

**EKSENEL YÜKLÜ KARE KESİTLİ BETONARME KOLONLARIN
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE NONLİNEER ANALİZİ**

Uğur YOZGAT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AĞUSTOS 2007
ANKARA**

Uğur YOZGAT tarafından hazırlanan “EKSENEL YÜKLÜ KARE KESİTLİ BETONARME KOLONLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE NONLİNEER ANALİZİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Yusuf DEMİREL
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oybirliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mehmet EROĞLU

Üye : Doç. Dr. Kurtuluş SOYLUK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yusuf DEMİREL (Danışman)

Üye : _____

Üye : _____

Tarih : 15/08/2007

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Uğur YOZGAT

EKSENEL YÜKLÜ KARE KESİTLİ BETONARME KOLONLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE NONLİNEER ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Uğur YOZGAT

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Ağustos 2007

ÖZET

Betonarme yapı elemanlarında yapılan deneysel çalışma verileri analitik çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, deneysel çalışmalarda kare kesitli betonarme bir kolon modellenmiştir. Modelin öncelikle, sonlu elemanlar yöntemine göre doğrusal olmayan (nonlinear) analizleri yapılmıştır. Analitik çalışmada ANSYS paket programı kullanılmıştır. Deneysel verilerle analitik çalışma sonuçlarının örtüşebilmesi amacıyla alternatif varsayımlar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar deneysel veriler ve teorik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda ANSYS paket programının mevcut sürümünün gerçekçi sonuçlar vermediği görülmüştür. Özellikle tepe noktası değerinden sonrası için herhangi bir sonuç elde edilememesi programın önemli eksikliklerinden olduğu tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 911.1.144
Anahtar Kelimeler : Nonlinear analiz, ANSYS, betonarme kolon
Sayfa Adedi : 70
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Yusuf DEMİREL

**NONLINEAR ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS
WITH AXIAL LOAD AND IN SQUARE CROSS SECTION BY WAY OF
FINITE ELEMENTS METHOD**

(M. Sc. Thesis)

Uğur YOZGAT

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

August 2007

ABSTRACT

Data concerning experimental study made on reinforced concrete structure elements are compared with the analytical study results. For this purpose, a reinforced concrete column with a square cross section in experimental studies has been modelled. First of all, nonlinear analyses of the model according to finite elements method have been done. In the Analytical study the package program, ANSYS has been used. Alternative assumptions have been made so as the experimental data to overlap with the analytical study results. The results obtained have been compared with the experimental data and theoretical analysis results. At the consequence of the study conducted, it was seen that the current version of the package program, ANSYS did not yield realistic results. As any results were not obtained especially after the peak point value, this was determined as one of the important deficiencies of the program.

Science Code	: 911.1.144
Key Words	: Nonlinear analysis, ANSYS, reinforced concrete column
Page Number	: 70
Adviser	: Assist. Prof. Dr. Yusuf DEMİREL

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardımlarıyla beni yönlendiren danışman hocam, Sayın Yrd. Doç. Dr. Yusuf DEMİREL'e minnet ve şükranlarımı sunarım. Çalışmam süresince bana çeşitli konularda yardımcı olan ve desteklerini esirgemeyen abim Öğr. Gör. Ercan YOZGAT'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	6
2.1. Genel.....	6
2.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Tarihsel Gelişimi.....	7
2.3. Sonlu Elemanlar Yönteminin Çözümü.....	8
2.3.1. Direkt yaklaşım.....	8
2.3.2. Varyasyonel yaklaşım.....	8
2.3.3. Ağırlıklı kalanlar yaklaşımı.....	9
2.3.4. Enerji dengesi yaklaşımı.....	9
2.4. Sonlu Elemanlar Yönteminde Problem Çözümünde İzlenecek Adımlar.....	9
2.5. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Elemanlar.....	9
2.5.1. Tek boyutlu elemanlar.....	10
2.5.2. İki boyutlu elemanlar.....	10

Sayfa

2.5.3. Dönel elemanlar.....	10
2.5.4. Üç Boyutlu elemanlar.....	10
2.5.5. İzoparametrik elemanlar.....	11
2.6. İnterpolasyon Fonksiyonlarının Seçimi.....	11
2.7. Eleman Direngelik Matrisinin Elde Edilmesi.....	12
2.8. Sistem Direngelik Matrisinin Elde Edilmesi.....	12
2.9. Sisteme Etki Eden Kuvvetlerin Bulunması.....	13
2.10. Sınır Şartlarının Belirlenmesi.....	13
2.11. Sistem Denkleminin Çözümü.....	13
2.12. Sonlu Elemanlar Yönteminin Diğer Yöntemlere Göre Avantajları.....	14
3. DENEY NUMUNESİ.....	16
4. MALZEME ÖZELLİKLERİ.....	22
4.1. Genel.....	22
4.2. Beton.....	23
4.2.1. Betonun davranışı.....	23
4.3. Beton ve Betonarme İçin Matematiksel Modeller.....	25
4.3.1. Hognestad modeli.....	25
4.3.2. Geliştirilmiş Kent ve Park modeli.....	26
4.3.3. Sheikh ve Uzumeri modeli.....	29
4.3.4. Çekme için $\sigma - \epsilon$ modeli.....	30
4.4. Çelik.....	31

	Sayfa
5. ANSYS İLE SONLU ELEMEN MODELİ.....	32
5.1. Genel.....	32
5.2. ANSYS Arayüzü.....	32
5.3. ANSYS İle Genel Analiz Adımları.....	34
5.3.1. Preprocessing adımı.....	35
5.3.2. Solution adımı.....	39
5.3.3. Postprocessing adımı.....	44
5.4. ANSYS İle Beton ve Betonarme Modeli.....	45
5.5. SOLID65 - ANSYS Betonarme Elemanı.....	47
5.6. Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması.....	49
6. ANSYS ANALİZİ, TEORİK HESAP SONUÇLARI VE DENEYSEL ÇALIŞMA VERİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	58
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	70

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Kare kesitli (Etriyeli) deney elemanının boyutları ve donatı özellikleri.....	18
Çizelge 3.2. Kare kesitli (Etriyeli) deney elemanının dayanım ve birim deformasyon özellikleri.....	21
Çizelge 5.1. Solid65 elemanı için tanımlanan eleman sabitleri.....	51
Çizelge 5.2. Malzeme özellikleri.....	53
Çizelge 6.1. Zaman – Uygulanan yükleme değerleri.....	58
Çizelge 6.2. Deney elemanı verileri ve ANSYS sonuçlarının karşılaştırılması.....	61

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Sonlu eleman genel görünüşü. (a) Birim üniform kalınlıklı iki düzlem sonlu eleman. (b) (a)'da ki sonlu elemanların düğümlerle bağlantısı.....	5
Şekil 2.2. Bir sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanlar.....	6
Şekil 3.1. Modellemesi yapılacak kolonun genel görünüşü (a) Donatı düzeni, (b) Geometrisi ve yükleme hali.....	17
Şekil 3.2. Deneysel çalışma düzeneği görünüşü. (a) Yükleme çerçevesinin şematik gösterimi, (b) Ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi.....	18
Şekil 3.3. YKE elemanının normalize edilmiş deneysel yük – birim deformasyon grafiği.....	20
Şekil 4.1. Donatısız betonun tek eksenli $\sigma - \varepsilon$ eğrisi.....	24
Şekil 4.2. Hognestad modeline göre betonun $\sigma - \varepsilon$ grafiği.....	26
Şekil 4.3. Geliştirilmiş Kent ve Park modeline göre betonun $\sigma - \varepsilon$ grafiği.....	27
Şekil 4.4. Sheikh ve Uzumeri modeline göre betonun $\sigma - \varepsilon$ grafiği.....	29
Şekil 4.5. Çekme altındaki beton için malzeme modeli.....	31
Şekil 5.1. ANSYS arayüzü.....	32
Şekil 5.2. ANSYS programında ana menü	34
Şekil 5.3. ANSYS programında preprocessor, solution ve postproc menüleri.....	35
Şekil 5.4. ANSYS programında eleman tipi seçimi menüsü.....	36
Şekil 5.5. ANSYS programında malzeme özelliklerinin girilmesi.....	37
Şekil 5.6. ANSYS programında line'ların manual olarak bölme menüsü.....	38
Şekil 5.7. ANSYS programında solid65 elemanı için gerçek sabitlerin giriş menüsü.....	39
Şekil 5.8. ANSYS programında yeni analiz seçimi menüsü.....	40
Şekil 5.9. ANSYS programında solution controls menüsü.....	40

Şekil	Sayfa
Şekil 5.10. ANSYS programında düğüm mesnetlenmesinde kullanılan menüsü.....	41
Şekil 5.11. ANSYS programında zamana bağlı yük artışı menüsü.....	42
Şekil 5.12. ANSYS programında yük artışı adımı sayısı menüsü.....	43
Şekil 5.13. Nonlinear analiz adımlarında load-time ilişkisi.....	43
Şekil 5.14. Concrete menüsü.....	46
Şekil 5.15. Solid65 elemanı.....	48
Şekil 5.16. Kolon modelinin üç boyutlu görünüşü.....	50
Şekil 5.17. Kolon elemanı içerisinde eleman sabitlerinin görünüşü.....	51
Şekil 5.18. Kolon elemanı içerisinde eleman sabitleri numaraları.....	52
Şekil 5.19. Sargısız beton için verilen Multilinear Isotropic Hardening verileri grafiği.....	54
Şekil 5.20. Sargılı beton için verilen Multilinear Isotropic Hardening verileri grafiği.....	54
Şekil 5.21. Donatı çeliği için verilen Bilinear Isotropic Hardening verileri grafiği...	56
Şekil 5.22. Teorik hesapta kullanılan donatı çeliğinin $\sigma - \epsilon$ grafiği.....	56
Şekil 5.23. Modellenen kolonun üst düğümlerden mesnetlenmesi.....	57
Şekil 5.24. Modellenen kolonun alt düğümlerde deplasman yüklemesinin gösterimi.....	57
Şekil 6.1. Modellenen kolonda oluşan çatlakların genel görünümü.....	58
Şekil 6.2. ANSYS modelinde oluşan gerilmelerin görünüşü. (a) Akma yükünde oluşan gerilmeler, (b) Göçme yükünde oluşan gerilmeler.....	60
Şekil 6.3. Ölçüm bölgesinde elde edilen yük - deplasman grafiği.....	61
Şekil 6.4. Deneysel çalışma verileri, ANSYS ile yapılan çalışma ve teorik hesap ile yapılan çalışma sonucu elde edilen yük - deplasman grafiği.....	63
Şekil 6.5. Deneysel çalışma verileri ve teorik hesap ile yapılan çalışma sonucu elde edilen yük - deplasman grafiği.....	64

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Kare kesitli (Etriyeli) yalın kolon (YKE) deneyi, a)Yükleme öncesi yalın kolon b) Taşıma gücünü kaybetmiş yalın kolon.....	21
Resim 6.1. Deney elemanı ile ANSYS modelinde oluşan çatlakların görünümü.....	59

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
E	Elastisite modülü
ε	Şekil değiştirme
f_{ck}	Betonun karakteristik basınç dayanımı
ρ_{st}	Kesitteki boyuna donatı oranı, pirsantaj
K	Rijitlik
N	Eksenel kuvvet
S	Beton malzeme çizelgesinde kırılma yüzeyi
u	Deplasman
σ	Gerilme
Kısaltmalar	Açıklama
LVDT	Lineer Variable Displacement Transducer (Dikey doğrusal deplasman okuyucu)
YKE	Kare kesitli yalın kolon

1. GİRİŞ

Betonarme malzeme olarak beton ve donatıdan oluşan bir yapı bileşimidir. 1800’lü yıllarda betonarmeye ilişkin önemli sayılabilecek gelişmeler olmasına rağmen, yaygın olarak kullanımı sağlanamamıştır. Ancak, 1900’lü yılların hemen başlarında tüm dünyada ve ülkemizde en çok tercih edilen yapı malzemelerinin başında gelmektedir [1].

Betonarmeyi oluşturan yapı malzemelerinin (çimento, su, demir ve agrega) kolay temini ve ucuzluğu, yüksek dayanım özelliği, yapım aşamasındaki kolaylığı, güvenilirliği ve sektörde yetişmiş insan gücüne ihtiyaç duyulmaması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

Beton, davranışı zamana ve yük geçmişine bağlı elastik olmayan heterojen, anizotrop bir malzemedir. Betonarmede, donatı çeliği gibi davranışı çoğu zaman elastik sınırlar içinde kalan ve beton gibi nonlinear ve inelastik davranış gösteren iki malzeme kompozit olarak birlikte çalışmaktadır. Donatısız betonun modellenmesi için geliştirilmiş nonlinear malzeme modelleri mevcuttur. Betonun çatlama ve ezilme gibi davranışlarının modellenmesi oldukça karmaşıktır.

Betonarme yapıların ve yapı elemanlarının davranışlarının incelenmesi doğal olarak ya deneysel yâda analitik olarak yapılacaktır. Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler neticesinde yapı elemanlarının sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi yani simülasyon tekniğinin kullanılmasıdır. Sonlu elemanlar yöntemiyle ilgili ayrıntılı bilgi Bölüm 2’de verilecektir. Deneysel çalışmalar mevcut davranışı vermektedir. Ancak, deneye tabi tutulacak olan betonarme elemanın ya da yapının şekli, boyutları, yükleme ve mesnetlenme koşulları bu yöntemin kullanılmasında kısıtlayıcı nedenlerin başında gelmektedir. Analitik çalışmalarda karşımıza malzeme varsayımlarının doğruluğu, modelin ve mesnetlenme şartlarının gerçeğe uygunluğu gibi bağlayıcı etkenler çıkmaktadır.

Laboratuar ortamında yapılacak olan deneysel çalışmalara başlamadan önce, deney düzeneğinin bir bilgisayar modelinin oluşturulması araştırmacıyı birçok olumsuzluklardan koruyacaktır. Deney düzeneğine ait uygun ölçü ve parametrelerin belirlenmesi, test edilecek deney numunesi sayısının belirlenmesi, deney sırasında ölçümü çok zor veya mümkün olmayan verilerin analiz yoluyla araştırılması, sonlu eleman modellemeleri ve bu modellerin çözümlenmeleri ile gerçekleştirilebilir. Bu tür modeller, test edilecek deney numunesi sayısının azaltılması, malzeme, işçilik ve zaman etkenlerinden avantajlar sağlayacaktır. Mevcut analitik çözümler tam olarak deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçları vermeseler bile büyük fayda ve yn gösterimi sağladığı kabul edilmektedir [2].

Bu çalışmada, deneysel çalışması yapılmış eksenel yüklü, kare kesitli betonarme bir kolonun bilgisayar ortamında modellemesi ve nonlinear sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılacak, elde edilen sonuçlar deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılacaktır.

Günümüzde kullanılmakta olan başlıca genel amaçlı Sonlu Elemanlar Yöntemi yazılımları; ANSYS, NASTRAN, ABAQUS ve MARC'tir. Betonarmenin sonlu eleman analizi için yaygın olarak kullanılan paket programı ANSYS'dir. Ayrıca bu program değişik mühendislik dallarınca da çok yaygın kullanım alanına sahip sonlu eleman paket programıdır. ANSYS'in güçlü bir grafik kullanıcı ara yüzüne sahip olması, modelleme sırasında ihtiyaç duyulabilecek çok sayıda hazır elemanı bünyesinde barındırması ve yaygın bir şekilde kullanılması bu çalışmada da tercih edilmesine sebep olmuştur. Program hakkında geniş ve ayrıntılı bilgiler Bölüm 5'te verilecektir.

Malzeme zelliklerinin tanımlanmasındaki zorluklar betonarme yapıların sonlu elemanlar analizindeki en büyük engeldir. Kesin matematiksel modellere oturtulamayan beton malzemesi ve betonarme yapı elemanları hakkında pek çok deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaya da ışık tutmuş olan geçmişte yapılmış çalışmalar hakkında kısa bilgiler verilecektir.

Barbosa ve Riberio'nun 1998 yılında yaptığı çalışmada, betonarme kiriş elemanı için iki farklı modelleme yapılmıştır. Birinci modelde, beton solid65 elemanı ile tanımlanırken, donatı için link8 çubuk elemanları kullanılmıştır(ayrık donatı), ikinci modelde ise donatılar solid65 elemanlarının bünyesinde hacimsel oranlarla tanımlanmıştır(gizli donatı). Beton için her analizde farklı malzeme modelleri oluşturulmuş(ezilmeli lineer elastik, elastik tam plastik(Drucker-Prager), ezilme ihmal multilineer pekleşmeli(Von Mises) ve ezilmeli multilineer pekleşmeli), donatı için ise iki modelle yetinilmiştir(lineer elastik, elastik-tam plastik). Bütün analizlerde yük-deplasman eğrileri düşük yüklemelerde birbirlerine çok yakın sonuçlar vermiştir. Başlangıçtaki lineer ilişki, betonda çatlama başlayınca ani bir rijitlik kaybı gösterip devamında yine yaklaşık lineer olarak devam etmiştir. Gizli donatılı modellerde bu rijitlik kaybı safhasındaki atlayış daha yumuşak ve belirsiz olmuştur. Modeller arasındaki fark asıl servis yüklerinden sonra oluşmuştur. Lineer elastik modeller kısa zamanda göçmeye ulaşmış ve bir çözüm elde edilememiştir. En iyi sonuçlar gizli donatı tekniğinin kullanıldığı modellerde, ayrıca ayrık donatılı modellemede ise elastoplastik malzeme modelinin ve özellikle ezilmenin ihmal edildiği multilineer pekleşmeli modellerden elde edilmiştir [3].

Miller ve ark.'nın 2001 yılında yaptığı çalışmada, 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 duvarlarının sonlu eleman modeli için solid65 eleman tipi yayılı donatı özelliği kullanılarak oluşturulmuştur. Kutu yapının üst ve alt döşemeleri rijit varsayılmıştır. Betonun ezilmesi ihmal edilmiştir. ANSYS analizleri sırasında çözüme yakınsama problemleri ile karşılaşmışlardır [4].

Fanning'in 2001 yılında yaptığı çalışmada, öngerilmeli iki ayrık donatılı kirişi ANSYS'te modellemiş ve bulunan sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Beton için solid65, çelik ve öngerme kabloları için link8 elemanları kullanılmış, beton ve çeliğin birim uzamaları aynı kabul edilmiştir. Klasik kiriş, yakınsamayı

kolaylaştırma ve deney elemanlarıyla uyum sağlayabilme amacıyla deplasman kontrollü yüklenmiştir. ANSYS'in betonun nonlinear davranışını modellerken yaptığı kabulle, kullandığı elemanlar ve özellikle betonun içinde tanımlanan gizli çatlak modelinin gerçeğe ne kadar uyduğunu belirlemek için yapılmış bu çalışmadan elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve gizli çatlak modelinin betonarme sistemlerin eğilmeden göçmesinde kullanılabilecek uygun bir nümerik model olduğu sonucuna varmıştır [5].

Erduran ve Yakut'un 2003 yılında yaptıkları çalışmada, betonarme kolon elemanları için hasar eğrilerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. ANSYS sonlu eleman programı kullanılarak, betonarme kolonlarda hasar oluşturan etkilere ait parametreler araştırılmıştır. Nümerik yük-deplasman eğrileri 'pushover' analizinden elde edilmiştir. Beton için Kent ve Park modeli kullanılmıştır. Kolonlar, 8 düğüm noktalı brick elemanlar vasıtasıyla modellenmiştir ve bunların kırılmaya ve ezilmeye yatkın olduğu kabulü 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 olmadı gözlenmiştir.

Yavuzer M.'nin 2005 yılında yaptığı çalışmada, daha önce deneysel çalışması yapılmış dikdörtgen kesitli, monotonik yüklü basit mesnetli betonarme bir kirişin ANSYS sonlu eleman programı ile nonlinear sonlu eleman analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Çalışmanın sonunda bilgisayarda oluşturulan sonlu eleman modelinin gerçek davranışa oldukça yaklaştığı, yinede bilgisayar modelinin deney elemanına göre daha rijit davranıp daha az süneklik göstererek göçmeye ulaştığı görülmüştür [6].

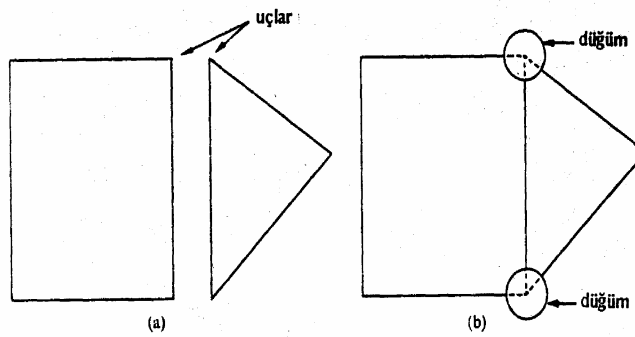
Dede F. T.'nin 2006 yılında yaptığı çalışmada, yüklemenin tersinir-tekrarlanır olarak uygulandığı betonarme çerçeve deneylerinin modellenmesi amaçlanmıştır. Modelleme için, beton ve çelik arasında tam aderans kabulü yapan ve çok eksenli gerilme durumu için kırılmayı modelleyebilen bir betonarme elemanı tipi bulunan

ANSYS sonlu eleman programı kullanılmıştır. Yapılan analizlerden, tersinir-tekrarlanır yükleme altındaki yapı elemanlarının kuvvet-deplasman geçmişinin modellenmesi sırasında, taşınabilecek maksimum yüke yaklaşıldığında ANSYS analizinin çözüme ulaşma problemi yaşadığı ve durduğu, ancak durmadan önce elde edilen analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür [2].

2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

2.1. Genel

Kompleks problemlere doğrudan yaklaşmanın zor olduğu ya da doğrudan yaklaşımla çözümün daha zorlaştığı durumlarda ana problemi daha kolay anlaşılabilen alt problemlere ayırmak ve bu alt problemlerin çözümünden orijinal problemin çözümünü elde etmek çoklukla kullanılan bir metottur. Problemin çözümünde, iyi tanımlanmış sonlu sayıda eleman kullanarak yeterli bir model elde edilir. Böyle problemler sonlu olarak adlandırılır. Bazı problemler matematiksel sonsuz küçük kurgusuyla tanımlanabilir. Bu tanım diferansiyel denklemlere veya sonsuz sayıda eleman kullanımına götürür. Bu sistemler sürekli olarak vasıflandırılır. Gerçekte elastik sürekli ortamda elemanlar arası bağlantı noktalarının sayısı sonsuzdur. Sonlu elemanlar yöntemiyle bu sonsuz sayıdaki bağlantı sonlu bir sayıya indirgenir. Cisim sanki sadece bu noktalardan birbiriyle bağlıymış gibi düşünülür (Şekil 2.1). Sonlu sayıda bu bağlantı noktaları ne kadar çoğaltılırsa bu metotla yapılan çözümdeki hata oranı o kadar küçülür. Diğer taraftan bu sayının çok fazla artması da sayısal çözümlemede büyük zorluk getirir.

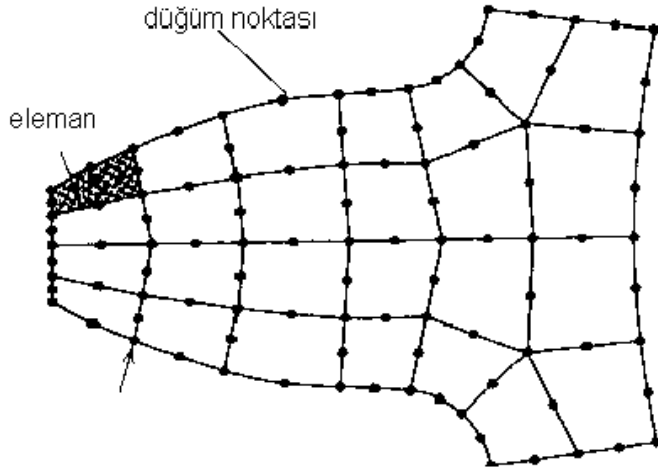


Şekil 2.1. Sonlu eleman genel görünüşü. (a) Birim üniform kalınlıklı iki düzlem (b) (a)'daki sonlu elemanların düğümlerle bağlantısı

Yöntemin üç temel niteliği vardır: İlk olarak, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesini sonlu elemanlar olarak basit alt bölgelere ayırır (Şekil 2.2). İkincisi her elemandaki, sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak

tanımlanabileceği kabul edilir. Üçüncü kabul ise, aranan değerlerin her eleman içindeki sürekli olan tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlıdır.

Sonlu eleman yönteminin önemli özelliği, tüm problemi temsil etmek üzere elemanları bir araya koymadan önce, her bir elemanın ayrı formüle edilebilmesidir. Eğer bir gerilme analizi problemi ile uğraşıyorsak her bir elemana etki eden dış kuvvetler ile elemanın düğüm noktalarının, yer değiştirme bağıntıları bulunduğu tüm sistem çözülmüş olur. Bu şekilde karmaşık bir problem oldukça basit bir probleme dönüşür. Sonlu elemanlar yönteminde eleman özellikleri değişik yollardan formüle edilir.



Şekil 2.2. Bir sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanlar

2.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Tarihsel Gelişimi

Sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak yapı analizinde kullanılmaya başlandı. Yapı alanı dışındaki problemlerin sonlu elemanlar yöntemiyle çözümü 1960'lı yıllarda başlamıştır.

Günümüzde, bilgisayar teknolojisi ve CAD sistemlerindeki ilerleme ile karmaşık problemlerin modeli yapılabilir hale gelmiştir. Günümüzde ilk prototipler (modeller) yapılmadan önce bilgisayarda birçok alternatif konfigürasyonlar yapılmaktadır.

Genel amaçlı sonlu elemanlar paket programları 1970'li yıllardan itibaren ortaya çıkmaya başlamıştır. 1980'li yılların sonlarına doğru ise artık paket programlar mikro bilgisayarlarda kullanılmaya başlandı. 1990 yıllarının ortaları itibariyle sonlu elemanlar yöntemi ve uygulamalarıyla ilgili yaklaşık olarak 40,000 makale ve kitap yayınlanmıştır.

2.3. Sonlu Elemanlar Yönteminin Çözümü

Sonlu yönteminin temel prensibi, öncelikle bir elemana ait sistem özelliklerini içeren denklemlerin çıkartılıp tüm sistemi temsil edecek şekilde eleman denklemlerini birleştirerek sisteme ait lineer denklem takımının elde edilmesidir. Bir elemana ait denklemlerin elde edilmesinde değişik metotlar kullanılabilir. Bunlar içinde en çok kullanılan dört temel yöntem şunlardır [7];

2.3.1. Direkt yaklaşım

Bu yaklaşım daha çok tek boyutlu ve basit problemler için uygundur.

2.3.2. Varyasyonel yaklaşım

Bir fonksiyonelin ekstremize yani maksimum ve minimum edilmesi demektir. Katı cisim mekaniğinde en çok kullanılan fonksiyoneller potansiyel enerji prensibi, komplementer (tümleyen) potansiyel enerji prensibi ve Reissner prensibi olarak sayılabilir. Fonksiyonelin türevinin sıfır olduğu noktada fonksiyonu ekstremize eden değerler bulunur. İkinci türevinin sıfırdan büyük veya küçük olmasına göre bu değerler maksimum veya minimum olduğu anlaşılır.

2.3.3. Ağırlıklı kalanlar yaklaşımı

Bir fonksiyonun çeşitli değerler karşılığında elde edilen yaklaşık çözümü ile gerçek çözüm arasındaki farkların bir ağırlık fonksiyonu ile çarpılarak toplamalarını minimize etme işlemine “ağırlıklı kalanlar yaklaşımı” denir. Bu yaklaşım kullanılarak eleman özelliklerinin elde edilmesinin avantajı, fonksiyonların elde edilemediği problemlerde uygulanabilir olmasıdır.

2.3.4. Enerji dengesi yaklaşımı

Bir sisteme giren ve çıkan termal veya mekanik enerjilerin eşitliği ilkesine dayanır. Bu yaklaşım bir fonksiyonele ihtiyaç göstermez.

2.4. Sonlu Elemanlar Yönteminde Problem Çözümünde İzlenecek Adımlar

Sonlu elemanlar yöntemi ile problem çözümünde kullanılacak olan yaklaşık çözüm işleminde izlenecek yolu değiştirmez. Çözüm yöntemindeki adımlar şunlardır:

- a) Cismin sonlu elemanlara bölünmesi,
- b) İnterpolasyon fonksiyonlarının seçimi,
- c) Eleman direngenlik matrisinin teşkili,
- d) Sistem direngenlik matrisinin hesaplanması,
- e) Sisteme etki eden kuvvetlerin bulunması,
- f) Sınır şartlarının belirlenmesi,
- g) Sistem denklemlerinin çözümü.

2.5. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Elemanlar

Sonlu eleman probleminin çözümünde ilk eleman tipinin belirlenmesi ve çözüm bölgesinin elemanlara ayrılmasıdır. Çözüm bölgesinin geometrik yapısı belirlenerek bu geometrik yapıya en uygun gelecek elemanlar seçilmelidir. Seçilen elemanların çözüm bölgesini temsil etme oranında, elde edilecek neticeler gerçek çözüme

yaklaşmış olacaktır. Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan elemanlar boyutlarına göre beş kısma ayrılabilir.

2.5.1. Tek boyutlu elemanlar

Bu elemanlar tek boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılır.

2.5.2. İki boyutlu elemanlar

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

2.5.3. Dönel elemanlar

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

2.5.4. Üç Boyutlu elemanlar

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

2.5.5. İzoparametrik elemanlar

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

İzoparametrik elemanların şu özellikleri vardır:

- a) Lokal koordinatlarda iki komşu eleman arasında süreklilik sağlanıyorsa, izoparametrik elemanlarda da sağlanıyor demektir.
- b) Eğer interpolasyon fonksiyonu yerel koordinat takımındaki elemanda sürekli ise, izoparametrik elemanda da süreklidir.
- c) Çözümün tamlığı yerel koordinatlarda sağlanıyor ise izoparametrik, elemanlarda da sağlanır.

2.6. İnterpolasyon Fonksiyonlarının Seçimi

İnterpolasyon fonksiyonu alan değişkeninin eleman üzerindeki değişimini temsil etmektedir. İnterpolasyon fonksiyonunun belirlenmesi seçilen eleman tipine ve çözülecek denklemin derecesine bağlıdır. Ayrıca interpolasyon fonksiyonları şu şartları sağlamalıdır:

- a) İnterpolasyon fonksiyonunda bulunan alan değişkeninin en yüksek mertebeden bir yüksek mertebeye kadar olan kısmi türevleri eleman sınırlarında sürekli olmalıdır.
- b) İnterpolasyon fonksiyonunda bulunan alan değişkeninin bütün türevleri, eleman boyutları sıfıra gitse bile alan değişkenini karakterize etmelidir.
- c) Seçilen interpolasyon fonksiyonu koordinat değişimlerinden etkilenmemelidir.

Hem yukarıdaki şartları sağlamaları hem de türev ve integral almadaki kolaylığından dolayı interpolasyon fonksiyonu olarak genelde polinomlar seçilir. Seçilen polinom, yukarıdaki şartların gerçekleşmesi için uygun terimleri ihtiva etmelidir.

2.7. Eleman Direngenlik Matrisinin Elde Edilmesi

Eleman direngenliğinin bulunması, elemana etki eden dış etkenler ile alan değişkenleri arasında bir ilişki kurmak anlamına gelmektedir. Eleman direngenliğini elde ederken çözülecek problemin konusu, atanan değişkeni, seçilen eleman tipi, seçilen interpolasyon fonksiyonu, eleman özelliklerine elde ederken kullanılan metot gibi pek çok faktör göz önüne alınmak durumundadır. Etki eden bu faktörlere göre de eleman direngenliğinin elde edilmesinde değişik yollar izlenir.

2.8. Sistem Direngenlik Matrisinin Elde Edilmesi

Sistem direngenlik matrisi sistemin düğüm sayısı ve her düğümdeki serbestlik derecesine bağlı olarak belirlenir. Elemanlar için hesaplanan direngenlik matrisleri, elemanın üzerindeki düğüm numaralarına bağlı olarak genel direngenlik matrisinde ilgili satır ve sütununa yerleştirilir. Farklı elemanlar tarafından ortak kullanılan düğümlerdeki terimler genel direngenlik matrisinin ilgili satır ve sütununda üst üste toplanmalıdır. Elemanların düğüm numaralaması bir sistematığe göre yapılırsa genel direngenlik matrisinde elemanlar diyagonal üzerinde üst üste toplanır. Genelde direngenlik matrisi simetriktr.

2.9. Sisteme Etki Eden Kuvvetlerin Bulunması

Bir problemde sisteme etki edebilecek kuvvetler şunlar olabilir:

Tekil Kuvvetler: Tekil kuvvetler hangi elemanın hangi düğümüne ne yönde etki ediyorsa genel kuvvet vektöründe etki ettiği düğüme karşılık gelen satıra yerleştirilir. Problemin cinsine göre tekil yük kavramı değişebilir. Örneğin ısı iletimi probleminde elastisite problemindeki tekil yüke karşılık noktasal ısı kaynağı veya tanımlı ısı akışı yükleri bulunmaktadır.

Yaylı Kuvvetler: Bu kuvvetler bir kenar boyunca ya da bir alanda etkili olurlar.

Kütle Kuvvetleri: Eleman hacmi için geçerli olan merkezkaç kuvveti ve ağırlık kuvvetleri gibi kuvvetlerdir.

2.10. Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Her problemin tabii olarak ya da yapay sınır şartları vardır. Sınır şartları, cismin çeşitli kısımlarındaki elastik yer değiştirmelerin ölçülebileceği bir referans sağlar. Bir çubuk eleman ele alalım. Bu eleman için bir sınır şartı tanımlanmazsa, etki eden düğüm kuvvetlerinin büyük, küçük ya da eşit olmasına göre hareket eder ve deplasman $u_1=u_2$ olarak çubukta rijit cismin hareketi gözlenir.

Birinci durumdaki rijit cisim hareketi genel direngenlik matrisinin tekil olmasına sebep olur. Bu durum $u_1=u_2$ 'nin ölçüleceği bir referans noktasının belirlenmemiş olmasına bağlanabilir. Gerçekte bir referans noktası sağlanmak zorundadır.

2.11. Sistem Denkleminin Çözümü

Çözüm için sistemin sınır şartları da göz önüne alınarak direngenlik matrisinin tersini almak yeterlidir. Fakat bilgisayar kapasitesi ve bilgisayar zamanı açısından çok

büyük matrislerin çözümünü ters alam işlemi ile yapmak yerine Gauss eliminasyon yöntemi ile daha az kapasite ve daha kısa sürede yapmak mümkün olmaktadır.

Kullanılan yaklaşım ne olursa olsun sonlu eleman yöntemiyle problem çözümünde aşağıdaki yol takip edilir:

a) Sürekli ortamın (çizimin) hayali çizgilerle veya yüzeylerle elemanlara bölünmesi elemanların geometrisi ortamın fiziki yapısına uygun seçilmelidir.

b) Komşu elemanlar birbiriyle belirli sayıda düğüm noktaları vasıtasıyla bağlanmış kabul edilir. Bu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri basit yapıların analizinde olduğu gibi problemin bilinmeyen ana parametreleridir.

c) Her bir sonlu elemanın yer değiştirmesini tanımlamak için düğüm noktalarının yer değiştirmeleri cinsinden fonksiyonlar seçilir (genelde bir polinomdur). Polinomun derecesi elemana konulan düğüm sayısına bağlıdır.

d) Elemanlar ve yer değiştirme fonksiyonları seçildikten sonra her bir elemanın özelliklerini ifade eden matris denklemleri teşkil edilebilir. Bunun için yukarıda bahsedilen dört yaklaşımdan biri kullanılır.

e) Elemanlara bölünen sistemin özelliklerini bulmak için elemanların özelliklerini toplamak gerekir, diğer bir ifadeyle elemanların davranışlarını ifade eden matris denklemlerini birleştirerek sistemin davranışını ifade eden matris denklemlerini oluşturmak gerekir. Sistemin matris denklemleri, bir elemanın matris denklemleriyle aynı formdadır. Ancak sistem denklemlerinin terim sayısı daha fazladır.

2.12. Sonlu Elemanlar Yönteminin Diğer Yöntemlere Göre Avantajları

Sonlu elemanlar yöntemi ile verilen şekil ne kadar karışık olursa olsun, şekle ve boyutlarına esneklik kazandırmaktadır.

a) Çok bağlantılı bölgeler (yani bir veya çok delikli cisimler) veya köşeleri olan bölgeler zorluk çekilmeksizin incelenebilir.

b) Değişik malzeme özellikleri ve geometrisinde farklı güçlükler ortaya çıkmaz. geometri ve malzeme nonlineariteleri, kalıtsal olsa bile (örneğin zaman bağlı) malzeme özellikleri kolaylıkla göz önüne alınabilir.

c) Genel katılık maddesiyle ilişkili kuvvet ve yer değiştirmesi bakımından formüle edilmiş neden sonuç ilişkisi problemidir. Bu durum sonlu elemanlar yöntemiyle problemin çözümünü kolaylaştırır.

d) Sınır şartları kolayca uygulanır.

e) Sonlu elemanlar yönteminin esnekliği sayesinde çok yönlü karmaşık yapılarda diğer problemlerdeki sonuç ilişkisinden daha etkin olarak kullanılır.

Bütün bilinen bu avantajlarının yanında kullanıcılarca bilinen bazı dezavantajlarını da saymak gerekir;

a) Ara yapının alt yapılara bölünmesinde tecrübe gerektirir.

b) Çok sayıda veri girişi sebebiyle hata yapma olasılığı yüksektir.

c) Sonuçlar düzenlenmediği takdirde bir dizi sayıdan oluşur ve yorumlanması zorlaşır.

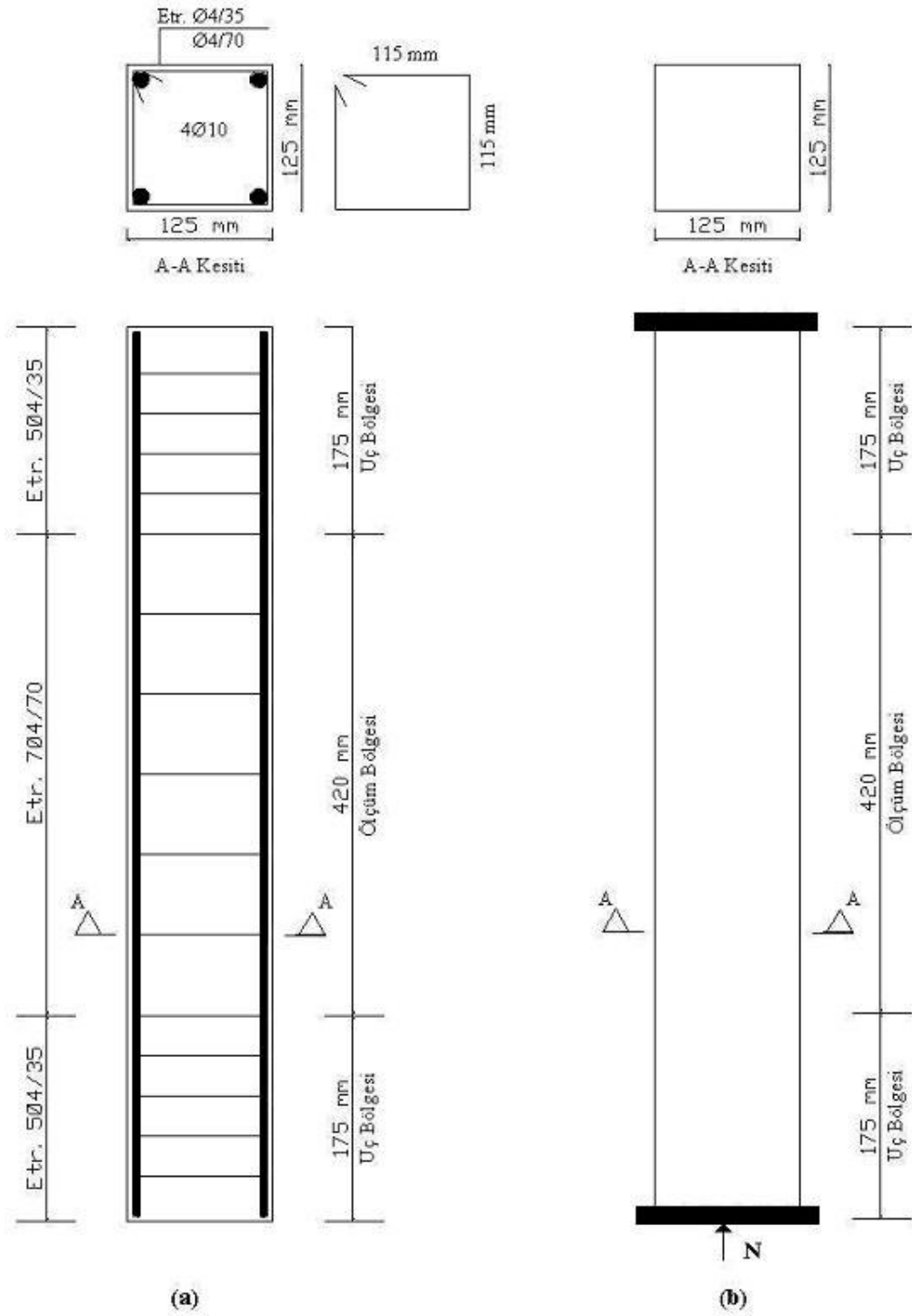
Bu nedenlerden dolayı Sonlu Elemanlar Yöntemi yüksek hızlı ve yüksek kapasiteli gelişmiş bilgisayarlar sayesinde çok karmaşık yapıların incelenmesinde araştırmacılar tarafından en çok kullanılan yöntem olmuştur.

3. DENEY NUMUNESİ

Tez çalışmasına konu olan Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda Prof. Dr. Hüsnü Can ve Figen Hekimoğlu tarafından gerçekleştirilmiş deneysel çalışma hakkında bilgi verilecektir. Bu çalışmada amaç, yetersizliği anlaşılmış kolonların güçlendirilmesine bir alternatif olması amacıyla, “kelepçe ile güçlendirme” yöntemi incelenmiştir. Yöntem kelepçelerin, etriye aralarına gelecek şekilde, kolona monte edilmesi esasına dayanmaktadır. Kare kesitli, dairesel kesitli ve fretli kolonlar yüksüz olarak güçlendirildikten sonra, eksenel yük altındaki davranış ve dayanımları incelenmiştir. Deneylerde dört tarafı serbest kolonlar kullanılmıştır. Deneysel çalışmada dokuz adet kolon test edilmiştir. Tez çalışmamızda modellemesi yapılan ve Şekil 3.1’de gösterilen kolon, YKE olarak tanımlanan kare kesitli (Etriyeli) yalın kolon’dur. Yalın kolon elemanları, yapılarda yetersizliği anlaşılmış olan mevcut kolonları temsil etmesi amacı ile güçlendirme öncesi davranışın belirlenmesi için üretilmiştir.

YKE deney elemanı, toplam 770 mm uzunluğunda ve 125x125 mm kare kesite sahip eksenel yük ile yüklenmiş basit bir kolondur. 4Ø10 boyuna donatıya sahiptir ve buna göre kesitteki boyuna donatı oranı 0,02 olmuştur. YKE elemanında ölçüm bölgesi içerisinde Ø4/70 mm.lik sargı donatısı kullanılırken, kolon alt ve üst kısımlarında etriye sıkılaştırılması yapılmış ve Ø4/35 mm.lik sargı donatısı kullanılmıştır. Donatı düzeni Şekil 3.1’de gösterilmiş, boyutlar ve donatı miktarı ise Çizelge 3.1’de verilmiştir. Buradaki temel amaç, kolonun alt ve üst kısımlarını rijitleştirerek deney esnasında hasarın ölçüm bölgesi içinde gerçekleşmesini sağlamaktır. YKE elemanında ölçüm bölgesi 420 mm olup, paralel ölçüm bölgesi 81 mm.dir. LVDT uçlarından elemana olan yatay mesafe, paralel ölçüm mesafesi olarak tanımlanmaktadır. Elemanda paspayı etriyenin dışından itibaren 5 mm olacak şekilde tasarlanmıştır.

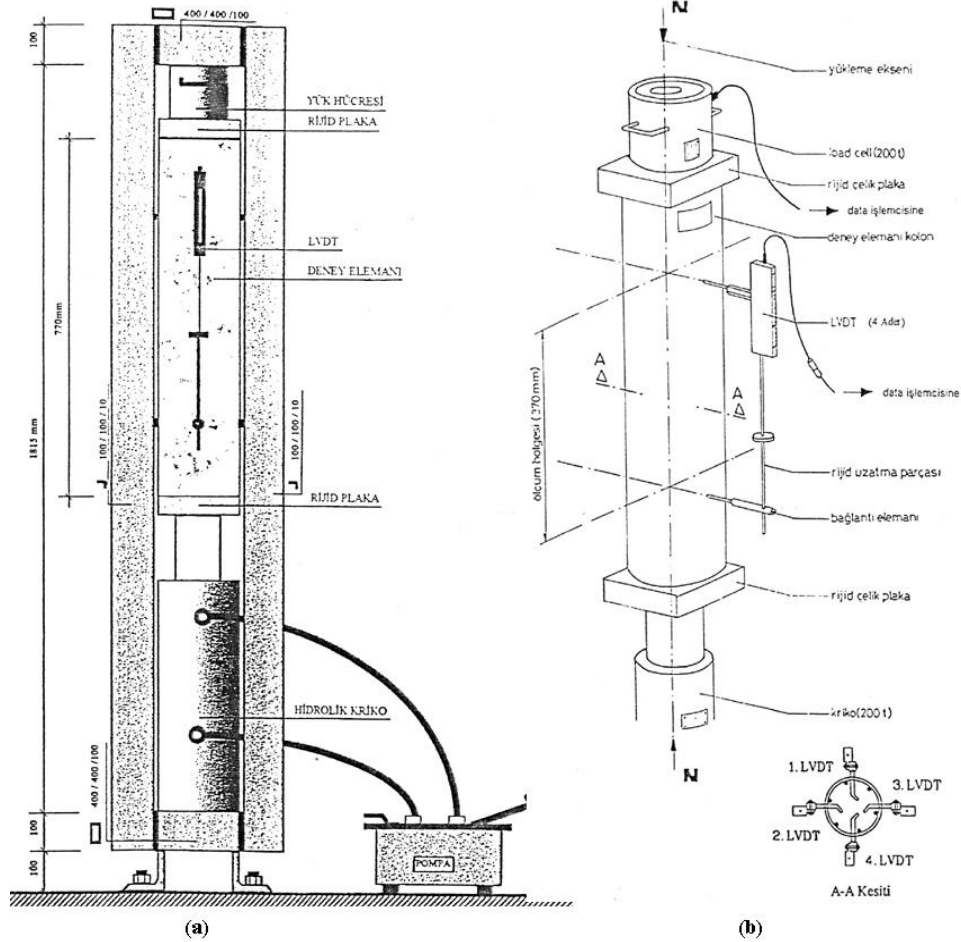
Deneysel çalışma sırasında yazar; eleman boyutlarının tespitinde, yükleme çerçevesi boyutunun, deney aletlerinin kapasitelerinin ve deneylerin laboratuvar ortamında yapılmasının eleman boyutu seçim serbestliğini kısıtladığını belirtmektedir [8].



Şekil 3.1. Modellemesi yapılacak kolon elemanı genel görünüşü. (a) Donatı düzeni, (b) Geometrisi ve yükleme hali [8]

Çizelge 3.1. Kare kesitli (Etriyeli) deney elemanının boyutları ve donatı özellikleri

Deney Elemanı	Kesit (mm^2)	Boy L(mm)	Ölçüm Bölgesi(mm)	Boyuna Donatı(A_{st})	Pursantaj (ρ_{st})	Enine Donatı
Yalın (YKE)	125x125	770	420	4Ø10	0,02	Ø4/70 Ø4/35



Şekil 3.2. Deneyel çalışma düzeneği görünüşü. (a) Yükleme çerçevesinin şematik gösterimi, (b) Ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi [8]

Deneyde bilgisayar destekli yükleme sistemi kullanılmıştır. Deneyel çalışma, deney elemanlarının boyutları göz önüne alınarak özel imal edilmiş, kapalı çelik bir çerçevede gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan yükleme çerçevesi şematik olarak Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Şekilde, çerçeve oluşturulurken kullanılan profiller ayrıntılı

olarak belirtilmiştir. Deney sırasında 420 mm olan ölçüm bölgesi LVDT'lerin donatıdan 25'er mm uzakta sabitlenmesi ile 370 mm alınmış ve bu bölgede yük – birim deformasyon grafiği elde edilmiştir.

Deney elemanı çerçeve içine yerleştirildikten sonra, 2 000 kN kapasiteli hidrolik bir krika ile elemana eksenel yük uygulanmıştır. Uygulanan eksenel yükün değeri, yükleme çerçevesinin üzerinde giriş yeri bulunan 2 000 kN kapasiteli bir yük ölçer (Load Cell) ile bilgisayardan kontrollü olarak izlenmiştir.

Eksenel deformasyonların deneylerin ileri safhalarında da hassas olarak okunabilmesi, deney sonuçlarının sağlıklı yorumlanabilmesi için gerekmektedir. Bunu sağlamak için, deney elemanları hazırlanırken beton dökümü aşamasında, ölçüm bölgesinde elemanların kenar ortalarına dişli çubuklar gömülmüştür. Deney yapılırken, deformasyon ölçerleri sabitleyen çubuklar, ankre edilmiş bu çubuklara vidalanmıştır. Deneyde tüm öteleme ölçümleri, dikey doğrusal deplasman okuyucuları (LVDT) ile yapılmıştır. Deneyde 4 adet LVDT kullanılmıştır. Deney elemanı üzerindeki deplasman ölçümleri, ölçüm yerleri ve ölçüm aletlerinin yerleşimi şematik olarak Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

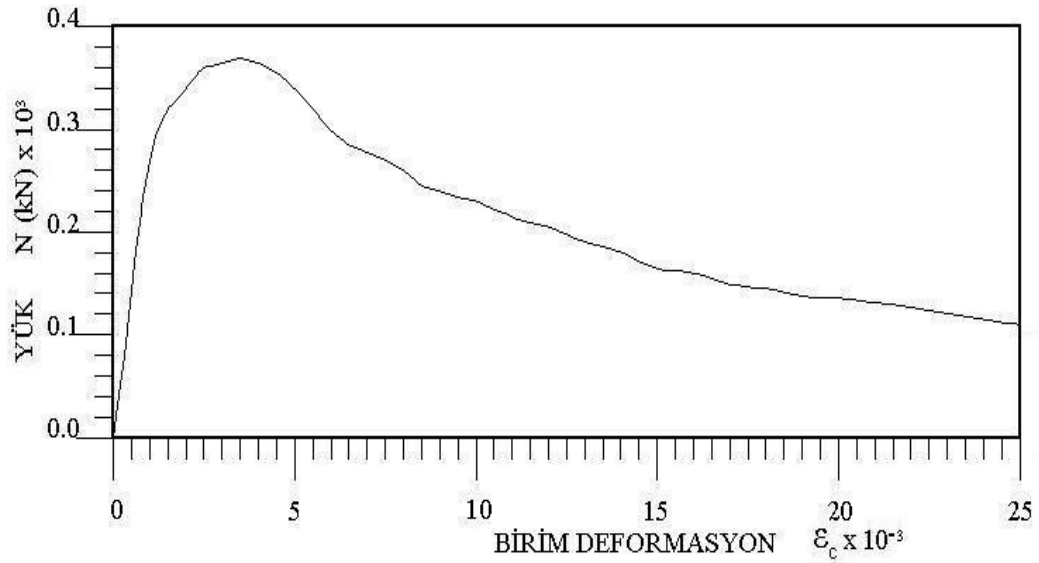
Her ne kadar deneysel çalışmada konu olarak eksenel kuvvet etkisindeki kolonlar olsa da, gerçekte bir elemanın tam olarak eksenel yüklenmesi pek mümkün değildir. Yükün eleman merkezine doğru uygulanması sağlansa bile, homojen olmayan beton yerleşimi eksenel yüklemeyi zorlaştırır.

Bu nedenlerle, tam olarak eksenel yüklenemeyen elemana yerleştirilen 4 adet LVDT'den birbirine yakın fakat farklı okumalar alınmıştır. Bu farklılığı gidermek için, her kayıttaki alınan LVDT okumalarının aritmetik ortalaması alınmış ve bulunan değer o kayıttaki kolon boy kısalması olarak kabul edilmiştir.

Deneyde toplam 823 kayıt alınmıştır. Ulaşılan maksimum yük 372,495 kN ve bu yük seviyesinde ölçülen deformasyon 1,24 mm.dir.

Elemana yükleme yapılmaya başlanmış, 2 ve 3 No.lu LVDT'lerin yük almadığı görülmüştür. İleri yük seviyelerinde okuma alınabileceği düşünüldüğünden yükleme devam edilmiştir. Ancak yük 72,477 kN'a ulaştığında LVDT'lerde hala deplasman okuması yapılamadığından yük boşaltılmıştır. Deney düzeneği düzeltilerek yükleme işlemine tekrar başlanılmıştır. 57,890 kN yüke ulaşıldığında 3 ve 4 No.lu LVDT'lerde deplasman okuması yapılmadığı görülmüş ve elaman üzerindeki yük boşaltılmıştır. Deney düzeneği tekrar düzeltilmiş ve yükleme işlemine başlanılmıştır. Tüm bu LVDT'lerde düzgün deplasman okumaları yapılabildiğinden, deneye devam edilmiştir.

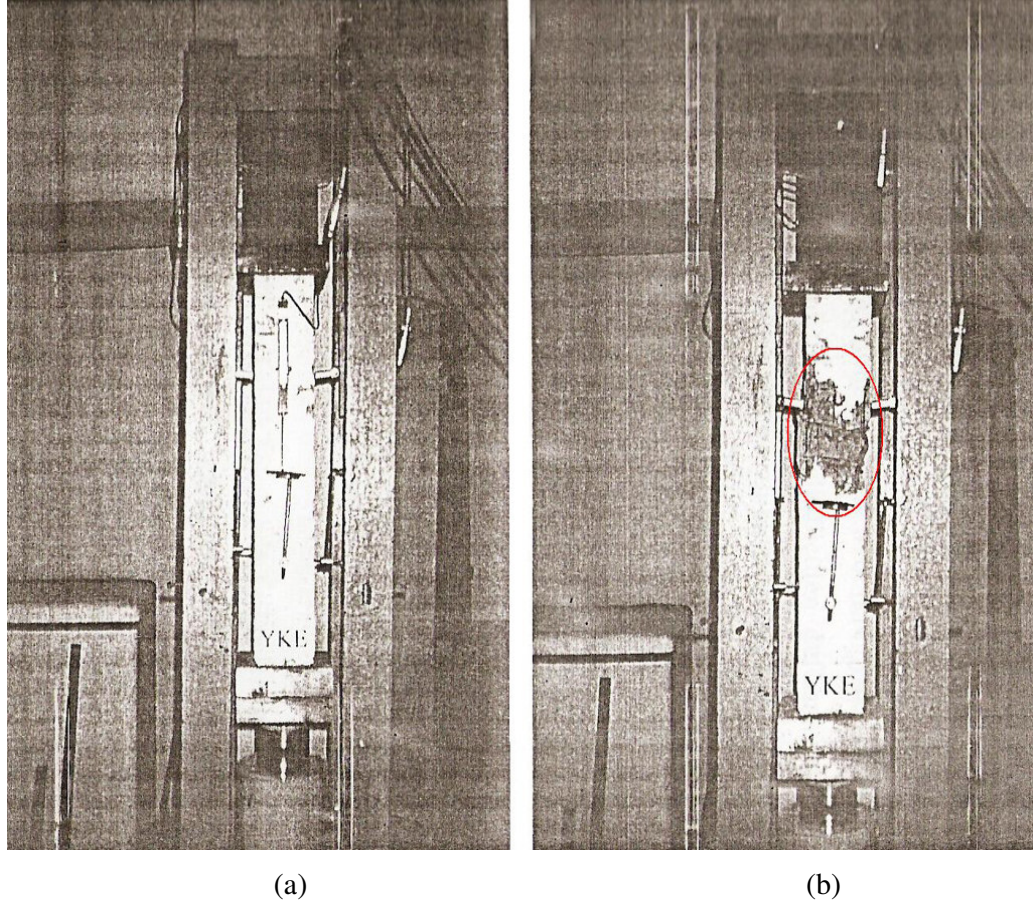
Yük 263,366 kN iken elemanda çatlak oluşmaya başlamıştır. 330,492 kN yüke ulaşıldığında boyuna çatlaklar belirgin bir şekilde görülmüştür. Yük 341,657 kN olduğunda donatıda akma olmuştur. 357,076 kN yük seviyesinde kabuk betonunda dökülme başlamıştır. Bu anda ölçülen deformasyon 1,64 mm dir. Maksimum yük aşıldıktan sonra yükte hızla bir düşme gözlenmiştir. Yük 228,409 kN'a indiğinde boyuna donatı burkulmuştur (Şekil 3.3). Yük 108,09 kN olduğunda etriye açılmıştır. Daha sonra etriye kopmaları gözlenmiştir (Çizelge 3.2).



Şekil 3.3. YKE elemanın normalize edilmiş yük-birim deformasyon eğrisi [8]

Çizelge 3.2. Kare kesitli (Etriyeli) deney elemanının dayanım ve birim deformasyon özellikleri [8]

Deney Elemanı	Dayanım ve Birim Deformasyon					
	Akmada		Tepede		0.85 Tepe	
	N_y (kN)	ϵ_{cy}	N_0 (kN)	ϵ_{co}	N_{85} (kN)	E_{85}
YKE	341	0,0011	372	0,0033	316	0,0056



Resim 3.1. Kare kesitli (Etriyeli) yalın kolon (YKE) deneyi, a)Yükleme öncesi yalın kolon b) Taşıma gücünü kaybetmiş yalın kolon [8]

4. MALZEME ÖZELLİKLERİ

4.1. Genel

Betonarmenin davranışı üzerinde çalışılırken betonarmeyi oluşturan iki esas bileşenin yani betonun ve çeliğin özellikleri ayrı ayrı ele alınmalıdır. Çelik, malzeme özellikleri gerçeğe uygun tanımlanabilen, homojen ve izotrop bir malzemeyken; beton, agrega, çimento, kum ve bazen de kimyasal katkılardan oluşan heterojen ve anizotrop bir malzemedir. Bununla birlikte beton genel olarak makroskopik düzeyde homojen bir malzeme olarak kabul edilebilir.

Bir yapıya, bir yük uygulandığında yapının gösterdiği deplasmanla yük arasındaki ilişki yapının lineerliğini ya da nonlinearliğini belirler. Çoğu yapıda özellikle servis yükleri altında yük ve deplasman arasındaki ilişki lineer Hooke kanunu ile belirlenir.

Bu denklemde yapının rijitliğini gösteren K yay sabiti değeri sabit kaldığı sürece davranış lineer bir davranıştır ve lineer denklemler kullanılabilir. Kablolu, asma sistemler, yüksek binalar gibi yapıların dışında genel olarak yapılar servis yükleri altında lineer (veya lineere yakın) kalacak şekilde dizayn edilir. Fakat hemen hemen tüm yapılar dayanımlarına ulaşmadan önce nonlinear davranış gösterirler. Bununla birlikte mühendislik yapılarının önemli bir kısmında yük ile deplasman arasındaki ilişki sabit değildir. Bu tür sistemler nonlinear sistemlerdir ve lineer denklem takımları ile analiz edilemezler.

İki tip nonlinearite vardır:

- 1) Geometrik nonlinearite
- 2) Malzeme nonlinearitesi

Geometrik Nonlinearite: Yapıların statik ve dinamik analizlerinde dış yükler etkisinde oluşacak deplasmanların taşıyıcı sistem boyutlarının yanında çok küçük olması durumunda lineer hesap prosedürü dikkate alınır. Fakat bazı yapıların aşırı

deplasman yapmasıyla başlangıç durumuna göre geometrisinde ve iç kuvvet dağılımında ihmal edilemeyecek oranlarda değişiklikler oluşabilmektedir.

Kablolu makaslar, asma köprüler gibi öngermeli yapılar dış yükler altında ihmal edilemeyecek deplasman yapabilirler. Bu tip yapıların analizinde geometrik nonlinear prosedür dikkate alınmalıdır. Geometrik Nonlineerite, büyük yer değiştirme, büyük şekil değiştirme, büyük dönmeler sonucu oluşabilir.

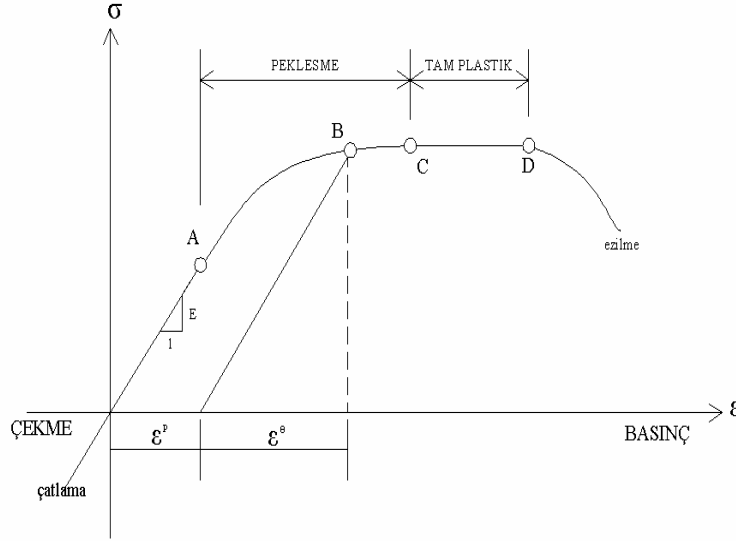
Malzeme Nonlineeritesi: Betonarme elemanlar deplasmanları kabul edilebilir seviyede olsa da malzeme olarak nonlinear olabilir. Betonarme sistem veya elemanda malzeme nonlinearitesinin ilk akla gelen sebepleri, betonun içsel çatlakları ile donatının ve betonun plastisitesidir.

4.2. Beton

4.2.1. Betonun davranışı

Beton, çekme ve basınç altında farklı mekanik özellikler gösterir. Bu özellikler betonun yaşı ile yakından ilgilidir. Örneğin beton zamanla dayanım kazanan bir malzemedir ve ilk yedi günde çok hızlı olan dayanım kazanımı sonra yavaşlayarak devam eder. Bu nedenle betonun dayanımını belirlemek için bir yaş sınırı konulmuştur. Bu sınır tüm yönetmeliklerde lineer davranış özelliği göstermezken kısa süreli yükleme altında yapılan deneylerde betonun en azından kısa bir süre için lineer davrandığı kabul edilebilir.

Betonun çekme dayanımı basınç dayanımına oranla çok küçük olduğu için ve beton genelde basınca çalıştırıldığı için, betonun davranışını belirlemeye yönelik modeller basınç etkisi altındaki beton elemanlar için geliştirilir. Şekil 4.1’de tek eksenli basınç yüklemesi altında bulunan beton elemanın tipik $\sigma - \epsilon$ eğrisi görülmektedir.



Şekil 4.1. Donatısız betonun tek eksenli $\sigma - \varepsilon$ eğrisi [9]

Beton malzemesi özellikle uzun süreli yüklemeler altında lineer özellik gösteremez. Ama beton davranışını matematiksel modelleyebilmek için bazı kabuller yapılır. Bunlardan bir tanesi betonun orantılılık sınırına kadar (A noktası) lineer özellik gösterdiğiidir.

Uygulamada betonun dayanımının üçte birine erişmeyen düşük gerilmelerde ve kısa yüklemeler altındaki davranışı doğrusal elastik kabul edilebilir ve bunun sonucu olarak elastisite modülü tanımlanabilir. Bundan sonra artan yük altında agrega ve çimento harcı ara yüzünde aderans çatlakları oluşmaya başlar ve yük arttıkça yayılırlar. Artan içsel çatlaklar nedeniyle beton zayıflamaya, rijitliği azalmaya başlar (A-C). Bundan sonra farklı beton modelleri vardır.

Betonun pekleşmeli plastik (work hardening elastoplastic) davrandığını kabul eden modelde C noktasın dan sonra dayanımda azalma görülür ve betonun ezilme sonucu göçtüğü gerilme düzeyi aslında maksimum gerilme seviyesinden küçüktür. Bu durum, betonarmede gerilme uyumu olarak adlandırılır ve bu gerilme kapasitesine ulaşan liften daha az yüklü liflere gerilme aktarımıyla olur. Betonun tam plastik olarak davrandığını kabul eden modellemelerde ise şekildeki C-D eğrisi oluşur.

Betonun sabit gerilme altında deformasyonu artar ve aslında bu betonun sünekliğinin ölçülerindendir.

Betonun $\sigma - \varepsilon$ eğrisi çok sayıda değişkenden etkilenir. Bu nedenle beton için tek bir eğri tanımlanması zordur. Ancak problemlerin çözümü ve davranışın anlaşılabilmesi için matematiksel modellere ihtiyaç vardır. Bunun için, deneylerden elde edilen $\sigma - \varepsilon$ eğrileri idealize edilip basitleştirilir [6].

Bugüne kadar birçok beton modeli önerilmiştir. Hognestad modeli, Geliştirilmiş Kent ve Park modeli, Sheikh ve Uzumeri modeli, Saatcioglu ve Razvi modeli, Thompson ve Park modeli bunlardan bir kaçıdır. Bu modellerden Hognestad dışındakiler sargılı betonlar için geliştirilmiştir.

4.3. Beton ve Betonarme İçin Matematiksel Modeller

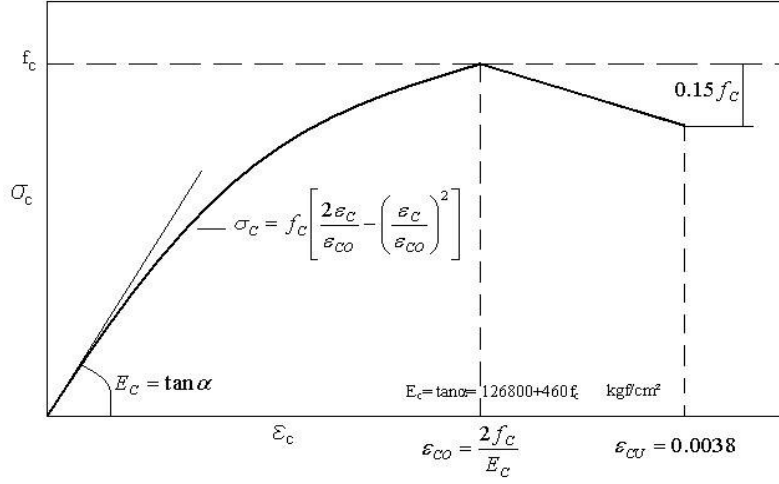
4.3.1. Hognestad modeli

Sargısız betonun matematiksel modeli için geliştirilmiştir. Modelde, $\sigma - \varepsilon$ eğrisinin tepe noktasına kadar olan parçası ikinci derece bir parabol, düşüş parçası ise doğrusal varsayılmıştır. Hognestad metoduna göre tipik $\sigma - \varepsilon$ grafiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Modelde, eğrinin tepe noktasına kadar olan parabolünün denklemi Eş. 4.1 ile belirtilmiştir. [9]

$$\sigma_{co} = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (4.1)$$

Eğrinin tepe noktasında maksimum gerilme düzeyine karşılık gelen deformasyon değeri Eş. 4.2 kullanılarak belirleneceği gibi 0,002 olarak alınabileceği de belirtilmiştir.

$$\varepsilon_{co} = \frac{2f_c}{E_c} \quad (4.2)$$



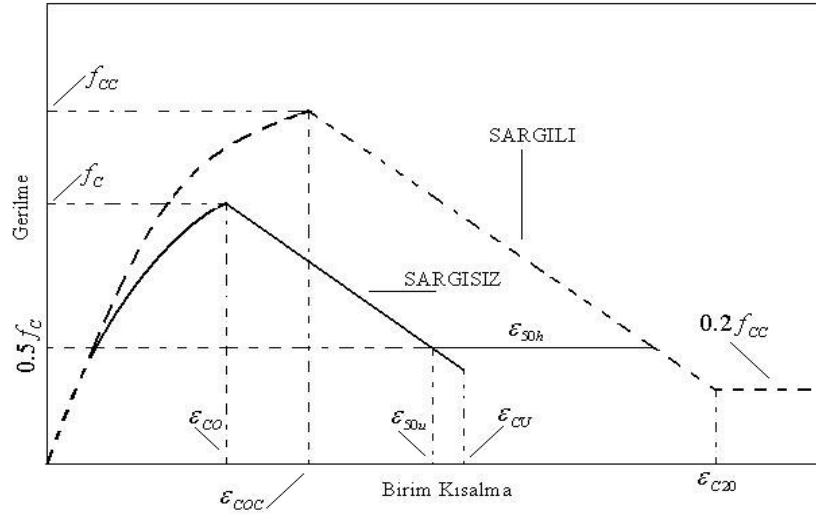
Şekil 4.2. Hognestad modeline göre betonun $\sigma - \varepsilon$ grafiği [9]

Elastisite modülünün bulunması için ise Hognestad tarafından Eş. 4.3'teki denklem önerilmiştir.

$$E_c = 12\,680 + 460f_c \quad (\text{Mpa}) \quad (4.3)$$

4.3.2. Geliştirilmiş Kent ve Park modeli

Kent ve Park modeli, Roy ve Sozen tarafından sargılı beton için önerilen $\sigma - \varepsilon$ ilişkisinden esinlenerek geliştirilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi, sargılı ve sargısız beton için iki ayrı $\sigma - \varepsilon$ eğrisi önerilmektedir. Sargı nedeni ile beton dayanımının f_c 'den f_{cc} 'ye, maksimum gerilmeye karşılık gelen boy değişiminin ise ε_{co} 'dan ε_{coc} 'ye yükseldiği varsayılmaktadır. Gerek sargılı, gerekse sargısız beton için önerilen eğrilerin ilk bölümleri, Hognestad modelindeki gibi ikinci derece bir parabol varsayılmıştır (Şekil 4.3). Eğrilerin gerilme azalmasını gösteren ikinci bölümleri ise, eğimi eksi olan düz çizgilerle gösterilmiştir. Sargılı betonun eğimi, sargısız betona oranla daha küçüktür. Sargısız betonda maksimum boy değişimi ε_{cu} iken, sargılı betonda böyle bir sınır yoktur. Sargısız beton için, $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{50u}$ veya daha basit olarak $\varepsilon_{cu} = 0,004$ alınabilir [9].



Şekil 4.3. Geliştirilmiş Kent ve Park modeline göre betonun $\sigma - \varepsilon$ grafiği [9]

Sargılı beton modeli, çekirdek olarak tanımlanan ve fret veya etriye ile sınırlanan beton kütlesi için, sargısız beton modeli ise çekirdek dışında kalan kabuk betonu için geçerlidir. Kent ve Park, çekirdeğin boyutlarını, etriye dışından etriye dışına ölçülen uzunluklarla tanımlamaktadır.

Geliştirilmiş Kent ve Park modelindeki $\sigma - \varepsilon$ eğrilerini tanımlayan denklemler aşağıda verilmiştir.

Parabolik Eğri:

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \Rightarrow \text{Sargısız beton} \quad (4.4)$$

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

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

$$\varepsilon_{coc} = K \cdot \varepsilon_{co} \text{ (K aşağıda tanımlanmıştır.)}$$

Doğrusal Eğri (Gerilmenin azaldığı bölüm):

Sargısız beton:

$$\sigma_c = f_c [1 - Z_u (\varepsilon_c - \varepsilon_{co})] \quad (4.6)$$

$$Z_u = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} - \varepsilon_{co}} \quad (4.7)$$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0.285 f_c}{142 f_c - 1000} \geq \varepsilon_{co} \quad (4.8)$$

Sargılı beton:

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{ywk}}{f_c} \quad (4.9)$$

$$\sigma_c = f_{cc} [1 - Z_c (\varepsilon_c - \varepsilon_{coc})] \geq 0.2 f_{cc} \quad (4.10)$$

$$Z_c = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - \varepsilon_{coc}} \quad (4.11)$$

$$\varepsilon_{50h} = 0.75 \rho_s \left(\frac{b_k}{s} \right)^{1/2} \quad (4.12)$$

f_c Sargısız betonun basınç dayanımı. Genelde $f_c = f_{ck}$ alınır. (Mpa)

f_{cc} Sargılı beton dayanımı. $f_{cc} = K f_c$ ($f_{cc} = \text{Mpa}$)

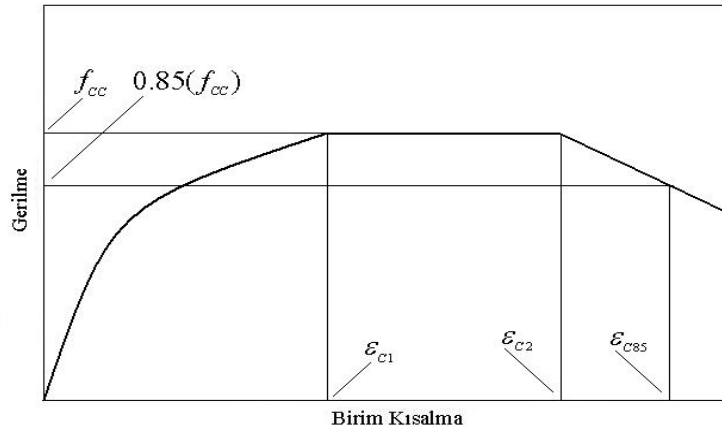
ε_{coc} Sargılı betonda maksimum gerilme altındaki birim deformasyon.

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

Z_u, Z_c	Sırasıyla, sargısız ve sargılı beton $\sigma - \varepsilon$ eğrilerinin doğrusal bölümünün boyutsuz eğimi (eğim/ f_c veya eğim/ f_{cc})
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 donatısının hacimsel oranı
A_o	Sargı donatısı kesit alanı. (mm ²)
l_s	Kesitteki sargı donatısı ve çirozların toplam uzunluğu. (mm)
f_{ywk}	Sargı donatısının minimum akma dayanımı. (Mpa)
s	Sargı donatısı aralığı. (mm)

4.3.3. Sheikh ve Uzumeri modeli

Bu modelde de, Geliştirilmiş Kent ve Park modelindeki gibi sargı nedeniyle dayanımın arttığı varsayılmaktadır. Modelde, göçme noktasına ulaşıldıktan sonra sabit gerilme altında deformasyon artışı öngörülmekte, eğrinin iniş bölümü ise bir doğru ile ifade edilmektedir. Kent ve Park'tan farklı olarak bu modelde, boyuna donatının konumu ve sargı donatısı düzeni de dikkate alınmaktadır [9].



Şekil 4.4. Sheikh ve Uzumeri modeline göre betonun $\sigma - \varepsilon$ grafiği [9]

Sheikh ve Uzumeri modeli aşağıdaki beş denklemlle tanımlanmaktadır.

$$\varepsilon_{cl} = 80K_0 f_c \times 10^{-6} \quad (4.13)$$

$$f_{cc} = 0.85 f_c \times K_0 \quad (4.14)$$

Sargılı kolon dayanımı hesaplanırken bulunan f_{cc} doğrudan kullanılacak, ayrıca bir kez daha 0,85 ile çarpılmayacaktır. Genelde, $\varepsilon_{co} = 0.002$ alınır.

$$\varepsilon_{c2} = \varepsilon_{co} \left[1 + \frac{248}{a} \left(1 - 5.0 \left(\frac{s}{b_k} \right)^2 \right) \frac{\rho_s f_{ywk}}{\sqrt{f_c}} \right] \quad (4.15)$$

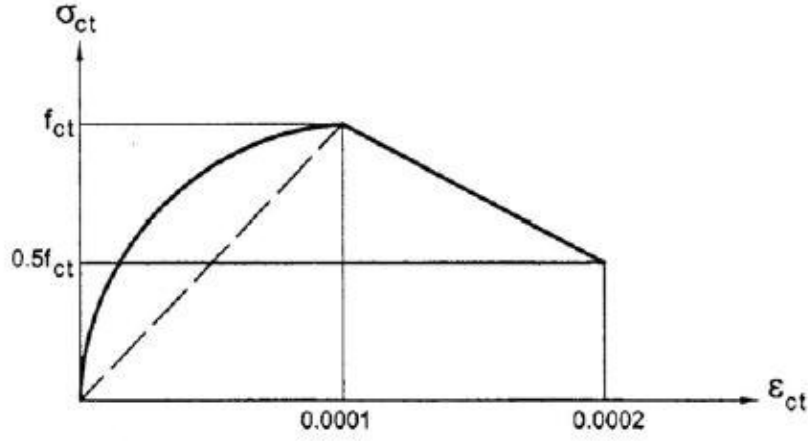
$$\varepsilon_{c85} = 0.225 \rho_s \sqrt{\frac{b_k}{s}} + \varepsilon_{c2} \quad (4.16)$$

$$K_0 = 1 + \frac{b_k^2}{140N_{oc}} \left[\left(1 - \frac{na^2}{5.5b_k^2} \right) \left(1 - \frac{s}{2b_k} \right)^2 \right] \sqrt{\rho_s f_{ywk}} \quad (4.17)$$

a	İki komşu boyuna donatının merkezleri arasındaki uzaklık (mm)
A_{ck}	Beton çekirdek alanı (mm ²)
A_{st}	Kolon kesitindeki toplam boyuna donatı alanı (mm ²)
b_k	Çekirdek betonunun küçük boyutu. Sheikh ve Uzumeri'nin çekirdek tanımı, Kent ve Park 'tan değişiktir, sargı donatısı merkezleri arasında ölçülen uzaklıktır.
n	Kolondaki boyuna donatı sayısı

4.3.4. Çekme için $\sigma - \varepsilon$ modeli

Çekme için önerilen $\sigma - \varepsilon$ modelinde basınç modeline benzer biçimde eğrinin ilk bölümü ikinci derece bir parabol, ikinci bölümü ise bir doğru olarak idealize edilmiştir.



Şekil 4.5. Çekme altındaki beton için malzeme modeli [9]

4.4. Çelik

Çelik, homojen ve izotrop bir malzemedir. Donatı çeliğinin $\sigma - \varepsilon$ eğrisini elde etmek için malzeme çekme deneyine tabi tutulur. Çelik malzeme olarak çekmede de basınçta da aynı davranışı gösterir. Başlangıçta lineer elastik olarak devam eder. Bu bölgede şekil değiştirmeler yükleme kaldırılınca başlangıç konumuna döner. Bu elastiklik durumu orantılılık sınırına kadar, lineerlik de akma noktasına kadar devam eder. Orantılılık sınırından sonra plastik deformasyonlar oluşmaya başlar. Orantılılık sınırı ile akma noktası arasındaki fark çok büyüktür. Bu nedenle birleştirilip tek bir nokta olarak ele alınmıştır. Gerçekte akma noktasından sonra bir akma platosu ve onu takip eden bir pekleşme bölgesi bulunurken araştırmacılar modellemelerde çeliğin bu davranışını idealize ederek kullanırlar.

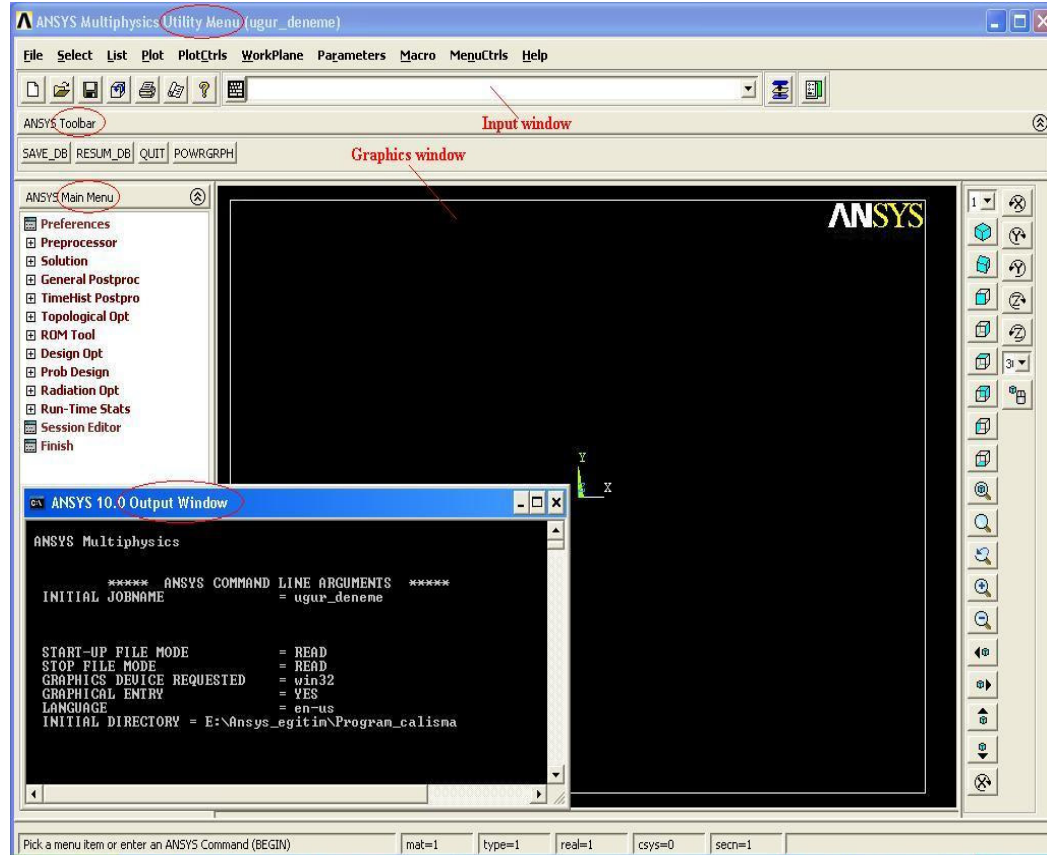
5. ANSYS İLE SONLU ELEMAN MODELİ

5.1. Genel

Bu tez çalışmasında analizi yapılacak olan modelin analizi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılacaktır. Genel amaçlı sonlu elemanlar paket programı olan ve mekanik problemlerin nümerik çözümünde kullanılan ANSYS sonlu elemanlar programı modelin analizinde kullanılmak üzere seçilmiştir.

5.2. ANSYS Arayüzü

ANSYS Arayüzü 10.0 versiyonunda açılıştta 6 pencere içerir. Bunlar; utility menu, main menu, input window, toolbar, graphics window ve output window'dur.



Şekil 5.1. ANSYS arayüzü

Bu bölümde, ANSYS programı hakkında genel bilgiler verilecektir. Çalışmamızda kullanılmak üzere tercih edilen ANSYS programının daha kolay anlaşılabilmesi için verilen bu genel bilgilere ek ve detaylı olarak bilgilenme için ANSYS programı bünyesinde mevcut kullanım kılavuzlarından ve resmi internet sitesinden ulaşılabilir.

Utility menu: ANSYS oturumu süresince dosya kontrolü, seçimler, grafik kontrolleri ve parametreler gibi fonksiyonlar içerir.

Main menu: Preprocessor, solution, postprocessor ve dizayn optimizasyonu tarafından organize edilen temel ANSYS fonksiyonlarını içerir. Bu menüde en önemli modelleme komutları bulunur.

Input window: Giriş penceresinde komutların direk olarak girilebilmesine imkân tanıyan bir input line vardır.

Toolbar: Bu bölüm çok sık olarak kullanılan ANSYS komutları düğmelerini içerir.

Graphics window: Grafiklerin gösterildiği ve grafiksel işaretleme yapıldığı yerdir. Bu pencerede modelin oluşturulması esnasında yapının farklı kademelerdeki durumları izlenebilir. Aynı zamanda, analiz sonuçlarının grafiksel olarak verildiği yerdir.

Output window: Verilerin listelenmesi gibi programdan çıkan text formatındaki bilgilerin gösterildiği yerdir. Genellikle açılışta main menu'nun arkasında çıkar ancak istenirse ön tarafa çekilebilir.

Yukarıda verilen ilk beş menü tek pencerede açılıyorken output window yine bağımsız bir pencere olarak açılmaktadır.

5.3. ANSYS İle Genel Analiz Adımları

Preprocessing: Problemin tanımlanması; preprocessing ana kademleri aşağıda verildiği gibidir:

- a) Keypoint/çizgi/alan/hacimlerin tanımlanması
- b) Element tipi ve malzeme/geometri özelliklerinin tanımlanması
- c) Gerekli çizgi/alan/hacimlerin sonlu elemanlara bölünmesi.

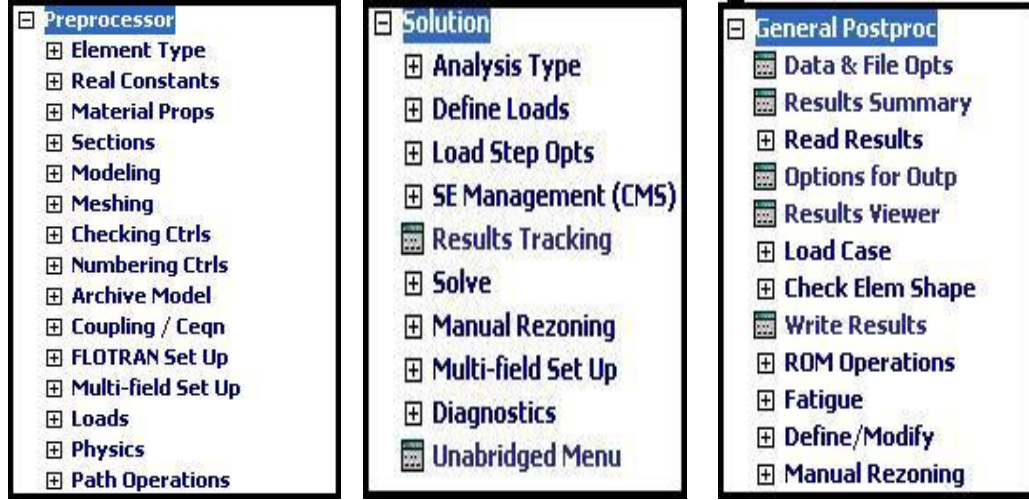
Solution: Yüklerin ve sınır şartlarının atanarak çözümün gerçekleştirilmesi; bu kademede yükler (noktasal veya basınç) belirlenir, sınır şartları tanımlanır ve sonuçta çözüme gidilir.

Postprocessing: sonuçların görüntülenmesi; bu kademede şunlar yapılabilir:

- a) Nodal yer değiştirmelerin listelenmesi
- b) Eleman kuvvet ve momentlerinin izlenmesi
- c) Yer değiştirme çizimleri
- d) Gerilme kontur diyagramları



Şekil 5.2. ANSYS programında ana menü



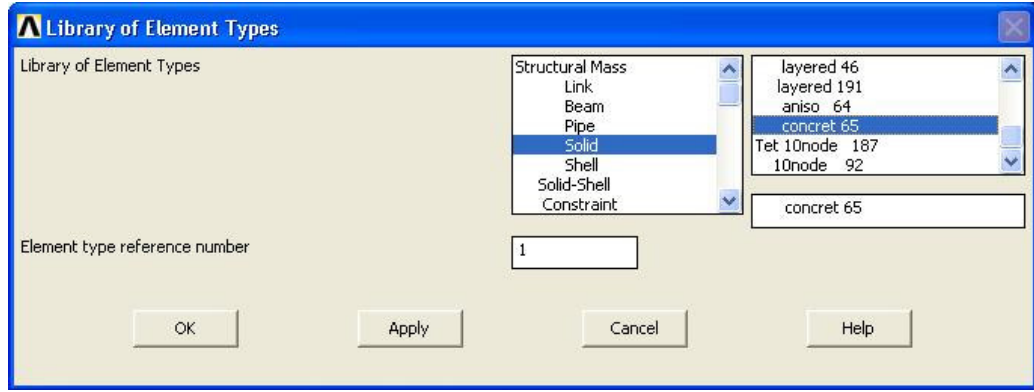
Şekil 5.3. ANSYS programında preprocessor, solution ve postproc menüleri

5.3.1. Preprocessing adımı

Başlığın belirlenmesi: Probleme isim verilmesi diye düşünülebilir. Bu seçenek aynı temel model üzerinde farklı seçenekli iterasyonlar yapılması durumunda çok faydalıdır. Türkçe karakter kullanılmamasına dikkat edilmelidir.

Modelin oluşturulması: Model 1D, 2D veya 3D uzayında uygun birimler (m., mm., in., vb.) kullanılarak çizilir. Model ANSYS preprocessor'ı kullanılarak oluşturulabileceği gibi başka bir CAD paketinde hazırlanmış bir dosyanın (IGES, STEP, Pro/E gibi) ANSYS preprocessor'ı tarafından okunması ile de olabilir. Modelin oluşturulması esnasında dikkat edilmesi gereken konulardan biri çizimde kullanılan birim ile malzeme özellikleri ve uygulanan yük birimlerinin uyumlu olmasıdır. Örneğin; model mm olarak çizildi ise, malzeme özellikleri SI birimi ile tanımlandığı şekilde olmalıdır. ANSYS'te şekillerin modellenmesi için çeşitli yardımcı geometrik nesneler mevcuttur. Bu nesneler; keypoint, line, area ve volume şeklinde işlem sırasına göre sıralanabilir. Bir line iki keypoint'ten, bir area en az üç line'dan ve bir volume ise en az dört area'dan oluşur. Tüm bu nesneler, model geometrisini oluşturmak için kullanılır ve oluşturulan geometrik şeklin sonlu elemanlara bölünmesiyle düğüm noktaları ve elemanlar oluşturulmuş olur.

Eleman tipinin belirlenmesi: Eleman seçimi 1D, 2D veya 3D olabileceği gibi yapılması düşünülen analizin tipine de bağlıdır (örneğin termal analiz gerçekleştirebilmek için termal eleman). ANSYS programı bünyesinde birçok eleman barındırmaktadır. Bu elemanlar; yapısal analiz, termal (ısı) analiz, elektromanyetik analiz vb. gibi analizler için kullanılmaktadır. Yapısal analizde en çok, link, solid, plane, shell ve beam elemanlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada solid65 eleman tipi kullanılmıştır. ANSYS programı bu eleman tipini betonarme modeli için geliştirmiştir.



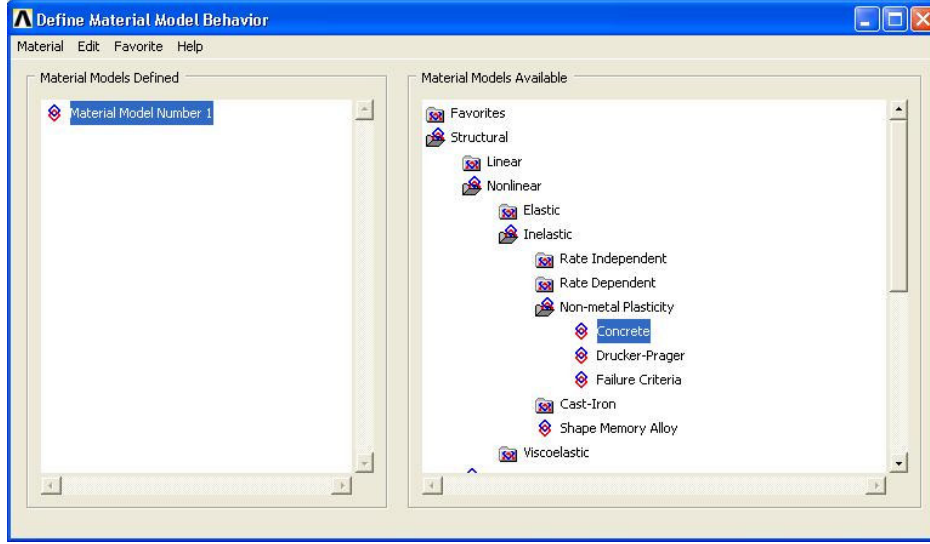
Şekil 5.4. ANSYS programında eleman tipi seçimi menüsü

Malzeme özelliklerinin girilmesi: Malzeme özellikleri (elastisite modülü, poisson oranı, yoğunluk ve ayrıca gerekli olduğunda genleşme katsayısı, termal iletkenlik, özgül ısı vb) tanımlanmalıdır. Problem çözümleri 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. Nonlineer bir malzeme için elastik, inelastik veya viskoelastik davranış seçenekleri mevcuttur.

Belirlenen malzeme özellikleri ve malzeme modeli ile bu malzeme modelini kullanan elemanın tanımlanmış davranışı arasındaki ilişki önemlidir.

Malzeme özelliklerinin girilmesi; seçilen malzemenin lineer ya da nonlineer olmasına bağlıdır. Lineer malzeme özelliklerinde malzemeye ait girilen değerler sabit ya da sıcaklığa bağlı olarak girilir. Nonlineer malzeme özellikleri ise genelde

çizelge şeklinde; plastisite, sünme, genleşme, hiperelastik malzeme verileri olarak girilir.

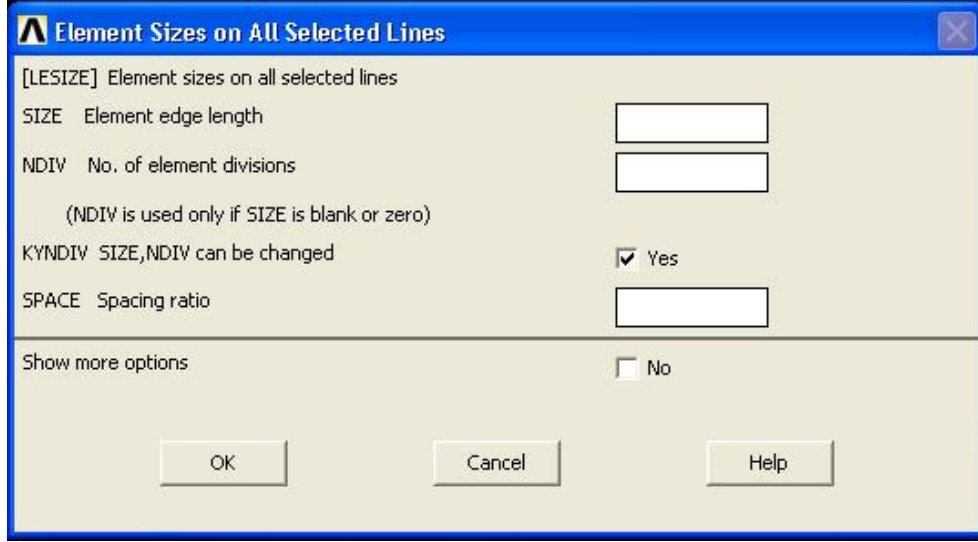


Şekil 5.5. ANSYS programında malzeme özelliklerinin girilmesi

Modelin elemanlara bölünmesi: Modelin elemanlara bölünmesi işlemi, analiz sürekliliğinin belirli sayıdaki ayrı parçalara veya diğer bir ifade ile sonlu elemanlara bölünmesidir. Daha çok sayıda eleman daha iyi sonuçlar fakat daha uzun analiz zamanı demektir. Modelin elemanlara bölünmesi manual olarak yapılabileceği gibi otomatik olarak da yapılabilir. Manual olarak elemanlara bölme işlemi uzun ve zor bir işlemken otomatik olarak elemanlara bölme işleminde gerek tek şey model kenarları boyunca eleman yoğunluğunun belirlenmesidir. Ayrıca elemanlara ait eleman özelliklerinin de girilmesi gerekebilir. Örneğin, 2D eleman kullanılıyorsa kalınlık gereklidir.

Mesh işlemi; line, area ve volume nesnelerini uygun sonlu eleman nesnelere dönüştürür. Mesh sonrası oluşacak elemanların uzunluklarının ve diğer boyutlarının belirlenmesi için SizeCtrls menüsünden modele uygun olan bölümlendirme seçeneği seçilmelidir. Manuel Size menüsünde bölümlendirilmesi istenen nesne türü belirlenir.

Genellikle line'ların manual olarak bölümlendirilip mesh işleminin uygulanması yolu izlenmektedir. Line'lar ister sayı olarak isterse uzunluk değeri girilerek parçalara ayrılabilir. Böylece volume'da oluşacak hacimsel elemanların sayısı da belirlenmiş olacaktır.



Şekil 5.6. ANSYS programında line'ların manual olarak bölme menüsü

Eleman sabitlerinin belirlenmesi: Bir model için oluşturulmuş eleman tiplerine ait kesit özellikleri ve kuvvet-deplasman ilişkisi gibi eleman sabitleri, Real Constants menüsü yardımı ile tanımlı hale getirilebilir. Her bir eleman sabitine bir numara verilir. Şekil 5.7'de solid65 elemanına ait Real Constants menüsü görülmektedir. Bu menüdeki θ ve $\emptyset$ açıları solid65 elemanı içerisinde tanımlanacak olan donatının yönlerini belirtmektedir. θ açısı, donatının eleman içerisinde x – y düzleminde x eksenine yaptığı açısı, $\emptyset$ açısı ise x – y düzlemiyle yaptığı açısı belirtmektedir.

Real Constant Set Number 1, for SOLID65

Element Type Reference No. 1

Real Constant Set No.

Real constants for rebar 1

Material number MAT1

Volume ratio VR1

Orientation angle THETA1

Orientation angle PHI1

Real constants for rebar 2

Material number MAT2

Volume ratio VR2

Orientation angle THETA2

Orientation angle PHI2

Real constants for rebar 3

Material number MAT3

Volume ratio VR3

Orientation angle THETA3

Orientation angle PHI3

Crushed stiffness factor CSTIF

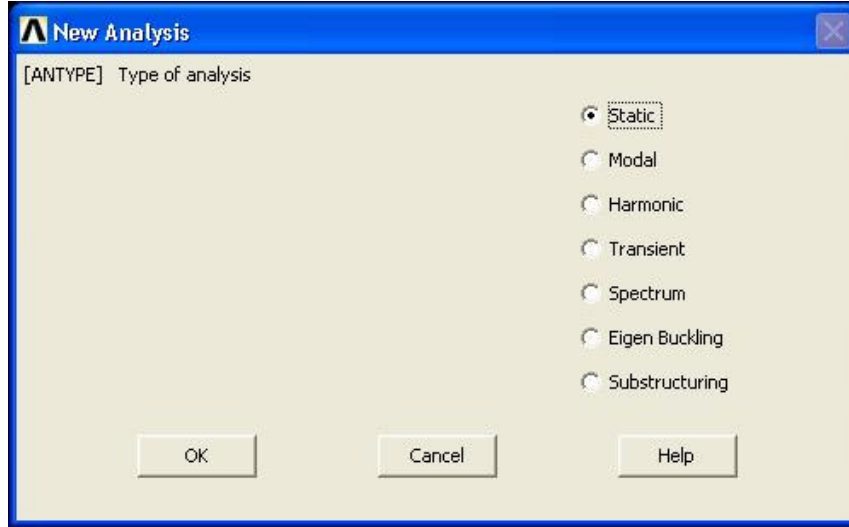
OK Apply Cancel Help

Şekil 5.7. ANSYS programında solid65 elemanı için gerçek sabitlerin giriş menüsü

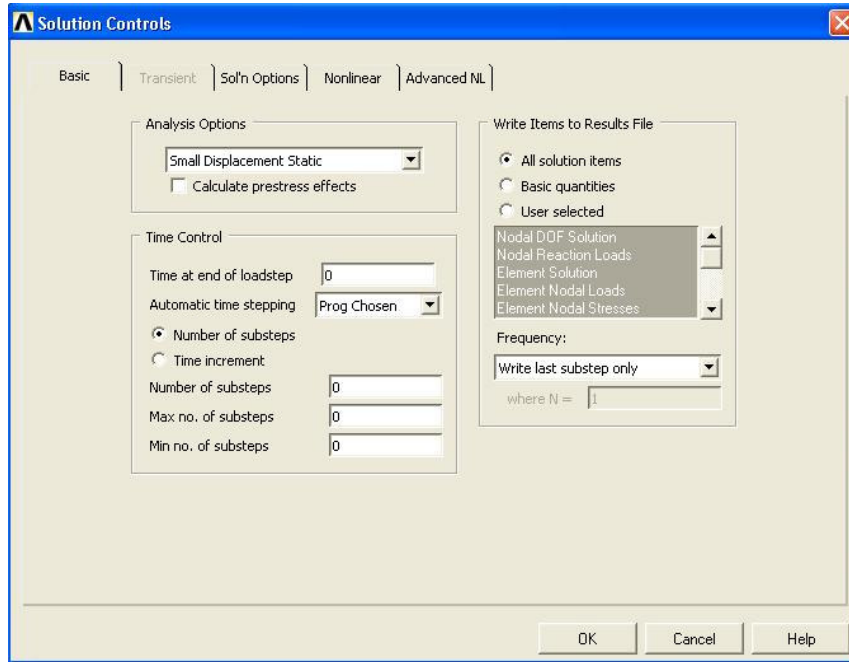
5.3.2. Solution adımı

Analiz tipinin belirlenmesi: Çözümde kullanılmak üzere statik, modal, transient gibi analiz tipleri belirlenir. ANSYS ile lineer ve nonlinear yapı analizi yapılabilmektedir. Analiz tipi modele ve modelde kullanılan eleman tipine bağlıdır. Malzemenin nonlinear tanımlanması ile analiz nonlinear olmaktadır. Analiz tipinin seçimi Şekil 5.8'deki menü yardımıyla seçilebilmektedir. Ayrıca Şekil 5.9'da görünen Sol'n Controls menüsü kullanılarak analiz ile ilgili yük adımı, alt adım sayıları ve time değeri gibi çözüme direkt etkiyecek ayarlarda yapılabilmektedir. Bu menü yardımıyla geometrik nonlinearlikte dikkate alınabilmektedir. Bu 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, nonlinear döngüye ait çeşitli seçenekler ve yakınsama

kriterleri bu menü aracılığıyla verilebilir. Kullanılacak nonlineer analiz prosedürü ise yalnızca ilgili komut yardımıyla belirlenebilir, bunun için mevcut bir menü yoktur.

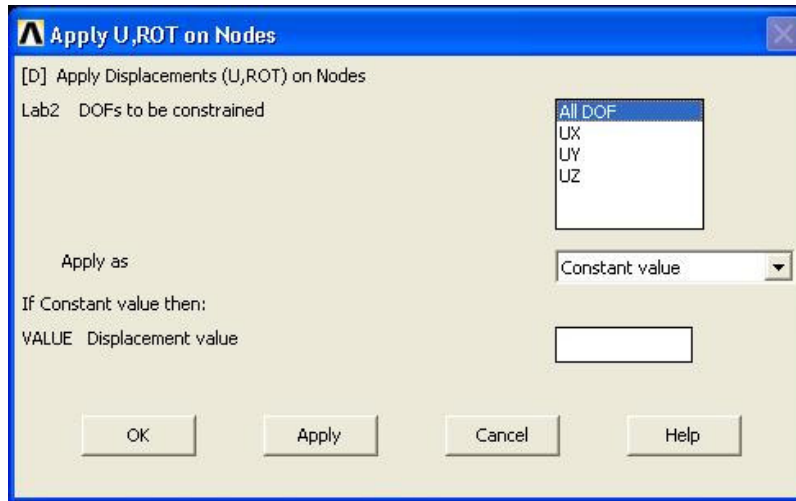


Şekil 5.8. ANSYS programında yeni analiz seçimi menüsü



Şekil 5.9. ANSYS programında solution controls menüsü

Sınır şartlarının tanımlanması: Eğer modele bir yük uygulanırsa, model bilgisayarın sanal dünyasında sonsuza kadar ivmelenir. Bu ivmelenme bir sınırlılık veya bir sınır şartı uygulanana kadar devam eder. Yapısal sınır şartları genellikle sıfır yer değiştirme, termal sınır şartları belirlenmiş bir sıcaklık, akışkan sınır şartları için bir basınç olarak tanımlanır. Bir sınır şartı bütün yönlerde (x,y,z) uygulanabileceği gibi yalnızca belirli bir yönde de tanımlanabilir. Sınır şartları düğüm noktalarında, keypointlerde, alan veya çizgilerde tanımlanabilir. Sınır şartı, simetri veya antisimetri tipinde olabilir. ANSYS programında ilgili düğüm noktalarına deplasman yüklemek ile mesnetler tanımlanabilir. İstenilen düğüm noktaları seçilerek o deplasman değerine sıfır değeri verilmek suretiyle deplasman engellenir. Deplasmanlar düğümlere, line, area ve keypoint gibi elemanlara atanabilir (Şekil 5.10).



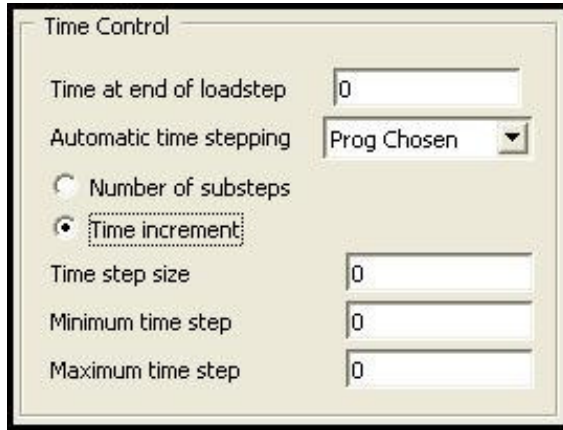
Şekil 5.10. ANSYS programında düğüm mesnetlenmesinde kullanılan menü

Yüklerin uygulanması: Yüklemeler noktasal bir basınç, gerilme analizlerinde yer değiştirme, termal analizlerde sıcaklık, akışkan analizlerinde hız formunda olabilir. Yükler bir noktaya, bir kenara, bir yüzeye ve hatta toplam cisme uygulanabilir. Yükler model geometrisi ve malzeme özelliklerinde kullanılan birim cinsinden tanımlanmalıdır.

Nonlinear analizde yük küçük yük artımlarına bölünerek ard arda uygulanmaktadır. Bir yük adımı (load step) içinde yük artımı uygulanan her adıma alt adım (substep) denir. Bir analizde birden fazla yük adımı olabilir. Her alt adımda yakınsama sağlanana kadar iterasyonlar yapılır. Alt adım adedi ve yük artımının büyüklüğünün yakınsamada etkisi vardır. Adımların küçülmesi, dolayısıyla yük artımının azalması çözümün daha kolay yakınsamasını ve sonuçların daha kesin olmasını sağlamaktadır. Fakat işlem hacminin büyümesi ve analiz süresinin uzaması kaçınılmaz olmaktadır.

Artış adımları zaman bağlı olarak, zaman adımı veya adım sayısı olarak verilebilir.

Zamana bağlı olarak yük artışı verilmesi;



Şekil 5. 11. ANSYS programında zamana bağlı yük artışı menüsü

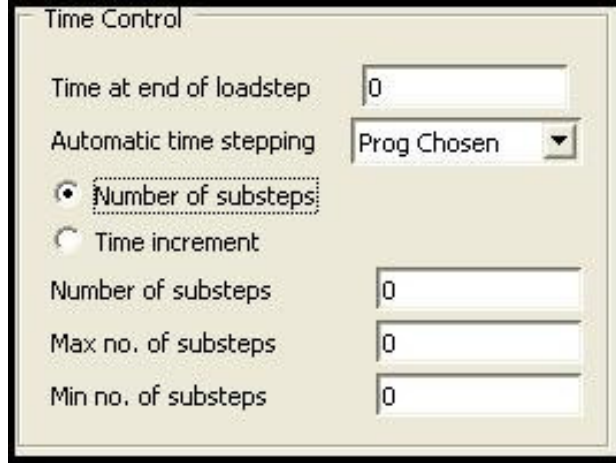
Time step size: Yük adımının son süresine hangi zaman artışıyla ilerlenileceğini belirlemede kullanılır. Zaman adımı büyüklüğünü ifade etmektedir.

Minimum time step: Zaman adımlarının otomatik olarak ayarlanması durumunda, program tarafından belirlenebilecek en küçük zaman adımıdır.

Maximum time step: Zaman adımlarının otomatik olarak ayarlanması durumunda, program tarafından belirlenebilecek en büyük zaman adımıdır.

Yük artışı adımı sayısına bağlı olarak;

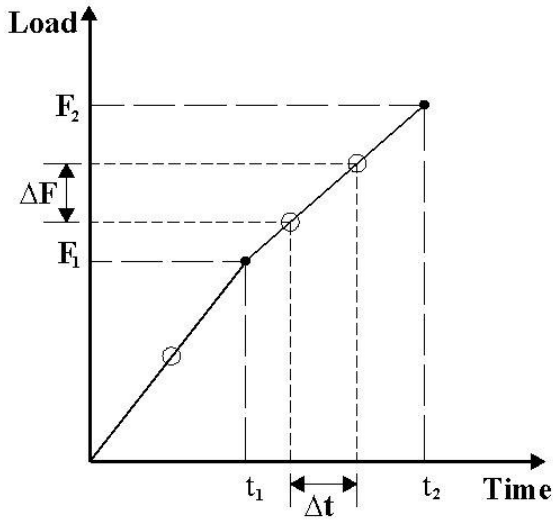
Number of substeps: Artış adımı sayısını ifade etmektedir.



Şekil 5.12. ANSYS programında yük artışı adımı sayısı menüsü

Max no. Of substeps: Maksimum artış adımı sayısını ifade etmektedir.

Min no. Of substeps: Minimum artış adımı sayısını ifade etmektedir.



Şekil 5.13. Nonlineer analiz adımlarında load-time ilişkisi

t_1 ve t_2 zamanına karşılık gelen yük değerleri yük adımlarını (load step), bu zamanların dışındaki ara yüklemeler ise alt adımı (substep) belirtmektedir.

Çözüm: ANSYS sonlu elemanlar programı nonlineer analiz çözümleri için Newton-Raphson yöntemini kullanmaktadır. Bu yöntem değişken rijitlik prosedürü olarakta bilinmektedir. Yöntemin işleyişi, dış yükler etkisinde deplasman yapan sistemin düğüm noktalarında oluşacak kuvvet farkını dikkate alması şeklindedir. Ayrıca bu yöntem dengelenmemiş yük vektörünü kullanarak doğrusal çözüm yapmaktadır.

Newton-Rapshon metodunda üç çeşit yaklaşım mevcuttur. Bunlardan ilki, Full Newton-Rapshon'dur. Bu yaklaşımda her iterasyon aşamasında rijitlik matrisi güncellenerek işleme devam edilmektedir. İkinci olarak, Modified Newton-Rapshon'dur. Bu yaklaşımda da rijitlik matrisi her alt adımda bir kere güncellenerek işleme devam edilir. Son olarak ise, Initial Stiffness Newton-Rapshon'dur. Bu yaklaşım da ise her iterasyonda başlangıçtaki elastik rijitlik değeri kullanılmaktadır. En çok iterasyon sayısı bu yöntemde gerekmektedir. ANSYS programında solid65 elemanı için Initial Stiffness yaklaşımı kullanılmaktadır.

5.3.3. Postprocessing adımı

Bu bölüm; sonuçların okunduğu ve yorumlandığı bölümdür. Sonuçlar; tablo şeklinde, kontur çizimler şeklinde veya cismin deforme olmuş biçiminde sunulabilir. Ayrıca animasyon yardımı ile modelin gerçek davranışı gözler önüne sunabilir. Yapısal tipteki problemlerin sunulmasında kontur grafikler genellikle en etkin yöntem olarak kullanılır.

Postprocessor, x, y, z koordinatlarında hatta koordinat ekseninde belli bir açıdaki gerilme ve birim şekil değiştirmelerin hesaplanmasında kullanılabilir. Etkin gerilme ve birim şekil değiştirme sonuçlarını ile akma gerilme ve şekil değiştirme sonuçlarını da görmek mümkündür. Bunun dışında birim şekil değiştirme enerjisi, plastik şekil değiştirme miktarı da kolaylıkla görsel olarak elde edilebilir.

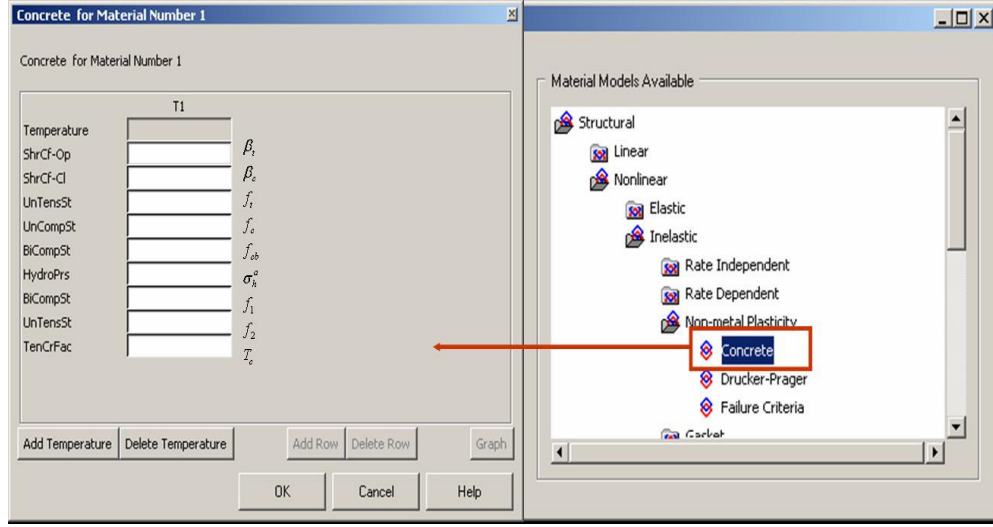
Sonuç olarak, sonlu elemanlar yöntemi çok güçlü bir yöntemdir. Sonuçlar görsel olarak çok etkileyici bir biçimde kontur grafikler olarak rahatlıkla elde edilebilse de sonuçların kalitesi modelin fiziksel problemi gerçekte ne kadar yansıttığına ve dolayısıyla analizi yapılan modelin kalitesine tamamiyle bağlıdır. Başarılı bir analiz için dikkatli bir planlamanın yapılması zorunluluğu göz ardı edilmemelidir [10].

5.4. ANSYS İle Beton ve Betonarme Modeli

ANSYS sonlu elemanlar paket programı beton malzemesinde çok eksenli gerilme durumu için Willam – Warnke tarafından geliştirilmiş olan kırılma modelini kullanmaktadır. Bu kriter aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

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

Bu eşitlikte F asal gerilme durumunun bir fonksiyonunu, S beton malzeme çizelgesinde beş parametre ve asal gerilme terimleriyle ifade edilen kırılma yüzeyini ve f_c ise tek eksenli basınç dayanımını temsil etmektedir. Eğer 3.18 eşitliği sağlanamaz ise, ezilme ve çatlama meydana gelmeyecektir. Bunların dışında malzeme ya ezilecektir ya da çatlayacaktır. Eğer bütün gerilmeler basınç ise ezilme meydana gelir. Ancak asal gerilmelerden herhangi biri çekme ise malzeme çatlayacaktır. Kırılma yüzeyini tanımlamak ve ortamdaki hidrostatik gerilme durumunu tanımlamak için toplam beş dayanım parametresine ihtiyaç vardır. Bu parametreler malzeme çizelgesinde verilmelidir. Bu çizelge concrete menüsü ile tanımlanabilir.



Şekil 5.14. Concrete menüsü

Beton malzemesi için nonlinear inelastik veriler Şekil 5.14’de gösterilmiştir. Bu verilerin içeriği ise sırasıyla şöyledir:

ShrCf-Op (β_1): Açık çatlaklar için kesme transfer katsayısıdır. Çatlak yüzeyleri arasında kesme kuvveti transferini gösterir. 0 – 1 aralığında değerler alır. Bu katsayının 0 olması durumunda kesme kuvveti transferinin olmadığı kabul edilir ve çatlağın düzgün yüzeyli bir çatlak olduğunu belirtir. 1 değeri verilmesi durumunda ise pürüzlü bir çatlak olduğu ve kesme kuvveti transferinde bir kayıp olmayacağını gösterir.

ShrCf-Cl (β_2): Kapalı çatlaklar için kesme transfer katsayısıdır. ShrCf-Op için açıklanan özellikler bu katsayı içinde aynen geçerlidir.

UnTensSt (f_t): Tek eksenli çekme dayanımıdır. Bu dayanım Eş. 5.2’den elde edilmiştir. Değer olarak -1 girilmesi halinde eleman çatlama yeteneğini kaybeder.

$$f_t = 0.35\sqrt{f_c} \quad (5.2)$$

UnCompSt (f_c): Tek eksenli basınç dayanımıdır. Değer, deneysel verilerden elde edilir. Değere -1 girilmesi halinde eleman ezilme yeteneğini kaybeder. Betonun ezilmesinin ihmal edilmek istendiği uygulamalarda -1 değeri kullanılmaktadır.

BiCompSt (f_{cb}): İki eksenli basınç dayanımıdır. Tek eksenli basınç dayanımına bağlı olarak bulunur (Eş. 5.3). Bu değer ANSYS'in bünyesinde tanımlıdır. Bu bölüme 0 girilmesi yeterli olacaktır.

$$f_{cb} = 1.2f_c \quad (5.3)$$

HydroPrs (σ_h^a): Hidrostatik gerilme durumudur.

$$\sigma_h = \frac{1}{3}(\sigma_{xp} + \sigma_{yp} + \sigma_{zp}) \quad (5.4)$$

BiCompSt (f_1): Hidrostatik gerilme durumu altındaki iki eksenli basınç dayanımıdır.

$$f_1 = 1.45f_c \quad (5.5)$$

UnTensSt (f_2): Hidrostatik gerilme durumu altındaki tek eksenli basınç dayanımıdır.

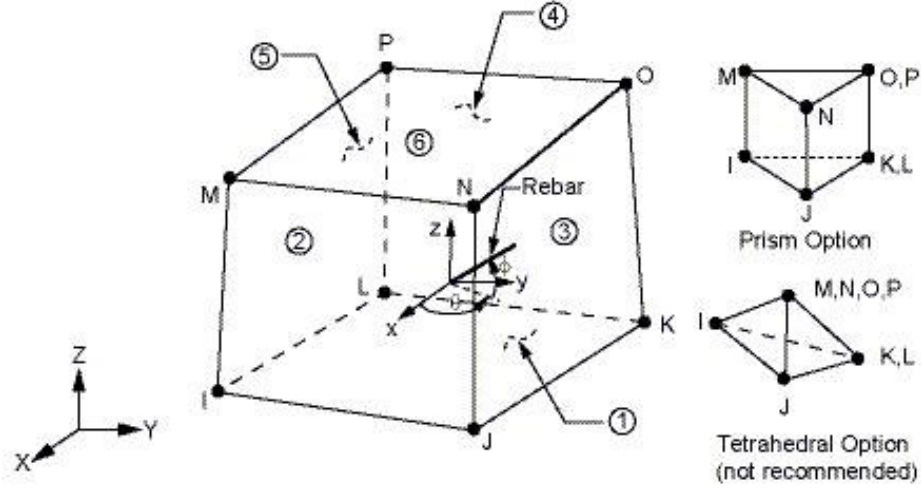
$$f_2 = 1.725f_c \quad (5.6)$$

β_t , β_c , f_t ve f_c değerlerinin girilmesi durumunda f_{cb} , σ_h^a , f_1 ve f_2 değerleri için ANSYS bünyesinde tanımlı olan değerleri kullanır. Kullanıcı bu değerlerden birini dahi kendi girmek isterse diğer üç değeri de girmek zorundadır.

5.5. SOLID65 - ANSYS Betonarme Elemanı

ANSYS beton ve betonarmenin modellenmesi için, 8 düğümlü bir hacimsel 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. Donatısız olarak da kullanılabileceği gibi, bünyesinde üç farklı malzeme ve kesit özellikli donatı tanımlanabilir.



Şekil 5.15. Solid65 elemanı

Solid65'e ait varsayımlar ve sınırlamalar;

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

5.6. Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Geometrik modelleme aşamasında ilk adım olarak keypoint'lerin tanımlanması yapılmıştır. Daha sonra bu keypoint'ler yardımıyla line elemanların oluşturulmasına geçilmiştir. Line elemanlar yardımıyla alanlar elde edilir ve alanlar yardımıyla da hacim belirlenir. Fakat line elemanlarla dış hatları tanımlanan kolonun hacminin belirlenmesi için alanların belirlenmesi şart değildir. ANSYS programında line elemanlardan direkt olarak volume geometrik nesnesine geçilebilmektedir. Bu çalışmada da bu özellik kullanılarak volume oluşturulmuştur.

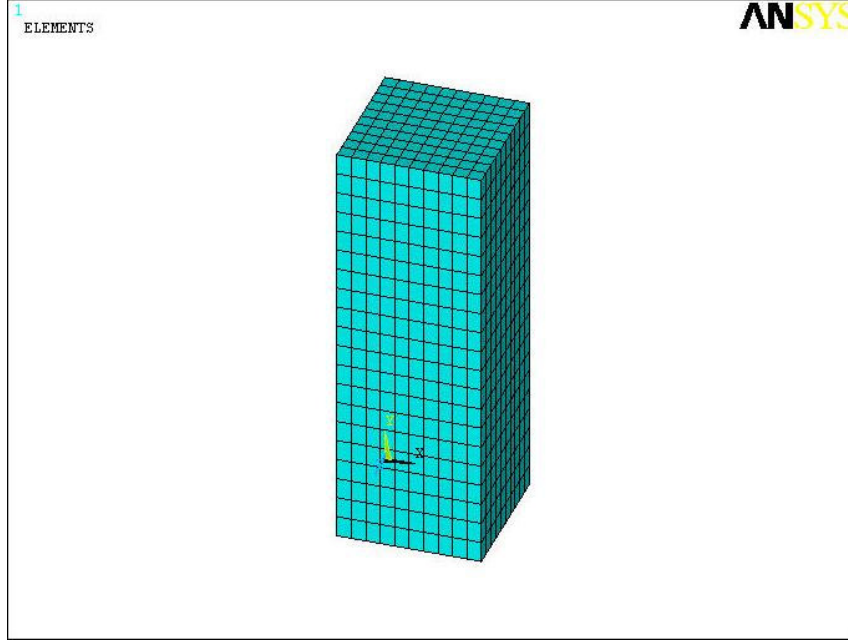
İkinci adım olarak kolonun elemanlara ayrılması işlemi yapılmıştır. Bunun için önceden oluşturmuş olduğumuz line elemanları kullanılmıştır. Line elemanları seçilmek suretiyle istenilen sayı veya istenilen ölçü girilerek line parça elemanlara bölünmüştür.

Tez çalışmamızda 770 mm uzunluğunda ve kesit boyutları 125 mm x 125 mm olan kolon elemanının yalnızca ölçüm bölgesi dikkate alınmış ve bu bölüm modellenmiştir. Model 10 x 10 x 20 şeklinde 2 000 dikdörtgen prizması solid elemana bölünlenmiştir. Uzunluğuna 20, enine ve yüksekliğine 10 parçaya bölünlenen kolonun her bir parçası boyuna 18,50 mm, enine ve yüksekliğine 12,50 mm boyutlarında oluşturulmuştur. Betonarme kolon modelinde 2 000 eleman, 2 541 düğüm noktası oluşturulmuştur.

Kolon büyük ebatlarda olmadığından simetri ekseninden faydalanma gereği duyulmamış ve eleman ölçüm bölgesinden bütün olarak modellenmiştir. Şekil 5.16'da kolonun üç boyutlu hali görülmektedir.

Solid65 elemanının her bir düğümünde 3 adet serbestlik derecesi bulunmaktadır. Kolon sonlu eleman modelinin daha fazla sayıda elemana bölünerek eleman sıklığının arttırılması ile daha doğru sonuçların elde edilmesi mümkün olacaktır. Daha fazla eleman, daha fazla serbestlik derecesi ve daha büyük rijitlik matrisleri demektir. Nonlineer bir analiz sırasında sık sık rijitlik matrislerinin tersinin

alınmasının gerekliliği, analizin yapılacağı bilgisayar kapasitesi ve analiz süresi ile ilgili önemli sorunlara sebep olmaktadır [2].



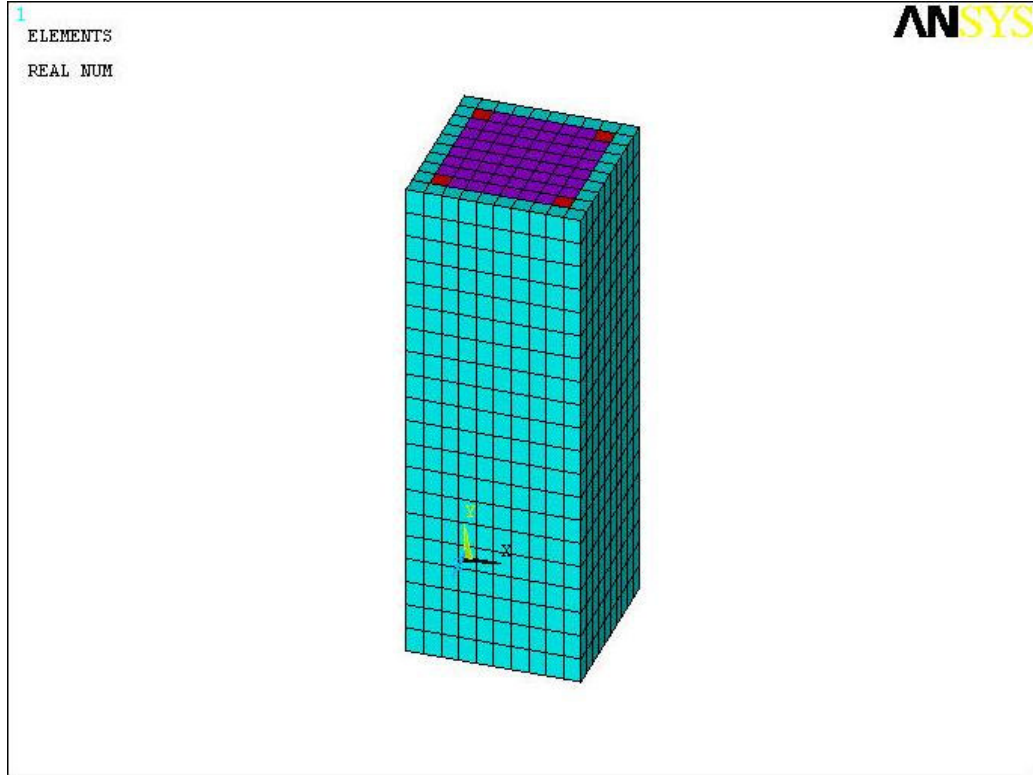
Şekil 5.16. Kolon modelinin üç boyutlu görünüşü

İncelenen modelde donatı için farklı bir eleman tipi seçilmemiş, donatının olması gerektiği yerdeki donatılar, solid65 elemanlarının içerisinde hacimsel oranlarla yani dağınık (smeared) donatı olarak oluşturulmuştur. Betonarme Solid65 elemanı dışında donatı ayrı tanımlanmak istenirse yine ANSYS programı bünyesinde yer alan Link8 iki düğüm noktalı çubuk elemanı kullanılabilir. Link8 elemanında her bir düğüm noktasında x, y, z yönlerinde 3 ötelenme serbestlik derecesi vardır. Tek eksenli çekme ve basınç elemanıdır, eğilme hesaba katılmaz. Ancak Link8 elemanının kullanımı ilave elemanlar gerektirmiş ve bunun neticesinde de işlem hacmi oldukça artmış ve bilgisayar kapasitesi çok zorlanmıştır. Literatürde ve bu çalışmada ayrık ve gizli donatı kullanılmak suretiyle elde edilen sonuçlar arasında önemli bir fark olmadığı görülmüş ve bundan dolayı da oluşturulan modelde dağınık (smeared) donatı kullanılmıştır. Donatıların tanımlanması için eleman sabitleri (real constants) menüsü kullanılmıştır. Modelimizde Ø10'luk boyuna donatı ve Ø4'lük etriyeler olmak üzere iki tip donatı bulunmaktadır.

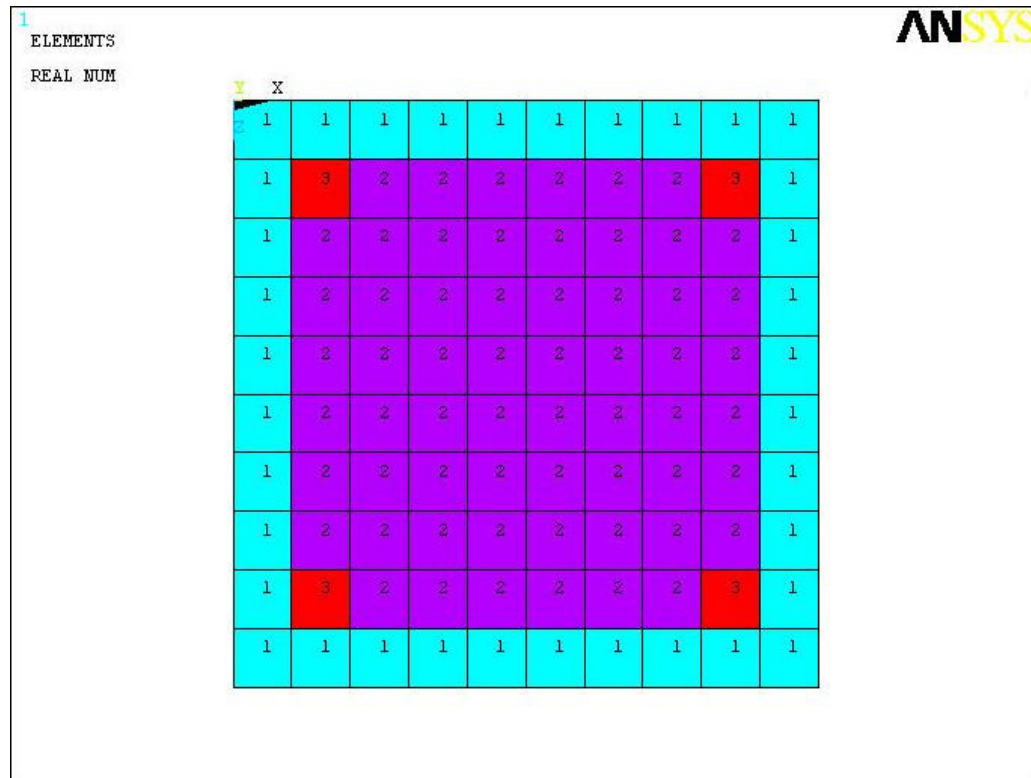
Çizelge 5.1. Solid65 elemanı için tanımlanan eleman sabitleri

Real Constant Set (Eleman sabiti)	Eleman Tipi	Donatı Özellikleri			
		Malzeme No	Hacim Oranı	θ açısı	ϕ açısı
1	Solid65	1	-	-	-
2		2	-	-	-
3		3	0,5	90°	0°

θ ve ϕ açıları solid65 elemanının içerisinde tanımlanacak olan donatının yönlerini belirtir. θ açısı, donatının eleman içerisinde x-y düzleminde x eksenine ile yaptığı açısı, ϕ açısı ise x-y düzlemiyle yaptığı açısı tanımlar. Hacim oranı, eleman kesitindeki donatı alanının eleman kesit alanına bölünmesi ile bulunan orandır.



Şekil 5.17. Kolon elemanı içerisinde eleman sabitlerinin görünüşü

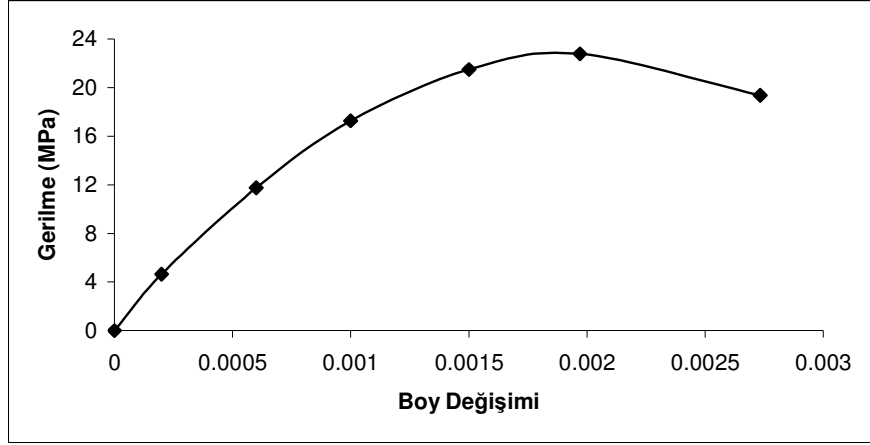


Şekil 5.18. Kolon elemanı içerisinde eleman sabitleri numaraları

Çizelge 5.2. Malzeme özellikleri

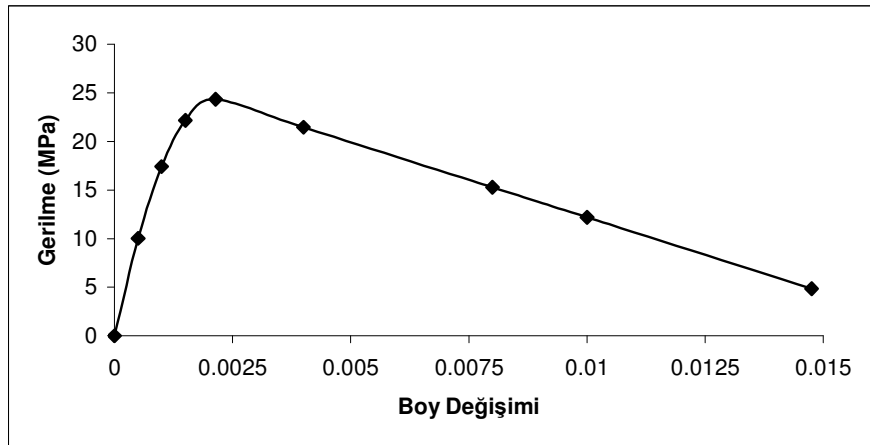
Malzeme No	Eleman Tipi	Malzeme Özellikleri	
1	Solid65	Lineer Isotropik Pekleşmeli	
		EX (MPa)	23 157
		Multilineer Isotropik Pekleşmeli	
			Şekil Değ. Gerilme (MPa)
		1. Nokta	0,0002 4,63
		2. Nokta	0,0006 11,76
		3. Nokta	0,001 17,26
		4. Nokta	0,0015 21,48
		5. Nokta	0,00197 22,777
		6. Nokta	0,00273 19,36
		Beton	
		ShrCf-Op	1
		ShrCf-Cl	1
2	Solid65	Lineer Isotropik Pekleşmeli	
		EX (MPa)	20 074
		Multilineer Isotropik Pekleşmeli	
			Şekil Değ. Gerilme (MPa)
		1. Nokta	0,0005 10,037
		2. Nokta	0,001 17,418
		3. Nokta	0,0015 22,145
		4. Nokta	0,00214 24,32
		5. Nokta	0,004 21,448
		6. Nokta	0,008 15,275
		7. Nokta	0,01 12,189
		8. Nokta	0,01475 4,86
		Beton	
		ShrCf-Op	1
		ShrCf-Cl	1
		UnTensSt(MPa)	1,72
		UnCompSt(MPa)	-1
3		Lineer Isotropik	
		EX (MPa)	200 000
		Bilineer Isotropik Pekleşmeli	
		Fy(MPa)	377
		Tan. Mod	0

Çalışmamızda sargı donatısı dışında kalan kabuk betonu için Hognestad beton modeli kullanılmıştır. Grafik Şekil 5.19’da görülmektedir.



Şekil 5.19. Sargısız beton için verilen Multilineer Isotropic Hardening verileri grafiği

Modelde yalnızca boyuna donatılar tanımlanmıştır. Etriye donatısı için ayrı elemanlar oluşturulmamıştır. Bunun yerine Bölüm 4.3.2’de anlatılmış olan, sargılı betonlar için geliştirilmiş matematik modellerden olan ve yaygın olarak kullanılan Geliştirilmiş Kent ve Park modeli kullanılmıştır (Şekil 5.20). Böylece etriye donatılarının gerektireceği ek elemanlar oluşturulmamış ve bunun sonucunda işlem hacminin artışı engellenmiştir.



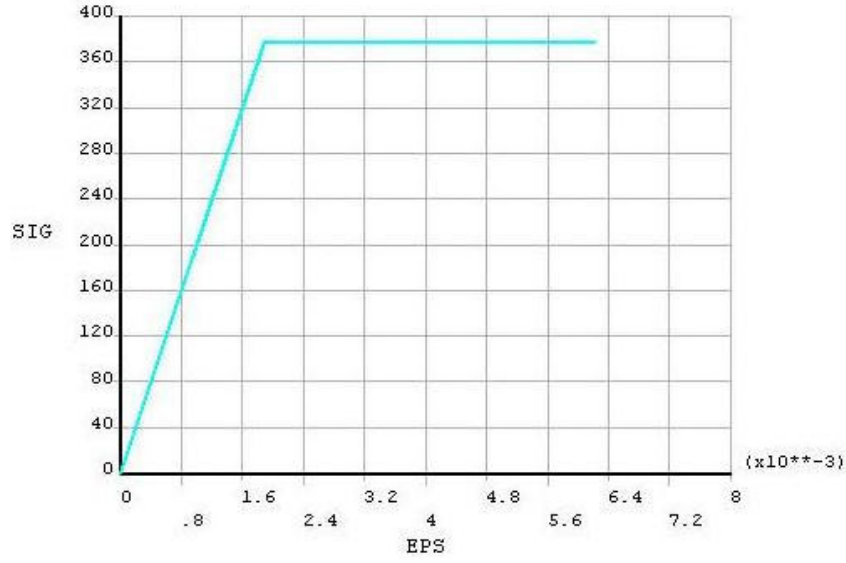
Şekil 5.20. Sargılı beton için verilen Multilineer Isotropic Hardening verileri grafiği

Betonun davranışı, ANSYS bünyesinde bulunan Willam-Warnke modelini tanımlamak için kullanılan parametrelerin girilmesi suretiyle belirlenmiştir. Bunlar;

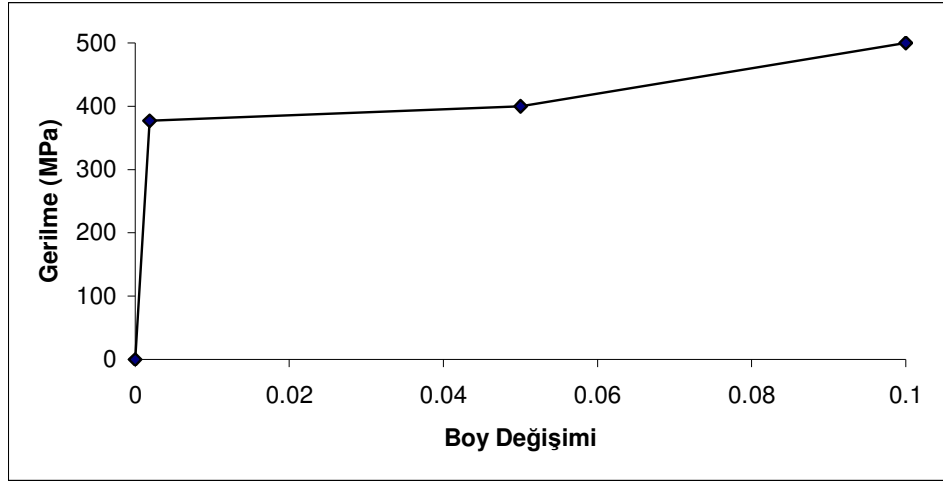
Açık ve kapalı çatlak için kayma transfer katsayısı (ShrCf-Op, ShrCf-CI) değeri 0 -1 arası değerler alabilmektedir. Değerin 0 olması durumunda çatlağın düzgün yüzeyli bir çatlak olduğu ve yüzeyler arasında bir transfer olmayacağı anlamına gelmektedir. 1 olması durumunda ise pürüzlü bir çatlak olduğu ve tam transfer olacağını göstermektedir ve bu çalışmada değerler için 1 kabulü yapılarak menüye girilmiştir.

Tek eksenli çekme dayanımı (UnTensSt) değeri Eş. 5.2'den hesaplanıp menüde yerine yazılmıştır. Tek eksenli basınç dayanımı (UnCompSt) değeri yakınsama hatalarının engellenmesi için ezilme çatlağının kontrolünün engellenmesi gerekmekte yani betonun ezilmesinin ihmalı gerekmektedir. Geçmiş çalışmalarda da ANSYS ezilme çatlağı modeli ile ilgili problemler olduğu ifade edilmiş ve bu özelliğin kullanılmamasının daha uygun olacağı belirtilmiştir. Bunun içinde bu değer -1 olarak ilgili menüde girilmiştir.

Üçüncü olarak Ø10'luk boyuna donatı malzemesi tanımlanmıştır. Çelik malzemesi, ANSYS programında bulunan Von Mises akma kriterini esas alan lineer elastik-tam plastik tanımlamada kullanılan Bilinear Isotropic Hardening seçeneği kullanılarak grafiği oluşturulmuştur. Böylece, donatı çeliği akma gerilmesine ulaşıncaya kadar lineer-elastik, bu değerden sonra plastik bir malzeme olarak davranış gösterecektir. Gerçekte akma noktasından sonra bir akma platosu ve onu takip eden bir pekleşme bölgesi bulunurken araştırmacılar modellemelerde çeliğin bu davranışını idealize ederek kullanırlar [6]. Donatının akma dayanımı deneysel çalışmada verildiği üzere 377 Mpa alınmış ve elastisite modülünde 200 000 Mpa varsayılmıştır (Şekil 5.21).



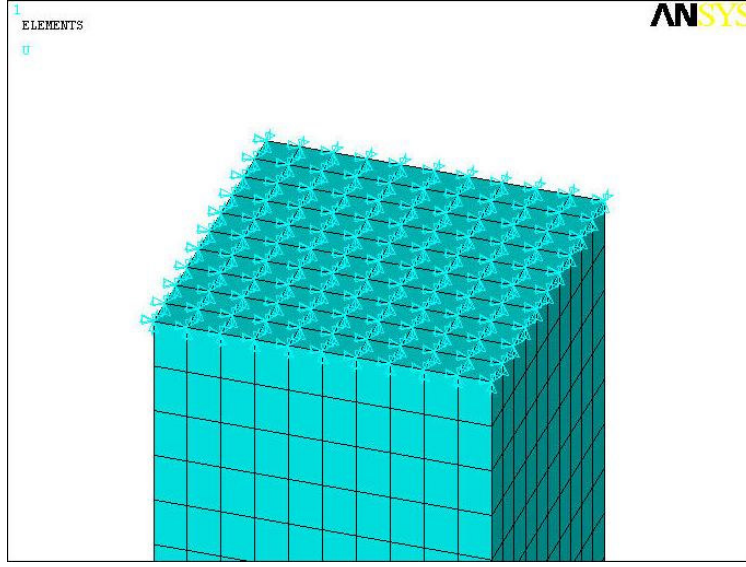
Şekil 5.21. Donatı çeliği için verilen Bilinear Isotropic Hardening verileri grafiği



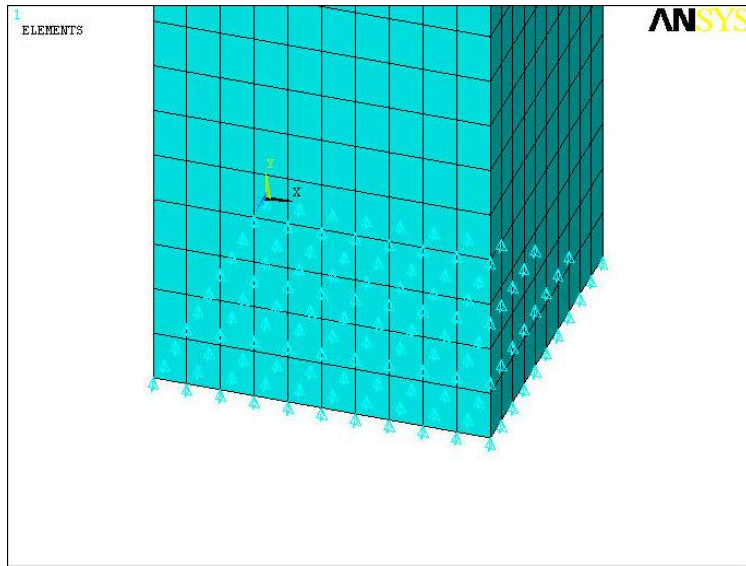
Şekil 5.22. Teorik hesapta kullanılan donatı çeliğinin $\sigma - \epsilon$ grafiği

Deney elemanının betonarme hesabı için kullanılacak olan donatı çeliği $\sigma - \epsilon$ grafiği Şekil 5.22’de ayrıca verilmiştir. Teorik hesapta pekleşmede hesaba katılmış ve eğrinin düz bölümü değiştirilmiştir. Bu eğri parçasının eğimi, kullanılan çeliğin özelliğine göre deneysel olarak saptanmıştır.

Betonarme kolon elemanı $y=370$ mm iken x - z düzlemindeki düğümlerinin x ve z eksenlerindeki hareketleri engellenmiş ve böylece bu yüzey ankastre mesnetli olarak tanımlanmıştır. Eleman y eksenini doğrultusunda, deplasman değerleri verilmek sureti ile yüklenmiştir. Nonlinear çözüm, deplasman kontrollü olarak gerçekleştirilmiş ve sistem göçme yüküne ulaşıncaya kadar deplasman değeri artırılarak uygulanmıştır.



Şekil 5.23. Modellenen kolonun üst düğümlerden mesnetlenmesi



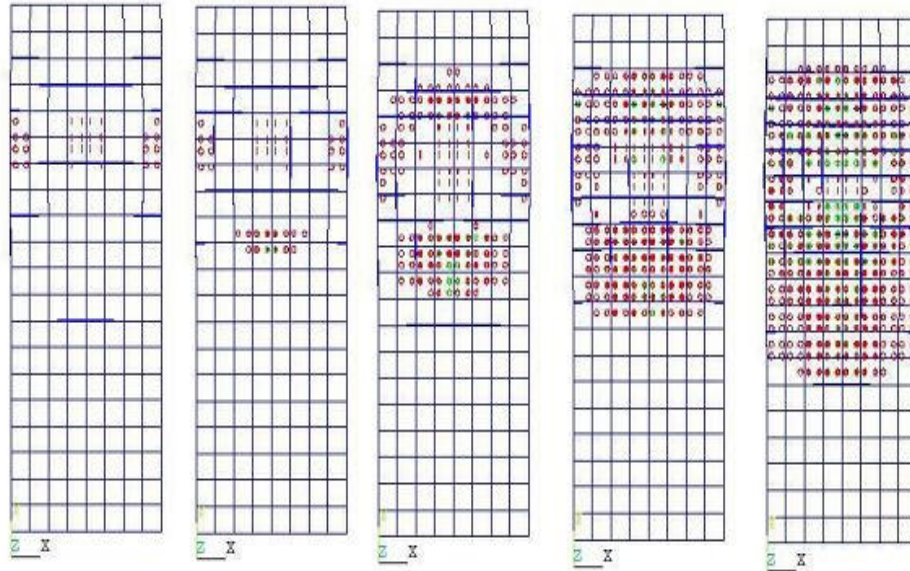
Şekil 5.24. Modellenen kolonun alt düğümlerde deplasman yüklemesinin gösterimi

6. ANSYS ANALİZİ, TEORİK HESAP SONUÇLARI VE DENEYSEL ÇALIŞMA VERİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Çizelge 6.1. Zaman – uygulanan deplasman değerleri

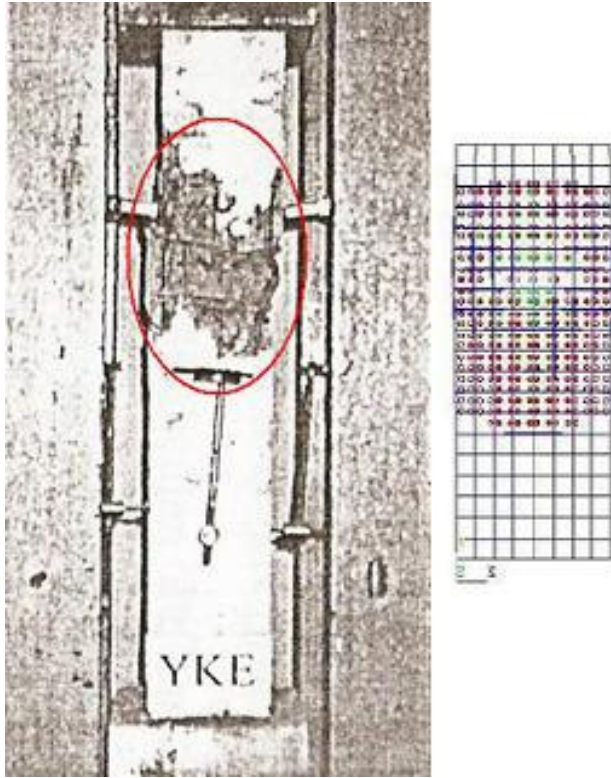
Zaman	Modele uygulanan deplasman değerleri (mm)
0	0,00
1	0,05
2	0,10
3	0,15
4	0,20
5	0,25
...	...
15	0,70
16	0,75

Analizde toplam 16 yük adımı bulunmaktadır. 16. yük adımında 0,73 mm deplasman değerine ulaşılmıştır. Toplam 386 hesap adımı yapılmıştır. Buda yük başına ortalama 24 hesap adımı anlamına gelmektedir.



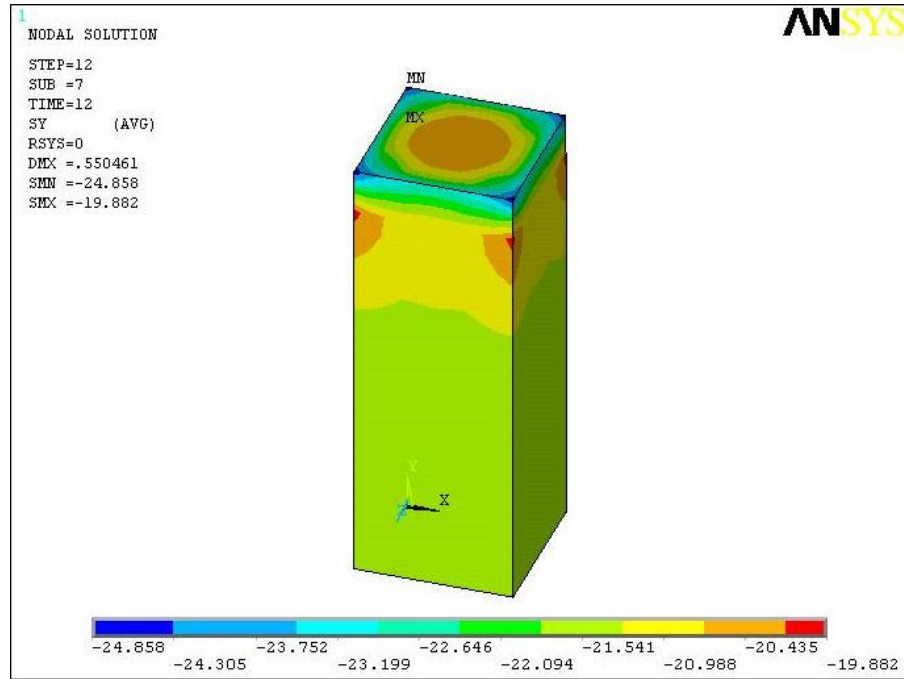
Şekil 6.1. Modellenen kolonda oluşan çatlakların genel görünümü

ANSYS programında deneysel çalışmada görülemeyecek olan tüm çatlaklar da görülebilmektedir. Program çekme çatlaklarını daire şeklinde, basınç çatlaklarını da poligon olarak göstermektedir. Yapılan kabuller esnasında betonun ezilmesini ihmal etmek ve yakınsama hatalarını engellemek için ilgili menüde tek eksenli basınç dayanımını -1 girdiğimizden dolayı Şekil 6.1’de görülmekte olan çatlakların hepsi dairesel olarak belirtilen çekme çatlağıdır ve çekme gerilmesinden kaynaklanmaktadır. Ancak ANSYS çatlakların boyutu ve derinliği hakkında herhangi sayısal bir bilgi vermemektedir.

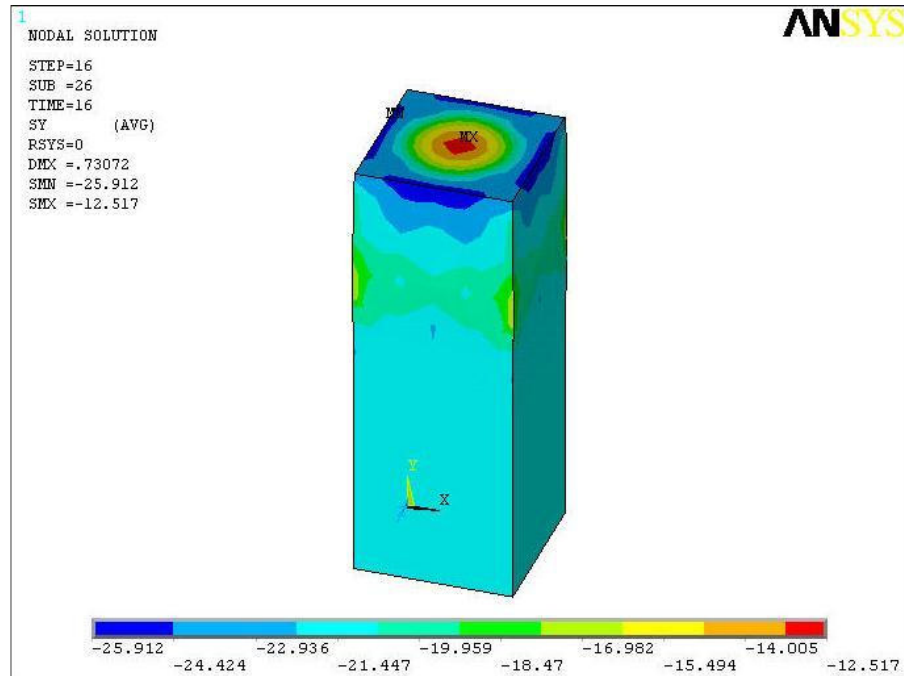


Resim 6.1. Deney elemanı ile ANSYS modelinde oluşan çatlakların genel görünümü

Deney elemanı ile ANSYS programında oluşturulan model arasında çatlakların oluşumu ve göçme durumundaki uyum dikkat çekicidir.



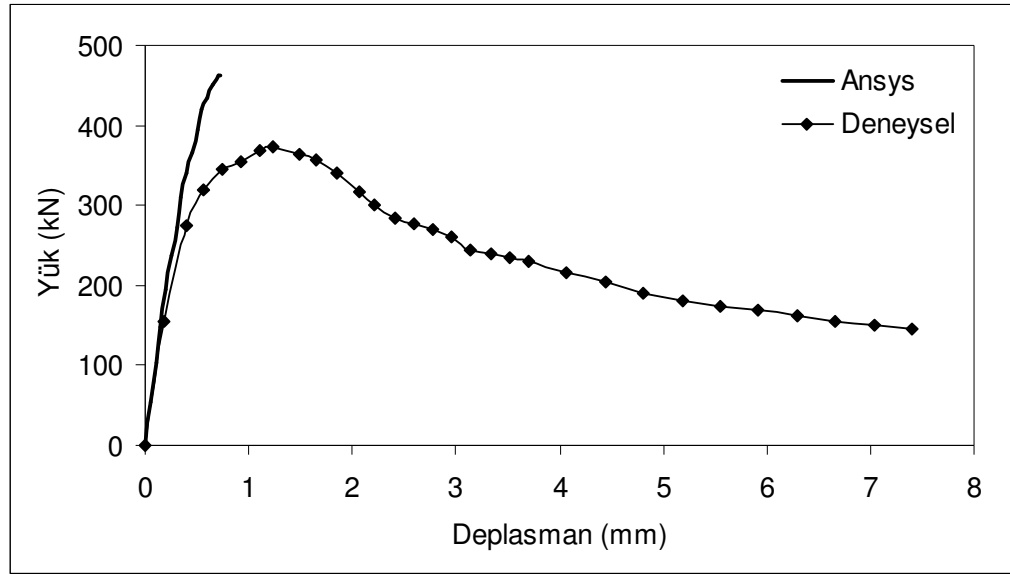
(a)



(b)

Şekil 6.2. ANSYS modelinde oluşan gerilmelerin görünüşü. (a) Akma yükünde oluşan gerilmeler, (b) Göçme yükünde oluşan gerilmeler

y doğrultusunda meydana gelen gerilmeler akma ve göçme yükü için Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Şekillerin altındaki skalalardaki değerler negatif oluşu gerilmelerin basınç gerilmesi olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.3. Ölçüm bölgesinde elde edilen yük - deplasman grafiği

Çizelge 6.2. Deney elemanı verileri ve ANSYS sonuçlarının karşılaştırılması

	Dayanım ve Deplasman			
	Akma Yüğü (kN)	Akmada Deplasman (mm)	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğünde Deplasman (mm)
Deney Elemanı Verileri	341,657	0,41	372,495	1,24
Analitik (ANSYS) Sonuçları	419,251	0,55	462,360	0,73
Fark	% 18	% 25	% 19	% 41

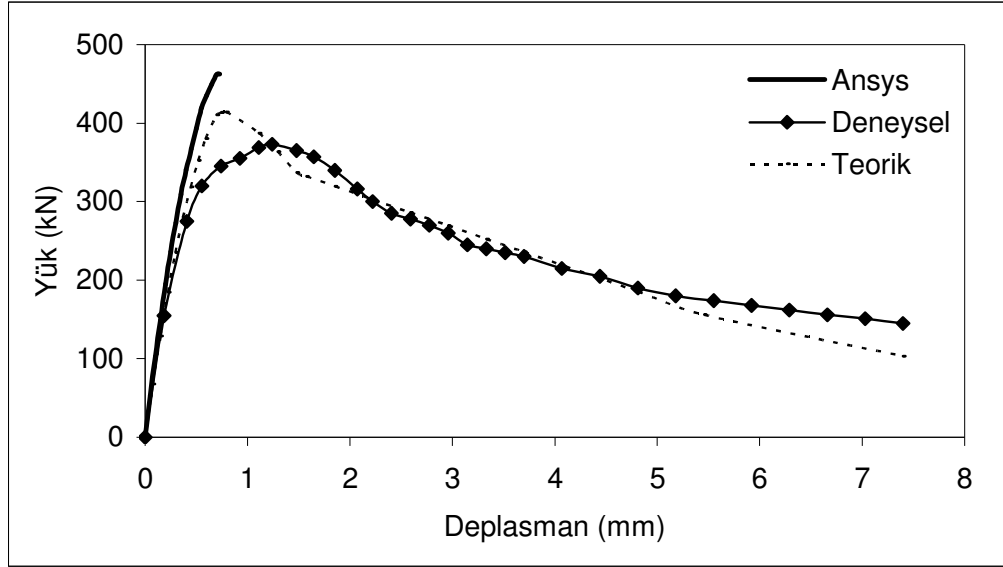
Deneyel çalışmada ulaşılan maksimum yük 372,495 kN ve bu yük seviyesinde ölçülen deformasyon 1,24 mm olmuştur. ANSYS ile yapılan çalışmada ise bu değer

462,360 kN olarak elde edilmiştir ve bu yük seviyesinde ölçülen deformasyon 0,73 mm olmuştur. Deney kolonunda donatı 341,657 kN değerinde 0,41 mm deplasman yaparak akmış, model kolonunda ise 419,251 kN değerinde 0,55 mm deplasman değerinde akmıştır. Göçme yükü değerinden sonraki yük değerleri ve buna karşılık gelen deplasman değerleri hakkında bir sonuca henüz ulaşılammıştır. Yapılan varsayımların değiştirilmesi ancak yük değerlerinde ve buna karşılık gelen deplasman değerlerinde değişikliklere neden olmuştur.

Bu çalışmada ek olarak teorik hesap çözümü gerçekleştirilmiştir. Bu çözüm aşamasında; kabuk betonu, göbek betonu ve donatı olarak elemanda üç ayrı bölge mevcuttur. Bu bölgelerin gerilme - boy değişimi grafikleri kullanılarak betonarme hesabı yapılmıştır (Şekil 5.19, Şekil 5.20 ve Şekil 5.22). Kabuk betonu, göbek betonu ve donatının üzerine etkileyen toplam kuvvet ilgili boy değişimi değerinde modele etkileyen toplam eksenel kuvvet olarak bulunmuştur.

“Yapılan deneylerde kolonlardaki basınç dayanımının, ortalama olarak silindir basınç dayanımının %85’i olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni, büyük bir olasılıkla boyut etkisi ve kolondaki betonun silindir numunesindeki kadar iyi sıkıştırılmamış olmasıdır” [9].

Kolon betonunda gözlenen bu değişiklik de dikkate alınarak, bulunan yük değerleri %85 ile çarpılarak azaltılmaktadır. Zamana bağlı sünmeden kaynaklanan bu davranışı teorik hesaplarda dikkate alarak bulunan eksenel yük 0,85 ile azaltılması deneysel verilere daha uygun sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.



Şekil 6.4. Deneysel çalışma verileri, ANSYS ile yapılan çalışma ve teorik hesap ile yapılan çalışma sonucu elde edilen yük - deplasman grafiği

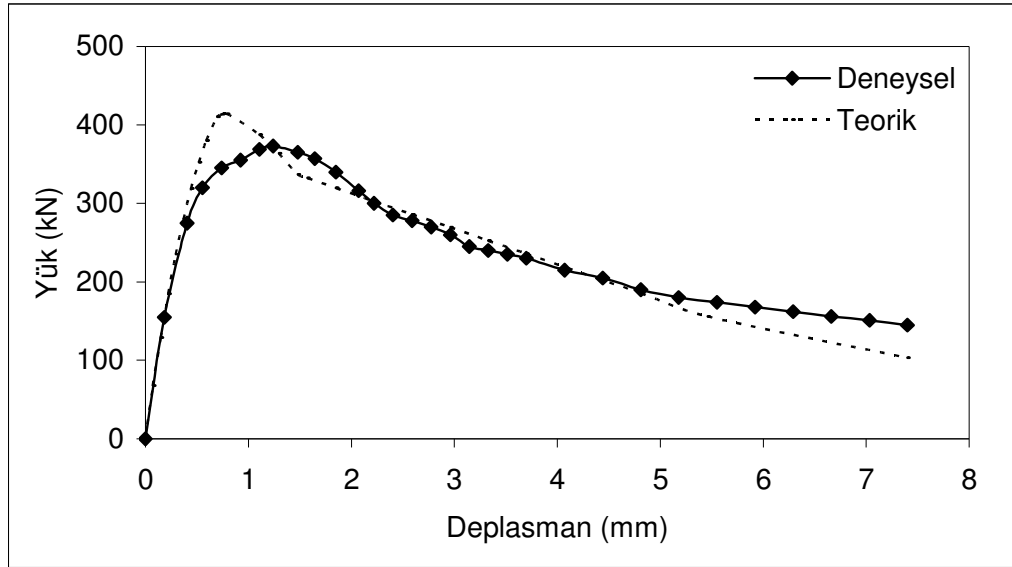
Deneysel çalışma verilerinde belirtilen tepe noktası değeri 372,495 kN iken, bu değer teorik hesap yoluyla 413,910 kN ve ANSYS programı ile 462,360 kN olarak bulunmuştur. Deneysel verilerde belirtilen tepe noktası değeri ile teorik hesapla bulunan değer arasında %10'luk, ANSYS ile bulunan değer arasında ise %19'luk bir fark bulunmaktadır.

Başlangıç rijitlikleri her üç grafik için son derece uyumlu olmasına rağmen, deneysel verilere göre ANSYS grafiğinin rijitliği daha büyük çıkmıştır. Teorik çalışma grafiği ise ANSYS grafiği ve deneysel veri grafiği arasında bir rijitlik değeri almaktadır.

ANSYS analizi sonucunda yalnızca tepe noktasına kadar olan sonuçlar elde edildiği için tepe noktasına kadar olan enerji tüketimi dikkate alınmıştır. Deneysel çalışma verileri referans alınacak olursa ANSYS ile yapılan çalışmanın enerji tüketimi yaklaşık %25, teorik olarak yapılan çalışmanın enerji tüketimi ise yaklaşık %13 daha büyük olmaktadır. Ancak deneysel çalışma grafiğinin tepe noktası değerinin daha büyük deplasmanlarda olduğu dikkatlerden kaçmamalıdır.

Teorik çalışmayla, deneysel çalışmalardan elde edilen grafiğimizde enerji tüketimi, rijitlik ve süneklik değerlerinin büyük ölçüde örtüşmesine rağmen, tepe noktası deplasmanı ve maksimum yük değerleri farklılık göstermektedir.

ANSYS programı değerleri ile, teorik olarak yapılan çalışma sonuçlarında tepe noktaları deplasman değeri olarak bir örtüşme söz konusu olurken, yük değerinde %10'luk bir fark bulunmaktadır. Deneysel verilerde ise tepe noktası daha büyük deplasman değerinde oluşmuştur (Şekil 6.4).



Şekil 6.5. Deneysel çalışma verileri ve teorik hesap ile yapılan çalışma sonucu elde edilen yük - deplasman grafiği

ANSYS programı ile bulunan sonuçlarda grafiğin negatif eğimle azaldığı bölüm (tepe noktasından sonraki kısım) elde edilememiştir (Şekil 6.4). Bu nedenle iniş kollarının karşılaştırılması deneysel verilerle elde edilen grafik ve teorik çalışma sonuçlarıyla elde edilen grafikler arasında yapmak gerekliliği vardır.

Deneysel çalışma verilerinde belirtilen tepe noktası ile teorik çalışma sonucu bulunan tepe noktası arasında %10'luk bir fark bulunurken, teorik çalışma sonucu bulunan enerji tüketimi deneysel veri grafiğinden elde edilen enerji tüketimi değerinden %13

fazla olmaktadır. Ancak Şekil 6.5’den de rahatlıkla görülebileceği gibi iniş kollarında büyük bir uyum söz konusudur.

Teorik çalışma sonucu elde edilen grafikteki keskinlikler dikkat çekmektedir. Bunun başlıca nedenleri; beton, sargılanmış beton ve donatı modellerindeki keskinliklerdir. Göbek betonu için kullandığımız Geliştirilmiş Kent ve Park modeli bu keskinliklerin oluşumunda etkilidir. Ancak grafiklerdeki genel uyum dikkat çekicidir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Eksenel yüklü, kare kesitli betonarme bir kolonun ANSYS sonlu elemanlar programı ile nonlinear sonlu elaman modeli oluşturulup, analizleri yapılmış ve bu analizler neticesinde elde edilen sonuçlar deneysel olarak yapılmış çalışmadan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

- Deneysel çalışma verilerinde belirtilen tepe noktası değeri 372,495 kN iken, bu değer teorik hesap yoluyla 413,910 kN ve ANSYS programı ile 462,360 kN olarak bulunmuştur. Deneysel verilerde belirtilen tepe noktası değeri ile teorik hesapla bulunan değer arasında %10'luk, ANSYS ile bulunan değer arasında ise %19'luk bir fark bulunmaktadır.
- Başlangıç rijitlikleri her üç grafik için son derece uyumlu olmasına rağmen, deneysel verilere göre ANSYS grafiğinin rijitliği daha büyük çıkmıştır. Teorik çalışma grafiği ise ANSYS grafiği ve deneysel veri grafiği arasında bir rijitlik değeri almaktadır.
- ANSYS analizi sonucunda yalnızca tepe noktasına kadar olan sonuçlar elde edildiği için tepe noktasına kadar olan enerji tüketimi dikkate alınmıştır. Deneysel çalışma verileri referans alınacak olursa ANSYS ile yapılan çalışmanın enerji tüketimi yaklaşık %25, teorik olarak yapılan çalışmanın enerji tüketimi ise yaklaşık %13 daha büyük olmaktadır. Ancak deneysel çalışma grafiğinin tepe noktası değerinin daha büyük deplasmanlarda olduğu dikkatlerden kaçmamalıdır.
- Teorik çalışmayla, deneysel çalışmalardan elde edilen grafiğimizde enerji tüketimi, rijitlik ve süneklik değerlerinin büyük ölçüde örtüşmesine rağmen, tepe noktası deplasmanı ve maksimum yük değerleri farklılık göstermektedir.

- ANSYS programı değerleri ile, teorik olarak yapılan çalışma sonuçlarında tepe noktaları deplasman değeri olarak bir örtüşme söz konusu olurken, yük değerinde %10'luk bir fark bulunmaktadır. Deneysel verilerde ise tepe noktası daha büyük deplasman değerinde oluşmuştur.
- ANSYS programı ile bulunan sonuçlarda grafiğin negatif eğimle azaldığı bölüm (tepe noktasından sonraki kısım) elde edilememiştir. Bu nedenle iniş kollarının karşılaştırılması deneysel verilerle elde edilen grafik ve teorik çalışma sonuçlarıyla elde edilen grafikler arasında yapmak gerekliliği vardır.
- Deneysel çalışma verilerinde belirtilen tepe noktası ile teorik çalışma sonucu bulunan tepe noktası arasında %10'luk bir fark bulunurken, teorik çalışma sonucu bulunan enerji tüketimi deneysel veri grafiğinden elde edilen enerji tüketimi değerinden %13 fazla olmaktadır. Ancak iniş kollarında büyük bir uyum söz konusudur.
- Teorik çalışma sonucu elde edilen grafikteki keskinlikler dikkat çekmektedir. Bunun başlıca nedenleri; beton, sargılanmış beton ve donatı modellerindeki keskinliklerdir. Göbek betonu için kullandığımız Geliştirilmiş Kent ve Park modeli bu keskinliklerin oluşumunda etkilidir. Ancak grafiklerdeki genel uyum dikkat çekicidir.
- Mesh yoğunluğunun artırılarak nonlineer analiz adım aralıklarının sıklaştırılması ile analizlerin yapılması daha iyi sonuç vermeye yardımcı olacaktır. ANSYS ile yapılan çalışmalarda dikkat edilmesi gereken ön önemli durum, modellenmek istenen elemanın özelliklerini iyi yansıtacak kabullerin yapılması gerektiğidir.
- Betonarme mantolama eksenel yüklü kolonlarda deneysel veriler mevcut olmasına rağmen ANSYS programıyla yapılan çalışmada ve teorik çalışmada mevcut değildir.

- ANSYS'in bu tez çalışmasında kullanılan mevcut sürümünde mantolanmış bir kolonun ister yüklü ister yüksüz mantolama olsun, ister onarım ister güçlendirme olsun gerçekçi sonuç vermeyeceği açıktır.
- Kullanılan çözüm yollarının, yapılan varsayımların ve kabullerin değiştirilmek suretiyle daha gerçekçi sonuçlara ulaşılması sonraki yapılacak olan çalışmalar için hedef teşkil etmektedir.

KAYNAKLAR

1. Doğangün, A., “Giriş”, Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı, **Birsen Yayınevi Ltd. Şti.**, İstanbul, 1-3 (2002).
2. Dede, F. T., “Tersinir-Tekrarlanır Yükleme Altındaki Betonarme Çerçevelerin ANSYS Programı İle Nonlineer Sonlu Eleman Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, **Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Konya, 1-100 (2006).
3. Barbosa, A. F., Riberio, G. O., “Analysis of Reinforced Concrete Structures Using ANSYS Nonlinear Concrete Model”, **Computational Mechanics**, 3; 50-57 (1998).
4. Miller, C., Hofmayer, C., Wang, Y., Chokshi, N., Murphy, A., Kitada, Y., “Prediction of NUPEC’s Multi-Axis Loading Tests of Concrete Shear Walls”, **Conference Transactions**, Washington DC,16 (2001).
5. Fanning, P., “Nonlinear models of reinforced and post-tensioned concrete beams”, **Electronic Journal of Structural Engineering**, 2: 111-119 (2001).
6. Yavuzer, M., “Monotonik Yükleme Etkisi Altında Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Nonlineer Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-6, 26-43 (2005).
7. Güngör, İ., “ANSYS Sonlu Eleman Programı İle Çift Konsol Kirişlerin Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 15-22 (2004).
8. Hekimoğlu, F., “Eksenel Yüklü Betonarme Kolonların Dıştan Çelik Kelepçe İle Güçlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 32-34, 67-69 (1999).
9. Ersoy, U., Özcebe, G., “Betonarme”, Geliştirilmiş Yeni Baskı, **Evrım Yayınevi**, İstanbul, 58-74 (2001).
10. Çalık, A., “ANSYS ve Uygulamaları”, Bitirme Ödevi, **Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü**, Zonguldak, 8-11 (2004).
11. Willam, K. J. and Warnke, E. P., “Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete”, **IABSE, Report No.19**, Bergamo, 1-30 (1974).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YOZGAT, Uğur
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 03.08.1982 Ordu
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (535) 812 78 74
 e-mail : uguryozgat@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Ondokuz Mayıs Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü	2004
Lise	Ünye Süper Lisesi (YDAL)	1999

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-2006	Delta İnş. San. ve Tic. A. Ş.	Şantiye Şefi Yard.
2006-2007	Metol Proje İnş. Tic. Ltd. Şti.	Şantiye Şefi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Fotoğrafçılık, Grafik tasarımı, Bilgisayar teknolojileri, Yüzme