalışmada yapılan sonlu eleman uygulamalarında, beton ve çelik arasında tam aderansın olduğu varsayılmıştır. Belirli yükler altında betonarme kolonların, ANSYS programı ile doğrusal olmayan sonlu eleman çözümlenmeleri yapılmıştır. Çözümlenmelerde, beton için Drucker - Prager akma kriteri tanımlanmış ve donatı elasto - plastik bir eğri ile idealize edilmiş, donatının akma noktasındaki şekil değiştirmeler de göz önüne alınarak kullanılmıştır. Drucker - Prager malzeme modelinin Von - Mises kriterinin genelleştirilmiş şekli olduğu söylenebilir. Drucker - Prager akma kriteri, Von - Mises kriterindeki hidrostatik gerilme etkisini ek bir terim olarak dikkate alır (Arslan ve Polat, 2004).

### 5.1 Sonlu Eleman Çözümlenmeleri ile Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bölüm 3 ve Bölüm 4'te tanımlanan malzeme modelleri ile yapılan sonlu eleman çözümlenmelerinden ve deneysel (Lin ve Lin, 2005) yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 5.1'de verilmiştir. Çözümlenmelerde, tek yönlü artan yüke maruz elemanın yatay yük-yerdeğiştirme eğrisinin tersinir yüke maruz elemanın yük-yerdeğiştirme zarf eğrisini temsil ettiği kabul edilmiştir. Tersinir yüklemeye maruz kolonda, yatay yükten oluşan eğilme momenti etkisiyle çekmeye maruz bölümü yükün yön değiştirmesi ile basınca maruz kalmaktadır. Yükün bu yön değiştirmesi esnasında kesit dayanımındaki azalma göz önünde tutulduğunda, tek yönlü artan yüke maruz elemanların yük-yerdeğiştirme eğrisinin tersinir yüke maruz elemanların yük-yerdeğiştirme eğrisininin üzerinde çıkması beklenmelidir. Deneysel yük-yerdeğiştirme eğrileri bilinen kolonların sonlu eleman çözümlenmelerinin deney sonuçları ile oldukça tutarlı olduğu söylenebilir (Şekil 5.1).

NC7 ve NC8 kolonları deneysel yük yer değiştirme eğrilerinin pozitif ve negatif bölümlerindeki yatay yük-yerdeğiştirme arasında önemli derece farklı olduğu söylenebilir, Şekil 5.1'de sonlu eleman çözümlenmelerinde bulunan sonuçların negatif yatay yük-yerdeğiştirme eğrilerini daha doğru tahmin ettiği söylenebilir.

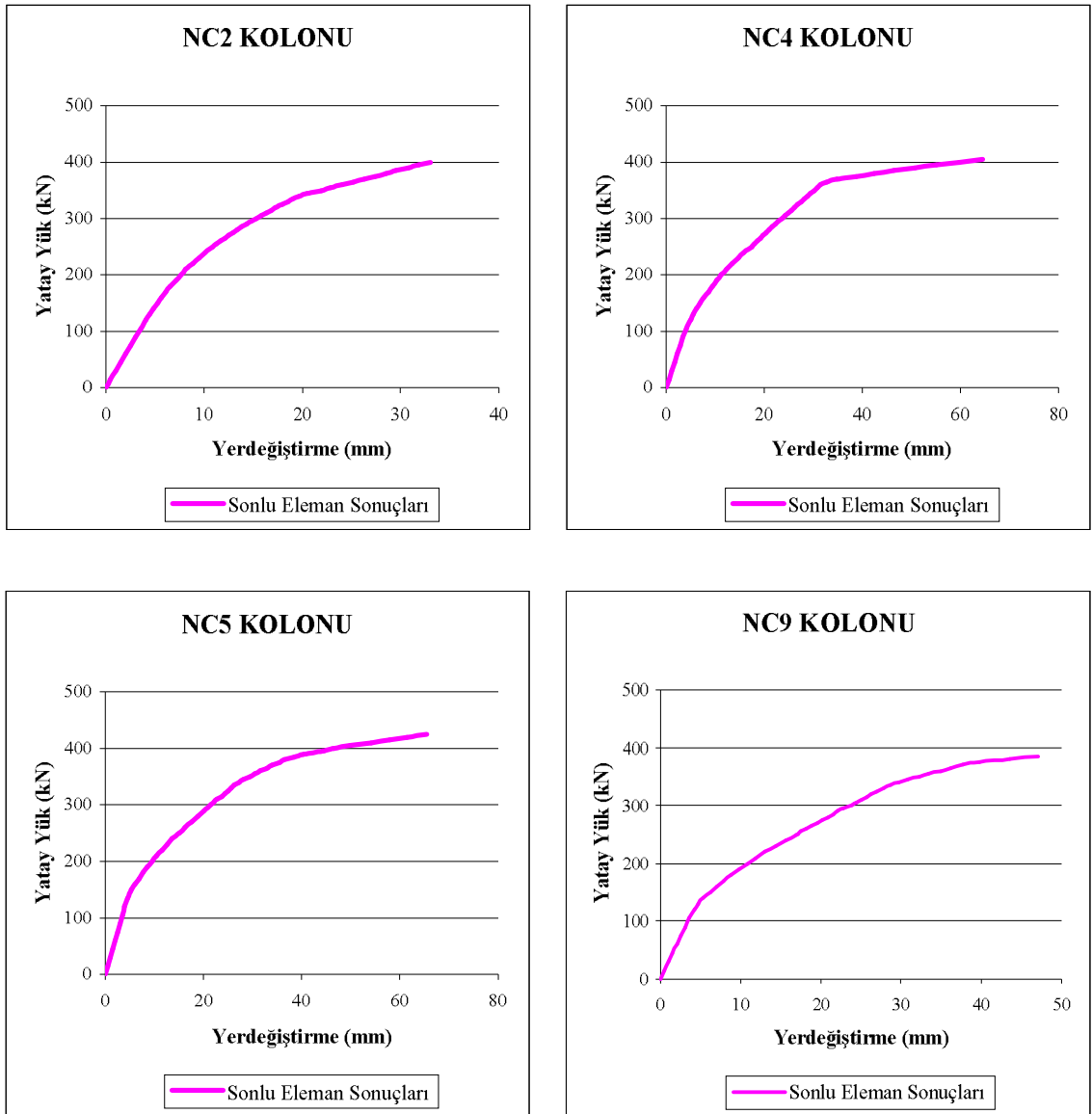
“Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY, 2007)”’de doğrusal elastik yöntemle yapılan hesap sonuçlarına göre hasar sınırlarını tanımlayan görelî kat ötelemesi oranları tanımlanmıştır. Bu açıdan, yer değiştirmelerin deneysel sonuçlarla uyumlu olması, çözümlmeden bulunan görelî kat ötelemesi oranlarına göre kesit birim Şekil değiştirmelerinin karşılaştırılabileceği sonucu varılmıştır.



Şekil 5.1 NC1, NC6, NC7 ve NC8 kolonları yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri

Sonlu eleman çözümlmelerinde yatay yük, yük artımları verilerek uygulanmıştır, bir başka ifade ile yük kontrollü çözümlme yapılmıştır. Fakat, deney yerdeğiştirme kontrollü yapılmıştır. Bu nedenle; deneydeki maksimum yük sonrası yük-yerdeğiştirme eğrisi, istenilen ölçüde yakalanamamıştır.

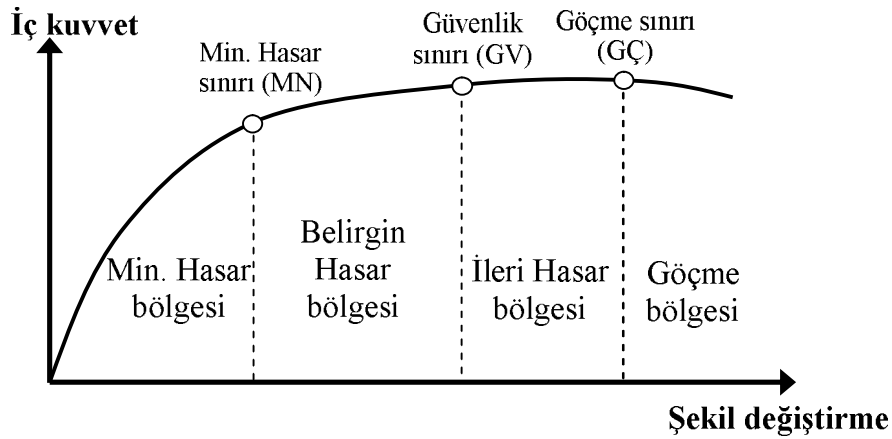
Lin ve Lin (2005) tarafından yapılan çalışmada, NC2, NC4, NC5 ve NC9 kolonlarının göçme anındaki yük ve yerdeğiştirme değerleri verilmiş; fakat yük-yerdeğiştirme eğrileri verilmemiştir. Bu nedenle, sonlu eleman çözümlerinden bulunan yük-yerdeğiştirme eğrileri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmamıştır (Şekil 5.2). NC2, NC4, NC5 ve NC9 kolonlarında enine donatı çap ve aralığı sabit ( $\text{Ø}10/100$ ), beton mukavemeti ve enine donatı akma mukavemeti değişken alınmıştır. NC4, NC5 ve NC9 kolonlarında uygulanan aksenal yük düzeyi, aksenal basınç yükü kapasitesinin 0.2 katı, NC4 kolonunda ise 0.4 katıdır.



Şekil 5.2 NC2, NC4, NC5 ve NC9 kolonları yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri

## 5.2 Deprem Yönetmeliği Performans Sınır Değerleri

DBYBHY (2007)'ye göre sünek elemanlar için kesit düzeyinde üç sınır durum tanımlanmıştır. Bunlar *Minimum Hasar Sınırı* (MN), *Güvenlik Sınırı* (GV) ve *Göçme Sınırı* (GÇ)'dir. Minimum hasar sınırı ilgili kesitte elastik ötesi davranışın başlangıcını, güvenlik sınırı kesitin dayanımını güvenli olarak sağlayabileceği elastik ötesi davranışın sınırını, göçme sınırı ise kesitin göçme öncesi davranışının sınırını tanımlamaktadır. Gevrek olarak hasar gören elemanlarda bu sınıflandırma geçerli olmadığı belirtilmiştir.



Şekil 5.3 Kesit hasar bölgeleri (DBYBHY, 2007)

Kritik kesitlerinin hasarı MN'ye ulaşmayan elemanlar *Minimum Hasar Bölgesi*'nde, MN ile GV arasında kalan elemanlar *Belirgin Hasar Bölgesi*'nde, GV ve GÇ arasında kalan elemanlar *İleri Hasar Bölgesi*'nde, GÇ'yi aşan elemanlar ise *Göçme Bölgesi*'nde yer alırlar (Şekil 5.3).

Çizelge 5.1'de gösterildiği üzere binanın herhangi bir katındaki herhangi bir katındaki kolon veya perdelerin göreceli kat ötelemeleri, her bir hasar sınırı için verilen değeri aşmayacaktır (DBYBHY, 2007).

Çizelge 5.1 Göreceli kat ötelemesi sınırları

Göreceli Kat Ötelemesi Oranı	Hasar Sınırı		
	MN	GV	GÇ
$\delta_j / h_j$	0.01	0.03	0.04

DBYBHY (2007)'ye göre elastik ötesi şekil değiştirmelerin meydana geldiği betonarme sünek taşıyıcı sistem elemanlarında, çeşitli kesit hasar sınırlarına göre izin verilen şekil değiştirme üst sınırları (kapasiteleri) aşağıda tanımlanmıştır:

- Kesit *Minimum Hasar Sınırı (MN)* için kesitin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirmesi ile donatı çeliği birim şekil değiştirmesi üst sınırları:

$$(\varepsilon_{cu})_{MN} = 0.0035 \quad ; \quad (\varepsilon_s)_{MN} = 0.010 \quad (5.1)$$

- Kesit *Güvenlik Sınırı (GV)* için enine donatı içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirmesi ile donatı çeliği birim şekil değiştirmesi üst sınırları:

$$(\varepsilon_{cg})_{GV} = 0.0035 + 0.01(\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.0135 \quad ; \quad (\varepsilon_s)_{GV} = 0.040 \quad (5.2)$$

- Kesit *Göçme Sınırı (GÇ)* için enine donatı içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirmesi ile donatı çeliği birim şekil değiştirmesi üst sınırları:

$$(\varepsilon_{cg})_{GÇ} = 0.004 + 0.014(\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.018 \quad ; \quad (\varepsilon_s)_{GÇ} = 0.060 \quad (5.3)$$

### 5.3 Deprem Yönetmeliği Performans Sınır Değerleri ile Sonlu Eleman Çözümleme Sonuçlarının Değerlendirilmesi

DBYBHY (2007)'de, yeni yapılacak binaların depreme dayanıklı tasarımının ana ilkesi; hafif şiddetteki depremlerde binalardaki yapısal ve yapısal olmayan sistem elemanlarının herhangi bir hasar görmemesi, orta şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda oluşabilecek hasarın sınırlı ve onarılabilir düzeyde kalması, şiddetli depremlerde ise can güvenliğinin sağlanması amacı ile kalıcı yapısal hasar oluşumunun sınırlandırılmasıdır. Deprem Bölgelerinde bulunan mevcut ve güçlendirilecek tüm binaların ve bina türü yapıların deprem etkileri altındaki performanslarının “Doğrusal Elastik Hesap Yöntemleri ile Belirlenmesi”nde, etki / kapasite oranları, görelî kat ötelemesine göre hasar sınırları tanımlanmıştır. “Depremde Bina Performansının Doğrusal Elastik Olmayan Yöntemler ile Belirlenmesinde” betonarme sünek taşıyıcı sistem elemanların için çeşitli kesit hasar sınırları tanımlanmıştır. Bu çalışmada, sonlu eleman çözümlerden bulunan sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

#### 5.3.1 Minimum Hasar Sınırı (MN)

Sonlu eleman çözümlemesi yapılan kolonlar için DBYBHY (2007)'de tanımlanan kesit hasar sınır değerleri için, kesit en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirmesi ( $\varepsilon_{cu}$ ) ve donatı çeliği birim şekil değiştirmesi ( $\varepsilon_s$ ) değerleri Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 Kolonların kesit birim şekil değiştirmeleri (MN)

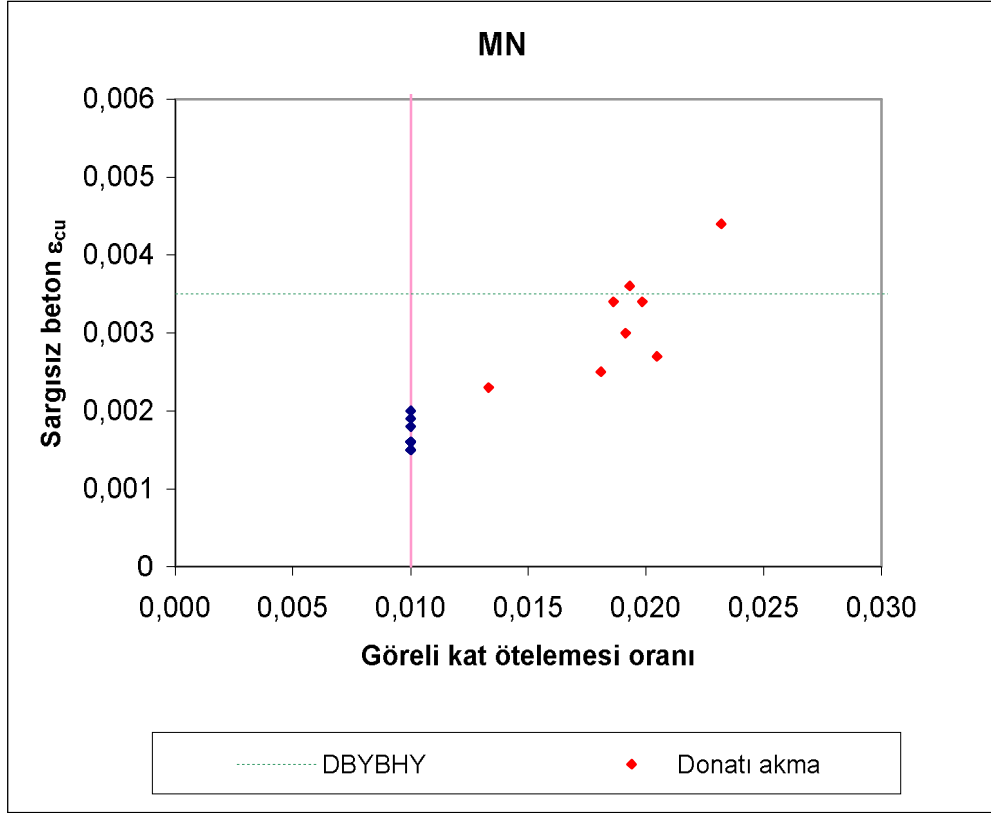
Kolon no:	Kesit minimum hasar sınırı (MN)	
	$\epsilon_{cu}$	$\epsilon_s$
NC1	0,0035	0,01
NC2	0,0035	0,01
NC4	0,0035	0,01
NC5	0,0035	0,01
NC6	0,0035	0,01
NC7	0,0035	0,01
NC8	0,0035	0,01
NC9	0,0035	0,01

Kolonların sonlu eleman çözümlerinden bulunan sonuçlar Çizelge 5.3'te gösterilmiştir. Çizelge 5.3'teki yerdeğiştirme değerleri yatay yükün uygulandığı noktadan okunmuştur. değerlerdir. Yerdeğiştirme değerleri, yatay yükün uygulandığı noktadan okunmuştur. Yatay yükün uygulandığı bölgedeki yerdeğiştirmenin yük ile mesnet arasındaki uzaklığa oranı görece kat ötelemesi ( $\delta_{ji} / h_{ji}$ ) olarak tanımlanmaktadır. DBYBHY (2007)'de minimum hasar sınırı için tanımlanan görece kat ötelemesi oranı 0.01 verilmiştir.

Çizelge 5.3 Kolonların sonlu eleman çözümlerinin sonuçları (MN)

Kolon no.	Yatay yük (kN)	Yerdeğiştirme (mm)	Sargısız Beton ( $\epsilon_c$ )	Boyuna Donatı Uzama ( $\epsilon_s$ )	Boyuna Donatı Kısılma ( $\epsilon_s$ )
NC1	240	10,37	0,0018	0,0013	0,0008
NC2	290	10,47	0,0019	0,0017	0,0003
NC4	230	10,81	0,002	0,0011	0,0009
NC5	250	10,96	0,0016	0,0015	0,0007
NC6	220	10,55	0,0015	0,0013	0,0007
NC7	250	10,74	0,0015	0,0013	0,0008
NC8	240	10,45	0,0016	0,0013	0,0008
NC9	230	10,49	0,0016	0,0014	0,0007

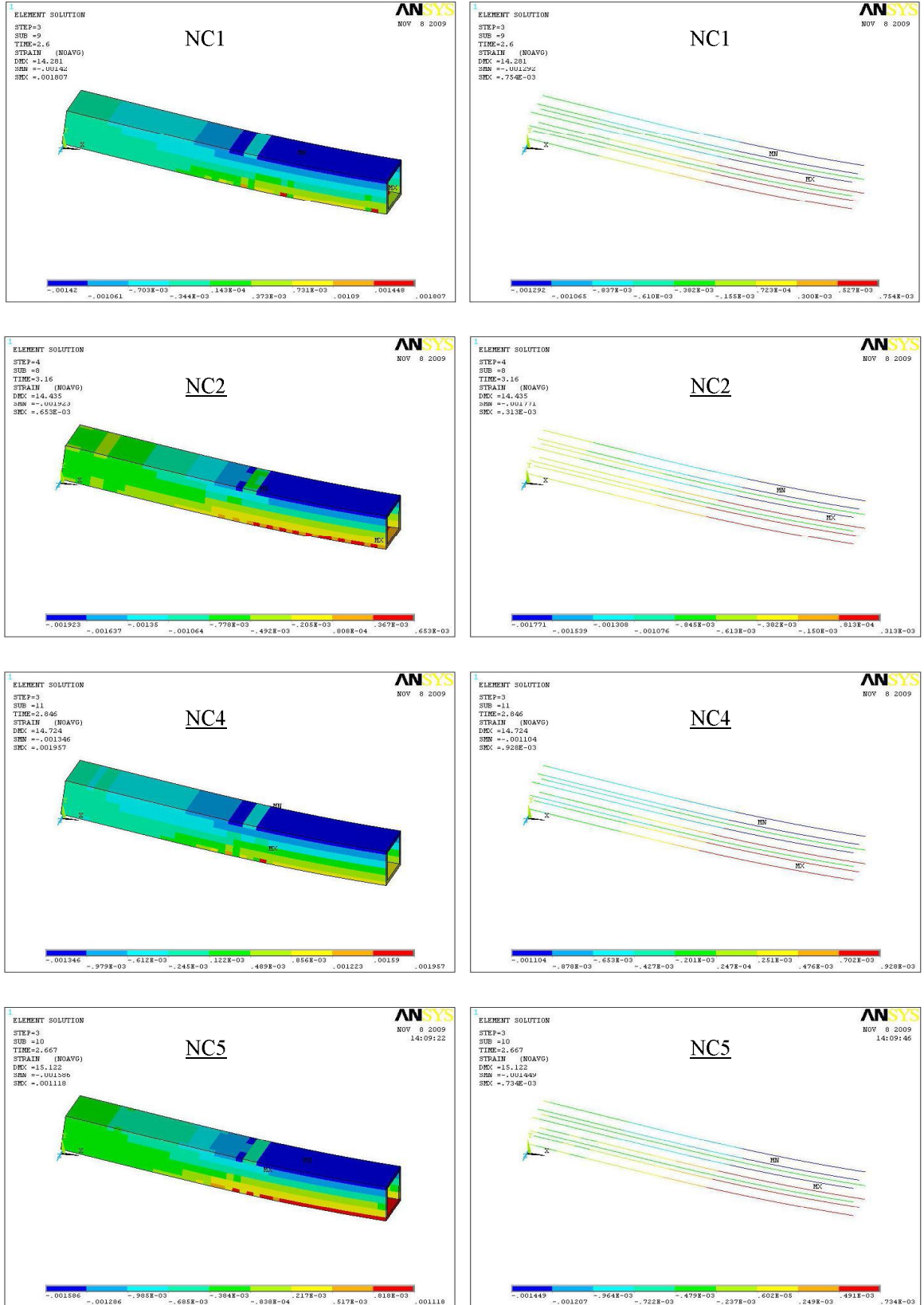
Görelî kat ötelemesi oranı ( $\delta/h$ ) 0.01 değerinde, kesit en dış lifindeki beton basınç birim Şekil değiştirme değeri 0.0015 ~ 0.002 arasında bulunmuştur. Bu değer yönetmelik sınırı ( $\epsilon_{cu}$ ) 0.0035'in oldukça altındadır (Şekil 5.4).



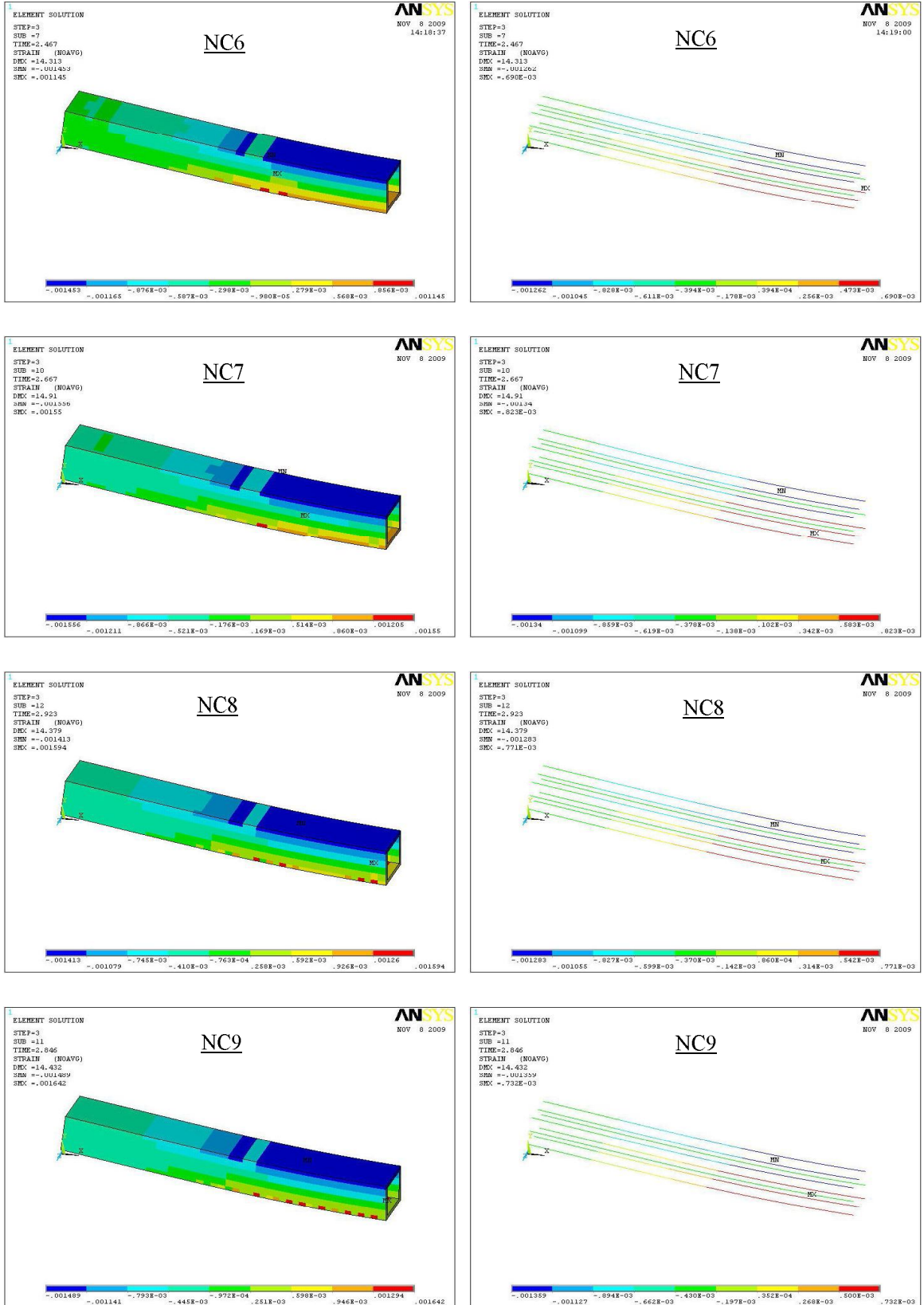
Şekil 5.4 Sargısız beton basınç birim Şekil değiştirme-görelî kat ötelemesi oranı (MN)

Kırçıl (2005) tarafından yapılan çalışmada akma hasar seviyesinin yaklaşık olarak hafif hasar karşılık geldiği düşünölmüştür. Bu tez çalışmasında, donatı aktığı andaki kesit en dış lifindeki beton basınç lifindeki birim Şekil değiştirme değerlerinin DBYBHY (2007)'de tanımlanan beton basınç birim Şekil değiştirme değerine ( $\epsilon_{cu} = 0.0035$ ) daha yakın değerler verdiği söylenebilir.

DBYBHY (2007)'de tanımlanan minimum hasar sınırına karşık gelen  $\epsilon_{cu}$  (kesit en dış lifindeki beton basınç birim Şekil değiştirmesi) ve  $\epsilon_s$  (donatı çeliği birim Şekil değiştirmesi) değerlerinin sonlu eleman özömlemesinden bulunan sonuçlar Şekil 5.5 - 5.6'da verilmiştir.

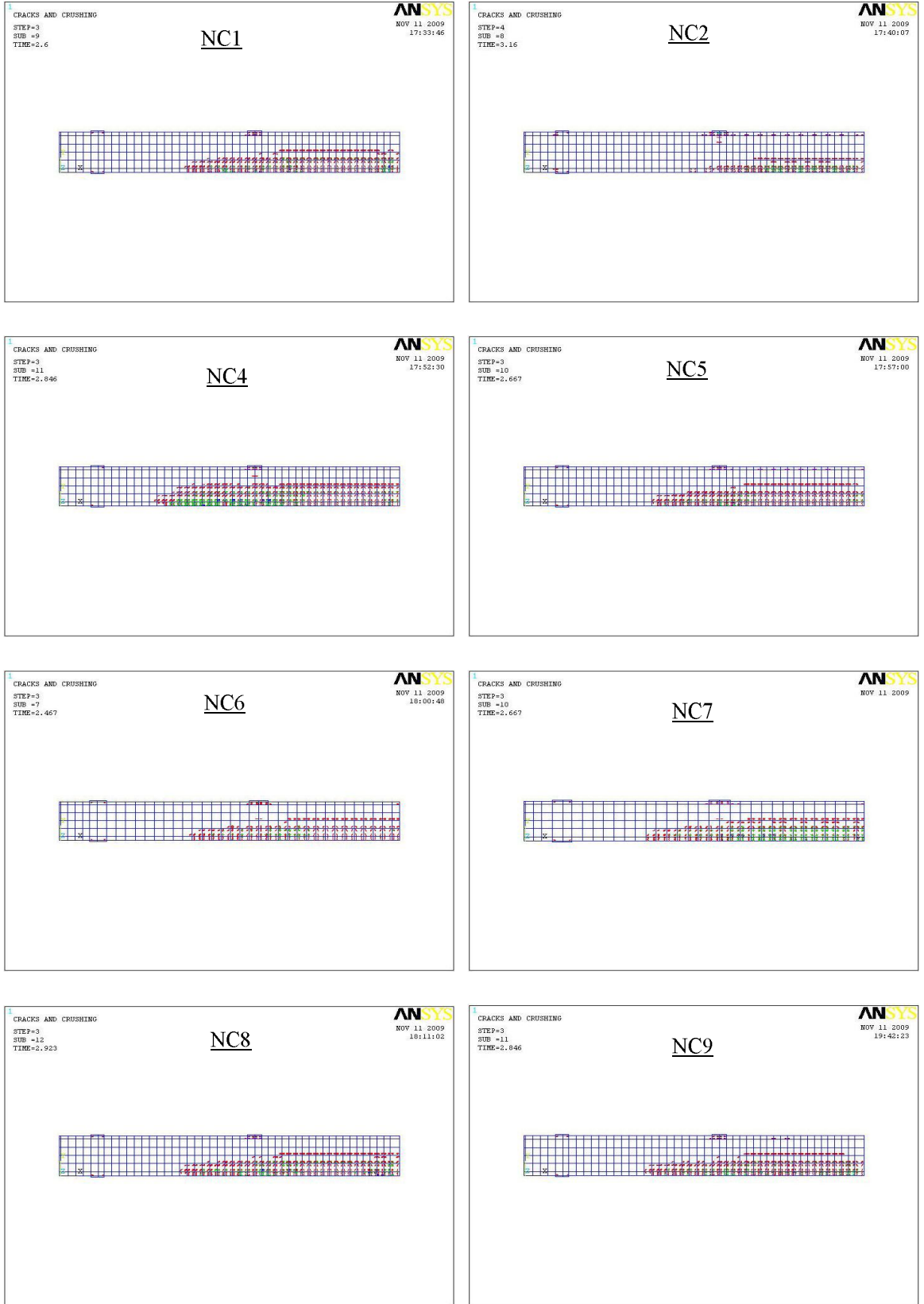


Şekil 5.5 NC1, NC2, NC4 ve NC5 kolonları  $\varepsilon_{cu}$  ve  $\varepsilon_s$  değişimleri (MN)



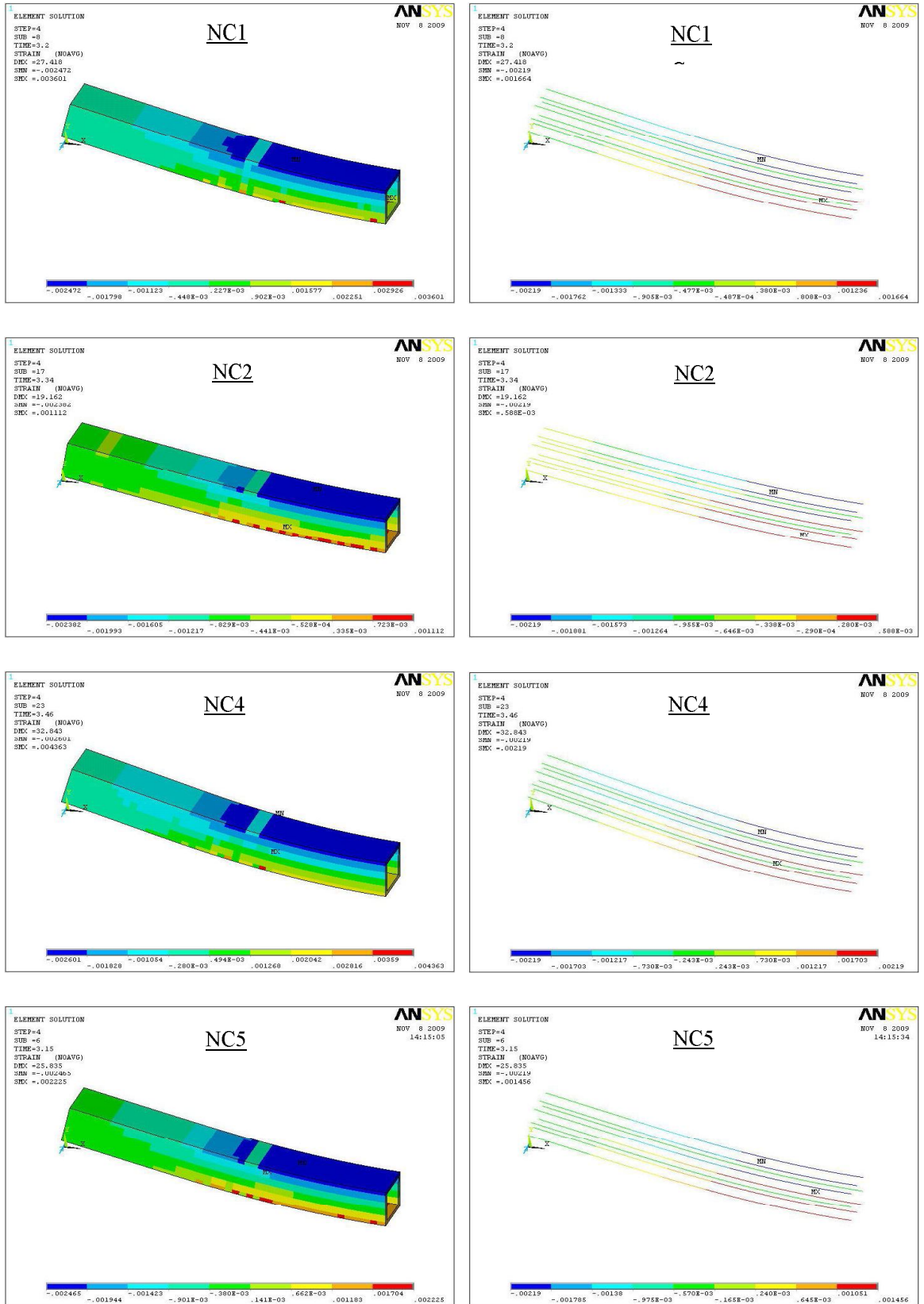
Şekil 5.6 NC6, NC7, NC8 ve NC9 kolonları  $\varepsilon_{cu}$  ve  $\varepsilon_s$  değişimleri (MN)

Minimum hasar sınırında, beton elemanda meydana gelen çatlaklar grafiksel olarak Şekil 5.7’de gösterilmiştir.

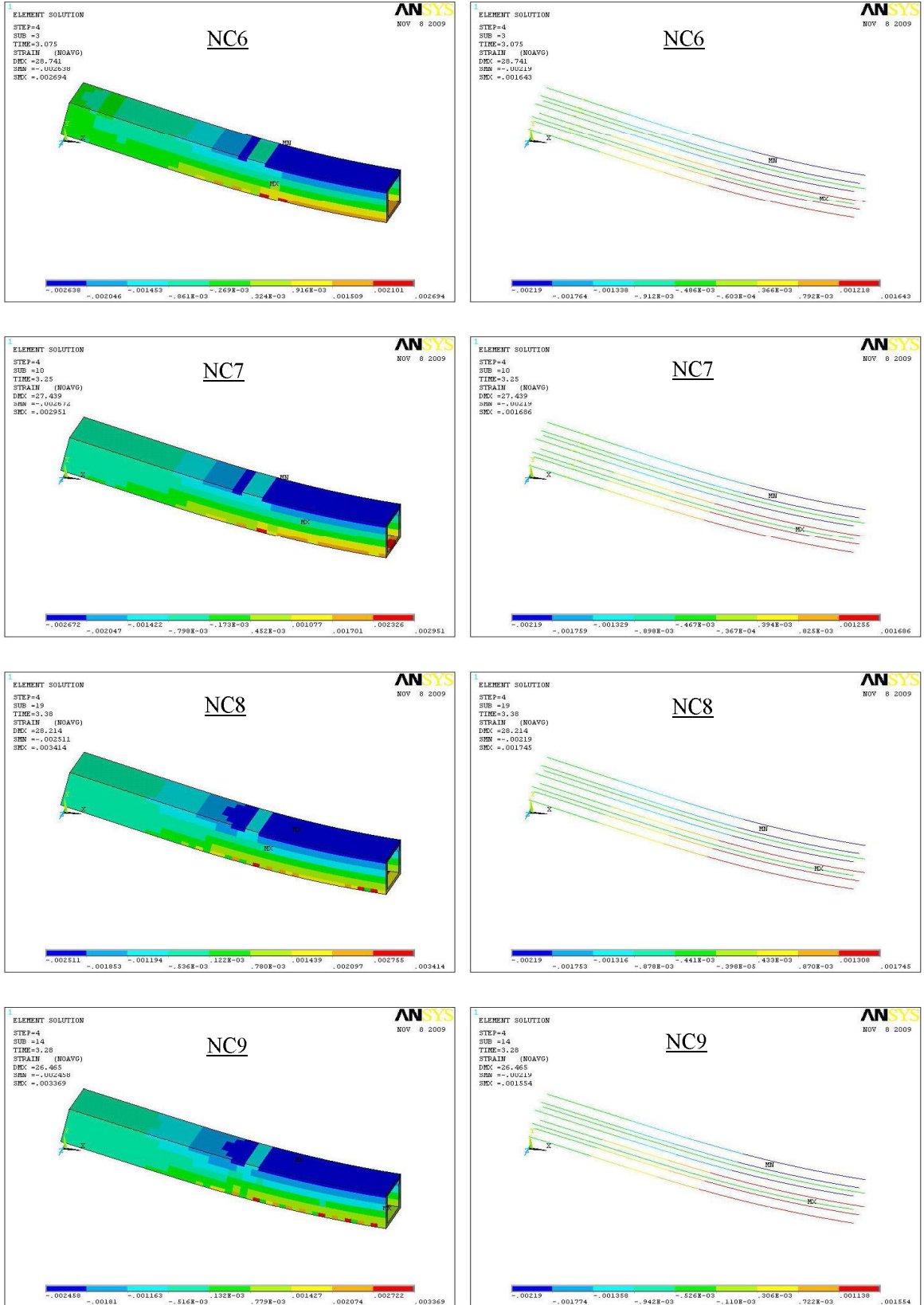


Şekil 5.7 Çözümlemesi yapılan kolonlara ait çatlaklar (MN)

Sonlu eleman çözümlemesinde donatının aktığı andaki  $\varepsilon_{cu}$  ve  $\varepsilon_s$  değerlerinin sonlu eleman sonuçları grafiksel olarak Şekil 5.8-9'da gösterilmiştir.

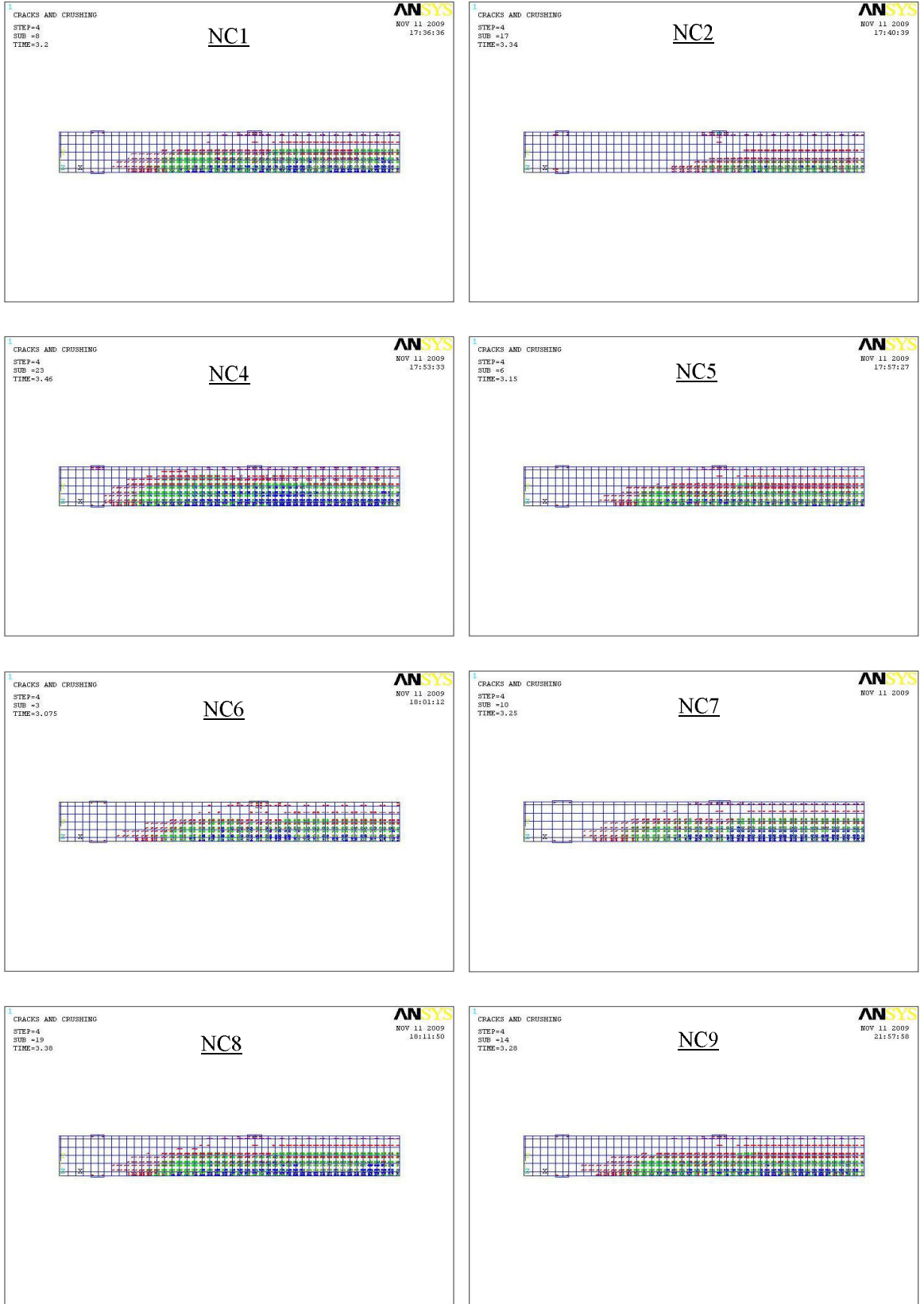


Şekil 5.8 NC1, NC2, NC4 ve NC5 kolonları  $\varepsilon_{cu}$  ve  $\varepsilon_s$  değişimleri (Donatı Akma)



Şekil 5.9 NC6, NC7, NC8 ve NC9 kolonları  $\varepsilon_{cu}$  ve  $\varepsilon_s$  değişimleri (Donatı Akma)

Donatı aktığı anda, beton elemanda meydana gelen çatlaklar grafiksel olarak Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10 Çözümlemesi yapılan kolonlara ait çatlaklar (Donatı akma)

### 5.3.2 Kesit Güvenlik Sınırı (GV)

Sonlu eleman çözümlemesi yapılan kolonlar için DBYBHY (2007)'de tanımlanan kesit hasar sınır değerleri için, enine donatı içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirmesi  $\varepsilon_{cg}$  ve donatı çeliği birim şekil değiştirmesi ( $\varepsilon_s$ ) değerleri Çizelge 5.4'te verilmiştir. DBYBHY (2007)'de açıklandığı gibi,  $\varepsilon_{cg} \leq 0.0135$  değerinin üzerinde çıkan kolonlarda  $\varepsilon_{cg} = 0.0135$ , donatı çeliği birim şekil değiştirmesi de üst sınır değer (0.040) alınmıştır.

Çizelge 5.4 Kolonların kesit birim şekil değiştirmeleri (GV)

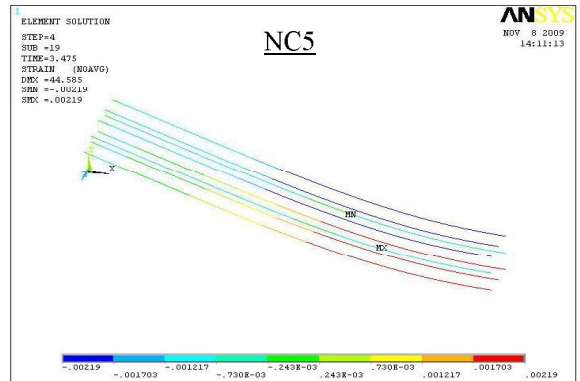
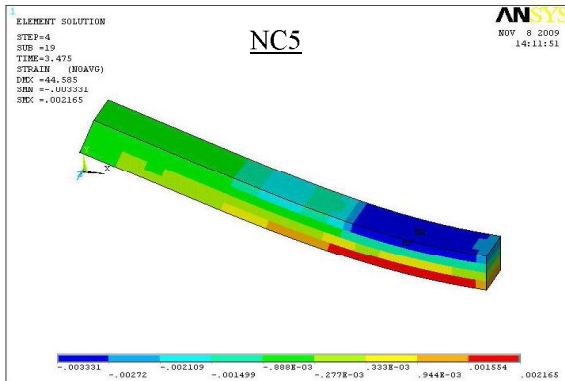
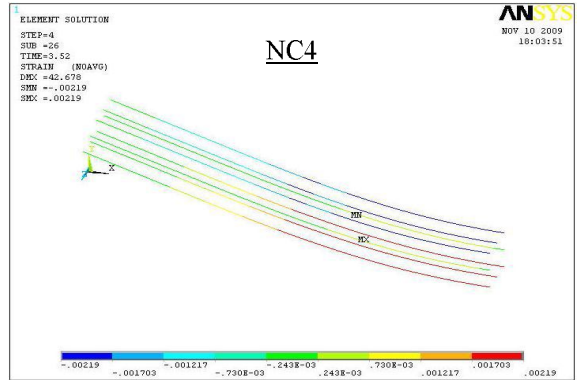
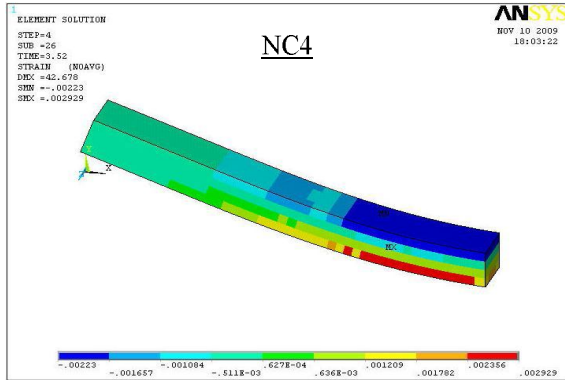
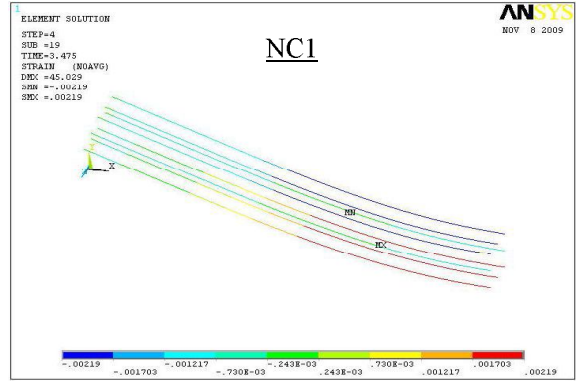
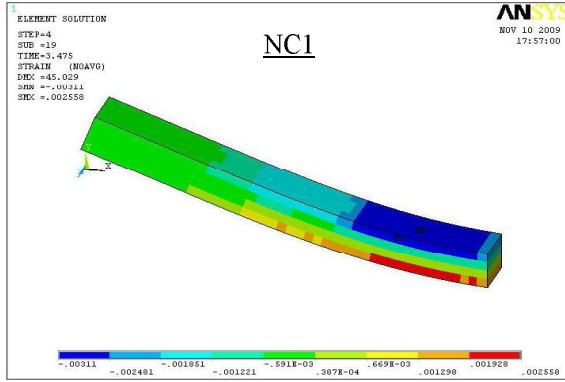
Kolon no:	Kesit güvenlik sınırı (GV)	
	$\varepsilon_{cg} \leq 0.0135$	$\varepsilon_s$
NC1	0,0262	0,04
NC4	0,0392	0,04
NC5	0,0232	0,04
NC6	0,0172	0,04
NC7	0,0480	0,04
NC8	0,0229	0,04
NC9	0,0294	0,04

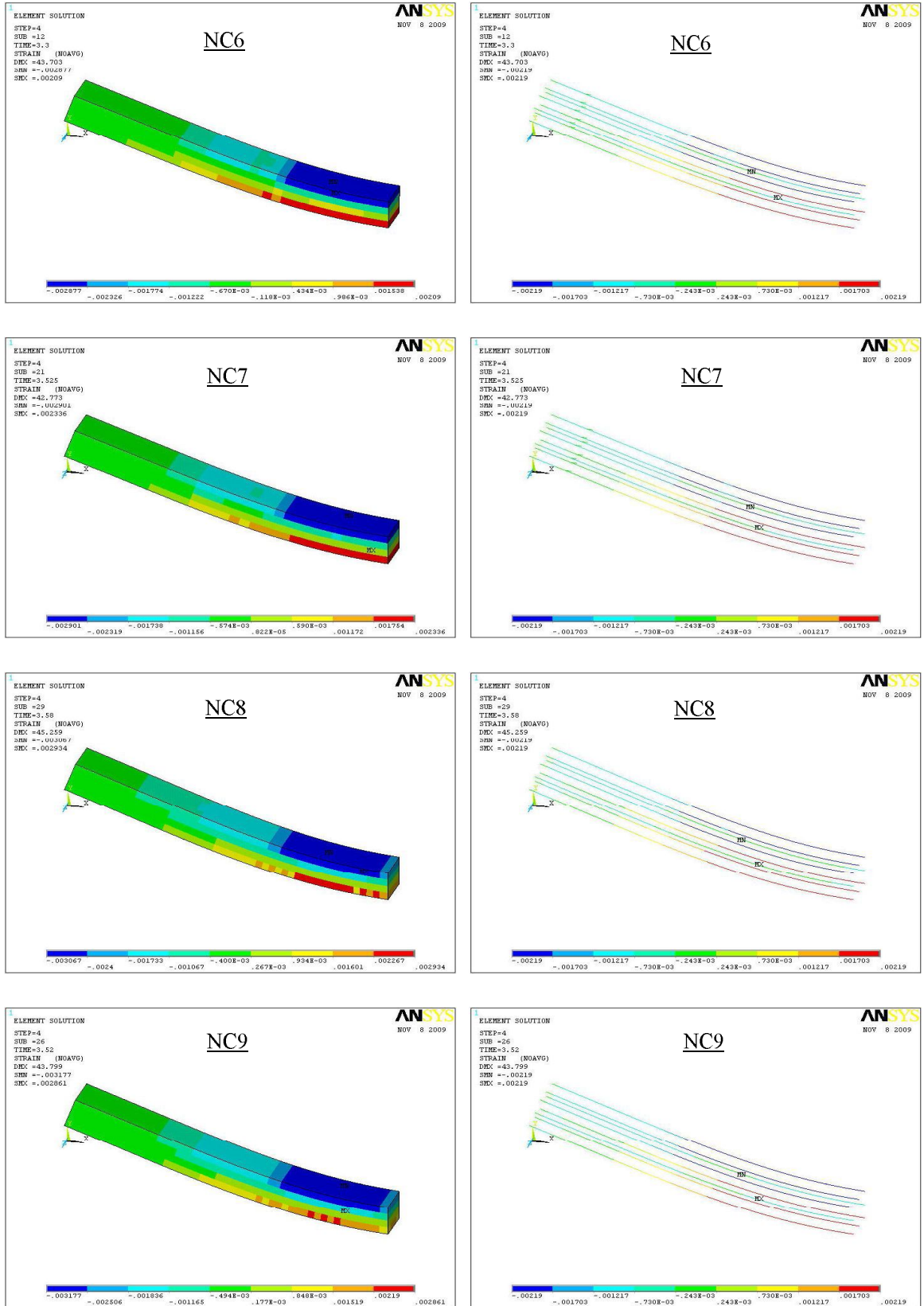
DBYBHY (2007)'de kesit güvenlik sınırı için tanımlanan görel kat öteleme sınırı olan 0.03'e karşılık, sonlu eleman çözümlemelerinden bulunan yük, yerdeğiştirme ve kesit birim şekil değiştirme değerleri Çizelge 5.5'te verilmiştir. Görel kat öteleme oranı ( $\delta/h$ ) 0.03 göz önüne alındığında sonlu eleman çözümlemesinden bulunan beton basınç ve donatı çeliği birim şekil değiştirme değerleri DBYBHY (2007)'ye göre hesaplanan  $\varepsilon_{cg} = 0.00135$ 'in oldukça altında olduğu görülmüştür.

DBYBHY (2007)'de tanımlanan kesit güvenlik sınırına (GV) karşılık gelen  $\varepsilon_{cg}$  (enine donatı içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirmesi) ve  $\varepsilon_s$  değerlerinin sonlu eleman sonuçları grafiksel olarak Şekil 5.11-12'de gösterilmiştir. NC2 kolonunun sonlu eleman çözümünde güvenlik sınırına karşılık gelen yerdeğiştirme oluşmadığı için aşağıdaki şekillerde gösterilememiştir.

Çizelge 5.5 Kolonların sonlu eleman çözümlene sonuçları (GV)

Kolon no:	Yatay yük (kN)	Yerdeğiştirme (mm)	Sargılı Beton ( $\epsilon_{cg}$ )	Boyuna Donatı Uzama ( $\epsilon_s$ )	Boyuna Donatı Kısılma ( $\epsilon_s$ )
NC1	395	32,20	0,0031	0,0022	0,0022
NC4	380	30,72	0,0029	0,0022	0,0022
NC5	395	31,84	0,0033	0,0022	0,0022
NC6	360	31,78	0,0029	0,0022	0,0022
NC7	405	30,41	0,0029	0,0022	0,0022
NC8	395	32,38	0,0031	0,0022	0,0022
NC9	380	31,44	0,0032	0,0022	0,0022



Şekil 5.11 NC1, NC4 ve NC5 kolonları  $\varepsilon_{cg}$  ve  $\varepsilon_s$  değişimleri (GV)Şekil 5.12 NC6, NC7, NC8 ve NC9 kolonları  $\varepsilon_{cg}$  ve  $\varepsilon_s$  değişimleri (GV)

Kesit güvenlik sınırında, beton elemanda meydana gelen çatlaklar grafiksel olarak Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13 Çözümlemesi yapılan kolonlara ait çatlaklar (GV)

### 5.3.3 Kesit Göçme Sınırı (GÇ)

Sonlu eleman çözümlemesi yapılan kolonların enine donatı içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirmesi ( $\epsilon_{cg}$ ) değerleri Çizelge 5.6'da verilmiştir. Ancak DBYBHY (2007)'de tanımlanan etriye içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirmesi üst sınır değeri olan  $\epsilon_{cg} \leq 0.018$  değerinin üzerinde çıkan kolonlarda  $\epsilon_{cg} = 0.018$  değeri dikkate alınmıştır. Donatı çeliği birim şekil değiştirmesinde ( $\epsilon_s$ ) ise DBYBHY (2007)'de tanımlanan üst sınır değeri dikkate alınmıştır.

Çizelge 5.6 Kolonların kesit birim şekil değiştirmeleri (GÇ)

Kolon no:	Kesit göçme sınırı (GÇ)	
	$\epsilon_{cg} \leq 0.018$	$\epsilon_s$
NC1	0,0358	0,06
NC4	0,0540	0,06
NC5	0,0316	0,06
NC6	0,0232	0,06
NC7	0,0663	0,06
NC8	0,0312	0,06
NC9	0,0402	0,06

Çizelge 5.7 Kolonların sonlu eleman çözümleme sonuçları (Kesit Göçme Sınırı)

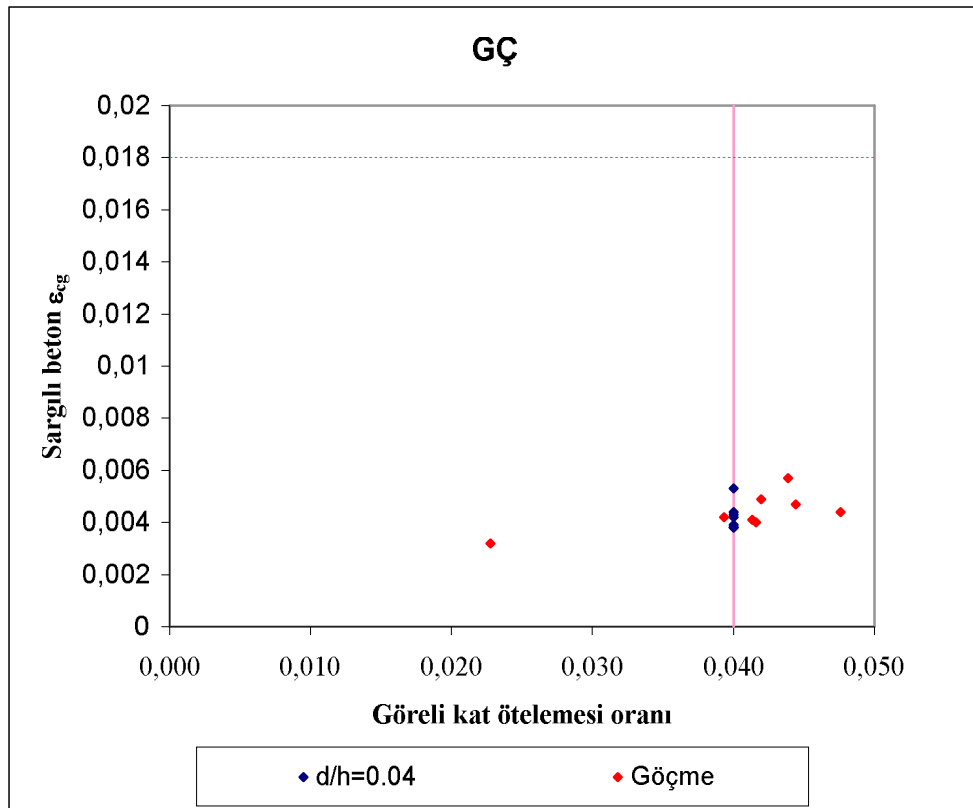
Kolon no:	Yatay yük (kN)	Yerdeğiştirme (mm)	Sargılı Beton ( $\epsilon_{cg}$ )	Boyuna Donatı Uzama ( $\epsilon_s$ )	Boyuna Donatı Kısılma ( $\epsilon_s$ )
NC1	410	40,11	0,0038	0,0022	0,0022
NC4	400	42,36	0,0053	0,0022	0,0022
NC5	415	41,13	0,0043	0,0022	0,0022
NC6	380	42,7	0,0038	0,0022	0,0022
NC7	425	40,48	0,0039	0,0022	0,0022
NC8	410	40,79	0,0044	0,0022	0,0022
NC9	400	40,92	0,0042	0,0022	0,0022

Tüm kolon elemanlarına ait kesit göçme sınırına karşılık gelen sonlu eleman çözümleme sonuçları Çizelge 5.7'de verilmiştir. Çizelgedeki yerdeğiştirme değerleri yatay yükün uygulandığı noktadan ölçülen değerlerdir. Yerdeğiştirme değerinin, yatay yükün uygulandığı

noktadan mesnete olan uzaklığı oranı DBYBHY (2007)'de kesit güvenlik sınırı için tanımlanan görelî kat ötelemesi sınırı olan 0.04'e karşılık, sonlu eleman çözümlerinden bulunan yük, yerdeğiştirme ve kesit birim Şekil değiştirme değerleri Çizelge 5.7'de verilmiştir.

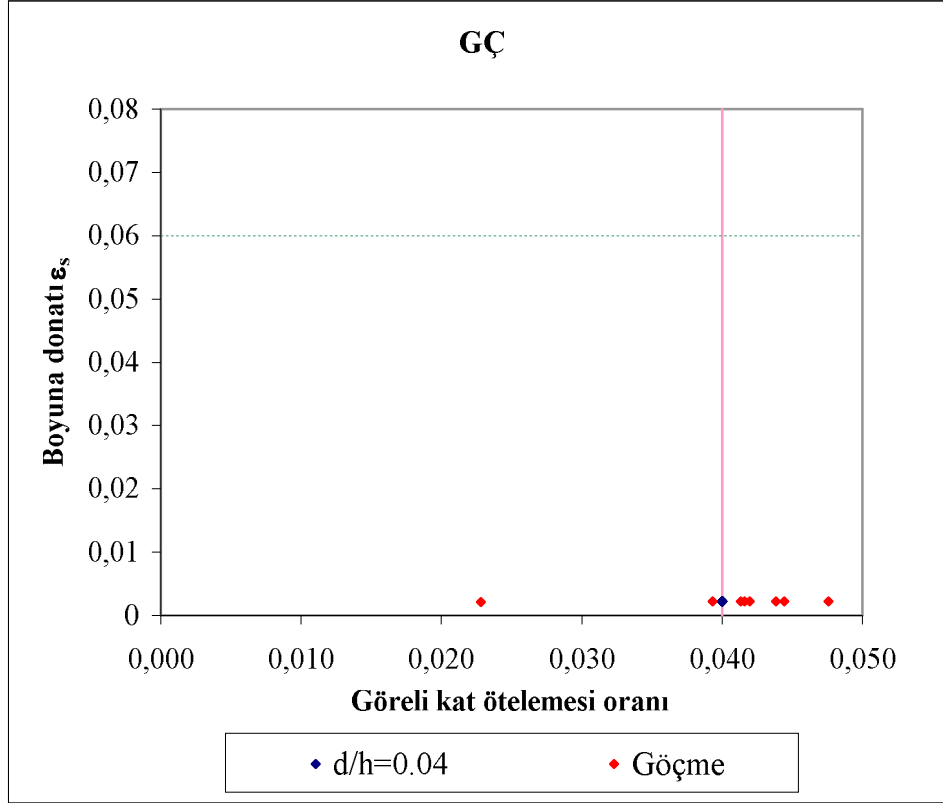
Sonlu eleman çözümlerinde  $\varepsilon_{cg}$  değeri 0.004 ~ 0.006 arasında olduğu görölmüştür. Söz konusu değer yönetmelik sınırı  $(\varepsilon_{cg})_{GC} = 0.004 + 0.014(\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.018$ 'in oldukça altındadır. Sonlu eleman çözümlerinden etriye içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim Şekil değiştirme sınır değerinin azaltılacak Şekilde yenilenmesi gerektiği söylenebilir.

Görelî kat ötelemesi oranı ( $\delta/h$ ) 0.04 göz önüne alındığında sonlu eleman çözümlerinden bulunan beton basınç ve donatı çeliği birim Şekil değiştirme değerleri DBYBHY (2007) sınırlarının altında bulunmuştur. Bununla beraber sonlu eleman modelinin çözüme ulaştığı (Göçme) andaki beton basınç birim Şekil değiştirme değerleri DBYBHY (2007) sınırlarının altında bulunmuştur (Şekil 5.14).



Şekil 5.14  $\varepsilon_{cg}$  - görelî kat ötelemesi oranı (GÇ)

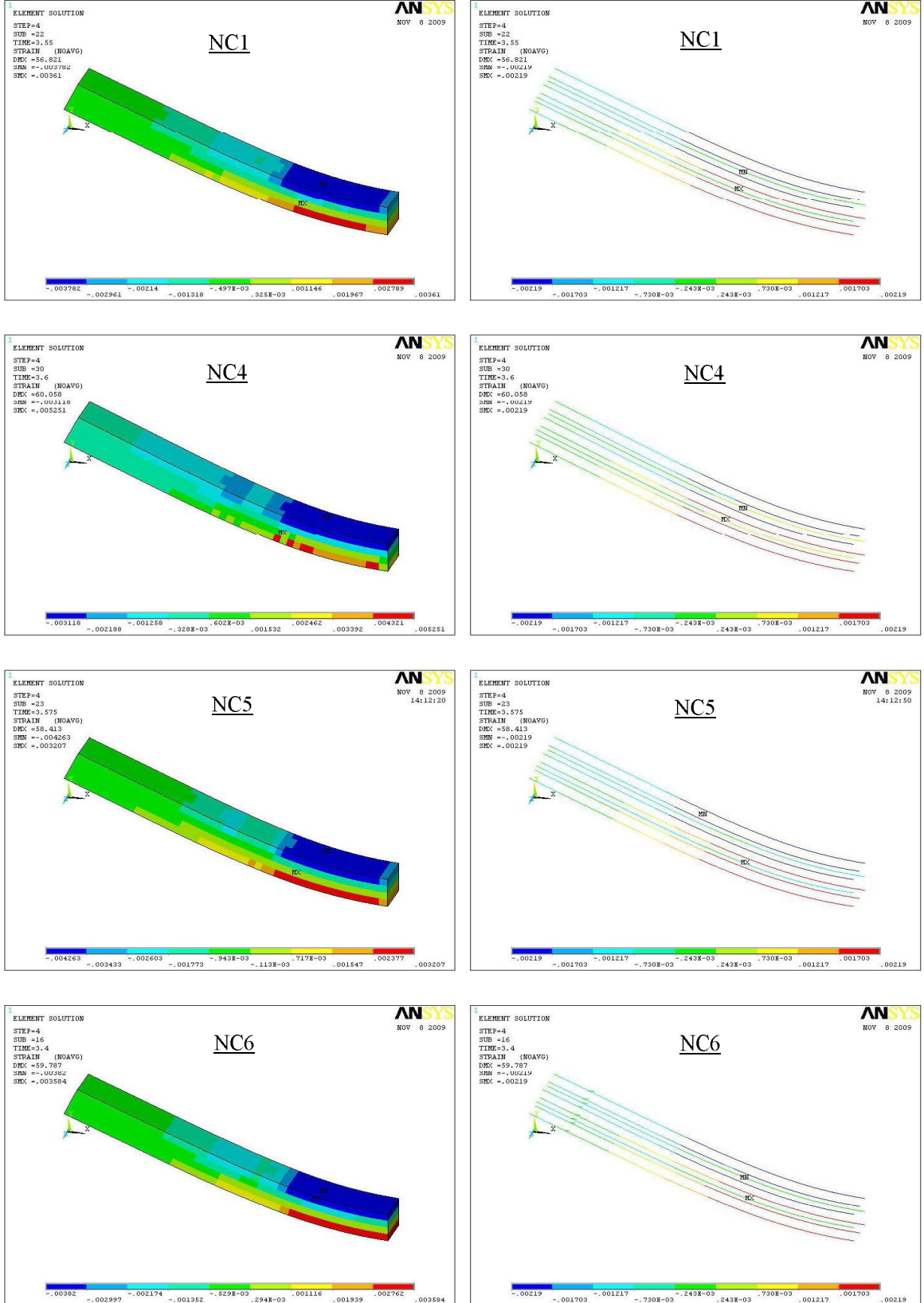
Çözümlemesi yapılan betonarme kolonların DBYBHY (2007)'de donatı çeliği birim şekil değiştirme üst sınırı  $(\varepsilon_s)_{GC} = 0.06$  verilmiştir. Betonarme kolonların sonlu eleman çözümlerinde  $\varepsilon_s$  değeri  $\sim 0.0022$  bulunmuştur. Söz konusu bu değer in yönetmelik sınırının oldukça altında olduğu ifade edilebilir (Şekil 5.15).



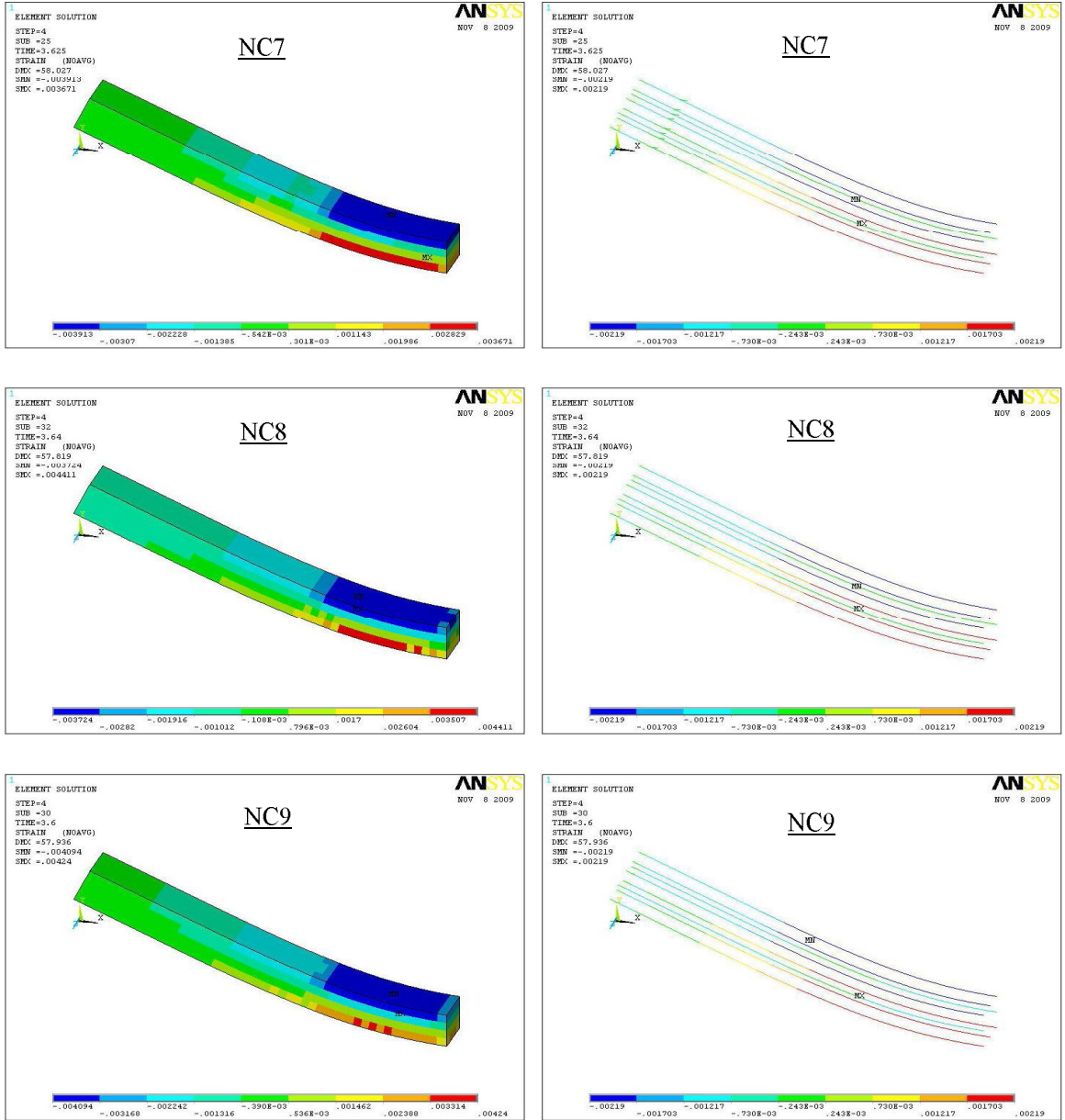
Şekil 5.15  $\varepsilon_s$  - görel kat öteleme oranı (GÇ)

Lin ve Lin (2005) tarafından yapılan deneysel çalışmada, göçme anında boyuna donatı birim şekil değiştirmelerinin 0.00184~0.00288 arasında olduğu, bu değerlerin ortalaması  $\sim 0.00232$  bulunmuştur. Sonlu eleman çözümlerinden bulunan çelik donatı birim şekil değiştirme değerlerin deneysel sonuçlardan bulunan ortalama değerle uyumlu sonuç verdiği söylenebilir.

DBYBHY (2007)'de tanımlanan kesit göçme sınırına (GÇ) karışık gelen  $\varepsilon_{cg}$  ve  $\varepsilon_s$  değerlerinin sonlu eleman sonuçları grafiksel olarak Şekil 5.16-17'de gösterilmiştir.



Şekil 5.16 NC1, NC4, NC5 ve NC6 kolonları  $\epsilon_{cg}$  ve  $\epsilon_s$  değişimleri (GÇ)



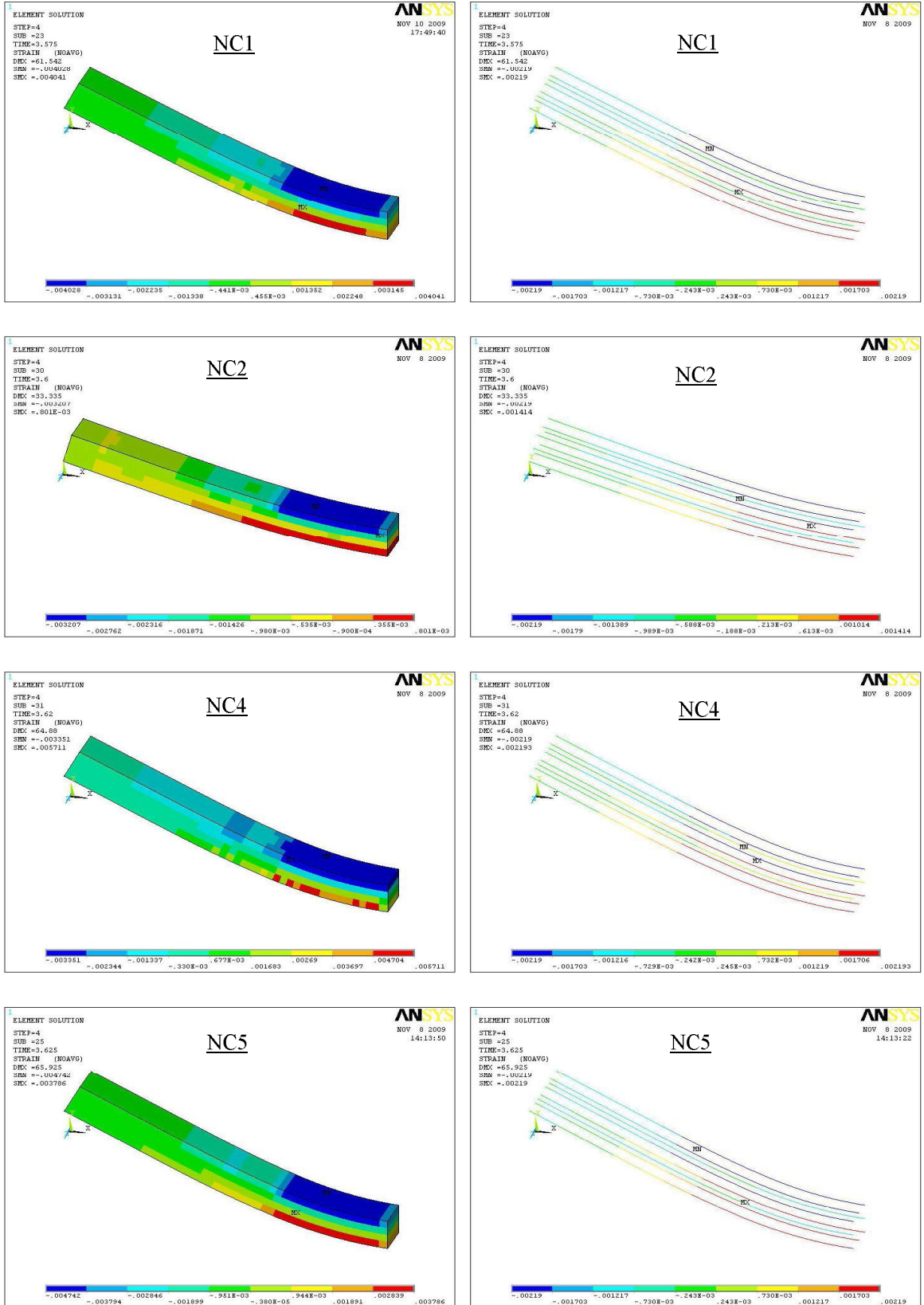
Şekil 5.17 NC7, NC8 ve NC9 kolonları  $\varepsilon_{cg}$  ve  $\varepsilon_s$  değişimleri (GÇ)

Kesit göçme sınırında, beton elemanda meydana gelen çatlaklar grafiksel olarak Şekil 5.18'de gösterilmiştir.

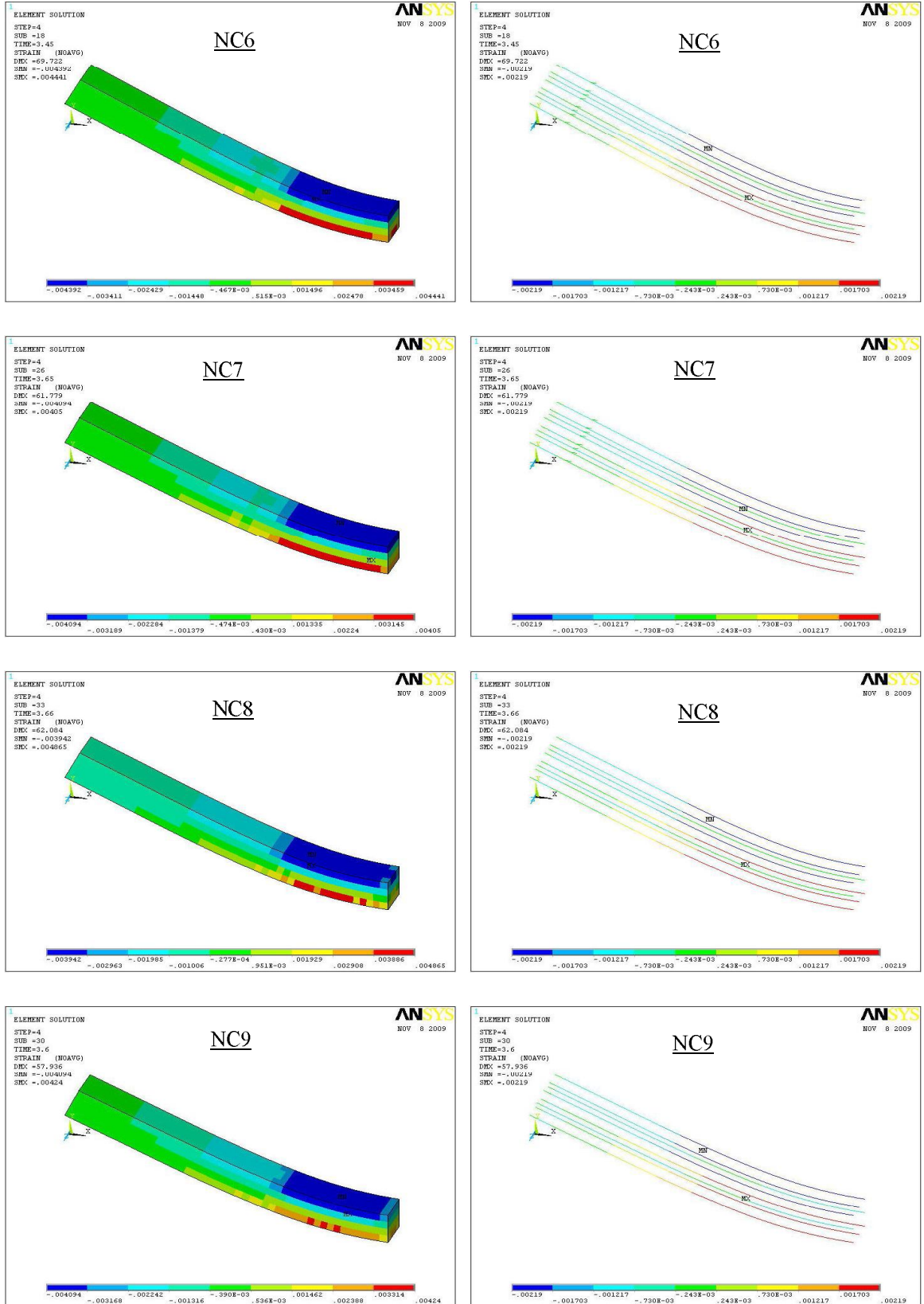


Şekil 5.18 Çözümlemesi yapılan kolonlara ait çatlak grafikleri (GÇ)

Sonlu eleman çözümlerinde çözümün sona erdiği andaki beton kesit birim şekil değiştirmesi ve donatı çeliği birim şekil değiştirmeleri Şekil 5.19 - 20'de gösterilmiştir.

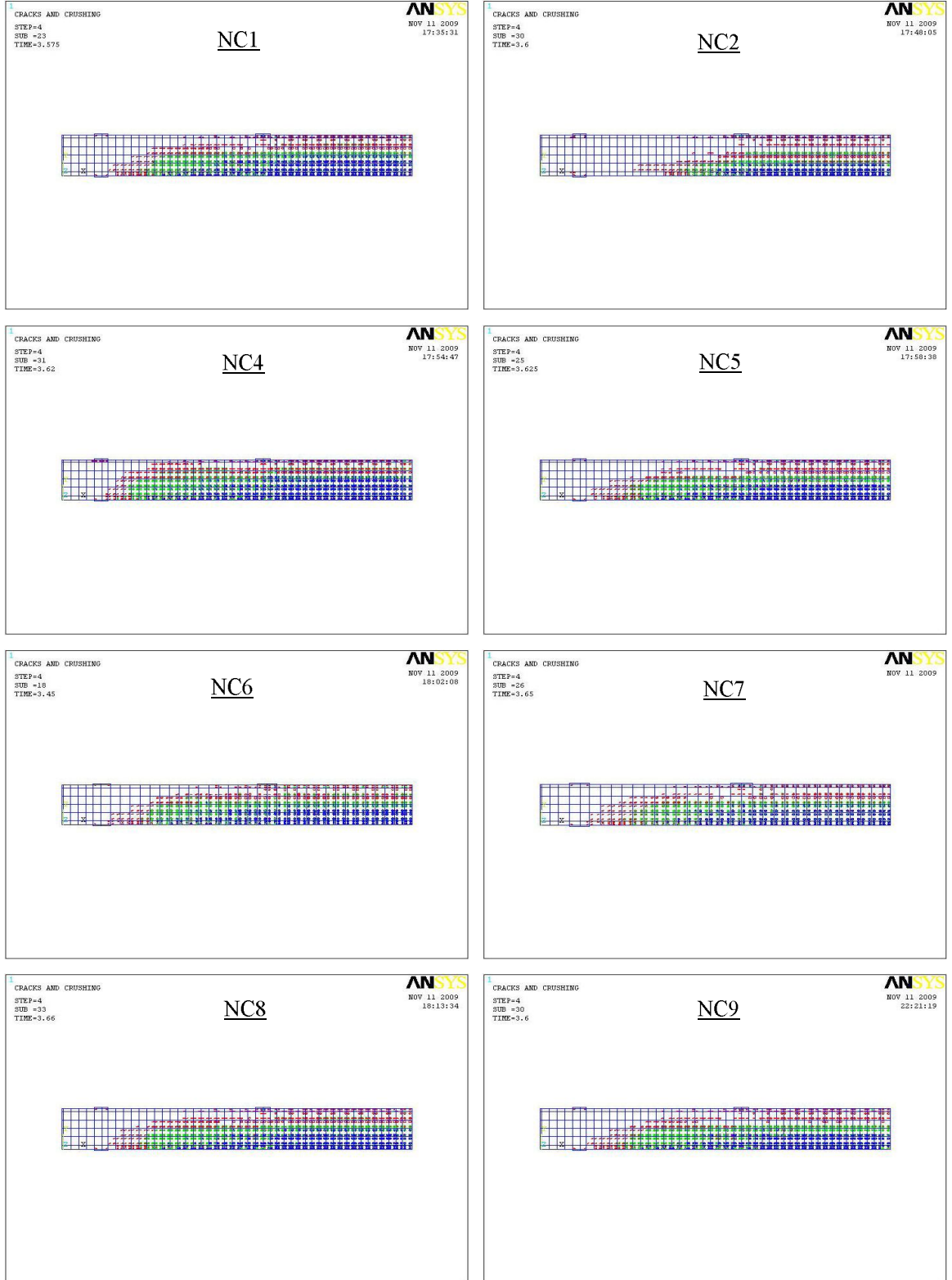


Şekil 5.19 Sonlu eleman çözümlemesinde NC1, NC2, NC4 ve NC5 kolonları göçme anındaki beton basınç ve donatı çeliği birim şekil değiştirmeleri



Şekil 5.20 Sonlu eleman çözümlemesinde NC6, NC7, NC8 ve NC9 kolonları göçme anındaki beton basınç ve donatı çeliği birim şekil değiştirmeleri

Sonlu eleman çözümünün sona erdiği andaki, beton elemanda meydana gelen çatlaklar grafiksel olarak Şekil 5.21’de gösterilmiştir



Şekil 5.21 Çözümlemesi yapılan kolonların göçme anına ait çatlak grafikleri

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada; literatürde kabul görmüş yayınlardan malzeme ve kesit özellikleri ile deneysel yatay yük-yerdeğiştirme grafikleri veya yatay yük, yerdeğiştirme değerleri bilenen betonarme kolonların doğrusal olmayan sonlu eleman çözümlenmeleri yapılmıştır. Çözümlenmelerde; betonarme kolonların deprem performansının doğrusal olmayan sonlu eleman çözümlenmeleri ile incelenmesinde tek yönlü artan yüke maruz elemanın yatay yük-yerdeğiştirme eğrisinin tersinir yüke maruz elemanın yük-yerdeğiştirme zarf eğrisini temsil ettiği kabul edilerek;

- Elemanların yatay yük-yerdeğiştirme değerlerinin deneysel sonuçlarla tutarlı değerler verdiği söylenebilir. Söz konusu değerler göz önüne alınarak Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY, 2007)'de tanımlanan görelî kat ötelemesi sınırlarına göre kesit birim şekil değıştirme kapasiteleri karşılaştırılmıştır.

Betonarme kolonların doğrusal olmayan sonlu eleman çözümlenme sonuçlarının deneysel verilerle tutarlı olduğu düşünülerek, DBYBHY (2007)'de tanımlanan görelî kat ötelemesi sınırları temel alınarak yatay yük etkisindeki performansı aşağıda özetlenmiştir.

### *Minimum hasar sınırı için;*

- Görelî kat ötelemesi oranı ( $\delta_{ji}/h_{ji}$ ) 0.01 değeriindeki kesit en dış lifindeki beton basınç birim şekil değıştirme değeri yaklaşık 0.002 bulunmuştur. Bu değeri yönetmelik sınırı ( $\epsilon_{cu}$ ) 0.0035'in oldukça altındadır.
- Kırçıl (2005) tarafından yapılan çalışmada akma hasar seviyesinin yaklaşık olarak hafif hasar karşılık geldiği düşünölmüştür. Bu tez çalışmasında, donatı aktığı andaki kesit en dış lifindeki beton basınç birim şekil değıştirme değeri DBYBHY (2007)'de tanımlanan beton basınç birim şekil değıştirme değeri ( $\epsilon_{cu} = 0.0035$ ) daha yakın değeri verdiği söylenebilir.

### *Güvenlik sınırı;*

- Görelî kat ötelemesi oranı ( $\delta_{ji}/h_{ji}$ ) 0.03 göz önüne alındığında sonlu eleman çözümlenmesinden bulunan beton basınç ve donatı çeliği birim şekil değıştirme değeri DBYBHY (2007) sınırlarının altında bulunmuştur.
- Çözümlenmesi yapılan betonarme kolonların DBYBHY (2007)'ye göre hesaplanan etriye içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değıştirme sınır değeri ( $\epsilon_{cg}$ ) 0.0135 bulunmuştur. Sonlu eleman çözümlenmelerinde  $\epsilon_{cg}$  değeri 0.0029 ~ 0.0032

arasında olduğu görülmektedir. Söz konusu değer yönetmelik sınırı  $(\varepsilon_{cg})_{GV} = 0.0035 + 0.01(\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.0135$ 'in oldukça altındadır.

- Çözümlemesi yapılan betonarme kolonların DBYBHY (2007)'de donatı çeliği birim şekil değiştirme üst sınırı  $(\varepsilon_s)_{GV} = 0.04$  verilmiştir. Betonarme kolonların sonlu eleman çözümlerinde  $\varepsilon_s$  değeri  $\sim 0.0022$  bulunmuştur. Söz konusu bu değer donatının aktığı göstermekte olup, bu değerın yönetmelik sınırından küçük değerler aldığı söylenebilir.

#### **Göçme sınırı;**

- Göreli kat ötelemesi oranı  $(\delta_{ji}/h_{ji})$  0.04 göz önüne alındığında sonlu eleman çözümlerinden bulunan beton basınç ve donatı çeliği birim şekil değiştirme değerleri DBYBHY (2007) sınırlarının altında bulunmuştur.
- Çözümlemesi yapılan betonarme kolonların DBYBHY (2007)'ye göre hesaplanan etriye içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirme sınır değeri  $(\varepsilon_{cg})$  0.018 bulunmuştur. Sonlu eleman çözümlerinde  $\varepsilon_{cg}$  değeri 0.004  $\sim$  0.006 arasında olduğu görülmüştür. Söz konusu değer yönetmelik sınırı  $(\varepsilon_{cg})_{GC} = 0.004 + 0.014(\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.018$ 'in oldukça altındadır. Sonlu eleman çözümlerinden etriye içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirme sınır değerinin azaltılacak şekilde yenilenmesi gerektiği söylenebilir.
- Çözümlemesi yapılan betonarme kolonların DBYBHY (2007)'de donatı çeliği birim şekil değiştirme üst sınırı  $(\varepsilon_s)_{GC} = 0.06$  verilmiştir.. Betonarme kolonların sonlu eleman çözümlerinde  $\varepsilon_s$  değeri  $\sim 0.0022$  bulunmuştur. Söz konusu bu değerın yönetmelik sınırının oldukça altında olduğu ifade edilebilir.
- Bu çalışmadan, sınırlı sayıda deneysel kolon çözümlerinin daha fazla sayıda eleman için yapılarak yönetmelik sınırının irdelenmesi önerilebilir.

## KAYNAKLAR

- ACI Committee 363. Guide to Quality Control and Testing of High strength Concrete, American Concrete Institute, ACI363.2R 1998.
- Akkaya, Y., Celep Z. (2007), “İki Boyutlu Yapı Elemanlarında Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Yaklaşımı”, İTÜ Dergisi 95-108, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- American Concrete Institute (2005) Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05). American Concrete Institute, Detroit, ACI Committee 318-05.
- ANSYS, ANSYS User’s Manual Revision 10.0, ANSYS, Inc., Cannonsburg, Pennsylvania, (2005).
- Arslan, G. ve Polat, Z., “Yüksek Beton Mukavemetli Betonarme Kirişlerde Uygun Sonlu Eleman Boyutları”, İTÜ Dergisi, 3(1), 22–28 (2004).
- Aydemir, C., (2004), “Simetrik Donatılı Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kolonların Pekleşmeli Eğilme Momenti Kapasitelerinin Belirlenmesi”, YL Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aydoğan, M., (2003), “Taşıyıcı Elemanlarda Sonlu Elemanlar Yöntemi”, Ders Notları, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Barbosa, A. F., Riberio, G. O., (1998), “Analysis of Reinforced Concrete Structures Using Ansys Nonlinear Concrete Model”, Computational Mechanics, 3; 50-57.
- CEB-FIB (MC909 Model code for Concrete Structures, Committee Euro-International du Beton, Bulletin d’Information No.213/214, Lausanne, Switzerland, 1990.
- Calayır, Y., Karaton, M., 2002, Kemer Barajların Drucker-Prager Yaklaşımı Kullanarak Lineer Olmayan Dinamik Analizi, Turkish J. Eng. Env. Sci. (26) 179-192.
- Chen, W. F., Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill Company, 1982.
- DBYBHY, (2007), “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı”, Ankara.
- Dede, F. T., (2006), “Tersinir-Tekrarlanır Yükleme Altındaki Betonarme Çerçevelerin Ansys Programı ile Nonlinear Sonlu Eleman Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1-100.
- Doğan, A. B., (2008), “Karbon Polimer Elyaf ile Güçlendirilmiş Beton Kirişlerin Sonlu Elemanlar Metodu ile Lineer Olmayan Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Fanning, P., (2001), “Nonlinear Models of Reinforced and Post - Tensioned Concrete Beams”, Electronic Journal of Structural Engineering, 2: 111-119.
- Gündüz, A., (1990), “Donatı Çeliği Son Limit Durum Deformasyon Tasarım Değerinin Belirlenmesi”, Türkiye Mühendislik Haberleri, İstanbul: 7-10.
- Hellesland, J., Green, R., (1972), “Tests of Reinforced Concrete Columns”, ACI Journal Proceedings, 69 (12): 770-774.

- Kırçıl, S. M., (2005), “Betonarme Binalarda Deprem Hasarının Olasılık Hesapları ile Tahmini”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Lin, C. H., Lin, S.P., (2005), “Flexural Behavior of High-Workability Concrete Columns Under Cyclic Loading”, ACI Structural Journal, 102-S41.
- Saatcioglu, M., Ozcebe, G., “Response of Reinforced Concrete Columns to Simulated Seismic Loading,” American Concrete Institute, ACI Structural Journal, January – February, 1989, pp. 3-12.
- Soesianawati, M. T., Park, R. and Priestley, M. J. N., “Limited Ductility Design of Reinforced Concrete Columns,” Report 86-10, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, March 1986, 208 pages.
- Suleiman, R. E., Tankut, A. T., Ersoy, U. (1991), “Repair and Strengthening of Reinforced Concrete Column”, Ph.D. Thesis, Civil Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 1-176.
- William, K. J. and Warnke, E. P., “Constitutive Model for the Triaxial Behaviour of Concrete”, IABSE, Report No.19, Bergamo, 1-30 (1974).
- Yavuzer, M., (2005), “Monotonik Yükleme Etkisi Altında Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Nonlinear Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-6, 26-43.
- Yozgat, U., (2007), “Eksenel Yüklü Kare Kesitli Betonarme Kolonların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Nonlinear Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yumak, Y., Tankut, A.T., Ersoy U., (1991), “Effects of Bar Development Methods on Jacked Column Behaviour”, M.S. Thesis, Civil Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 1-5.
- Zahn, F. A., Park, R., Priestley, M. J. N., “Design of Reinforced Bridge Columns for Strength and Ductility,” Report 86-7, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, March 1986, 330 pages.

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi 02.11.1982

Doğum yeri Ilgaz/Çankırı

Lise 1994-2001

Ilgaz Şehit Nizamettin Yaman Anadolu Lisesi

Lisans 2001-2006

Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2006-

Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri  
Enstitüsü

**Çalıştığı kurumlar**

2008-2009

Kale Mühendislik Ltd Şti.

2009-2009

Optimum Mühendislik Ltd Şti.