

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERSİNİR-TEKRARLANIR YÜKLEME ALTINDAKİ BETONARME
ÇERÇEVELERİN ANSYS PROGRAMI İLE NONLİNEER SONLU
ELEMAN ANALİZİ

Fatma Tuba DEDE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI

Konya, 2006

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERSİNİR-TEKRARLANIR YÜKLEME ALTINDAKİ BETONARME
ÇERÇEVELERİN ANSYS PROGRAMI İLE NONLİNEER SONLU
ELEMAN ANALİZİ

Fatma Tuba DEDE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI

Bu tez 22.03.2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir

.....		
Prof.Dr. M. Yaşar KALTAKCI	Yrd.Doç.Dr. Rifat SEZER	Yrd.Doç.Dr.Yunus DERE
(Üye)	(Üye)	(Danışman)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TERSİNİR-TEKRARLANIR YÜKLEME ALTINDAKİ BETONARME ÇERÇEVELERİN ANSYS PROGRAMI İLE NONLİNEER SONLU ELEMAN ANALİZİ

Fatma Tuba DEDE

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı

Danışman: Yrd.Doç.Dr.Yunus DERE

2006, 100 Sayfa

Jüri: Prof.Dr. M. Yaşar KALTAKCI
Yrd.Doç.Dr. Rıfat SEZER
Yrd.Doç.Dr.Yunus DERE

Beton ve çelik gibi yapı malzemelerinin akma veya kırılma dayanımlarına eriştiklerinde, gerilme ve şekil değiştirme ilişkileri doğrusallığını kaybetmektedir. Bu tür malzeme davranışının nonlinear sonlu eleman modelleri ile modellenmesi bilgisayar teknolojisindeki en son gelişmeler sayesinde yaygın hale gelmiştir. Bu tez çalışmasında, betonarme deneylerinin, özellikle de yüklemenin tersinir-tekrarlanırlar 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 analizlerden, tersinir-tekrarlanırlar yükleme altındaki yapı elemanlarının kuvvet-deplasman geçmişinin modellenmesi sırasında, taşınabilecek maksimum yüke yaklaşıldığında ANSYS analizinin çözüme ulaşma problemleri yaşadığı ve durduğu, ancak durmadan önce elde edilen analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Betonarme, Modelleme, ANSYS, Sonlu eleman analizi,
Tersinir-tekrarlanırlar yükleme.

ABSTRACT

MSc Thesis

NONLINEAR FINITE ELEMENT ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE FRAMES SUBJECTED TO REVERSED-CYCLIC LOADING USING ANSYS SOFTWARE

Selçuk University Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Department

Fatma Tuba DEDE

Supervisor: Yrd.Doç.Dr.Yunus DERE

2006, 100 Pages

Jury: Prof.Dr. M. Yaşar KALTAKCI
Yrd.Doç.Dr. Rıfat SEZER
Yrd.Doç.Dr. Yunus DERE

When materials like concrete and steel reach their yielding or fracture strengths, their stress-strain relationships lose linearity. Modeling such material behavior through nonlinear finite element models became popular after the latest advancements in computer technology. The purpose of this thesis is the modeling of reinforced concrete frame experiments, especially in which the loads are applied in a reversed-cyclic manner. For the modeling purposes, ANSYS finite element software which has a type of element that assumes full bond between steel and concrete and can model failure in tri-axial stress state, has been used. From the analyses done, during the modeling of the force-displacement time history of structural members under reversed-cyclic loading, when the analysis gets closer to the maximum carrying load, it is seen that ANSYS experiences convergence problems and stops the analysis, however, the obtained analysis results before the analysis stops are fairly in accordance with the experimental ones.

Key words: Reinforced concrete, Modeling, ANSYS, Finite element analysis,
Reversed-cyclic loading

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	4
2.1. Beton(arme) Elemanların Sonlu Eleman Modeli	4
2.2. ANSYS Programı Kullanarak Beton(arme) Modellenmesi	5
3. MALZEME DAVRANIŞININ MODELLENMESİ.....	13
3.1. İdeal Malzeme Kabulleri	13
3.2. Tersinir-Tekrarlanır Yükler Altında Davranış	16
4. BETON VE BETONARME İÇİN MATEMATİKSEL MODELLER.....	18
4.1. Basınç Gerilmeleri Altındaki Sargılı ve Sargısız Beton İçin Malzeme Modelleri	18
4.1.1. Hognestad modeli	19
4.1.2. Geliştirilmiş Kent ve Park modeli	20
4.2. Çekme Gerilmeleri Altındaki Beton İçin Malzeme Modeli	23
5. ANSYS İLE BETON VE BETONARME MODELİ	24
5.1. Betonarme Malzeme Modeli	24
5.2. SOLID65-ANSYS Betonarme Elemanı	26
6. ANSYS PROGRAMI İLE SONLU ELEMAN ANALİZİ.....	28
6.1. Bir Modelin Oluşturulması (<i>Modelling</i> menüsü)	28
6.2. Eleman Tiplerinin Belirlenmesi (<i>Element Type</i> menüsü).....	31
6.3. Eleman Sabitlerinin Belirlenmesi (<i>Real Constants</i> menüsü)	32
6.4. Malzeme Özellikleri (<i>Material Props</i> menüsü).....	33
6.5. Sınır Koşulları ve Dış Yükler (<i>Define Loads</i> menüsü).....	35
6.5.1. Zamana bağlı yükleme	36
6.6. Analiz.....	37

6.6.1. Statik analiz.....	39
6.6.2. Dinamik (transient) analiz.....	40
6.6.3. Analiz prosedürleri.....	42
7. ANSYS İLE BETONARME ANALİZİ UYGULAMALARI	44
7.1. Tekil Bir <i>SOLID65</i> Betonarme Elemanının Analizi.....	44
7.1.1. ANSYS programı ile modelin oluşturulması	46
7.1.2. ANSYS analiz sonuçları	51
7.2. Bir Betonarme Çerçevenin ANSYS İle Nonlineer Analizi	55
7.2.1. Betonarme çerçeve deney numunesine ait özellikler	56
7.2.2. ANSYS sonlu eleman modelinin oluşturulması	58
7.2.3. Çerçevenin statik itme (pushover) analizi.....	66
7.2.4. Çerçevenin tersinir-tekrarlanır yükleme altında analizi.....	71
8. SONUÇLAR	82
9. KAYNAKLAR	84
EK-1 ANSYS İLE AÇIKLIK ORTASINDA TEKİL YÜKLÜ BİR	
BETONARME KİRİŞİN GÖÇME ANALİZİ	87
1. ANSYS Modelinin Oluşturulması	88
2. ANSYS Analiz Sonuçları.....	90
3. Moment-Eğrilik İlişkisi.....	94
EK 2. ANSYS İLE OLUŞTURULAN ÇEŞİTLİ MODEL ÖRNEKLERİ	98

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 Lineer elastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi	13
Şekil 3.2 Lineer olmayan elastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi	14
Şekil 3.3 Elastoplastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi	14
Şekil 3.4 İdeal elastoplastik malzeme kuvvet-deplasman ilişkisi	15
Şekil 3.5 Pekleşen ideal elastoplastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi	15
Şekil 3.6 Rijit plastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi	15
Şekil 3.7 İzotropik pekleşme gösteren malzemenin σ - ϵ ilişkisi.....	16
Şekil 3.8 Kinematik pekleşme gösteren malzemenin σ - ϵ ilişkisi	17
Şekil 4.1 Hognestad malzeme modelinde σ - ϵ ilişkisi	20
Şekil 4.2 Geliştirilmiş Kent ve Park malzeme modelinde σ - ϵ ilişkisi	21
Şekil 4.3 Çekme gerilmeleri için σ - ϵ ilişkisi.....	23
Şekil 5.1 Üç boyutlu <i>Solid65</i> eleman modeli.....	26
Şekil 6.1 ANSYS model oluşturma nesneleri	29
Şekil 6.2 Serbest elemanlara bölünmüş bir sonlu eleman modeli.....	30
Şekil 6.3 Planlanmış elemanlara bölünmüş bir sonlu eleman modeli.....	30
Şekil 6.4 Bir kiriş eleman tipi için gerçek sabitler giriş menüsü	33
Şekil 6.5 Zik-zak yükleme için dosyası ve zaman-yük grafiği	36
Şekil 6.6 ANSYS programı yeni analiz seçenekleri menüsü	38
Şekil 6.7 <i>Solution Controls</i> menüsü	39
Şekil 6.8 <i>Solution Controls</i> menüsünde transient analiz için artış adımlarının belirlendiği menü	41
Şekil 6.9 Newton Raphson yönteminde çözümün ilerleyişi	42
Şekil 6.10 Değiştirilmiş Newton Raphson Metod	43
Şekil 7.1 (a) Küp şeklinde bir betonarme elemanına ait boyut ve mesnetlenme durumu (b) Tekil betonarme küp elemanı, mesnetlenme ve yüklenme biçimi	45
Şekil 7.2 Beton ve donatı çeliğinin gerilme-birim deformasyon ilişkileri.....	45
Şekil 7.3 Multilinear Kinematic Hardening verilerinin girilmesi	47
Şekil 7.4 Beton için verilen <i>Multilinear Kinematic Hardening</i> verileri grafiği.....	47

Şekil 7.5 Concrete malzeme parametrelerinin girilmesi	48
Şekil 7.6 Donatı çeliği için iki kollu izotropik pekleşme modeline ait verilerin girilmesi	48
Şekil 7.7 Donatı çeliği için verilen <i>Bilinear Isotropic Hardening</i> verileri grafiği.....	49
Şekil 7.8 Tepe düğüm noktalarının tersinir tekrarlanır yük grafiği	50
Şekil 7.9 $\Delta_x = 0.6$ mm iken deforme olmuş eleman (Tabanda X-Z düzlemi ankastre mesnetlidir).....	51
Şekil 7.10 $\Delta_x = 0.6$ mm iken ortalama σ_y gerilmesi dağılımı	51
Şekil 7.11 $\Delta_x = 0.6$ mm iken ortalama τ_{xy} gerilmesi dağılımı.....	52
Şekil 7.12 $\Delta_x = 0.02$ mm iken asal gerilme yönleri, çatlama şekli ve asal çekme gerilmesi σ_1 dağılımı	53
Şekil 7.13 a) $\Delta_x = 0.06$ mm iken b) $\Delta_x = 0.6$ mm iken oluşan çatlaklar	54
Şekil 7.14 Betonarme küp eleman için tersinir-tekrarlanır yük altında P – Δ ilişkisi	55
Şekil 7.15 Betonarme çerçevenin boyut, kesit ve donatı özellikleri (Boyutlar: cm) .	57
Şekil 7.16 Etriyesiz kolon-kiriş birleşim bölgesi	57
Şekil 7.17 Çerçeve sistemi kalıp ve donatı düzeni.....	58
Şekil 7.18 Betonarme çerçevenin sonlu elemanlara bölünmesi.....	59
Şekil 7.19 Kolon-kiriş birleşiminde eleman sabiti (<i>real constant</i>) numaraları.	60
Şekil 7.20 Betonarme çerçeve modelinin kiriş ve kolon ana donatıları.....	61
Şekil 7.21 Sargılı beton için verilen <i>Multilinear Isotropic Hardening</i> verileri	62
Şekil 7.22 Sargısız beton için verilen <i>Multilinear Isotropic Hardening</i> verileri	63
Şekil 7.23 Donatı için verilen <i>Bilinear Isotropic Hardening</i> verileri grafiği	64
Şekil 7.24 Bir kolonun temel hizasında mesnetlenmesi.....	65
Şekil 7.25 Çerçevenin sağ üst köşesinden yüklenmesi	65
Şekil 7.26 Çerçeve modeli üzerinde deplasman yüklemeleri	66
Şekil 7.27 ANSYS (a) ve (b) statik itme analizi sonuçları ve deneysel sonuçlar	67
Şekil 7.28 ANSYS (a) analizi maksimum deplasman için genel çatlak haritası	68
Şekil 7.29 ANSYS (a) analizi maksimum deplasmanı için üçüncü çatlaklar	69
Şekil 7.30 ANSYS (a) analizi 12.3mm deplasman için donatı gerilmeleri	70
Şekil 7.31 ANSYS (a) analizi maksimum deplasman için donatı gerilmeleri.....	70
Şekil 7.32 Tersinir tekrarlanır deplasman yüklemesi ($\Delta u=2$ mm)	71
Şekil 7.32 Tersinir-tekrarlanır yükleme altında yük-deplasman geçmişi	72

Şekil 7.33 Kısmi deney sonuçları ile ANSYS analizi sonuçlarının karşılaştırılması	73
Şekil 7.34 Tersinir tekrarlanır deplasman yüklemesi ($\Delta u=10$ mm)	74
Şekil 7.35 Betonarme çerçeve modeline deplasman yüklerinin uygulanması	74
Şekil 7.36 Kuvvet-deplasman geçmişi grafikleri (a) Yükleme adımları 1-4 için (b) Yükleme adımları 5-9 için (c) Tüm yükleme adımları için	75
Şekil 7.37 ANSYS analizi ve deneysel sonuçların karşılaştırılması (a) Kısmi karşılaştırma (b) Genel karşılaştırma	76
Şekil 7.38 Deney sırasında oluşan çatlakların şematik gösterimi	77
Şekil 7.39 Çatlak haritası grafikleri (a) 1. yük adımı (b) 3. yük adımı (c) 5. yük adımı (d) 7. yük adımı	78
Şekil 7.40 Tersinir-tekrarlanır yükleme grafiği	79
Şekil 7.41 Miller ve ark. (2001)'de ANSYS (<i>Finite Element</i>) ile Analitik(<i>Engineering</i>) hesaplamadan elde edilen sonuçların karşılaştırılması	80
Şekil 7.42 ANSYS analizi kuvvet-deplasman geçmişi	80
Şekil 7.43 Kısmi deney sonuçları ile ANSYS analizi sonuçlarının karşılaştırılması	81

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 5.1 Beton malzeme tanım çizelgesi	25
Çizelge 7.1 Zaman-yük geçmişi çizelgesi.....	50
Çizelge 7.2 <i>Solid65</i> betonarme elemanı için tanımlanan eleman sabitleri	60

1. GİRİŞ

Son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler sayesinde, yapı elemanlarının sonlu elemanlar metodu ile modellenmesi oldukça yaygın hale gelmiştir. Bilindiği gibi, sonlu elemanlar metodu, yapıların sonlu sayıda elemanlara ayrılması ve bu elemanların birbirlerine bağlandığı düğüm noktalarında kuvvetler dengesi ve deplasman sürekliliğinin sağlanması ilkelerine dayanan bir yöntemdir. Bu yöntemde problemin büyüklüğü sınırlanmamıştır.

Yapı elemanları ve yapı sistemlerinin çeşitli yüklemeler altındaki davranışlarının incelenmesi için deneysel çalışmaların gerekliliği tartışılmazdır. Ancak, deneysel çalışmalara ait bilgisayar modellerinin oluşturulması ve model analizinden elde edilen sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırılması yoluyla yapılan deneylerin tahkik edilmesi sık sık karşımıza çıkmaktadır. Modelleme kimi zaman bir tasarımın uygulamaya konulmasından önce yapılan bir çalışma olarak ele alınır. Örneğin, otomobil üreten bir firmanın tasarladığı otomobil modellerinin bilgisayar ortamında çeşitli statik ve dinamik yükler altında davranışını analiz etmesi ve en uygun tasarımı üretime geçirmesi gibi. Benzer şekilde, prefabrik yapı elemanlarının sonlu eleman modellerinin oluşturulması ve davranış analizlerinin üretim öncesinde yapılması faydalı olacaktır.

Deneysel çalışmalar başlamadan önce, deney düzeneğinin bir bilgisayar modelinin oluşturulması çeşitli faydalar sağlar. Örneğin, deney düzeneğine ve deney numunelerine ait en uygun ölçü ve parametrelerin belirlenmesi, test edilecek deney numunesi sayısının belirlenmesi, deney sırasında verilerin toplanacağı kritik noktaların tespiti ve deney sırasında ölçümü çok zor veya mümkün olmayan verilerin analiz yoluyla araştırılması v.b. konular, sonlu eleman modellemeleri ve bu modellerin çözümlenmeleri ile gerçekleştirilebilir. Bu tür modeller sayesinde, test edilecek deney numunesi sayısının azaltılması, dolayısıyla malzeme, işçilik ve zaman yönünden oldukça önemli derecede ekonomik avantajlar sağlanabilir.

Sonlu elemanlar metodu uygulamaları için kişisel bilgisayar programları hazırlanabildiği gibi mevcut ticari paket programlar da kullanılabilir. Sonlu eleman modellemeleri için SAP (Structural Analysis Program), ABAQUS ve ANSYS gibi ticari paket programlar mevcuttur. Bu tür paket programlar çok sayıda mühendis ve bilgisayar programcısının uzun yıllar süren ortak çalışmaları sonucu hazırlanmışlardır. Karmaşık problemlerin sonlu eleman modellemeleri için kişisel analiz programları yazmak oldukça zordur. Ayrıca, mevcut ticari paket programlarla çözümü mümkün olan karmaşık problemleri çözmek için, kişisel programlar hazırlamaya kalkışmak (maddi imkanlar bu tür programların satın alınmasına elverdiği ölçüde) çoğu zaman gereksizdir.

Bu çalışmada beton/betonarme elemanların sonlu elemanlar metodu ile modellenmesi ve tersinir-tekrarlanır yükler altında nonlinear analiz dikkate alınmıştır. Bilindiği gibi, betonarmede, donatı çeliği gibi davranışı çoğu zaman elastik sınırlar içinde kalan ve beton gibi nonlinear (doğrusal olmayan) ve inelastik (elastik olmayan) davranış gösteren iki ayrı malzeme kompozit olarak birlikte çalışmaktadır. Donatısız betonun modellenmesi için çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiş nonlinear malzeme modelleri mevcuttur. Betonun çatlama ve ezilme gibi davranışlarının modellenmesi oldukça karmaşıktır. Betonda aynı zamanda, zamana bağlı deformasyon biçimleri olan rötre ve sünme de görülmektedir. Betonarmenin modellenmesinde ise, iki farklı malzemenin birlikte çalışmasının getirdiği aderans (bond) ve sıyrılma (slip) gibi problemlerin de modellenmesine ihtiyaç duyulur. Aderansın modellenmesindeki zorluklar ve belirsizliklerden dolayı, analizler çoğu zaman beton ile donatı çeliği arasında tam bir aderans olduğu varsayılarak yürütülmektedir.

Betonun yukarıda bahsedilen tüm nonlinear davranışlarının modellenmesi önemli derecede plastisite ve sonlu eleman analizi bilgisi gerektirir. Betonarmenin sonlu eleman modeli için ABAQUS ve ANSYS en yaygın olarak kullanılan paket programlardır. Bunlardan ANSYS'in güçlü bir grafik kullanıcı ara yüzüne (Graphical User Interface) sahip olmasından dolayı, bu çalışmada ANSYS programı tercih edilmiştir. ANSYS programında modelleme sırasında ihtiyaç duyulabilecek ve

kullanımı kolay (ancak, parametrelerinin anlaşılması ve belirlenmesi zor) çok sayıda hazır eleman modülleri mevcuttur.

Bu çalışmada, deprem benzeri, tersinir-tekrarlanır yükleme altındaki bir betonarme çerçevenin sonlu eleman metodu kullanan ANSYS programı ile nonlinear modellenmesi amaçlanmıştır. ANSYS programı ile betonarme elemanların modellenmesinin nasıl yapılacağı, kullanılacak parametreler ve modelleme sırasında dikkat edilmesi gereken hususlar, ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Beton modeli için, literatürde mevcut olan matematiksel malzeme modellerinden faydalanılmıştır. Mevcut literatürde deneysel olarak incelenmiş olan betonarme çerçevelere ait boyut, malzeme ve yükleme verilerinin kullanılmasıyla ANSYS modeli oluşturularak nonlinear sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Böylece deneysel sonuçlar ile sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması mümkün hale gelmiştir. İncelenen betonarme çerçevenin yüklemeye bağlı olarak gösterdiği gerilme, deformasyon ve çatlama davranışları, yüklemenin çeşitli aşamalarında belirlenerek davranış geçmişi elde edilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Beton(arme) Elemanların Sonlu Eleman Modeli

Betonarme yapıların sonlu elemanlar analizinde en büyük engel malzeme özelliklerini tanımlamaktaki zorluklardır. Betonarme yapıların davranışını önceden belirlemek için gerçeğe uygun modellemelerin araştırılması konusunda çok çaba harcanmıştır. Sonlu eleman yönteminin betonarmeye ilk uygulanışı Ngo ve Scordelis tarafından 1967’de gerçekleştirilmiştir (Wasti,1990). Bu çalışmada betonarme kirişler incelenerek beton ve donatı iki boyutlu üçgen elemanlarla lineer elastik olarak modellenmiştir. Donatı ile beton arasındaki aderans modellenmiş, bunun yanında çatlakların oluşması ile ilgili varsayımlar yapılmıştır.

Wasti’nin (1990) çalışmasında sonlu eleman yöntemi hakkında kısa bilgiler verilmiş, yöntemin matrissel formülasyonu gösterilmiştir. Nonlineer malzeme, aderans ve artan yükler altında malzemenin davranışı, oluşan çatlaklar ve yapı geometrisindeki değişikliklerin nasıl modellendiği açıklanmıştır. Betonun davranışı doğrusal bağıntılarla ifade edilemeyeceğinden bilgisayar programı gerekli görülmüştür. FEARCM (Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Members) ve FINEARCS (Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures) adlı iki bilgisayar programından bahsedilmiştir.

Lundgren ve ark.’nın (2002) çalışmasında beton ve donatı arasındaki aderansı modellemek için nonlinear sonlu eleman modeli kullanılarak üç boyutlu bir model oluşturulmuştur. Aderans, sürtünme, kaymaya sebep olabilen normal gerilmeler ve donatılar arasındaki betonun göçmesine göre hesaplanan üst sınır gerilme dikkate alınarak sonlu eleman analizi yapılmıştır. DIANA sonlu eleman bilgisayar programı kullanılmıştır. Bu programda beton ve donatı arasındaki aderansı tanımlayabilecek arayüz elemanları mevcuttur. Beton ve donatı “solid” elemanlarla modellenmiştir. Yapılan deney ve analizler sonucunda, geliştirilen aderans modelinin boyuna donatı ve etriye demirinin her ikisi içinde kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Hamil ve ark.'nın (2000) çalışmasında betonarme kolon-kiriş birleşim bölgeleri için bir nonlinear sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Analiz sonuçlarının doğruluğu 16 adet deney sonucu ile karşılaştırma yapılarak sunulmuştur. Bütün modellerin oluşturulması için SBETA nonlinear sonlu eleman programı kullanılmıştır. SBETA'nın beton ve çelik malzemelerinin özelliklerini tanımlarken ve elemanı sonlu elemanlara bölerken kullanıcı dostu olduğu ifade edilmiştir. Deneysel sonuçlardan elde edilen verilere dayanarak malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Üç farklı model kullanılmıştır. Modeller, düğüm noktalarında çekme donatısı bulunup bulunmaması ve beton dayanımındaki farklılıklara göre değişiklik göstermektedirler. Betonarme kolon-kiriş birleşim noktası modeli nonlinear sonlu eleman yöntemi ile başarıyla modellenmiştir.

Arslan'ın (2004) çalışmasında, betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesinin analitik hesabında sonlu eleman boyut etkisi araştırılmıştır. Hesabı yapılan betonarme kirişte yalnız iki sıra çekme donatısı bulunmaktadır. Açıklık ortasında tekil yükle yüklenmiş kirişte beton için iki farklı kırılma kriteri seçilmiş (Drucker-Prager ve Çatlak modeli) analitik çözümler buna göre yapılmıştır. Drucker-Prager matematiksel modeli betonun mekanik davranışını, plastik ve visko plastik teoriler yardımıyla ifade etmektedir. Akma kriteri von-Mises kriterinin genelleştirilmiş şeklidir. Çatlak modelinde ise gelişen çatlakla malzemenin yumuşamadığı ve yük artımı sonunda mukavemetini kaybettiği farz edilmiştir. Analizler LUSAS bilgisayar programı kullanılarak yapılmış ve sonuçlar deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

2.2. ANSYS Programı Kullanarak Beton(arme) Modellenmesi

Kavlıcoğlu ve ark.'nın (2001) çalışması statik yükleme altındaki grafit/epoksi beton köprü kirişlerinin analizi ve test edilmesi hakkındadır. Çalışmada; bir grafit/epoksi beton kiriş imal edilmiş ve iki noktadan yüklenerek test edilmiştir. Geliştirilen kirişin teorik modeli oluşturulmuş ve sonlu eleman analizi yapılmıştır. Grafit/epoksi şeritlerinin iki doğrultusundaki elatisite modüllerinin belirlenmesi için çekme testlerine tâbi tutulmuştur. Uygun malzeme özellikleri ve varsayımlar kullanılarak statik yükler altında kesitin hem teorik hem de sonlu eleman analiziyle davranışının

belirlenmesi mümkün olmuştur. Kirişin sonlu eleman analizi hem tasarımın sonlandırılmasından önce hem de testlerden sonra yapılmıştır. Analizler tasarımın detaylandırılmasına yardımcı olurken, testlerden sonraki analizler ise kirişin davranışının açıklanmasında etkili olmuştur. Sonlu eleman modeli için ANSYS 5.5 programı kullanılmıştır. Sonlu eleman analizinde beton ve çeliğin malzeme nonlineerlikleri ve geometrik nonlineerlik dikkate alınmıştır. Beton ve çelik arasında tam aderans varsayılmıştır. Beton elemanların gerilme-birim deformasyon ilişkisi Hognestad modeline göre belirlenmiştir. Etriye elemanları ANSYS *Solid45* elemanları ile modellenmiştir ve sargılı beton davranışı ayrıca dikkate alınmamıştır. Çelik ve betonun gerilme-birim deformasyon eğrileri ANSYS programında *multi-linear kinematic hardening* seçeneği ile tanımlanmıştır.

Parvin ve Granata'nın (2000) yaptığı çalışmada, kenar kiriş-kolon düğümlerinin moment kapasitelerini artırmak için FRP kullanımı parametrik olarak incelenmiştir. Üç adet kiriş-kolon düğümü farklı tip ve kalınlıklarda fiber kompozit levhalar kullanılarak modellenmiş ve ANSYS programı kullanılarak analiz edilmiştir. Üç boyutlu modelde beton için *Solid65* elemanı, donatı çeliği için ise *Link8* elemanlar kullanılmıştır. Beton için sadece çekme ve basınç mukavemetleri ile elastisite modülü verilmiştir. Ancak herhangi bir gerilme-birim deformasyon eğrisinden bahsedilmemiştir. Çelik için iki kollu lineer pekleşen birim deformasyon modeli kabul edilmiştir. Çalışmada eğilme öncesi düzlem kesitler *eğilme sonrası düzlem kalır* prensibini uygulamak için *Pipe16* tipinde yapay elemanlar kullanılmıştır.

Chansawat'ın (2003) yaptığı çalışmada eğilme, kesme, eğilme+kesme etkisi altındaki betonarme kirişlerin karbon fiber bileşenlerle güçlendirilmesinin üç boyutlu sonlu eleman modelleri geliştirilmiştir. FRP için üç boyutlu elemanlar, beton için 8 düğümlü açık çatlak yaklaşımı kabul eden izoparametrik elemanlar kullanılmıştır. Deney için Horsteel Creek Köprüsü'nün enine kirişlerine benzer dört adet kiriş oluşturulmuş ve test edilmiştir. Bu kirişler; güçlendirilmemiş kiriş, eğilmeye karşı güçlendirilmiş, kesmeye karşı güçlendirilmiş, eğilme+kesmeye karşı güçlendirilmiş kirişlerdir. FRP ile güçlendirilmiş betonarme elemanların davranışını modellemek için ANSYS programı kullanılmıştır. Beton için *Solid65* elemanı seçilmiştir. Sonlu

eleman modelinde yerel rijitlik kaybından doğan erken göçmeyi engellemek için ezilme yeteneği ihmal edilmiştir. Donatı için *Link8* elemanı, FRP bileşenleri için ise *Solid46* elemanı kullanılmıştır. Beton için nonlinear malzeme davranışı kabul edilerek William-Warnke yayılı çatlak yaklaşımı kullanılmıştır. Birleşim noktalarında çatlak meydana geldiği zaman, yayılı çatlak ayırık çatlaklara göre malzeme özelliklerine daha uyumlu bir şekilde ilerler. Kirişlerdeki enine donatıyı modellemek için sargılı beton modeli kullanılmıştır. Simetriden faydalanma amacıyla, tam kesitli kirişin sınır şartları gözetilerek, çeyrek kısmının modellenmesi ile bilgisayarın performansı açısından önemli avantajlar sağlanmıştır. Deneyde beton ve donatı çeliği arasında önemli bir kayma gözlenmediğinden dolayı, analiz modelinde beton ve çelik arasında tam aderans olduğu varsayılmıştır. Kirişlerin nonlinear davranışının analizi için, birbirini izleyen lineer yaklaşım serileriyle Newton-Raphson iterasyon metodu kullanılmıştır. Kirişlere deplasman kontrollü yük uygulanmıştır. Sonlu eleman analizi sonuçlarının (lineer kısım ve nonlinear kısım) deney sonuçları ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Feng ve ark. (2002), tek eksenli basınç altında FRP tabakası ile sarılı kare enkesitli beton kolonun davranışını araştırmak için bir sonlu eleman modeli oluşturmuş ve beş adet numuneyi test etmişlerdir. Betonarme kolonların davranışını tespit etmek amacıyla yapılan yükleme üç aşamaya bölünmüştür. Sonlu eleman modelleri ANSYS 5.6 programında oluşturulmuştur. ANSYS’de beton için *Solid65* eleman tipi seçilmiştir. Beton için göçme kriteri William-Warnke ile beş farklı parametre kullanılarak tanımlanmıştır. Betonun tek eksenli gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Guo’nun (Guo ve Zhang, 1982) eğrisi kullanılarak tanımlanmıştır. Diğer parametreler deneyden elde edilen veriler kullanılarak verilmiştir. Donatı, *Link8* elemanı seçilerek elastik-tam plastik malzeme modeli ile tanımlanmıştır. Fiber tabakalar ise *Shell41* elemanı kullanılarak modellenmiştir. *Shell41* elemanı eğilmenin ikinci derecede önemli olduğu plak yapılar için tasarlanmıştır. Fiber tabakalar için anizotropik malzeme modeli kullanılmıştır. Sonlu eleman modelinde kolonun simetrisi nedeniyle çeyrek kısmı modellenmiştir. Analizde üniform basınç deplasman yüklemesi yapılmıştır. Deney ve sonlu eleman analizinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri birbirlerine uygunluk sergilemektedir.

Uysal ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada düzlem elastisite problemi olarak ele alınan bir kirişin çeşitli yüklemeler altında ve farklı mesnetlenme durumlarında davranışlarını incelemiştir. Statik analiz için ANSYS programını kullanmışlardır. Dörtgen sonlu eleman ağının düğüm noktalarında oluşan Von Mises gerilmelerinin maksimum değerlerinin akma gerilmesini aşmaması şartı altında kiriş boyutları minimize edilmeye çalışılmıştır. Tasarım değişkenleri olarak ise tasarım elemanlarının köşe noktalarının y koordinatları alınmıştır. Elde edilen en büyük kiriş hacmi ve tasarım değişkenleri tablo halinde verilmiştir.

Beassason ve Sigfusson'nun (2001) çalışmasında betonarme perde duvarların kapasitesi ve deprem davranışını araştırmak için sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu sonlu eleman modellerinde deneysel veriler kullanılmıştır. Deprem davranışı analizinde 2000 Haziran Kuzey İceland depremi verileri kullanılmıştır. Aynı geometriye fakat farklı donatı biçimine sahip perde duvarların yük-deformasyon eğrilerini elde etmek için ANSYS sonlu eleman programı seçilmiştir. Analizde, donatılı ve donatısız olarak hazırlanmış üç boyutlu modellerde *Solid65* eleman tipi kullanılmıştır. Beton için plastisite akma teorisi üzerine kurulmuş Von-Mises akma kriteri kabul edilmiş, malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi *Isotropik Hardening* seçeneği kullanılarak tanımlanmıştır. Deneylerde kullanılan perde duvarların beton ve donatı özelliklerinin sonlu eleman modelinde gerçeğe uygun olarak tanımlanmasından dolayı sonlu eleman analizi sonuçları ve deneylerden elde edilen sonuçların birbiriyle oldukça uyumlu olduğu ifade edilmiştir.

Miller ve ark.'nın (2001) çalışmasında, betonarme perde duvarların iki eksenli yükleme altındaki performansları test edilmiştir. Statik ve tersinir-tekrarlanır yükleme altındaki davranışlarını araştırmak için deneyler öncesi model çalışmaları yapılmıştır. Statik yükleme için kutu ve silindir elemanlar kullanılmıştır. ANSYS v5.6 programı kullanılarak sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Modeldeki perde duvarların sonlu eleman modeli için *Solid65* eleman tipi yayılı donatı özelliği kullanılarak oluşturulmuştur. Kutu yapının üst ve alt döşemeleri rijit varsayılmıştır.

Betonun ezilmesi ihmal edilmiştir. Oluşturulan model, tersinir-tekrarlanır yükleme olarak 0 mm den 4 mm'ye sonra da -4 mm'den 0mm'ye deplasman yapması için yüklenmiştir. ANSYS analizleri sırasında çözüme yakınsama problemleri ile karşılaşmışlardır. Bir yapının göçme dayanımına yaklaşan tersinir yüklemeler altında betonun nonlinear özelliklerini modelleme sırasında ANSYS'in problemler yaşadığı belirtilmiş ve test sonrası analizler için ANSYS'ten başka bir program kullanmaya karar verilmiştir.

Calayır ve Karaton'un (2002) çalışmasında, betonun lineer olmayan malzeme özelliğinin kemer barajların dinamik davranışına etkisi incelenmiştir. Karakaya kemer barajının lineer ve nonlinear çözümleri elde edilerek sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Baraj betonunun lineer olmayan malzeme modeli için Drucker-Prager yaklaşımı seçilmiştir. Drucker-Prager yaklaşımı betonun çekmede çatlaması, basınçta ise plastikleşmesi gibi etkilerin göz önüne alınabildiği bir elasto-plastik malzeme modelidir. Sonlu eleman modeli ANSYS 5.6 Programı kullanılarak oluşturulmuştur. Programda Drucker-Prager yaklaşımı, c kohezyon değeri ve ϕ içsel sürtünme açısı değeri verilerek tanımlanmıştır. Yapılan araştırmalar sonunda betonun lineer olmayan davranışını hesaba katan malzeme modellerinin kullanılması önerilmektedir.

Köksal ve Doran'nın (1997) çalışmasında yer alan sonlu elemanlar bilgisayar programında nonlinear oktahedral bünyesel bağıntılar kullanılmış ve elde edilen sonuçlar ANSYS programında Drucker-Prager akma kriteri seçilerek yapılan plastik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizde beton için Drucker-Prager, çelik için ise Multi-lineer izotropik malzeme modeli seçilmiştir. Betonda basınç ve çekme gerilmeleri etkisi altında çatlak oluşması sırasında sürtünme kuvvetlerinin olduğu Drucker-Prager akma kriterinin, betonun bünyesinde sürtünme kuvvetlerinin iş yaptığı durumlarda kullanılabildiği ifade edilmiştir. Bu yüzden, Drucker-Prager akma kriteri kullanılarak yapılan beton prizma ve betonarme kiriş elemanlarının sonlu eleman analizlerinin deneysel verilere uygunluk gösterdiği tespit edilmiştir.

Barbosa ve Ribeiro'nun (1998) çalışması, ANSYS beton eleman modelini kullanarak betonarme yapı elemanlarının nonlinear sonlu eleman analizinin mümkün olup olmadığını araştırmayı amaçlamıştır. Çalışmada; betonarme kiriş elemanın farklı malzeme modelleri kullanımı ile davranışı incelenmiştir. Bunlardan birincisinde, beton ve çeliğin her ikisi de lineer elastik davranış göstermektedir. İkinci modelde, elastik-tam plastik davranış üzerine kurulan Drucker-Prager akma kriterinin kullanılmıştır. Diğer bir model ise Von-Mises akma kriterinin kullanılmış olduğu elastoplastik modeldir. Lineer elastik model, basınç bölgesinde hemen kırılmaya ulaşmış ve çözüm tamamlanamamıştır. Elastik-tam plastik model ise, lineer elastik model davranışına benzer bir davranış göstererek, donatı akma sınırına ulaşmadan, betondaki kırılma sebebiyle göçme gerçekleşmiştir. Yük-deformasyon ilişkisi deneysel sonuç ile benzerlik göstermesine rağmen oluşturulan modelin taşıdığı göçme yükü, deneysel göçme yükünden daha küçük olduğu görülmüştür. Elastoplastik modelin analizinden elde edilen göçme yükü diğer tüm modellerden daha yüksek olmuştur ve göçme durumuna donatının akması ile ulaşılmıştır.

Li ve ark. (2003) çalışmalarında paslanma, donma-erime, aşırı yüklenme, bakımsızlık ve başlangıçtaki tasarım eksikliği gibi sebeplerden hasar görmüş betonarme elemanların FRP (Fiber Reinforced Plastics) ile takviyesi ANSYS kullanılarak modellenmiştir. Sonlu eleman modeli yardımıyla, onarılan kolonların rijitliği, betonun dayanımı ve FRP sargıları ile arasındaki aderans hesaplanmıştır. Analizde, iki sınır durum dikkate alınmıştır. Bunlardan birincisi, beton ile donatı arasında tam aderansın olduğu durum, ikincisi ise aderansın hiç olmadığı durumdur. FRP'nin tipi, kalınlığı ve beton ile aralarında oluşan arayüzdeki aderansın mukavemet ve rijitlik üzerine etkisi değerlendirilmiştir. FRP ile takviye edilmiş kolonun gerilme-birim deformasyon ilişkisi ve kırılma yükünü tespit etmek amacıyla nonlinear analiz yapılmıştır. Analiz sonunda, arayüzdeki aderansın ve FRP sargısının kalınlığının artmasıyla, takviye edilen kolonun rijitliğinin ve mukavemet değerinin arttığı gözlenmiştir. Ayrıca kullanılan FRP sargısının elastisite modülü değerinin rijitlik ve dayanıma etkisi olduğu gözlenmiştir. Oluşturulan model deneysel çalışma sonuçları ile desteklenmiştir.

Fanning'in (2001) çalışmasında, sıradan betonarme kirişler ile art gerilmeli T kesitli kirişler için uygun nümerik modelleme stratejileri önerilmiştir. Beton için ANSYS'te bulunan ve gevrek malzemelerin üç eksenli nonlinear davranışını modelleyen *Solid65* elemanı kullanılarak model oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin nonlinear analizinden elde edilen yük-deplasman eğrileri ile deneysel yük-deplasman eğrileri karşılaştırılmıştır ve ikisinin paralellik izlediği görülmüştür.

Rahman ve ark. (2003) çalışmasında, ince betonarme plakların sonlu eleman yöntemi ile nonlinear analizi gerçekleştirilmiştir. Beton plak yapıların tasarımı ve analizinde çatlakların başladığı yerin önemi ifade edilmiştir. Plaklarda aydınlatma ve havalandırma için bırakılan boşluklara çok sık rastlanmasına rağmen tasarım ve analizinde eksikliklerin olduğu dile getirilmiştir. Beton plaklar için elastik çözümün bulunmamasından dolayı, böyle yapıların sonlu eleman modellemesine ihtiyaç olduğu belirtilmiştir. Çalışmada, farklı boyutlardaki boşluklara sahip plakların çatlama yükleri ve ezilme mekanizmaları araştırılmıştır. İki farklı eleman tipi kullanılmıştır. Birinci tipte, rötre, sünme, basınç ezilmesi ve çekme çatlağı gibi betonun nonlinear davranışını dikkate alan 'solid' eleman, diğeri ise nonlinear davranışı modellemeye yatkın olmayan 'shell' elemandır. Modeller boşluklu ve boşluksuz olarak iki ayrı grup halinde oluşturulmuştur. Sonlu eleman modelinin deplasman ve gerilme değerleri ile ince plaklar için sonlu şerit teorisi değerleri arasında uyumluluk gözlenmiştir. Çatlama yükünün boşluğun büyüklüğüne ve plağın kalınlığına bağlı olduğu belirtilmiştir. ANSYS 'in kabul ettiği William-Warnke beton kırılma modelinin betonarme yapıların nonlinear davranışını uygun bir şekilde modellediği ifade edilmiştir.

Erduran ve Yakut'un (2003) çalışması betonarme kolon elemanları için hasar eğrilerinin geliştirilmesi hakkındadır. ANSYS sonlu eleman programı kullanarak, betonarme kolonlarda hasar oluşturan etkilere ait parametreler geniş bir aralıkta araştırılmıştır. Nümerik yük-deplasman eğrileri 'pushover' analizinden elde edilmiştir. Beton için Kent ve Park modeli kullanılmıştır. Kolonlar, 8 düğüm noktalı *brick* elemanlar vasıtası ile modellenmiştir ve bunların kırılmaya ve ezilmeye yatkın olduğu kabulü yapılmıştır. Beton dayanımının, kolonun narinliğinin, eksenel yük

miktarının, boyuna ve enine donatı miktarının ve boyuna donatı akma dayanımının kolonun deformasyon kapasitesine etkisini tespit etmek amacıyla nonlinear analizler yapılmıştır. Kolonun deformasyon kapasitesini etkileyen en önemli parametrelerin; enine donatı miktarı, kolon narinliği ve boyuna donatının akma dayanımı olduğu tespit edilmiştir. Boyuna donatı miktarının ise yük taşıma kapasitesine etkisinin büyük olduğu, ancak kolonun deformasyon özelliğine etkisi olmadığı gözlenmiştir.

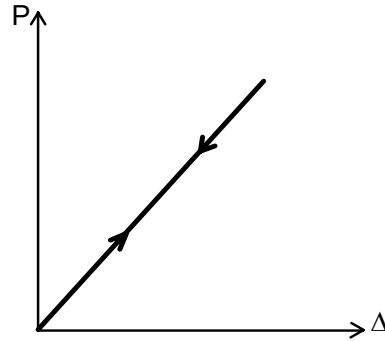
Kachlakev ve Miller'in (2001) çalışmasında, ANSYS programı kullanılarak kırılma ve nonlinear tepki hakkında sonlu eleman modelleri geliştirilmiştir. Kirişlerin; ilk çatlama yükleri, göçme yükleri ve göçme sırasındaki çatlak oluşum şekilleri araştırılmıştır. Horsetail Creek Köprüsü'nün lineer davranışı üzerine modeller geliştirilmiştir. Yükleme testlerinden elde edilen şekil değiştirmeler ile sonlu eleman analizinden hesaplanan şekil değiştirmeler karşılaştırılmıştır. Köprünün enine kirişlerine benzer özelliklerde, gerçekteki ile aynı kesit boyutlarına sahip dört adet kiriş test edilmiştir. Her bir kiriş farklı elemanlarla (FRP, CFRP, GFRP) güçlendirilmiştir. Düzlem betonarme kirişlerin ANSYS ve SAP2000 programlarından elde edilmiş çekme ve basınç gerilmeleri, şekil değiştirmeleri ve orta açıklıktaki deplasmanları karşılaştırılmıştır. Sonlu eleman modeli sonuçlarının lineer ve nonlinear çözümlerinin her ikisinin de test sonuçlarından daha rijit davrandığı görülmüştür. Sonlu eleman analizi ile modellenen, eğilmeye ve kaymaya karşı güçlendirilmiş kirişin yük taşıma kapasitesi, test edilmiş kirişinkinden %105 daha büyük bulunmuştur.

3. MALZEME DAVRANIŞININ MODELLENMESİ

Yükleme ve boşaltma eğrilerinin izledikleri yola göre malzemeler farklı gruplara ayrılmaktadır. Yapı sistemlerinde kullanılan gerçek malzemelere ait kuvvet-deplasman ilişkileri, burada bahsedilen malzeme davranışı gruplarındakilere yaklaşık olarak benzemektedir. Yapı sistemlerinin kuvvet-deplasman ilişkilerinin belirlenebilmesi için bazı kabuller yapılmış ve ideal malzemeler tanımlanmıştır.

3.1. İdeal Malzeme Kabulleri ¹

- *Lineer-elastik malzeme*: Yüklem ve boşaltma eğrilerinin çakıştığı malzemeye elastik malzeme, kuvvet-deplasman bağıntısının lineer olduğu elastik malzemeye ise lineer-elastik malzeme denilmektedir (Şekil 3.1).

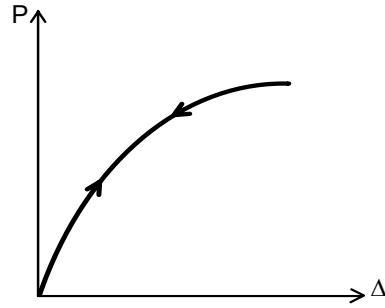


Şekil 3.1 Lineer elastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi

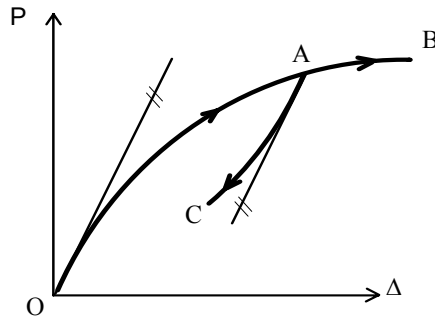
- *Nonlinear (Lineer olmayan) elastik malzeme*: Yüklem ve boşaltma eğrileri çakışan fakat kuvvet-deplasman ilişkisi nonlinear olan malzemelerdir (Şekil 3.2).

- *Elastoplastik malzeme*: Yüklem ve boşaltma eğrileri çakışmayan, fakat boşaltma eğrisinin başlangıç teğeti, yüklem eğrisinin başlangıç teğetine paralel olan malzemelerdir (Şekil 3.3).

¹ Açıklamalar sırasında Çakıroğlu ve Özer (1980) kaynağından faydalanılmıştır.



Şekil 3.2 Lineer olmayan elastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi

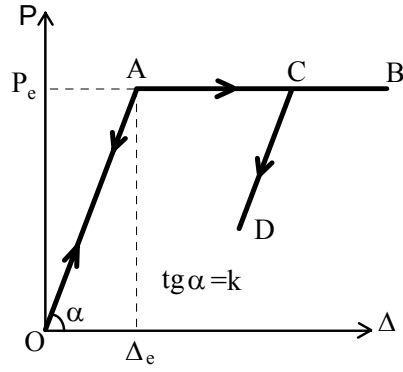


Şekil 3.3 Elastoplastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi

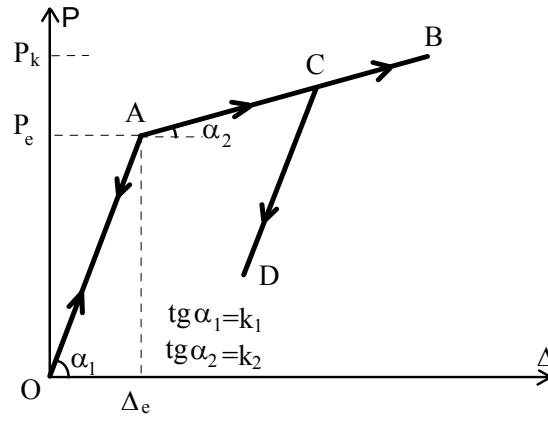
- *İdeal elastoplastik malzeme:* Yükleme eğrisinin iki doğru parçasından meydana geldiği kabul edilmiştir. Bu doğru parçaları, elastik yük değeri P_e aşıldıktan sonra, Δ eksenine paralel olarak devam eder. Boşaltma eğrisi ise elastik şekil değiştirme değeri Δ_e 'ye kadar olan kısımda yükleme eğrisi ile çakışırken, Δ_e değerini aşıttıktan sonra yükleme eğrisinin ilk bölümü olan OA doğrusuna paralel bir yol izler (Şekil 3.4).

- *Pekleşen ideal elastoplastik malzeme:* İdeal elastoplastik malzemeye göre kuvvetin P_e değerini aşıttıktan sonrada artış gösterdiği yani pekleşmenin olduğu malzemelerdir (Şekil 3.5).

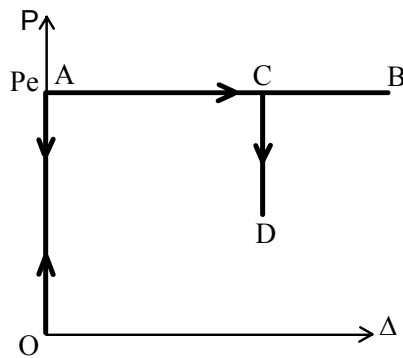
- *Rijit plastik malzeme:* Elastik şekil değiştirmelerin olmadığı bu tür malzemelerde boşaltma eğrisi yükün P_e değerini aşmadığı durumda yükleme eğrisi ile çakışırken, P_e değerini aşıttıktan sonra OA doğrusuna paralel bir yol izler (Şekil 3.6).



Şekil 3.4 İdeal elastoplastik malzeme kuvvet-deplasman ilişkisi

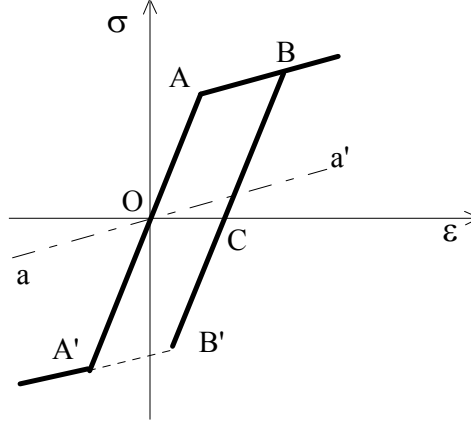


Şekil 3.5 Pekleşen ideal elastoplastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi



Şekil 3.6 Rijit plastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi

Lineer pekleşen bir malzeme için kinematik pekleşme grafiği Şekil (3.8)'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, $|BB'| = |AA'|$ olmaktadır ve elastik bölgenin merkezi aa' düz hattı boyunca taşınmıştır.



Şekil 3.8 Kinematik pekleşme gösteren malzemenin σ - ϵ ilişkisi

4. BETON VE BETONARME İÇİN MATEMATİKSEL MODELLER

Betonarmenin homojen bir malzeme olmaması yanında, farklı gerilme-birim deformasyon ilişkisine sahip iki malzeme olan beton ve donatı çeliğinin birlikte modellenmesi gerekmektedir. Betonda meydana gelen rötire ve sünme deformasyonlarından dolayı betonarme elemana ait gerilme ve deformasyonlar zamana bağlı değişmektedir. Betonarme elemanlarda görülen aderans, donatı sıyrılması, agrega kilitlenmesi (aggregate interlock) ve kaldırma etkisi (dowel action) gibi tesirlerin modellenmesi oldukça karmaşıktır. Bu nedenle bir betonarme elemanın modellenmesi sırasında genelde aderansın ya tam olduğu ya da aderansın hiç olmadığı kabulü yapılır. Agrega kilitlenmesi, yapısında çatlak bulunan bir betonarme elemandaki çatlağın her iki tarafındaki yüzeyler arasında bulunan kayma kuvvetinin meydana getirdiği taşıma ve transfer mekanizmasıdır. Aderans, donatı sıyrılması ve agrega kilitlenmesi etkilerinin modellenmesi için genellikle ilave sonlu elemanlara ihtiyaç vardır. Çelik ile beton arasındaki bağlantıyı sağlayacak olan bu elemanlar uzunluksuz yatay ve düşey yaylardan oluşturulabilir. Diğer bir zorluk ise betonun gerilme-birim deformasyon ilişkisinin doğrusal olmamasıdır. Gerilme veya kuvvet cinsinden ifade edilen *denge denklemleri* ile deformasyon cinsinden ifade edilen *uygunluk denklemleri* arasındaki bağlantı malzemenin gerilme-birim deformasyon ilişkisinden faydalanılarak kurulur. Gerilme-birim deformasyon arasındaki ilişki ne kadar doğru varsayılırsa sonuç o kadar gerçeğe yaklaşır. Matematiksel çözümü kolaylaştırmak için deneylerden elde edilen gerilme-birim deformasyon değerleri idealize edilerek matematiksel modeller oluşturulur.

4.1. Basınç Gerilmeleri Altındaki Sargılı ve Sargısız Beton İçin Malzeme Modelleri

Betonarme elemanların nonlinear analizi sırasında, beton malzemesine ait nonlinear σ - ϵ eğrisinin tanımlanması gerekmektedir. Basınç gerilmeleri için geliştirilen matematiksel modellerden en yaygın olarak kullanılanları; Hognestad, Geliştirilmiş Kent ve Park, Sheikh ve Üzümeri ile Saatçioğlu ve Razvi modelleridir. Hognestad

modeli dışındaki diğer modellerde etriye/sargı etkisi de dikkate alınmıştır. Bu çalışmada ANSYS'te oluşturulan modellerin bir kısmında sargılı betona ait malzeme davranışını kullanılırken, bir kısmında ise sargının dikkate alınmadığı Hognestad modeli kullanılmıştır.

Sheikh ve Üzümeri modeli ile Saatçioğlu ve Razvi modeli, sadece sargılı betonun σ - ε ilişkisi için tanımlanmıştır ve sargı nedeniyle dayanımın arttığı varsayılmıştır. Her iki modelde boyuna donatının konumu ve sargı donatısı düzeni dikkate alınmaktadır.

Thompson ve Park modelinde dinamik yükler altındaki tersinir-tekrarlanır yükleme davranışları ele alınmış, yükleme-boşaltma durumunda σ - ε eğrisi tanımlanmıştır.

4.1.1. Hognestad modeli ³

Bu çalışmada kullanılan modellerden biri olan Hognestad modeli sargısız betonun matematiksel modeli için geliştirilmiştir. Bu modelde ise σ - ε ilişkisi; $0-\varepsilon_{c0}$ arasında ikinci dereceden bir parabol, $\varepsilon_{c0}-\varepsilon_{cu}$ arasında ise bir doğru ile modellenmiştir Şekil (4.1). Maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalma;

$$\varepsilon_{c0} = 2 f_c / E_c \quad (4.1)$$

olarak ifade edilmiştir. $\varepsilon_{c0} = 0.002$ değeri alınabilir (Ersoy ve Özcebe 2001).

Modeldeki elastisite modülü E_c ;

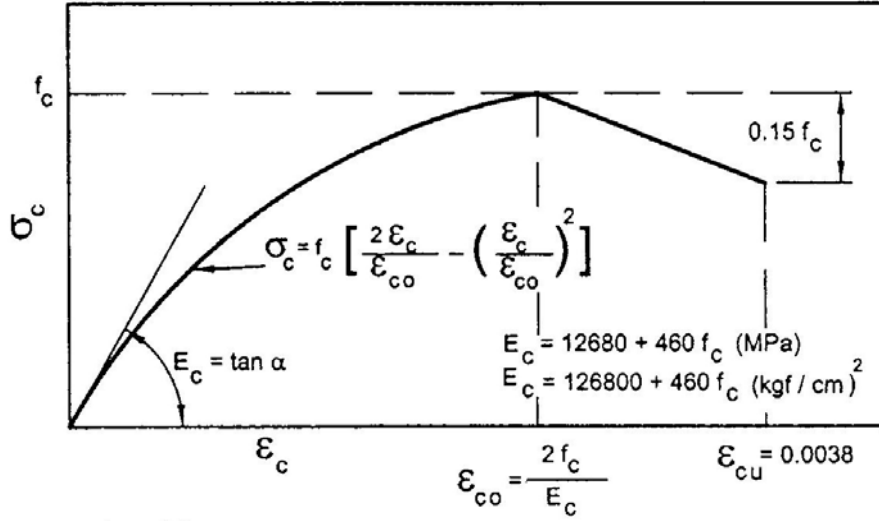
$$E_c = \tan \alpha = 12680 + 460f_c \text{ (MPa)} \quad (4.2)$$

olarak tanımlanmıştır.

³ Model ile ilgili açıklamalar Ersoy ve Özcebe'den (2001) alınmıştır.

Eğrinin birinci bölümü olan parabol, aşağıdaki denklem ile tanımlanmıştır.

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right] \quad (4.3)$$



Şekil 4.1. Hognestad malzeme modelinde σ - ε ilişkisi

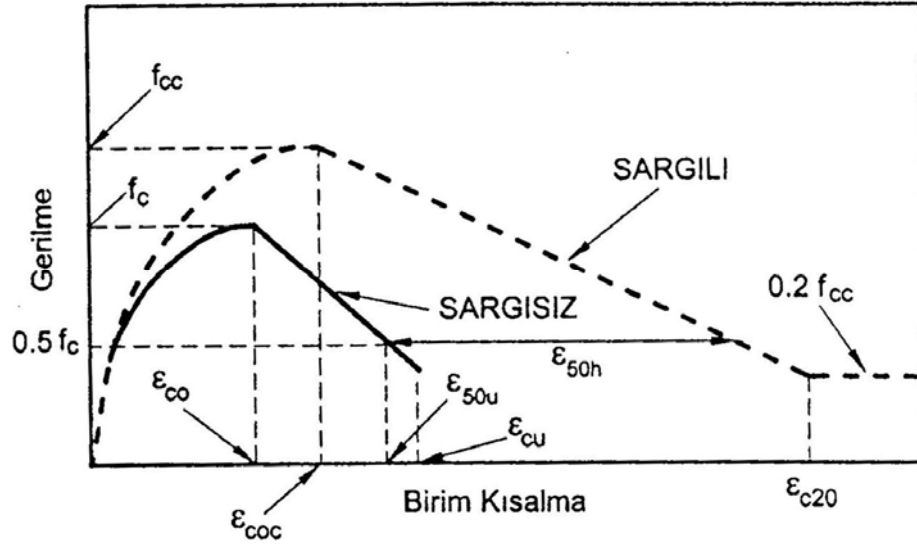
Betonun maksimum birim kısalması $\varepsilon_{cu} = 0.0038$, buna karşılık gelen gerilme değeri ise $0.85 f_c$ olarak verilmiştir. ε_{c0} ile ε_{cu} arasındaki bölgedeki gerilme değerlerini birleştiren doğru ile σ - ε ilişkisi verilmiştir.

4.1.2. Geliştirilmiş Kent ve Park modeli ⁴

Geliştirilmiş Kent ve Park modelinde sargılı ve sargısız beton için iki ayrı σ - ε eğrisi tanımlanmıştır. Bu modelde sargıdan dolayı dayanımın arttığı varsayılmıştır. Sargı

⁴ Model ile ilgili açıklamalar Ersoy ve Özcebe'den (2001) alınmıştır.

nedeni ile beton dayanımı f_c 'den f_{cc} 'ye maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalmanın ise ϵ_{co} 'dan ϵ_{coc} 'ye yükseldiği varsayılmaktadır. Gerek sargılı, gerekse sargısız beton için önerilen eğrilerin ilk bölümleri ikinci dereceden bir parabol iken, eğrilerin ikinci bölümleri gerilmenin azaldığını gösteren lineer çizgilerden meydana gelmektedir.



Şekil 4.2. Geliştirilmiş Kent ve Park malzeme modelinde σ - ϵ ilişkisi

Geliştirilmiş Kent ve Park modelinde σ - ϵ eğrilerini tanımlayan denklemler⁵:

Parabolik Eğri Bölgesi:

- Sargısız beton için:

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_{co}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (4.4)$$

ϵ_{co} , normal dayanımlı betonlar için yaklaşık 0.002 alınabilir.

- Sargılı beton için:

⁵ Denklemler ve simge açıklamaları Ersoy ve Özcebe'den (2001) alınmıştır.

$$\sigma_c = f_{cc} \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{coc}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{coc}} \right)^2 \right] \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_{coc} = K \cdot \varepsilon_{co} \quad (4.6)$$

Doğrusal Bölge:

- Sargısız beton için:

$$\sigma_c = f_c [1 - Z_u (\varepsilon_c - \varepsilon_{co})] \quad (4.7)$$

$$Z_u = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} - \varepsilon_{co}} \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0.285 f_c}{142 f_c - 1000} \geq \varepsilon_{co} \quad (4.9)$$

- Sargılı beton için:

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{ywk}}{f_c} \quad (4.10)$$

$$\sigma_c = f_{cc} [1 - Z_c (\varepsilon_c - \varepsilon_{coc})] \geq 0.2 f_{cc} \quad (4.11)$$

$$Z_c = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - \varepsilon_{coc}} \quad (4.12)$$

$$\varepsilon_{50h} = 0.75 \rho_s \left(\frac{b_k}{s} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.13)$$

f_c : Sargısız betonun basınç dayanımı. Genelde $f_c = f_{ck}$ alınır.

f_{cc} : Sargılı beton basınç dayanımı. $f_{cc} = K \cdot f_c$

ε_{coc} : Sargılı betonda maksimum gerilme altındaki birim deformasyon.

ε_{co} : Sargısız betonda maksimum gerilme altındaki birim deformasyon. Genelde

$\varepsilon_{co} = 0.002$ alınır.

Z_u, Z_c : Sırasıyla, sargısız ve sargılı betondaki σ - ε eğrilerinin doğrusal bölümünün boyutsuz eğimi

b_k : Etriye dışından etriye dışına ölçülen çekirdek beton alanının küçük boyutu (mm)

h_k : Etriye dışından etriye dışına ölçülen çekirdek beton alanının büyük boyutu (mm)

ρ_s : Sargı donatısı kesit alanı

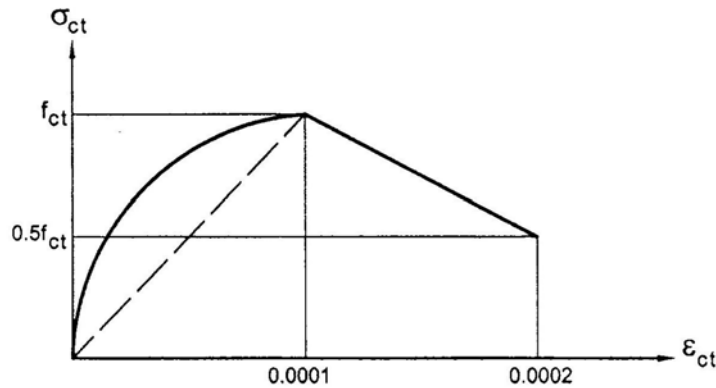
l_s : Kesitteki sargı donatısı ve çirozların toplam uzunluğu (mm)

f_{ywk} : Sargı donatısının minimum akma dayanımı (MPa)

s : Sargı donatısının aralığı (mm)

4.2. Çekme Gerilmeleri Altındaki Beton İçin Malzeme Modeli

Çekme için önerilen σ - ε ilişkisinde, betonun maksimum çekme gerilmesine karşılık gelen birim uzamasına kadar olan kısım, ikinci dereceden bir parabol ile (bazı problemlerde doğru olarak da kabul edilebilir), maksimum çekme gerilmesine karşılık gelen birim uzama ile maksimum birim uzama arasında ise bir doğru ile tanımlanmıştır (Şekil 4.3). Betonun maksimum birim uzaması $\varepsilon_{ct}=0.0002$, buna karşılık gelen gerilme değeri ise $0.5 f_{ct}$ olarak verilmiştir. (Ersoy ve Özcebe, 2001)



Şekil 4.3 Çekme gerilmeleri için σ - ε ilişkisi

5. ANSYS İLE BETON VE BETONARME MODELİ

5.1. Betonarme Malzeme Modeli ⁶

ANSYS betonda çok eksenli gerilme durumu için Willam ve Warnke (1975) tarafından geliştirilmiş kırılma modelini kullanmaktadır. Bu kriter aşağıdaki biçimde ifade edilmiştir:

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \quad (5.1)$$

F: Asal gerilme durumunun bir fonksiyonu ($\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}$)

S: Beton malzeme çizelgesinde beş parametre ($f_t, f_c, f_{cb}, f_1, f_2$) ve asal gerilme terimleriyle ifade edilen kırılma yüzeyi

f_c : Tek eksenli basınç dayanımı

$\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}$: Asal gerilmeler

Eğer (5.1) denklemi sağlanmazsa, ezilme ve çatlama meydana gelmeyecektir. Aksi takdirde malzeme ya ezilir ya da çatlar. Eğer bütün gerilmeler basınç ise ezilme meydana gelir, ancak, asal gerilmelerden herhangi biri çekme ise malzeme çatlayacaktır.

Hem kırılma yüzeyini tanımlamak için, hem de ortamdaki hidrostatik gerilme durumunu tanımlamak için toplam beş dayanım parametresine (her biri sıcaklığa bağlı olarak tanımlanabilir) ihtiyaç duyulur. Bu parametreler malzeme çizelgesinde verilmelidir. Bu çizelge *concrete* menüsü veya TB,CONCR komutu yardımıyla tanımlanabilir.

⁶ Açıklamalar için ingilizce olarak hazırlanmış olan Ansys (2003) kaynağından faydalanılmıştır.

Çizelge 5.1 Beton Malzeme Tanım Çizelgesi

Sembol	Açıklama
f_t	Tek eksenli çekme dayanımı
f_c	Tek eksenli basınç dayanımı
f_{cb}	İki eksenli basınç dayanımı
σ_h^a	Ortamdaki hidrostatik gerilme durumu
f_1	Hidrostatik gerilme durumuna (σ_h^a) eklenecek olan iki eksenli basınç durumu için basınç dayanımı
f_2	Hidrostatik gerilme durumuna (σ_h^a) eklenecek olan tek eksenli basınç durumu için basınç dayanımı

Kırılma yüzeyinin en az iki sabit (f_t, f_c) ile de tanımlanması mümkündür. Diğer üç sabit için ANSYS şu değerleri varsayar:

$$f_{cb} = 1.2 f_c \quad (5.2)$$

$$f_1 = 1.45 f_c \quad (5.3)$$

$$f_2 = 1.725 f_c \quad (5.4)$$

Bu varsayılan değerler, sadece denklem (5.5) şartının sağlandığı gerilme durumları için geçerlidir. Eğer hidrostatik gerilme durumu bu şartı sağlamazsa, kullanıcının bu parametreleri kendisinin tanımlaması gereklidir.

$$\sigma_h \leq \sqrt{3} f_c \quad (5.5)$$

$$[\sigma_h : \text{hidrostatik gerilme durumu} = \frac{1}{3} (\sigma_{xp} + \sigma_{yp} + \sigma_{zp})] \quad (5.6)$$

Hem F fonksiyonu hem de S kırılma yüzeyi $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ifadeleriyle gösterilen asal gerilme terimleri cinsinden ifade edilir. Bu asal gerilmeler:

$$\sigma_1 : \max (\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}) \quad (5.7)$$

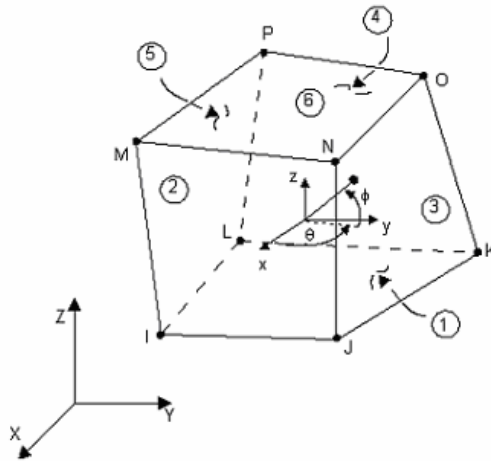
$$\sigma_3 : \min (\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}) \quad (5.8)$$

ve $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ tür. Betonun kırılma hali 4 grupta toplanabilir:

1. $0 \geq \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (basınç-basınç- basınç)
2. $\sigma_1 \geq 0 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (çekme- basınç- basınç)
3. $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0 \geq \sigma_3$ (çekme-çekme- basınç)
4. $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ (çekme-çekme-çekme)

5.2. SOLID65-ANSYS Betonarme Elemanı ⁷

ANSYS beton ve betonarmenin modellenmesi için, 8 düğümlü bir hacimsel (solid) eleman olan *Solid65* elemanını geliştirmiştir. Bu elemanın, üç eksen (x, y, z) doğrultusunda birer olmak üzere, her bir düğümünde toplam üç adet serbestlik derecesi vardır. Eleman, plastik deformasyon yapma, ezilme, sünme ve birbirine dik üç eksende kırılma özelliklerine sahiptir. Bir *Solid65* elemanın genel geometrisi ve düğüm noktalarının yerleşimi Şekil (5.1)'de görülmektedir.



Şekil 5.1 Üç boyutlu *Solid65* eleman modeli

⁷ Açıklamalar için İngilizce olarak hazırlanmış olan ANSYS (2003) kaynağından faydalanılmıştır.

Solid65'e ait varsayımlar ve sınırlamalar ise şöyledir:

- 1- Her bir entegrasyon noktasında birbirine dik üç eksenle çatlamaya izin verilir
- 2- Entegrasyon noktasında çatlama meydana geldiğinde; çatlama olayı malzeme özelliklerinin ayarlanması yoluyla modellenmiştir.
- 3- Beton malzemesi başlangıçta izotropik varsayılmıştır.
- 4- Elemanın donatı bulundurma özelliği (betonarme eleman) kullanıldığında, donatının eleman boyunca dağınık (*smeared*) olduğu varsayılır.
- 5- Ezilmeye ve çatlamaya ilave olarak beton; en yaygın olarak kullanılan Drucker-Prager kırılma kriteri ile plastisiteye uğrayabilir.

Beton malzemesi için nonlinear inelastiklik veriler sırasıyla şöyledir:

- 1- Kapalı çatlaklar için kayma transfer katsayısı
- 2- Açık çatlaklar için kayma transfer katsayısı
- 3- Tek eksenli çekme dayanımı
- 4- Tek eksenli basınç dayanımı
- 5- İki eksenli basınç dayanımı
- 6- 7 ve 8 numaralı sabitler ile kullanılmak üzere hidrostatik gerilme durumu
- 7- Hidrostatik gerilme durumu altında iki eksenli basınç dayanımı
- 8- Hidrostatik gerilme durumu altında tek eksenli basınç dayanımı

Yukarıdaki verilerden 1-2 numaralı veri değerlerinin sıfır verilmesi halinde kesme kuvveti transferinin olmadığı kabul edilir. 3-4 numaralı değerlere -1 verilmesi halinde ise eleman sırasıyla çatlama ve ezilme yeteneğini kaybeder. Bu komutta 1-4 arası değerlerin kullanıcı tarafından verilmesi durumunda 5-8 arası değerleri için ANSYS varsayılan değerleri kullanır. 5-8 arası değerlerden herhangi birinin verilmesi halinde diğer bütün değerlerin de kullanıcı tarafından girilmesi zorunludur.

6. ANSYS PROGRAMI İLE SONLU ELEMAN ANALİZİ

Bu bölümde, ANSYS programı ile modellemeye ilişkin çeşitli genel bilgiler verilecektir. Burada amaç, 7. Bölümde analizi yapılacak örnek ANSYS modellerinin oluşturulması için gerekli önbilginin verilmesidir. Daha ayrıntılı modelleme bilgisi için ANSYS kullanım kılavuzlarına ve program içerisindeki yardım menüsüne başvurulması gerekmektedir.

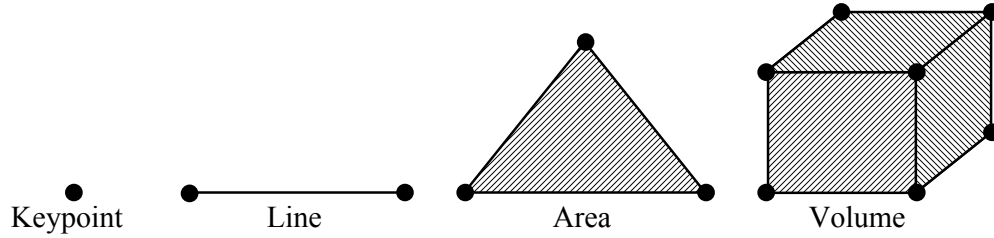
Sonlu elemanlar modeli aslında fiziksel sistemin matematiksel bir modelini oluşturma demektir. Bu model; fiziksel sistemin geometrisini düğüm noktaları ve elemanlar ile oluşturmak, sistemde kullanılan malzemelere ait özellikleri, deplasman sınır şartlarını ve diğer özellikleri kapsar.

Modellemeye başlamadan önce; fiziksel sistemin geometrisinin tanımlanması, modellenmenin iki boyutlu mu yoksa üç boyutlu mu olacağına karar verilmesi, bunun için simetri özelliklerinden yararlanılıp yararlanılamayacağının tespit edilmesi, sınır şartları ve yüklerin önceden belirlenmesi, hangi tür analize ihtiyaç duyulduğunun önceden kararlaştırılması gereklidir.

6.1. Bir Modelin Oluşturulması (*Modelling* menüsü)

Modelleme için ANSYS'te çeşitli seçenekler mevcuttur. Düğüm ve düğümlere bağlı elemanlardan oluşan bir sonlu eleman modeli, önce düğümlerin, sonra da elemanların oluşturulmasıyla meydana getirilebilir. Her bir düğüm noktasına ait global koordinatlar verilerek düğüm noktaları oluşturulabildiği gibi, otomatik düğüm noktası türetme imkanı da vardır. ANSYS'te, düğüm noktası ve elemanların otomatik türetilmesi (generation) için çok sayıda faydalı seçenekler vardır. Bunun yanında, karmaşık şekillerin daha kısa zamanda modellenmesi için çeşitli yardımcı geometrik nesneler mevcuttur. Bu nesneler en küçük birimden büyük birime sırasıyla: *keypoint*, *line*, *area* ve *volume*'dur. Bir *line* iki *keypoint* ve bunları birbirine

bağlayan bir doğrudan meydana gelir. Bir *area*, en az üç *line*'dan oluşan kapalı bir yüzeydir. Bir *volume* ise en az dört *area*'dan oluşan kapalı bir hacimdir (Şekil 6.1).



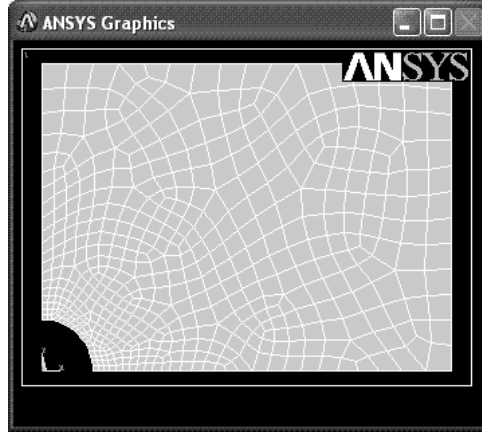
Şekil 6.1 ANSYS model oluşturma nesneleri

Yukarıda bahsedilen ANSYS nesneleri, model geometrisini oluşturmak için kullanılır ve oluşturulan geometrik şeklin sonlu eleman bölümlemesinin gerçekleştirilmesi yani *mesh* edilmesi ile düğüm noktaları ve elemanlar oluşturulur. *Mesh* işlemi; *line*, *area* ve *volume* nesnelerini uygun sonlu eleman nesnelere dönüştürür. Örneğin, bir *line*'in mesh edilmesinden ancak tek boyutlu bir eleman, bir *volume*'un mesh edilmesinden ancak üç boyutlu bir eleman oluşturulabilir. Mesh sonrası oluşacak elemanların uzunluklarının ve/veya diğer boyutlarının belirlenmesi için *SizeCtrls* menüsünden modele uygun olan bölümlendirme seçeneği seçilmelidir. *ManuelSize* menüsünde bölümlendirilmesi istenen nesne türü belirlenir. Bu çalışmadaki örnek modeller için *line*'ların bölümlendirilmesi öngörülmüştür. Bir *volume*'u çevreleyen *line*'ların bölümlendirilmesi ile, *volume*'da oluşturulacak hacimsel elemanların sayısı da belirlenmiş olmaktadır. *Line*'ların bölümlendirilmesi için ister *line*'in bölümlenme sayısı, ister her bir bölümün uzunluğu verilebilir.

Elemanlara bölme işlemi iki şekilde gerçekleştirilebilir:

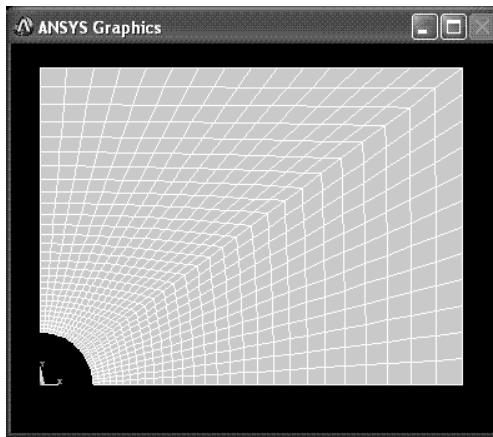
1. Serbest elemanlara bölme
2. Planlanmış elemanlara bölme

Serbest elemanlara bölme işleminde eleman şekli, elemanlara bölünecek olan modelin geometrisine ve kullanılan elemanın alabileceği şekillere bağlı olarak ANSYS tarafından en düşük eleman yoğunluğuna sahip olacak şekilde otomatik olarak ayarlanır. (Şekil 6.2)



Şekil 6.2 Serbest elemanlara bölünmüş bir sonlu eleman modeli

Halbuki aynı alanı modelin analiz sonrası sonuç dağılımını da tahmin ederek daha uygun bir tarzı yansıtacak şekilde dörtgenlerden oluşan, yani planlanmış şekilde elemanlara bölmek istenilirse (Şekil 6.3)' de ki gibi mesh tercih edilir.



Şekil 6.3 Planlanmış elemanlara bölünmüş bir sonlu eleman modeli

Modelleme sırasında karmaşık geometriye sahip şekillerin oluşturulabilmesi için süperpozisyon prensibinden faydalanılabilmektedir. Bu amaçla, ANSYS, çeşitli *boolean* (mantık) işlemleri sunmaktadır. Bunlardan bazıları, *divide*, *subtract* ve *glue*'dur. Örneğin, *divide* işlemi ile bir *volume* bir *area* ile iki ayrı *volume*'e bölünebilir, *subtract* işlemi ile birbiri içine girmiş iki *volume*'dan biri diğerinden çıkartılabilir ve *glue* işlemi ile de iki ayrı nesnenin birleşme noktaları/arayüzeyleri ortak hale getirilerek mesh işlemi sonrasında bu ortak noktalarda tek ortak düğüm oluşması sağlanabilir.

Modelleme için gerekli olan koordinatlar, kesit ve malzeme özellikleri gibi verilerin ANSYS'te tanımlanması sırasında herhangi bir birim sistemi seçmek gerekli değildir. Bunun yerine kullanıcı, verilerin birimleri arasındaki uyumu gözeterek kendi seçeceği herhangi bir birim sistemini kullanmakta serbest bırakılmıştır.

6.2. Eleman Tiplerinin Belirlenmesi (*Element Type* menüsü)

Bir modelde kullanılacak eleman tipleri önceden tanımlanmalıdır. ANSYS kullanılan eleman tiplerine bir numara atamaktadır. Bir modelde, aynı eleman tipi bir defadan fazla tanımlanabilir. Bu genellikle aynı eleman tipinin farklı eleman tipi seçenekleri ile modelin farklı bölgelerinde kullanılması amacıyla uygulanır. ANSYS 8.0 versiyonunda 150 farklı elemandan oluşan bir eleman tipi kütüphanesi mevcuttur. Bu elemanlar genel olarak şu analiz tipleri için hazırlanmışlardır: yapısal analiz, termal (ısı) analiz, elektromanyetik analiz ve hesaplamalı akışkanlar mekaniği analizi, vb. Yapı analizinde kullanılan eleman tiplerinden en yaygın kullanılanları arasında *beam*, *plane*, *shell*, *solid* ve *link* elemanlar yer almaktadır. ANSYS'te bahsi geçen elemanların çok çeşitli biçimleri (örneğin 2-boyutlu, 3-boyutlu, lineer, nonlineer vb.) mevcuttur. Genel olarak elemanlar için 4 şekil geçerlidir. Bunlar nokta, çizgi, alan ve hacim'dir. Bir nokta eleman tipik olarak bir düğüm noktası ile belirlenen bir elemandır. Örneğin kütle (*mass*) eleman noktasal şekle sahip bir elemandır. Çizgi eleman, bir çizgi veya yay ile tanımlanan ve iki veya üç düğüm noktasını birbirine bağlayan bir elemandır. Alan eleman, üçgen veya dörtgen şekle sahip bir katı eleman

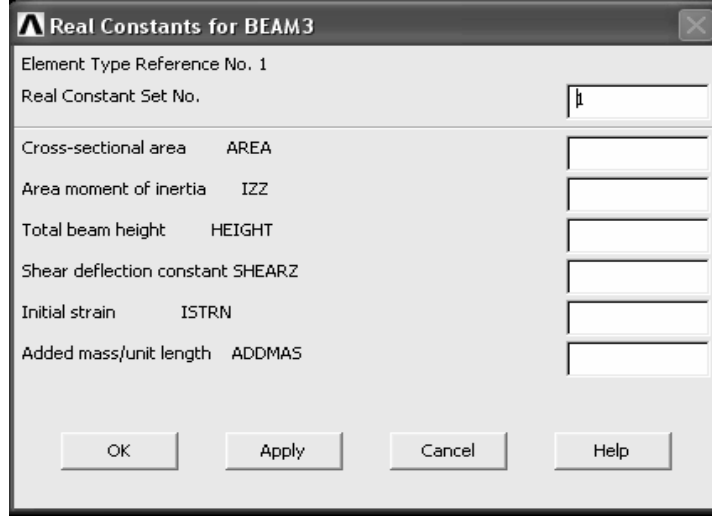
veya bir kabuk (*shell*) elemandır. Hacim eleman ise, dörtkenarlı (*tetrahedral*) veya tuğla (*brick*) şekle sahip ve genellikle 3 boyutlu olan katı elemandır.

Hemen her eleman tipine ait çeşitli anahtar seçenekleri (Key Options) vardır. Bu seçenekler, elemanlara ait bazı özelliklerin aktif hale getirilmesi veya iptal edilmesi için kullanılan düğmeler gibidirler. Kimi zaman analiz sırasında elemanın davranışını, kimi zaman ise elemana ait verilerin hesaplanma ve sonuç çıktılarının nasıl olacağını belirler. Anahtar seçenekler KEYOPT(1), KEYOPT(2),... şeklinde numaralandırılmıştır ve her bir anahtar seçenek için bir değer belirlemek mümkündür.

Bu çalışmada betonarme modeli için geliştirilmiş olan eleman tipi *solid65* kullanılmıştır..

6.3. Eleman Sabitlerinin Belirlenmesi (*Real Constants* menüsü)

Eleman rijitlik matrislerinin hesaplanmasında gerekli olacak, ve düğüm noktaları yerleşimi veya malzeme özellikleri verileri haricindeki tanımlamalara eleman gerçek sabitleri denilmiştir. Bir model için oluşturulmuş eleman tiplerine ait kesit özellikleri (enkesit alanı, kesit yüksekliği, atalet momentleri, vb.) ve kuvvet-deplasman ilişkisi (örneğin, nonlinear yay davranışını tanımlamak amacıyla) gibi eleman sabitleri, *Real Constants* menüsü yardımıyla tanımlanabilir. Her bir eleman sabitine bir numara verilir. Bir eleman tipi için birden fazla eleman sabiti tanımlanması mümkündür.



Şekil 6.4 Bir kiriş eleman tipi için gerçek sabitler giriş menüsü

6.4. Malzeme Özellikleri (*Material Props* menüsü)

Analiz sırasında gerekli her malzeme türü için bir malzeme modeli oluşturulmalıdır. Her malzeme modeline bir numara verilmelidir. Her bir eleman tipi için çeşitli malzeme özellikleri mevcuttur. Lineer-elastik bir malzeme için izotropik, ortotropik veya anizotropik tanımlamalarından uygun olanı seçilebilir. Nonlineer bir malzeme için ise, elastik, inelastik veya viskoelastik davranış seçenekleri mevcuttur. Malzemeye ait plastik davranışın tanımlanmasında bir kaç seçenek vardır. Bunlardan bazıları:

- BISO(*Bilinear Isotropic Hardening*)
- MISO(*Multilinear Isotropic Hardening*)
- BKIN (*Bilinear Kinematic Hardening*)
- MKIN (*Multilinear Kinematic Hardening*)

Bilinear modellerde gerilme ile birim deformasyon arasındaki ilişki iki doğru ile ifade edilirken, *multilinear* modellerde ikiden fazla doğru ile idealize edilmektedir. *Isotropic* ve *kinematic hardening* hakkında detaylı bilgi Bölüm 3'te verilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, tanımlanan eğrinin ilk noktası için tespit edilen elastisite modülü/doğru eğimi ile lineer malzeme modelinde girilen elastisite

modülü (bu değer nonlinear analiz için de verilmek zorundadır) değerinin aynı olması gerektiğidir. Malzeme özelliklerinin ısıya bağlı değişimi söz konusu ise, sıcaklık ve ilgili malzeme sabiti arasındaki ilişkinin verilmesi mümkündür.

ANSYS programında Drucker-Prager malzeme modeli üç parametre ile tanımlanır. Bunlar, kohezyon değeri(sıfırdan büyük olmalı), iç sürtünme açısı ve genleşme açısıdır. Akmadan dolayı malzeme hacminde meydana gelen genleşmenin miktarı genleşme açısı ile kontrol edilebilir. Eğer genleşme 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 genleşme 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: Genleşme açısı.

Belirlenen malzeme özellikleri ve malzeme modeli ile bu malzeme modelini kullanan elemanın tanımlanmış davranışı arasındaki ilişki çok önemlidir. Örneğin, bir nonlinear malzeme modelini desteklemeyen bir eleman tipi, nonlinear bir malzeme modelini kullanmaya çalışırsa, eleman kendisinden beklenen davranışı göstermeyecektir.

Bunların yanında, kütle yoğunluğu (density) ve ısı genleşme katsayısı, sürtünme katsayısı ve sönümlenme katsayısı gibi malzeme sabitleri de gerektiğinde verilebilir. İnelastik malzeme davranışı ve bu davranışın tanımlanması için gerekli sabitlerin verilmesi konuları Bölüm 7’deki örnek uygulamalar içinde ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Malzeme özelliklerinin girilmesi; seçilen malzemenin lineer ya da nonlinear olmasına bağlıdır. Lineer malzeme özelliklerinde malzemeye ait girilen değerler sabit ya da sıcaklığa bağlı olarak girilir. Örnek olarak; Elastisite modülü, yoğunluk, ısı genleşme katsayısı, Poisson oranı, ısı iletkenlik katsayısı değerleri verilebilir. Nonlinear malzeme özellikleri ise genelde çizelge şeklinde; plastisite (farklı yumuşama kanunları için gerilme-birim deformasyon eğrisi), sünme, genleşme, hiperelastik malzeme verileri olarak girilir. Verilen nonlinear özellikler anizotropik malzeme için ise; bu tip malzemeler farklı doğrultularda farklı davranışa sahip olduğu için matris formunda girilir.

6.5. Sınır Koşulları ve Dış Yükler (*Define Loads* menüsü)

ANSYS'te bir modelin mesnet şartlarını tanımlamak; ilgili düğüm noktalarına deplasman (dönmeler de dahil) yüklemek ile mümkündür. İlgili düğüm noktaları seçilerek hangi deplasman engellendiyse, o deplasman değeri sıfır olarak verilir. Sıfırdan farklı deplasmanlar ise deplasman yüklemesi olarak değerlendirilir. Deplasmanlar düğümlere atanabildiği gibi, *line*, *area*, *keypoint* gibi geometrik nesnelere de atanabilir. Ancak, bu deplasmanların analiz sırasında dikkate alınması için sonlu eleman modeline transfer edilmesi gereklidir.

Herhangi bir kuvvet/moment şeklindeki dış yük de, benzer şekilde düğümlere veya *keypoint*'lere atanabilir. *Keypoint* yüklemeleri sonlu eleman modeline transfer edilmelidir. Basınç, sıcaklık değişimi ve atalet kuvvetleri de eleman düğümleri veya elemanlar ile geometrik nesnelere yüklenebilmektedir.

Üç boyutlu model yüklemeleri sırasında, gerçek hayatta olduğu gibi, noktasal yüklerin belirli bir bölgeye yayılması, gerilme yığılmalarını ve bunlardan doğabilecek lokal göçmeleri engelleyecektir. Bu çalışmada ele alınan örnek uygulama için de benzer bir yöntem takip edilmiştir.

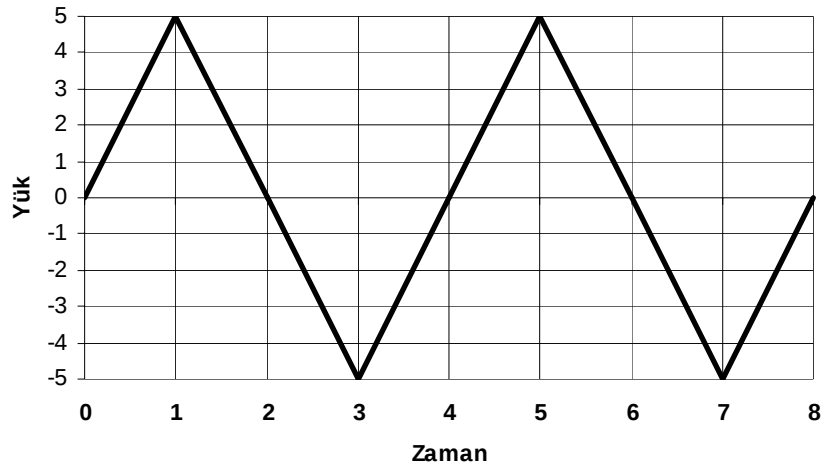
6.5.1. Zamana bağılı yüklemeler

Yüklemeler, ister statik isterse dinamik bir analiz için zaman-yük geçmişi (time-load history) şeklinde uygulanabilir. Bunun için yük adımı/virtüel zaman ve buna karşılık gelen yük bir çizelge biçiminde hazırlanıp, bu çizelge istenen nokta/noktalara yüklenebilir.

Örnek bir yükleme dosyası Şekil 6.5'te verilen zaman-yük değer çiftlerinden oluşturulabilir. Yükleme zamanı gerçek zaman olmak zorunda değildir ve yüklemenin gerçekleşeceği bir adım numarası olarak da varsayılabilir. Yükün birimi ise yükleme çeşidine göre farklılık gösterebilir. Bu zamana bağlı yükleme düğüm noktalarına etkiyen kuvvet veya deplasman olabilir. Kuvvet veya deplasmanın birimi ise modelde kullanılan malzeme özellikleri ve uzunluk birimleriyle uyumlu olmalıdır.

Zaman Yük

0	0
1	5
2	0
3	-5
4	0
5	5
6	0
7	-5
8	0



Şekil 6.5 Zik-zak yükleme için dosyası ve zaman-yük grafiği

Veriler veri dosyasına yazılırken araya boşluk konularak ayrılabilir. Bu veri dosyası daha sonra notepad gibi bir yazım programı ile kaydedilir. ANSYS modeline bu 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 dosyanın konumu seçilir ve başlık satırı sayısı belirtilir. Başlık satırı verilerden böylece ayırt edilmiş olur.

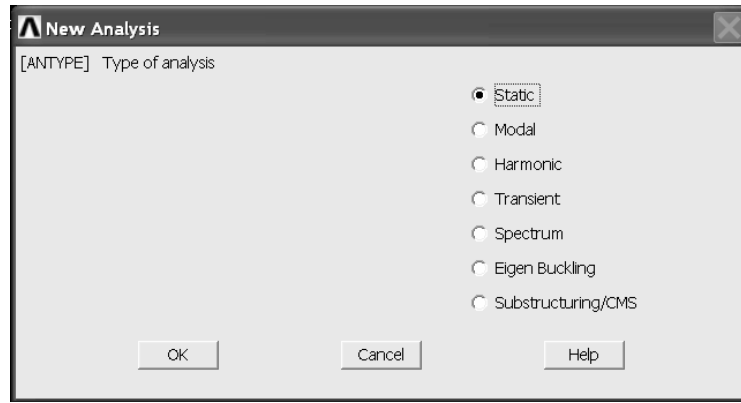
Deneysel olarak bir çerçeveye tersinir tekrarlanır yükleme uygulanırken, çerçevenin aynı ucuna hem itme hem çekme uygulanamaz, bunun yerine bir ucunda itme uygulandıktan sonra diğer uçundan ters yönde itme uygulanarak çekme etkisi oluşturulur. Böylece çerçeve her iki yöne hareket eder ve sadece itme kuvvetleri uygulanmış olur. Ayrıca bir deney sırasında yükün bir nokta yerine belirli bir alana yayılı olarak uygulanması olayının sonlu eleman modeline uygulanacak yük için de aynen geçerli olacağı görülmüştür. Teorik olarak üç boyutlu bir modele noktasal bir yük uygulamak mümkün olsa da, bu şekil bir yükleme istenmeyen sonuçlar doğuracaktır. Bu yüzden yük ister kuvvet olsun isterse deplasman olsun, eleman yüzeyleri üzerine veya düğüm noktaları grubuna uygulanmalıdır. Dış kuvvet yükleri düğüm noktalarına tek tek uygulanabildiği gibi eleman yüzeyleri üzerine yayılı olarak da uygulanabilir. Tersinir-tekrarlanır bir yüklemenin ANSYS modeline uygulanması için farklı yöntemler kullanılabilir.

Çerçevenin en tepedeki düğüm noktalarına Şekil (6.5)'de gösterilen yüklemeye benzer bir tersinir-tekrarlanır yük direk olarak uygulanabilir. Ancak bu durumda, çerçevenin tüm üst düğümlerinin aynı deplasmanı yaptığı varsayılmış olacaktır. Bunun yerine çerçevenin bir ucuna pozitif bir yükleme yapılır, böylece çerçeve itilmiş olur. Daha sonra *Solution* menüsünü terk etmeden, çerçevenin aynı ucuna sıfır yüklemesi yapılır. Ardından yine *Solution* menüsünü terk etmeden, çerçevenin diğer ucuna yine çerçevede itme tesiri oluşturacak şekilde ve önceki yüklemenin ters yönünde yükleme yapılır. Ve bu işlem her yükleme-boşaltma için tekrarlanır.

6.6. Analiz

ANSYS programı ile lineer ve nonlineer yapı analizi yapılabilmektedir. Analiz tipi modelde kullanılan malzeme modeline ve eleman tipine bağlıdır. Nonlineer bir malzeme tanımının yapılması analizi nonlineer yapacaktır. Ayrıca rijitliği değişken

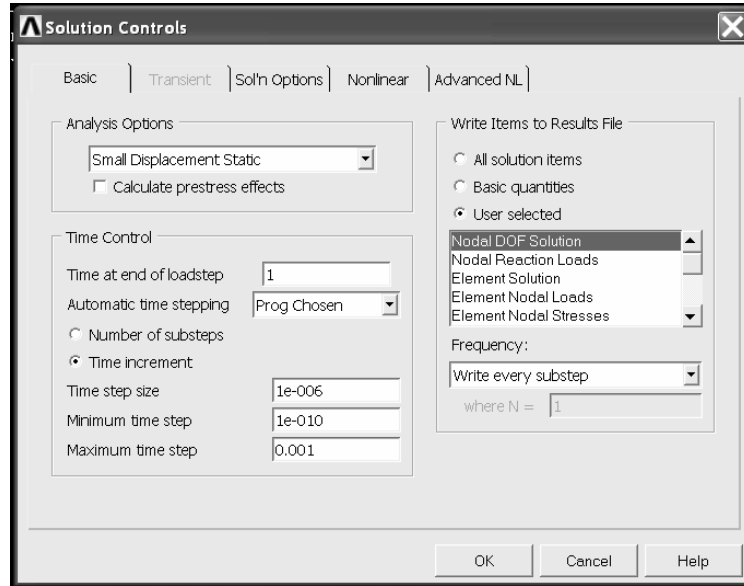
elemanlar tanımlamak (Örneğin: *contact* eleman) da analizi nonlinear hale getirir. Geometrik nonlinearliğin dikkate alınması analiz çözüm seçenekleri (*Solution Controls*) menüsünden ayarlanabilir. Analizler ayrıca Statik, Modal, Dinamik (*Transient Dynamic*) vs. olarak da farklılık gösterir. Lineer veya nonlinear olan bir Statik veya bir Dinamik analiz yapmak mümkündür. Yeni bir analize başlarken, yapılacak analiz tipi *Solution* $\Rightarrow$ *Analysis Type* $\Rightarrow$ *New Analysis* menüsü aracılığıyla belirlenebilir (Şekil 6.6).



Şekil 6.6 ANSYS programı yeni analiz seçenekleri menüsü

Analiz ile ilgili çeşitli seçenekler için *Solution* $\Rightarrow$ *Analysis Type* $\Rightarrow$ *Sol'n Controls* menüsü kullanılır (Şekil 6.7). Bu menü ile analizde "*Large Displacement*" seçeneği seçilerek geometrik nonlinearlik dikkate alınabilir. Zaman kontrolü, hem statik hem de dinamik analiz için tanımlanabilir. Lineer statik bir analizde zaman adımları gereksizdir. Nonlinear statik analizde ise zaman adımları yükleme aralıklarını tanımlar. Nonlinear dinamik analizde (*Nonlinear Transient Dynamics*), dinamik denge denklemleri kullanılır, dolayısıyla kütle, hız ve ivme gibi dinamik parametreler analiz sırasında dikkate alınmış olur. Aynı menü yardımıyla sonuç dosyasında yer alması istenilen veri grupları ve bu veri gruplarının hangi sıklıkla dosyaya kaydedileceği belirlenir. Çözüm sırasında kullanılacak denklem sistemi çözüm yöntemi (*Sparse Direct, Iterative* vs.), Nonlinear döngüye ait çeşitli seçenekler ve yakınsama kriterleri (*convergence criteria*) bu menü aracılığıyla verilebilir. Kullanılacak Nonlinear analiz prosedürü (*Full Newton-Raphson, Modified*

Newton-Raphson, Initial Stiffness vs.) ise yalnızca ilgili komut yardımıyla belirlenebilir, bunun için mevcut bir menü yoktur.



Şekil 6.7 *Solution Controls* menüsü

6.6.1. Statik analiz

Bu çalışmada nonlinear analiz kullanıldığından nonlinear statik analiz prosedüründen bahsedilecektir. Geometrik nonlinearlığı dikkate almak için *Large Displacement Static*, ihmal etmek için ise *Small Displacement Static* analiz kullanılır. Malzeme nonlinearlığı malzeme modeli oluşturulması sırasında tanımlanır.

Bir analizde birden fazla Yük Adımı (*Load Step*) bulunabilir. Her bir yük adımında, yükün başlangıç değerinden itibaren belirli artış adımları (*substep*) ile yükleme yapılır (Linear bir analizde 1 yük artış adımı yeterlidir). Artış adımları zamana bağlı olarak, *zaman adımı* veya *artış adımı* sayısı olarak verilebilir.

- Zamana bağlı yük artışı verilirken;

Time step size (Zaman adımı büyüklüğü): Yük adımının son süresine (*Time at end of load step*) hangi zaman artışıyla ilerleneceğini belirler.

Minimum time step (En küçük zaman adımı büyüklüğü): Zaman adımlarının otomatik olarak ayarlanması durumunda, program tarafından belirlenebilecek en küçük zaman adımı.

Maximum time step (En büyük zaman adımı büyüklüğü): Zaman adımlarının otomatik olarak ayarlanması durumunda, program tarafından belirlenebilecek en büyük zaman adımı değerleri belirlenmelidir.

- Yük artışı adımı sayısına bağlı tanımlamada;

Number of substeps: Artış adımı sayısı

Max. num. of substeps: Maksimum artış adımı sayısı (Otomatik adım ayarı kullanılması durumunda)

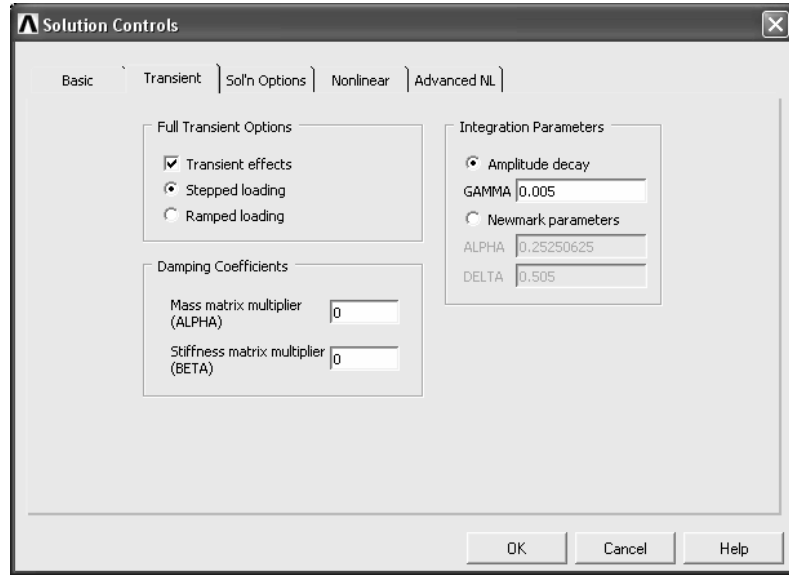
Min. num. of substeps: Minimum artış adımı sayısı (Otomatik adım ayarı kullanılması durumunda)

Zamana bağlı artış adımı tanımlanması dinamik analiz yapılacağı anlamına gelmez. Bir statik analiz için, zaman adımı yük artış adımı olarak düşünülmektedir.

6.6.2. Dinamik (transient) analiz

Dinamik analiz yapılacaksa *New Analysis* $\Rightarrow$ *Transient* seçeneği seçilir. Daha sonra ne tür dinamik analiz yapılacağı belirlenir. *Sol'n Controls* menüsünde geometrik nonlineerliğin dikkate alınması *Large Displacement Transient*, ihmal ise *Small Displacement Transient* seçenekleri ile olur. *Transient* bir analizde dinamik

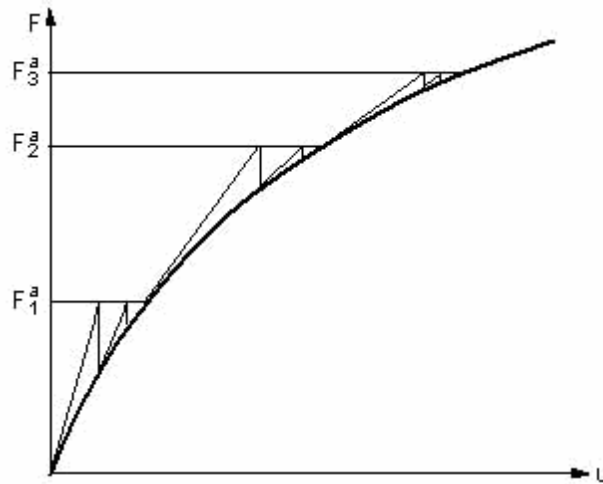
karakteristikler (ivme vb.) dikkate alınmadan da analiz yapılabilir. Bunun için *Sol'n Controls* menüsünde *Transient Effects* kutucuğu boş bırakılır (Şekil 6.8). Bu durumda analiz statik analize eşdeğer hale gelir. Yüklemenin bir adımdan diğerine geçişi iki şekilde olabilir. Yük bir zaman adımı boyunca sabit varsayılacaksa *Stepped loading*, zaman adımı başlangıcındaki değerinden zaman adımı bitişindeki değerine kadar lineer değişiyor varsayılacaksa *Ramped loading* seçeneği işaretlenmelidir. ANSYS sonlu eleman analizinde viskoz sönüm katsayı matrisi $[C]$ için $\alpha[M] + \beta[K]$ toplamı kullanılır. Buradaki alfa ve beta değerleri *Sol'n Controls* menüsünde verilir. *Transient* bir analizde de Bölüm 6.6.1. de anlatıldığı gibi artış adımları belirlenmelidir.



Şekil 6.8 Solution Controls menüsünde transient analiz için artış adımlarının belirlendiği menü

6.6.3. Analiz prosedürleri⁸

ANSYS sonlu eleman programı, geometrisi veya malzeme gerilme-birim deformasyon ilişkisi doğrusal olmayan sistemlerin çözümünde çeşitli iterasyon prosedürleri kullanır. Herhangi bir seçim yapılmadığı takdirde otomatik olarak Newton-Raphson yöntemini kullanır. ANSYS sonlu eleman programı, nonlinear analiz çözümleri için Newton-Raphson yöntemini kullanır. Newton-Raphson yada değişken rijitlik prosedürü olarak da bilinen bu yöntem, dış yükler etkisinde deplasman yapan sistemin düğüm noktalarında oluşacak kuvvet farkını dikkate alır. İlk deplasmanlar yapının deforme olmamış konumunda hesaplanan rijitlik matrisinden bulunur. Daha sonraki her iterasyon adımında yapının deforme 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 olmamasına 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 (6.9)'da görülmektedir.



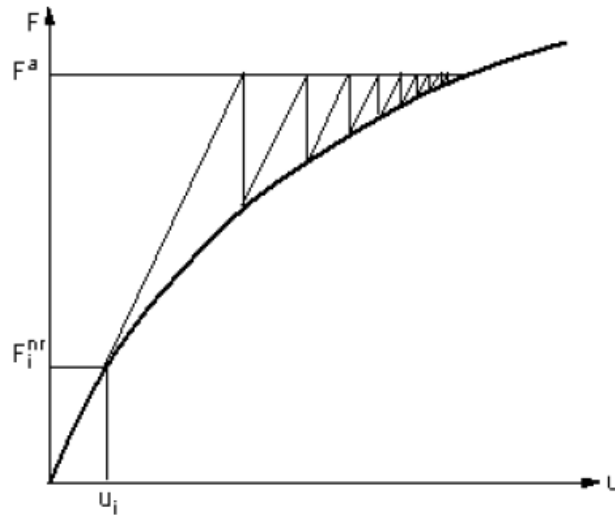
Şekil 6.9 Newton Raphson yönteminde çözümün ilerleyişi

⁸ Açıklamalar sırasında Nuhoğlu (2004) , Çıngı (2005) kaynaklarından faydalanılmıştır.

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 karşı daha az matris işlemi gerektirir.

Nonlinear çözüm algoritmalarından bir diğeri Başlangıç Rijitliği yöntemidir. Bu yöntem ile Değiştirilmiş Newton Raphson yöntemi birbirine benzemektedir. Ancak her yük artışı için yeni bir rijitlik hesaplanması yerine sistemin tüm yükleme adımlarında analiz başlangıcında oluşturulan rijitlik matrisi kullanılır. En çok iterasyon sayısı bu yöntemde gerekir. Ancak bazı yük-deformasyon ilişkilerinin elde edilmesi için bu yöntem gerekli olabilmektedir (Şekil 6.10).



Şekil 6.10 Değiştirilmiş Newton Raphson Metod

ANSYS programında Newton Raphson yönteminden farklı bir yöntem seçebilmek için *NROPT* komutundan faydalanılır.

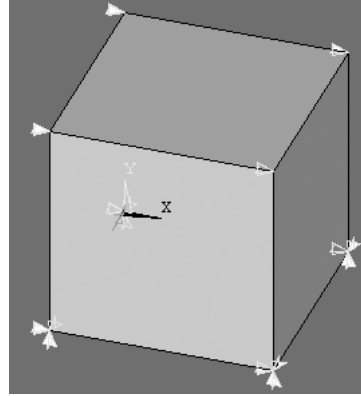
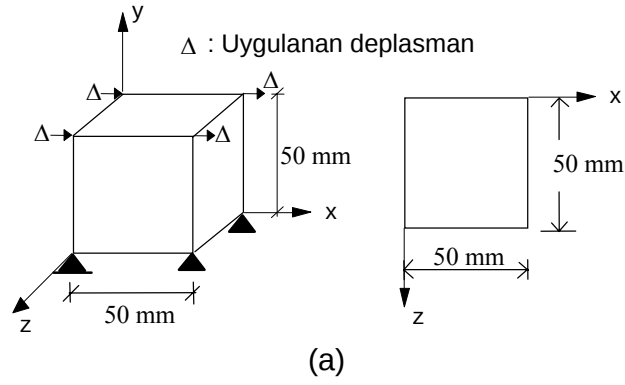
7. ANSYS İLE BETONARME ANALİZİ UYGULAMALARI

Bu bölümde, ANSYS ile çeşitli betonarme sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve nonlinear analizleri yapılmıştır. ANSYS Solid65 elemanının davranışını görmek ve modelin oluşturulma safhalarını basitçe göstermek ve analizin ilerleyişini daha iyi anlatabilmek amacıyla tek bir *Solid65* sonlu elemanından oluşan kübik bir betonarme yapı modeli, tersinir tekrarlanır yükleme altında analiz edilmiştir. Ardından, S.Ü. Müh.-Mim. Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Deprem Laboratuvarında Akın (2006) tarafından gerçekleştirilen bir betonarme çerçeve deneyinin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Bu model üzerinde çeşitli sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Böylece ANSYS programı kullanılarak oluşturulan nonlinear beton ve donatı modelinin, betonarme çerçeve davranışını ne ölçüde modelleyebildiğini anlamak mümkün olmaktadır.

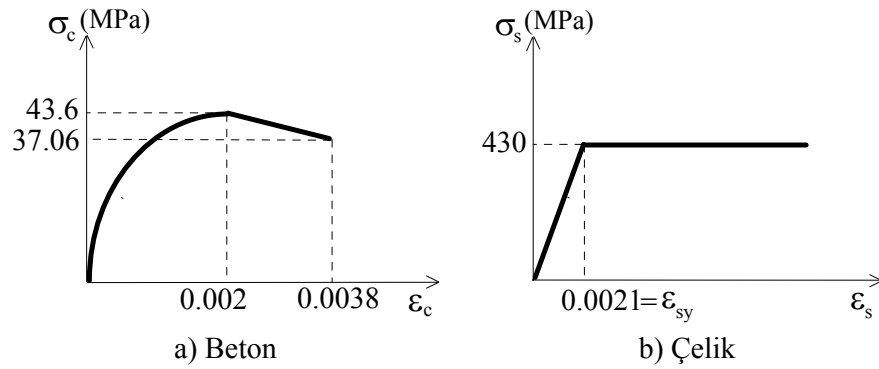
7.1. Tekil Bir *SOLID65* Betonarme Elemanının Analizi

ANSYS programı ile tersinir tekrarlanır yüke maruz betonarme elemanların nonlinear analizi çalışmalarına tekil bir *Solid65* betonarme elemanının modeli oluşturularak başlanmıştır. Böylelikle programın tersinir tekrarlanır yükleme analizlerindeki performansı tespit edilmeye çalışılmıştır.

Eleman boyutları 50x50x50 mm olarak seçilmiştir. Modele ait geometrik özellikler Şekil (7.1a ve 7.1b)' de gösterilmiştir. Eleman içinde dağınık (*smeared*) halde bulunan donatı kabulü yapılmıştır. Donatı oranı olarak, düşey y eksenine doğrultusunda konumlanmış 20mm^2 donatı alanına karşılık gelen oran olan $\rho=0.008$ kullanılmıştır. Bu donatı miktarı rasgele seçilmiştir. Betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi için Hognestad malzeme modeli, donatının için ise elastoplastik malzeme modeli kabul edilmiştir (Şekil 7.2).



Şekil 7.1 (a) Küp şeklinde bir betonarme elemanına ait boyut ve mesnetlenme durumu. (b) Tekil betonarme küp elemanı, mesnetlenme ve yüklenme biçimi



Şekil 7.2 Beton ve donatı çeliğinin gerilme-birim deformasyon ilişkileri

7.1.1. ANSYS programı ile modelin oluşturulması

Çalışmada ANSYS v8.0 kullanılmıştır. Eleman tipi olarak sadece *Solid65* elemanı seçilmiştir. Donatı için ayrı bir eleman tipi oluşturulmamış, dağınık donatı modeli benimsenmiştir. Bunun için *Real constant* tanımlaması sırasında donatı oranı ve donatının hangi eksen yönünde bulunduğu ait açısal verileri girilmiştir. Mevcut donatı duruşu için $\theta=90^\circ$ ve $\phi=0^\circ$ olmaktadır. Beton malzeme modelini tanımlarken ANSYS'te yer alan *Multilinear Kinematic Hardening* seçeneği kullanılmış (Şekil 7.3) ve Hognestad malzeme modeline ait gerilme-birim şekil değiştirme verileri girilerek Şekil (7.4)'teki gerilme-birim deformasyon diyagramı elde edilmiştir.

Beton için Elastisite modülü Şekil (7.4)'teki eğrinin başlangıç eğimi olan $E=38150$ MPa olarak verilmiştir. ANSYS başlangıç eğimi değerinin dışında başka bir değeri kabul etmemektedir. Betonun çekme ve basınç mukavemetleri, açık ve kapalı çatlak durumunda kayma aktarımı davranış parametreleri malzeme modeli menüsü içerisinde *concrete* alt menüsü yardımıyla verilmiştir (Şekil 7.5). Çatlak yüzeyleri birbiriyle sürtünme halinde olmayan açık çatlaklarda kayma transfer katsayısı 0.5 olarak kabul edilmiştir. Aslında gerçek değer bu değerden daha küçük olması gerekir, ancak bu çalışma için yapılan denemeler sonucu nonlinear çözüm döngüleri sırasında yakınsama sorunlarını gidermek için 0.5 kullanılmasının uygun olacağı anlaşılmıştır. Çatlak yüzeyleri birbiriyle irtibat halinde olan kapalı çatlaklar için kayma kuvvetinin %100'ünün transfer edildiği varsayılmış ve kayma transfer katsayısı 1.0 olarak verilmiştir. Çekme dayanımı, beton basınç dayanımının %10'u olarak kabul edilmiş ve dayanım değeri 4.3 MPa olarak alınmıştır. Basınç dayanımı değeri için -1 verilerek ANSYS'in kullandığı çatlak modelinde ezilme çatlak kontrolü engellenmiştir. Literatür'de ANSYS ezilme çatlak modeli ile ilgili problemler olduğu ifade edilmiş ve bu özelliğinin kullanılmamasının daha uygun olacağı dile getirilmiştir.

Multilinear Kinematic Hardening for Material Number 1

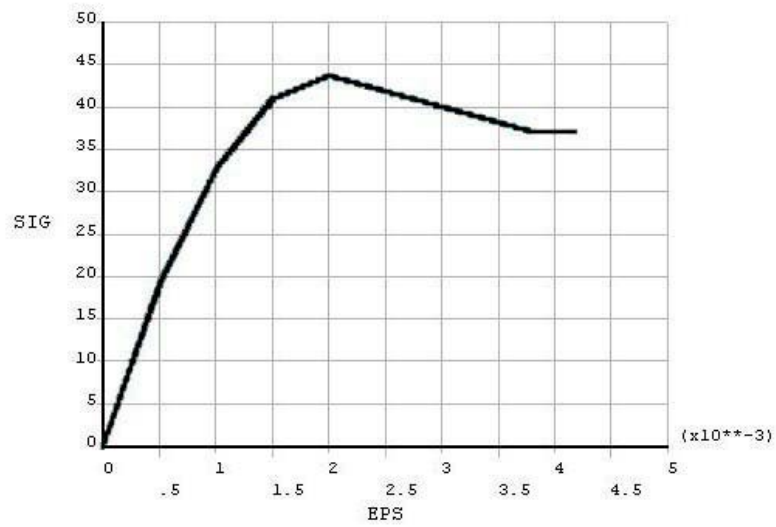
Multilinear Kinematic Hardening for Material Number 1

Stress-Strain Options: Stress versus Total Strain

T1: 0

	STRAIN	STRESS
1	0.0005	19.075
2	0.001	32.7
3	0.0015	40.875
4	0.002	43.6
5	0.0038	37.06

Şekil 7.3 Multilinear Kinematic Hardening verilerinin girilmesi



Şekil 7.4 Beton için verilen *Multilinear Kinematic Hardening* verileri grafiği

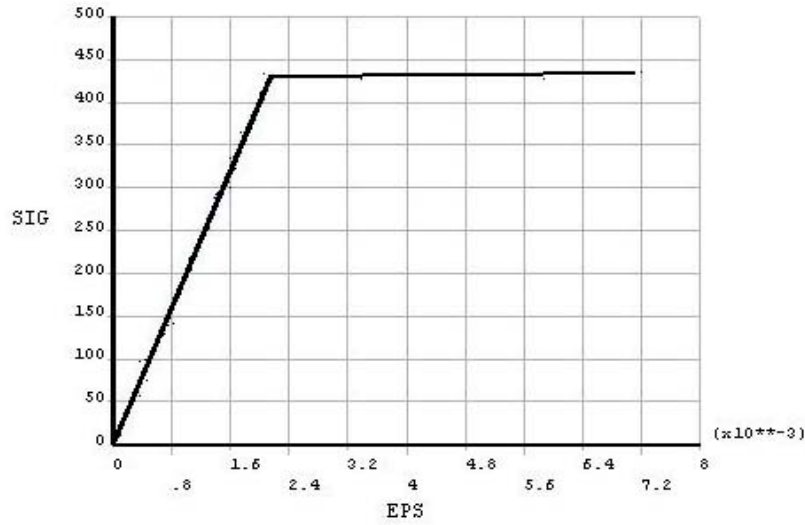
T1	
Temperature	0
ShrCF-Op	0.5
ShrCF-Cl	1
UnTensSt	4.3
UnCompSt	-1
BiCompSt	0
HydroPrs	0
BiCompSt	0
UnTensSt	0
TenCrFac	0

Şekil 7.5 Concrete malzeme parametrelerinin girilmesi

Donatı için malzeme modeli *Bilinear Isotropic Hardening* seçilmiş ve elastisite modülü gerilme-birim deformasyon ilişkisinin verildiği eğrinin ilk eğimi olarak alınmıştır (Şekil 7.6). Bu modelden elde edilen σ - ϵ ilişkisi Şekil (7.7)'de gösterilmiştir. Donatı çeliği için elastisite modülü $E = 200,000$ MPa, akma dayanımı $f_y = 430$ MPa olarak verilmiştir.

T1	
Temperature	0
Yield Stss	430
Tang Mod	1000

Şekil 7.6 Donatı çeliği için iki kollu izotropik pekleşme modeline ait verilerin girilmesi



Şekil 7.7 Donatı çeliği için verilen *Bilinear Isotropic Hardening* verileri grafiği

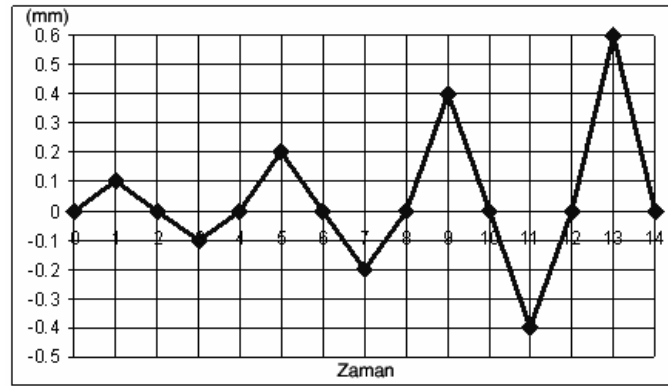
Çeliğin σ - ϵ ilişkisi, elasto-plastik varsayılabilir. Buna göre, donatı çeliği akma gerilmesine ulaşmaya kadar lineer-elastik, bu değerden sonra plastik bir malzeme olarak davranış gösterecektir. Akmadan sonraki elastisite modülünü (*tangent modulus*) sıfır vermek yerine bir miktar pekleşme kabul edilmiş ve küçük bir değer verilmiştir (Şekil 7.6). Burada amaç nonlinear çözüm döngüsünde yakınsama problemlerini ortadan kaldırmaktır.

Betonarme küp elemanın $y=0$ iken x - z düzlemindeki düğümlerinin x ve z eksenlerindeki hareketleri engellenmiş ve böylece bu yüzey ankastre mesnetli olarak tanımlanmıştır. Eleman, Şekil (7.1)'deki görüldüğü gibi x eksenini doğrultusunda, tepe düğüm noktalarından tersinir tekrarlanır deplasman yükü ile yüklenmiştir. Yüklemeler, yük geçmişi (*time-load history*) şeklinde uygulanmıştır. Bunun için yük adımı ve buna karşılık gelen yük bir çizelge biçiminde hazırlanmış ve bu çizelge Şekil (7.1)'deki tepe düğüm noktalarına uygulanmıştır. Bu yüklemeyi yapmak için ANSYS programında *Solution* $\rightarrow$ *Define Loads* $\rightarrow$ *Apply* menüsünden *on nodes* seçeneği kullanılmalıdır. Bu yükleme sırasında yük çizelgesinin bulunduğu notepad veya benzeri bir program ile hazırlanmış text dosyasına ihtiyaç duyulacaktır.

Betonarme küp elemanın yükleme noktalarında tanımlanan yük çizelgesi Çizelge (7.1)'de ve grafiği Şekil (7.8)'te görülmektedir.

Çizelge 7.1 Zaman-yük geçmişi çizelgesi

Zaman	Uygulanacak deplasman (mm)
0	0.0
1	0.1
2	0.0
3	-0.1
4	0.0
5	0.2
6	0.0
7	-0.2
8	0.0
9	0.4
10	0.0
11	-0.4
12	0.0
13	0.6
14	0.0

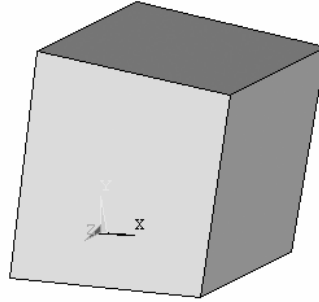


Şekil 7.8 Tepe düğüm noktalarının tersinir tekrarlanır yük grafiği

Nonlineer analiz, deplasman kontrollü olarak yürütülmüş ve yükleme geçmişi son değerine kadar tatbik edilmiştir.

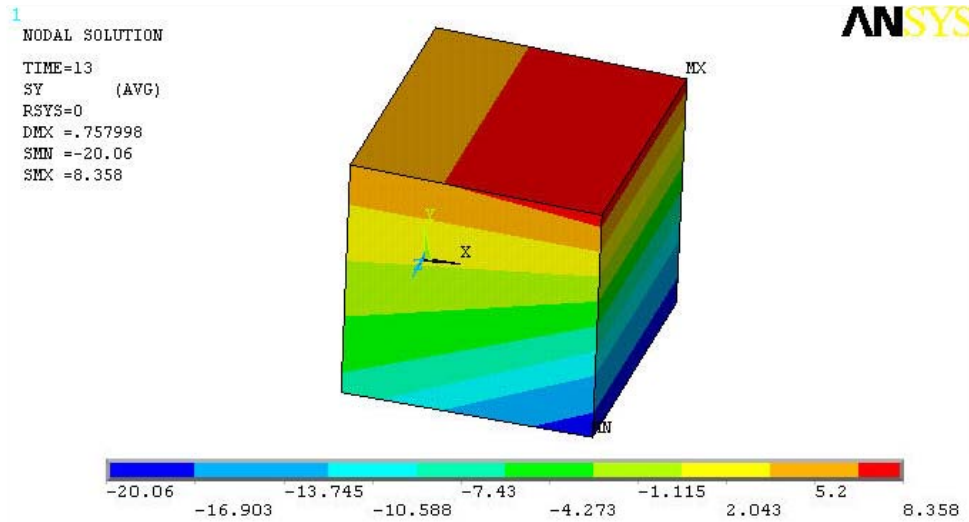
7.1.2. ANSYS analiz sonuçları

Nonlinear analiz sonucunda *Solid65* eleman tipi seçilerek oluşturulan betonarme küp elemanda oluşan tesirler incelenmiştir. Şekil (7.9)'da Zaman adımı 13 için deforme olmuş eleman gösterilmiştir.



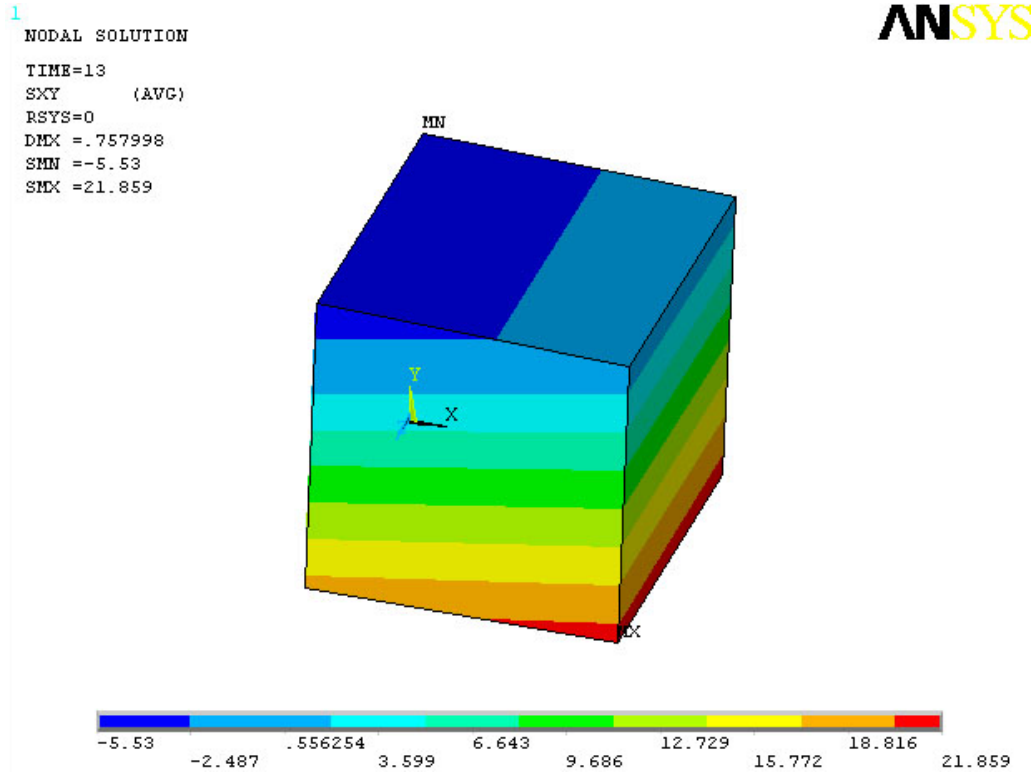
Şekil 7.9 $\Delta_x = 0.6$ mm iken deforme olmuş eleman (Tabanda X-Z düzlemi ankastre mesnetlidir)

Elemanın yükleme biçiminden anlaşılacağı gibi, elemanda eğilme etkisi oluşturacak gerilme σ_y olmaktadır ve ankastre mesnet düzlemi olan xz'de M_z momenti oluşmaktadır.



Şekil 7.10 $\Delta_x = 0.6$ mm iken ortalama σ_y gerilmesi dağılımı

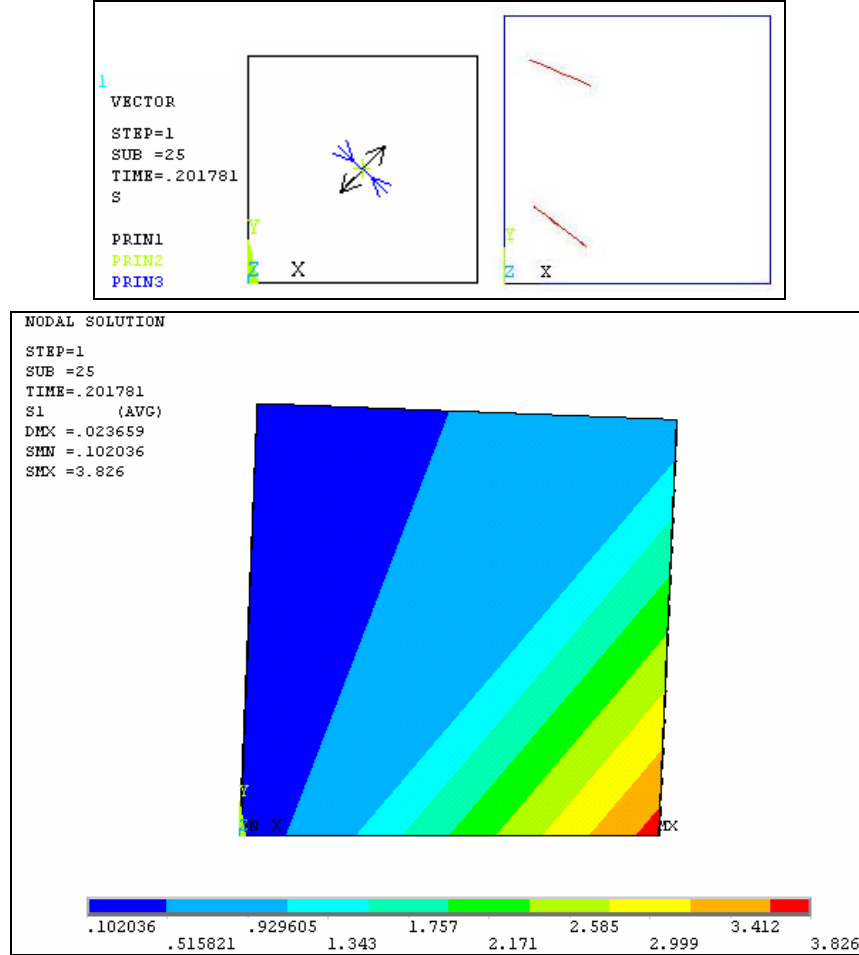
Örnek olarak elemanın zaman adımı (*time*) =13 ve $\Delta_x=0.6$ mm tepe deplasmanına maruz iken ortalama σ_y gerilme değişimi Şekil (7.10)'da gösterilmiştir. Buradaki gerilme skalasında pozitif değerler çekmeyi, negatif değerler ise basıncı göstermektedir. Betonarme küp eleman için asıl önemli olan gerilmenin τ_{xy} kayma gerilmesi olacağı açıktır. Bu nedenle ortalama τ_{xy} gerilmesinin değişimi de $\Delta_x = 0.6$ mm için Şekil (7.11)'de gösterilmiştir.



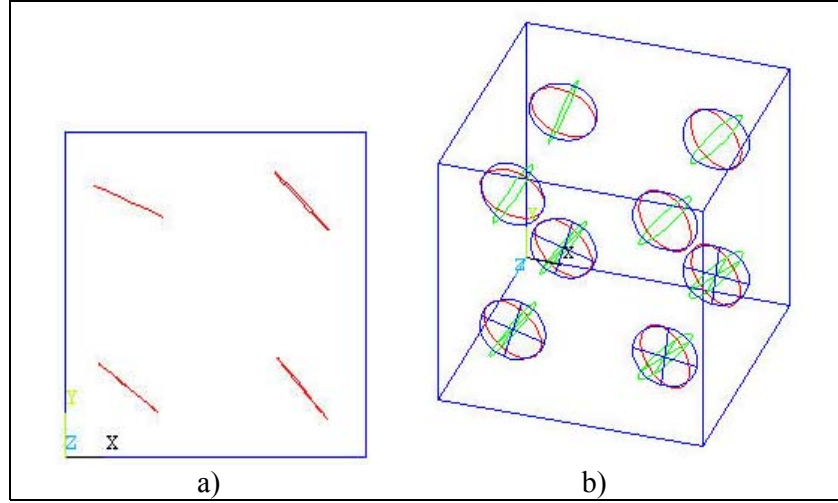
Şekil 7.11 $\Delta_x = 0.6$ mm iken ortalama τ_{xy} gerilmesi dağılımı

Yüklemenin başından sonuna kadar oluşan çatlaklar incelenmiştir. İlk çatlak $time=0.2$, $\Delta_x= +0.02$ mm iken oluşmuştur. Asal çekme gerilmelerinin çatlakların oluşumunda başrol oynadığı bilinmektedir. Bu nedenle Şekil (7.12)'de asal çekme gerilmelerinin vektörel gösterimi, X-Y düzlemindeki dağılımı ve oluşan çatlaklar gösterilmiştir. Hacimsel elemanlar için gerilme değerleri integrasyon noktalarında yapılır ve diğer noktalardaki değerler enterpolasyon ile elde edilir. *Solid65* elemanda

çatlaklar ya elemanın orta (*centroid*) noktasında ya da integrasyon noktalarında (*integration point*) gösterilir. ANSYS gerilmeleri vektörel olarak da yön ve şiddetleri ile gösterebilmektedir. Ancak bunu eleman ortasında veya düğümlerinde yapabilmektedir. Şekil (7.12)'de çatlak açısının asal çekme gerilmesi σ_1 yönü ile uyum içinde olduğu görülmektedir.



Şekil 7.12 $\Delta_x = 0.02$ mm iken asal gerilme yönleri, çatlama şekli ve asal çekme gerilmesi σ_1 dağılımı

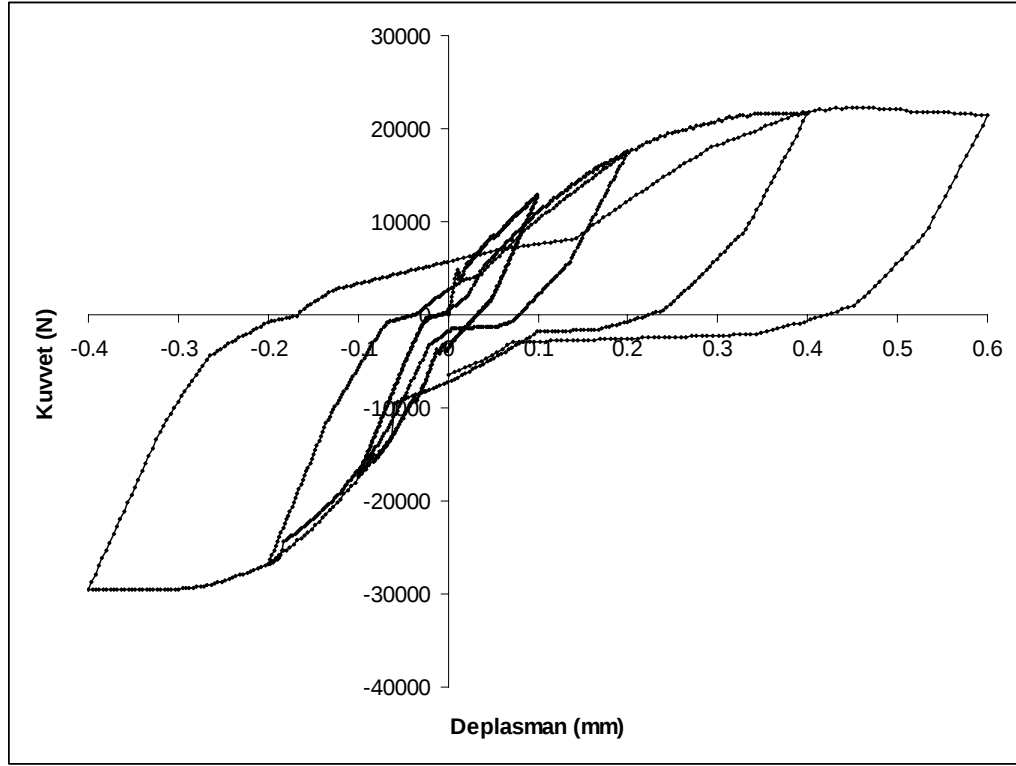


Şekil 7.13 a) $\Delta_x = 0.06$ mm iken b) $\Delta_x = 0.6$ mm iken oluşan çatlaklar

Şekil (7.13)'te ise $\Delta_x = 0.06$ mm ve $\Delta_x = 0.6$ mm iken oluşan çatlaklar gösterilmiştir. Tüm bu çatlaklar çekme çatlaklarıdır. Bir elemanın bir integrasyon noktasında asal çekme gerilmelerinin eksenlerle yaptığı açı değiştikçe bununla uyumlu olarak aynı noktada çok sayıda çatlak oluşabilmektedir (Şekil 7.13b). 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 7.13b de eleman altındaki mavi renkli çatlaklar gibi). Bu çatlak grafiğinde poligon çatlak görülmemesinin sebebi; daha önce yapılan malzeme tanımlamalarında *concrete* menüsü yardımıyla betonun ezilme dayanımına -1 değeri verilerek beton malzemesinin ezilme yeteneğinin engellenmesidir. Böylelikle bu örnek uygulamada, betonda bulunan çatlakların tamamı çekme gerilmesinden kaynaklanmaktadır.

Sisteme tersinir tekrarlanır yükün uygulandığı noktalarda nonlineer kuvvet-deplasman ilişkisi elde edilmiş ve bir grafik halinde Şekil (7.14)'te gösterilmiştir. Model oluşturulurken *Multilinear Kinematic Hardening* seçeneği kullanılarak beton malzemesinin kinematik pekleşme yapması öngörülmüştü. Şekil (7.14)'teki yükleme ve boşaltma eğrilerinin biçimi de bununla uyumlu olmaktadır. Bu analiz bize

ANSYS ile tersinir tekrarlanır yükleme altında betonarme analizin gerçekleştirilebileceğini ve uygun sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir.



Şekil 7.14 Betonarme küp eleman için tersinir-tekrarlanır yük altında $P - \Delta$ ilişkisi

7.2. Bir Betonarme Çerçevenin ANSYS İle Nonlinear Analizi

Bu bölümde Selçuk Üniversitesi Deprem Mühendisliği laboratuvarında tersinir-tekrarlanır yük altında testleri yapılmış olan betonarme çerçevelerden birisine ait geometri, malzeme, donatı ve yükleme verileri kullanılarak, bilgisayar ortamında çerçeve modelleri oluşturulmuş ve nonlinear sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu tezin tamamlandığı tarih itibari ile Akın (2006) çalışması henüz sonuçlanmamış olduğundan, çerçeveye ait veriler yazar ile yapılan birebir görüşmeler sonucu elde edilmiştir. Akın'ın (2006) deneysel olarak incelemiş olduğu üç katlı üç açıklıklı bir

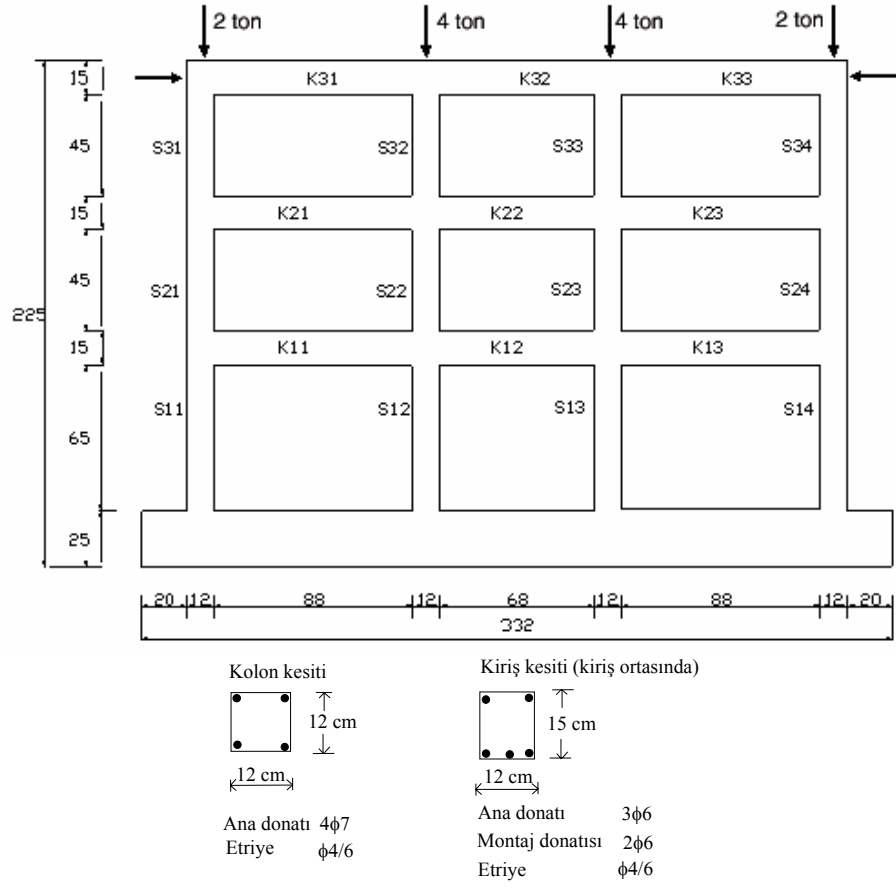
betonarme çerçeveye ait sonlu eleman modeli ANSYS yardımıyla oluşturulmuştur. Bu çalışmanın amacı ANSYS analiz sonuçları ile deneysel davranışın karşılaştırılmasıdır. Böylece ANSYS programında kullanılan beton ve donatı modelinin gerçek bir betonarme çerçeve davranışını ne ölçüde modelleyebildiği daha iyi irdelenmiştir.

Oluşturulan çerçeve modeli başlangıç olarak nonlinear statik itme (*pushover*) analizine tabi tutulmuştur. Daha sonra aynı çerçeve modeli tersinir tekrarlanır yükleme ile yüklenmiştir. Heriki durum için de sonuçlar detaylı bir biçimde incelenmiştir.

7.2.1. Betonarme çerçeve deney numunesine ait özellikler

Sonlu eleman modeli oluşturulan betonarme çerçeve üç katlı ve üç açıklıklı olarak düzenlenmiştir. Çerçeveye ait boyutlar, kesit ve donatı özellikleri Şekil (7.15)'de görülmektedir. Çerçevede kolon boyutları 120x120mm, kiriş boyutları ise 120x150 mm'dir. Çerçeve simetrik olarak düzenlenmiş olup orta açıklığı yan açıklıklardan daha küçük teşkil edilmiştir. Çerçevenin kolon-kiriş birleşimlerinde özellikle etriye sargısı kullanılmamıştır (Şekil 7.16). Çerçevenin kalıp ve donatı düzeni ise Şekil (7.17)'de gösterildiği gibidir.

Kolonlarda $4\text{Ø}7$ (153.86 mm^2) boyuna donatı kullanılmıştır. Kirişlerde $2\text{Ø}6$ düz, $2\text{Ø}6$ montaj ve $1\text{Ø}6$ pilye kullanılmıştır. Kolon ve kiriş elemanın sargı donatıları $\text{Ø}4/6$ 'dır. Rijit bir temel oluşturulması amacıyla temel ebatları $h=250 \text{ mm}$ ve $b=300 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir. Temel donatısı olarak $4\text{Ø}16$ düz ve $\text{Ø}8/20$ etriye kullanılmıştır. Beton malzemesinin dayanım sınıfı C18, kolon ve kiriş elemanlarında paspayı 10 mm 'dir.



Şekil 7.15 Betonarme çerçevenin boyut, kesit ve donatı özellikleri (Boyutlar: cm)



Şekil 7.16 Etriyesiz kolon-kiriş birleşim bölgesi

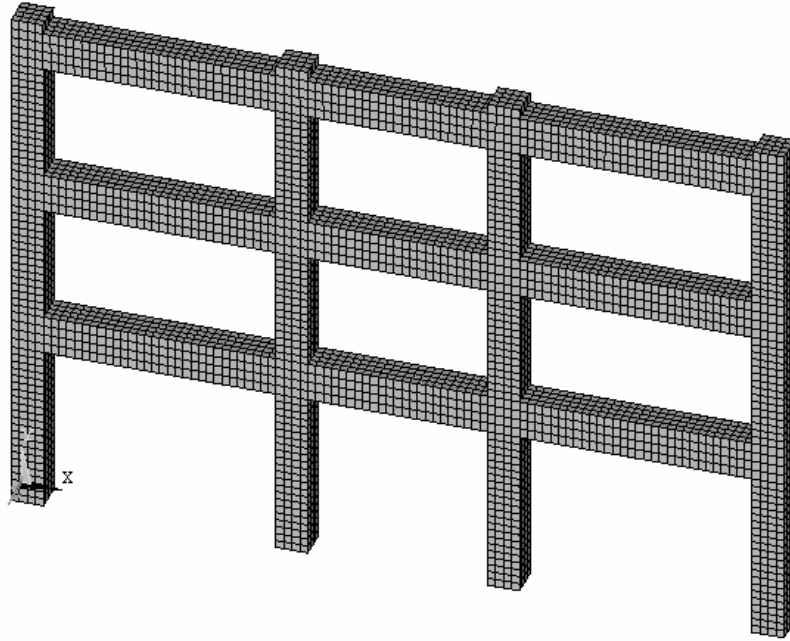


Şekil 7.17 Çerçeve sistemi kalıp ve donatı düzeni

7.2.2. ANSYS sonlu eleman modelinin oluşturulması

Betonarme çerçeve modelinde kolon ve kirişler *volume* geometrik nesnesi kullanılarak oluşturulmuştur. *Volume* oluşturmak için iki köşe noktası belli bir hacim için mevcut bulunan “*BLOCK, x1, x2, y1, y2, z1, z2*” komutu kullanılmıştır. Kiriş ve kolon elemanları *volume* nesnesi ile oluşturulduktan sonra birleşim bölgelerinde tek düğüm noktası oluşması amacı ile *glue* işlemi ile birleştirilmiştir. Kiriş ve kolon kesitlerini $4 \times 4 = 16$ elemana bölmenin yeterli olduğu düşünülmüştür. Kiriş ve kolonlar boyuna bölünürken de kesitteki elemanlara yakın bir boyut seçilmiş ve yaklaşık 30mm lik elemanlara bölünmüştür. Bölme işlemi *volume* nesnelerinin kenarlarındaki *line* nesneleri üzerinde “*LESIZE, n1, size, angsize, ndiv, space, kforc, layer1, layer2, kyndiv*” komutunun işletilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, oluşturulan çerçeve modeli *mesh* işlemi ile *solid65* sonlu elemanlarına dönüştürülmüştür. Sonuç olarak betonarme çerçeve modelinde 8144 eleman, 22672 düğüm noktası oluşturulmuştur (Şekil 7.18). *Solid65* elemanının her bir düğümünde 3 adet serbestlik derecesi bulunmaktadır. Çerçeve sonlu eleman modelinin daha fazla sayıda elemana bölünerek eleman sıklığının artırılması ile daha doğru sonuçların elde edilmesi

mümkün olacaktır. *Solid65* eleman düğümlerinin dönme serbestlik derecelerinin bulunmayışı, kolon boyunca yatay yüklemekten dolayı meydana gelecek eğilmenin modellenmesinde hatalara sebep olacaktır. Ancak mevcut çalışma için 30mm kenar uzunluğuna sahip elemanların çözümü yeterli doğruluğa ulaştıracağı düşünülmüş ve sonuçlardan da bu düşüncenin doğruluğu anlaşılmıştır. Daha fazla eleman, daha fazla serbestlik derecesi ve daha büyük rijitlik matrisleri demektir. Nonlineer bir analiz sırasında sık sık rijitlik matrisinin tersinin alınmasının gerekliliği, analizin yapılacağı bilgisayar kapasitesi ve analiz süresi ile ilgili önemli sorunlara sebep olmaktadır. Bu nedenle daha fazla elemana bölmeye gerek duyulmamıştır.



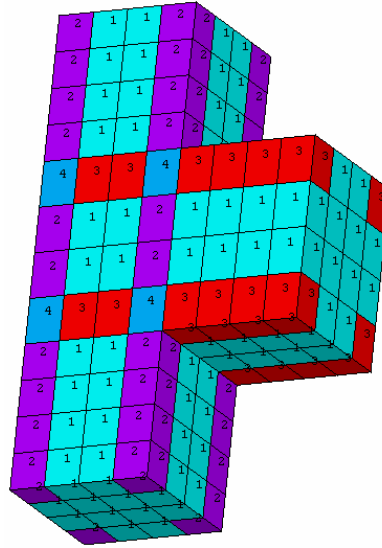
Şekil 7.18 Betonarme çerçevenin sonlu elemanlara bölünmesi

Modelde donatı için ayrı bir eleman tipi oluşturulmamıştır. Kolon ve kiriş elemanlarının boyuna donatıları için donatının olması gerektiği yerdeki *Solid65* elemanlarına dağınık (*smeared*) donatı tanımlanmıştır. Donatının tanımlanması eleman sabitleri (*real constants*) vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Eleman içindeki farklı her donatı oranı ve donatı duruşu için ayrı bir eleman sabiti tanımı yapılması gereklidir. Donatı tanımlanırken verilmesi gereken iki değerden biri donatı oranıdır. Bu oran, eleman kesitindeki donatı alanının eleman kesit alanına bölünmesi ile bulunabilir. Diğer ise donatının konumunu belirlemek için verilen açılar değerleridir.

Mevcut model için tanımlanan eleman sabiti numaraları ve ilgili donatı özellikleri Çizelge (7.2)'de verilmiştir. Ayrıca Şekil (7.19)'da bu eleman sabitleri model üzerinde farklı renklerle gösterilmiştir. Yaygın donatı tanımlamasından dolayı, donatı elemanın tamamı içinde yayılıdır, ancak donatının elemanın ağırlık merkezinde olduğunu düşünerek donatının moment kolu ve paspayı mesafeleri hakkında yaklaşık değerler elde edilebilir.

Çizelge 7.2 *Solid65* betonarme elemanı için tanımlanan eleman sabitleri

Eleman Sabiti (<i>Real Constant</i>)	Donatı Özellikleri			
	Malzeme No	Oranı	θ açısı ($^{\circ}$)	ϕ açısı ($^{\circ}$)
1	-	-	-	-
2	2	0.0428	90	0
3	2	0.0248	0	0
4	2	0.0428	90	0
		0.0248	0	0



Şekil 7.19 Kolon-kiriş birleşiminde eleman sabiti (*real constant*) numaraları.

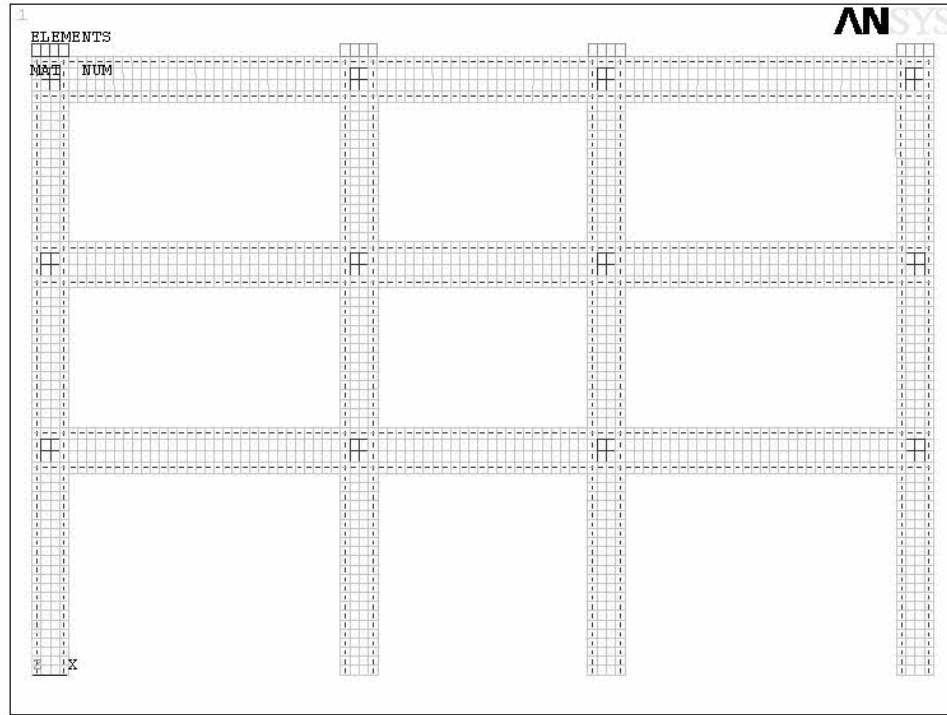
Çizelge (7.2) ile verilen donatıların sistem üzerindeki görünümünü elde etmek için ANSYS'te işletilmesi gereken komutlar şunlardır:

```

/ESHAPE,1
/TYPE,,BASIC
/DEVICE,VECTOR,ON
EPLOT

```

Bu komutların kullanılmasından sonra donatılar model üzerinde Şekil (7.20)'deki gibi görülebilecektir.

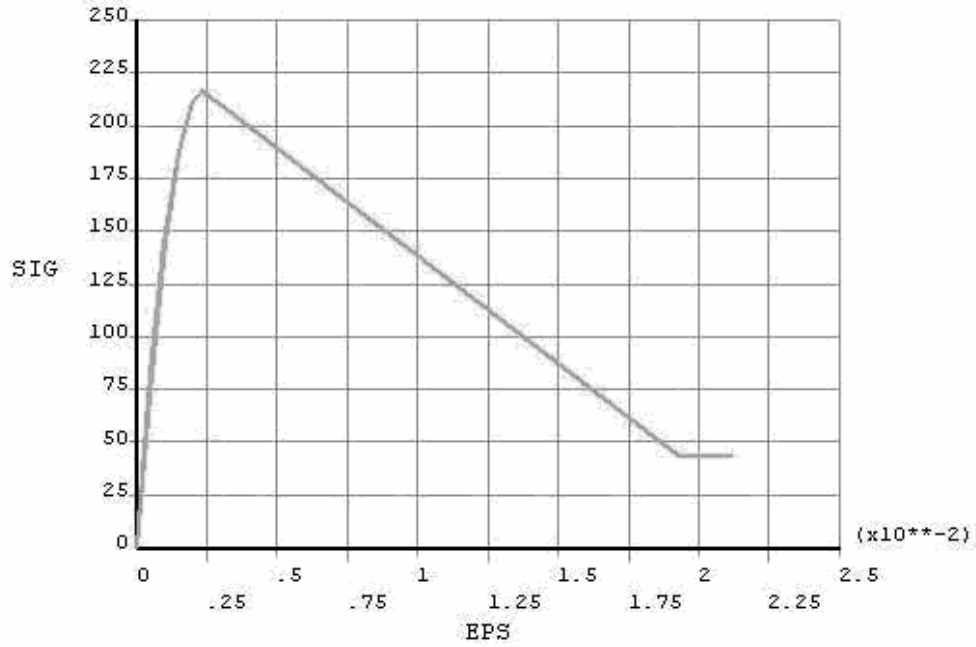


Şekil 7.20 Betonarme çerçeve modelinin kiriş ve kolon ana donatıları

Etriye donatısı için ayrı elemanlar oluşturmak yerine, literatürde sargılı beton için tanımlanan beton malzeme modeli kullanılmıştır. Çerçeve deney numunesinin kolon-kiriş birleşim noktalarında etriye kullanılmamasından dolayı, bu bölgelerde sargısız beton malzeme modeli tanımlanmıştır.

Betonarme çerçevenin sonlu eleman modelinde üç farklı malzeme modeli tanımlanmıştır. Bunlardan birincisi sargılı beton malzemesini tanımlayan malzeme modelidir. Bu malzeme modelinde beton için oluşturulan matematiksel modellerden sargılı beton için sıklıkla tercih edilen Geliştirilmiş Kent ve Park modeli kullanılmıştır. Kolon ve kiriş elemanının beton basınç dayanımı, sargı donatısının kesit alanı ve aralığı, sargı donatısının akma dayanımı, betonun maksimum gerilme altındaki birim deformasyon değerleri dikkate alınarak gerilme-şekil değiştirme ilişkisi verileri elde edilmiştir. Elde edilen bu Kent ve Park modeline ait gerilme-şekil değiştirme verileri ANSYS'te bulunan *Multilinear Isotropic Hardening*

seçeneğinde tanımlanarak Şekil (7.21)'da gösterilen gerilme-birim deformasyon grafiği elde edilmiştir.

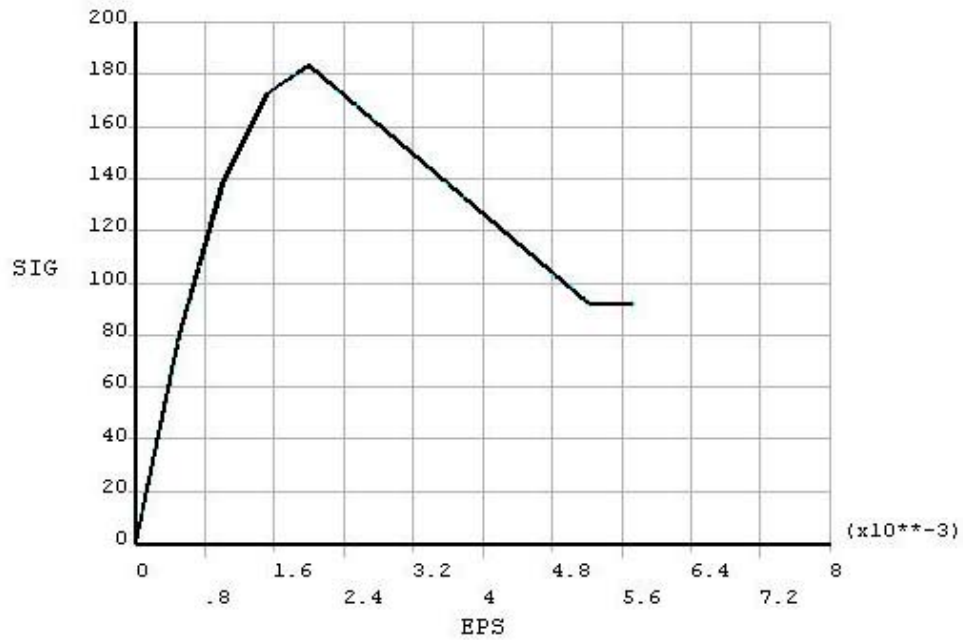


Şekil 7.21 Sargılı beton için verilen *Multilinear Isotropic Hardening* verileri grafiği

Geliştirilmiş Kent ve Park modeline göre beton dayanım değeri $f_c = 180 \text{ kg/cm}^2$ 'den $f_{cc} = 211.90 \text{ kg/cm}^2$ 'ye kadar ikinci dereceden değişmektedir. Maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalma $\epsilon_{co} = 0.002$ kabul edilmiş ve kopma birim kısalması $\epsilon_{coc} = 0.00235$ olarak hesaplanmıştır. Gerilme-birim deformasyon eğrisinin eğrisel kısmı kırıklı doğrular ile oluşturulmuş ve elastisite modülü olarak başlangıç eğimi olan $E = 164\,200 \text{ kg/cm}^2$ değeri kullanılmıştır.

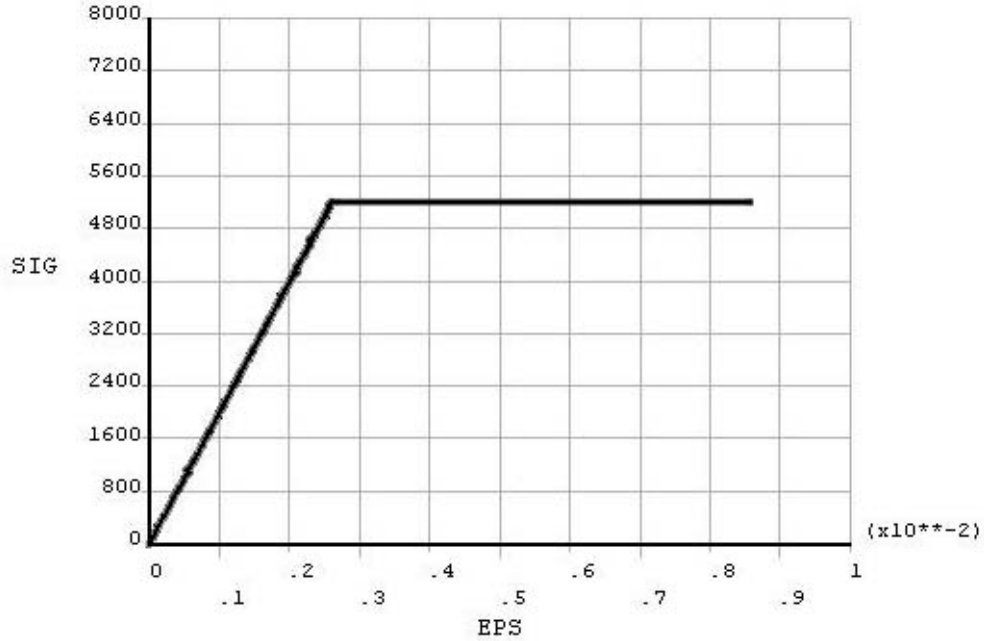
Betonun davranışı ile ilgili veriler *Non-metal plasticity* → *Concrete* menüsünden tanımlanmıştır. Çekme dayanımının basınç dayanımının %10'u olduğu kabulü yapılarak 21.19 kg/cm^2 alınmıştır. Basınç dayanımı değeri için -1 verilerek ANSYS'in kullandığı çatlak modelinde ezilme çatlak kontrolü engellenmiştir. Çatlak yüzeyleri birbiriyle sürtünme halinde olmayan açık çatlaklar için kayma transfer katsayısı 0.5 olarak kabul edilmiştir. Çatlak yüzeyleri birbiriyle irtibat halinde olan kapalı çatlaklar için kayma kuvvetinin %100'ünün transfer edildiği düşünülmüş ve kayma transfer katsayısı 1 olarak verilmiştir.

Kiriş ve kolon birleşim bölgelerinde deney numunesindeki durumu modellemek için etriyesiz beton modeli tanımlanmıştır. Bunun için de Geliştirilmiş Kent ve Park modelinin sargısız beton modeli tanımı kullanılarak oluşturulmuştur. Sargısız beton modeli de ANSYS programında yine *Multilinear Isotropic Hardening* seçeneği kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 7.22). Beton basınç dayanım değeri $f_c=180$ kg/cm^2 dir. *Concrete* menüsünde çekme dayanım değeri 1.8 kg/cm^2 alınmıştır. Önceden olduğu gibi, açık çatlaklarda kayma transfer katsayısı 0.5, kapalı çatlaklarda ise 1.0 olarak verilmiştir.



Şekil 7.22 Sargısız beton için verilen *Multilinear Isotropic Hardening* verileri grafiği

Betonarme çerçevede donatısının davranışını tanımlayan malzeme modeli ANSYS'in *Bilinear Isotropic Hardening* seçeneği kullanılarak oluşturulmuştur. Bu seçenek ile iki kollu izotropik pekleşme varsayımı yapılmıştır. Donatının akma dayanımı $f_y=5200 \text{ kg/cm}^2$ alınmış ve elastisite modülü $E= 2000000 \text{ kg/cm}^2$ varsayılmıştır. Buradan akma birim uzaması ayrıca hesaplanmıştır. İkinci kol için teğet modülü ise çok küçük olması için 1000 varsayılmıştır (Şekil 7.23).



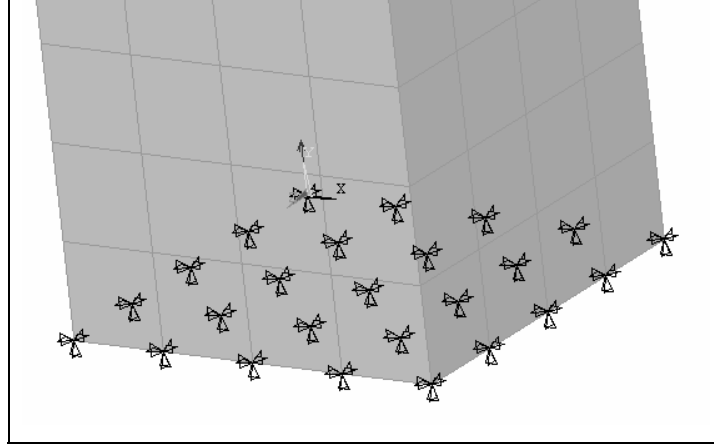
Şekil 7.23 Donatı için verilen *Bilinear Isotropic Hardening* verileri grafiği

Şekil (7.23)'teki grafiğin başlangıç eğimi elastisite modülü, akma gerilmesinden sonraki eğimi ise tanjant modülüdür.

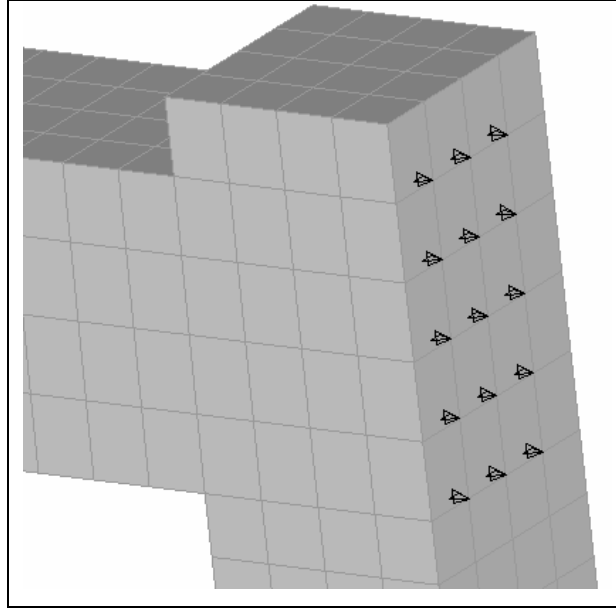
Deneyisel numunede kolonların temel ile birleştiği yerde ankastre mesnetlenme kabulü yapılmıştır. Bu nedenle kolonların alt uçlarındaki X-Z düzleminde bulunan tüm düğümlerine X, Y ve Z yönlerinde sıfır deplasman uygulanmıştır, yani mesnetlenmiştir (Şekil 7.24).

Betonarme çerçeve numunesinin Şekil (7.15)'te görülen düşey yükleme noktalarında kolon üst bölgelerine ağırlık elemanları oluşturulmuştur. Bunun nedeni yatay yüklemenin zamana göre değişmesi ancak düşey yüklemenin bu arada sabit kalmasıdır. Şekil (7.15)'te görülen yatay yükleme noktalarından deplasman yükü uygulanmıştır. Yatay deplasman yükleri, yük geçmişi (time-load history) şeklinde çerçevenin tüm tepe düğümlerine uygulamak yerine, deneydekine benzer şekilde sağ üst ve sol üst köşelere uygulanmıştır. Bunun için yüklemeler solution menüsünden çıkmadan, ard arda yapılmıştır. Şekil (7.25)'te çerçeve modelinin sağ üst köşesine X

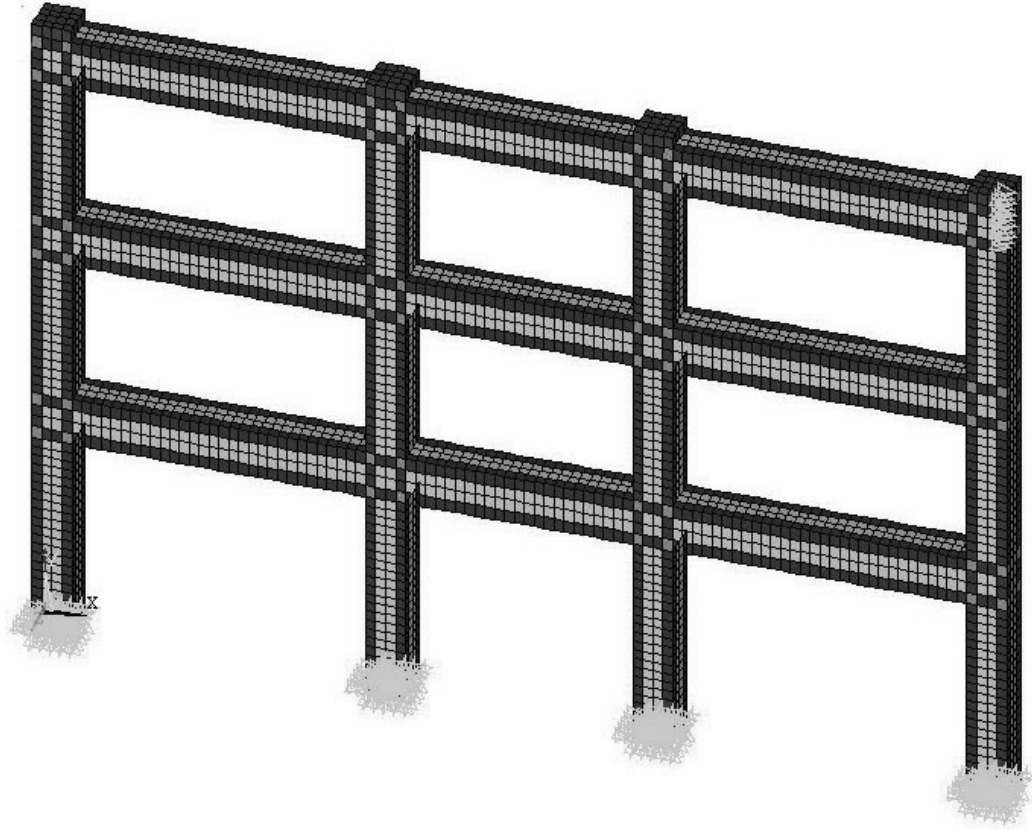
yönünde yapılan deplasman yüklemesi görülmektedir. Şekil (7.26)'da ise kolon mesnetlenmesi ve yatay deplasman yüklemesi genel olarak gösterilmektedir.



Şekil 7.24 Bir kolonun temel hizasında mesnetlenmesi



Şekil 7.25 Çerçevenin sağ üst köşesinden yüklenmesi



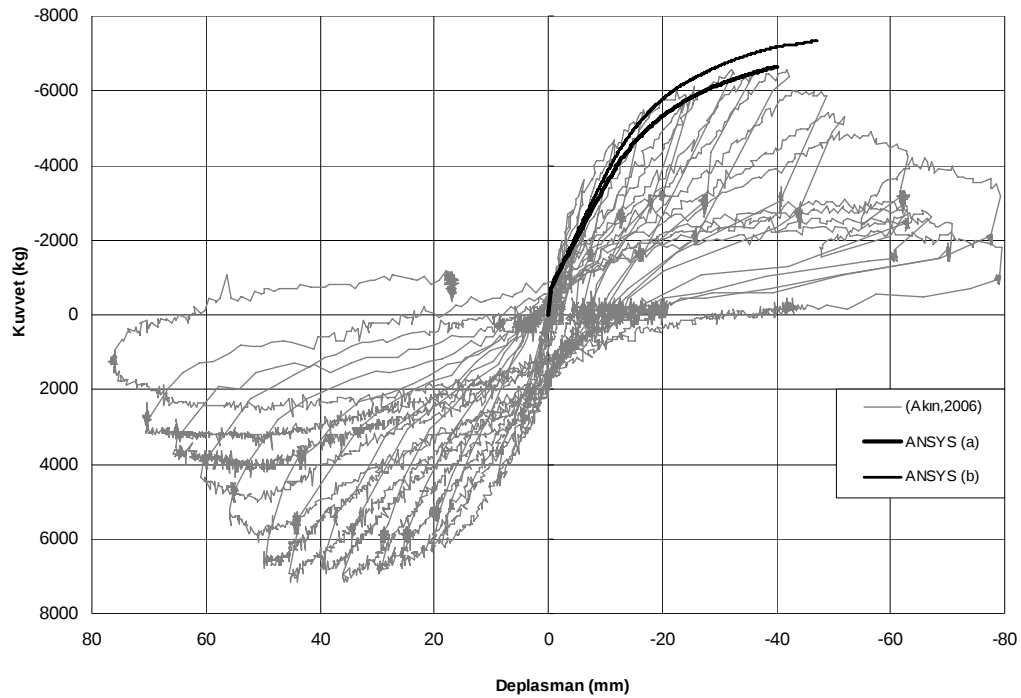
Şekil 7.26 Çerçeve modeli üzerinde deplasman yüklemeleri

7.2.3. Çerçevenin statik itme (pushover) analizi

Tersinir-tekrarlanır yükleme öncesinde, çerçevenin yük-deplasman eğriliğinin deneysel sonuçlara yakınlığını anlamak üzere bir statik-itme analizinin yapılması uygun görülmüştür. Statik-itme analizinden sonuç olarak çerçevenin dayanım zarfı elde edilecektir.

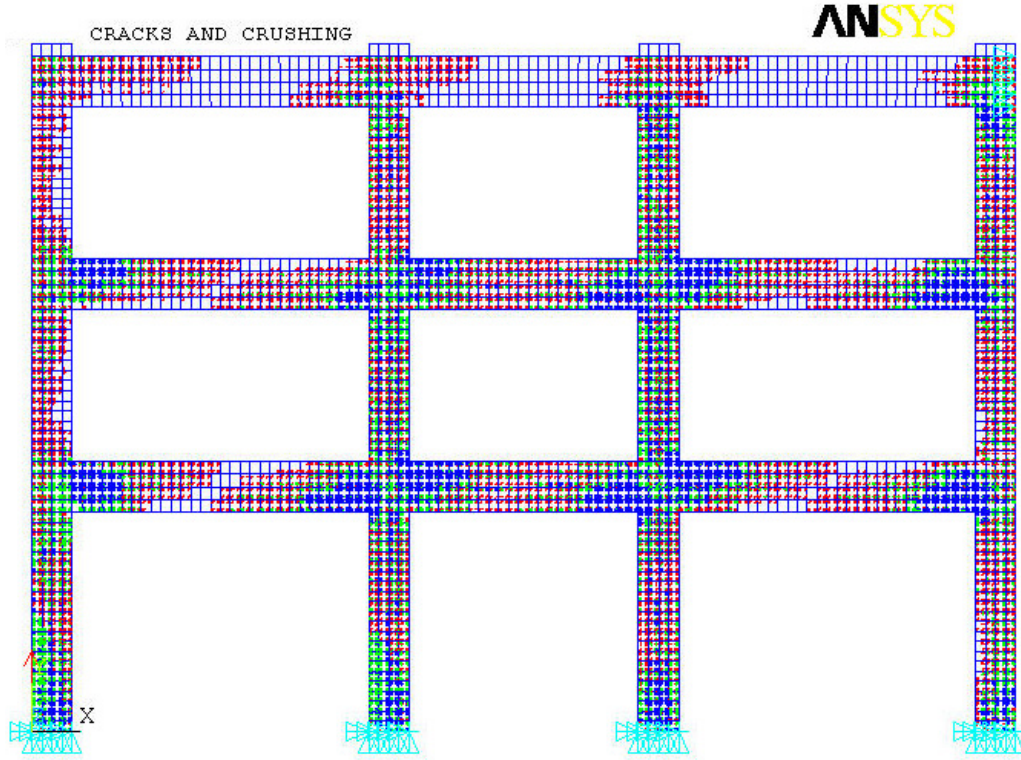
Bu amaçla çerçevenin üst köşesine sürekli artan yatay bir deplasman uygulanmış ve çözüm duruncaya kadar yüklemeye devam edilmiştir. Analiz parametrelerinden çatlak sabitleri için iki farklı varsayım yapılmıştır. Birinci varsayımda çatlak sabitleri açık çatlaklar için 0.2 ve kapalı çatlaklar için 0.8 alınmıştır. Bu parametrelerle gerçekleştirilen analiz ANSYS (a) olarak adlandırılmıştır. İkinci varsayımda ise

çatlak sabitleri açık çatlaklar için 0.5 ve kapalı çatlaklar için 1.0 alınmıştır. Bu parametrelerle gerçekleştirilen analize de ANSYS (b) denilmiştir. Uygulanan deplasman ile kuvvet arasındaki ilişki Şekil (7.27)'de gösterilmiştir. Şekilde ayrıca deneysel tersinir-tekrarlanır yükleme grafiği de karşılaştırma amacıyla verilmiştir. Görüldüğü gibi, ANSYS (a) analizinde yani çatlak sabitlerinin küçük olduğu durumda statik itme eğrisi daha düşük rijitlik sergilemiştir ve analiz yaklaşık 40mm yatay deplasmanda sona ermiştir. ANSYS (b) analizinde model daha rijit davranmış ve göçme yükü artmıştır. Bu durumda ise analiz yaklaşık 47mm yatay deplasmanda sona ermiştir. Çatlak sabitlerinin yüksek seçilmesi ile modele daha büyük deplasman uygulanması mümkün olmuştur. Ancak ANSYS (b) analizi sonuçlarının deneysel sonuçlar ile daha uyumlu olduğu görülmektedir. Deneysel olarak çerçevenin taşıyabileceği maksimum yatay yük değerleri -6551 kg ve +7145 kg olmuştur. ANSYS (a) statik itme analizinden elde edilen maksimum yatay yük değeri ise 6650kg olmuştur. Aslında bu değer deneysel yüke bu kadar yaklaşık çıkması iyi bir rastlantı olarak nitelendirilebilir. Çünkü, çerçeve modelinde bir çok varsayım yapılmıştır. ANSYS (b) analizinde ise 40mm deplasmana karşılık 7172 kg yük taşınmıştır.



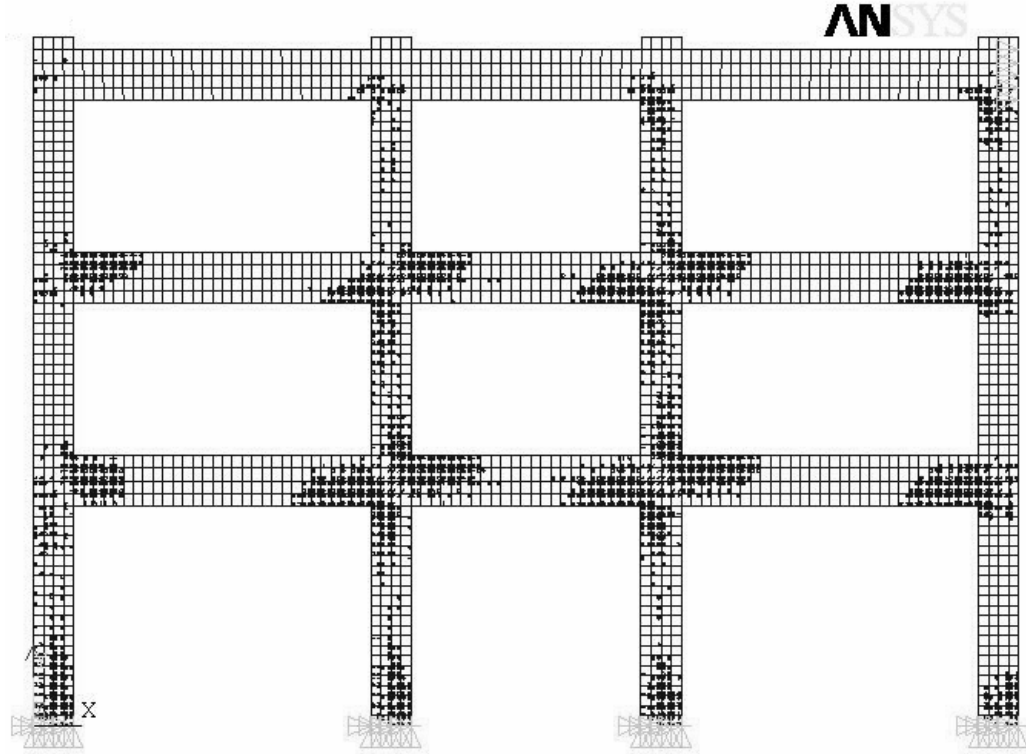
Şekil 7.27 ANSYS (a) ve (b) statik itme analizi sonuçları ve deneysel sonuçlar

Şekil (7.28)'de ANSYS (a) analizinde maksimum deplasman 40mm uygulandığı andaki çatlak haritası verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi modelin sağ üst köşesinden $-X$ yönünde deplasman uygulanmıştır. Bir elemanda çatlama bir defadan fazla farklı doğrultularda meydana gelebilmektedir. Şekil (7.28)'de farklı doğrultulardaki tüm çatlaklar gösterilmiştir.



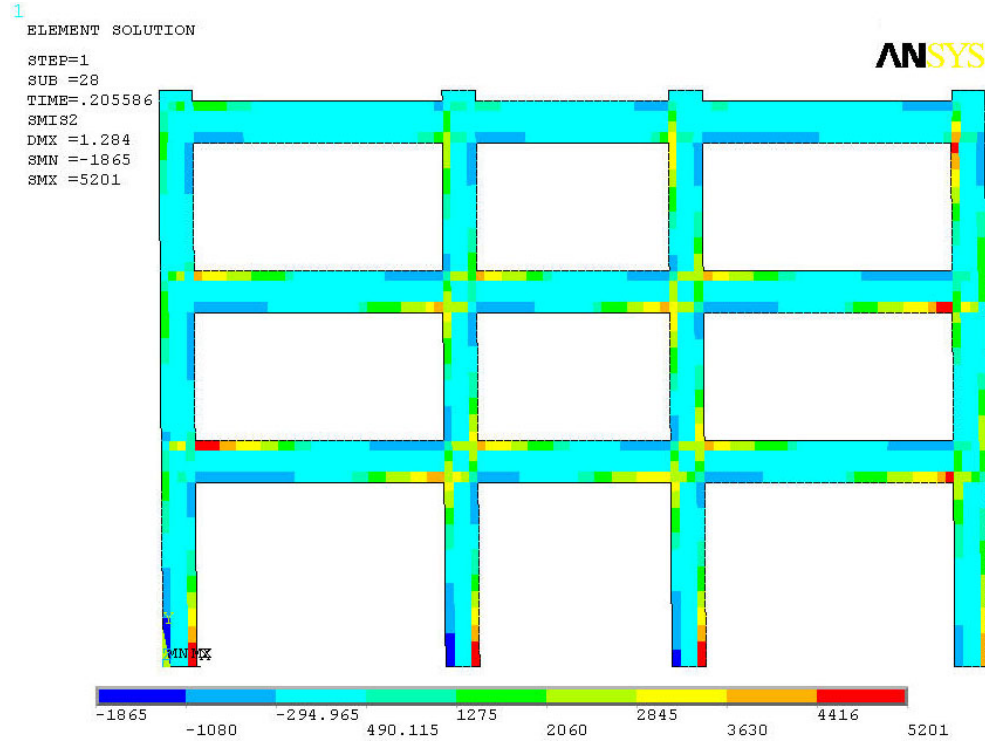
Şekil 7.28 ANSYS (a) analizi maksimum deplasman için genel çatlak haritası

ANSYS birinci, ikinci, üçüncü ve tüm çatlaklar için ayrı ayrı çatlak haritası çizilmesine elvermektedir. Karşılaştırma amacıyla Şekil (7.29)'da elemanlarda oluşan sadece üçüncü çatlaklar gösterilmiştir. ANSYS çatlak genişlikleri hakkında bir bilgi vermemektedir. Çatlak haritalarında gözle görülemeyecek kadar küçük çatlaklar da gösterildiği için deneysel çatlak haritaları ile karşılaştırma sırasında sorunlar yaşanmaktadır. Bir elemanda aynı noktada üç çatlak meydana gelmesi muhtemelen çatlakların o bölgelerde daha genişlediği anlamına gelebilir. Bu yüzden, üçüncü çatlaklara ait çatlak haritasının deneysel çatlak haritaları ile karşılaştırılmasının daha uygun olacağı düşünülmüştür.

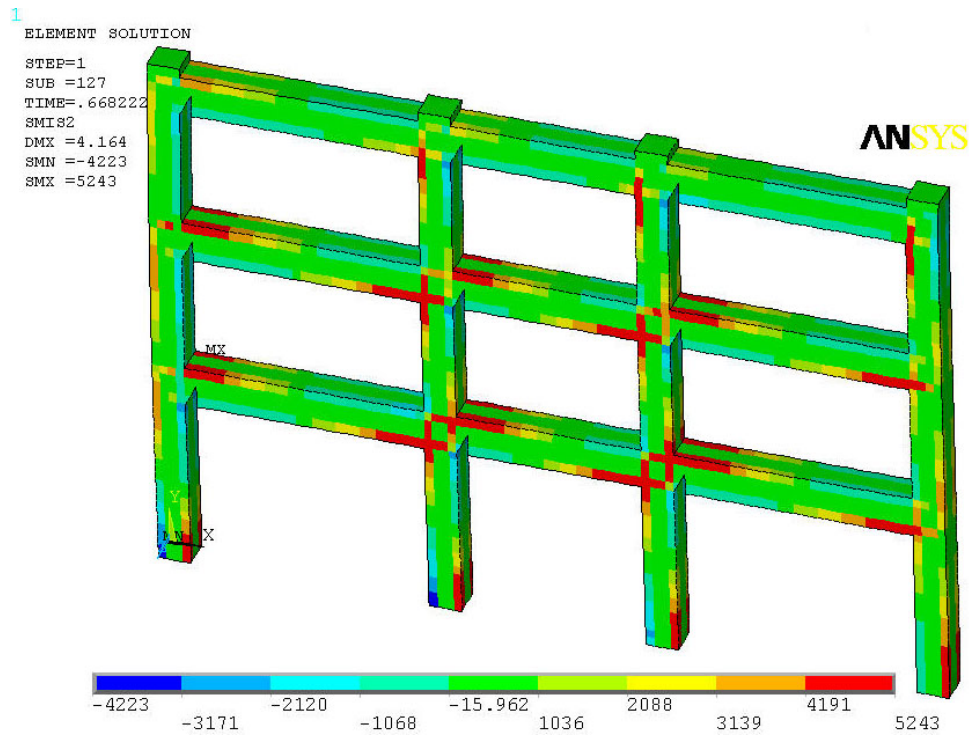


Şekil 7.29 ANSYS (a) analizi maksimum deplasmanı için üçüncü çatlaklar

Solid65 elemanında donatının dağınık (*smeared*) olarak tanımlanmasına karşın donatı gerilme verilerine erişilebilmektedir. Çerçeve modelinde 12.3 mm yatay deplasman uygulandığı anda donatıda ilk akmanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekil (7.30)'da donatı gerilmeleri grafiği verilmektedir. Maksimum yatay deplasman uygulanması sırasındaki donatı gerilme grafiği ise Şekil (7.31)'de gösterilmiştir. Burada pozitif gerilme değerleri çekmeyi, negatif gerilme değerleri ise basıncı göstermektedir. Görüldüğü gibi maksimum gerilmeler en fazla zorlanan kesitler olan kolon-kiriş birleşim noktalarında ve kolonların temel ile birleşim noktalarında meydana gelmektedir. Donatılarda çekme gerilmelerinin maksimum olduğu bölgeler ile çatlak oluşum bölgelerinin de uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 7.30 ANSYS (a) analizi 12.3mm deplasman için donatı gerilmeleri



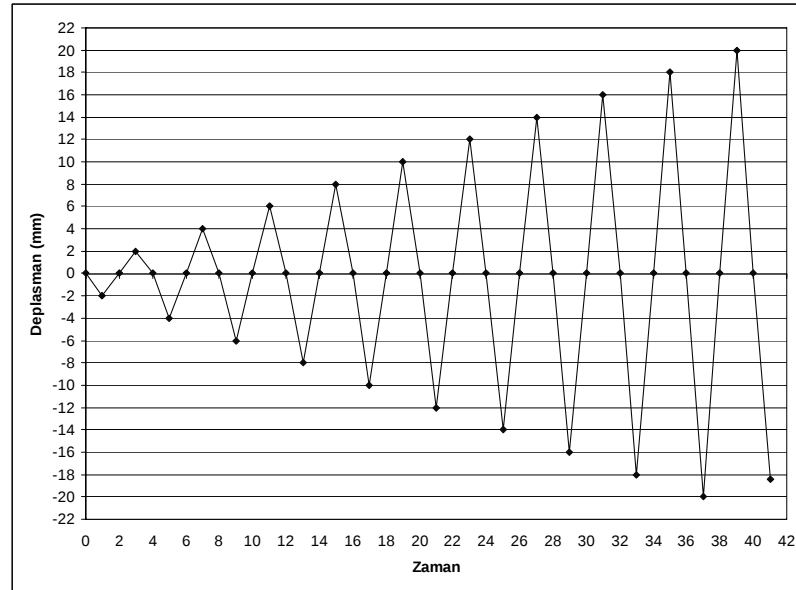
Şekil 7.31 ANSYS (a) analizi maksimum deplasman için donatı gerilmeleri

7.2.4. Çerçevenin tersinir-tekrarlanır yükleme altında analizi

Tersinir tekrarlanır yükleme üç farklı şekilde çerçeveye uygulanmıştır. Birinci yükleme tipinde deplasman 2 mm artışlarla verilmiştir. İkinci tip yüklemede 10 mm artış uygulanmıştır. Üçüncü ve son tip yüklemede ise başlangıçta 20 mm daha sonra 10mm artış ile yükleme yapılmıştır. Bu yükleme tiplerinin oluşturulmasındaki amaç, ANSYS'in farklı yükleme artışlarına karşın yük-deplasman geçmişini modellemesindeki farklılıkları görmektir.

1. Yükleme Durumu: Yüklemenin 2mm aralıklarla artırılması

Yükleme çerçeveye Şekil (7.25)'te görüldüğü gibi, çerçevenin sağ üst ve sol üst köşelerinden $\Delta u=2\text{mm}$ yatay deplasman artışı ile Şekil (7.32)'de görüldüğü gibi uygulanmıştır.



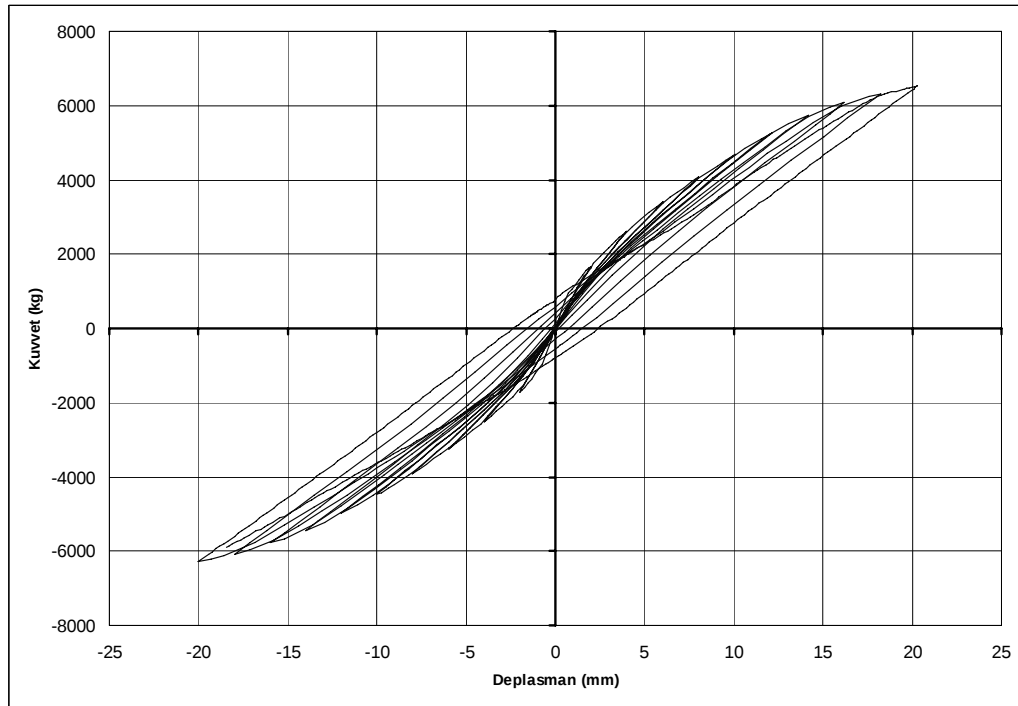
Şekil 7.32 Tersinir tekrarlanır deplasman yüklemesi ($\Delta u=2\text{mm}$)

Beton için çatlak kayma kuvveti transfer katsayıları 0.5 ve 1.0 olarak varsayılmıştır. Analiz tipi olarak *Static Analysis* seçilmiş ve *Small Displacements* kabulü yapılmıştır. Böylece geometrik nonlineerlik ihmal edilmiştir. ANSYS, beton elemanını *Large Displacements* için kullanmayı önermemektedir. Aslında mevcut

çerçeveadaki deplasman mertebesi yüksek olmasına karşın kolonlar üstündeki yüklerin düşük olmasından dolayı geometrik nonlinearlık önemini yitirmektedir.

Analizde toplam 41 yük adımı bulunmaktadır. 41 inci yük adımı -18.41mm deplasmana ulaşıldığında ANSYS artık çözüme yakınsamamıştır ve program durmuştur. Analiz içerisinde toplam 1071 hesap adımı yapılmıştır. Böylece yük adımı başına ortalama 26 hesap adımı yapılmıştır. Bu hesaba yakınsamayan hesap adımları dahil edilmemiştir.

Çerçeve köşe deplasmanı ile bu deplasmana karşılık gelen yük değerleri ANSYS *Time History Postprocessing* menüsünden elde edilmiş ve Şekil (7.33)'te gösterilmiştir.

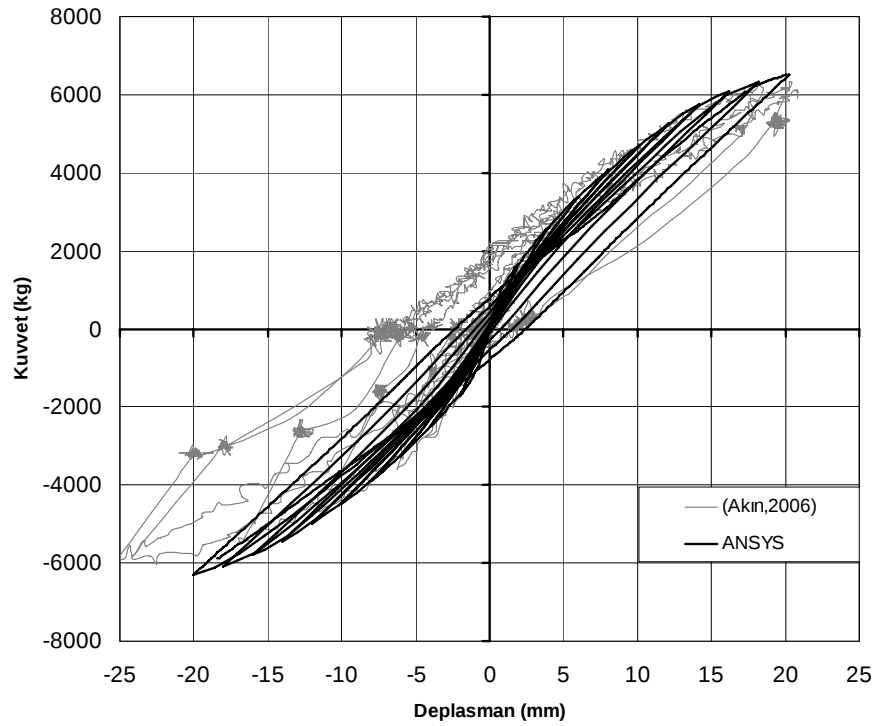


Şekil 7.32 Tersinir-tekrarlanır yükleme altında yük-deplasman geçmişi

Miller ve ark. (2001) çalışmalarında ANSYS'te tersinir-tekrarlanır yükleme altında yakınsama problemleri olduğundan bahsetmektedirler. Burada da bunun bir örneği görülmektedir. Aslında -18.4mm deplasmanda çözümün durması sistemin tamamıyla

göçmesi anlamına gelmemektedir. Bazı lokal rijitlik matrislerindeki tekilliklerin buna sebep olduğu söylenebilir.

Karşılaştırma amacıyla deneysel sonuçların yaklaşık 20mm deplasmana kadar olan kısmı ile analiz sonuçları aynı şekil üzerinde gösterilmiştir (Şekil 7.33). Şekilde, ANSYS analizindeki boşaltma eğrilerindeki doğrusallıklar dikkati çekmektedir. Deneysel sonuçlarda boşaltma eğrileri daha kıvrımlı olmaktadır. Bunun dışında analiz sonuçları ile deney sonuçlarının uyumunun kabul edilebilir derecede olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 7.33 Kısmi deney sonuçları ile ANSYS analizi sonuçlarının karşılaştırılması

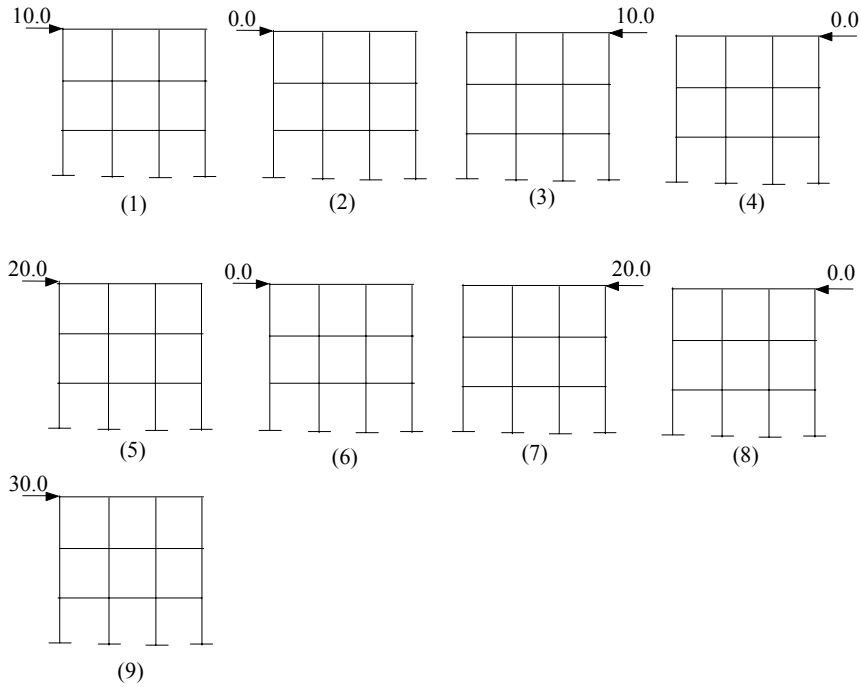
1. Yükleme Durumu için çatlak haritalarından bahsedilmeyecek bu konuya 2. Yükleme Durumu'nda daha detaylı değinilecektir.

2. Yükleme Durumu: Yüklemenin 10 mm aralıklarla artırılması

Bu yükleme durumunda yükleme aralıkları 10 mm'ye artırılmıştır. ANSYS analizi 29.3 mm deplasman uygulandığında artık çözüme ulaşamadığından dolayı yükleme 30 mm deplasmanın uygulandığı 9. adımda durdurulmuştur. Şekil (7.34) ve (7.35)'te deplasman yüklemesi ve çerçeveye uygulanma şekilleri gösterilmektedir.

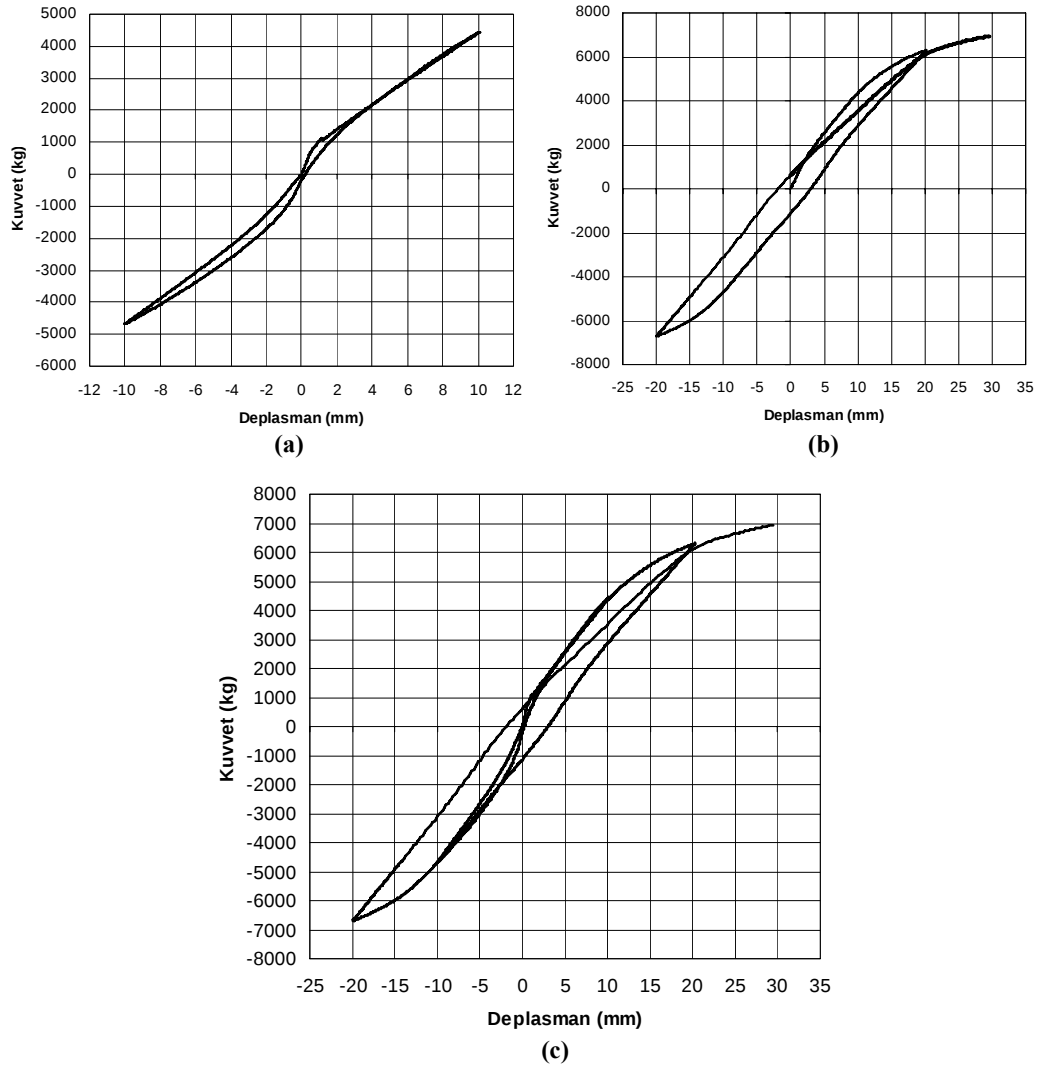


Şekil 7.34 Tersinir tekrarların deplasman yüklemesi ($\Delta u=10$ mm)



Şekil 7.35 Betonarme çerçeve modeline deplasman yüklerinin uygulanması

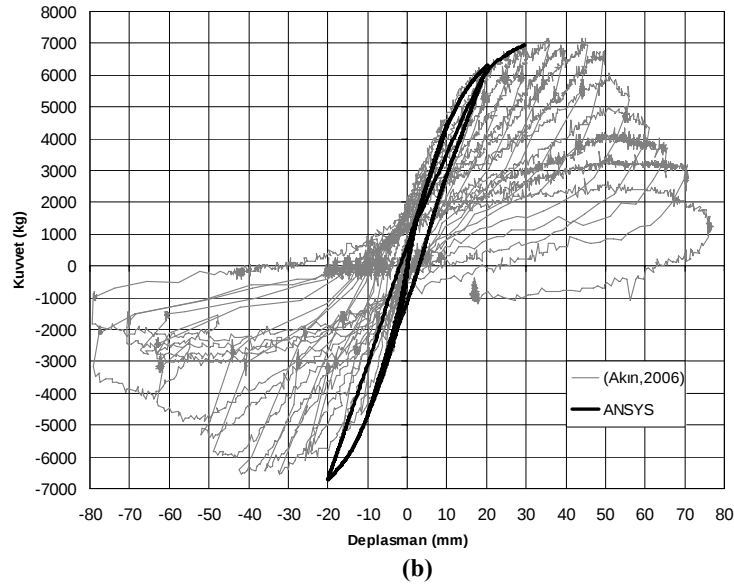
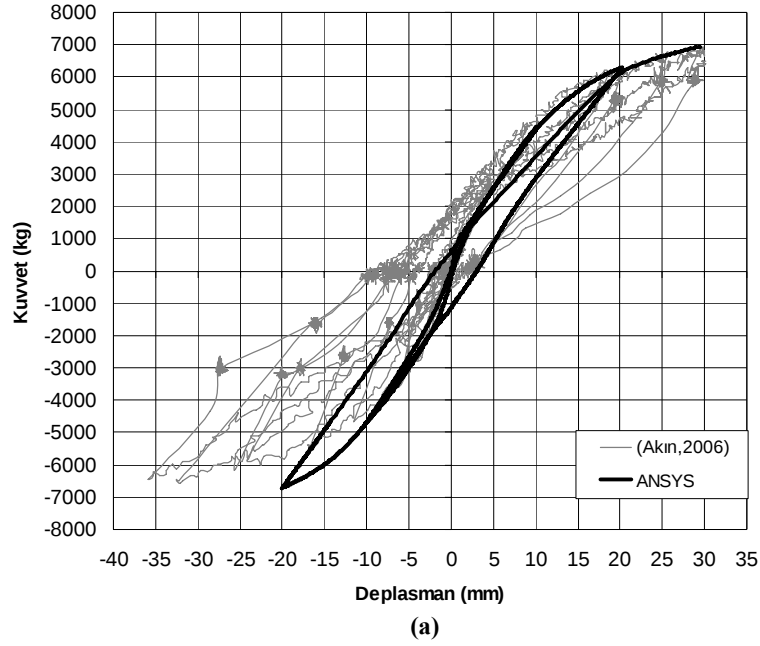
Beton için çatlak kayma kuvveti transfer katsayıları önceki analizde olduğu gibi 0.5 ve 1.0 olarak varsayılmıştır. Analiz seçeneklerinde bir değişiklik yapılmamıştır. Ancak zaman aralıkları daha sıklaştırılmıştır. Bu analizde toplam 9 yükleme adımı ve 3889 hesap adımı gerçekleşmiştir. Yükleme adımı başına ortalama 432 hesap adımı düşmektedir. Yükleme adımının 2 mm'den 10 mm'ye çıkarıldığı bu 2. yükleme durumunda, hesap adımı sayısı yaklaşık 16 kat artmıştır.



Şekil 7.36 Kuvvet-deplasman geçmişi grafikleri (a) Yükleme adımları 1-4 için (b) Yükleme adımları 5-9 için (c) Tüm yükleme adımları için

Şekil (7.36a), (7.36b) ve (7.36c)'de ANSYS analizinden elde edilen kuvvet-deplasman geçmişleri daha iyi anlaşılması amacıyla farklı yükleme adımları için ayrı ayrı verilmiştir. Şekil (7.36a)'da plastik deformasyonlar henüz çok küçüktür, Şekil

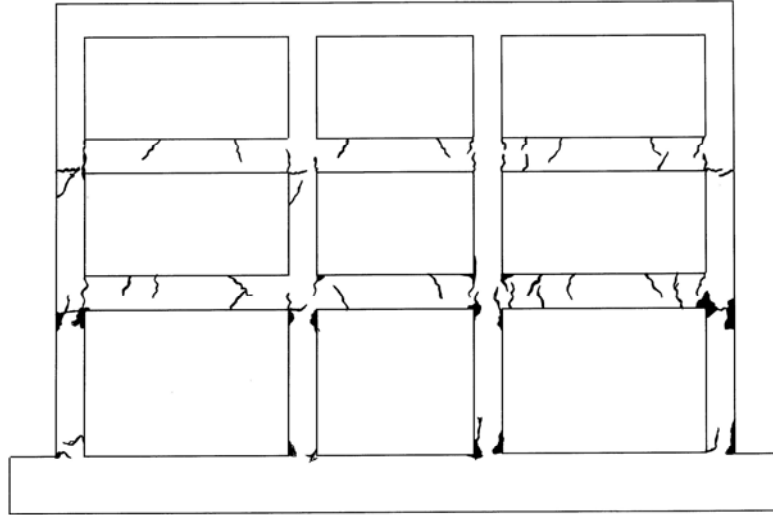
(7.36b)'de ise plastik deformasyonlar 3mm'ye kadar çıkmıştır (Kuvvetin tamamen boşaltıldığı noktada). Yine karşılaştırma amacıyla ANSYS ve deney sonuçları Şekil (7.37a) ve (7.37b)'de tek grafik üzerinde gösterilmiştir. Şekil (7.37a)'da deney sonuçlarının 30 mm'ye kadar olan kısmı ile Şekil (7.37b)'de ise deney sonuçlarının tamamı ile bir karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 7.37 ANSYS analizi ve deneysel sonuçların karşılaştırılması (a) Kısmi karşılaştırma (b) Genel karşılaştırma

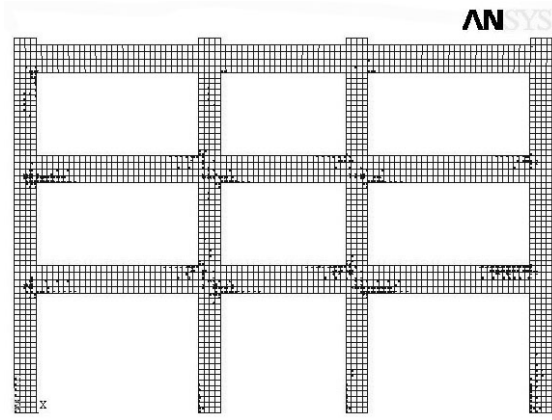
Sonuçlar incelendiğinde, ANSYS analizinin yaklaşık 30 mm deplasman uygulanmasından sonra durduğu ve deneysel olarak göçmenin yaklaşık 70 mm deplasmanda gerçekleştiği görülmektedir. Buradan şunun söyleyebiliriz ki ANSYS gerçek göçme yükünün tespiti ve yeterli deplasman aralığında çerçeve davranışının anlaşılması için mevcut parametreler ile tek başına kullanılamamaktadır. Ancak, ANSYS çerçevenin deneysel olarak taşıyabildiği maksimum yatay tepe kuvvetine yaklaşık bir sonuç vermiştir. Maksimum tepe kuvvetinden sonra yapıdaki yumuşama (*softening*) davranışını ANSYS'in modelleyebildiğine dair herhangi bir referansa rastlanılmamıştır.

Akın (2006) deneysel çalışması sırasında çerçevede oluşan çatlaklar şematik olarak Şekil (7.38)'de gösterilmiştir.

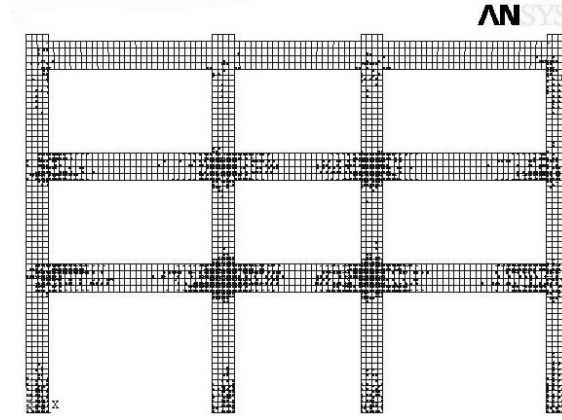


Şekil 7.38 Deney sırasında oluşan çatlakların şematik gösterimi

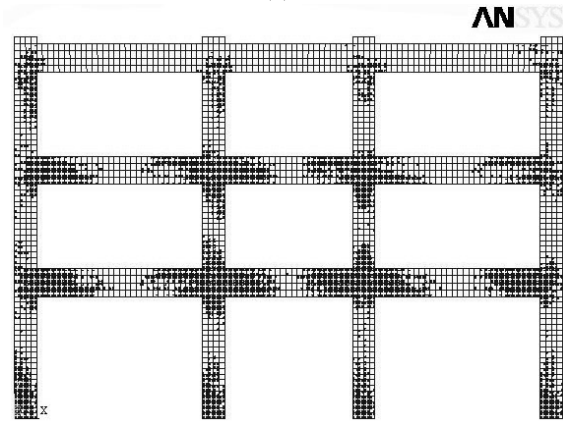
ANSYS beton modelindeki çatlak haritaları 1., 3., 5. ve 7. yükleme adımları için ayrı ayrı çıkarılmıştır. Bu haritalarda önceden bahsedilen sebeplerle üçüncü çatlaklar çizdirilmiştir. Şekil (7.39)'da bu çatlak grafikleri gösterilmiştir. ANSYS'in çatlak genişliği hakkında bir bilgi sağlamaması deneysel sonuçlar ile karşılaştırma yapmayı güçleştirmektedir.



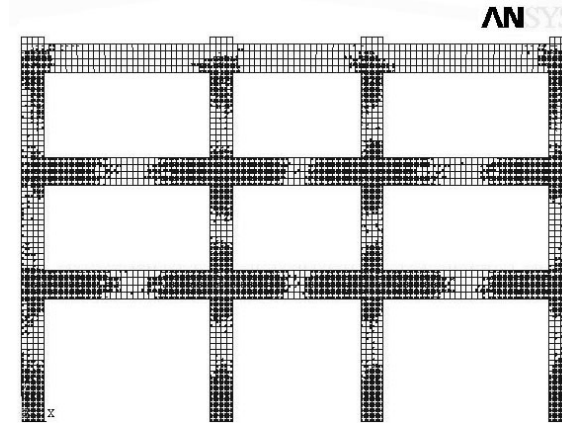
(a)



(b)



(c)



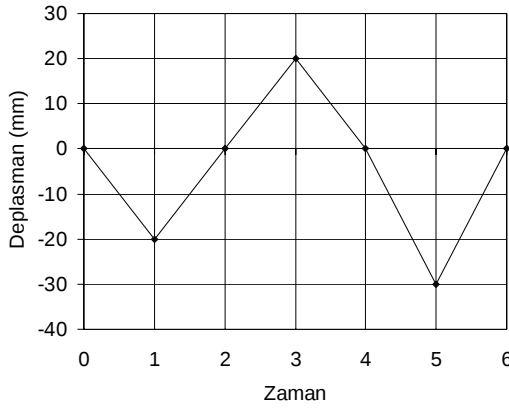
(d)

Şekil 7.39 Çatlak haritası grafikleri (a) 1. yük adımı (b) 3. yük adımı (c) 5. yük adımı (d) 7. yük adımı

Şekil (7.39d)'de sistem henüz 20mm deplasman yapmasına rağmen, Şekil (7.38)'de çerçeve numunesinin hemen hemen göçmüştür. ANSYS'te gözle görülemeyecek kadar küçük çatlaklar da gözlemlenebilmektedir. Bu yüzden analiz çatlak grafiklerinde deneydekilere nazaran çok daha fazla sayıda çatlak görülmektedir. İlk yükleme adımlarından elde edilen çatlak grafiklerinde görülen çatlaklar kolon kiriş birleşim bölgelerinde yoğunlaşmaktadır. Yük değeri artış gösterdikçe çatlaklar kolon ve kiriş boyunca yayılmaya ve artmaya başlamaktadır. Üst katlarda eğilme ve çekme gerilmeleri etkisinin azalmasından dolayı bu bölgelerde çatlaklar oldukça azdır.

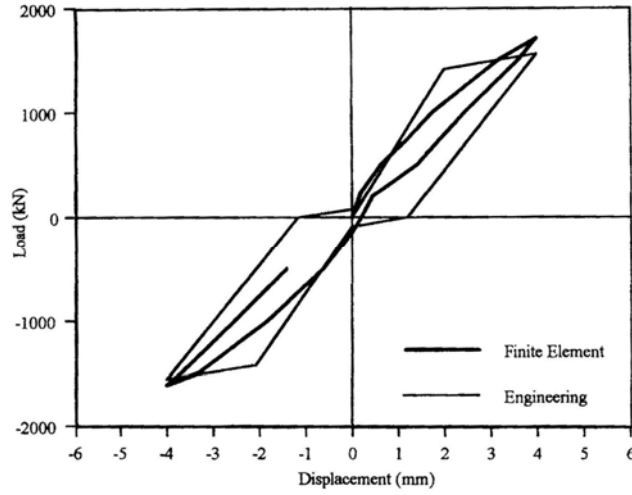
3. Yükleme Durumu: Başlangıçta 20 mm daha sonra 10 mm artırımlı yükleme

Bu yükleme durumunda çerçeveye ilk olarak 20 mm deplasman yükü verilmiş ve daha sonra 10 mm artış uygulanmıştır. Bu yükleme durumu en geniş yükleme adımli analizi temsil etmektedir ve toplam 6 yükleme adımından oluşmaktadır (Şekil 7.40).

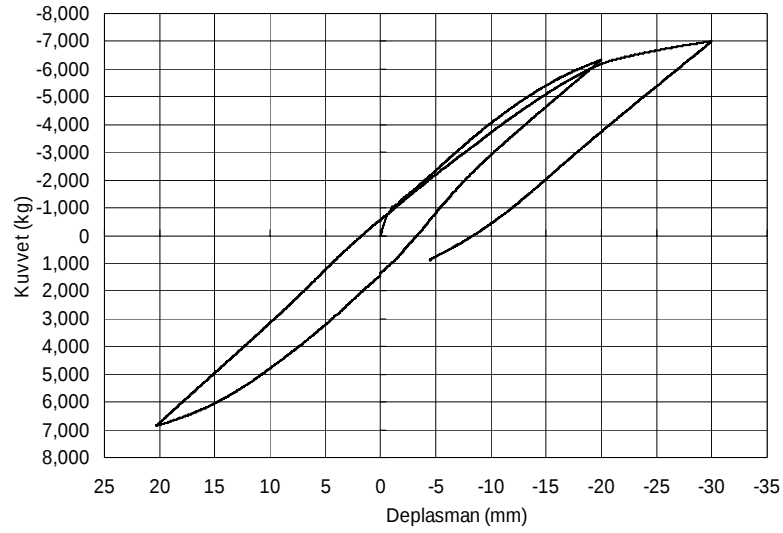


Şekil 7.40 Tersinir-tekrarlanır yükleme grafiği

Analiz seçenekleri önceki yükleme durumlarındaki gibi seçilmiştir. Analiz 6. adımın tamamlanmasına yakın, zaman 5.85 iken durmuş ve çözüme yakınsanamamıştır. Benzer şekilde yük boşaltma aşamasında iken ANSYS analizinin yakınsamaması olayı Miller ve ark. (2001) çalışmasında da gözlenmiştir. Şekil (7.41)'de de görüldüğü gibi ANSYS boşaltmayı tamamlayamamıştır. Betonarme çerçeve modeli tepe deplasmanı ile kuvvet arasındaki yükleme-boşaltma geçmişi Şekil (7.42)'de gösterilmiştir.

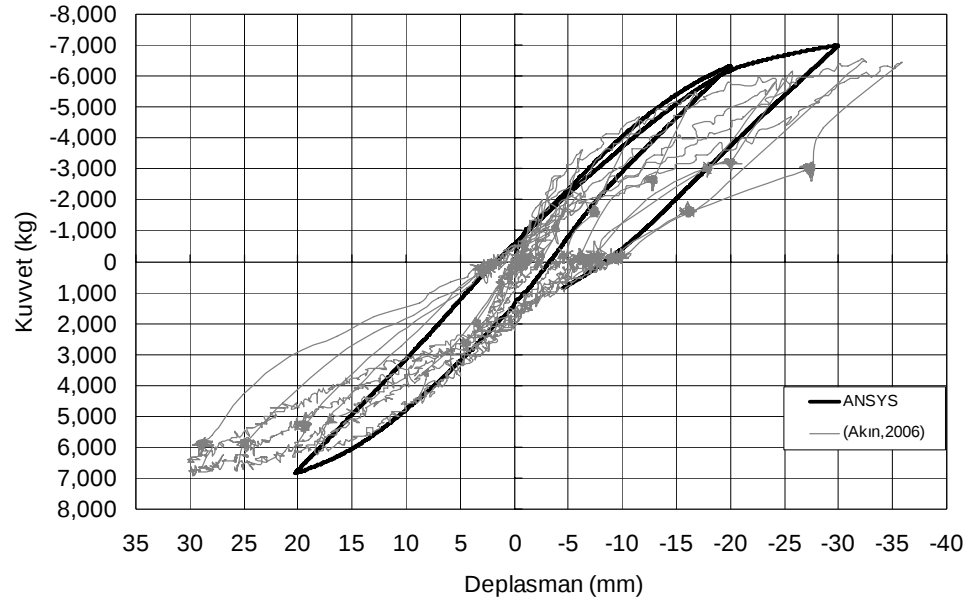


Şekil 7.41 Miller ve ark. (2001)'de ANSYS (*Finite Element*) ile Analitik (*Engineering*) hesaplamadan elde edilen sonuçların karşılaştırılması



Şekil 7.42 ANSYS analizi kuvvet-deplasman geçmişi

Yine karşılaştırma amacıyla, deneysel ve ANSYS analizine ait kuvvet-deplasman ilişkileri tek bir grafik üzerinde çizilmiş ve Şekil (7.43)'te gösterilmiştir. Bu yükleme durumunda, 2. Yükleme Durumu'nun aksine 30 mm deplasmandan sonra boşaltmaya başlanabilmektedir. Yüklemin 6. adımında kuvvetin sıfır olduğu noktada yaklaşık 8 mm plastik deformasyon gerçekleşmiştir. Bu değer, deneysel değere son derece yakındır. Genel olarak, ANSYS analizinin deney sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 7.43 Kısmi deney sonuçları ile ANSYS analizi sonuçlarının karşılaştırılması

3. Yükleme Durumu için çatlak grafiklerinde önemli bir farklılık görülmediğinden dolayı burada tekrar çatlak grafikleri verilmeyecektir.

8. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında beton ve çelik malzemelerinin nonlinear davranışının dikkate alındığı, yüklemenin tersinir tekrarlanır biçimde yapıldığı betonarme çerçeve deneylerinin nonlinear sonlu eleman modelleri ANSYS programı yardımıyla oluşturulmuş ve analizleri yapılmıştır. Beton malzemesinin gerilme-birim deformasyon ilişkisi için sargılı ve sargısız Kent ve Park matematiksel modelinden faydalanılmıştır. Modellerde ANSYS programında bulunan *Solid65* tipi betonarme elemanı kullanılmıştır. Bu eleman tipi betonun üç eksenli gerilme halinde çatlamasını modelleyebilmektedir. Beton ve çelik arasında ise tam aderans kabulü yapılmaktadır.

Çalışmada ANSYS ile sonlu eleman modellerinin oluşturulması, betonarme elemanın özellikleri ve tanımlanması sırasında gerekli parametreler incelenmiştir. ANSYS model parametreleri, bu parametrelerin programa girilmesinin aşamaları, modellerin yüklenmesi, analiz tipleri ve analizlerin nasıl yapılacağı, analiz sonrası sonuçların grafiklerinin çizilmesi anlatılmıştır.

Tekil bir Solid65 elemanının davranışı detaylı olarak incelenmiş ve bunun ardından S.Ü. Müh.-Mim. Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Deprem Laboratuvarında Akın (2006) tarafından gerçekleştirilen bir betonarme çerçeve deneyinin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Bu model üzerinde statik itme analizi ve tersinir-tekrarlanır yükleme analizleri gerçekleştirilmiştir.

ANSYS modelinde yükleme sırasında oluşan çatlaklar grafikler halinde verilmiş ve deneysel çatlak şeması ile karşılaştırılmıştır. Sonlu eleman modelinde gözle görülemeyecek kadar olan çatlakların da çizilmesinden dolayı çatlak sayısı oldukça fazla olmaktadır. Ne yazık ki, ANSYS modeli çatlak genişlikleri hakkında bir bilgi verememektedir. Genel olarak çatlakların oluştukları yerler deneysel çatlak konumları ile uyum içerisindedir.

ANSYS analizinden elde edilen ve deneysel yük-deformasyon geçmişleri birbirleriyle karşılaştırılmış ve birbirlerine oldukça yakın oldukları görülmüştür. Ancak, ANSYS analizinin çerçevenin taşıyabileceği maksimum yüke yaklaşıldığında artık çözüme ulaşamadığı ve analizin durduğu gözlenmiştir. Bu nedenle, maksimum yük noktasından sonraki çerçeve davranışının incelenmesi mümkün olmamıştır. ANSYS analizinde karşılaşılan benzer yakınsama problemlerine Miller ve ark.'nın (2001) çalışmasında da değinilmiştir. Miller ve ark. test sonrası analizleri için ANSYS'ten başka bir program kullanmaya karar vermişlerdir.

Bu tez çalışmasının literatür araştırması kısmında incelenen ANSYS ile yapılmış çalışmaların hiç birisinde bir betonarme sistemin maksimum taşıma yüküne ulaştıktan sonra etkisi altına gireceği yumuşama davranışını, yani, yük-deplasman eğrisinin negatif eğimle aşağıya indiği kısmı modellediğine rastlanılmamıştır. Hem bu tezin literatür kısmındaki çalışmaları, hem de burada yapılan çerçeve modeli analizleri göz önünde bulundurulursa, bir betonarme yapı elemanının sonlu eleman modeli ANSYS ile SOLID65 sonlu elemanı kullanılarak oluşturulduğunda, bir nonlinear statik itme (pushover) analizi ile veya tersinir-tekrarlanır yükleme altında yapılacak bir analiz ile ulaşılabilecek son nokta maksimum yükleme noktası veya bu yüklemeden daha önceki bir nokta olacaktır. Böylece, ANSYS ile yapılacak modellemelerin kendi başına bir deneysel modelin yerini tutması ve tersinir-tekrarlanır yükleme altında sünekliğin ve maksimum yükleme sonrasındaki davranışın incelenmesinde kullanılmasının mevcut çalışmalar ışığında mümkün olmadığı sonucuna varılabilir.

Analizin deplasman kontrollü ilerlemesine karşın, Newton Raphson iterasyonlarını gerçekleştirememesinin sebebi kesin olarak bilinmemektedir. Ancak, SOLID65 betonarme elemanının çatlama sonrası, sonlu eleman rijitlik matrisinde meydana gelebilecek tekil matris oluşumlarının bunun başlıca nedeni olduğu sanılmaktadır. Analizler sırasında farklı iterasyon yöntemleri denenmiş ancak bu denemeler mevcut yakınsama problemlerinin aşılması için bir çözüm olmamıştır. Daha sonraki çalışmalarda arc-length iterasyon yönteminin de göz önüne alınması düşünülmektedir.

9. KAYNAKLAR

ANSYS Kullanım Kılavuzu, 2003.

Akın, S.K., 2006, Betonarme Çerçevelerin Deprem Güvenliğinin Çapraz Çubuklar Yardımıyla Artırılması, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Tamamlanma aşamasında.

Arslan, G., 2004, Mesh Size Effect On Load Carrying Capacity Of Thereinforced Concrete Beams Without Stirrups By Using Drucker-Prager And Cracking Concrete Fracture Criteria, Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 2004/3

Barbosa, A.F., Ribeiro, G.O., 1998, Analysis Of Reinforced Concrete Structures Using ANSYS Nonlinear Concrete Model, Computational Mechanics, Idelsohn, S., Onate, E., Dvorkin, E.(eds.), Cimne, Barcelona, Spain

Bessason, B., Sigfusson, T., 2001, Capacity and Earthquake Response Analysis of RC-Shear Waals, Nordic Concrete Research, The Nordic Concrete Federation, Publication no.27,2001 (2), 1-14

Calayır, Y., Karaton, M., 2002, Kemer Barajların Drucker-Prager Yaklaşımı Kullanarak Lineer Olmayan Dinamik Analizi, Turkish J. Eng. Env. Sci. (26) 179-192.

Chansawat, K., 2003, Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates, PhD. Thesis, Oregon State Universty, USA

Chen, W.F., Han, D.J., 1995, Plasticity for Structural Engineers, Taiwan

Çakıroğlu, A., Özer, 1980, E., Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistem, İstanbul.

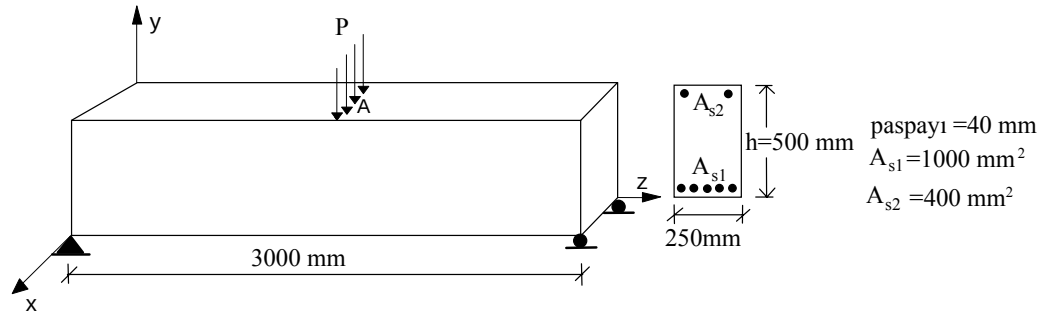
Çingı, F., 2005, Çelik Kiriş Kolon Birleşimlerinin Sismik Tasarım Parametreleri İçin Bir Yazılım, Türkiye Mühendislik Haberleri, 435-2005/1

- Erduran, E., Yakut, A., 2003, Drift Based Damage Functions for Reinforced Concrete Columns, Computers and Structures, 82 (2004) 121-130
- Ersoy, U., Özcebe, G., 2001, Betonarme Temel İlkeler TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap, İstanbul
- Fanning, P., 2001, Nonlinear Models of Reinforced and Post-tensioned Concrete Beams, Electronic Journal of Structural Engineering, 2 (2001)
- Feng, P., Lu, X.Z., Ye, L.P., 2002, Experimental Research and Finite Element Analysis of Square Concrete Columns Confined by FRP Sheets Under Uniaxial Compression, 17 th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, Gold Coast Australia, Jun 71-76
- Guo, Z.H., Zhang, X.Q, 1982. Experimental Study on Concrete Stress-Strain Curve, Journal of Building Structure 3(1): 1-12. (Çince)
- Hamil, S.J., Baglin, P.S., Scott, R.H., 2000, Finite Element Modelling of Reinforced Concrete Beam- Column Connections, Proceedings of the American Concrete Institute (Structural Journal), Vol 97, No.6, November- December, 886-894
- Kachlakev, D., Miller, T., Finite Element Modelling of Reinforced Concrete Structures Strengthened With FRP Laminates, Technical Report, No. SPR 316, Corvallis, Oregon, USA
- Kavlıcoğlu, B.M., Gordaninejad, F., Saiidi, M., and Jiang, Y., 2001, Analysis and Testing of Graphite/Epoxy Concrete Bridge Girders under Static Loading, Proceedings of Conference on Retrofit and Repair of Bridges, London, England, July
- Köksal, O., Doran, B., 1997, Beton ve Betonarme Elemanlarda Doğrusal Olmayan Oktahedral Elastik ve Plastik Bağlantılar Kullanılarak Yapılan Sonlu Eleman Uygulamaları, İMO Teknik Dergi, 1445-1455.

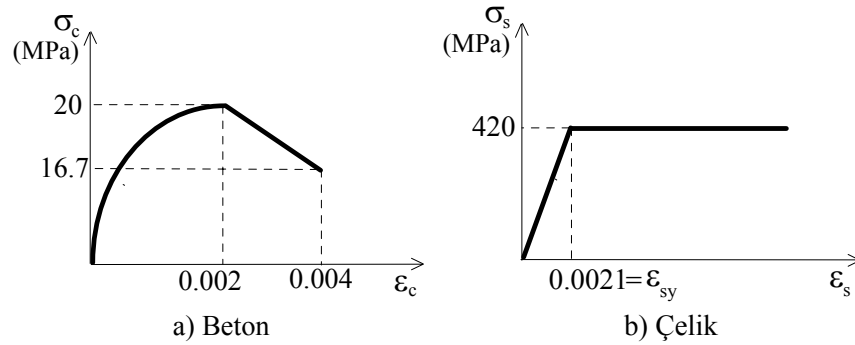
- Li, G., Kidane, S., Pang, S., Helms, J.E., Stubblefield, M.A., 2003, Investigation into FRP repaired RC columns, *Composite Structures* 62 (2003) 83-89
- Lundgren, K., Gustavson, R., Manusson, J., 2002, Finite Element Modelling as tool to Understand the Bond Mechanisms, In "Proceedings Bond in Concrete - from research to standards", Budapest, Hungary, 2002
- Miller, C., Hofmayer, C., Wang, Y., Chokshi, N., Murphy, A., Kitada, Y., 2001, Prediction of NUPEC's Multi-Axis Loading Tests of Concrete Shear Walls, Conference Transactions, International Association For Structural Mechanics In Reactor Technology SMiRT 16, Washington DC, August.
- Nuhoğlu, A., 2004, Kablolü Sistemlerin Geometrik Nonlineer Statik Hesabı, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 1, 17-38
- Parvin, A., Granata, P., 2000, Investigation on the Effects of Fiber Composites at Concrete Joints, *Composites: Part B* 31 (2000) 499-509
- Rahman, A., Mahamid, M., Abu-Hanna, J., Malhas, F., 2003, FE Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Thin Shells, ASCE 16th Engineering Mechanics Conference, July 16-18, University of Washington, Seattle, USA
- Saatçioğlu, M., Özcebe, G., 1989, Response of Concrete Columns to Simulated Seismic Loading, *ACI Structural Journal*, 86(1), 3-12.
- Uysal, H., Aşçı, N., Uzman, Ü., 2004, Düzlem Elastisite Problemi Olarak Ele Alınan Bir Kirişin Yapısal Şekil Optimizasyonu , *Advances in Civil Engineering*, 6th International Conference, ACE 2004, 6-8 Ekim, İstanbul.
- Wasti, T., 1990, Sonlu Eleman Yönteminin Betonarme Elemanlarına Uygulanması, *İMO Teknik Dergi*, 199-208.
- Willam, K. J., Warnke, E. D., 1975, "Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete", *Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering*, Vol. 19, ISMES, Bergamo, Italy, p. 174.

EK-1 ANSYS İLE AÇIKLIK ORTASINDA TEKİL YÜKLÜ BİR BETONARME KİRİŞİN GÖÇME ANALİZİ

Kesit özellikleri Ersoy ve Özcebe'de (2001) verilen, açıklık ortasında tekil yüklü bir basit betonarme kiriş modellenmiştir. Standart analitik metotlar ile elde edilmiş kesit moment-eğrilik ilişkisi ile ANSYS modelinin analizi ile herhangi bir kesit için elde edilen moment-eğrilik ilişkisi karşılaştırılmıştır. Açıklığı 3m olan, ortasından tekil yük ile yüklü basit kirişin kesit özellikleri Şekil (1)'de verilmektedir (Ersoy ve Özcebe, 2001). Beton için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Hognestad modeli, donatı için ise elastoplastik malzeme modeli kabul edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 1. Betonarme elemanın kesit ve donatı özellikleri

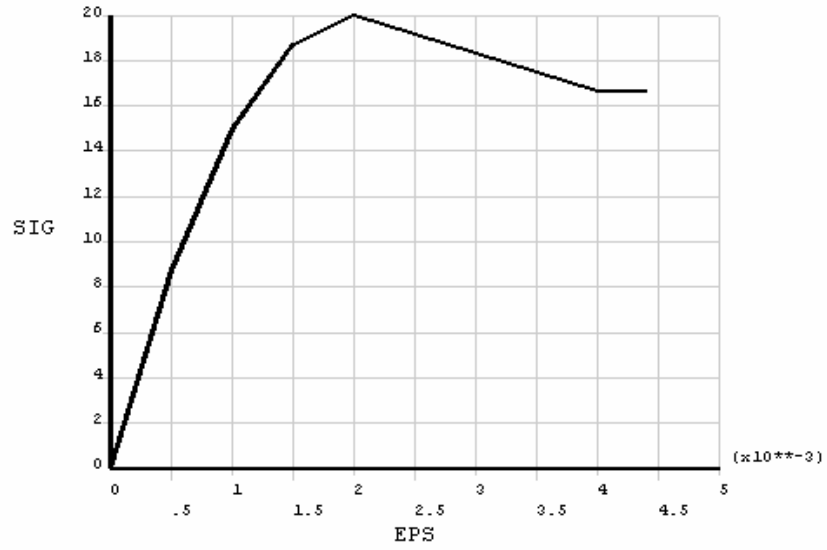


Şekil 2. Beton ve donatının gerilme-birim deformasyon ilişkileri

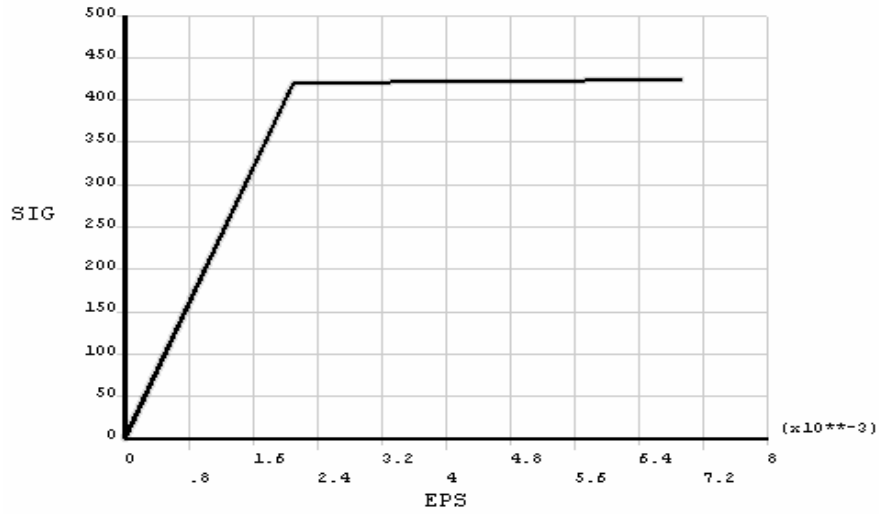
1. ANSYS Modelinin Oluşturulması

ANSYS v7.1 kullanılarak modelleme ve analizler yürütülmüştür. Betonarme kiriş *volume* nesnesi kullanarak oluşturulmuştur. Bu *volume*, x yönünde 4, y yönünde 7 ve z yönünde ise 60 elemana bölünmüştür. Eleman tipi olarak sadece *Solid65* elemanı seçilmiştir. Donatı için ayrı bir eleman tipi oluşturulmamış, kiriş donatısı civarındaki *Solid65* elemanları için *Real constant* belirlenmesi sırasında yaygın donatı tanımlaması yapılmıştır. Bu elemanlar için, donatı miktarı oranı ve donatının hangi eksen yönünde bulunduğu verileri *Real constant* yolu ile belirlenmiştir. Beton malzeme modelini tanımlarken ANSYS'te yer alan *Multilinear Isotropic Hardening* seçeneği kullanılmış ve Hognestad modeline uygun gerilme-şekil değiştirme verileri girilerek Şekil (3)'teki gerilme-birim deformasyon diyagramı elde edilmiştir. Beton için Elastisite modülü Şekil (3)'teki eğrinin ilk eğimi olan $E=17500\text{MPa}$ olarak verilmiştir. Betonun davranışı ile ilgili veriler *non-metal plasticity* $\rightarrow$ *concrete* menüsünde tanımlanmıştır. Burada betonun çekme ve basınç mukavemetleri, açık ve kapalı çatlak durumunda kayma aktarımı davranış parametresi verilmiştir. Çatlak yüzeyleri birbiriyle sürtünme halinde olmayan açık çatlaklarda kayma transferinin olmadığı düşünülmüştür fakat problemin matematiksel çözümünün kolaylığı açısından kayma transfer katsayısı 0.1 verilmiştir. Çatlak yüzeyleri birbiriyle irtibat halinde olan kapalı çatlaklar için kayma kuvvetinin %90'ının transfer edildiği düşünülmüş ve kayma transfer katsayısı 0.9 olarak verilmiştir. Çekme dayanımı, beton basınç dayanımının %10'u olarak kabul edilmiş ve dayanım değeri 2MPa olarak alınmıştır. Basınç dayanımı değeri için -1 verilerek ANSYS'in kullandığı çatlak modelinde ezilme çatlağı kontrolü engellenmiştir.

Donatı için verilen σ - ϵ ilişkisi Şekil (4)'de görülmektedir. Çeliğin σ - ϵ ilişkisi, elasto-plastik varsayılabilir. Donatı için malzeme modeli *Bilinear Isotropic Hardening* seçilmiş ve elastisite modülü gerilme-birim deformasyon ilişkisinin verildiği eğrinin ilk eğimi olarak alınmıştır. Donatı için, elastisite modülü $E= 200000$ MPa, akma dayanımı $f_y=420$ MPa olarak verilmiştir.



Şekil 3. Hognestad modeli için *Multilinear Isotropic Hardening* verileri grafiği

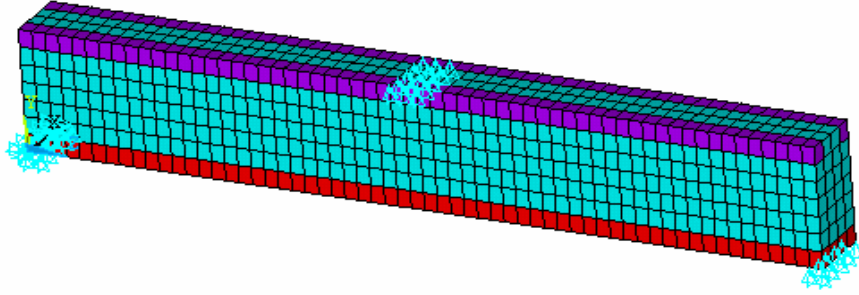


Şekil 4. Donatı çeliği için verilen *Bilinear Isotropic Hardening* verileri grafiği

Eleman tipi, eleman sabitleri ve malzeme bilgileri girildikten sonra *mesh* işlemi ile önceden oluşturulan *volume* sonlu elemanlara ayrılmıştır. Böylece 2440 düğüm ve 1680 eleman teşkil edilmiştir (Şekil 5).

Kiriş elemanın bir ucu sabit mesnetli, diğer ucu hareketli mesnetli olarak tanımlanmıştır. Elemanı, Şekil (1)'deki gibi çizgisel yükle yüklenmiştir. Nonlineer

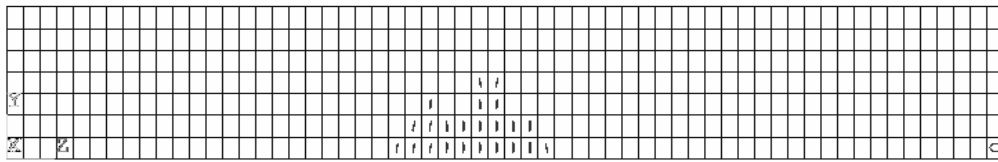
çözüm, deplasman kontrollü olarak yürütülmüş ve kiriş ortası üstündeki A noktasının deplasmanı 10 mm oluncaya kadar yüklemeye devam edilmiştir. Yük kontrollü analizler, betonun maksimum basınç gerilmesine ulaşmasından sonra sonuca ulaşamamaktadır.



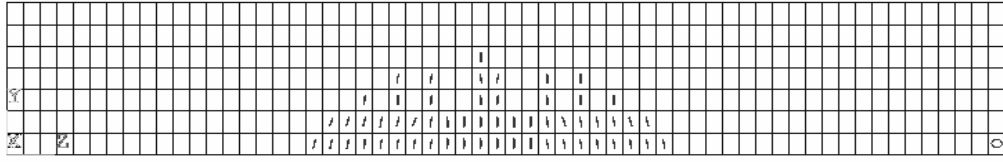
Şekil 5. Solid 65 elemanlarından oluşan üç boyutlu kiriş elemanı

2. ANSYS Analiz Sonuçları

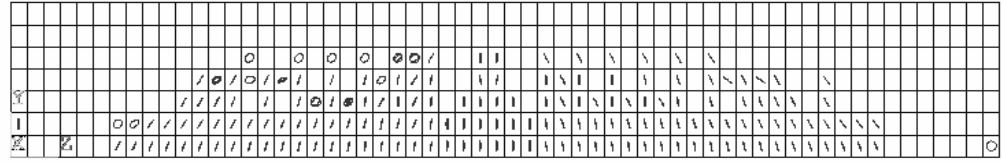
Betonarme kiriş elemanının nonlinear analizi sonucunda göçme konumuna betonun maksimum birim uzamasına ulaşması ile ulaşıldığı gözlenmiştir. Betondaki gerilme, basınç dayanımı değerine ulaştığında, donatıdaki gerilme henüz akma dayanımı değerine ulaşmamıştır. Kiriş açıklığı ortasındaki kiriş kesitinin orta üst noktası olan A noktasının deplasmanına bağlı olarak kiriş çatlaklarının oluşumu Şekil (6)-(10)'da görülmektedir. A noktasındaki düşey deplasmanın küçük değerlerinde, beklendiği gibi, çatlaklar kiriş ortasında, tekil yük altında, çekme bölgesinde oluşmaya başlamıştır. Daha sonra yükün artması ile çatlaklar mesnetlere doğru her iki yönde yayılmaya ve artmaya başlamıştır. A daki deplasman 10mm'ye ulaştığında ise kiriş ortasındaki kesit tamamıyla çatlamış ve çatlaklar kirişin büyük bir bölümünü kaplamıştır.



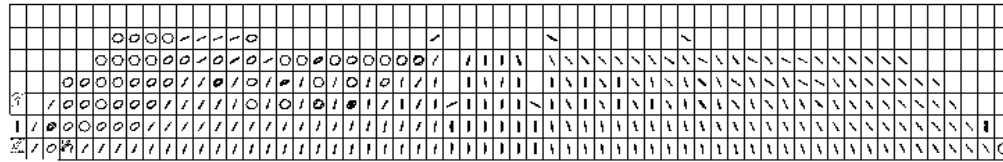
Şekil 6. $\Delta_A=0.61$ mm, $P=46$ kN iken oluşan çatlaklar



Şekil 7. $\Delta_A=1.09$ mm, $P=62$ kN iken oluşan çatlaklar



Şekil 8. $\Delta_A=2.70$ mm, $P=128$ kN iken oluşan çatlaklar

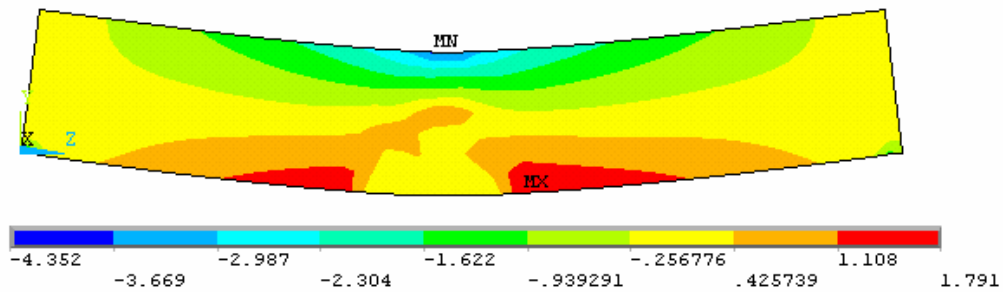


Şekil 9. $\Delta_A=5.07$ mm, $P=218$ kN iken oluşan çatlaklar

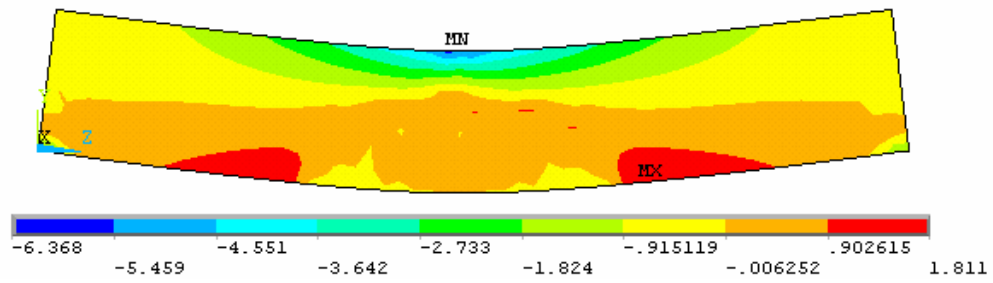


Şekil 10. $\Delta_A=10$ mm, $P=286$ kN iken oluşan çatlaklar

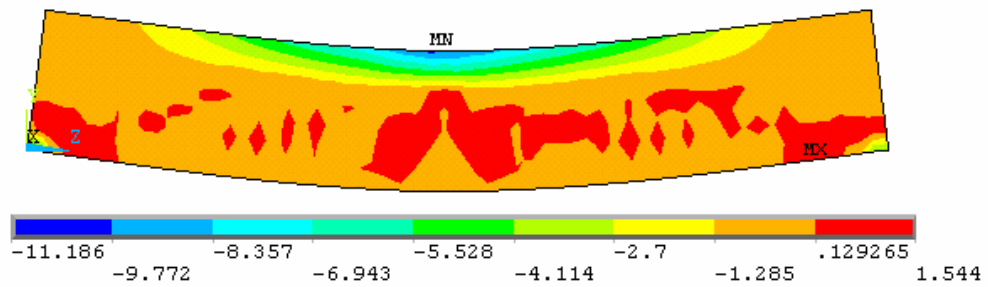
Yukarıda verilen A noktası deplasmanları için, kirişin z eksenı doğrultusundaki gerilmelerin değışimi de Şekil (11)-(15)'te eş gerilme bölgeleri ile gösterilmiştir. Bu şekillerde verilen gerilme değerlerinin birimi MPa' dır.



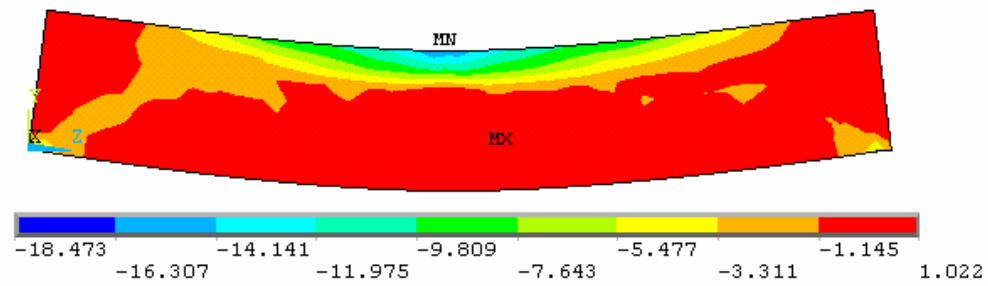
Şekil 11. $\Delta_A=0.61$ mm, $P=46$ kN iken oluşan z doğrultusundaki gerilme grafiğı



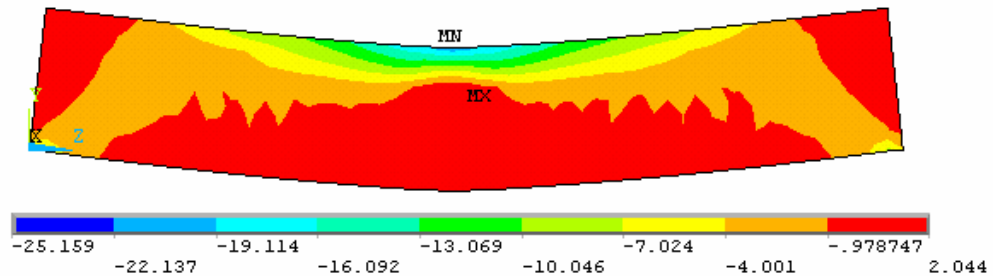
Şekil 12. $\Delta_A=1.09$ mm, $P=62$ kN iken oluşan z doğrultusundaki gerilme grafiği



Şekil 13. $\Delta_A=2.70$ mm, $P=128$ kN iken oluşan z doğrultusundaki gerilme grafiği

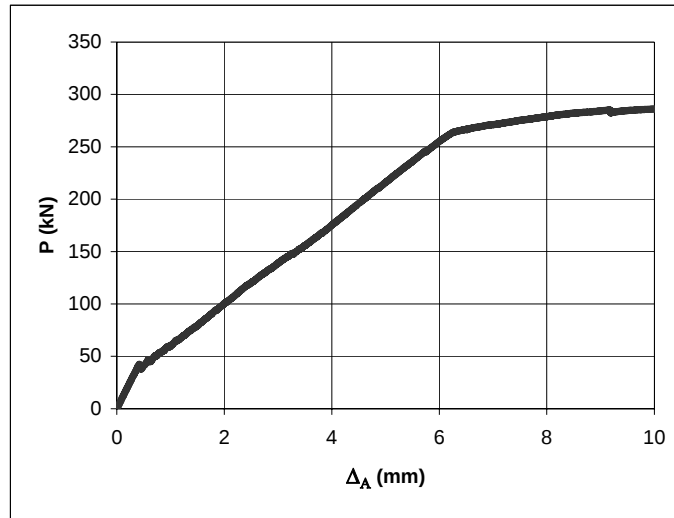


Şekil 14. $\Delta_A=5.07$ mm, $P=219$ kN iken oluşan z doğrultusundaki gerilme grafiği



Şekil 15. $\Delta_A=10$ mm, $P=286$ kN iken oluşan z doğrultusundaki gerilme grafiği

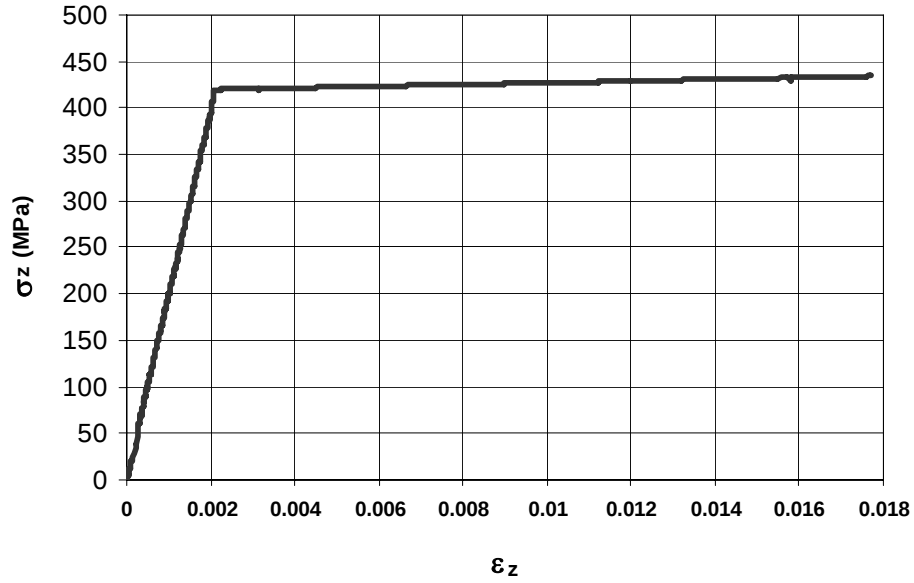
Her şeklin altında eşgerilme değerleri skalası bulunmaktadır. Skalada negatif değerler basınç, pozitif değerler çekmeyi ifade etmektedir. Şekillerde, çekme gerilme bölgelerinin çatlak oluşum bölgeleri ile uyum içinde olduğu ve basınç bölgesinin giderek A noktasına kiriş ortasına doğru noktasal hale geldiği gözlenmiştir. Nonlineer kuvvet-deplasman ilişkisini elde etmek üzere, kiriş açıklık ortasına tesir eden P düşey tekil kuvvet ile A noktasının düşey deplasmanı Δ_A arasındaki ilişki Şekil (16)'da gösterilmiştir.



Şekil 16. Tekil kuvvet P ve Δ_A ilişkisi

Şekil (16)'da elemanın yaklaşık 6 mm düşey deplasman sonrasında kirişin üst liflerindeki beton, basınç dayanımına ulaşmaktadır. Hemen ardından donatıda da akma meydana gelmektedir. Bu sebeplerle de rijitlik azalmakta ancak yük taşıma kapasitesi artmaya devam etmektedir.

Donatı çeliğindeki davranışı incelemek amacıyla da, kiriş açıklık ortasındaki kesitteki çekme donatısı için z doğrultusundaki gerilme-birim deformasyon grafiği elde edilmiş ve Şekil (17)'de verilmiştir. Yine, burada elde edilen davranış Şekil (4)'te gösterilen donatı malzemesi için tanımlanmış σ - ϵ grafiğiyle uygunluk sergilemektedir.



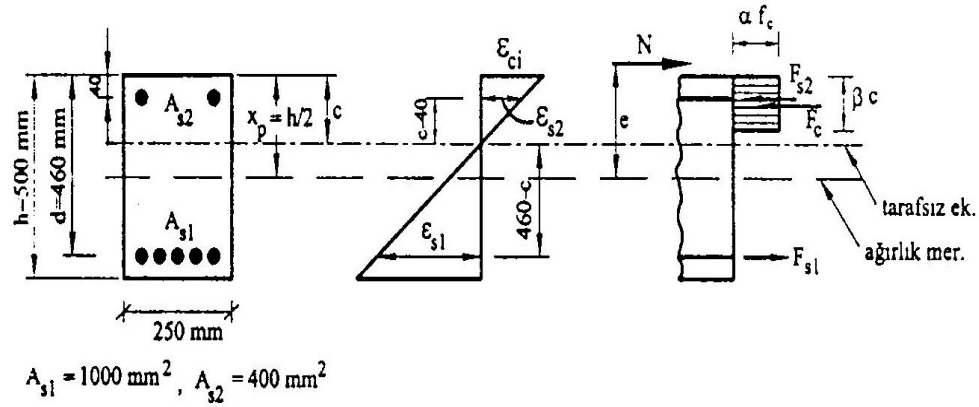
Şekil 17. Kiriş açıklık ortasındaki kesitteki çekme donatısı için Solid65 elemanından elde edilen gerilme-birim deformasyon grafiği

3. Moment-Eğrilik İlişkisi

Eğilme ve eksenel yük veya yalnız eğilme altındaki bir kesitin davranışını belirlemek için gerçek malzeme davranışını temel alarak modellenmiş bir elemanın moment-eğrilik değerleri elde edilebilir. Moment-eğrilik eğrisini oluşturan M_i ve K_i değerlerini iterasyon metoduyla hesaplayabilmek için denge ve uygunluk denklemlerinden faydalanılır. Çözüm için c (tarafsız eksen derinliği) değeri için varsayımlar yapılır, c değeri kuvvetler dengesi sağlanıncaya kadar değiştirilir. En dış lifteki beton birim kısalması, ϵ_{ci} için bir değer seçilir. Bilinen ϵ_{ci} ve c için çelik birim deformasyonları, ϵ_{si} bulunur. Bulunan ϵ_{si} değerlerinden donatıdaki gerilmeler ve donatı kuvvetleri tespit edilir. Beton basınç bileşkesi F_c hesaplanır. Dengeye ulaşıldıktan sonra, iç kuvvetlerin ağırlık merkezi etrafındaki momentleri hesaplanarak M_i bulunur. Eğrilik ise;

$$K_i = \frac{\epsilon_{ci}}{c} \quad (1)$$

denklemleri ile elde edilir.



Şekil 18. Bir kiriş kesiti için birim deformasyon dağılımı ve iç kuvvetler

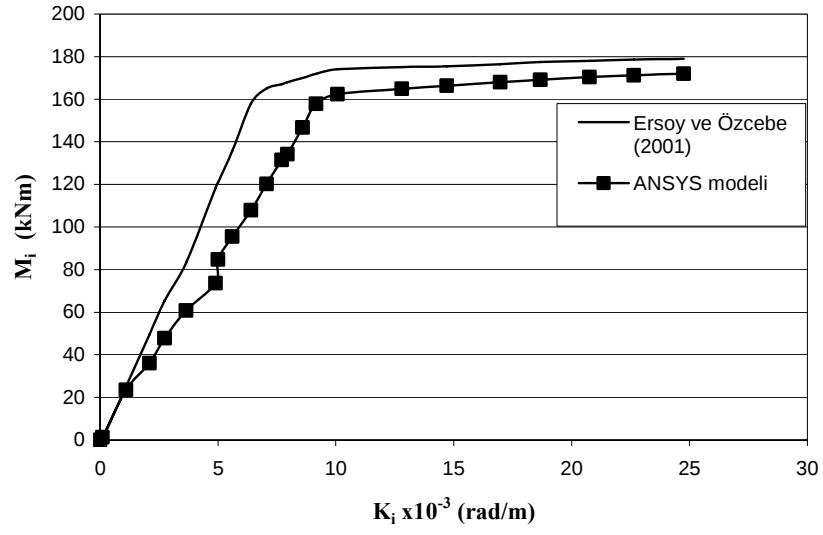
Kiriş üzerinde maksimum gerilmelerin olduğu açıklık ortası kesiti için, herhangi bir Δ_A açıklık ortası düşey deplasmanı için moment-eğrilik değeri, ANSYS analizi sonucunda şu şekilde elde edilmiştir: Ele alınan kesit için donatı elemanlarındaki gerilme değerleri tespit edilmiştir. Bu değerler donatı alanı ile çarpılarak donatı kuvvetleri, F_s , bulunmuştur. Beton basınç kuvveti F_c 'nin gerilmelerden kesin olarak hesaplanması güç olduğundan, F_c değeri kuvvetler dengesinden hesaplanmıştır. Kesit için birim deformasyon eğrisi elde edildikten sonra, birim deformasyon değerinin, ε_{ci} , sıfır olduğu nokta tespit edilmiş ve buradan c tarafsız eksen derinliği hesaplanmıştır. Eğrilik değeri ise (1) denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Moment değerleri, kesit için hesaplanan beton ve donatı kuvvetlerinin kesit ortasına göre momentleri toplamı olarak hesaplanmıştır. Anlatılan işlem, Δ_A 'nın 0mm'den 10mm'ye kadar değişmesi durumunda tekrarlanması ile moment-eğrilik diyagramı elde edilebilir. Çeşitli Δ_i değerlerine karşılık hesaplanan değerler Çizelge (1)'de listelenmiştir.

Çizelge 1. ANSYS programında yapılan modelleme sonucu elde edilen değerler

Δ_i (mm)	$\varepsilon_i \times 10^{-3}$	c_i (mm)	F_{ci} (kN) (Beton)	F_{s1} (kN) (Çekme donatısı)	F_{s2} (kN) (Basınç donatısı)	M_i (kNm)	$K_i \times 10^{-3}$ (Rad/m)
0.0687	0.03	244	1.881	3.363	1.482	1.259	0.10
0.525	0.19	168	51.983	62.939	10.956	23.523	1.13
1.044	0.30	142	77.775	94.851	17.076	36.156	2.12
1.546	0.39	142	103.205	125.457	22.252	47.806	2.74
2.049	0.49	134	131.201	158.831	27.630	60.842	3.65
2.547	0.60	122	157.525	190.615	33.090	73.652	4.92
3.044	0.62	124	180.878	219.754	38.876	84.816	5
3.548	0.70	125	203.443	247.593	44.150	95.512	5.60
4.049	0.80	125	229.776	279.616	49.840	107.864	6.40
4.540	0.89	126	256.017	311.617	55.600	120.126	7.06
5	0.99	127	279.392	341.260	61.868	131.501	7.79
5.095	1.01	127	284.938	347.930	62.992	134.068	7.95
5.595	1.13	128	311.089	380.700	69.611	146.620	8.59
6.088	1.22	133	335.088	411.320	76.232	157.898	9.17
6.581	1.30	129	337.686	421.050	83.364	162.320	10.07
7.093	1.54	117	333.76	423.420	89.660	164.819	12.82
7.596	1.67	113	330.568	425.720	95.152	166.351	14.77
8.093	1.85	109	326.006	428.070	102.064	167.944	16.97
8.499	1.98	106	322.134	429.850	107.716	169.154	18.67
9.009	2.16	104	317.916	431.760	113.844	170.318	20.76
9.511	2.31	102	315.05	433.030	117.980	171.160	22.64
10	2.5	101	312.336	434.440	122.104	171.949	24.75

Ersoy ve Özcebe (2001) tarafından iterasyon yöntemi ile çizilen moment-eğrilik grafiği ile Çizelge (1)'de ANSYS programı kullanılarak hesaplanmış M_i ve K_i değerlerinden elde edilen moment-eğrilik grafiği Şekil (18)'de görülmektedir.

Şekil 19'da görüldüğü gibi, ANSYS ile nonlinear malzeme davranışı doğru bir şekilde modellenmiştir. ANSYS analizinden elde edilen değerlerin, iterasyon yöntemi ile elde edilenlerden farklı olması beklenen bir sonuçtur. Çünkü, ANSYS *Solid65* betonarme elemanı çatlama özelliğine sahiptir ve kesitin çatlama davranışından dolayı, kesitin taşıyabileceği maksimum moment değeri daha düşük olmaktadır.



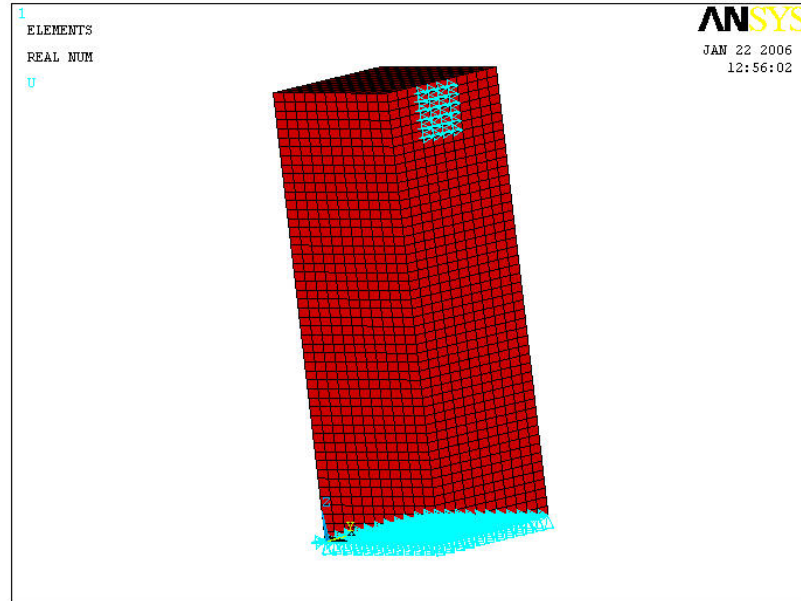
Şekil 19. Referansta verilen ve ANSYS programında yapılan modelleme sonucu elde edilen moment-eğrilik ilişkileri

EK 2. ANSYS İLE OLUŞTURULAN ÇEŞİTLİ MODEL ÖRNEKLERİ

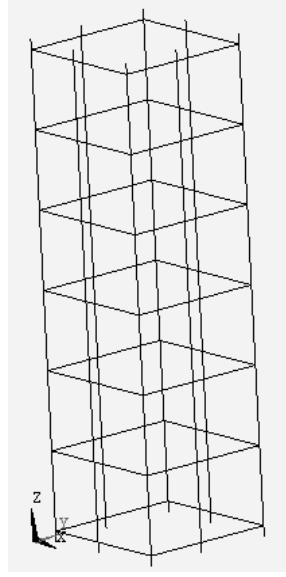
DENEYSEL OLARAK İNCELENMİŞ BİR KOLON MODELİ

1. Donatıların *Link* elemanlarla modellenmesi

Saatçioğlu ve Özcebe'den (1989) alınan verilere göre 350x350x1000mm ebatlarında bir kolon elemanının ANSYS'te sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Şekil (1)'de oluşturulan sonlu eleman modeli görülmektedir. Beton için *Solid65* eleman tipi, donatı çeliği için ise *Link8* eleman tipi kullanılmıştır. Beton malzemesinin davranışı Hognestad malzeme modeli kullanılarak *Multilinear Isotropic Hardening* seçeneği ile tanımlanmıştır. Donatı çeliği için ise referansta etriye elemanları ile boyuna donatı elemanlarının akma dayanımları farklı olarak verildiği için iki ayrı malzeme modeli oluşturulmuştur. Deplasman yüklemesi Şekil (1)'de görülen düğüm noktalarından yapılmıştır. Şekil (2)'de bu modeldeki *Link8* eleman tipi kullanılarak oluşturulan donatı elemanları görülmektedir.



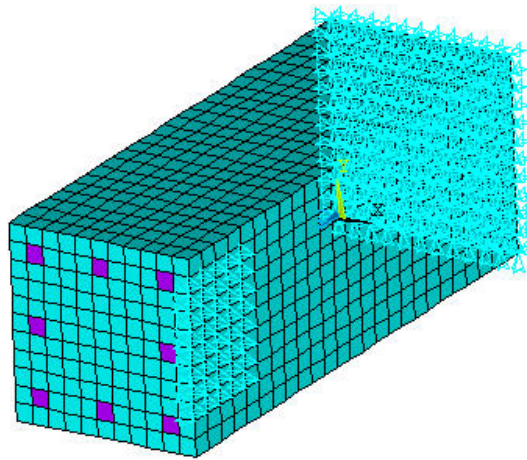
Şekil 1. Kolonun sonlu eleman modeli



Şekil 2 Kolon modelinde bulunan boyuna ve enine donatılar

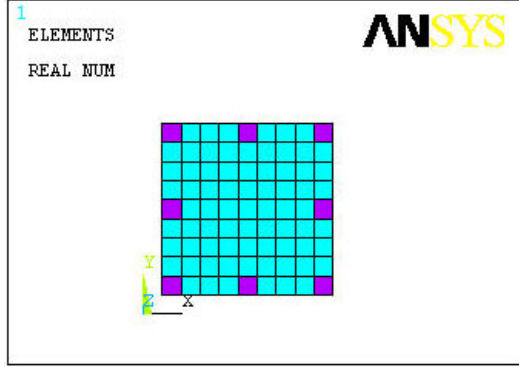
2. Donatılar için ayrı eleman kullanmadan modelleme

1. Bölümdeki kolon modeli burada yeniden oluşturulmuş ancak donatılar için ayrı bir eleman tipi kullanılmamıştır. Şekil (3)'de görülen sonlu eleman modelinde donatı çeliğinin betonun içinde yayılı olarak bulunduğu varsayılmıştır. Etriye elemanını tanımlamak için ayrı bir eleman tipi veya eleman sabiti tanımlamadan sargılı beton malzeme modeli oluşturulmuştur.

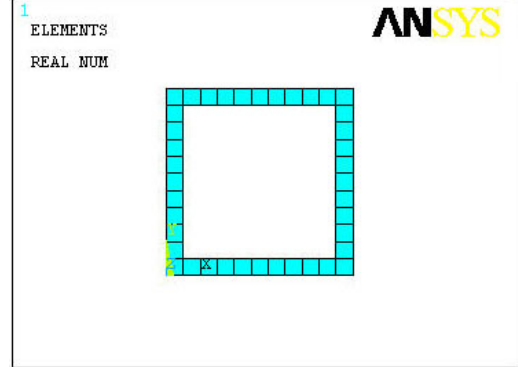


Şekil 3 Yaygın (*smeared*) donatı özelliği ile oluşturulan sonlu eleman modeli

Sargılı beton gerilme-birim deformasyon ilişkisi için Kent ve Park modeli kullanılırken, sargısız beton modeli için Hognestad modeli seçilmiştir. Şekil 4 (a) ve (b)'de bu farklı malzeme modelleri kullanılan elemanlar ayrı ayrı gösterilmiştir. Şekil (5)'te ise donatı bulunduran *Solid65* elemanları görülmektedir.

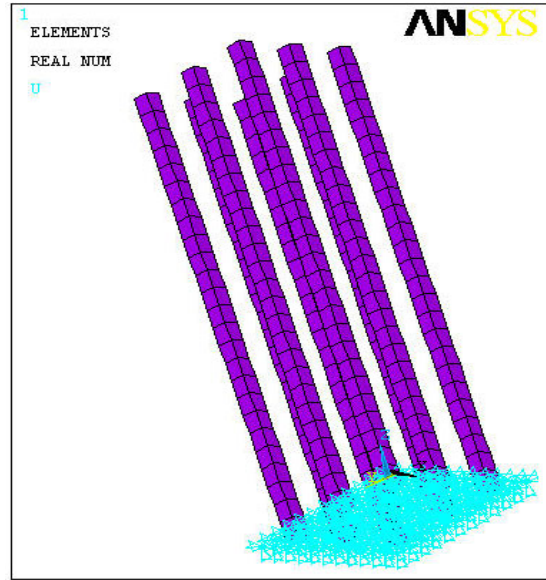


(a) Sargılı beton



(b) Sargısız beton

Şekil 4. Modelin farklı beton malzeme tanımlarına göre ayrılması



Şekil 5. Donatı bulunduran *Solid65* elemanları