T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇLENDİRİLMİŞ 3 KATLI BETONARME MODEL BİR YAPININ STATİK İTME YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Tezi Hazırlayan
Furkan BİRDAL

Tezi Yöneten
Doç. Dr. Fatih ALTUN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Ocak 2010
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇLENDİRİLMİŞ 3 KATLI BETONARME MODEL BİR YAPININ STATİK İTME YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Tezi Hazırlayan
Furkan BİRDAL

Tezi Yöneten
Doç. Dr. Fatih ALTUN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Ocak 2010
KAYSERİ

Doç. Dr. Fatih ALTUN danışmanlığında **Furkan BİRDAL** tarafından hazırlanan **"Güçlendirilmiş 3 Katlı Betonarme Model Bir Yapının Statik İtme Yöntemiyle Analizi"** adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

15.01.2010

JÜRİ:

Başkan: Prof. Dr. Tefaruk HAKTANIR

Üye : Doç. Dr. Fatih ALTUN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hacı Bekir KARA

ONAY :

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 19/01/2010 tarih ve 2010/03-07 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

N. Ayyıldız
20 / 01 / 2010

Prof. Dr. Nusret AYYILDIZ
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

"Güçlendirilmiş 3 Katlı Betonarme Model Bir Yapının Statik İtme Yöntemiyle Analizi" konulu tez çalışmasında yardımlarıyla beni yönlendiren ve tezimin her aşamasında fikirlerine başvurduğum değerli danışman hocam Doç. Dr. Fatih ALTUN' a ve tez çalışmam boyunca burs aldığım TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Dairesi Başkanlığına şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmam boyunca bana vermiş oldukları manevi destek ve göstermiş oldukları sabırdan dolayı babam Öğretmen Fahrettin BİRDAL, annem Kamuran BİRDAL ve kız kardeşim Hilal BİRDAL'a, tez konum ile ilgili birçok yabancı makale, tez ve yönetmeliklerin çevrilmesinde desteğini esirgemeyen nişanlım İngilizce Öğretmeni Tuğba SALMAN'a ve değerli arkadaşım İnşaat Mühendisi Cengiz SEVİM'e teşekkürü borç bilirim.

GÜÇLENDİRİLMİŞ 3 KATLI BETONARME MODEL BİR YAPININ STATİK İTME YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Furkan BİRDAL
Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ocak 2010
Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fatih ALTUN

ÖZET

Son yıllarda ülkemizde ve dünyada depreme dayanıklı yapı tasarımı gittikçe önem kazanmaktadır. Depreme dayanıklı yapı tasarımının önem kazanmasıyla birlikte yapıların güçlendirilmesi ve doğrusal olmayan hesap yöntemleri kavramları literatürümüze girmiştir. Bu tez çalışmasında karbon esaslı fiber polimer uygulaması ile güçlendirilmiş 3 katlı 2 açıklıklı model betonarme bir yapının kuvvet-deplasman ilişkisi analitik olarak incelenmiştir.

Günümüzde İnşaat Mühendisliği paket programları arasında fiber polimer uygulanmış kolon ya da kiriş elemanlarının modellenmesine imkan veren bir program bulunmamaktadır. Bu nedenle analitik çalışmalarda ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. Literatürde çalışmalar tek bir kolon ya da kiriş üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada 3 katlı bir bina modeli oluşturulmuş ve bu modele yanal yükleme yapılmıştır. ANSYS sonlu elemanlar paket programı ile tez konusu deney numunesi, tek bir kolon ve tek bir düğüm noktası modellenmiş ve kuvvet- deplasman ilişkileri çıkarılmıştır. Sonuçlar deneysel verilerle kıyaslanmış, analitik çalışma ile deneysel verilerin uygunluğu araştırılmıştır. Bu sonuçların neticesinde fiber polimerler ile güçlendirilmiş model bir yapı üzerinde deney yapmadan önce numune modellenerek FRP (fiber lifli polimer) malzemesinin sünekliğe etkisi, oluşacak çatlak modeli gibi veriler elde edilebilmiştir.

Anahtar Kelimeler: ANSYS modelleme, karbon esaslı lifli polimerler, statik-itme analizi, güçlendirme, performans

ANALYSIS OF STRENGHTHENED 3D REİNFORCED CONCRETE STRUCTURE MODEL WİTH PUSHOVER METHOD

Furkan BİRDAL
Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
M.Sc. Thesis, January 2010
Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Fatih ALTUN

ABSTRACT

In recent years, designing earthquake resistant structures has been progressively important for our country and world. Concepts of retrofitting structures and nonlineer methods entered the engineering literature due to the increasing significance of earthquake resistant design. In the thesis, force-displacement relationship of a 3 storey 2 span reinforced concrete structure strenghtened by the application of carbon-based fiber polymer was investigated analytically.

At present, a program that allows modelling of columns or beams of a structure with fiber polymer application does not exist. Therefore, ANSYS finite element package program was used for analytical purposes. Studies in literature has been constructed on a single column or beam. In this study, 3- storey building model has been created and the lateral installation has been done. Using ANSYS, the experiment model as a single column, and single joint were modelled and force-displacement relationships have been obtained. Analytical results were compared with experimental data; the compability of analytical and experimental output was hence investigated. As a result of these studies, such values as de-bonding of the FRP material, ductility effect and model of the expected cracking able to be achieved before an experiment is carried out.

Keywords: Modelling with ANSYS, carbon fiber reinforced polymer, pushover analysis, retrofitting, performance

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY i
TEŞEKKÜR ii
ÖZET iii
ABSTRACT iv
TABLOLAR LİSTESİ vii
ŞEKİLLER LİSTESİ viii
1.BÖLÜM 1
GİRİŞ 1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 3
1.2 Literatür taraması 4
2.BÖLÜM 9
ANALİTİK ÇALIŞMASI YAPILAN DENEY NUMUNESİ 9
2.1 Deney Numunesi Detayları 11
2.2 Lifli Polimerlerle Güçlendirilmiş Numune Sarım Detayları 14
3.BÖLÜM 17
BETONARMENİN NONLİNEER DAVRANIŞI ve STATİK İTME ANALİZİ 17
3.1 Betonarmenin Nonlineer Davranışı 17
3.2 Süneklik ve Plastik Mafsalın Tanımı 19
3.3 Doğrusal Olmayan Davranışın Nedenleri 25
3.3.1 Malzeme Nonlineeritesi 26
3.3.1.1 İdeal Malzeme Kabulleri 26
3.4 Beton İçin Matematiksel Modeller 29
3.4.1 Sargısız Beton İçin Literatürde Verilen Modeller 29
3.4.1.1. Hognestad Modeli 29
3.4.1.2. Mander Modeli 31
3.4.2 Sargılı Beton için Literatürde Verilen Modeller 32
3.4.2.1 Geliştirilmiş Kent ve Park Modeli 32
3.4.2.2 Saaatçioğlu Ravzi modeli 35
3.5. Çekme Gerilmesi Altında Beton Modeli 38
3.6 Statik- İtme Analizi ve Yapı Performansının Belirlenmesi 38
4.BÖLÜM 42
ANSYS SONLU ELEMANLAR PAKET PROGRAMINDA MODELLEME 42

4.1 Giriş.....42
4.2 FRP Uygulanmamış Numunenin Modellenmesi.....42
4.2.1 Preprocessing.....42
4.2.1.1 Modelling.....42
4.2.1.2 Element Type.....49
4.2.1.3 Material Probs.....51
4.2.1.4 Eleman Sabitleri (Real Constant).....58
4.2.1.5 Modelin Sonlu elemanlara Bölünmesi.....60
4.3 FRP Malzemesinin Modellenmesi.....62
4.3.1 FRP Malzemesinin Özellikleri.....62
4.3.2 Ansys Paket Programında FRP Plakalarının Modellenmesi.....62
5.BÖLÜM.....69
FRP İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ 3 KATLI DENEY MODELİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE STATİK İTME ANALİZİ.....69
5.1 Modelin Mesnet Şartları.....69
5.2 Modele Yükün Uygulanması.....71
5.3 Ansys Sonlu Elemanlar Paket Programı ile Modelin Çözümü.....73
5.3.1 Ansys Çözüm Opsiyonları.....73
5.3.2 Tek Bir Kolonda FRP Malzemesinin Sünekliğe Etkisinin İncelenmesi.....75
5.3.3 Düğüm Noktasında FRP Malzemesinin Sünekliğe Etkisinin İncelenmesi.....80
5.4 Tek Bir Kolon Deneyinin Analitik Olarak İncelenmesi.....82
5.5 Tez Konusu Modelin Analizi.....85
6. BÖLÜM.....88
SONUÇ.....88
6.1 Ansys Sonlu Elemanlar Programının İnşaat Mühendisliğinde Kullanımı.....88
6.2 Analitik Sonuçlar İle Deneysel Dataların Uygunluğu.....89
6.3 Bulgular.....95
KAYNAKLAR.....98
ÖZGEÇMİŞ.....103

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 4. 1 Keypoint koordinatları 43
Tablo 4. 2 Solid 65 Sargılı beton malzeme özellikleri 54
Tablo 4. 3 Solid 65 sargısız beton malzeme özellikleri 56
Tablo 4. 4 FRP malzemesi özellikleri 57
Tablo 4. 5 Solid 46 malzeme özellikleri 57
Tablo 4. 6 Solid 45 malzeme özellikleri 58
Tablo 4. 7 Solid 65 eleman sabitleri 59
Tablo 5.1 Kolon Yükleme Adımları 76
Tablo 6.1 Tez Konusu Model Deney Verileri 90
Tablo 6.2 Tez Konusu Model Analitik Çalışma Sonuçları 91

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. a. Yükleme Düzeneği……..10
Şekil 2. 1.b. Deney numunesi.....10
Şekil 2. 2. Deney numunesi.....11
Şekil 2. 3 Deney numunesi plan görünümü 12
Şekil 2. 4 Deney numunesi kiriş açılımı 13
Şekil 2. 5 Deney numunesi kolon en kesitleri 13
Şekil 2. 6 Modellenecek yapının genel görünümü.....14
Şekil 2. 7 Kenar kolon sarım detayı 15
Şekil 2. 8 Orta kolon sarım detayı 15
Şekil 2. 9 Deney numunesi genel görünümü 16
Şekil 3. 1 Gevrek ve sünek davranış 20
Şekil 3. 2 Dayanım azaltma katsayısı 20
Şekil 3. 3 Elastik ve elastoplastik sistemlerde eylemsizlik kuvveti-yatay ilişkisi……...22
Şekil 3. 4 Konsol kolon için plastik davranış modeli 24
Şekil 3. 5 Kiriş mesnet bölgesinde plastik mafsal oluşumu 25
Şekil 3. 6 Lineer elastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi 26
Şekil 3. 7 Lineer olmayan elastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi 27
Şekil 3. 8 Elastoplastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi 27
Şekil 3. 9 İdeal elastoplastik malzeme kuvvet-deplasman ilişkisi 28
Şekil 3. 10 Pekleşen İdeal elastoplastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi 28
Şekil 3. 11 Rijit plastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi 29
Şekil 3. 12 Hognestad malzeme modelinde $\sigma-\varepsilon$ ilişkisi 30
Şekil 3. 13 Sargısız Beton için mander modeli 31
Şekil 3. 14 Geliştirilmiş Kent ve Park malzeme modelinde ($\sigma-\varepsilon$) ilişkisi 32
Şekil 3. 15 Saatçioğlu Ravzi beton modeli 35
Şekil 3. 16 Çekme Gerilmeleri için $\sigma-\varepsilon$ ilişkisi 38
Şekil 3. 17 Pushover Eğrisi.....39
Şekil 3. 18 Sprektral ivme spektral yer değiştirme diyagramı 40
Şekil 3. 19 Kapasite Eğrisi 41

Şekil 4. 1 Keypointlerin Oluşturulması....43
Şekil 4. 2 Keypointlerin Modellenmesi....44
Şekil 4. 3 Kolon Taban Alanlarının Modellenmesi....44
Şekil 4. 4 Alanın Hacme Dönüştürülmesi....45
Şekil 4. 5 Köşe Kolon Plan Görünümü....45
Şekil 4. 6 İlk Oluşturulan Hacim....45
Şekil 4. 7 Birinci Kat Kolonları....46
Şekil 4. 8 Birinci Kat Kolon ve Kirişleri....46
Şekil 4. 9 Döşeme Hacimlerinin Oluşturulması....47
Şekil 4. 10 Modelin Genel Görünüü....48
Şekil 4. 11 Hacimlerin Birleştirilmesi....48
Şekil 4. 12 Element Type Menüsü....49
Şekil 4. 13 Solid 65 Beton Modeli....50
Şekil 4. 14 Solid 46 Elemanı....50
Şekil 4. 15 Solid 45 Elemanı....51
Şekil 4. 16 Malzeme Özellikleri Menüsü....52
Şekil 4. 17 Sargılı Beton Davranışı....52
Şekil 4. 18 Sargısız Beton Davranışı....53
Şekil 4. 19 Beton Özelliklerinin Tanımlanması....55
Şekil 4. 20 FRP Katmanları....57
Şekil 4. 21 Eleman Sabitleri Menüsü....59
Şekil 4. 22 FRP Uygulanmamış Düğüm Noktası....60
Şekil 4. 23 Modelin sonlu Elemanlara Ayrılması....61
Şekil 4. 24 Modelin sonlu elemana bölünmüş görünümü....61
Şekil 4. 25 Köşe Kolon Sarım Detayları....63
Şekil 4. 26 Kenar Kolon Sarım Detayları....64
Şekil 4. 27 Orta Kolon Sarım Detayları....64
Şekil 4. 28 Boyuna FRP Plakaları....65
Şekil 4. 29 Köşeli Plakalar....65
Şekil 4. 30 Kıvrımlı Plakalar....66
Şekil 4. 31 Enine Plakalar....66
Şekil 4. 32 FRP uygulanmış düğüm noktası....67
Şekil 4. 33 FRP Uygulanmış Modelin Genel Görünümü....67

Şekil 5. 1 Kolon alt yüzeylerinin mesnetlenmesi.....69
Şekil 5. 2 Deney Numunesi Çelik Çerçeveler.....70
Şekil 5. 3 ANSYS modeli kenar mesnetler.....70
Şekil 5. 4 Tez Konusu Model.....71
Şekil 5.5 Yük Uygulama Plakası…….72
Şekil 5.6 Deney Düzeneği……...72
Şekil 5.7 Çözüm opsiyonları……... 73
Şekil 5.8 Çözüm Opsiyonları Penceresi…… 74
Şekil 5.9 Tek Bir Kolonun Modeli …….75
Şekil 5.10 Tek Bir Kolona Yük Uygulanması ……76
Şekil 5.11 Kolon Yük Deplasman Eğrisi ……77
Şekil 5.12 FRP Uygulanmış Kolon Modeli ……77
Şekil 5.13 FRP Uygulanmış Kolon Yük Deplasman Eğrisi ……...78
Şekil 5.14 Yük Deplasman Eğrilerinin Karşılaştırılması ……...78
Şekil 5.15 Tek Kolon Deplasman Grafiği ……..79
Şekil 5.16 FRP Uygulanmış Tek Kolon Gerilme Grafiği ……...79
Şekil 5.17 Düğüm Noktası Modeli …….80
Şekil 5.18 Düğüm Noktası Yük Deplasman Eğrisi ……80
Şekil 5.19 FRP Uygulanmış Düğüm Noktası Yük Deplasman Eğrisi ……81
Şekil 5.20 Düğüm Noktası Yük Deplasman Eğrilerinin Karşılaştırılması……..81
Şekil 5.21 Düğüm Noktası Deplasman Grafikleri ……..81
Şekil 5.22 Tek Bir Kolon Deneyi Çizimi ……...82
Şekil 5.23 Tek Bir Kolon Deneyi Modeli ……..83
Şekil 5.24 Tek Bir Kolon Model Yük Deplasman Eğrisi ……..83
Şekil 5.25 Tek Bir Kolon Deney Yük Deplasman Eğrisi ……..84
Şekil 5.26 Tek Bir Kolon Deneyi Model Deplasman Grafikleri ……85
Şekil 5.27 Tez Konusu Model Yükleme Adımları …….86
Şekil 5.28 Tez Konusu Model Çözüm Opsiyonları ……86
Şekil 5.29 Tez Konusu Model Çözüm Opsiyonları ……87
Şekil 5.30 Tez Konusu Model Düğüm Noktası Gerilme Grafikleri ……...87
Şekil 6.1 Tez Konusu Model Deney Verileri …….91
Şekil 6.2 Tez Konusu Model Analitik Yük Deplasman Grafiği ……92

Şekil 6.3 Tez Konusu Model Deneysel ve Analitik Yük Deplasman Grafiği Karşılaştırması……..92
Şekil 6.4 Üçüncü Yükleme Adımı Çatlak Oluşumu……....93
Şekil 6.5 On ikinci Yükleme Adımı Çatlak Oluşumu…….93
Şekil 6.6 Son Yükleme Adımı Çatlak Oluşumu……..94
Şekil 6.7 Son Yükleme Adımı Çatlak Oluşumu……..94

1.BÖLÜM

GİRİŞ

Son yıllarda dünyada ve ülkemizde meydana gelen depremlerde ciddi can ve mal kayıpları yaşanmıştır. Depremlerin önceden tahmini ile ilgili bugünkü yaklaşımlar ve bulgular, depremlerin önceden bilinemeyeceğini ortaya koymaktadır**.** Bu anlamda inşaat mühendisleri olarak üzerinde durulması gereken nokta, meydana gelecek olan depremde yapının davranış felsefesidir. 2007 Deprem yönetmeliği, "*Depreme dayanıklı yapı tasarımında temel amaç, hafif şiddetteki depremlerde binalardaki yapısal ve yapısal olmayan sistem elemanlarının herhangi bir hasar görmemesi, orta şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda oluşabilecek hasarın onarılabilecek düzeyde kalması, şiddetli depremlerde ise can kaybını önlemek amacıyla binaların kısmen veya tamamen göçmesinin önlenmesidir."* ilkesini benimsemiştir [1]**.**

17 Ağustos 1999 Marmara depremi, depreme dayanıklı yapı tasarımının ve mevcut yapılarımızın güçlendirilmesi gerekliliğinin ne kadar önemli olduğunu acı bir tablo ile ortaya koymuştur. Ülkemizde depreme karşı dayanıklı yapı tasarımında, performansa dayalı tasarım gittikçe önem kazanmakta, gerçekçi ve daha güvenilir sonuçlar ortaya koymaktadır. Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler de inşaat mühendisliğinde lineer olmayan yöntemlerin kullanımını artırmaktadır. Lineer olmayan yöntemler ile yapıda önemli enerji yutma kapasitesine sahip olan plastik mafsallar, gerçeğe yakın bir şekilde modellenebilmektedir. Bu durum yapının deprem sırasındaki davranışını daha sağlıklı bir şekilde ortaya koymaktadır. Büyük bir kısmı deprem kuşağında bulunan ülkemizde, yapıların deprem davranışlarını daha sağlıklı belirleyerek gerekli önlemlerin alınması, ülke ekonomisi ve insan hayatı için önem taşımaktadır.

Performansa dayalı tasarım kavramı ilk olarak 1998 deprem yönetmeliğinde yer almıştır. Son 10 yıl içerisinde depreme dayanıklı yapı tasarımı ilkelerinde, deprem kuvvetlerinin elemanlara sağlıklı bir şekilde dağıtılması esasına dayalı tasarımından,

performansa dayalı tasarıma doğru bir geçiş yaşanmaktadır [2]**.** Bu kapsamda güçlendirme esaslarını bulundurmayan 1998 deprem yönetmeliği, ihtiyaç olmasından dolayı mevcut ve güçlendirilecek binalar için analiz esaslarını barındıran 2007 deprem yönetmeliği şeklinde revize edilmiştir. 2007 Deprem yönetmeliğinin 7. Bölümünde, yapı elemanlarının kapasitesi ve yapının deplasman sınırlarına göre, doğrusal olmayan hesap yöntemleri sonucunda performans düzeyi değerlendirilmesi için önemli açıklamalar verilmiştir.

Deprem yönetmeliğinde, doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin amacı, "*verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme istemleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet istemlerinin hesaplanmasıdır*" şeklinde belirtilmiştir. Daha sonra bu büyüklüklerin yönetmelik de tanımlanan şekil değiştirme ve iç kuvvet kapasiteleri ile karşılaştırılarak, kesit ve bina düzeyinde yapısal performans değerlendirilmesi yapılması tanımlanmıştır. Bu bağlamda pushover analizi (statik-itme analizi) olarak bilinen yöntem kullanılmaya başlanmıştır. Bu analiz yöntemiyle yapıda hasar sonrası gerçeğe yakın davranış ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Günümüzde yapıların performans düzeylerinin belirlenmesi ile birlikte ciddi oranda zayıf yapı stoku olduğu için mevcut yapıların güçlendirilmesi de söz konusu olmuştur. Bu nedenle deprem yönetmeliği, yeni projelendirilecek binalar dışında, mevcut binaların deprem güvenliğinin incelenmesi ve güçlendirilmesi konularını da kapsamaktadır. Yönetmelikle birlikte güçlendirme yöntemleri, mevcut binaların güçlendirilmesinde daha etkin ve güvenilir bir şekilde uygulanacaktır [3].

Güçlendirilmiş yapıların pushover eğrilerinin çıkarılması konusunda birçok deneysel çalışma olmasına rağmen, analitik çalışmalar sınırlı düzeyde kalmıştır. Bu tez çalışması kapsamında incelenecek olan lifli polimerlerle güçlendirilmiş yapıların kapasite eğrisinin çıkarılması, bilinen inşaat mühendisliği paket programlarıyla oldukça zor olduğundan, sonlu elemanlar metoduna dayalı ANSYS paket programı ile yapılacaktır. Son yıllarda bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle sonlu elemanlar yönteminin kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Özellikle inşaat mühendisliğinde beton davranışının tahmini açısından yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Sonlu elemanlar metoduyla, beton ve betonarme için en doğru modeller kurulmaya çalışılmaktadır. Literatürde sonlu elemanlar metoduyla genellikle tek bir kiriş ya da kolon elemanları üzerinde çalışılmış

ve bu elemanların davranışları ortaya konulmuştur. Bu tez çalışmasında ise üç boyutlu bir modelin sonlu elemanlar metoduyla analizi gerçekleştirilecektir. Böylece tez çalışması ile bu metodun gerçek yapılarda uygulanabilirliği araştırılmış olmaktadır. Bu analizler, sonlu elemanlar metodunu kullanan ANSYS versiyon 11 programı ile yapılacaktır. ANSYS paket programı, kompozit elemanların modellenmesinde de kolaylık sağlamaktadır. Fakat modelleme sırasındaki bütün datalar çözümün süresini ve işlem hacmini etkilediği için, bu verilerin doğru bir şekilde belirlenip tanımlanması gerekmektedir. Bu nedenle ANSYS paket programında doğru modeli oluşturup, en az işlem hacmiyle sonuca ulaşmak için, ANSYS paket programının kullanıldığı beton ve donatı modelleri, kırılma hipotezleri, beton ve donatı için girilmesi gereken datalar, hem literatürden hem de ANSYS kullanma kılavuzlarından incelenmiştir. Ansys programında bir çok denemeler yapılmış sonra tez konusu modele geçilmiştir.

Çalışma kapsamında incelenecek olan güçlendirilmiş yapının kapasite eğrisi ile devam eden bir çalışmanın deney sonuçları karşılaştırılacaktır. Analitik ve deneysel değerlerin yakın olması durumunda, lifli polimerlerle güçlendirilmiş yapıların davranışı, sarım teknikleri üzerinde deney yapmadan ve sadece model üzerinden incelenmesi ile mümkün olabilecektir. Bu şekilde maliyetli ve uzun zaman alan deneyler önceden modellenebilecektir. Ayrıca FRP malzemesinin sünekliğe olan etkisi incelenmiş olacaktır.

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Tez çalışmasında aşağıdaki başlıklar üzerine yoğunlaşılmıştır:

- Betonarme sistemlerin doğrusal olmayan davranışı, statik itme analizinin incelenmesi,
- Betonarmede Sonlu Elemanlar Yönteminin kullanımı,
- ANSYS paket programında betonarme modeli,
- ANSYS paket programı ile FRP uygulanmamış modelin oluşturulması,
- ANSYS paket programı ile FRP uygulanmış modelin oluşturulması,
- Modelden ve farklı örneklerden kuvvet- deplasman eğrilerinin elde edilmesi,
- Sonuçların devam eden bir çalışmanın deneysel verileri ile kıyaslanması.

1.2 Literatür taraması

FRP oranının betonarme kiriş güçlendirmesi etkisi üzerine yapılan bir çalışmada, kullanılan betonarme kiriş numuneleri basit eğilme etkisi altında deneye tabi tutulmuştur. Sonuçta, FRP oranındaki artış kirişlerin rijitlik ve nihai yük kapasitesini artırmıştır. Ayrıca, FRP oranındaki artışla birlikte kırılma mekanizması FRP kopmasından yapışma bölgesinde sıyrılmaya dönüşmüştür [4].

Diğer bir çalışma, betonarme kirişlerin Karbon FRP ile güçlendirilmesi ile ilgili analitik ve deneysel çalışmayı kapsamaktadır[5]. CFRP (karbon esaslı lifli polimer) liflerinin çatlaklara dik olarak yerleştirilmesi durumunda mukavemette ve rijitlikte çok büyük artış sağlanmış ve CFRP uçlarındaki gerilme yığılmalarından dolayı beton ezilmiş ve gevrek kırılma olmuştur. CFRP liflerinin çatlaklara dik olmaması durumunda mukavemette ve rijitlikte daha az artış olmuş ancak, sünek bir davranış gözlenmiştir. Çalışma kapsamında CFRP plakalarının kiriş taşıma gücünü ve rijitliğini önemli oranda arttırdığı ispatlanmıştır [5].

Başka bir çalışmada, dört noktadan monotonik olarak yüklenen 150x250 mm kesit alanına sahip bir kiriş deneyinin analitik çalışması yapılmıştır [6]. Çalışmada, sonlu elemanlar metodunu kullanan ANSYS paket programı kullanılmıştır. Deneysel veriler ile analitik datalar arasında yapılan karşılaştırma neticesinde, analitik sonuçların deneysel sonuçlara yaklaştığını ve farklılıklara nelerin sebep olabileceği belirtilmiştir [6].

Yine betonarme kirişlerle ilgili bir çalışmada, ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılarak alt yüzeyine ve diğer tüm yüzeylere FRP uygulanarak güçlendirilen betonarme kiriş modellerinin, maksimum yükleme kapasitesindeki doğrusal olmayan davranışı irdelenmiştir [7]. Sayısal analizler için gerçek davranış modelleri bilgisayar ortamına adapte edilmiştir. Bu çalışma için kısa ve uzun kiriş modelleri hazırlanmış ve içerisindeki donatı oranı yüksek ve düşük olarak farklı modeller dizayn edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda, FRP kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin maksimum eğilme dayanımlarının oldukça arttığı belirlenmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, güçlendirilmiş kirişin üniform yayılı yükler altındaki doğrusal olmayan

davranışına kiriş uzunluğu, kiriş içindeki donatı oranı ve fiber dokusu özelliklerinin etkisinin irdelenmiştir [7].

Kolonlarla ilgili bir çalışmada, kare kesitli mantolanmış bir kolon üzerinde deneysel ve analitik çalışma yapılmıştır [8]. Model ANSYS programında hazırlanmış ve sonuçları deneysel datalarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların birbirine çok yakın değerler verdiği, fakat deney elemanının sonlu elemandan elde edilen modele göre daha rijit ve daha sünek bir davranış gösterdiği belirtilmiştir [8].

FRP ile onarılmış kolonlar üzerindeki diğer bir araştırmada, FRP plakalarının kalınlığı, yönü ve rijitliği ile birlikte, FRP ve betonun arasındaki yapışmanın etkileri dairesel bir kolon üzerinde ANSYS sonlu elemanlar paket programı yardımıyla incelenmiştir [9]. Betonarme modeli olarak ANSYS programında hazır bulunan Solid65 kullanılmıştır. Donatılar dağınık (smeared) şekilde modellenmiştir. FRP malzemesi de Shell99 eleman tipi kullanılarak modellenmiştir. Silindir kolonun alt yüzeyindeki bütün noktaların dönmesi ve ötelenmesi önlenmiştir. Kolonun üst yüzeyinden artan basınç kuvvetiyle analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları deneysel sonuçlarla kıyaslanmış ve yakın değerler elde edilmiştir [9].

Kolon-kiriş bölgesinde, cam, karbon ve kevlar esaslı üç tip FRP malzemesi ile güçlendirilmiş bir çalışmada deney ve analitik çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma 3 kolon kiriş birleşim bölgesi üzerinde yapılmıştır [10]. Birleşim bölgelerinden biri kontrol numunesi olarak oluşturulmuş diğer ikisine de FRP uygulanmıştır. FRP birleşim bölgeleri üzerine enine ve boyuna bonded olarak tanımlanmıştır. Çalışmada FRP için farklı kalınlık kombinezonları da kullanılmıştır. Analizler ANSYS 5.0 sonlu elemanlar programında yapılmıştır. Sonuç olarak, FRP uygulanmış numuneler ile kontrol numunesi arasında donatıdaki çekme gerilmesi, boyuna ve enine FRP de oluşan çekme ve kayma gerilme değerleri kıyaslanmıştır [10].

Düğüm noktası ile ilgili diğer bir çalışmada, karbon lifli polimerlerin, deprem yüklerine göre tasarlanmamış ve orta veya yüksek derecede hasar görmüş betonarme köşe kolon-kiriş bağlantılarının güçlendirilmesindeki etkinliğini inceleyen deneysel bir çalışmanın sonuçlarını kapsamaktadır [11]. 1970 öncesinin tipik malzeme ve detaylandırma

eksiklikleri kullanılarak tasarlanmış iki adet tam-ölçekli kolon-kiriş-döşeme bağlantı örneği tersinir-tekrarlanır çift eksenli yüklemeye tabi tutulmuştur. Hasarlı deney elemanları, epoksi enjeksiyonu, kolon iç köşesinde paspayı içine bir donatı eklenmesi ve tek yönlü bir karbon-epoksi sisteminden türetilmiş çok katmanlı lifli polimerlerin dıştan yapıştırılması ve yerinde ısı kürüne tabi tutulması yöntemleriyle güçlendirilip tekrar test edilmiştir. Deney sonuçları, kolon donatısındaki akmanın, bağlantıdaki kesme göçmesinin ve kiriş alt donatısındaki ankraj kaybının onarım öncesi davranışa hakim olduğunu, ancak yüksek hasarlı bir köşe bağlantısının bile sünek bir kiriş mekanizmasıyla göçecek ve her iki asal eksende eşzamanlı uygulanmış %3.7 oranına kadar kat ötelenmesine dayanacak şekilde iyileştirilebileceğini göstermiştir. Geliştirilen güçlendirme yönteminin hem orta hem yüksek hasar derecelerinde eşit derecede etkili olabileceği de belirtilmiştir [11].

Çerçevede FRP uygulaması ile ilgili bir çalışmada, çerçeve içerisinde yer alan tuğla bölme duvarlara çapraz karbon FRP'ler yerleştirilerek yapıların güçlendirilmesi ile ilgili analitik çalışmalar yapılmıştır [12]. FRP'ler çerçeve içerisinde çekme ve basınç elemanları olarak modellenmiş ve yapılan analitik çalışmalar daha önce yapılan deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta, FRP ile bölme duvar güçlendirmesinin sistem güçlendirmesinde hızlı ve pratik bir yöntem olduğu ve Türkiye gibi yapı stoku zayıf ve ivedi olarak iyileştirilmesi geren ülkeler için uygun olduğu vurgulanmıştır [12].

Yapı sistemi ile ilgili bir çalışmada, Güney Avrupa'da yakın tarihe kadar inşa edilmekte olan tipik bir yapı, deneysel çalışmalarda referans alınmıştır [13]. Yapı geleneksel eski yapı özelliklerinden olan planda düzensizlik, zayıf detaylandırma, düşük düşey donatı oranı, yetersiz sargılama, zayıf düğüm noktalarına sahip eski yapım tekniğine uygun olarak inşa edilmiştir. 1954-1995 yılları arasında yürürlükte kalan Yunan Standardına göre dizayn edilen üç katlı ve tam ölçekli yapı pseudo-dinamik olarak deneye tabi tutulduktan sonra cam FRP ile güçlendirilmiştir. Güçlendirme sonunda yapı sünekliği ve enerji sönümlemesi artmış, kat ötelenme kapasiteleri %50 civarında fazlalaşmıştır. Deneyde o tarihe kadar yapılan deneylerden farklı olarak yapıya burulma da verilmiş ve deneyler sonucunda iyileştirme ile yapı burulma kapasitesinin arttığı da ortaya konulmuştur [13].

FRP ile güçlendirilmiş betonarme kiriş elemanların gevrek kırılma modları üzerinde yapılan analitik ve deneysel bir çalışmada, betonun nasıl çatladığı, yapıştırıcı davranışı, plakaların uzunluğu, genişliği ve kırılma mekanizmasına etkileri incelenmiştir. Makalede FRP plakalarının betonarme elemanların iç yüzeylerine yapıştırılmasının, elemanın nihai taşıma kapasitesini artırmak için çok etkili olduğu fakat dıştan yapıştırılmış plakaların elemanda süneklik kaybına yol açtığı belirtilmiştir. Analitik çalışma MERLİN Sonlu elemanlar programında gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak güçlendirilmiş kirişlerin yük taşıma kapasiteleri artmıştır. Fakat bütün güçlendirilmiş numunelerde açıklık ortasında CFRP şeritlerinin sıyrılmasından dolayı gevrek davranış ortaya çıkmıştır. Ayrıca FRP plakasının genişliği ile FRP beton arasındaki sıyrılmaya etkisinin olduğu belirtilmiştir [14].

ANSYS programında bir köprünün taşıma kapasitesinin yetersiz olduğu kirişlerde yapılan FRP uygulaması modellenmiştir. Köprünün güçlendirmesi eğilmeye ve kesmeye karşı yapılmıştır. ANSYS programında beton için Solid 65, FRP için Solid 46 kullanılmıştır. Donatı ayrık olarak tanımlanmış ve Link8 eleman tipi seçilmiştir. Kirişlerdeki enine donatının modellenmesi için sargılı beton davranışı kullanılmıştır. Sonuç olarak deneysel verilerle sonlu elemanlar modeli arasında uyum tespit edilmiştir [15].

Yapılan bir diğer çalışmada ANSYS programını kullanarak FRP malzemesinin kirişlerde kesme dayanımına olan etkisi araştırılmıştır. Makalede FRP ile güçlendirilmiş yapılar üzerinde yapılan deneylerin davranışı anlama adına çok önemli olduğu fakat bu davranışın modellenebilmesiyle daha az maliyetle davranışın anlaşılabileceği belirtilmiştir. Çalışma beton için Solid 65, donatı için link8 ve FRP malzemesi için Shell43 elemanı kullanılmıştır. Yükleme noktalarında bu tez çalışmasında modellendiği gibi Solid 45 eleman tipine sahip olan plakalar konulmuştur. Sonuç olarak ANSYS programının tasarımda güvenle kullanılabileceği, deneysel verilerle uyumun olduğu, betonda önemli çatlaklar oluşuncaya kadar FRP malzemesinin çalıştığı sonuçları çıkarılmıştır [16].

Köprü ayaklarında kullanılan ortası boşluklu betonarme elemanları temsil eden bir model üzerinde test yapmışlardır. Modeli ayrıca ANSYS sonlu elemanlar paket programında oluşturarak deneysel çalışma için kalibrasyon yapmışlardır. Sonuç olarak

deneysel ve analitik çalışma neticesinde elemanın gerilme- şekil değiştirme eğrileri arasında iyi bir ilişki elde etmişlerdir [17].

FRP plakalarının özelliklerini tahmin etmek için bir çalışmada FRP plakalarının heterojen ve anizotropik yapılarından dolayı kompleks malzemeler olduğu belirtilmiştir. Makalede cam, aramit ve grafit esaslı üç tip FRP malzemesi ANSYS paket programında modellenerek bu malzemelerin mekanik özellikleri elde edilmiştir [18].

FRP malzemesinin kesmeye karşı güçlendirmede etkili olan parametrelerinin incelendiği diğer bir çalışmada ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. Sayısal bir metodun kullanılmasının daha düşük maliyetlerle bu davranışın daha iyi anlaşılmasını sağlayabileceği belirtilmiştir. Çalışmada deneysel verileri mevcut bulunan bir kiriş modellenmiştir. Sonuç olarak değerlerin çok uyumlu olduğu grafiksel olarak verilmiştir [19].

FRP laminatlarla güçlendirilmiş bir betonarme birleşim bölgesi üzerinde 7 farklı model üzerinde ANSYS sonlu elemanlar paket programında analizler yapılmıştır. Bu modellerden biri kontrol numunesi olarak seçilmiş, sonuç olarak FRP plakalarla güçlendirilmiş modellerde eğilme kapasitesinin arttığı gözlenmiştir. Kiriş-kolon bağlantısındaki FRP kompozitlerden L şekilli kaplamalar, ilave olarak FRP laminatlarla kolonun enine sarımı ve kirişin altındaki U şekilli kaplamalar, betonarme birleşim bölgelerindeki esneklik ve güç artırımı için çok iyi güçlendirme stratejileri olduğu sonucu çıkarılmıştır [20].

FRP plakaları ile güçlendirilmiş bir model üzerinde analizler yapmışlardır. Modellemede ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. Analiz sonucu elde edilen eğriler , davranışın deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğunu göstermektedir. Bütün kirişler için sonlu elemanlar modeli, doğrusal alandaki gerçek kirişten daha rijittir. Birkaç faktör sonlu elemanlar modellerinde daha fazla rijitliğe neden olabilir. Beton ve çelik arasındaki bağın, sonlu eleman modelinde mükemmel (hatasız) olduğu varsayılır. Fakat, gerçek kirişler için varsayımının doğru olmayacağı çünkü kusurların oluşabileceği sonucu çıkarılmıştır [21].

2. BÖLÜM

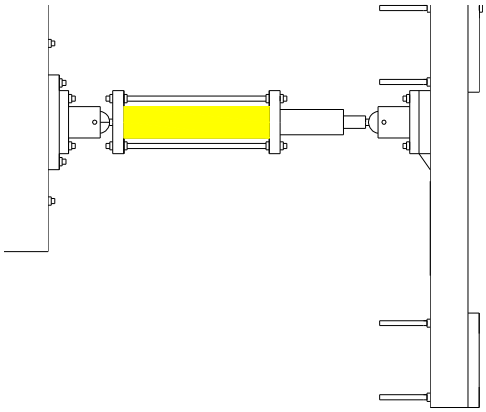
ANALİTİK ÇALIŞMASI YAPILAN DENEY NUMUNESİ

Tez çalışması kapsamında analitik olarak incelenen deney numunesinin dataları, Erciyes Üniversitesi Deprem Araştırma Laboratuarında yapılan ve devam eden bir çalışmadan alınmıştır. Çalışmada üç boyutlu, üç katlı, iki açıklıklı, 1/3 geometrik ölçeğe sahip çerçevelerden oluşan betonarme referans yapı ve bu yapının lifli polimerler ile güçlendirilmiş hali, deprem yüklerini benzeştiren yanal yüke maruz bırakılmıştır [22]. Betonarme numune ülkemizdeki zayıf yapı stoku özelliklerini barındıracak şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle, deney numunesinin tasarım ve yapımında, aşağıda detayları verilen zayıflıklar esas alınarak,

- Düşük beton kalitesi,
- Düz yüzeyli donatı kullanılması,
- Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde etriye sıklaştırılmasının olmaması,
- Kolon-kiriş birleşim bölgesinde kiriş yüksekliğince kolon etriyesinin bulunmaması,
- Kolon boyuna donatılarında kat seviyesinde ve temel düzeyinde bindirmeli ek yapılması (40ϕ),
- Kiriş donatısında yetersiz kenetlenme,
- Kancaların 90° yapılması,
- Güçlü kolon-zayıf kiriş ilkesine uyulmaması,

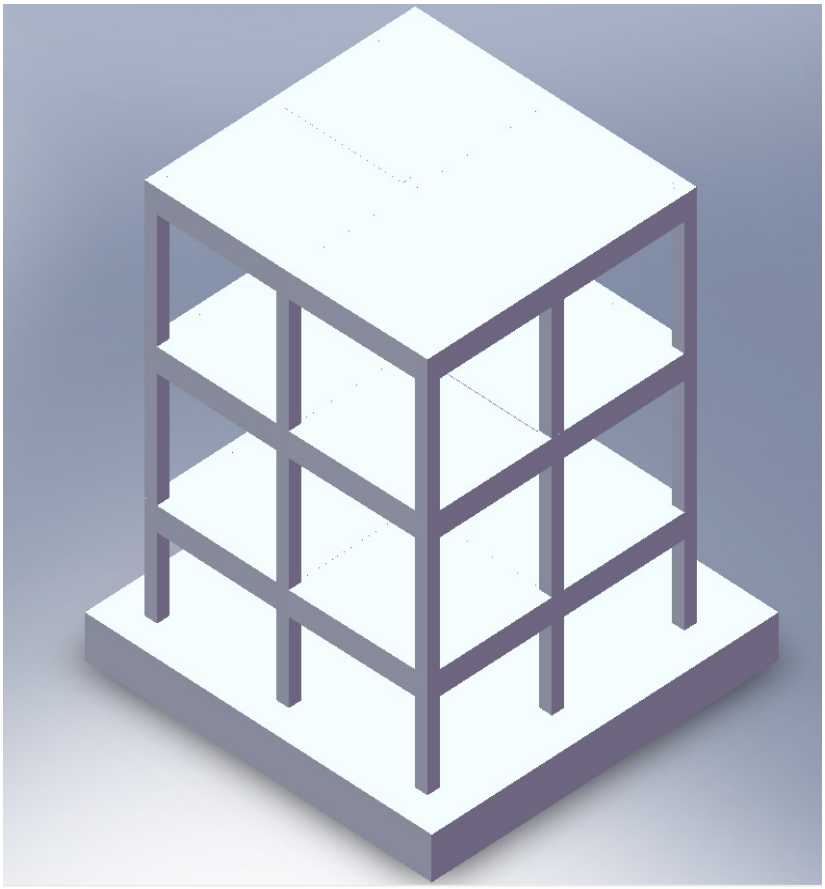
numune imal edilmiştir. Deneysel sonuçları kullanılan araştırma projesindeki 3 katlı model yapı birinci aşamada, güçlendirme yapılmadan test edilmiş ve göçmenin önlenmesi durumu hasar seviyesine gelecek şekilde hasara görmüştür. İkinci aşamada ise, göçmenin önlenmesi durumu hasar seviyesine kadar hasarlı yapı lifli polimerler ile güçlendirilmiştir. Deneyler laboratuarda bulunan rijit deney platformu üzerinde

gerçekleştirilmiş ve yatay yükler kuvvetli duvara mesnetli hidrolik kriko vasıtasıyla uygulanmıştır.(Şekil 2.1 a)



Şekil 2. 1.a. Yükleme Düzeneği.

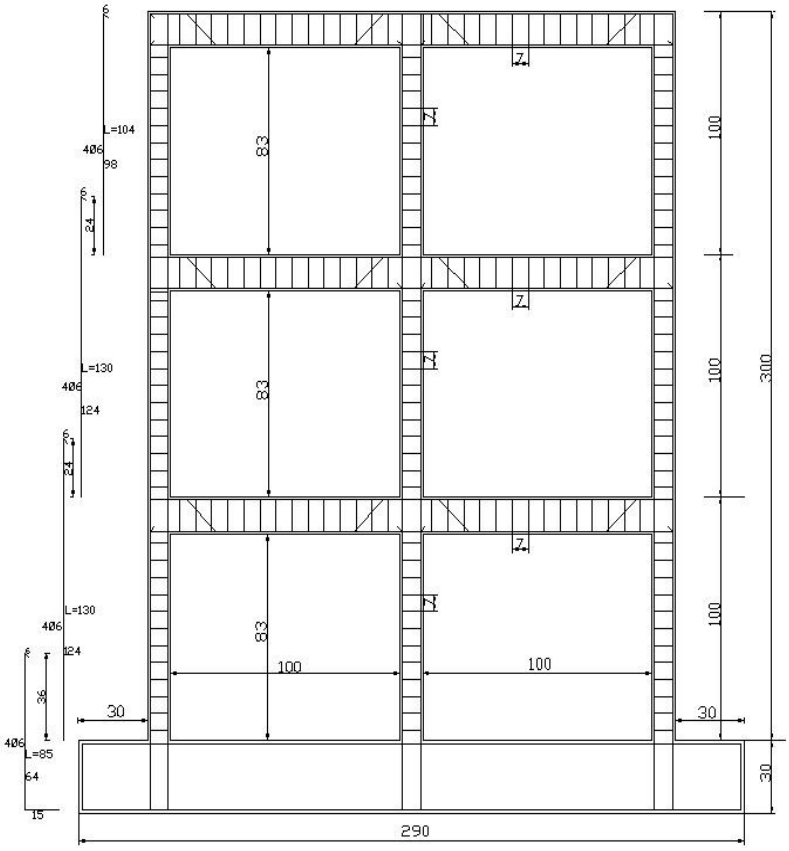
Gerekli rijitlik ve ankastre mesnet şartlarının sağlanması için radye temel tipi seçilmiştir. Bu temel deney elemanı için rijit ve ankastre mesnet şartlarını olabildiğince sağlayabilecek şekilde boyutlandırılmış ve donatılandırılmıştır. Deney dataları datalogger yardımıyla 17 noktadan, 0.5 s. de bir data olacak şekilde alınmıştır. Sistemin model görünümü üç boyutlu olarak Şekil 2.1b de verilmiştir.



Şekil 2. 1.b. Deney numunesi.

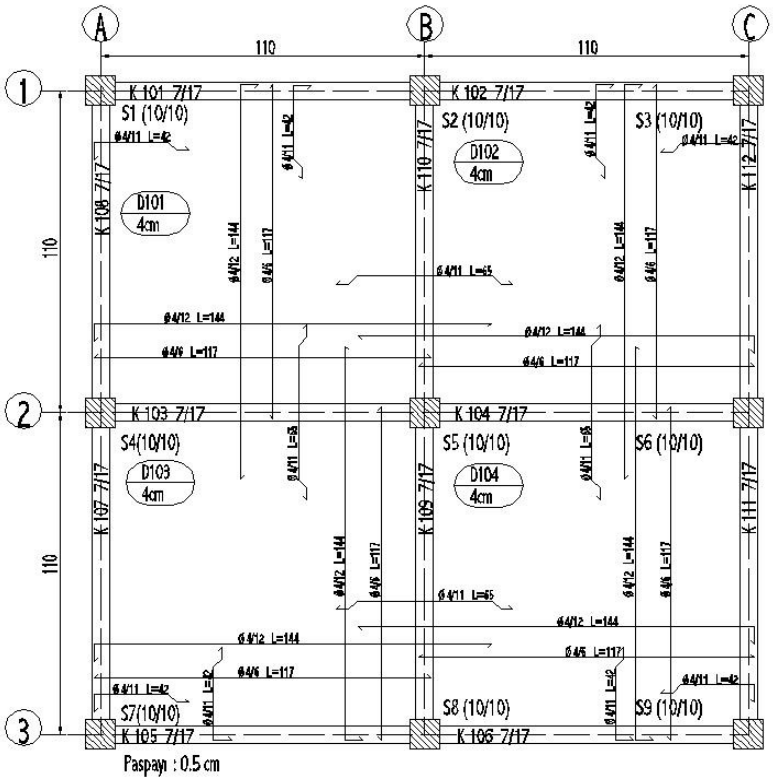
2.1 Deney Numunesi Detayları

Deney numunesi boyutlarının büyük olması nedeniyle 3 katlı bir binanın karşılığı olması amacıyla 1/3 ölçeği kullanılmıştır. Kat yükseklikleri 1000 mm olarak seçilmiştir. Seçilen geometrik ölçek betonarme döşeme, kiriş ve kolon elemanla için geçerlidir. Ayrıca, belirtilen ölçek değerleri sistemin üretiminde kullanılan malzeme özelliklerine de yansıtılmıştır. Özellikle donatı çapları ve agrega boyutlarında da 1/3 ölçeklemesi özellikle sağlanmıştır. Betonarme kolon boyutları 100 mmx100 mm olarak, betonarme kiriş boyutları da 70mmx170mm olarak seçilmiştir. Üretilen ve hasara maruz bırakılan numunenin kolon boyuna ve enine donatıları ile kiriş boyuna ve enine donatıları aşağıda Şekil 2.2 de verilmiştir.



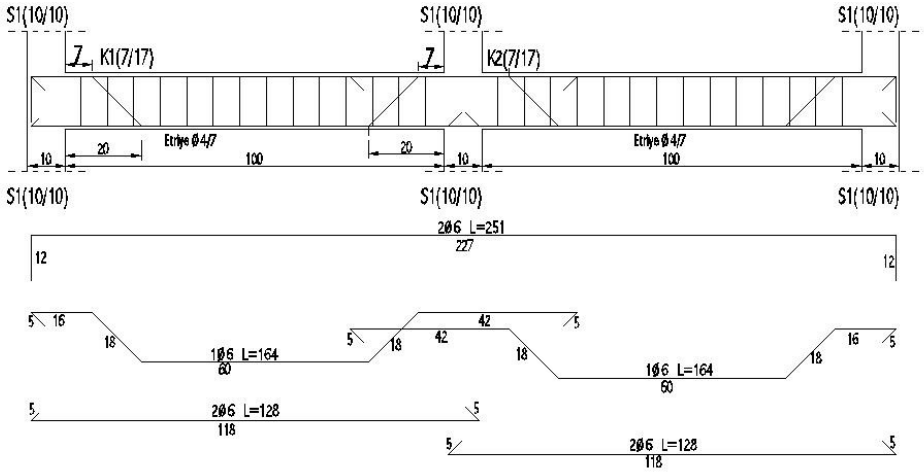
Şekil 2. 2. Deney numunesi.

Betonarme döşeme boyutları ve döşeme donatı kırım ile adetleri de aşağıda Şekil 2.3 de verilmiştir. Döşeme boyutları 40 mm ve paspayı değerleri de 5 mm olarak seçilmiştir.



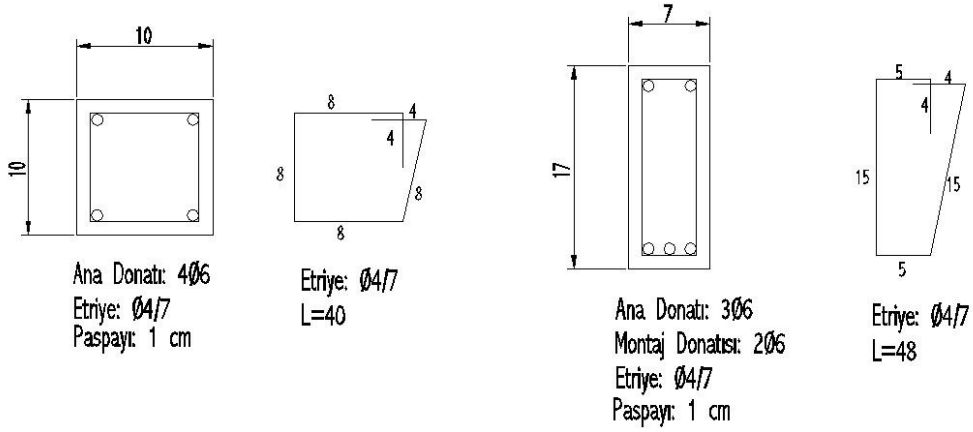
Şekil 2. 3 Deney numunesi plan görünümü[22].

Betonarme kirişlerin tasarımında mevcut yapılardaki kusuru bulunduran detaylar dikkate alınmıştır. Bu amaçla özelikle kolon-kiriş düğüm noktalarında etriye sıklaştırması yapılmamıştır. Bu bölge etriyeleri açıklık ortası etriyeleri ile aynı aralık ve çapta seçilmiştir. Betonarme kolonlarda da benzer şekilde kiriş-kolon düğüm noktasında etriye sıklaştırması yapılamamıştır. Sadece kolon orta bölgesi etriye çap ve aralığı sıklaştırma bölgesinde de devam ettirilmiştir. Aşağıda Şekil 2.4 de betonarme kiriş boyut ve donatı açılımları verilmiştir.



Şekil 2. 4 Deney numunesi kiriş açılımı [22].

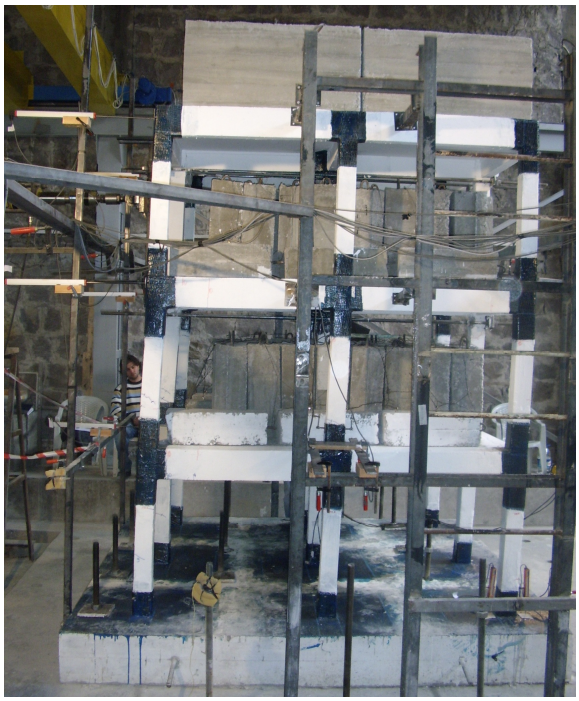
Benzer kusurları bulunduracak şekilde, betonarme kolon ve kiriş etriyeleri için kancalar 135^0 yerine 90^0 olarak yapılmıştır. Aşağıda Şekil 2.5 de betonarme kolon ve kirişe ait enine ve boyuna donatı çap ve adetleri ile paspayları verilmiştir.



Şekil 2. 5 Deney numunesi kolon en kesitleri [22].

Deney numunesinin beton dayanım sınıfı C15 olarak belirlenmiş, donatı olarak da $\phi 6$ çapında boyuna donatılarda akma dayanımı 622 MPa, çekme dayanımı 690 MPa olan nervürsüz donatı kullanılmıştır. Etriyeler ise $\phi 4$ çapında akma dayanımı 580 MPa, çekme dayanımı 600 MPa olan donatılar kullanılmıştır.

Bu veriler doğrultusunda üretilen üç katlı 1/3 ölçeğindeki model yapının genel görünümü aşağıda Şekil 2.6 de verilmiştir.

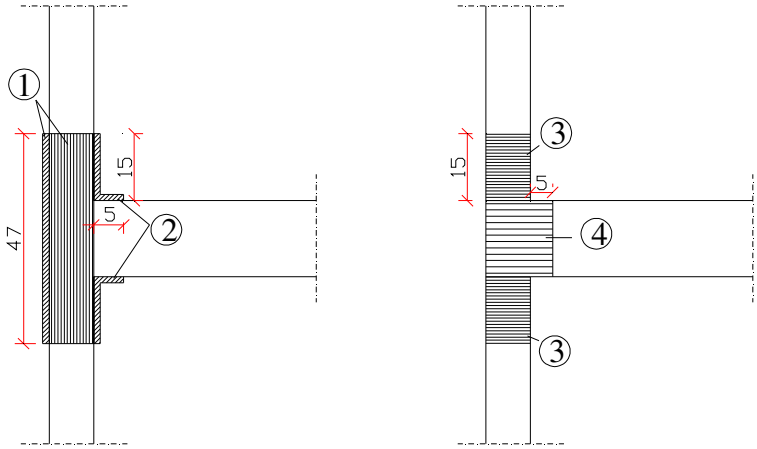


Şekil 2. 6 Modellenecek yapının genel görünümü[22].

2.2 Lifli Polimerlerle Güçlendirilmiş Numune Sarım Detayları

Lifli polimerlerin uygulanması düğüm noktalarında gerçekleştirilmiştir. Bu FRP sargısı kenar (Şekil 2.7) ve orta düğüm (Şekil 2.8) noktalarında ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

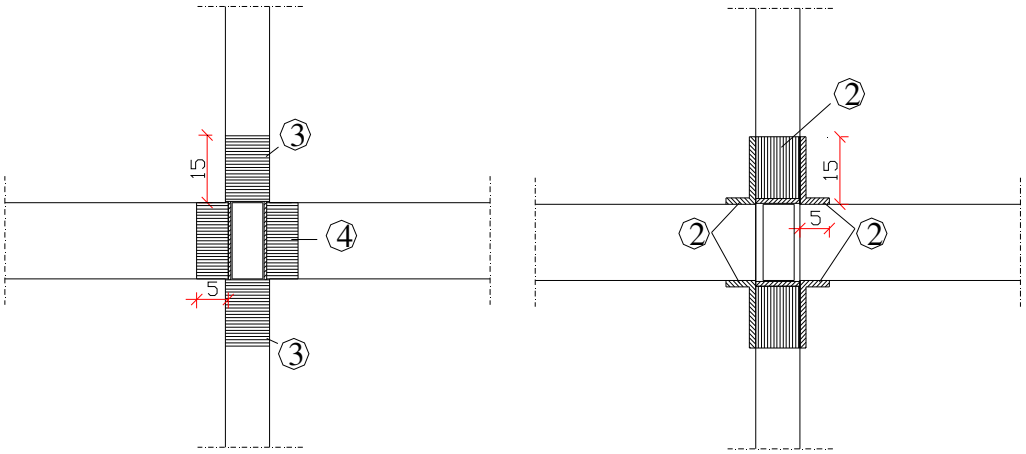
Kenar Kolonlarda Sarım Detayı



Boyuna FRP Sarım Enine FRP Sarım

Şekil 2. 7 Kenar kolon sarım detayı [22].

Orta Kolonlarda Sarım Detayı



Enine FRP Sarım Boyuna FRP Sarım

Şekil 2. 8 Orta kolon sarım detayı.[22].

Lifli polimerler hasarlı model yapı da bütün düğüm noktalarında uygulanmıştır. Deneyleri yapılmış olduğu model yapının genel görünümü Şekil 2.9 de verilmiştir. Ayrıca şekilde yapılan FRP güçlendirmesi de verilmiştir.



Şekil 2. 9 Deney numunesi genel görünümü[22].

Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş deney sonuçlarında, 1. ve 2. katlarda 2.4 ton, 3. katta ise 2.77 ton yükler konularak deneylerin yapıldığı belirtilmiştir. ANSYS paket programında modelleme yapılırken bu yük değerleri dikkate alınmıştır.

3.BÖLÜM

BETONARMENİN NONLİNEER DAVRANIŞI ve STATİK İTME ANALİZİ

3.1 Betonarmenin Nonlineer Davranışı

Betonarme gibi, elastik ve doğrusal olmayan, gerilmeleri zamana ve yük geçmişine bağlı bir malzemenin davranışını hesaplara yansıtmak kolay değildir. Çünkü, davranışı etkileyen tüm değişkenleri hesapta göz önünde bulundurmak, işlemleri son derece karmaşık duruma getirerek, pratik olmaktan çıkaracaktır. Bu nedenle betonarme ile ilgili hesaplamalarda, daha az önemli olan değişkenler ihmal edilir, diğerleri için de basitleştirici birçok varsayımlar yapılarak hesapların kolaylaştırılmasına çalışılır. Bazı değişkenler ihmal edilip, diğerleri basitleştirilerek hesaba katılırken en büyük tehlike, analiz sonucunda elde edilen davranışın, gerçek davranıştan tamamen uzaklaşma olasılığıdır [23].

Gerçek davranıştan uzaklaşmak da yapının deprem esnasında sanıldığının aksine farklı bir tepki vereceği anlamına gelmektedir. Bu da sistemin çökmesi gibi istenmeyen sonuçlara neden olabilmektedir. Bu nedenle betonarmenin gerçek davranışını elde etmenin önemi acı tecrübelerle anlaşılmıştır. 2007 deprem yönetmeliğiylede bu davranışı elde etmek zorunlu hale gelmiştir. Artık yapısal çözümlemede dayanıma göre tasarımdan şekil değiştirmeye göre tasarıma geçiş yaşanmaktadır.

Günümüz yapı mühendisliğinde genellikle uygulanmakta olan ve doğrusal teoriye göre sistem analizine dayanan tasarım yaklaşımlarında (güvenlik gerilmeleri esasına göre tasarım ve tasıma gücü yöntemine göre tasarım), yapı sisteminin doğrusal olmayan davranışı çeşitli şekillerde göz önüne alınmaya çalışılmaktadır. Örneğin, ikinci mertebe etkilerini hesaba katmak ve burkulmaya karşı güvenlik sağlamak amacıyla, moment büyütme yönteminden ve burkulma katsayılarından yararlanılmakta, doğrusal olmayan şekil değiştirmeler nedeniyle iç kuvvet dağılımının değişmesi yeniden dağılım ilkesi

yardımı ile göz önüne alınmaya çalışılmaktadır. Diğer taraftan, deprem etkilerine göre hesapta malzemenin doğrusal-elastik sınır ötesindeki davranışını hesaba katmak üzere, taşıyıcı sistem davranış katsayısı tanımlanmakta ve elastik deprem yükleri bu katsayıya bağlı olan bir deprem yükü azaltma katsayısı ile bölünerek küçültülmektedir [24].

Sonuç olarak, doğrusal analiz yönteminde çok fazla katsayılar kullanılmakta, bu katsayıların doğru kullanılması da mühendisin tecrübesi ile orantılı olmaktadır. Yanlış kullanılan katsayılar ile yapı güvenlikten ve ekonomiden uzaklaşabilmektedir. Yapıların doğrusal sınır ötesindeki kapasitelerini dikkate almak ile hem daha güvenilir hem de ekonomik çözümler geliştirilmesi doğru katsayı seçimleri ile ancak mümkün olabilmektedir.

Doğrusal davranışı esas alan çözümlemelerde yer değiştirmelerin çok küçük olduğu varsayılmaktadır. Fakat şiddetli deprem kuvvetleri yapıyı doğrusal davranışın ötesinde zorlamaktadır. Deprem etkilerinde yapıda elastik sınırın ötesinde ciddi deplasmanlar oluşmaktadır. Yapının, depremin talep ettiği bu kuvveti karşılayıp karşılayamayacağını tespit etmek için, betonarmenin doğrusal olmayan davranışını da ortaya koymak bir zorunluluk olarak karşımıza çıkmaktadır.

Deprem kuvveti yapıda dinamik bir etki oluşturur. Doğrusal olmayan davranışı temel alan çözümleme yöntemlerinde, yapıda bu etkinin plastik deformasyon oluşumu ile karşılanacağı esas alınmaktadır. Yapı plastik deformasyon yaparak enerjiyi sönümleyebilecektir. Fakat yapıda hasar oluşumunun da bir sınırı olmalıdır. 2007 deprem yönetmeliğimizde farklı performans düzeyleri için göreli kat ötelemeleri sınırları verilmiştir. Yani bina enerjiyi sönümleyene kadar deformasyon yapacak fakat göçmeden ayakta kalabilecektir. Yapının göçmeden plastik deformasyon yapabilmesi, sünekliği ile yani elastik sınır ötesinde dayanımda önemli bir azalma olmadan deplasman yapabilme yeteneğiyle yakından ilgilidir.

Depremde meydana gelen yapısal hasarların, yönetmeliklerin öngördüğü yükler altında elemanların mevcut dayanım kapasitelerinin aşılması ile değil, sünek davranması öngörülen yapı elemanlarının şekil değiştirme kapasitelerinin aşılması sonucu olduğu bilinmektedir [25]. Bu nedenle yapıların deprem performanslarının belirlenmesinde ya

da yeni yapıların analizinde performansa (şekil değiştirmeye) dayalı analiz önem kazanmıştır.

3.2 Süneklik ve Plastik Mafsalın Tanımı

Süneklik ani kırılma olmaksızın ilk akma noktasının ötesinde şekil değiştirme yapabilme kabiliyetidir [26]. Sayısal olarak süneklik yapı elemanlarının güç tükenmesi anındaki şekil değiştirmelerinin elastik şekil değiştirmelere oranı olarak tarif edilmektedir. (Eşitlik 3.1)

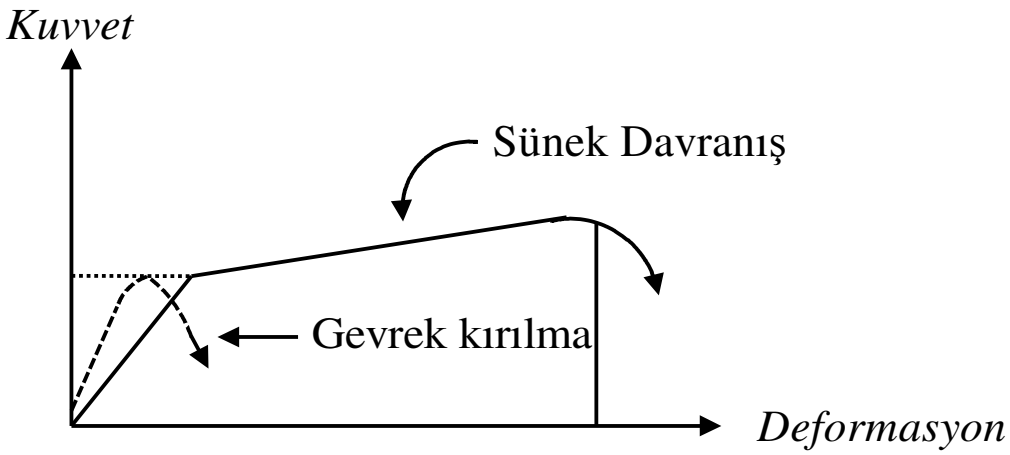
$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \tag{3.1}$$

Yapının ve zeminin özelliklerinden dolayı, deprem etkisi ile ortaya çıkan enerji, yapılarda değişik türden sönümlerle azalır. Bu sönümler, yapının rijitliği, geometrik boyutları ve kullanılan malzemenin yanında depremin büyüklüğü ile de ilgilidir [27].

Betonarme elemanların elastik enerji tüketme güçleri kısıtlıdır. Plastik enerji tüketme gücü ise malzeme kalitesi ve donatı detaylarına bağlı olarak artabilmektedir. Plastik deplasman ve plastik enerji tüketimi söz konusu olunca süneklik ön plana çıkmaktadır [25].

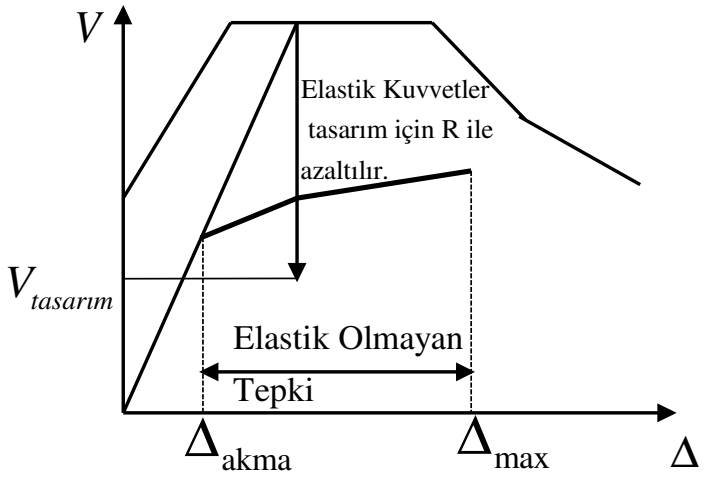
Süneklik malzeme, kesit ve taşıyıcı sistem sünekliği bakımından üçe ayrılır. Malzeme sünekliği malzemenin şekil değiştirme yeteneğidir. Yani malzemenin ($\sigma - \varepsilon$) eğrisi etkendir. Betonarme kiriş, kolon yada perdelerin sünekliği eğrilik cinsinden ifade edilir. Bu nedenle eleman için süneklik incelendiğinde ($M - \phi$) eğrisi önemlidir. Taşıyıcı sistem açısından süneklik ise ötelenme cinsinden ifade edilmektedir.

Taşıyıcı sistem açısından süneklik sismik taleplere karşı yapı kapasitesinin bir ölçütüdür. Yani yapı kendisinden beklenen performansı gösterebilmesi için yeterli sünekliğe sahip olmalıdır. Bir yapının elastik olmayan kapasitesi o yapının deprem enerjilerini sönümleme kabiliyetinin bir ölçüsüdür [26]. Bir yapı sünekse, deprem ile yapıya iletilen enerjinin büyük bir kısmı elastik sınırın ötesindeki büyük genlikli titreşimlerle, yapının dayanımı önemli bir kayba uğramadan yutulur [28]. Aşağıda Şekil 3.1 de sünek ve gevrek davranış grafiksel olarak ifade edilmiştir [28].



Şekil 3. 1. Gevrek ve sünek davranış [26].

Deprem etkisinde yapılarda elastik ötesi davranışın göz önüne alınması için elastik deprem kuvvetleri R (Yapı Tipi Davranış Katsayısı) katsayısı ile azaltılır. Bu azaltma değeri yapının sünekliği ile doğrudan alakalıdır (Şekil 3.2). Deprem yapı sisteminden dayanım değil süneklik talep etmektedir. Yapının Sünek davranıp davranmayacağı tam bilinememektedir. R katsayısı ile azaltılan dayanım karşılığında süneklik talebi söz konusudur. [23]



Şekil 3. 2. Dayanım azaltma katsayısı [23].

Geleneksel yapı analizlerinde, 2007 deprem yönetmeliğinden bina taşıyıcı sistem özelliklerine bağlı olarak bu katsayı deprem yönetmeliği Tablo 2.5'den seçilir. Bu katsayıya ve bina doğal titreşim periyoduna bağlı olarak da deprem yükü azaltma katsayısı belirlenir. Depremde binaya etki eden taban kesme kuvveti bu değere bölünerek tasarım yapılır. Sonuç tasarıma esas deprem kesme kuvveti değerinin hesap aşaması aşağıda eşitlik 3.2, 3.3 ve 3.4 de verilmiştir.

$$R_a(T) = 1.5 + (R - 1.5)\frac{T}{T_a} \qquad (0 \le T \le T_a) \qquad (3.2)$$

$$R_a(T) = R \qquad (T_a < T) \qquad (3.3)$$

$$V_t = \frac{WA(T_1)}{R_a(T_1)} \qquad (3.4)$$

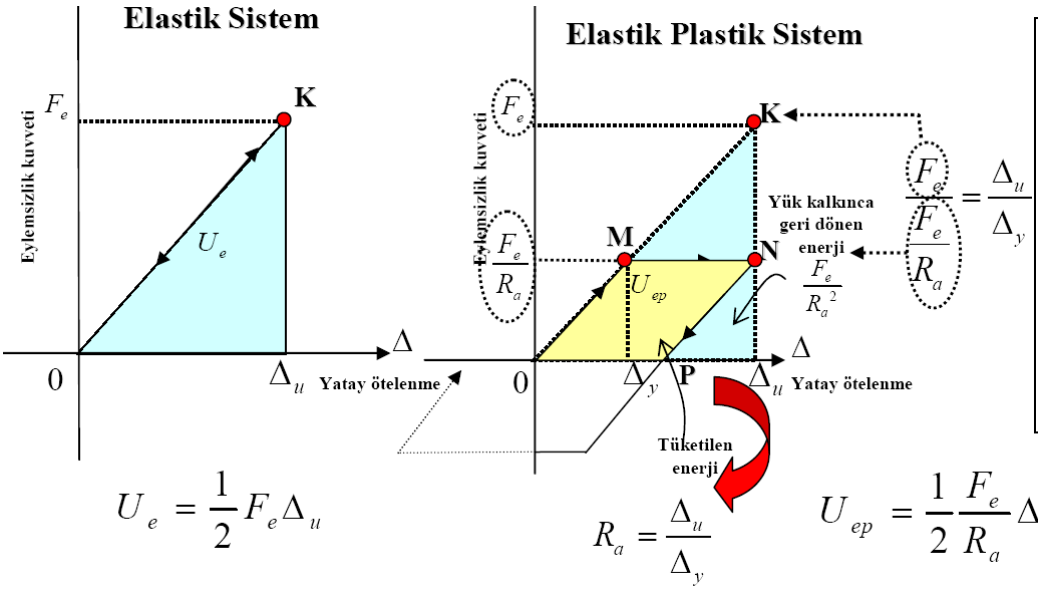
Deprem yükü azaltma katsayısı belirlenirken kullanılan iki yöntem vardır. [41]

1. Eşit Yer Değiştirme Kuralı

2. Eşit Enerji Prensibi

Deprem yükü azaltma katsayısının belirlenmesinde etkin olan yöntemlerden ilki **eşit yer değiştirme kuralıdır.** Bu kural genellikle periyodu 0,7 sn'den büyük olan sistemler için geçerlidir. Doğrusal elastik olan bir taşıyıcı sistemde, eylemsizlik kuvveti ve yatay ötelenme arasındaki ilişki de doğrusal elastiktir. Doğrusal elastik sistem şiddeti artan eylemsizlik kuvveti altında adım adım kırılma noktasına (K noktası) gelir ve kırılır. Bu durumda 0-K- Δ_u noktaları Şekil3.3 içinde tanımlanan alan elastik sistemde depolanan enerjiyi verir. [41]

Elasto plastik sistemde ise eylemsizlik kuvveti artarken M noktasında plastik mafsal oluştuğu kabul edilir Şekil 3.3. Böylece sünek olan taşıyıcı sistemin ötelenmesi mafsal oluşumundan sonra hala devam ederken eylemsizlik kuvveti sabit kalacaktır.



$$U_e = \frac{1}{2} F_e \Delta_u \qquad R_a = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \qquad U_{ep} = \frac{1}{2} \frac{F_e}{R_a} \Delta$$

Şekil 3. 3. Elastik ve elastoplastik sistemlerde eylemsizlik kuvveti-yatay ötelenme ilişkisi [41].

Her iki sistem için de maksimum ötelenme miktarını Δ_u ile gösterelim. Analitik araştırmalar aynı deprem hareketleri altında elastik ve elasto plastik sistemlerin yatay ötelenmelerinin yaklaşık eşit olduğunu gösterir. Bu davranış eşit yer değiştirme kuralıdır. [41]

Elasto plastik sistemlerde, plastik mafsalın oluştuğu bölgeye denk gelen ötelenmeye Δ_y denirse; Δ_u ile Δ_y arasındaki oran taşıyıcı sistemin **ötelenme sünekliği** olarak tanımlanır. (Eşitlik 3.5)

$$\Delta_u / \Delta_y = R_a \qquad (3.5)$$

Elasto plastik sistem kırılma konumuna geldiğinde etkiyen kuvvet, elastik sistemi kırılma konumuna getiren kuvvetten R_a kadar küçüktür. İşte bu oran deprem yükü azaltma katsayısıdır.

Doğal titreşim periyodu 0,5 sn'den küçük olan elastik sistemlerde ise eylemsizlik kuvveti-ötelenme ilişkisi altında kalan alan sistemde tüketilen enerjiyi göstermektedir. Elasto plastik sistem ise, plastik mafsal oluşumundan sonra kuvvet artmadığı halde ötelenmesi gittikçe artar. Bu artış elastik ve elasto plastik sistemdeki enerjilerin eşitlenmesine kadar devam eder. İki enerjinin eşitlendiği N noktasındaki ötelenme

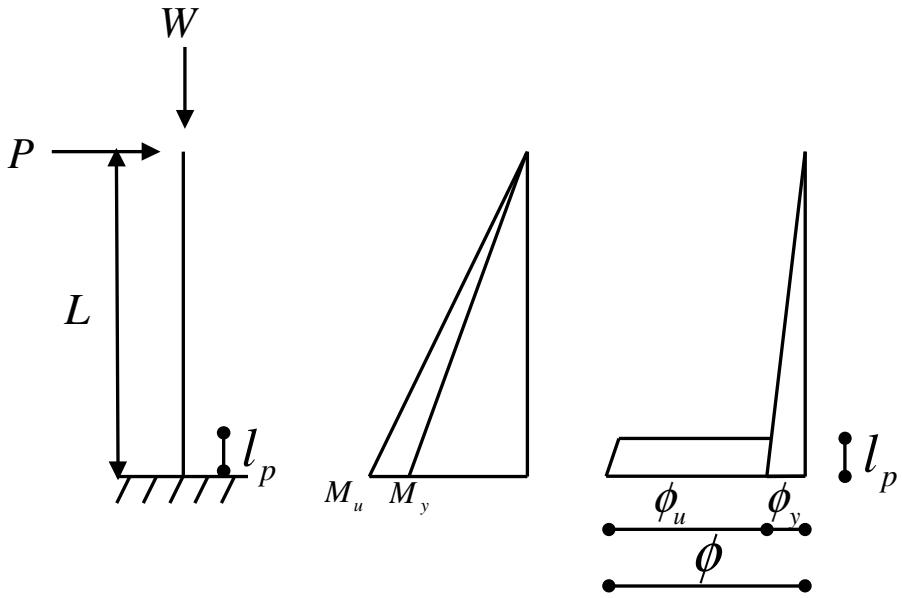
miktarı Δ_u olur. Bu kurala da **eşit enerji prensibi** denilmektedir [41].

İki enerjinin birbirine eşitlenmesinden, ötelenmeler ve deprem yükü azaltma katsayısı arasındaki ilişki bulunabilir (Eşitlik 3.6) [41].

$$\Delta_u / \Delta_y = (R^2+1)/2 \qquad (3.6)$$

Lineer olmayan hesap yöntemlerinde bu yaklaşımın yerine plastik mafsal kavramı geliştirilmiştir. Doğrusal olmayan analizlerin doğrusal analizlerden farkı elemanların sonlu kapasitelerinin dikkate alınmasıdır. Eğilme momentinin artmasıyla çekme bölgesindeki beton çatlamaktadır. Betonun çatlamasıyla lineer davranıştan nonlineer davranışa geçiş yaşanmaktadır. Doğrusal olmayan analizde elastik analizden farklı olarak elemanların belirli bir dayanım kapasitesi mevcuttur. Eleman üzerindeki yük etkileri arttıkça rijitliğinde azalma olur ve kritik bölgelerde dayanım değerine ulaştıktan sonra eleman sabit sayılabilecek yük değeri altında deformasyon yaparak enerji sönümlemeyi sürdürür. Bu durum eleman kapasitesini kaybedene kadar devam eder. Doğrusal olmayan analizdeki bu dayanım deformasyon ilişkisi "plastik mafsal" yoluyla modellenmektedir [29]. Sünek davranış gösteren yapı sistemlerinde plastik mafsal hipotezi yapılarak sistem hesapları kısaltılabilmektedir [24].

2007 Deprem yönetmeliği de, yayılı plastik davranış modelinin kullanılmasını öngörmüştür. Basit eğilme durumunda *plastik mafsal hipotez'*ine karşı gelen bu modelde, çubuk eleman olarak idealleştirilen kiriş, kolon ve perde türü taşıyıcı sistem elemanlarındaki iç kuvvetlerin plastik kapasitelerine eriştiği sonlu uzunluktaki bölgeler boyunca, plastik şekil değiştirmelerin düzgün yayılı biçimde oluştuğu varsayılmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3. 4. Konsol kolon için plastik davranış modeli [29].

l_p : Plastik mafsal boyu

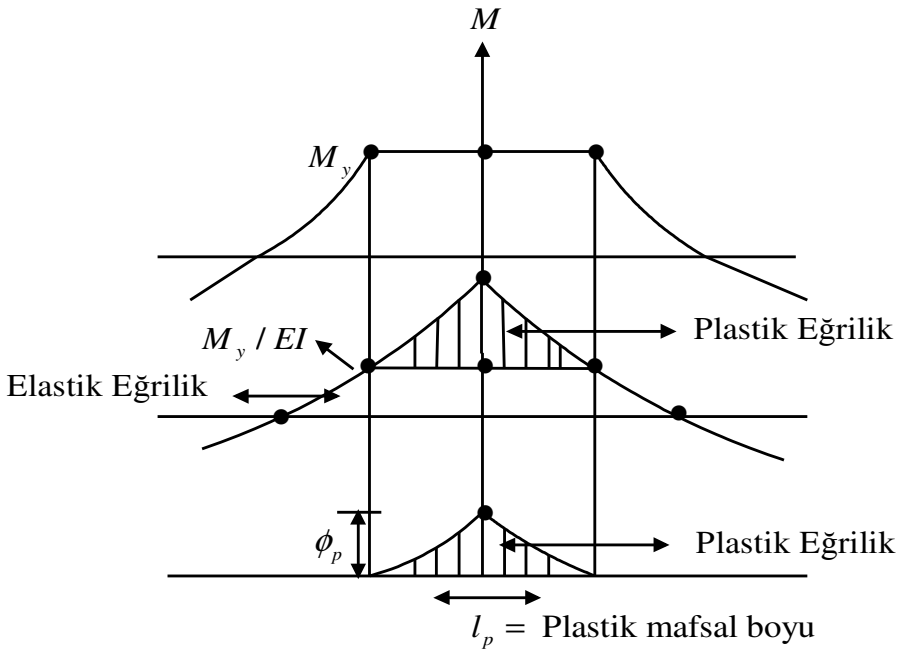
M_u : Nihai moment değeri

M_y : Akma momenti değeri

ϕ_u : Nihai eğrilik değeri

ϕ_y : Akma anındaki eğrilik değeri

Kolonlarda plastik mafsallar maksimum momentin oluştuğu bölgelere yakın yerlerde oluşmaktadır (Şekil 3.4). Kirişlerde ise eğilme momenti açıklık ve mesnetlerde büyük değerler aldığından plastik mafsallarda buralar da oluşmaktadır (Şekil 3.5) .



Şekil 3. 5. Kiriş mesnet bölgesinde plastik mafsal oluşumu [41].

Plastik mafsal boyu kesitin moment-eğrilik diyagramına, eğilme momentinin eleman boyunca değişimine, kesit boyutlarına ve elemana etkiyen normal kuvvete, beton dayanımına, plastik mafsal bölgesindeki sargı donatısına, boyuna ve enine donatının mekanik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir [30].

Farklı araştırmacılar plastik mafsal uzunluğuna ilişkin olarak bir çok formül geliştirmiştir. 2007 Deprem yönetmeliğinde plastik mafsal uzunluğu için $L_p = 0.5h$ şeklinde bir tanımlama yapılmıştır. Burada h çalışan doğrultudaki kesit boyutu olarak belirtilmiştir. Sadece eksenel kuvvet altında plastik şekil değiştirme yapan elemanların plastik şekil değiştirme bölgeleri içinde, elemanın serbest boyuna eşit uzunluğun alınması açıklaması getirilmiştir.

3.3 Doğrusal Olmayan Davranışın Nedenleri

Yapı analizleri yapılırken hesaplanan sistemlerin davranışında doğrusal olmamayı etkileyecek nedenler iyice irdelenmelidir. Yapı sistemlerinin dış etkiler altındaki doğrusallığını engelleyen çeşitli sebepler vardır. Bunlar, malzeme özelliklerinin doğrusal olmaması nedeniyle bünye denklemlerinin doğrusal olmaması ve geometri

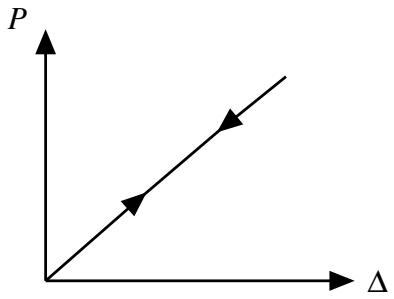
değişimlerinden kaynaklanan denge denklemlerinin doğrusal olmamasıdır [31]. Bu nedenle, sonlu elemanlar metoduyla doğru analiz yapabilmek için modelin doğrusal olmayan davranışına neden olan etkenlerin iyi tespit edilmesi gerekmektedir.

3.3.1 Malzeme Nonlineeritesi

Nonlineer analiz yöntemlerinde malzemelerin doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme eğrileri kullanılır. Malzeme davranışı lineer özellik göstermediğinden dolayı yapı sistemi de lineer özellik göstermez. Bu nedenle malzeme gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin hesaplarda kullanılabilmesi için idealleştirmeler yapılmalıdır.

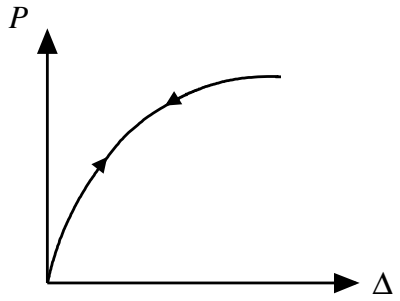
3.3.1.1 İdeal Malzeme Kabulleri

Lineer Elastik Malzeme: Yükleme boşaltma eğrilerinin çakıştığı malzemeye elastik malzeme, kuvvet-deplasman bağıntısının lineer olduğu elastik malzemeye ise lineer elastik malzeme denilir (Şekil 3.6) [32].



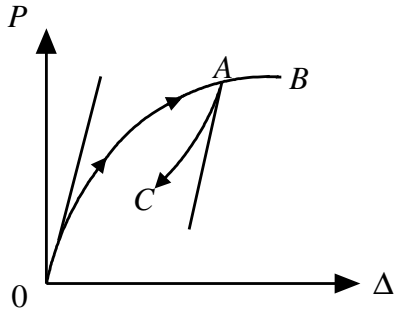
Şekil 3. 6. Lineer elastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi [32].

Nonlineer Elastik Malzeme: Yükleme boşaltma eğrileri çakışan fakat kuvvet-deplasman ilişkisi nonlineer olan malzemelerdir (Şekil 3.7) [32].



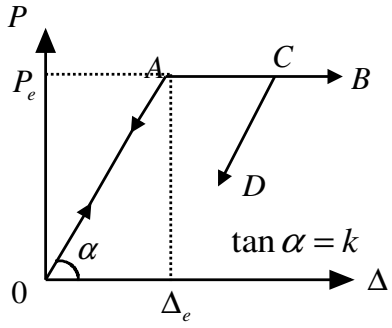
Şekil 3. 7 Lineer olmayan elastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi [32].

Elastoplastik Malzeme: Yükleme ve boşaltma eğrileri çakışmayan, fakat boşaltma eğrisinin başlangıç teğeti, yükleme eğrisinin başlangıç teğetine paralel olan malzemelerdir (Şekil 3.8) [32].



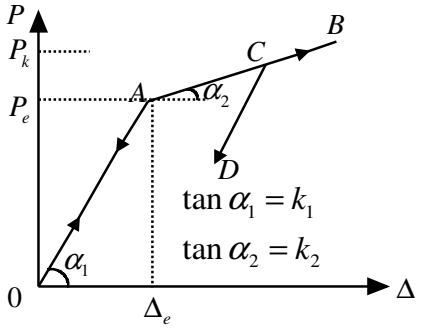
Şekil 3. 8. Elastoplastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi [32].

İdeal Elastoplastik Malzeme: Yükleme eğrisinin iki doğru parçasından meydana geldiği kabul edilmiştir. Bu doğru parçaları, elastik yük değeri P_e aşıldıktan sonra, Δ eksenine paralel olarak devam eder. Boşaltma eğrisi ise elastik şekil değiştirme değeri Δ_e' ye kadar olan kısımda yükleme eğrisi ile çakışırken, Δ_e değerini aştıktan sonra yükleme eğrisinin ilk bölümü olan OA doğrusuna paralel bir yol izler (Şekil 3.9) [32].



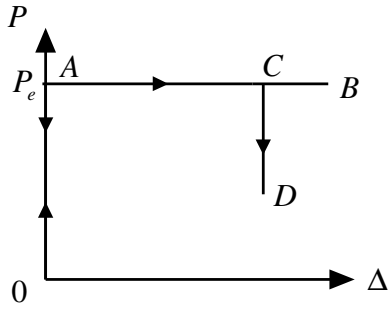
Şekil 3. 9. İdeal elastoplastik malzeme kuvvet-deplasman ilişkisi [32].

Pekleşen İdeal Elastoplastik Malzeme: İdeal elastoplastik malzemeye göre kuvvetin P_e değerini aştıktan sonrada artış gösterdiği yani pekleşmenin oluştuğu malzemelerdir (Şekil 3.10) [32].



Şekil 3. 10. Pekleşen İdeal elastoplastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi [32].

Rijit plastik malzeme: Elastik şekil değiştirmelerin olmadığı bu tür malzemelerde boşaltma eğrisi yükün P_e değerini aşmadığı durumda yükleme eğrisi ile çakışırken, P_e değerini aştıktan sonra OA doğrusuna paralel bir yol izler (Şekil 3.11) [32].



Şekil 3. 11. Rijit plastik malzeme için kuvvet-deplasman ilişkisi [32].

3.4 Beton İçin Matematiksel Modeller

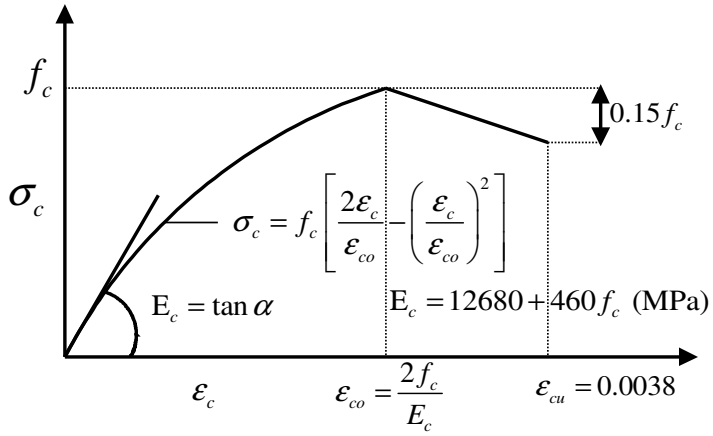
Betonun gerilme–şekil değiştirme eğrisine birçok parametre etki etmektedir. Bundan dolayı beton için tek bir gerilme–şekil değiştirme eğrisi tanımlanamaz. Bu nedenle literatürde doğrusal olmayan analiz yöntemlerinde kolaylık sağlamak amacıyla matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu modeller deneylerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri idealize edilerek oluşturulmuştur.

3.4.1 Sargısız Beton İçin Literatürde Verilen Modeller

3.4.1.1. Hognestad Modeli

Kolon ve kirişlerdeki kabuk betonun ANSYS sonlu elemanlar paket programında modellenmesinde Hognestad modeli kullanılmıştır. Çünkü bu modelle sargısız betonun matematiksel modeli çıkarılmıştır. Bu modelde ($\sigma - \varepsilon$) ilişkisi;

- 0-ε_{co} arasında ikinci dereceden bir parabol,
- $\varepsilon_{co} - \varepsilon_{cu}$ arasında ise bir doğru ile modellenmiştir. (Şekil 3.12)



Şekil 3. 12. Hognestad malzeme modelinde $\sigma - \varepsilon$ ilişkisi [33].

Şekil 3.12'den maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalma;

$$\varepsilon_{co} = 2 f_c / E_c \tag{3.7}$$

olarak ifade edilmiştir. $\varepsilon_{co} = 0.002$ değeri alınabilir. Modeldeki elastisite modülü E_c ;

$$E_c = \tan\alpha = 12680 + 460 f_c \text{ (MPa)} \tag{3.8}$$

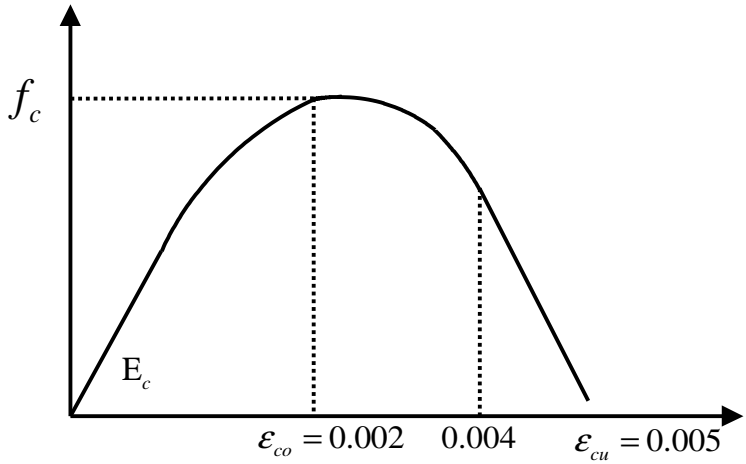
olarak tanımlanmıştır. Eğrinin birinci bölümü olan parabol, aşağıdaki denklem ile tanımlanmıştır.

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \tag{3.9}$$

Betonun maksimum birim kısalması $\varepsilon_{cu} = 0.0038$, buna karşılık gelen gerilme değeri ise 0.85 f_c olarak verilmiştir. ε_{co} ile ε_{cu} arasındaki bölgedeki gerilme değerlerini birleştiren doğru ile $\sigma - \varepsilon$ ilişkisi verilmiştir [33].

3.4.1.2. Mander Modeli

Sargılı beton için geliştirilen Mander beton modelinin sargı gerilme değerinin sıfır alınmasıyla bu modelin sargısız beton için de kullanılması mümkündür. Aşağıda Şekil 3.13'de modelin grafiksel değişimi veriliştir.



Şekil 3. 13. Sargısız Beton için mander modeli [30].

Şekil 3.13'de verilen modelin denklemi ise aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_c = \frac{f_c.x.r}{r-1+x^r} \qquad \varepsilon_c \le 2\varepsilon_{co} \tag{3.10}$$

$$\sigma_c = f_c\left(\frac{2.r}{r-1+2^r}\right)\left(1-\frac{\varepsilon_c - 2\varepsilon_{co}}{\varepsilon_{cu} - 2\varepsilon_{co}}\right) \qquad 2\varepsilon_{co} \le \varepsilon_c \le \varepsilon_{cu} \tag{3.12}$$

$$\sigma_c = 0 \qquad \varepsilon_c > \varepsilon_{cu} \tag{3.13}$$

$$X=\varepsilon_c / \varepsilon_{co} \tag{3.14}$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{\sec}} \tag{3.15}$$

$$E_{sec} = f_c / \varepsilon_{co} \tag{3.16}$$

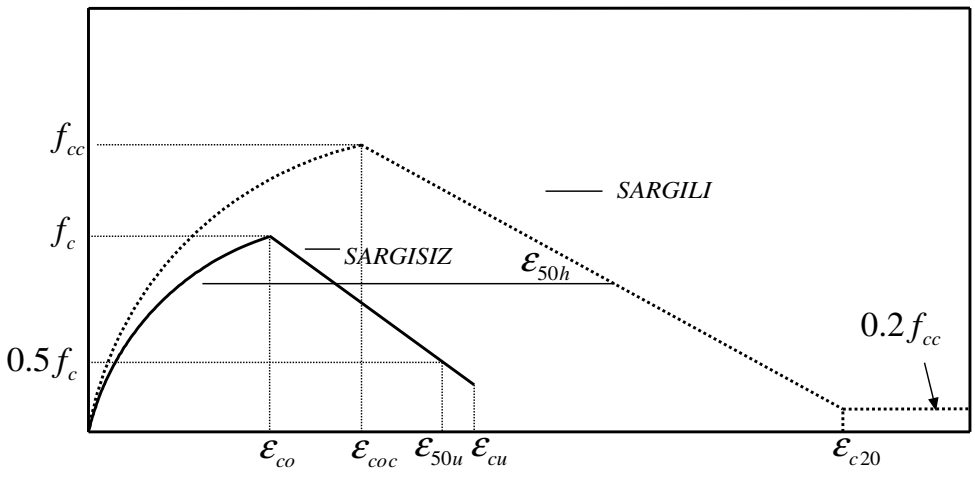
$$E_c = 5000\sqrt{f_c} \tag{3.17}$$

Burada E_{sec} = kesit modülü olup diğer parametreler bir önceki bölümde tanımlanmıştır. Sargısız beton davranışında Mander modeli için $\varepsilon_{co=}0.002$ ve $\varepsilon_{cu=}0.005$ olarak alınır [30].

3.4.2 Sargılı Beton için Literatürde Verilen Modeller

3.4.2.1 Geliştirilmiş Kent ve Park Modeli

Geliştirilmiş Kent ve Park modelinde sargılı ve sargısız beton için iki ayrı ($\sigma-\varepsilon$) eğrisi tanımlanmıştır. Bu modelde sargıdan dolayı dayanım arttığı varsayılmıştır. Sargı nedeniyle beton dayanımı f_c' den f_{cc}' ye, maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalmanın ise ε_{co}' dan ε_{coc}' ye yükseldiği varsayılmaktadır. Gerek sargılı, gerekse sargısız beton için önerilen eğrilerin ilk bölümleri ikinci dereceden bir parabol iken, eğrilerin ikinci bölümleri gerilmenin azaldığını gösteren lineer çizgilerden meydana gelmektedir. Aşağıda Şekil 3.14 de modelin grafiksel gösterimi verilmiştir [33].



Şekil 3. 14. Geliştirilmiş Kent ve Park malzeme modelinde ($\sigma-\varepsilon$) ilişkisi [33].

Geliştirilmiş Kent ve Park modelinde ($\sigma-\varepsilon$) eğrilerini tanımlayan denklemler:

Parabolik Eğri Bölgesi:

- Sargısız beton için:

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \tag{3.18}$$

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

- Sargılı beton için:

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{coc}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{coc}} \right)^2 \right] \tag{3.19}$$

$$\varepsilon_{coc} = K.\varepsilon_{co}$$

Doğrusal Bölge:

- Sargısız beton için: (3.20)

$$\sigma_c = f_c \left[1 - Z_u (\varepsilon_c - \varepsilon_{co} \right]$$

$$Z_u = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} - \varepsilon_{co}}$$

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

- Sargılı beton için: (3.21)

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{wk}}{f_c}$$

$$\sigma_c = f_{cc}\left[1 - Z_c(\varepsilon_c - \varepsilon_{coc}\right] \geq 0.2 f_{cc}$$

$$Z_c = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - \varepsilon_{coc}}$$

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

$$\rho_s = \frac{A_0 x l_s}{s x b_k x h_k}$$

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

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

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

ε_{co} : Sargısız betonda maksimum gerilme altındaki birim deformasyo. Genelde $\varepsilon_{co} = 0.002$ alınır.

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

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

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

ρ_s : Sargı donatısının hacimsel oranı

A_0 : Sargı donatısı kesit alanı (mm^2)

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

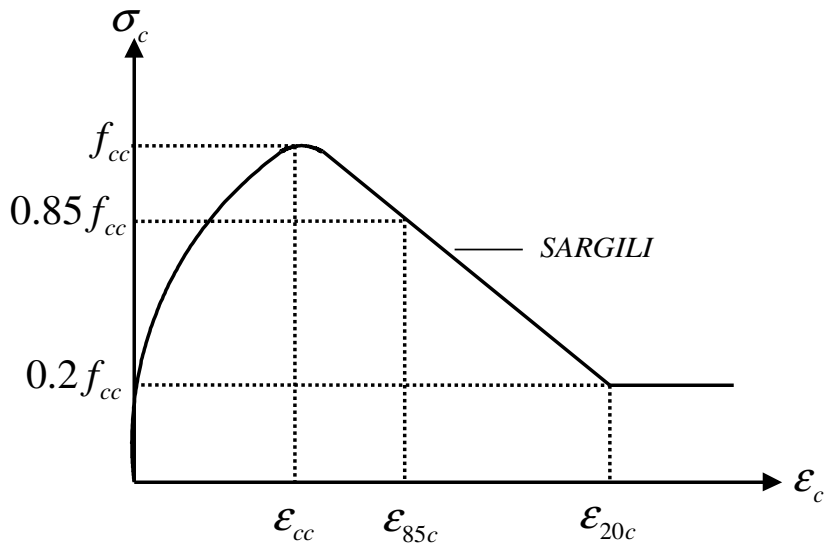
f_{ywk} : Sargı donatısının minumum akma dayanımı (MPa)

s : Sargı donatısının aralığı (mm)

Bu tez çalışmasında ANSYS programında modelleme yapılırken işlem hacmini en aza indirmek için kolon etriyeleri modellenmemiş, sargılı betonlar için yaygın olarak kullanılan Geliştirilmiş Kent ve Park modeli kullanılmıştır.

3.4.2.2 Saatçioğlu Ravzi modeli

1992 yılında Saatcioglu ve Ravzi tarafından önerilmiştir [30]. Enine donatı yakınında maksimuma ulaşan ve donatılar arasında azalan yanal basıncın ortalama değerinin hesaplanması esasına dayanır. Artan ilk bölüm bir parabol, düşen kol bir doğrudan oluşur (Şekil 3.15 Kent&Park ve Sheikh&Uzumeri modelleri gibi içsel sürtünme nedeniyle beton gerilme değerinin dayanımın belirli bir oranının altına düşmediği varsayılır (0.20fcc).



Şekil 3. 15. Saatçioğlu Ravzi beton modeli [27].

Model ile ilgili denklemler aşağıda özetlenmiştir [30].

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{1+2\lambda}} \qquad \varepsilon_c \le \varepsilon_{cc} \tag{3.22}$$

$$\sigma_c = f_{cc} \left[1 - \frac{0.15(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc})}{\varepsilon_{85} - \varepsilon_{cc}} \right] \qquad \varepsilon_{20} > \varepsilon_c > \varepsilon_{cc} \tag{3.23}$$

$$\sigma_c = 0.2 f_{cc}$$

$$f_{cc} = k_3 f_c + k_1 f_{1e} \tag{3.24}$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}(1 + 5\lambda)$$

$$\lambda = \frac{k_1 f_{1e}}{k_3 f_c}$$

$$k_1 = 6.7 (f_{1e})^{-0.17}$$

$$\varepsilon_{85} = 260 \rho_s \varepsilon_{cc} + \varepsilon_{o85} \tag{3.25}$$

$$f_{1e} = \frac{f_{1ex} b_x + f_{1ey} b_y}{b_x + b_y}$$

$$f_{1ex} = \beta_x f_{1x}$$
$$f_{1ey} = \beta_y f_{1y}$$

$$f_{1x} = \frac{\sum A_0 f_{sy} \sin \alpha_x}{s.b_x} \tag{3.26}$$

$$f_{1x} = \frac{\sum A_0 f_{sy} \sin \alpha_y}{s.b_y} \tag{3.27}$$

$$\beta_x = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_x}{a_x} \right) \left(\frac{b_x}{s} \right) \left(\frac{1.0}{f_{1x}} \right)} \tag{3.28}$$

$$\beta_y = 0.26\sqrt{\left(\frac{b_y}{a_y}\right)\left(\frac{b_y}{s}\right)\left(\frac{1.0}{f_{1y}}\right)} \tag{3.29}$$

f_{1e}: efektif yanal sargı basıncı

f_{1x}: X yönünde oluşan sargı basıncı

f_{1y}: Y yönünde oluşan sargı basıncı

f_{1ex}: X yönünde oluşan efektif sargı basıncı

f_{1ey}: Y yönünde oluşan efektif sargı basıncı

k_1: betonun özelliğine bağlı katsayı

k_e: sargılamanın etkinliği ile ilgili katsayı

A_0: enine donatı kesit alanı

b_x: enine donatı merkezlerinden ölçülen çekirdek betonu X'e paralel boyutu

b_y: enine donatı merkezlerinden ölçülen çekirdek betonu Y'e paralel boyutu

s : enine donatı merkezinden merkezine ölçülen etriye aralığı

$a_x : b_x$ boyunca tutulan boyuna donatılar arası mesafe

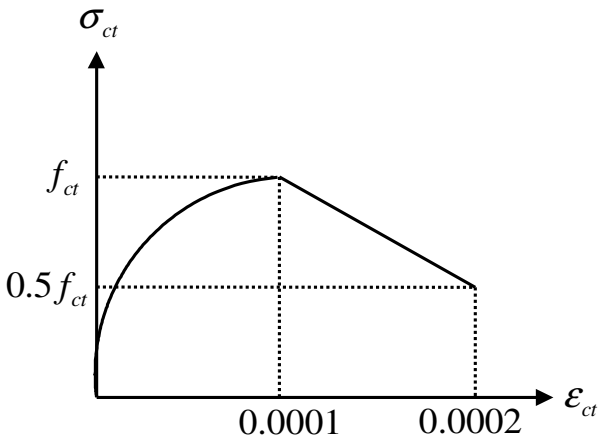
$a_y : b_y$ boyunca tutulan boyuna donatılar arası mesafe

α_x: enine donatı ve b_x arasındaki açı

α_y: enine donatı ve b_y arasındaki açı

3.5. Çekme Gerilmesi Altında Beton Modeli

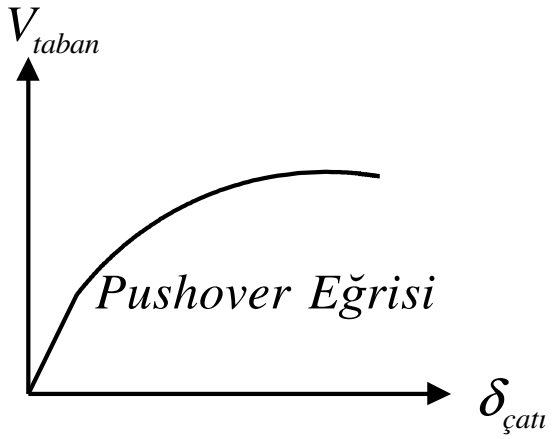
Betonun çekme gerilmesi altındaki ($\sigma - \varepsilon$) eğrisi basınç altındaki eğrisine benzemektedir. (Şekil 3.16.) Eğrinin betonun maksimum çekme gerilmesine kadar olan bölümü parabol, maksimum çekme gerilmesi ile maksimum uzama arasında ise bir doğru olarak tanımlanmıştır [35].



Şekil 3. 16. Çekme Gerilmeleri için $\sigma - \varepsilon$ ilişkisi [32].

3.6 Statik- İtme Analizi ve Yapı Performansının Belirlenmesi

Statik itme analizi (Pushover analizi) önceden belirlenmiş bir dağılıma göre, sisteme etki ettirilen yatay yüklerin adım adım arttırılması ve her adımda elde edilen iç kuvvetler, yer değiştirmeler ve plastik şekil değiştirmelerin hesaplanması olarak tanımlanabilir [25]. Bu hesaplamalar neticesinde pushover eğrisi elde edilir. Bu eğri yük etkisi altında taban kesme kuvvetlerine karşılık gelen çatı deplasman değerlerinin geometrik olarak birleştirilmesiyle elde edilen diyagramdır. Aşağıda Şekil 3.17' de genel bir pushover eğrisi verilmiştir.



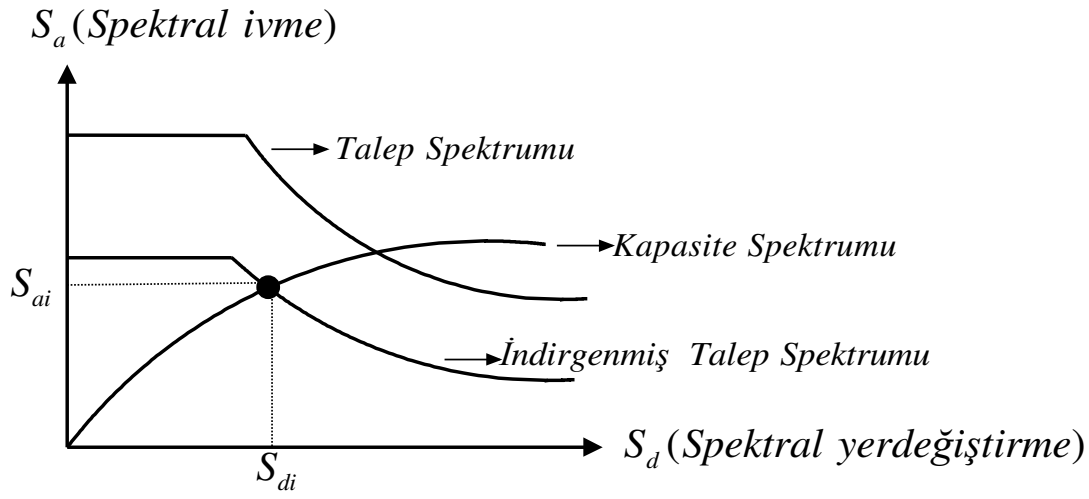
Şekil 3. 17. Pushover Eğrisi.

Pushover eğrisinin elde edilmesi performansa dayalı analizin en önemli adımıdır. Yapıların performansını belirlemek için ilk olarak Pushover eğrisinin çıkarılması gerekmektedir. Yapının pushover eğrisi çıkarıldıktan sonra literatürde performansı belirlemek için iki farklı metot geliştirilmiştir. Bunlar,

- Kapasite Spektrumu Metodu,
- Deplasman Katsayıları Metodu,

olarak verilmiştir. Performansa dayalı tasarım işlemlerinin iki önemli kavramı, talep ve kapasitedir. Tüm işlemler bu iki kavrama dayanarak yapılmaktadır. Talep, yer hareketinin bir göstergesidir. Kapasite ise, yapının sismik talebe karşılık verebilme yeteneğini ifade etmektedir. Bu durumda performans, kapasitenin talebe cevap verebilmesi ile ölçülür. Başka bir deyişle performans, söz konusu yapının olası bir depremin açabileceği hasarları, depremin etkilerini kendi bünyesinde söndürerek engelleyebilecek bir kapasiteye sahip olması gerektiği seklinde açıklanabilir [34].

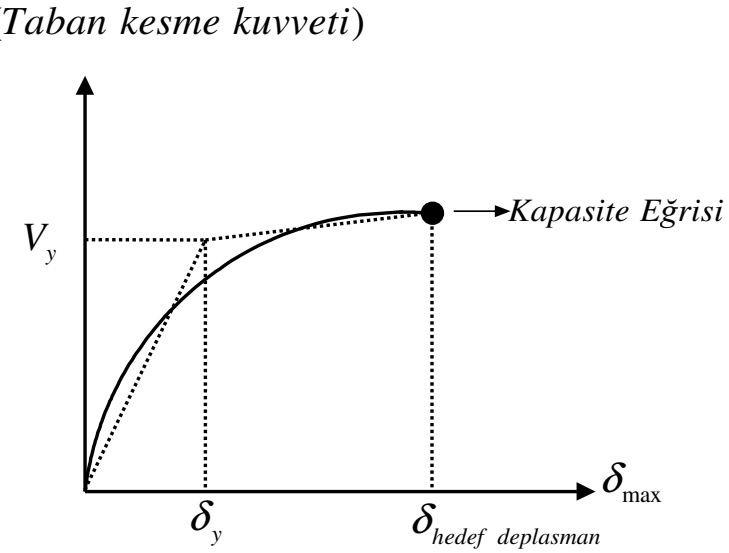
Kapasite spektrumu yönteminde, pushover eğrisi spektral formata dönüştürülür. Yapının talep spektrumu (spektral ivme)-(spektral yer değiştirme) formatına dönüştürülür; ve sönüm etkilerine bağlı olarak talep spektrumuna indirgenir. Bu indirgemeden sonra talep spektrumu ile kapasite eğrisi kesiştirilir. Yapının performans noktası bu iki eğrinin kesiştiği noktadır. Aşağıda Şekil 3.18 de verilmiştir.



Şekil 3. 18. Sprektral ivme spektral yer değiştirme diyagramı [34].

Performans noktası bağıntıları bulunduktan sonra bu noktalara karşılık gelen taban kesme kuvveti ve en üst kat yer değiştirmeleri hesap edilir. Bu değerlerin ön görülen performans seviyesini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir.

Deplasman katsayıları metodunda ise, Kapasite Spektrumu Yöntemi'ndeki gibi kapasite ve talep birbiriyle ilişkilidir. İki yöntem arasındaki temel farklılık ise deplasman katsayıları yönteminde, talep edilen yer değiştirme grafiksel değil de, doğrudan sayısal olarak belirlenmektedir. Yer değiştirme talebi sayısal olarak belirtildiğinden, kapasite eğrisi kapasite spektrumuna dönüştürülmez. Deplasman Katsayıları Yöntemi'nde, yer değiştirme talebi yapı sisteminin özelliklerine bağlı olarak belirtilmiş katsayılar kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu yöntemde önce yapının kapasite eğrisi belirlenir, yapabileceği maksimum deplasman yani hedef deplasman hesaplanır ve yapının performans noktası elde edilir [31]. Aşağıda Şekil 3.19 de verilmiştir.



Şekil 3. 19. Kapasite Eğrisi [31].

Görüldüğü üzere iki metodun uygulanabilmesi için pushover eğrisinin çıkarılması gereklidir. Bu tez çalışmasında 3 katlı deney modelinin en doğru modellenmesi yapılarak pushover (kapasite) eğrisi çıkarılmaya çalışılmıştır.

4.BÖLÜM

ANSYS SONLU ELEMANLAR PAKET PROGRAMINDA MODELLEME

4.1 Giriş

Bu tez çalışması kapsamında fiber polimerlerle güçlendirilmiş yapının modellenmesinde ANSYS v11 paket programı kullanılmıştır. Bu bölümde ANSYS paket programında betonarme bir elemanın modellenmesi ve bu modelin FRP malzemesi ile güçlendirilmesi hakkında adım adım bilgiler verilecektir.

4.2 FRP Uygulanmamış Numunenin Modellenmesi

Bu bölümde Ansys programında tez konusu olan modelin nasıl oluşturulduğu ile ilgili bilgiler verilecektir. Modelleme için ANSYS' de çeşitli seçenekler mevcuttur. Düğüm ve düğümlere bağlı elemanlardan oluşan bir sonlu eleman modeli, önce düğümlerin, sonra da elemanların oluşturulmasıyla meydana getirilmektedir. Her bir düğüm noktasına ait global koordinatlar verilerek düğüm noktaları oluşturulabileceği gibi, otomatik düğüm noktası türetme imkanı da vardır [35]. Ansys programında teze konu olan modelin tanımlanmasında izlenecek adımlar aşağıda kısaca tanımlanmıştır.

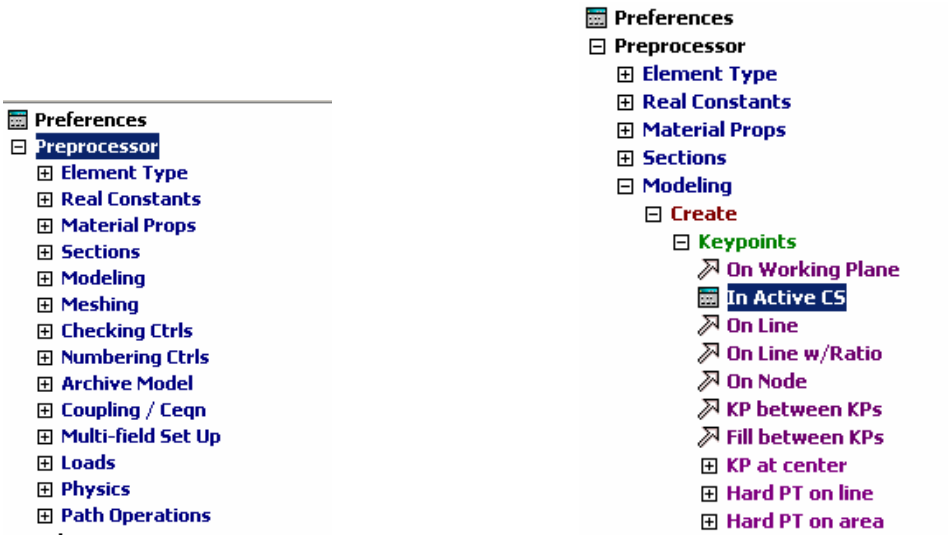
4.2.1 Preprocessing

Ansys paket programında modelin çizilmesi, malzeme özelliklerinin tanımlanması, eleman tipinin seçimi, elemanlara ait sabitlerin girilmesi, mesh işleminin yapılması ve modele yükün verilmesi bu bölümde yapılmaktadır.

4.2.1.1 Modelling

Modelin keypointlerinin, alanlarının ve hacimlerin oluşturulması, çoğaltma işleminin yapılması bu bölümün altındaki adımlar kullanılarak yapılmıştır.

Keypointlerin Oluşturulması:

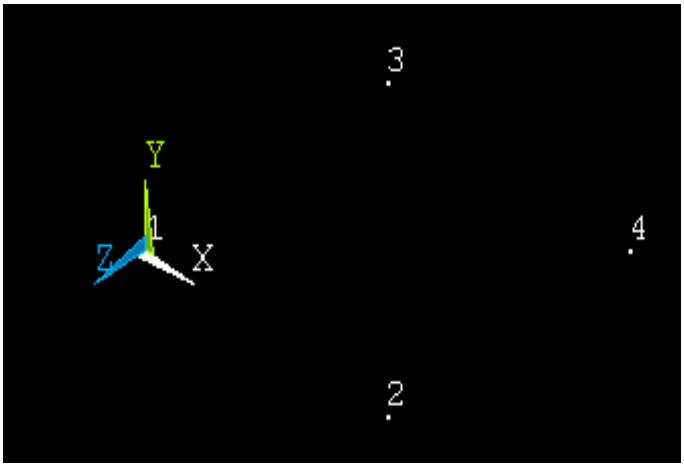


Şekil 4. 1. Keypointlerin Oluşturulması.

In Active CS komutu ile uzayda referans olarak oluşturulan bir noktaya göre köşe kolonun tabanına ait keypointler oluşturulmuştur. (Şekil 4.1) Keypointlerin numarası aşağıda Tablo 4.1 de ve genel görünümü Şekil 4.2 de verilmiştir.

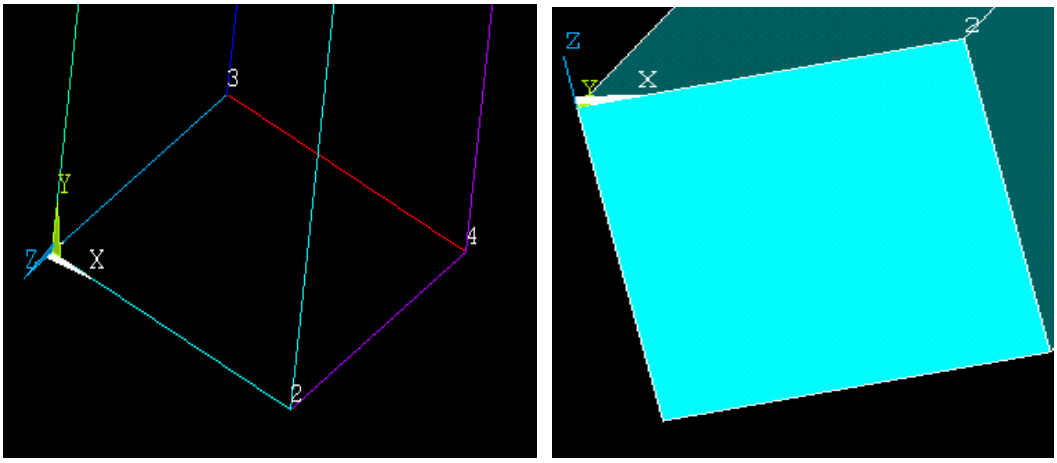
Keypoint No	**X**	**Y**	**Z**
1	0	0	0
2	100	0	0
3	0	0	-100
4	100	0	-100

Tablo 4. 1. Keypoint koordinatları.



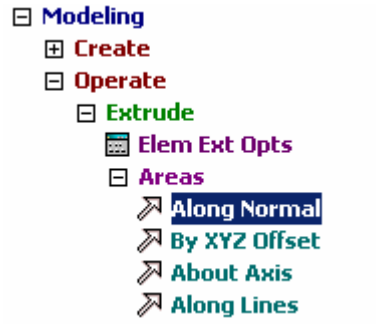
Şekil 4. 2. Keypointlerin Modellenmesi.

Oluşturulan keypointlerden çizgiler oluşturulmuş ve bu çizgilerden de kolonun taban alanı türetilmiştir. Türetilmiş olan kolon taban görünümü Şekil 4.3 de verilmiştir.

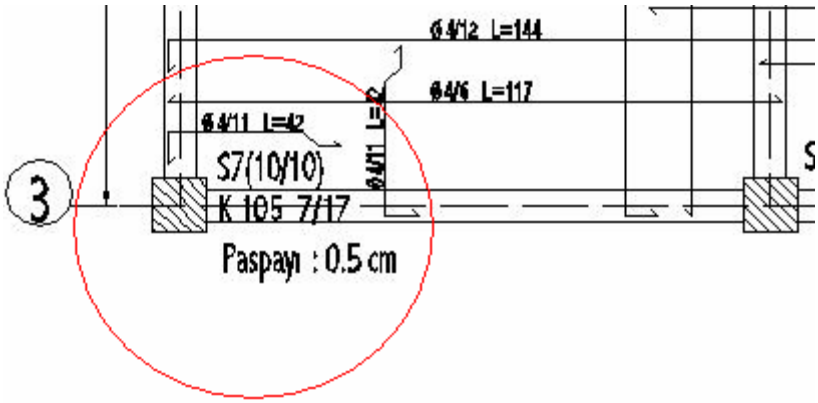


Şekil 4. 3. Kolon Taban Alanlarının Modellenmesi.

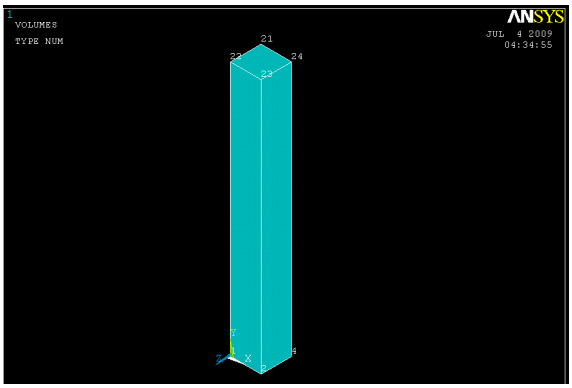
Oluşturulan köşe kolon taban alanı normali doğrultusunda *Modelling-Operate-Extrude-Areas-Along Normal* adımları kullanılarak hacme dönüştürülmüştür.(Şekil 4.4) Hacme dönüştürülmüş kolon köşe kolon için Şekil 4.5 de ve genel görünümü Şekil 4.6 da verilmiştir.



Şekil 4. 4. Alanın Hacme Dönüştürülmesi.

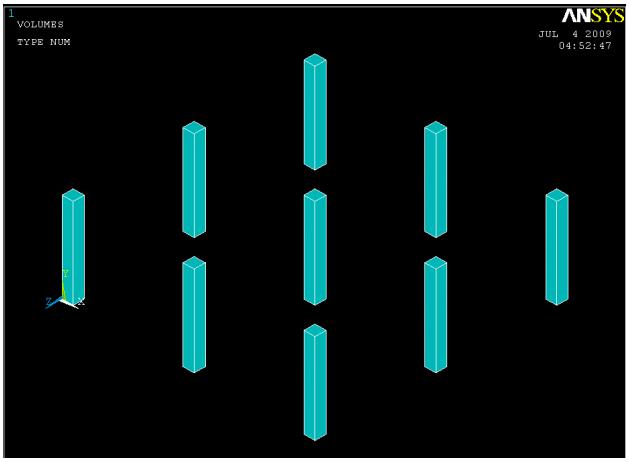


Şekil 4. 5. Köşe Kolon Plan Görünümü.



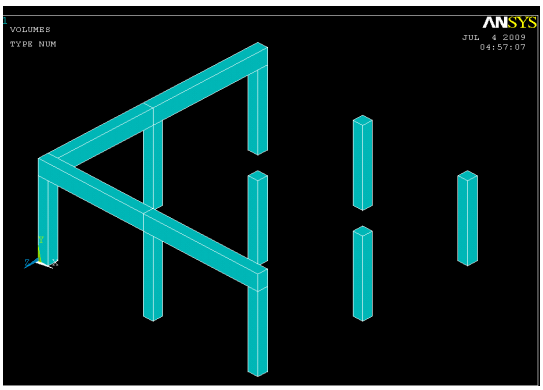
Şekil 4. 6. İlk Oluşturulan Hacim.

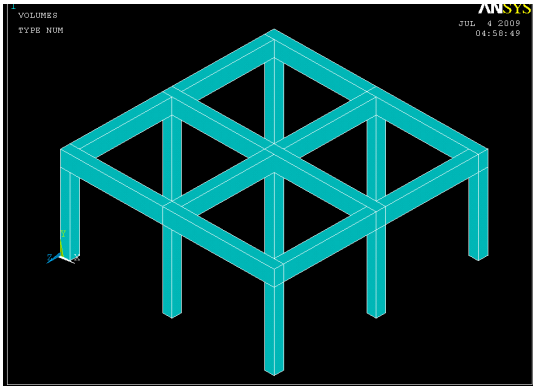
Köşe kolon X doğrultusunda üç, Z doğrultusunda üç adet olacak şekilde *Modelling-Copy-Volumes* adımları kullanılarak çoğaltılmıştır. Oluşan yeni hacimlerde X ve Z doğrultularında kalıp planındaki ölçülere uyularak çoğaltılmış ve birinci kat kolonlarının oluşturulması tamamlanmıştır.(Şekil 4.7)



Şekil 4. 7. Birinci Kat Kolonları.

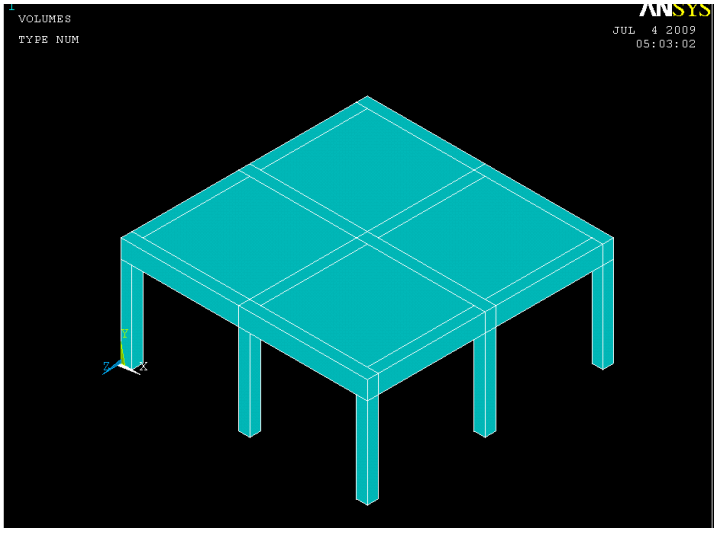
Kirişlerin oluşturulmasında kolonların modellenmesindeki yol izlenmiş ve 1. kat tamamen modellenmiştir. (Şekil 4.8)





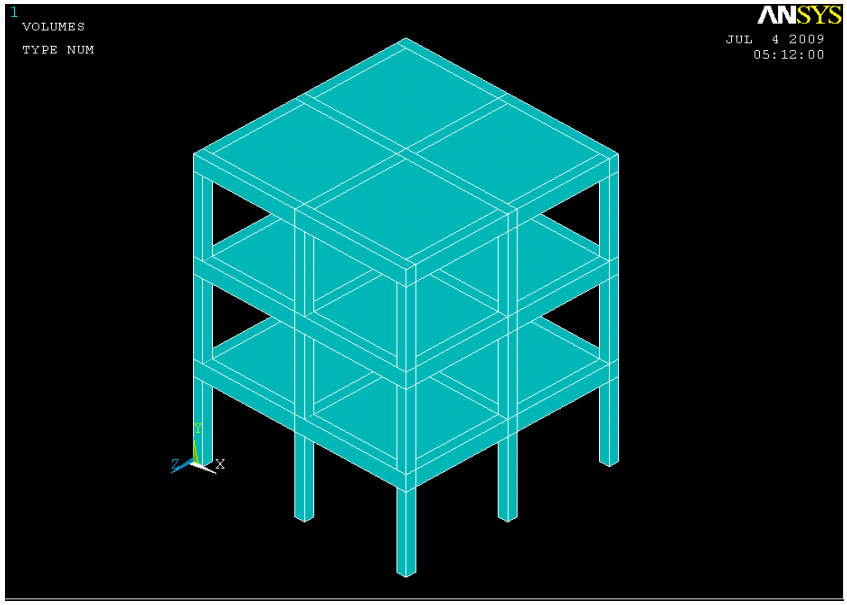
Şekil 4. 8. Birinci Kat Kolon ve Kirişleri.

Modelin yanal yük etkisinde rijit diyafram özelliğini gösterebilmesi için modele döşemelerde tanımlanmıştır. Döşeme hacimlerinin modellenmesinde kolon ve kirişler türetilirken izlenen yollar izlenmiştir. Döşeme hacim modellemesi Şekil 4.9 de verilmiştir.



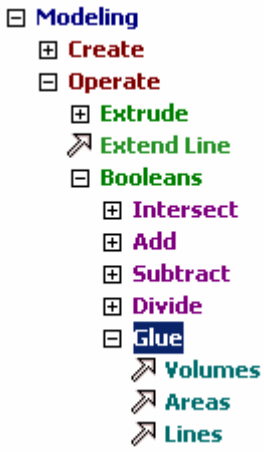
Şekil 4. 9. Döşeme Hacimlerinin Oluşturulması.

Tez çalışmasına konu olan model üç kattan oluşmaktadır. Bu nedenle birinci kat Y yönünde 1000 mm ara ile çoğaltılmıştır. FRP uygulanmamış model bu şekilde tamamlanmıştır. Modelin genel görünümü Şekil 4.10 de verilmiştir.



Şekil 4. 10. Modelin Genel Görünümü.

Modelde kopyalama işlemi tamamlandıktan sonra bütün hacimlerin birlikte çalışması için glue işlemi yapılmıştır. (Şekil 4.11)



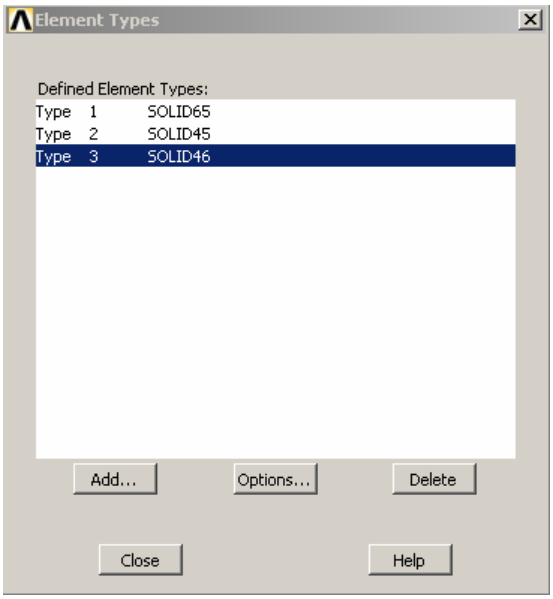
Şekil 4. 11. Hacimlerin Birleştirilmesi.

FRP uygulanmamış model oluşturulduktan sonra eleman tiplerinin ve sabitlerinin, malzeme özelliklerinin tanımlanması yapılmıştır. FRP'siz model üzerinde mesh işlemi uygulandıktan sonra FRP malzemesinin modele uygulanmasına başlanmıştır.

Eleman tiplerinin ve sabitlerinin, malzeme özelliklerinin ve mesh işleminin tanımlanması aşamaları aşağıda verilmiştir.

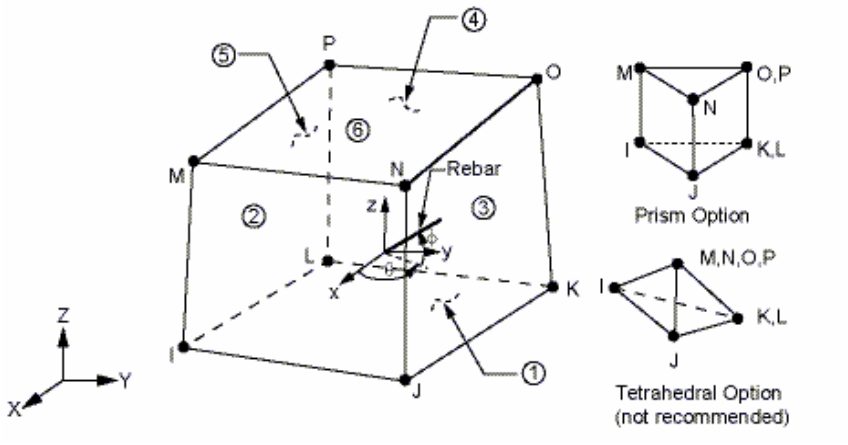
4.2.1.2 Element Type

Bu menüde modelde kullanılacak beton ve FRP gibi malzemelere uygun modeller tanımlanabilmektedir. (Şekil 4.12)



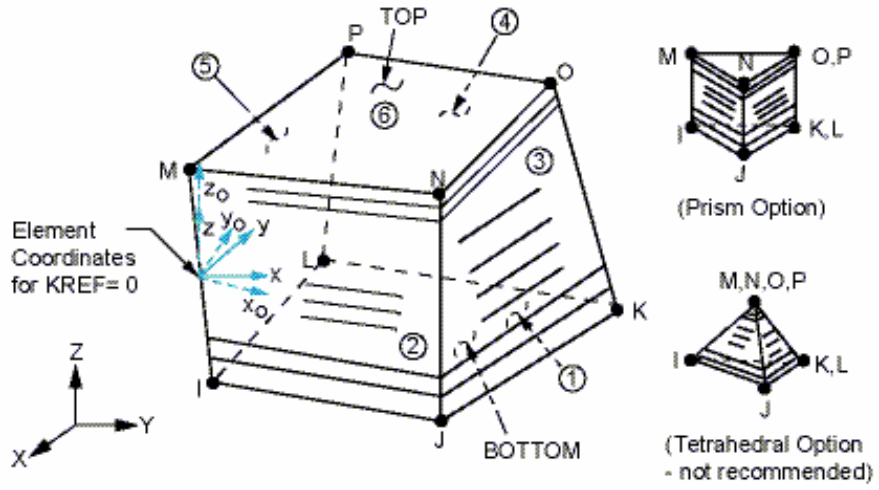
Şekil 4. 12. Element Type Menüsü.

Ansys paket programında betonarmenin modellenmesinde programın içerisinde bulunan 8 düğüm noktalı bir hacimsel eleman olan Solid 65 modeli kullanılmıştır. Bu eleman her düğüm noktasında üç serbestlik derecesine sahiptir. Eleman, plastik deformasyon yapma, kırılma ve ezilme özelliklerine sahiptir. Şekil de Solid 65 elamanının genel geometrisi görülmektedir. (Şekil 4.13)



Şekil 4. 13. Solid 65 Beton Modeli [37].

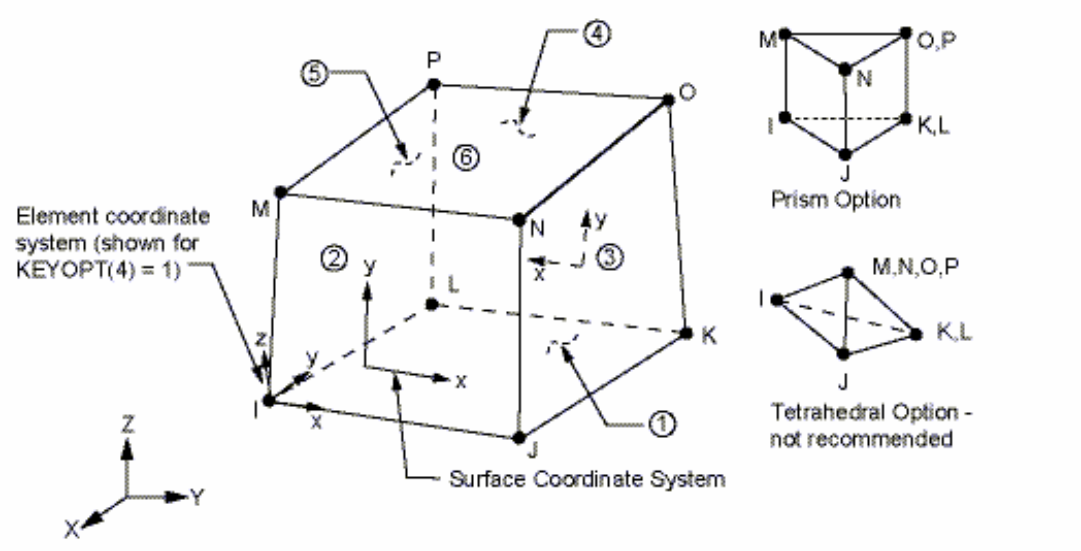
Programda FRP malzemesinin modellenmesinde ise Solid 46 elemanı kullanılmıştır. Tabakalı malzemelerin modellenmesinde kullanılan bu eleman tipi üç boyutlu olup, 8 adet düğüm noktasına sahiptir. Kendi içerisinde değişik açılara ve kalınlıklara sahip 250'ye kadar tabakanın tanımlanmasına olanak vermektedir [38]. Bu elemanın genel özellikleri ve görünümü Şekil 4.14 de verilmektedir.



Şekil 4. 14. Solid 46 Elemanı [37].

.

Modele yük uygulama noktalarındaki lokal gerilme yığılmalarını önlemek için yük plakaları modellenmiştir [38]. Bu plakalar için Solid 45 modeli kullanılmıştır. Bu elemanın malzeme özelliği çelik olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.15).

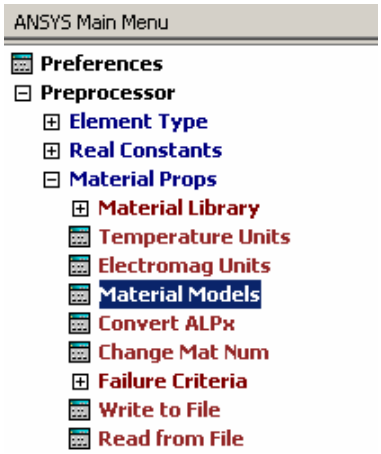


Şekil 4. 15. Solid 45 Elemanı [37].

Bu bölümde Solid65, Solid46, Solid45 modelleri eleman tipleri tanımlanmıştır.

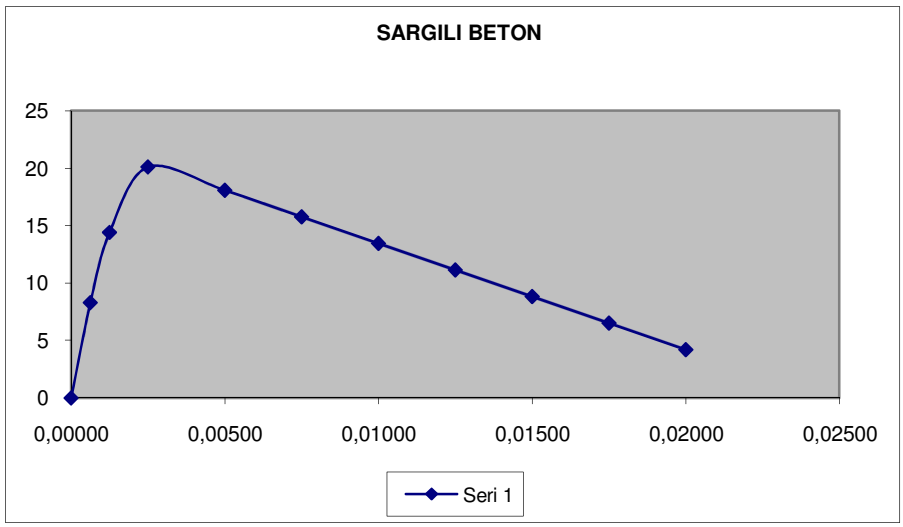
4.2.1.3 Material Probs

Bu menü altında beton, donatı, FRP ve beton FRP temas yüzeyi ile ilgili malzeme özellikleri girilmiştir. (Şekil 4.16)

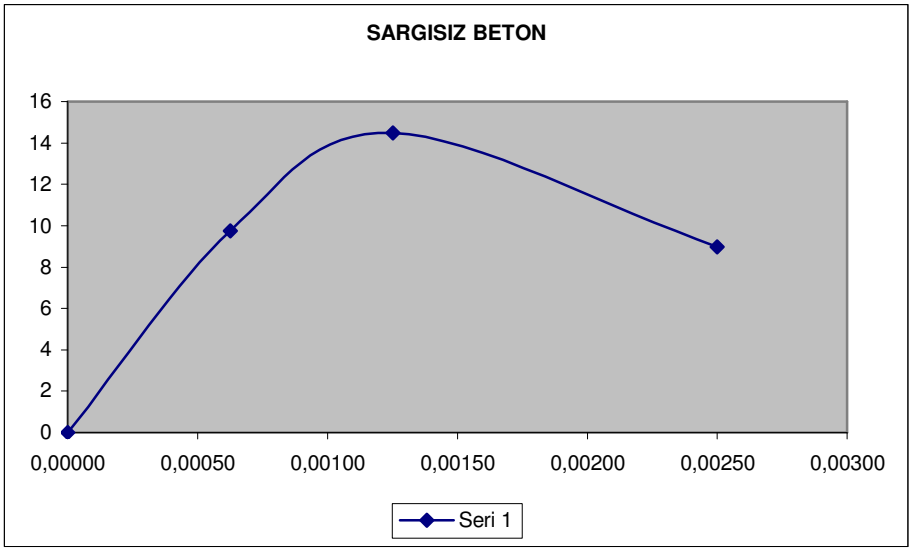


Şekil 4. 16. Malzeme Özellikleri Menüsü.

Solid 65 Malzeme Özellikleri: Tez çalışmasında Solid 65 beton modelinin malzeme özellikleri girilirken sargılı ve sargısız beton modelleri için gerilme-şekil değiştirme eğrileri hesaplanarak tanımlama yapılmıştır. Sargılı ve sargısız beton davranışı Şekil 4.17 ve şekil 4.18 de verilmiştir.



Şekil 4. 17. Sargılı Beton Davranışı.



Şekil 4. 18. Sargısız Beton Davranışı.

Beton malzemesi için nonlineer inelastik veriler sırasıyla şöyledir:

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

Yukarıdaki verilerden, 1-2 numaralı veri değerlerinin sıfır verilmesi halinde kesme kuvveti transferinin olmadığı kabul edilir. 3-4 numaralı değerlere -1 verilmesi halinde ise eleman sırasıyla çatlama ve ezilme yeteneğini kaybeder [35]. Tez çalışmasında sadece 1-4 arası değerler verilmiş olup diğerlerini Ansys tarafından varsayılan değerleri kullanmıştır. Aşağıda Tablo 4.2 de özellikler verilmiştir.

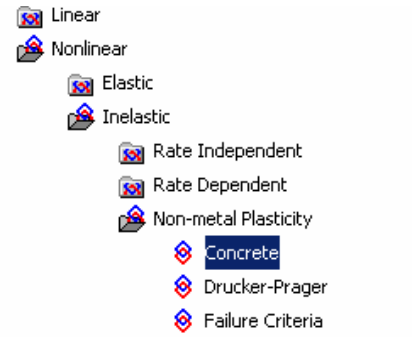
Malzeme	**Eleman Tipi**	**Sargılı Beton Malzeme Özellikleri**		
1	**SOLİD 65**	**Lineer İzotropik**		
		EX (Mpa)	13248	
		PRXY	0.3	
		Multilineer Kinematic Hardening		
			Şekil Değ.	**Gerilme (Mpa)**
		1. nokta	0	0,0
		2. nokta	0,000625	8,3
		3. nokta	0,00125	14,4
		4. nokta	0,0025	20,1
		5. nokta	0,005	18,1
		6. nokta	0,0075	15,7
		7. nokta	0,01	13,4
		8. nokta	0,0125	11,1
		9. nokta	0,015	8,8
		10. nokta	0,0175	6,5
		11. nokta	0,02	4,2
		Beton		
		ShrCf-Op	0.4	
		ShrCf-Cl	0.5	
		UnTensSt(Mpa)	1.35	
		UnCompSt(Mpa)	-1	
		BiCompSt	0	
		HydroPrs	0	
		BiCompSt	0	
		UnTensSt	0	
		TenCrFac	0	

Tablo 4. 2. Solid 65 Sargılı beton malzeme özellikleri.

Betonun elastisite modülünü bulmak için başlangıç eğimi kullanılmıştır.

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{8.28}{0.000625} = 13248 Mpa$$

Ansys bu değerin dışında bir değeri kabul etmemektedir. Betonun açık ve kapalı çatlak durumunda kayma aktarımı davranış parametreleri, betonun çekme ve basınç mukavemeti concrete menüsünden tanımlanmıştır. (Şekil 4.19)



Şekil 4. 19. Beton Özelliklerinin Tanımlanması.

Çatlak yüzeyleri birbiriyle sürtünme halinde olmayan, açık çatlaklarda kayma transfer katsayısı 0.4, çatlak yüzeyi birbiriyle irtibat halinde olan kapalı çatlaklar için kayma transfer katsayısı 0.5 alınmıştır. Ancak bu değerlerde analizin yakınsamasında problem çıkmıştır. Bu nedenle bu değerler değiştirilerek analiz tekrarlanmıştır. Betonun çekme dayanımı TS500-2000 de verilen $f_t = 0.35\sqrt{f_c}$ [39] formülünden hesaplanmıştır. Basınç dayanımı değeri -1 verilerek ANSYS'in kullandığı çatlak modelinde ezilme çatlağı kontrolü engellenmiştir. Aşağıda Tablo 4.3 da genel özellikler verilmiştir.

Malzeme	Eleman Tipi	Sargısız Malzeme Özellikleri		
1	SOLİD65	**Lineer İzotropik**		
		EX (Mpa)	15600	
		PRXY	0.3	
		Multilineer Isotropic Hardening		
			Şekil Değ.	**Gerilme (Mpa)**
		1. nokta	0	0,0
		2. nokta	0,000625	9,8
		3. nokta	0,00125	14,5
		4. nokta	0,0025	9,0
		Beton		
		ShrCf-Op	0.4	
		ShrCf-Cl	0.5	
		UnTensSt(Mpa)	1.35	
		UnCompSt(Mpa)	-1	
		BiCompSt	0	
		HydroPrs	0	
		BiCompSt	0	
		UnTensSt	0	
		TenCrFac	0	

Tablo 4. 3. Solid 65 sargısız beton malzeme özellikleri.

Sargısız beton modelinde, elastisite modülü başlangıç eğimi olan 15600 MPa alınmıştır. Beton ile ilgili diğer değerler sargılı beton modeli ile aynı alınmıştır.

Solid 46 Malzeme Özellikleri: Literatürde FRP ile güçlendirilmiş elemanlar ve yapılar üzerinde yapılan analitik çalışmalarda genellikle FRP malzemesinin eleman tipi Solid 46 olarak modellenmiştir [38]. Tez çalışmasına konu olan modelin güçlendirilmesinde aşağıda Tablo 4.4 da verilen FRP malzemesi ve Ansys modelinde Tablo 4.5 de verilen FRP malzemesi kullanılmıştır.

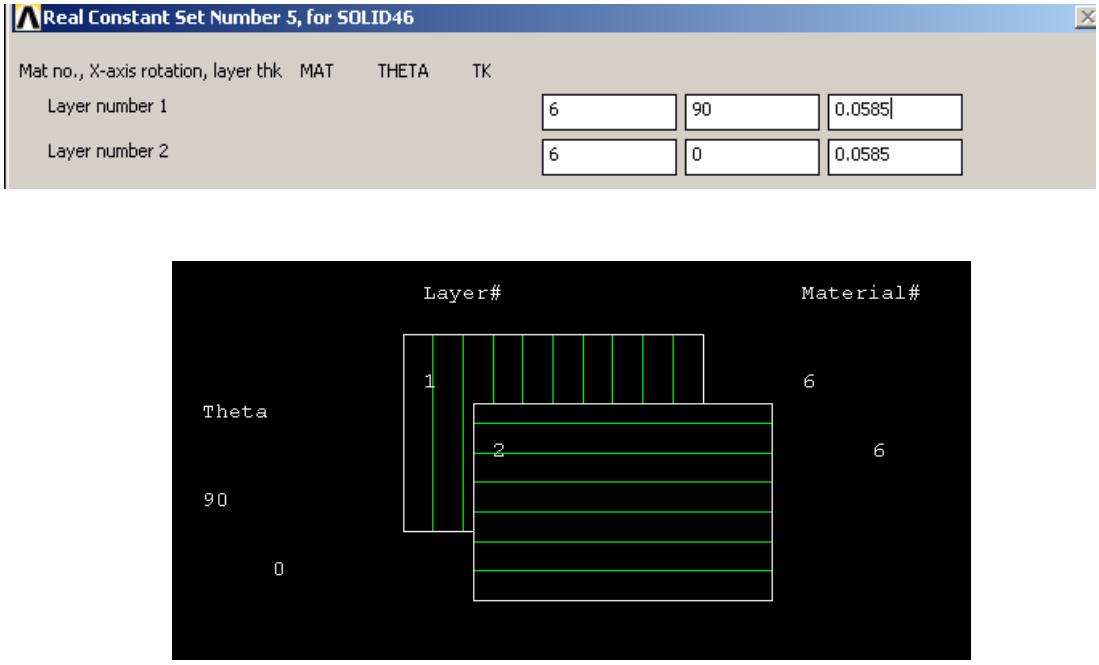
	MBRACE® FIBER C1-23
Elastisite Modülü (N/mm²)	240,000
Çekme Dayanımı (N/mm²)	3800
Tasarım Kesit Kalınlığı (mm)	0,117
Toplam Ağırlık (g/m²)	230
Kopmada Uzama (%)	1,55
Genişlik (mm)	300/600

Tablo 4. 4. [3] FRP malzemesi özellikleri.

Malzeme	Eleman Tipi	FRP Malzeme Özellikleri	
1	SOLİD46	**Lineer İzotropik**	
		EX (Mpa)	240000
		PRXY	0.22

Tablo 4. 5. Solid 46 malzeme özellikleri.

Solid 46 malzemesi eleman sabiti real set 17 ile modellenmiştir. Eleman sabiti olarak iki adet katman tanımlanmıştır. Katman görünümü Şekil 4.20 de verilmiştir.



Şekil 4. 20. FRP Katmanları.

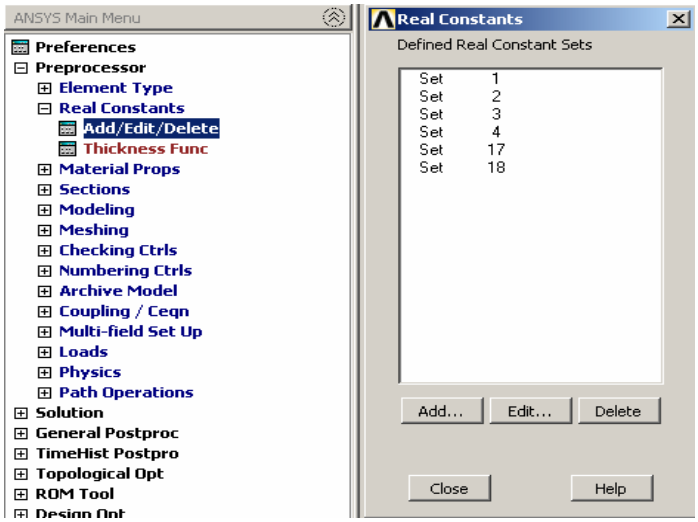
Solid 45 Malzeme Özellikleri : Solid 45 malzemesi olarak çelik kullanıldığından çeliğin elastisite modülü ve poisson oranı bu elaman için kullanılmıştır. Kullanılan özellikler Tablo 4.6 da verilmiştir.

Malzeme	**Eleman Tipi**	**FRP Malzeme Özellikleri**	
1	**SOLİD45**	**Lineer İzotropik**	
		EX (Mpa)	2,1E+005
		PRXY	0.3

Tablo 4. 6. Solid 45 malzeme özellikleri.

4.2.1.4 Eleman Sabitleri (Real Constant)

Model için oluşturulan Solid65, Solid46 gibi eleman tiplerine ait özellikler bu menü yardımıyla tanımlanmıştır. Örneğin, modelin donatıları Solid65 beton modeli ile ilgili real constant kısmından yapılır. FRP malzemesi için katman sayısı ve katmanların kalınlıkları, bu elemanlar ile ilgili real constant yardımıyla tanımlanır. Bu aşamanın genel görünümü aşağıda Şekil 4.21 de verilmiştir.



Şekil 4. 21. Eleman Sabitleri Menüsü.

Modelimizde Set1, Set2, Set3 ve Set4 şeklinde tanımlanan sabitler donatı tanımlamalarını içermektedir. Ansys paket programında kullanılan beton modelinde donatının eleman boyunca dağınık (smeared) olduğu varsayımı yapılmıştır. Bu nedenle Solid65 modeli için real constantlar girilmiştir. Literatürde dağınık donatı tanımlama yerine link8 eleman tipi (discrete) kullanılarak da betonarme elemanlar modellenmiştir. Fakat bu tez kapsamında yapılan modellemede dağınık model olarak kullanılmıştır. Modellenen donatı özellikleri Tablo 4.7 da verilmiştir.

Eleman Sabiti	**Donatı Özellikleri**			
	Malzeme No	**Oranı**	**θ açısı**	**Φ açısı**
Set1	-	-	-	-
Set2	2	0.07065	90	0
Set3	2	0.07065	0	0
Set4	2	0.07065 0.14418	90 0	90 0

Tablo 4. 7. Solid 65 eleman sabitleri.

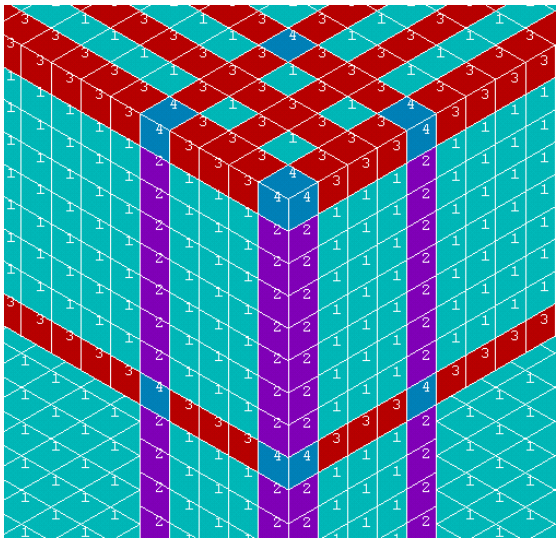
Set1: Donatısız beton oranı

Set2: Kolon boyuna donatısı oranı

Set3: Kiriş doyuna donatısı oranı

Set4: Kolon ve Kirişlerin boyuna donatılarının kesişim yerlerindeki donatı oranı

Yukarıdaki tabloda verilen oranlar eleman kesitindeki donatı alanının eleman kesit alanına bölünmesi ile bulunur. Tanımlama sonucu malzeme özelliklerinin genel görünümü aşağıda Şekil 4.22 de verilmiştir.

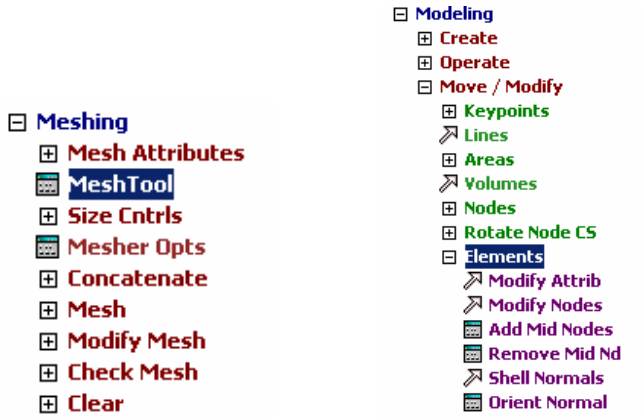


Şekil 4. 22. FRP Uygulanmamış Düğüm Noktası.

4.2.1.5 Modelin Sonlu elemanlara Bölünmesi

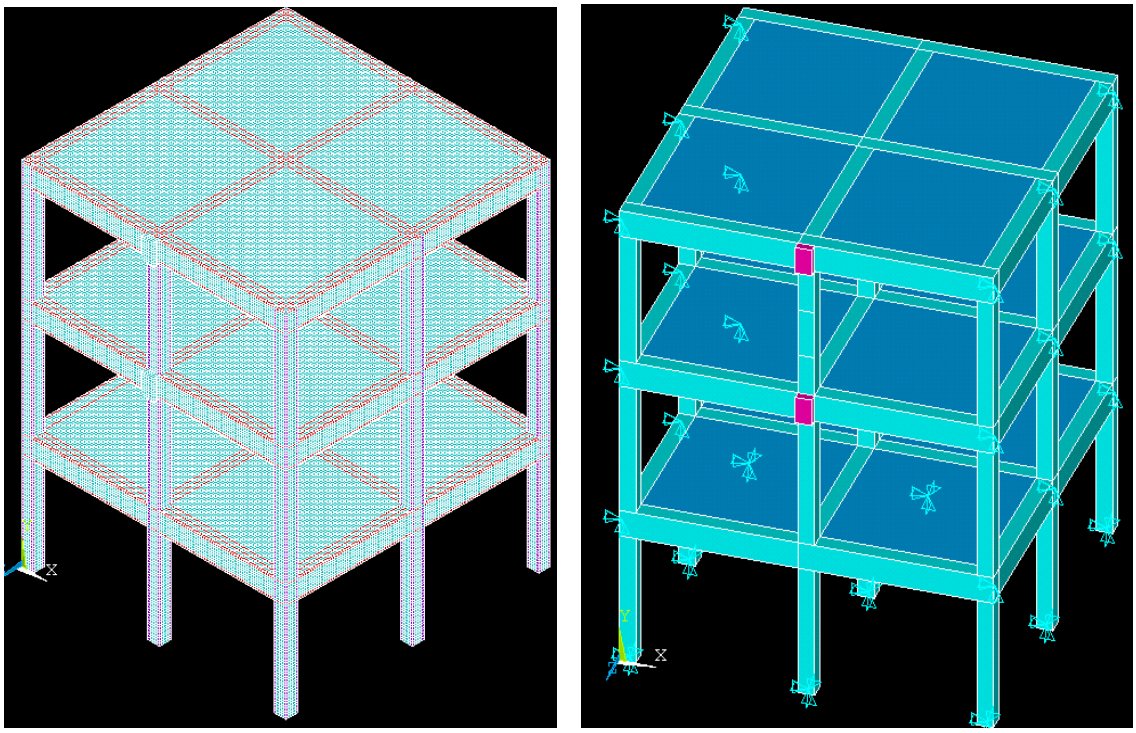
Model donatıların kesit içerisindeki konumları dikkate alınarak 20x20x20 mm boyutlarında mesh elemanlara ayrılmıştır. Bu ayırma sonucunda FRP uygulanmamış model 171419 adet Solid65 elemanına, 15000 Solid45 elemanına ayrılmıştır.(Şekil 4.23)

Modeli sonlu elemanlara ayırma işlemi tamamlandıktan sonra move/modify menüsünden bütün elemanların eleman sabitleri tanımlanmıştır.



Şekil 4. 23. Modelin sonlu Elemanlara Ayrılması.

Bu adımda tamamlandıktan sonra FRP uygulanmamış numunenin modellenmesi tamamlanmıştır. Modelin sonlu elemanlara ayrılmış genel görünümü aşağıda Şekil4.24 verilmiştir.



Şekil 4. 24. Modelin sonlu elemana bölünmüş görünümü.

4.3 FRP Malzemesinin Modellenmesi

4.3.1 FRP Malzemesinin Özellikleri

FRP malzemesinin kullanımı son yıllarda dünyada ve ülkemizde artmaktadır. Lifli polimer güçlendirme sistemleri betonarme, çelik, taşıyıcı tuğla ve ahşap elemanların eğilmeye, kesme etkilerine, eksenel yüklere ve darbelere karşı dayanımlarının ve/veya sünekliklerinin arttırılmasında kullanılmaktadır. Lifli polimerler çok yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülüne sahiptirler. Güçlendirme uygulamasında yapının boşaltılmasına gerek duyulmadan, kısmi düzenlemelerle yapı veya endüstriyel tesis servis verirken, güçlendirme işlemlerine devam edilir. Ayrıca bu malzemeler çok hafiftirler [3].

Bu tez çalışması kapsamında modellenen 1/3 ölçekli model yapıda karbon esaslı polimerler kullanılmıştır. Lifli polimerler ile güçlendirilen kesitin tasarım esasları, geleneksel betonarme tasarım ilkeleri ve lifli polimerlerin mekanik özellikleri ile ilgili bilgilere dayanılarak tarif edilmiştir. Lifli polimerler kesite gelen çekme kuvvetlerini karşılarlar, basınç dayanımları hesapta ihmal edilir (BASF). Tez çalışmasında kullanılan FRP malzemesinin elastisite modülü 240000 MPa, çekme dayanımı ise 3800 MPa olarak üretici firmanın katalogundan alınmıştır.

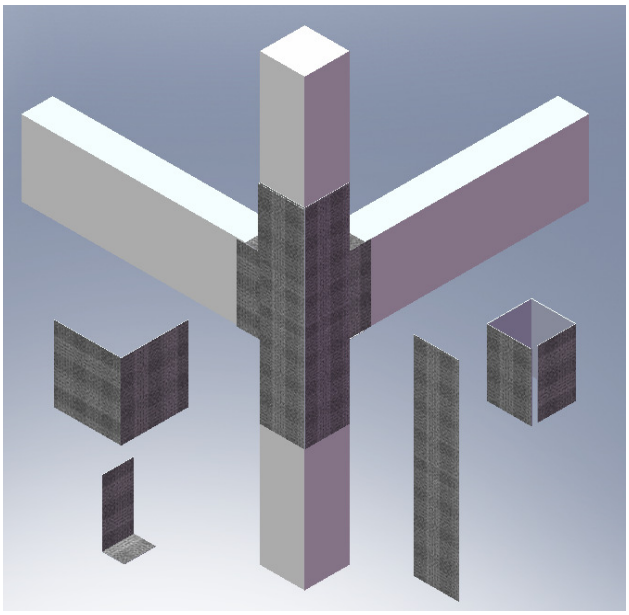
4.3.2 Ansys Paket Programında FRP Plakalarının Modellenmesi

Dünyada ve ülkemizde FRP uygulamalarının artmasıyla birlikte, bu malzemenin betonarme ile birlikte çalışma prensibi üzerinde analitik çalışmalar artmaktadır. Yapılan analitik çalışmalarla FRP ile güçlendirilmiş yapıların davranışı ortaya konulmaktadır. Bu çalışmalar literatürde genellikle tek bir kolon ya da tek bir kiriş üzerinde yapılmaktadır. Bu tez çalışması ile deneyi yapılmış üç katlı 1/3 ölçeğindeki bir model yapıda analitik çalışma yapılarak sonuçları incelenmiştir.

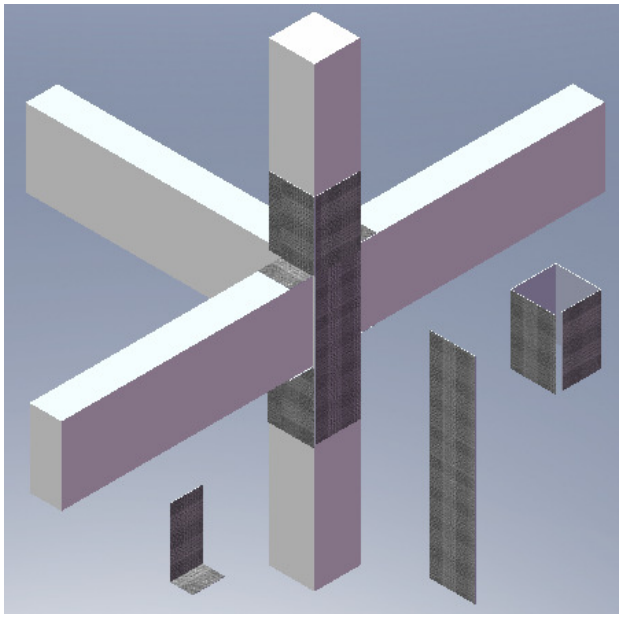
Günümüzde kullanılan inşaat mühendisliği paket programlarında beton üzerine FRP malzemesi tanımlanamamaktadır. Tez konusu olan modelin FRP uygulanmamış şeklinin statik–itme analizi SAP 2000 paket programında yapılmıştır. Ancak FRP uygulanmış model bu programda tanımlanamamıştır. Bu nedenle ANSYS paket programı analizler için tercih edilmiştir. Modelleme için literatür çalışmalarından,

tezlerden ve ANSYS help menüsünden faydalanılmıştır. Bu bölümde FRP'nin modellenmesi aşamaları anlatılacaktır.

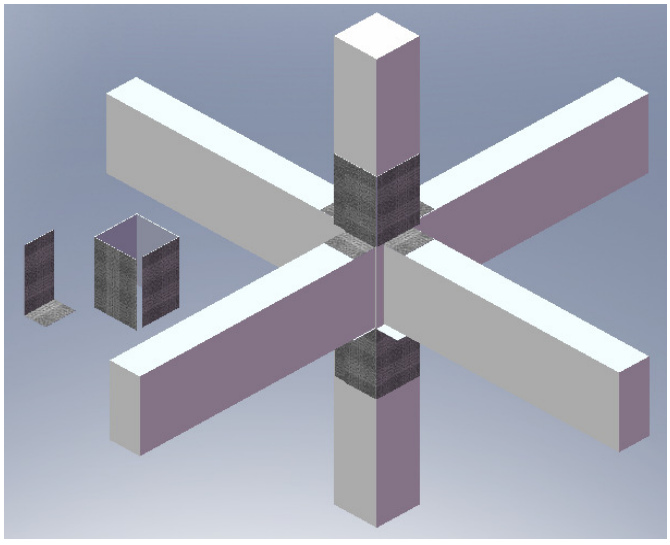
Modelleme için ilk olarak deneyde kullanılan sarım detayları ayrı ayrı incelenmiştir. FRP modellenirken deneyde kullanılan sıra takip edilmiştir. Modelleme yapılırken öncelikle keypointler oluşturulmuş, mevcut düğüm noktaları kullanılarak kolon ver kirişler üzerine yeni keypointler oluşturulmuş, sonra alanlara geçilmiş ve hacimler meydana getirilmiştir. Plakalar, kolon ve kirişlerle aynı ölçülerde mesh elemanlara ayrılmıştır. Aşağıda Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27 FRP tabakalarının köşe, kenar ve orta düğüm noktalarındaki sarılma detayları gösterilmiştir.



Şekil 4. 25. Köşe Kolon Sarım Detayları.

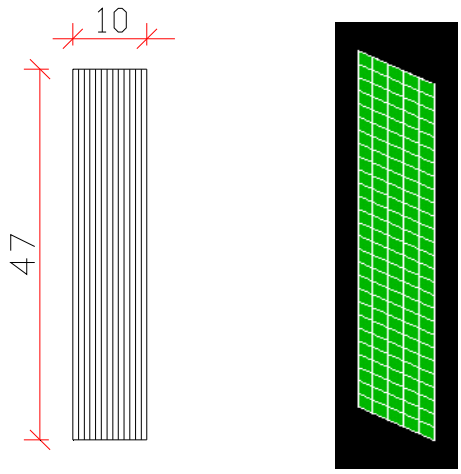


Şekil 4. 26. Kenar Kolon Sarım Detayları.



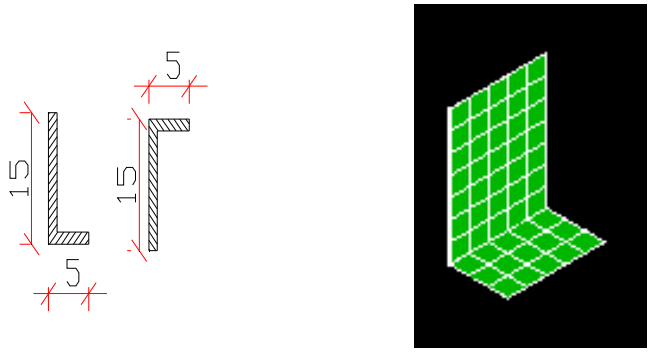
Şekil 4. 27. Orta Kolon Sarım Detayları.

FRP malzemesi tanımlanmasında ilk olarak Şekil 4.28 de verilen FRP düz plakaları modellenmiştir.



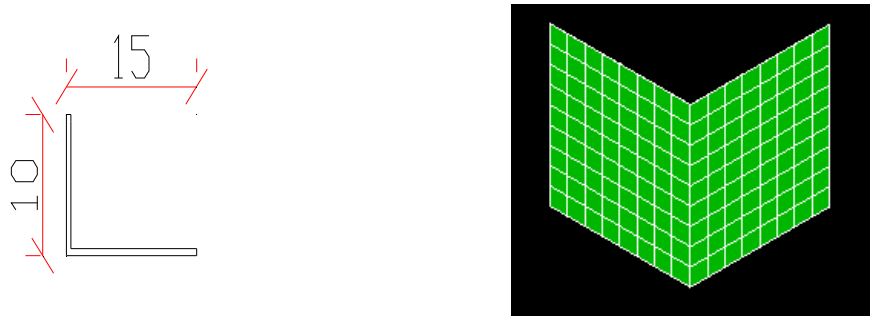
Şekil 4. 28. Boyuna FRP Plakaları.

Bu plakalar X-Y ve Y-Z düzlemlerinde modellenerek kenar ve köşe kolonlar üzerinde modele göre oluşturulmuştur. İkinci olarak da Şekil 4.29 de verilen köşeli plakalar oluşturulmuştur.



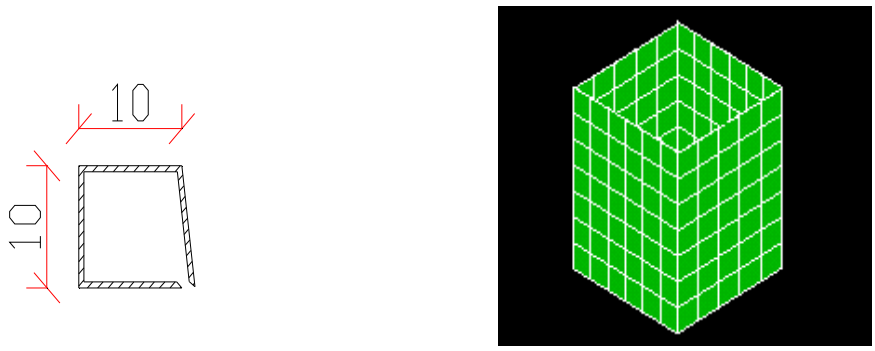
Şekil 4. 29. Köşeli Plakalar.

Bu plakalar ayrı ayrı oluşturulmuş ve Booleans menüsü yardımıyla birleştirilmiştir. Bu plakalarda iki farklı düzlemde oluşturulmuş üzerine uygulanmıştır. Üçüncü olarak Şekil 4.30 de verilen tipteki kıvrımlı FRP plakaları modellenmiştir.



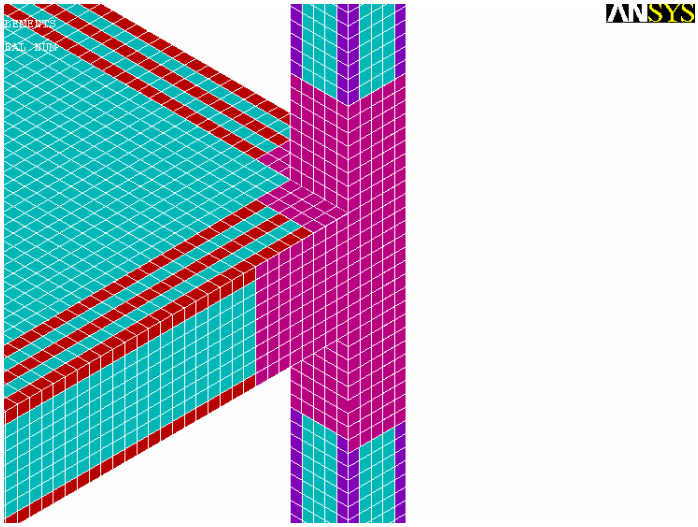
Şekil 4. 30. Kıvrımlı Plakalar.

Son olarak da Şekil 4.31 de görülen enine yöndeki FRP'lerin modellenmesi tamamlanmıştır. .



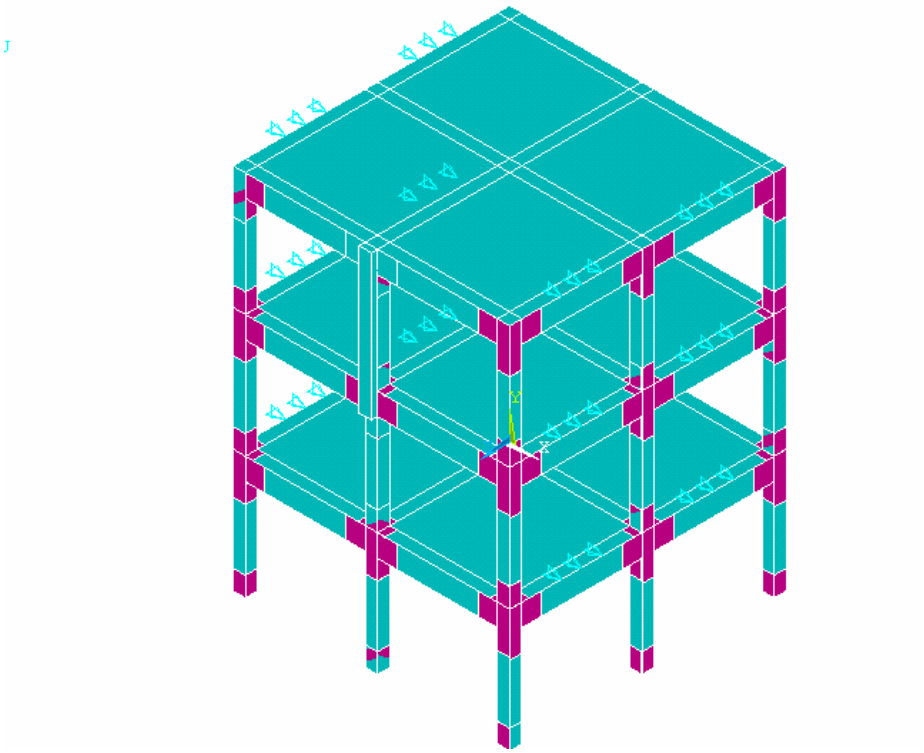
Şekil 4. 31. Enine Plakalar.

FRP plaklarının modellenmesinin ardından yapı genelindeki düğüm noktalarına bu plakalar birleştirilmiştir. Bu birleştirme için betonarme ve FRP malzemesi için sonlu eleman boyutları özellikle çakışmanın tam sağlanması amacıyla eşit büyüklüklerde seçilmiştir. Düğüm noktasına modelde sabitlenmiş FRP görünümleri Şekil 4.32 de verilmiştir.



Şekil 4. 32. FRP uygulanmış düğüm noktası.

Yapı genelindeki düğüm noktalarında sabitlenmiş FRP görünümleri ise, aşağıda Şekil 4.33 de verilmiştir.



Şekil 4. 33. FRP Uygulanmış Modelin Genel Görünümü.

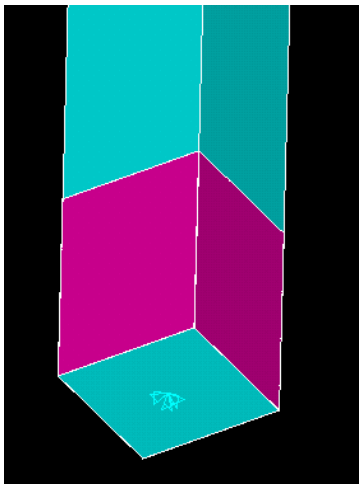
Deneysel çalışma için datalarının alındığı ve FRP uygulanmış yapı sisteminin genel görünümü ise Şekil 2.9 da daha önce Bölüm 2 de verilmiştir.

5.BÖLÜM

FRP İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ 3 KATLI DENEY MODELİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE STATİK İTME ANALİZİ

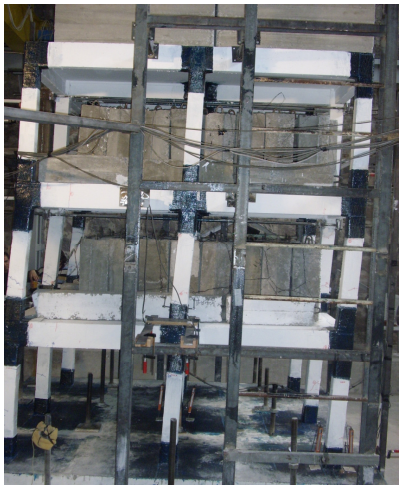
5.1 Modelin Mesnet Şartları

Tez çalışmasına konu olan deney numunesi 30cm kalınlığında bir temel üzerine inşa edilmiştir. Bu nedenle ANSYS programında birinci kat kolonlarının alt yüzeyleri üç yönde ötelenmesi ve dönmesi engellenmiştir. (Şekil 5.1)

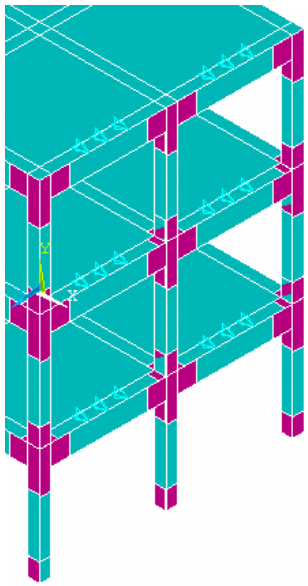


Şekil 5. 1. Kolon alt yüzeylerinin mesnetlenmesi.

Ayrıca deney numunesinde burulma etkilerini ortadan kaldırmak için numunenin her iki yanına çelik çerçeveler yapılmıştır. (Şekil 5.2) Bu durum ANSYS programında modelin her iki tarafındaki kenarlara z yönünde serbest, x yönünde hareketleri önlenmiş mesnetler atanarak yapılmıştır. (Şekil 5.3)



Şekil 5. 2. Deney Numunesi Çelik Çerçeveler.

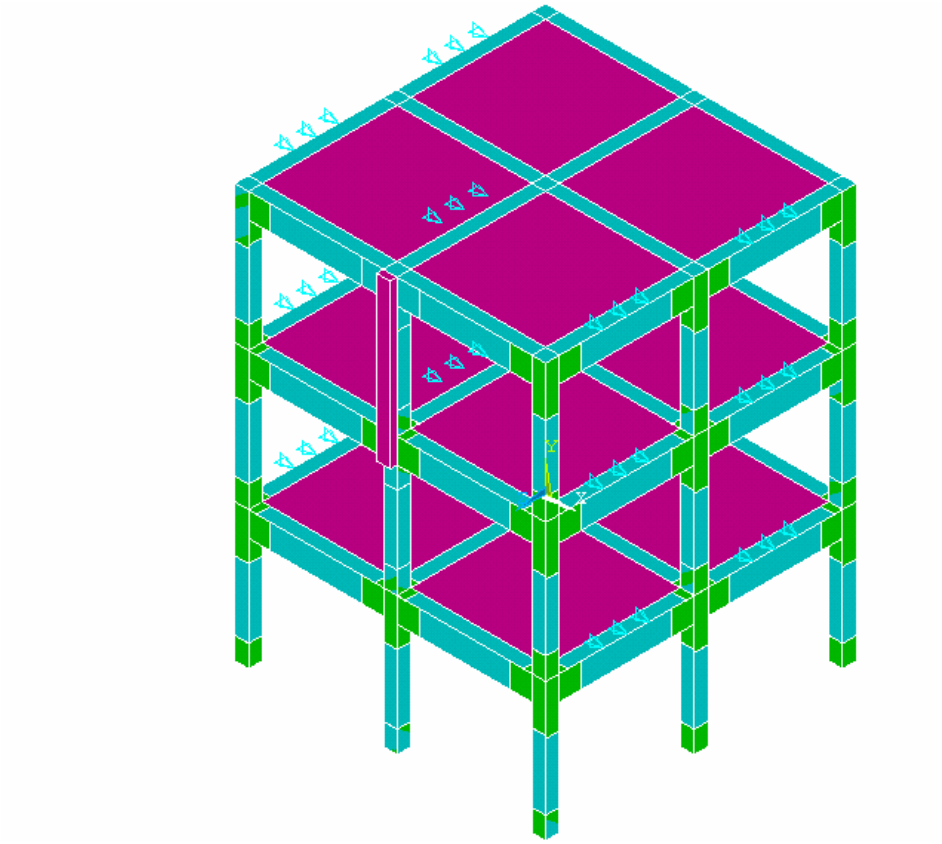


Şekil 5. 3. ANSYS modeli kenar mesnetler.

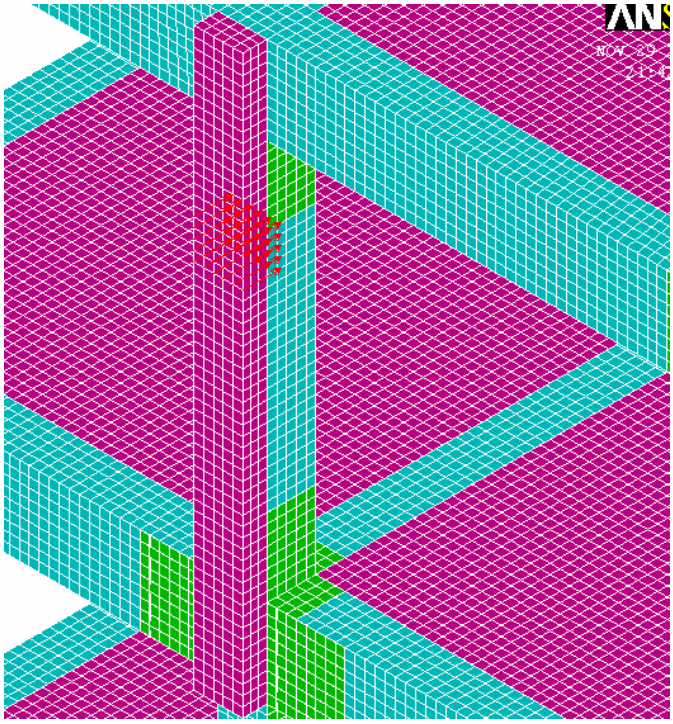
5.2 Modele Yükün Uygulanması

Ansys paket programında yüklemeler ister statik isterse dinamik olsun zaman-yük geçmişi (time-load history) kullanılarak uygulanabilir. Bir analizde birden fazla yük adımı bulunabilir. Her bir yük adımında yükün başlangıç değerinden itibaren belirli artış adımları ile yükleme yapılır. Artış adımları zamana bağlı olarak, zaman adımı veya artış adımı olarak verilebilir [35].

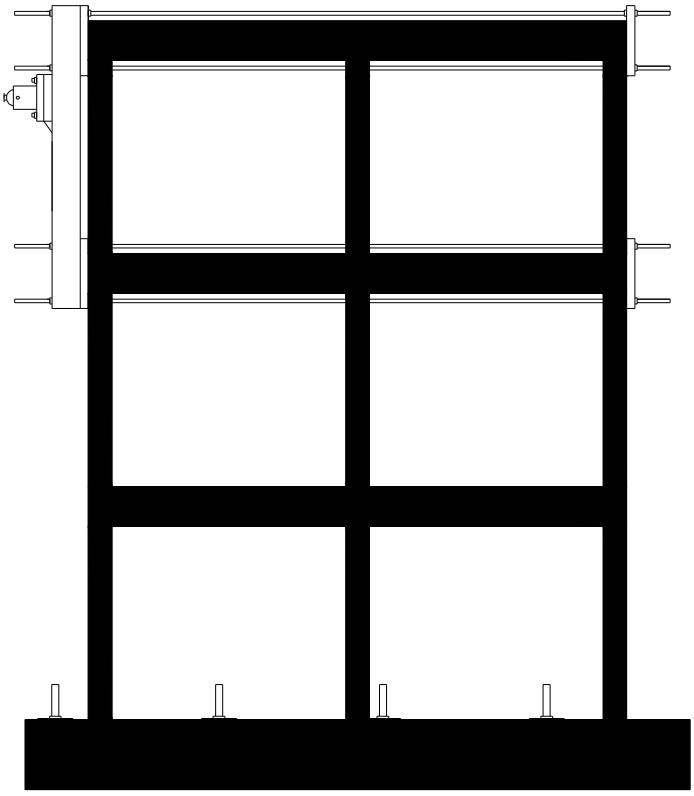
Zamana bağlı yük artışı verilirken zaman adımı büyüklüğü (time step size), en küçük zaman adımı büyüklüğü (minimum time step), en büyük zaman adımı büyüklüğü (maximum time step) değerleri girilmiştir. Modele yük son kat ile ikinci kat arasında üstten 1/3 lük kısma verilmiştir. Son kat ve ikinci kat arasına 50 mm kalınlığında çelik bir plaka modellenmiş yük bu plaka üzerinden verilmiştir.



Şekil 5. 4. Tez Konusu Model.



Şekil 5. 5. Yük Uygulama Plakası.



Şekil 5. 6. Deney Düzeneği.

5.3 Ansys Sonlu Elemanlar Paket Programı ile Modelin Çözümü

Ansys sonlu elemanlar paket programı önceki bölümlerde de değinildiği gibi modelleme, analiz ve sonuçların görüntülenmesi kısımlarından oluşmaktadır. Bu bölümde Ansys ile analiz yapmadan önce dikkate edilmesi gereken hususlar, tez konusu model dışında bir örnek ve modelden elde edilen sonuçlardan bahsedilecektir.

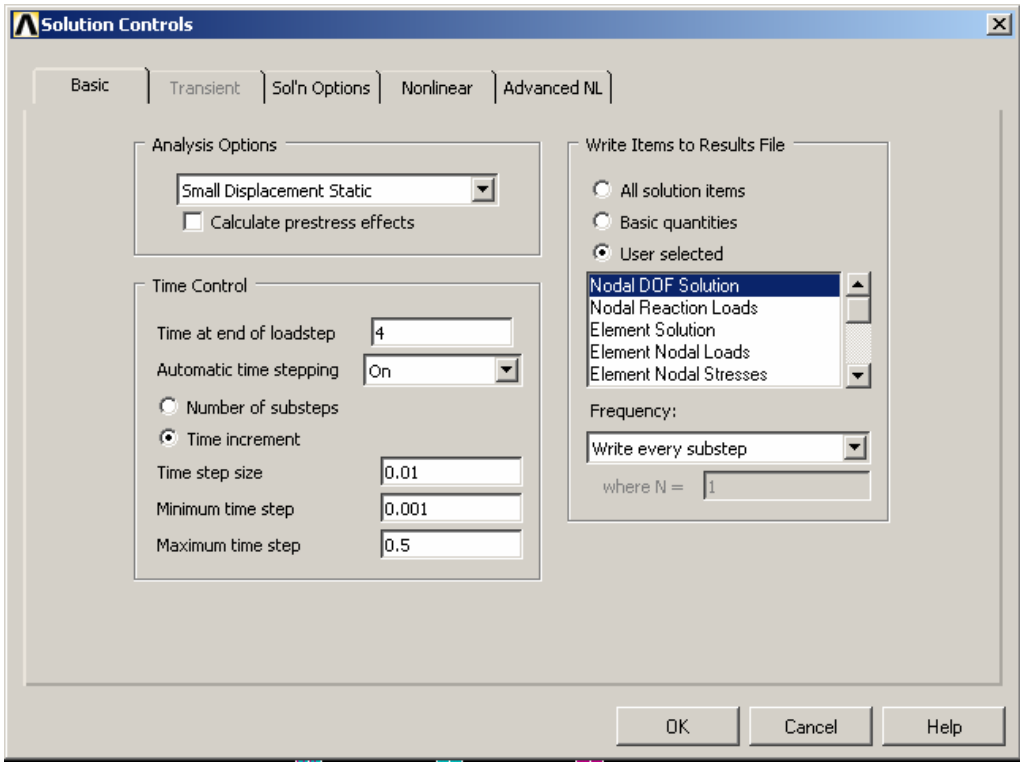
5.3.1 Ansys Çözüm Opsiyonları

Ansys paket programı ile modelleme yapıldıktan sonra analiz yapmak için modelimize göre bazı analiz ayarları yapmak gerekmektedir.



Şekil 5. 7. Çözüm Opsiyonları.

Ansys paket programında analiz ayarları için Şekil 5.7 deki menü kullanılmaktadır. Bu menü açıldığında Şekil 5.8 deki kutu ekrana gelecektir.



Şekil 5. 8. Çözüm Opsiyonları Penceresi.

Bu pencereden ilk olarak Analysis Options menüsünden small displacement static opsiyonu seçilmiştir. Bu menüde large displacement static seçeneğide mevcuttur. Ancak birçok analiz denemesinden large displacement statik seçeneği seçildiğinde analiz belli bir değere ulaşmış o değerden ileri gitmemiştir. Yani yakınsama problemi ortaya çıkarmıştır.

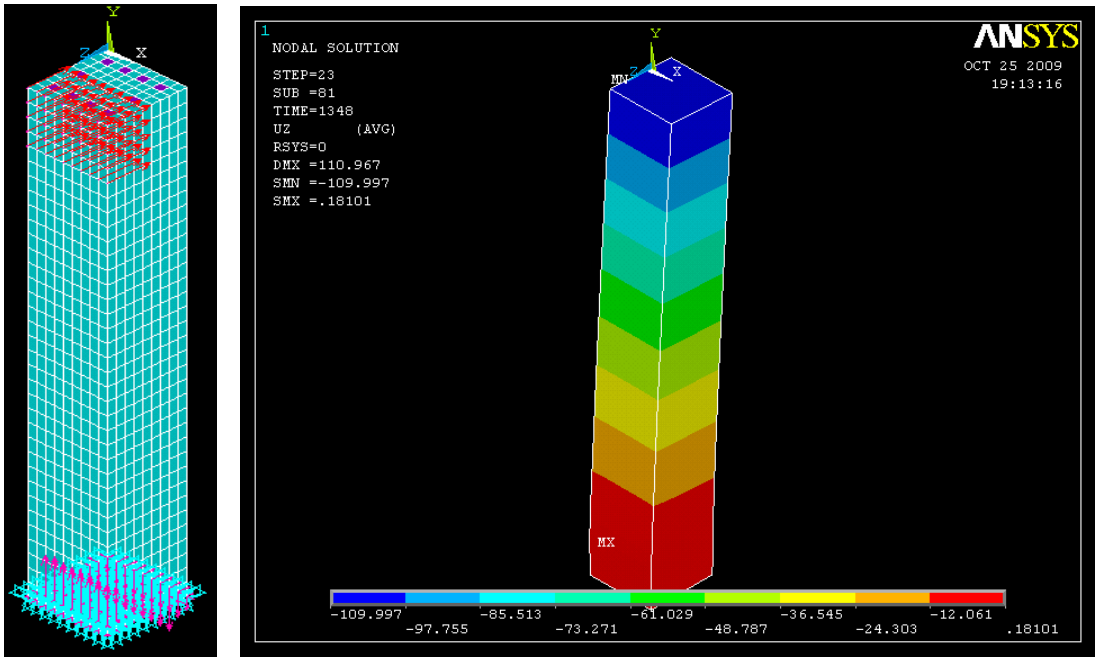
Ansys sonlu elemanlar paket programında yükleme adımları zaman artışı (time increment) veya artış adımı (number of substep) olarak verilebilir. Bu modele yük verilirken yük 60 adet noktaya zaman artışı olarak verilmiştir. Yakınsama açısından zaman adımı büyüklüğünün önemli olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca minumum ve maksimum zaman adım büyüklükleri de yakınsama açısından önemlidir. Örneğin, maksimum zaman adımına büyük bir değer verilirse analizin yakınsaması güçleşmektedir. Analiz için zaman kontrolü de otomatik olacak şekilde ayarlanmıştır. Yani bilgisayar maksimum ve minumum zaman adımları arasında analizin yakınsaması için en iyi artışı kendisi ayarlayacaktır.

Ansys sonlu elemanlar paket programı çözüm sonuçlarını bir dosya halinde bilgisayara kaydetmektedir. Örneğin tez konusu modelde 40 GB' lık bir data dosyası oluşturmuştur.

Gerekli analiz sonuçları Ansys içerisinden elde edilebilmektedir. Bunun için bilgisayara sadece Nodal DOF çözümlerinin yazılması sağlanmıştır. Frequency menüsünden de write every substep seçeneği seçilerek her adımın bilgisayara kaydedilmesi ve her adımdaki çözümlerin takip edilebilmesi amaçlanmıştır.

5.3.2 Tek Bir Kolonda FRP Malzemesinin Sünekliğe Etkisinin İncelenmesi

Tez çalışmasında 3 katlı modelin analizi yapılmadan önce bir çok kolon ve kiriş örnekler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu örnekte tek bir kolon FRP uygulanmış ve uygulanmamış olarak analiz edilmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Analiz 300x300 mm boyutlarında 2000 mm yüksekliğinde kolon üzerinde gerçekleştirilmiştir. 10Ø14 boyuna donatı tez konusu modeldeki gibi smeared (dağınık) şekilde modellenmiştir

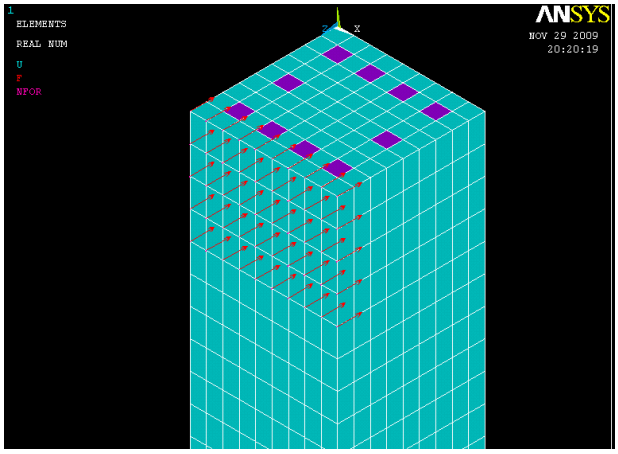


Şekil 5. 9. Tek Bir Kolonun Modeli.

Modele en üst noktadan 1/7 lik kısımdan 50 noktadan yükleme yapılmıştır.

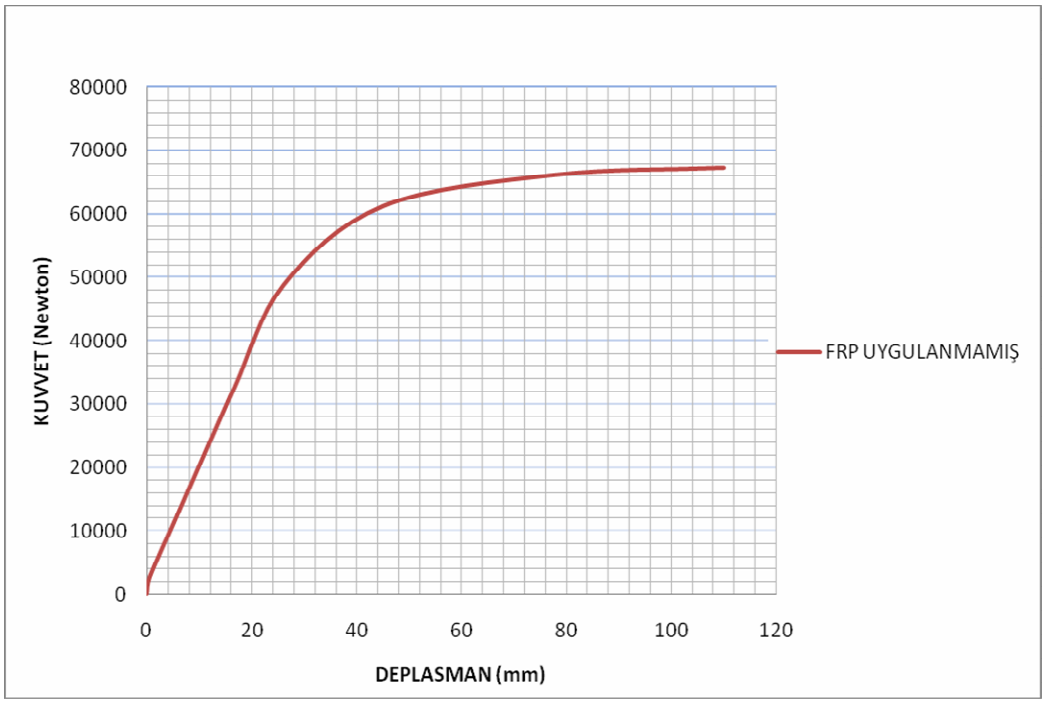
LOAD STEP	NEWTON
1	0- 180
2	180-250
3	250-350
4	350-400
5	400-1325

Tablo 5.1. Kolon Yükleme Adımları.



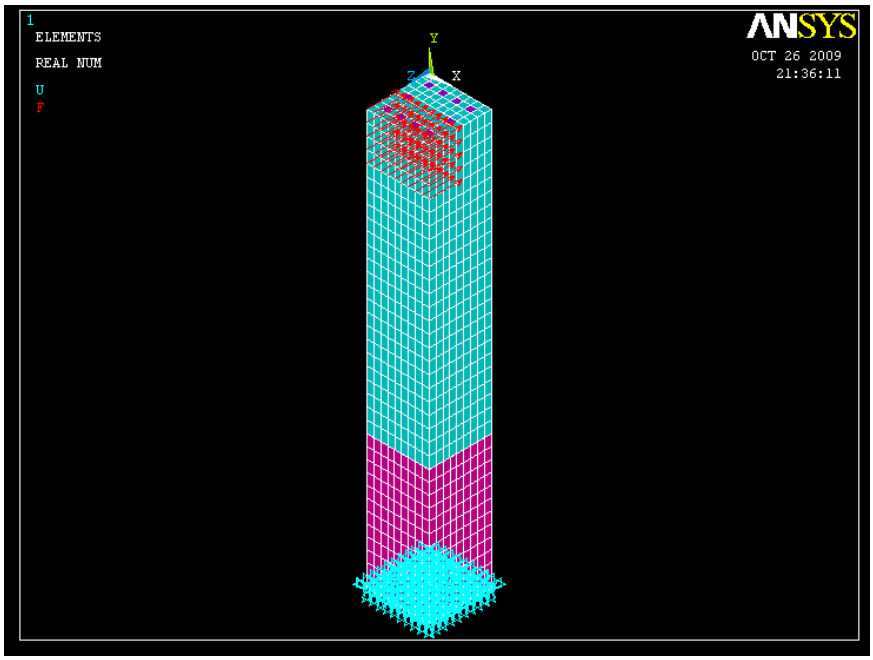
Şekil 5. 10. Tek Bir Kolona Yük Uygulanması.

Sonuç olarak modelin yük -deplasman eğrisi elde edilmiştir.



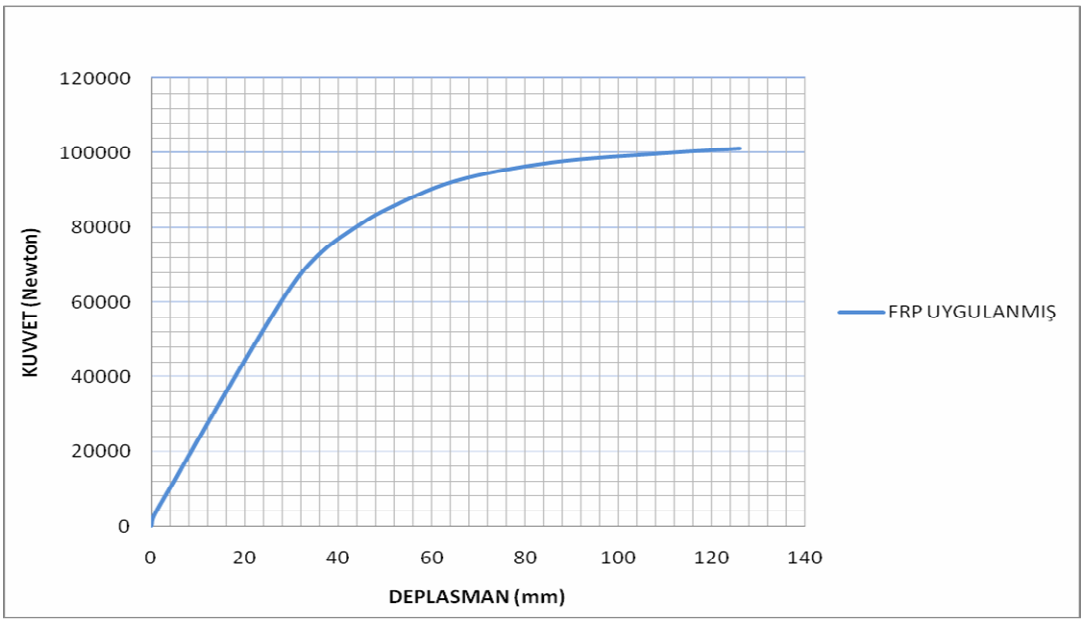
Şekil 5. 11. Kolon Yük Deplasman Eğrisi.

FRP uygulanmamış modelin analizi yapıldıktan sonra modelin üzerine FRP uygulanmıştır. Uygulanan FRP tez konusu modele uygulanan FRP ile aynı malzeme özelliklerini taşımaktadır. 0.117 mm kalınlığındaki bu plakalar kolonun 1/3' lük kısmına uygulanmıştır.



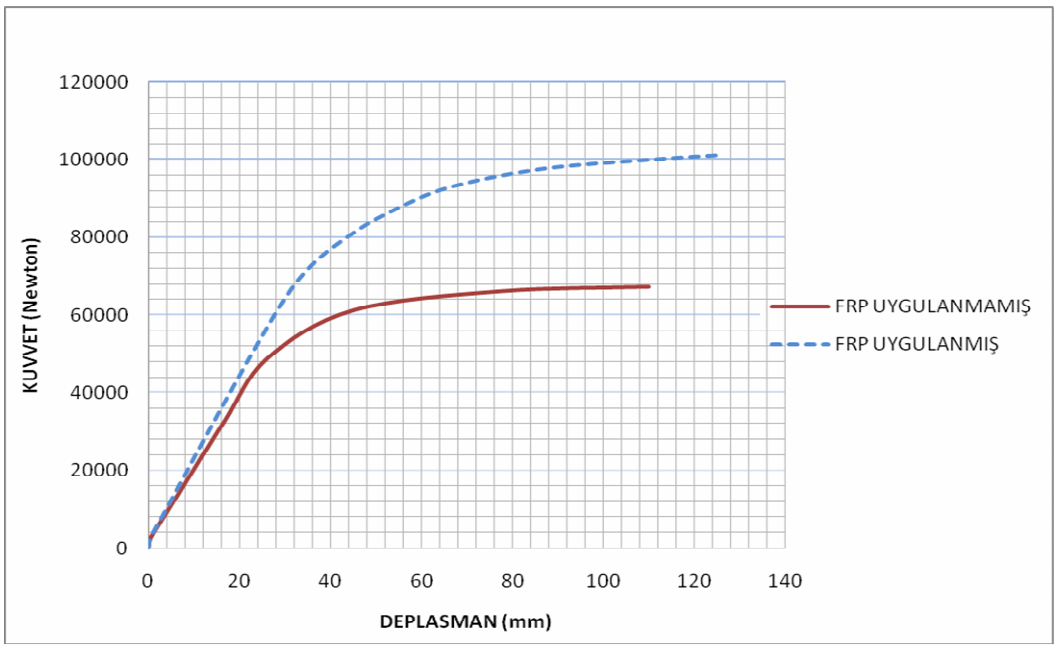
Şekil 5. 12. FRP Uygulanmış Kolon Modeli.

Aynı yükleme bu modele de uygulanmıştır. FRP uygulanmış modele, FRP uygulanmamış modelle aynı yükleme adımları uygulanmıştır. Sonuç olarak modelin yük- deplasman eğrisi elde edilmiştir.

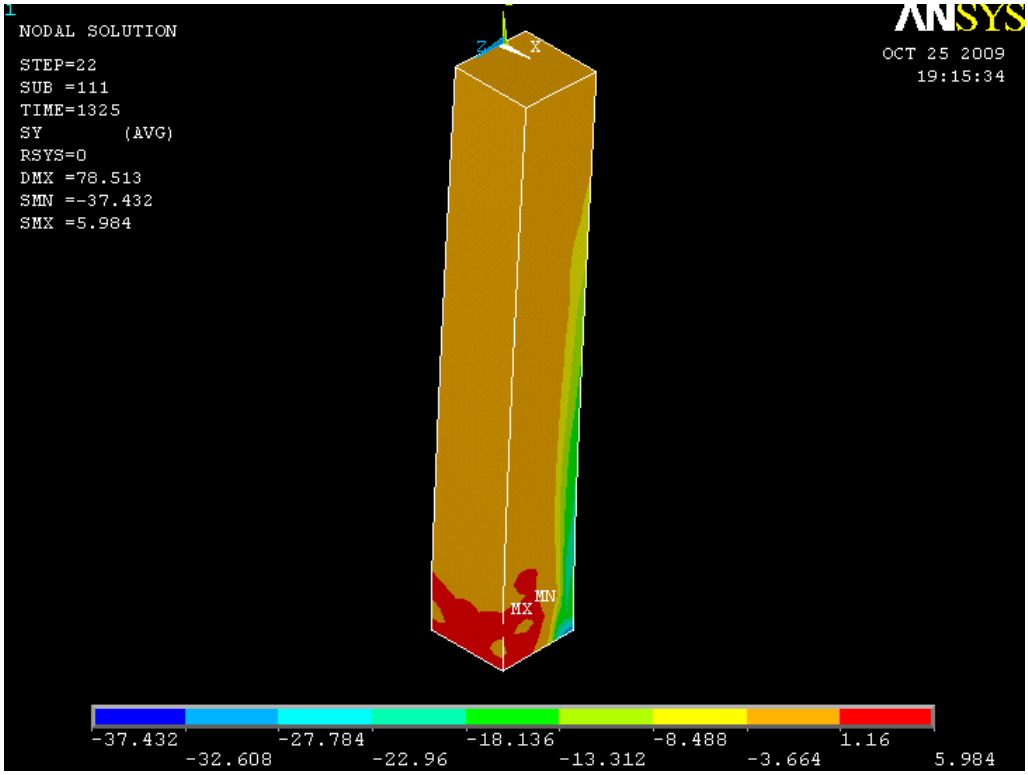


Şekil 5. 13. FRP Uygulanmış Kolon Yük Deplasman Eğrisi.

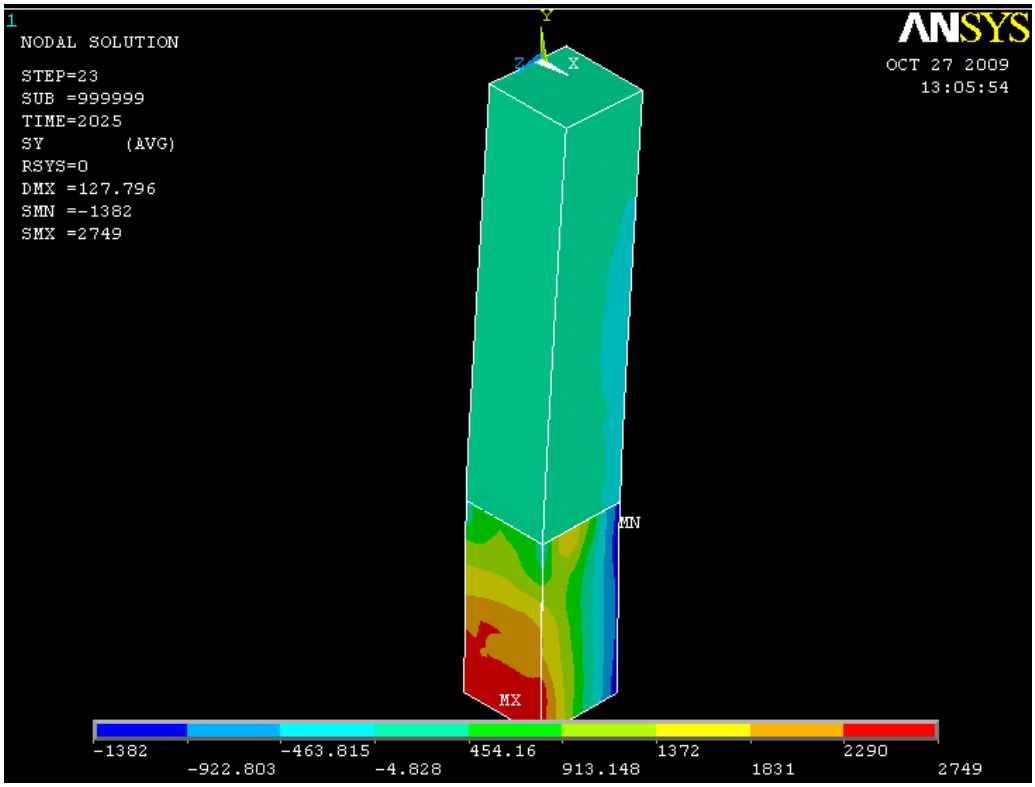
Bu iki modelden elde edilen eğriler kıyaslandığında FRP malzemesinin sünekliği artırdığı analitik olarak elde edilmiştir.



Şekil 5. 14. Yük Deplasman Eğrilerinin Karşılaştırılması.



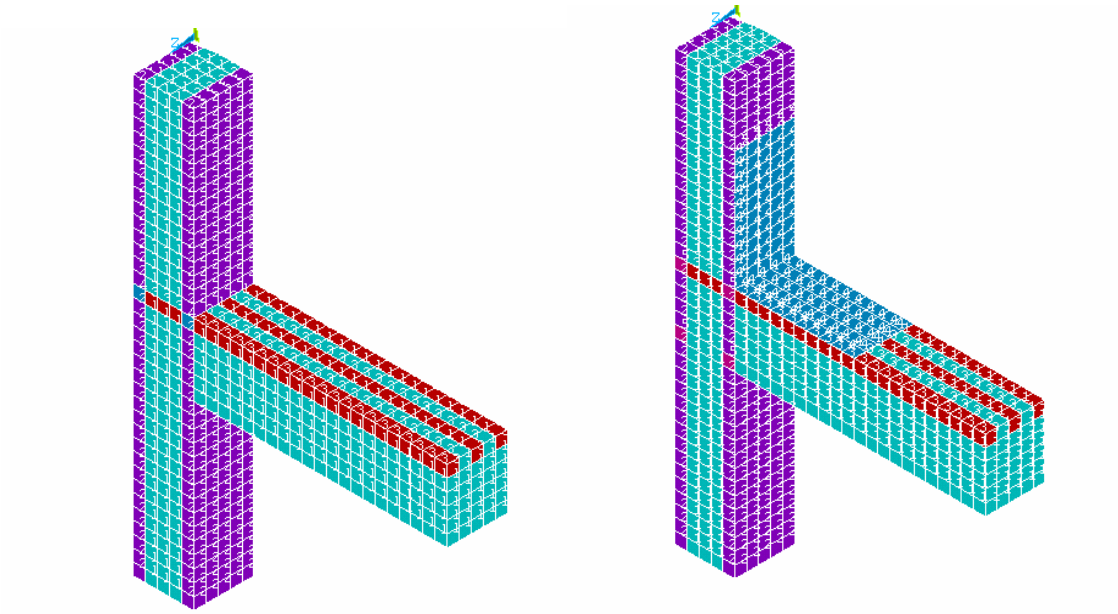
Şekil 5. 15. Tek Kolon Deplasman Grafiği.



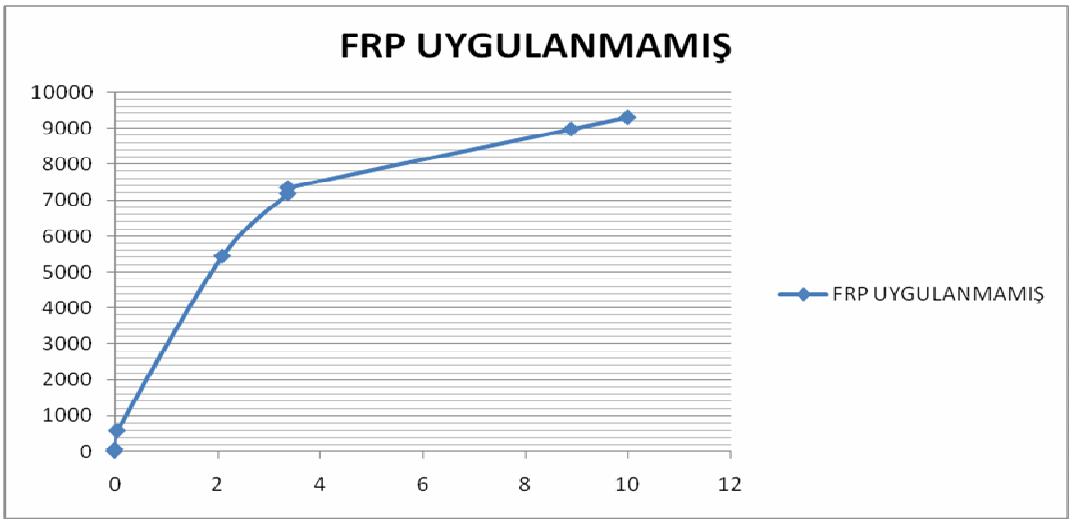
Şekil 5. 16. FRP uygulanmış tek kolon gerilme grafiği.

5.3.3 Düğüm noktasında FRP Malzemesinin Sünekliğe Etkisinin İncelenmesi

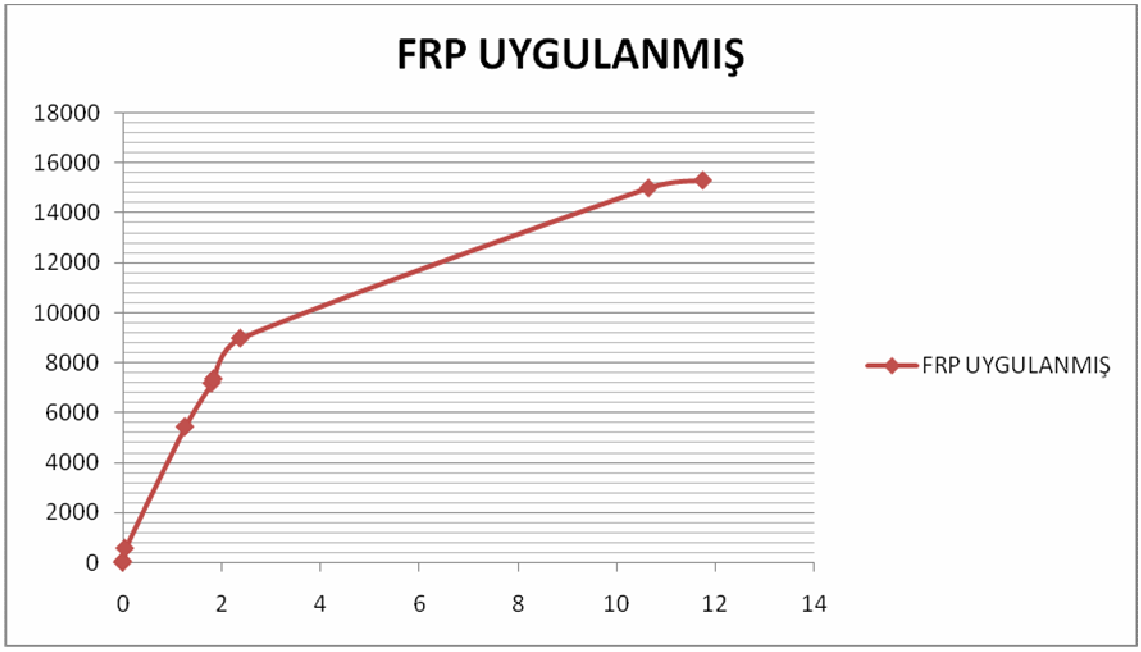
Tez konusu modelin analizi yapılmadan önce birçok model üzerinde denemeler yapılmıştır. Bu modellerden biri ise kolon kiriş birleşimden oluşan tek bir düğüm noktasıdır. Bu birleşimde kolon alttan ve üstten mesnetlenmiş ve eksenel yüklü şekilde modellenmiştir. Kiriş ucuna yükleme yapılarak model FRP sargılı ve sargısız olarak incelenmiş ve aşağıdaki eğriler elde edilmiştir.



Şekil 5. 17. Düğüm Noktası Modeli.

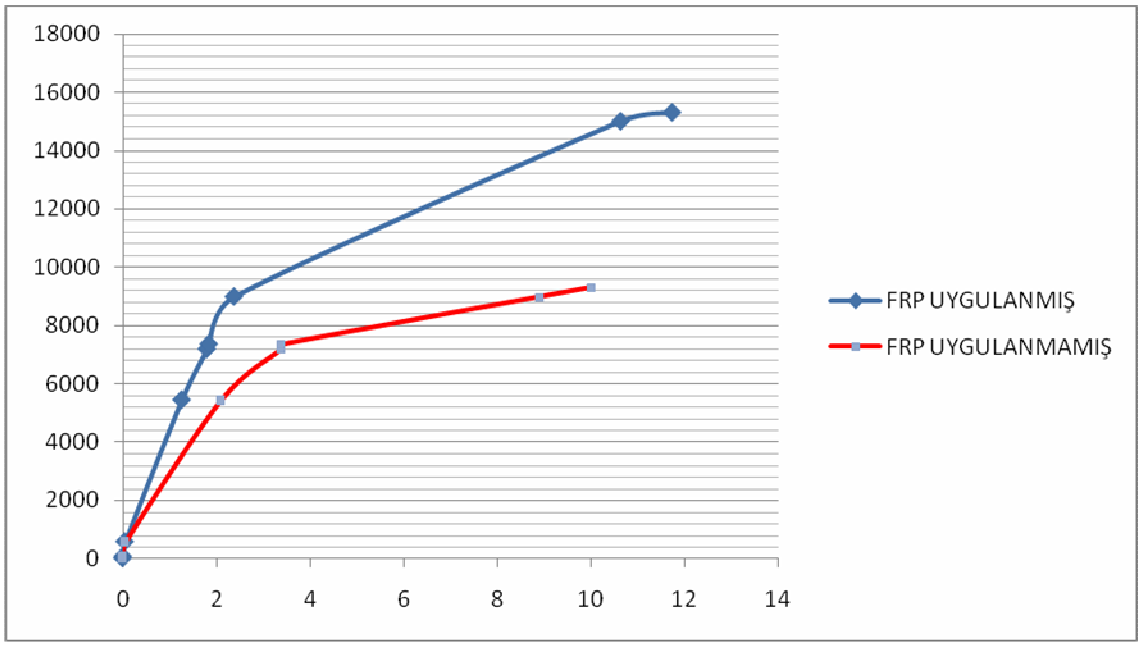


Şekil 5. 18. Düğüm Noktası Yük Deplasman Eğrisi.



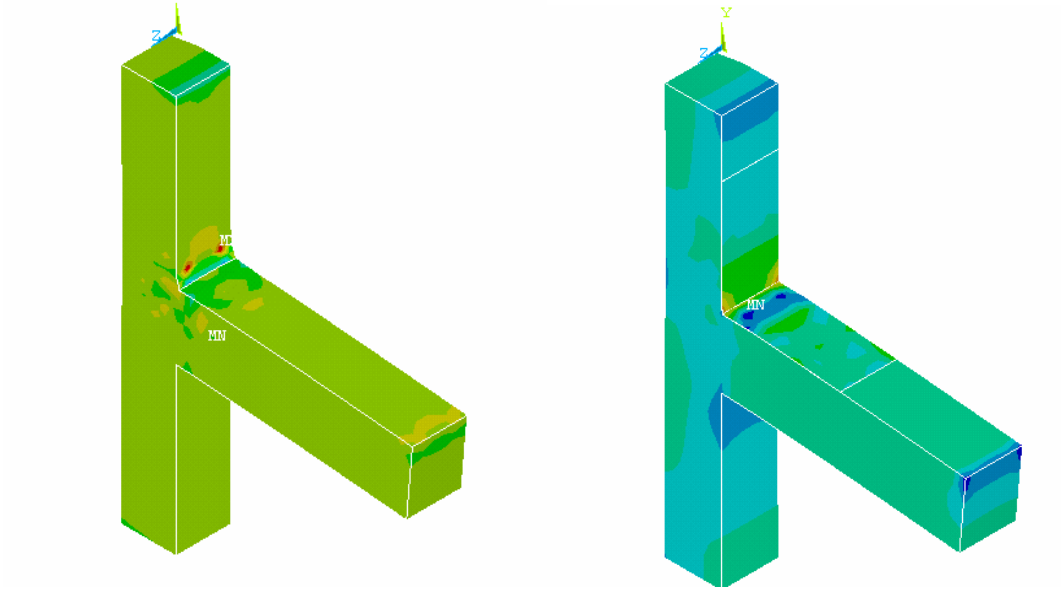
Şekil 5. 19. FRP Uygulanmış Düğüm Noktası Yük Deplasman Eğrisi.

FRP malzemesi olarak tez konusu modelde kullanılan malzeme özelliklerinin aynısı kullanılmıştır. Plaka L şeklinde düğüm noktasına yapıştırılmıştır.



Şekil 5. 20. Düğüm Noktası Yük Deplasman Eğrilerinin Karşılaştırması.

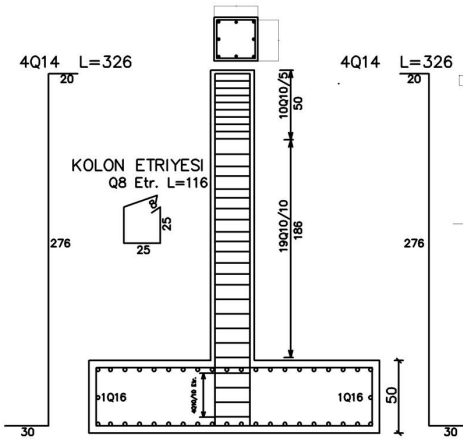
Yapılan analizler neticesinde FRP malzemesinin sünekliğe olan etkisi görülmüştür.



Şekil 5. 21. Düğüm Noktası Deplasman Grafikleri.

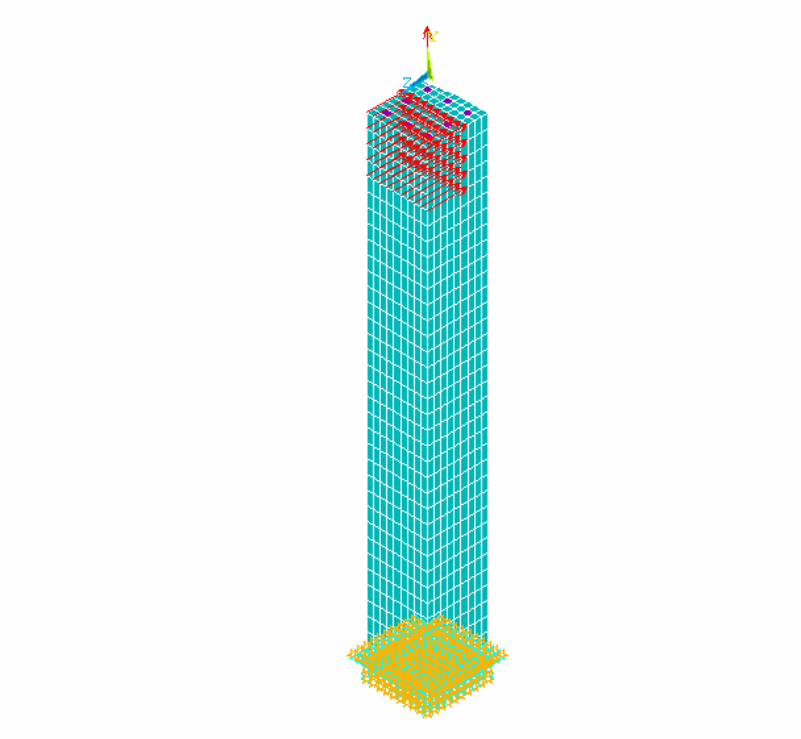
5.4 Tek Bir Kolon Deneyinin Analitik Olarak İncelenmesi

Erciyes Üniversitesi Deprem Araştırma Laboratuarında yapılan yüksek lisans tez çalışmasında tek bir kolon üzerinde çelik lif etkisi araştırılmıştır [42]. Bu tez kapsamında da tez konusu modelin oluşturulması aşamasında ANSYS programının çalışma prensibinin daha detaylı incelenmesi ve modellemenin daha doğru yapılabilmesi için tek bir kolonun deneysel yük deplasman eğrisi ile analitik olarak elde edilen yük deplasman eğrileri karşılaştırılmıştır.



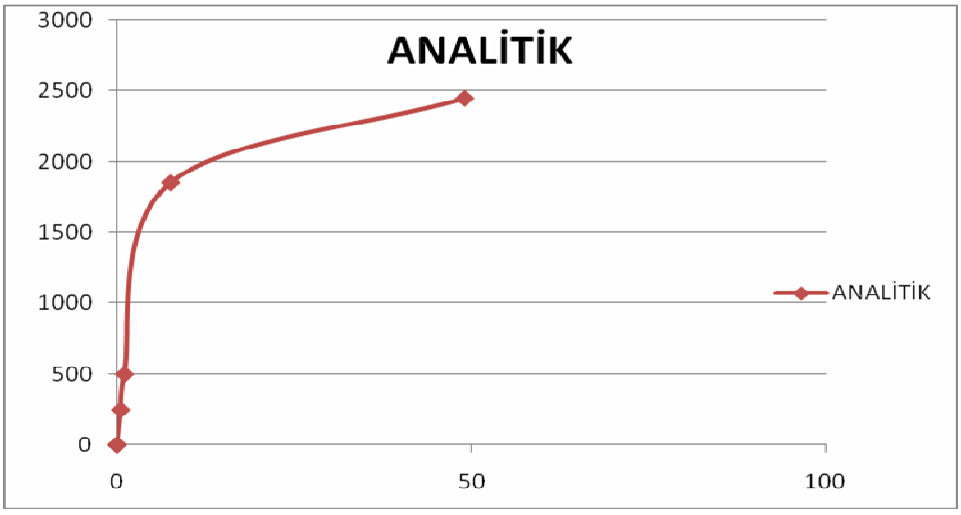
Şekil 5. 22. Tek Bir Kolon Deneyi Çizimi [42].

Tez çalışmasında üretilen kolonun şekli yukarıda verilmiştir. Bu kolon ANSYS sonlu elemanlar paket programı ile deney şartlarına uygun olarak modellenmiştir.

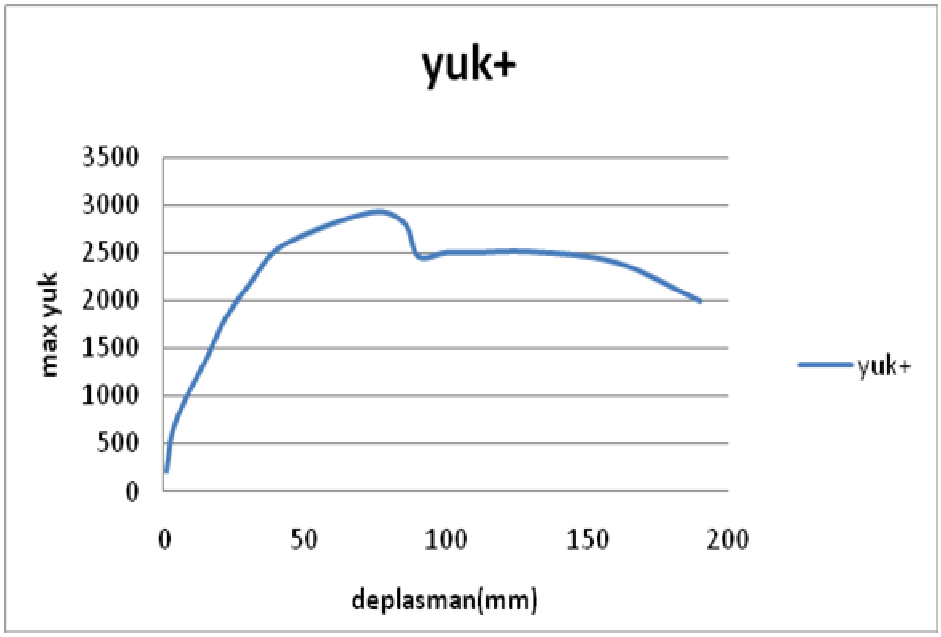


Şekil 5. 23. Tek Bir Kolon Deneyi Modeli.

Yükleme yeri deneye uygun olarak ayarlanmıştır. Sonuç olarak aşağıdaki eğri elde edilmiştir.

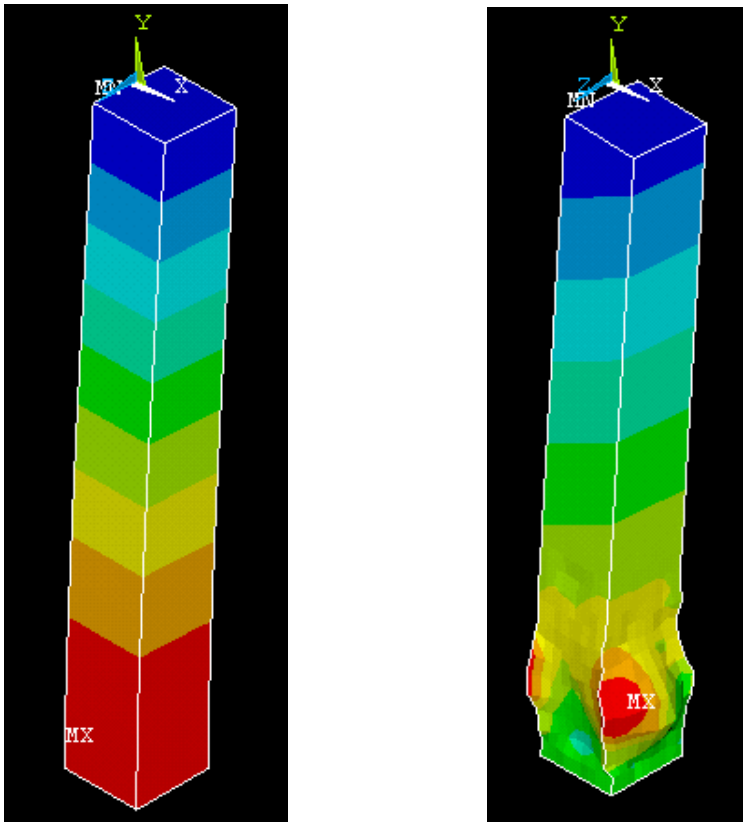


Şekil 5. 24. Tek Bir Kolon Model Yük Deplasman Eğrisi.



Şekil 5. 25. Tek Bir Kolon Deney Yük Deplasman Eğrisi.

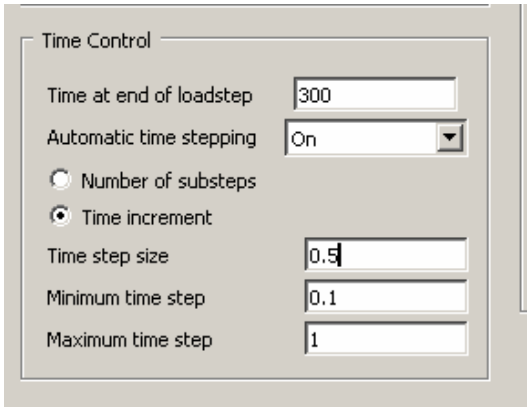
Sonuç olarak akma yüklerinin ve buna karşılık gelen deplasman değerlerinin yakın olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ancak analitik çalışmadan elde edilen eğrinin daha rijit davrandığı gözlenmiştir. Bunun nedenleri Bölüm 6 Bulgular başlığı altında belirtilmiştir.



Şekil 5. 26. Tek Bir Kolon Deneyi Model Deplasman Grafikleri.

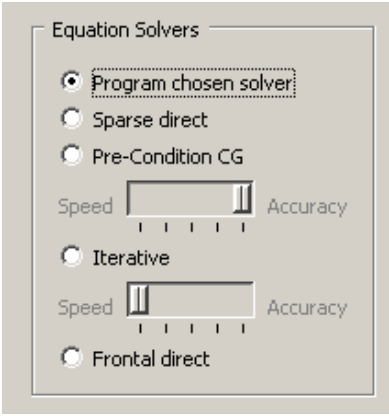
5.5 Tez Konusu Modelin Analizi

Tez konusu modelin analizi yapılmadan önce tek bir kolon, kiriş ve düğüm noktası üzerinde birçok deneme yapıldıktan sonra tez konusu modelin analiz aşamasına geçilmiştir. Bu denemeler ANSYS sonlu elemanlar programını daha iyi tanıyabilmek ve 3 katlı bir modelde karşılaşılabilecek problemleri en aza indirmek için yapılmıştır. Bu nedenle model oluşturulduktan sonra analiz aşaması çok zaman almıştır. Bölüm 5.3 de bahsedildiği üzere modele yük 60 adet noktadan z yönünde verilmiştir.



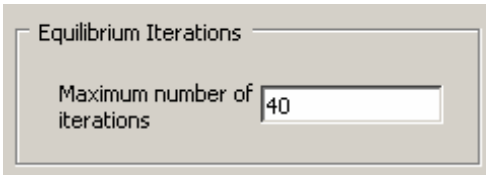
Şekil 5. 27. Tez Konusu Model Yükleme Adımları.

Modele ilk Load Step olarak her noktaya 300 Newton yük verilmiştir. Analizin sonlarına doğru artış adımı 0.5 Newton, minumum artış adımı 0.1 N ve maksimum artış adımıda 1 N olarak ayarlanmıştır. (Şekil 5.27) Automatic Time Stepping opsiyonu on olarak seçilmiş ve bilgisayarın 0.1 N ile 1 N arasında artış adımını belirleyebilmesi sağlanmıştır. (Şekil 5.28)



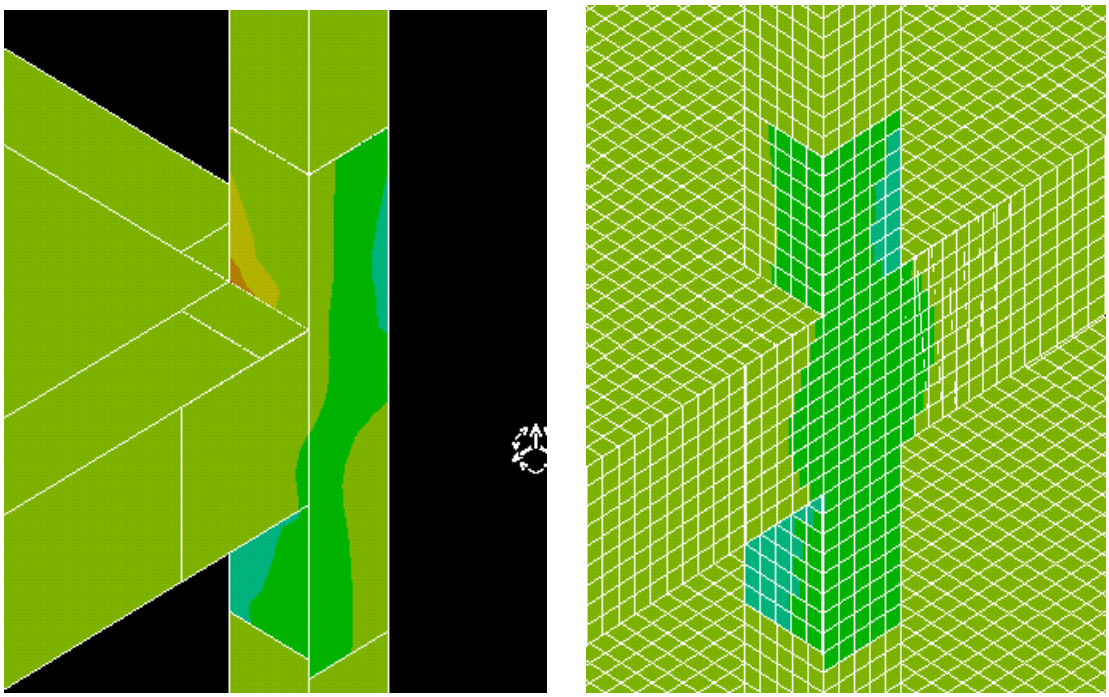
Şekil 5. 28. Tez Konusu Model Çözüm Opsiyonları.

Equation solver opsiyonunu bilgisayarın kendisi seçmesi sağlanmıştır. Ancak sparse direct seçeneği seçildiğinde de analiz açısından problem olmamıştır. Analizle durdurulup kontrol yapıldığında bilgisayarın sparse direct seçeneğini seçtiği tespit edilmiştir.



Şekil 5. 29. Tez Konusu Model Çözüm Opsiyonları.

Analize ilk başlandığında maksimum iterasyon sayısı 40 olarak ayarlanmıştır.(Şekil 5.29) Çünkü bir çok denemeden de anlaşılmıştır ki analizlerde bilgisayarın default olarak ayarlanmış olan 25 iterasyon sayısı aşılmaktadır. Yani analiz 25 iterasyonun üzerinde yakınsayabilmektedir. Bu düzenlemeler yapıldıktan sonra model kontrol edilip analize başlanmıştır.(Şekil 5.30)



Şekil 5. 30. Tez Konusu Model Düğüm Noktası Gerilme Grafikleri.

6.BÖLÜM
SONUÇ

Bu tez çalışmasının sonuç kısmında Ansys Sonlu elemanlar paket programının İnşaat Mühendisliğinde kullanımı, betonarme bir elemanın modellenmesi, analitik sonuçların deneysel datalarla uygunluğu üzerinde durulacaktır.

6.1 Ansys Sonlu Elamanlar Programının İnşaat Mühendisliğinde Kullanımı

Bu tez çalışmasında 3 katlı betonarme modelin yük-deplasman ilişkisini çıkarmak için Ansys haricinde İnşaat Mühendisliği programlarında modelleme yapılmıştır. Ancak ilk bölümde de bahsedildiği üzere FRP malzemesinin tanımlanmasına olanak veren bir çözüm bulunamamıştır. Tez kapsamında modellemenin Ansys sonlu elemanlar programı ile yapılabileceği literatür incelemesinden sonra anlaşılmıştır. Fakat literatürde en fazla Ansys programı ile çerçeve analizi yapıldığı, diğer çalışmaların sadece tek bir kolon yada kiriş üzerinde yoğunlaştığı gözlenmiştir. Ansys paket programının internet sitesinde referans olarak yapısal modellemeler yapıldığından bahsedilmiştir. Ancak modelleme aşamaları ile ilgili bilgiler verilmemiş görsel olarak anlatım yapılmıştır.

Ansys sonlu elamanlar programıyla tez konusu model üzerinde birçok denemeler yapılmıştır. İlk olarak model FRP uygulanmamış şekilde modellenmiş ve çözüm denemeleri yapılmıştır. Ansys paket programında eleman bazında analiz yaparken ciddi bir işlemci gücüne gerek olmamaktadır. Ancak tez kapsamında modellenen yapının analizini yapmak ciddi bir zaman almıştır. Analizler işlemci gücü yüksek bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmadan Ansys programının kullanımı ile ilgili şu sonuç çıkarılmıştır. Ansys programı İnşaat Mühendisliğinde bilinen analizler için pratik bir program değildir. Öte yandan teorik çalışmalarda, modellenmesi zor kompozit elemanlarda ve daha çok akademik amaçlı kullanımlarda çok geçerli bir programdır. Literatürde kullanımı

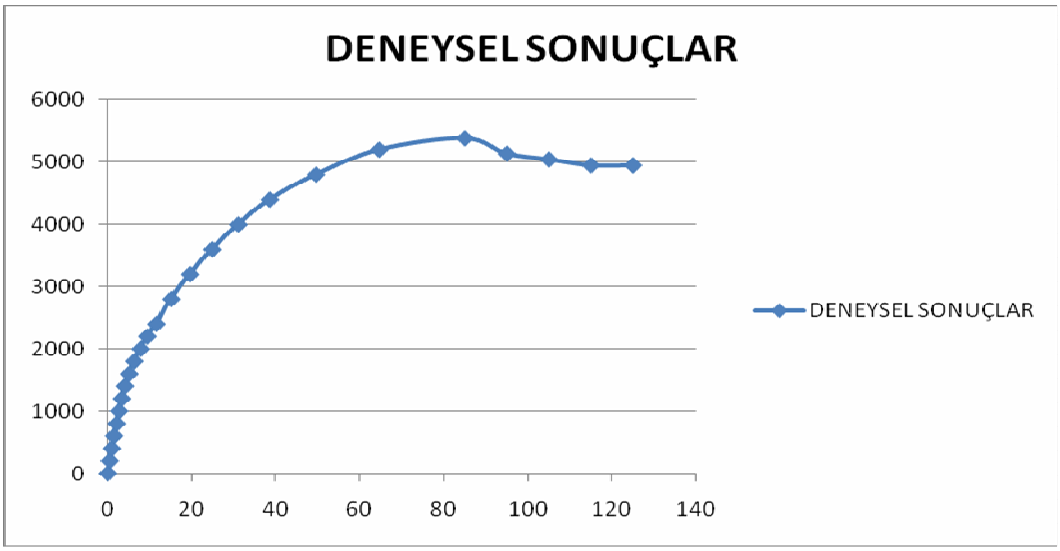
oldukça yaygındır ve programının Ansys Workbench, Ansys Structural gibi yeni versiyonlarıyla ileride birçok çalışmada kullanılacağı tahmin edilmektedir.
Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere Ansys paket programı kütüphanesinde betonarme için hazır modeller bulunmaktadır. Bu, modelleme için büyük bir kolaylık sağlamaktadır. Çünkü donatı bu modelin içinde tanımlanabilmektedir. FRP malzemesi içinde uygun modeller vardır. FRP malzemesinin betonarme eleman üzerine modellenmesinde Select-Entities menüsü oldukça yararlı olmuştur. Tez konusu modelden ve bu model oluşturuluncaya kadar yapılan çalışmalardan Ansys sonlu elemanlar paket programı ile betonarme bir elemanın ya da sistemin davranışı doğru bir şekilde çıkarılabilmektedir. Bu sonuç literatür çalışmalarıyla da desteklenmiştir. Ancak Ansys sonlu elemanlar paket programında modelleme çok önemlidir. Modelleme sırasında parametreler doğru ve gerçek modele uygun girilmelidir. Bu hem analizin yakınsaması hem de doğru sonuçlar elde etmek için önemlidir.

6.2 Analitik Sonuçlar İle Deneysel Dataların Uygunluğu

Güçlendirilmiş 3 katlı modelin deneylerinden elde edilen datalar aşağıdaki tabloda verilmiştir. Deneyde 125 mm değerine kadar itme yapılmıştır. Ansys modelinde bu değere kadar itme yapmak çok zordur çünkü modelimiz 188000 elemandan oluşmaktadır. Çözümün belirli bir değerden sonra ilerlemesi çok güç olmaktadır. Bunun için server desteği alınmalıdır. Normal bir bilgisayarla 125 mm değerine ulaşmak bu nedenle zordur. Fakat çalışmada deneysel datalarla modelden elde edilen sonuçların analiz yapılabilen değere kadar uygun olduğu görülmüştür. Farklılıkların nedenleri de bölüm sonunda verilmiştir.

POZİTİF YÖN			
yük (KGF)	**üst dep**	**yük (KN)**	**üst dep**
0	0	0,000	0
200	0,462	1,960	0,462
400	0,967	3,920	0,967
600	1,484	5,880	1,484
800	2,13	7,840	2,13
1000	2,7	9,800	2,7
1200	3,34	11,760	3,34
1400	4,08	13,720	4,08
1600	5,091	15,680	5,091
1800	6,317	17,640	6,317
2000	7,84	19,600	7,84
2200	9,4	21,560	9,4
2400	11,55	23,520	11,55
2800	15,12	27,440	15,12
3200	19,6	31,360	19,6
3600	24,85	35,280	24,85
4000	31,07	39,200	31,07
4400	38,56	43,120	38,56
4800	49,56	47,040	49,56
5200	64,6	50,960	64,6
5385	85	52,773	85
5137	95	50,343	95
5045	105	49,441	105
4950	115	48,510	115
4950	125	48,510	125

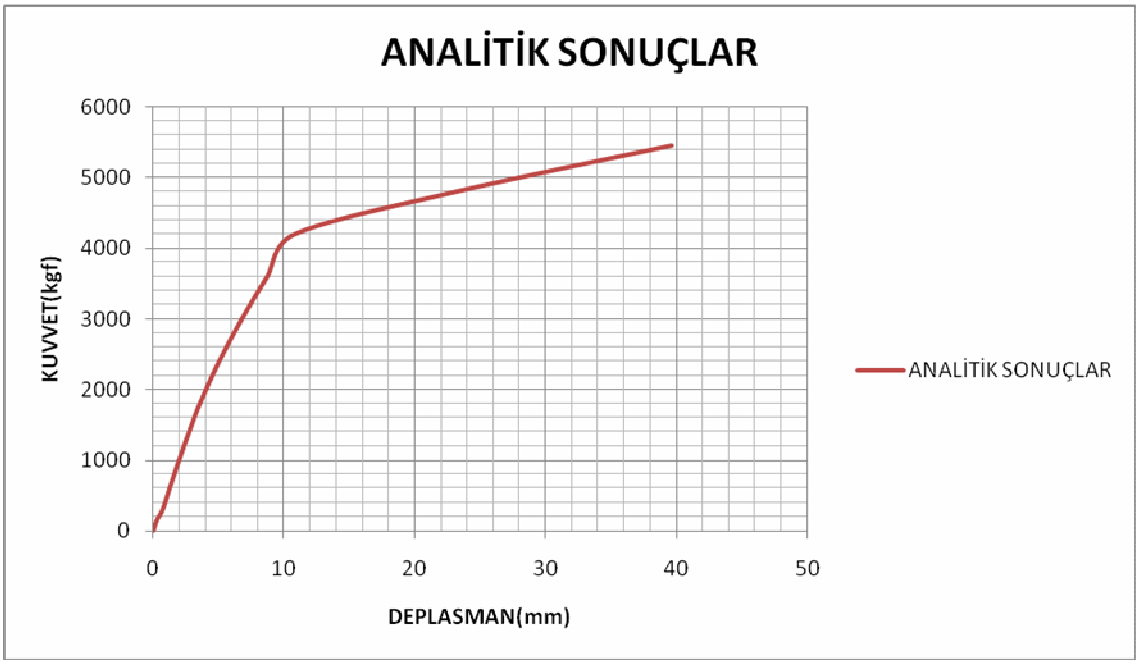
Tablo 6.1. Tez Konusu Model Deney Verileri.



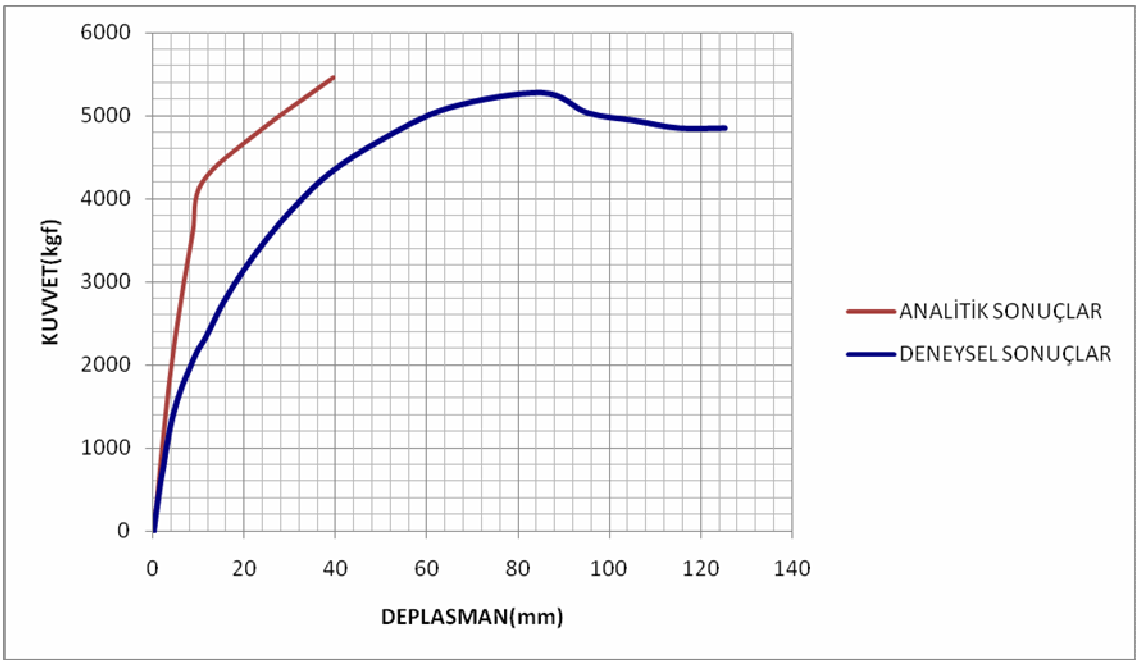
Şekil 6.1. Tez Konusu Model Deneysel Yük Deplasman Grafiği[22].

POZİTİF YÖN			
yük (KGF)	**üst dep**	**yük (KN)**	**üst dep**
0,06	0,00011	0,0006	0,00011
0,12	0,00022	0,001	0,00022
0,84	0,0015	0,008	0,0015
6,858	0,0128	0,069	0,0128
52,44	0,098	0,524	0,098
152,22	0,28	1,522	0,28
300	0,72	3,000	0,72
600	1,25	6,000	1,25
900	1,79	9,000	1,79
1200	2,35	12,000	2,35
1500	2,94	15,000	2,94
1800	3,56	18,000	3,56
2400	5,04	24,000	5,04
3000	6,77	30,000	6,77
3600	8,717	36,000	8,717
4200	10,82	42,000	10,82
4800	23,08	48,000	13,08
5457	39,627	54,570	15,627

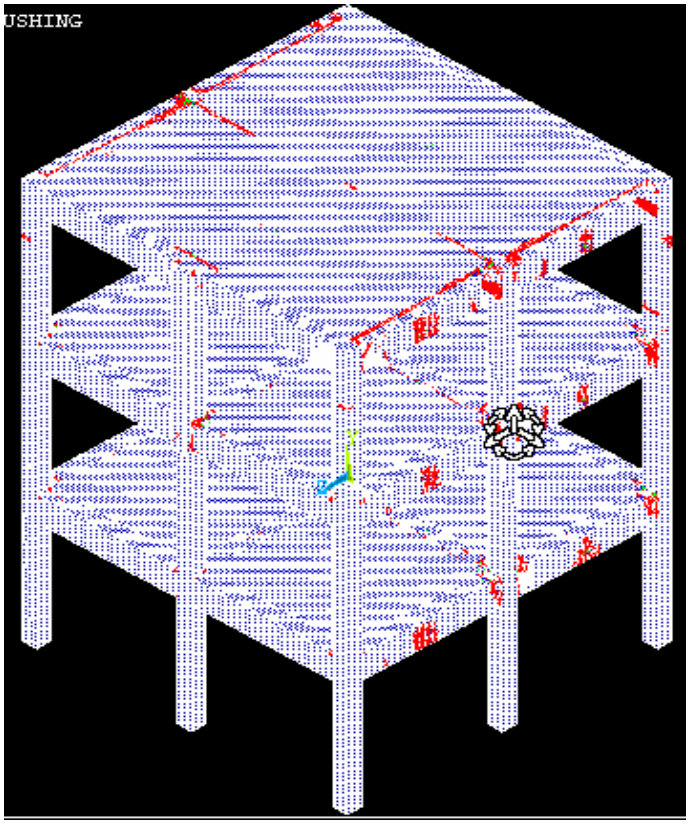
Tablo 6.2. Tez Konusu Model Analitik Çalışma Sonuçları



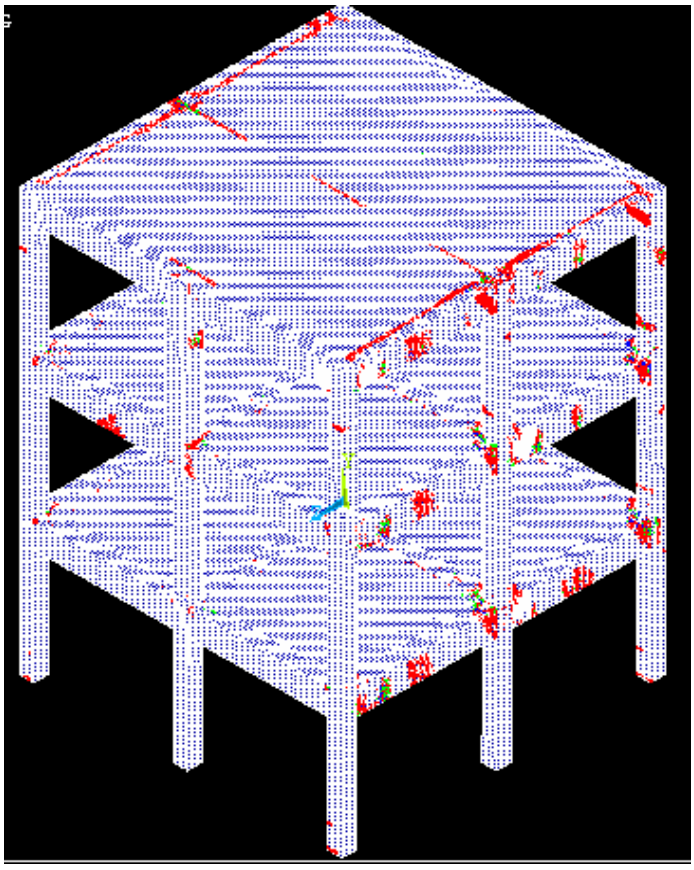
Şekil 6.2. Tez Konusu Model Analitik Yük Deplasman Grafiği.



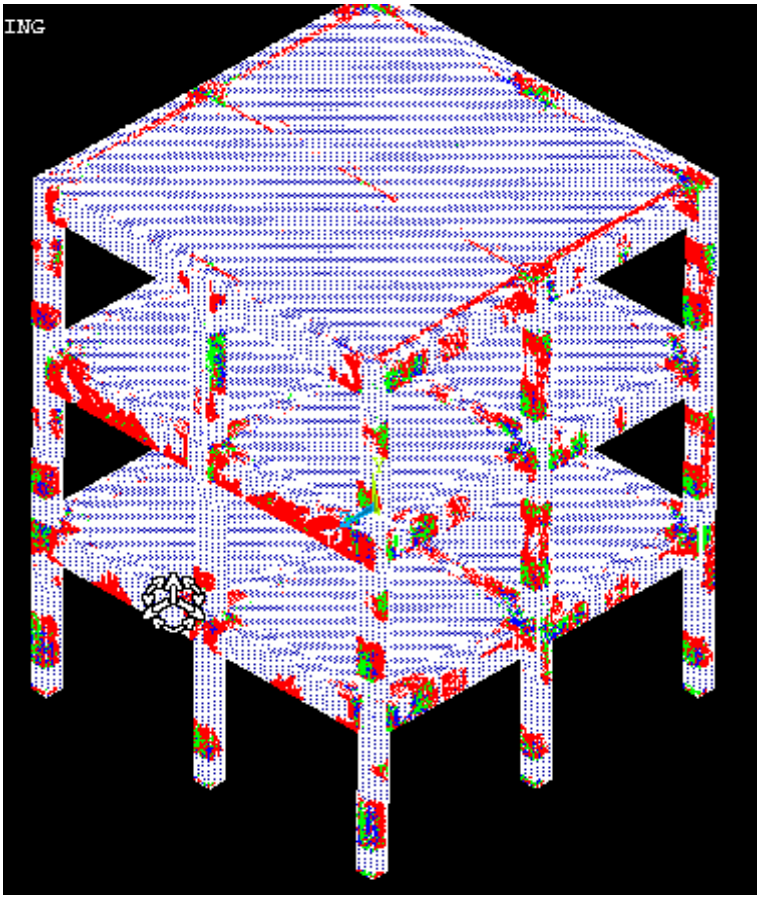
Şekil 6.3. Tez Konusu Model Deneysel ve Analitik Yük Deplasman Grafiği Karşılaştırması.



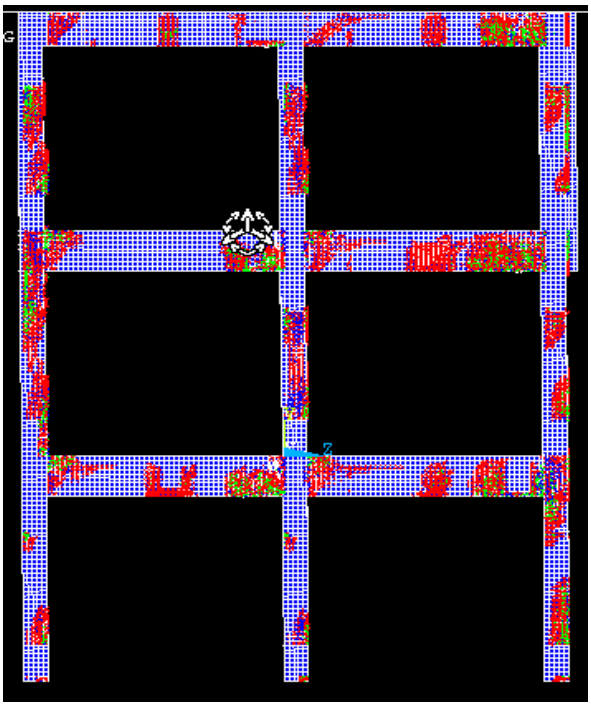
Şekil 6.4. Üçüncü Yükleme Adımı Çatlak Oluşumu.



Şekil 6.5. On İkinci Yükleme Adımı Çatlak Oluşumu.



Şekil 6.6. Son Yükleme Adımı Çatlak Oluşumu.



Şekil 6.7. Son Yükleme Adımı Çatlak Oluşum.

6.3 Bulgular

Tez çalışmamızda 3 katlı 2 açıklıkla her katında yaklaşık 2.5 ton düşey yük bulunan bir numune ANSYS sonlu elemanlar paket programında modellenmiştir. Deneysel verilerle analiz verilerinin kıyaslaması yapılmıştır. Modelin deney verilerine göre daha rijit davrandığı gözlenmiştir. Ayrıca ANSYS paket programı ile ilgili bazı tespitler yapılmıştır. Aşağıda verilerin kıyaslanması ve program ile ilgili tespitler sıralanmıştır.

- ANSYS sonlu elemanlar paket programı ile yapılan analizde kuvvet deplasman eğrisinin eğiminin daha dik ilerlediği görülmüştür. Bu program içerisinde tanımlanan parametrelerle ilgili olduğu gibi, gerçek numunenin daha çok kusurlu olmasından da kaynaklanabilmektedir. Analitik eğrinin deneysel eğriden farklı çıkmasının başka bir nedeni ise, deney numunesinin ön hasar gördükten sonra güçlendirilmesi şeklinde açıklanabilir. Çünkü model hiç hasar görmemiş bir numunenin üzerine FRP sarılmasını temsil etmektedir. Ayrıca modelde yaparken FRP plakaları model yüzeyine bütün noktalardan bağlı olarak modellenmiştir. FRP ve beton arasına kontak elemanları tanımlanarak da model oluşturulmuştur. Gerçek davranışı daha iyi temsil eden bu modelde çok küçük adımlarda dahi yakınsama sağlanamamıştır. Deney sırasında bazı eleman yüzeyindeki FRP plakalarının sıyrılmaya başladığı gözlenmiştir. Bu durum da modelden elde edilen eğrinin daha rijit olmasının bir sebebidir.

- ANSYS paket programı ile yapılan analizlerde yük deplasman eğrisinin lineer bölgesini elde etmek kolay olmaktadır. Ancak nonlineer bölgenin elde edilmesi adım sayısını artırmak ilave iterasyonlar eklemek ile mümkün olabilmektedir. Nonlineer bölgenin elde edilmesi de belli bir değere kadar mümkün olabilmektedir. Belirli bir değerden sonra analizler yakınsamamaktadır. Bu çalışmada tek bir eleman üzerinde yapılan analizlerde eğriler daha kolay elde edilebilmiştir. Bu kolaylık işlem yoğunluğu ile doğru orantılıdır.

- Modelleme yaparken donatılar hacim içerisinde yayılı olarak tanımlama yapılmıştır. Literatürde bu şekilde tanımlamanın ayrık donatı modellemesine göre daha iyi sonuçlar verdiği araştırılmıştır. Fakat bu modelleme tarzının donatının tam yerinde tanımlanamaması gibi bir dezavantajı vardır.

- Modelleme yaparken tanımlanan kapalı çatlak için kayma transfer katsayısı ve açık çatlaklar için kayma transfer katsayısı parametrelerinin analizin yakınsaması açısından önemli olduğu tespit edilmiştir.

- Modelin mesnet şartlarının iyi tanımlanması gerekir. Mesnet şartları doğru bir şekilde tanımlanmaz ise yakınsama için problem oluşmaktadır.

- Yükün uygulandığı noktaya yük uygulama mesnedi tanımlamak analizin daha kolay yakınsamasına olanak vermektedir.

- Bu tez kapsamında 188000 elemanlı bir analiz yapılmış ve yük belli sayıda load step ile verilmiştir. Her load step de program dosyası içerisine (.rnn) uzantılı dosyalar kaydedilmektedir. Eğer bu dosyalar silinir ya da üzerine analiz yapılırsa problemler çıkmaktadır.

- Programda analizin ilerleyen bölümlerinde VALUE is maximum number of results exceeding şeklinde bir hata uyarısı olmaktadır. Bu hata program açılırken /CONFIG,NRES,10000 komutu ile giderilmiştir.

- Analizler small displacement statik olarak yapılmıştır. Large displacement statik seçeneği kullanıldığında yakınsama problemi oluşmaktadır.

- En doğru modellemeyi yapabilmek için hem eleman bazında hem de tez konusu numune üzerinde yüzlerce analiz yapılmıştır. Analizlerde yukarıda belirtilen deplasman değerinden sonra yakınsama sağlanamamıştır.

- Analiz sonuç dosyası 40 GB yer kaplamıştır. Ayrıca değerlerin bir hata sonucu kaybolmaması için kopyalama yapılmıştır. Bilgisayarda analiz için yeterli alanın bulunması gerekir.

- Yük deplasman eğrisinin analitik olarak daha büyük deplasman seviyelerine ulaşması için yüzlerce analiz yapılmıştır. Fakat bu noktadan ileri gidilememiştir. Bunun nedeninin analiz sırasında oluşan small pivot terms hatasından kaynaklanabildiği araştırılmıştır. Bir çok parametrenin etki ettiği ve analizlerin aylarca sürdüğü bu modellemede belirtilen deplasman seviyesine ulaşmak ciddi çalışma ve sabır gerektirmiştir.

- Sonuç olarak, özellikleri verilen deney numunesi sonuçları ile analitik sonuçlar uyumlu olmuştur. Bu tez çalışması ile bu durum değerlendirildiğinde deneysel çalışmanın zor olduğu üç boyutlu numune yerine ANSYS ile doğru modelleme yapmak koşulu ile analitik çözüm yapılması ve davranışın tahmin edilmesi mümkün olabilmektedir.

KAYNAKLAR

1. ABYYHY Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, s.1, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, Mart 2007.

2. Bilgin, H., Özmen, H.B., İnel, M., Kamu Yapılarının Performanslarının Doğrusal Ötesi Davranış Modelleriyle Değerlendirilmesi, Deprem Sempozyumu, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 556, Mart 23-25, 2005

3. Lifli Polimer (FRP) Güçlendirme sistemleri, BASF Yapı Kimyasalları Rehberi, BASF Yapı Kimyasalları Sanayi A.Ş, s.3-11, İstanbul, 2008

4. Triantafillou, T.C., Plevris, N., Strenghtening of RC Beams with Epoxy Bonded Fibre Composite Materials, Materials and Structures, 25, 201-211, 1992

5. Norris, T., Saadatmanesh, H., Ehsani, M.R. Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets, Journal of Structural Engineering, ASCE, 123, 903-911, 1997.

6. Anıl, Ö., Belgin, M.Ç., Monotonik Yükleme Etkisi Altındaki Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Doğrusal Olmayan Analizi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22, 191-197, 2007.

7. Hsuan-Teh, H., Ming Lin, F., Yih-Yuan, J., Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened By Fiber-Reinforced Plastics, Composite Structures, 63, 271-281, 2004.

8. Büyükkaragöz, A., Kopraman, Y., Eksenel Yük Etkisi Altındaki Kare Kesitli Mantolanmış Kolonun sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23, 309-315, 2008.

9. Li, G., Kidane, S., Pang, S.S., Helms, J.E., Stubblefield, M.A., Investigation into FRP repaired RC columns, Composite Structures, 62, 83–89, 2003.

10. Parvin, A., Granata, P., Investigation On The Effects of Fiber Composites at Concrete Joints, Composites: Part B, 31, 499-509, 2000.

11. Engindeniz, M., Kahn, L.F., Zureick, A-H. Bidirectional Loading of Pre-1970 RC Corner Beam-Column Joints Before and After Rehabilitation with CFRP Composites, Sixth National Conference on Earthquake Engineering, 551-562, , Istanbul, Turkey, 16-20 October, 2007.

12. Binici, B., Özcebe, G. Seismic Evaluation of Infilled Reinforced Concrete Frames Strengthened With FRPS, Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, , San Francisco, California, USA, 18-22 April, 2006.

13. Balsamo, A., Colombo, A., Manfredi, G., Negro, P., Prota, A. Seismic Behavior of a Full-Scale RC Frame Repaired Using CFRP Laminates, Engineering Structures, 27, 769-780, 2005.

14. Camata, G., Spacone, E., Zarnic, R., Experimental and Nonlinear Finite Element Studies of RC Beams Strengthened With FRP Plates, Composites: Part B, 38, 277-288, 2007.

15. Chansawat, K., Kachlakev, D., Miller, T.H., Y, S.C.S., FE Modeling and Experimental Verification of an FRP Strengthened Bridge, Technical Report, Oregon State University, Oregon, USA.

16. Elyasian, I., Abdoli, N., Ronagh, H.R., Evaluation of Parameters Effective in FRP Shear Strenghtening of RC Beams Using FE Method, Asıan Journal Of Civil Engineering (Building And Housing), 7, 249-257, 2006.

17. Bardaro, D., Mani, O., Corvaglia, P., Modarelli, R., Primo, T., Experimental Study And Numerical Modelling of Solid And Hollow FRP Confined Concrete Members, Technical Report, Department of Materials and Structural Engineering, CETMA Consortium Cittadella della Ricerca Brindisi, 2006 ITALY.

18. Hussain, S.A., Reddy, B.S., Reddy, V.N., Prediction of Elactic Properties of FRP Composites Lamina for Longitudinal Loading, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 6, 2008.

19. Elyasian, I., Abdoli, N., Ronagh H.R., Evaluation of Parameters Effective In FRP Shear Strengthened of RC Beams Using FE Method Asian Journal of Civil Engineering 3, 249-257 2006

20. Mostofinejad, D., Talaeitaba, S.B., Finite Element Modelling of RC Connections Strengthened with FRP Laminates Iranian Journal of Science 30, 2006

21. Mahmood, M., Ibrahim, A.M., Finite Element Modelling of Reinforced Concrete Beams Strengtened with FRP Laminates European Journal of Science Research, 4, 526-541, 2009

22. Altun, F., Betonarme Binaların Depreme Karşı Güçlendirilmesinde Lifli Polimer Uygulamasının Deneysel Araştırılması, FBA-08-477 nolu Erciyes Üniversitesi Araştırma Fonu Projesi, Devam Ediyor

23. Ersoy, U., Betonarme Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı, s.90, ODTÜ, Ankara, 1985.

24. Özer, E., Doğrusal Olmayan Hesaba Giriş Ders Notu, s.1, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2008

25. Koçak, İ., Seçilen Bir Kamu Binasının Doğrusal Ötesi Davranışında Beton Dayanımı Ve Etriye Aralığının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2007

26. ATC 40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.

27. Celep, Z., Kumbasar, N., Betonarme, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1995.

28. Celep, Z., Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış ve Çözümleme, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2008

29. Özmen, H.B., İnel, M., Bilgin, H., Betonarme Elemanların Doğrusal Ötesi Davranışının Modellenmesi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Ekim16-20, 2007.

30. İnel, M., Özmen, H.B., Bilgin, H., Sargı Etkisi Modelleme Analiz Programı Kullanma Kılavuzu, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2008.

31. Yön, B., Betonarme Yapıların Statik İtme Analizi İle Performanslarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2007.

32. Çakıroğlu, A., Özer, E., Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistem, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul 1980.

33. Ersoy, U., Özcebe, G., Betonarme Temel İlkeler TS 500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine Göre Hesap, İstanbul, 1998.

34. Temur, F., Statik İtme (Pushover) Yöntemi Kullanılarak Yapıların Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2007.

35. Dede, F., T., Tersinir-Tekrarlanır Yükleme Altındaki Betonarme Çerçevelerin Ansys Programı İle Nonlineer Sonlu Eleman Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2006

36. Doğan, A., B., Karbon Polimer Elyaflar İle Güçlendirilmiş Beton Kirişlerin Sonlu Elemanlar Metodu İle Lineer Olmayan Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2008

37. Ansys Sonlu Elemanlar Paket Programı Yardım Menüsü Versiyon 11,2007

38. Kachlakev, D., Miller, T., Yim, S., Chansawat, K., Potisuk, T., Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strenghtened With FRP Laminates Final Report, California Polytechnic State University, San Luis, Oregon State University, Corvallis, May, 2001

39. TS500 (2000) Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Şubat, 2000

40. Mo, Y., L., Earthquake Engineering Handbook, University of Houston, Houston, Texas, USA, 2003

41. Celep, Z., İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Meslek İçi Eğitim Kursu, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul, Eylül 11, 2008

42. Dandin, Z., Betonarme Kolon Performansına Çelik Lif Etkisinin İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2009

ÖZGEÇMİŞ

Furkan Birdal 1986 yılında Kayseri'de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kayseri'de tamamladı. 2002 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2007 yılında İnşaat Mühendisliği bölüm birincisi olarak mezun oldu. 2007 yılında Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisansa başladı. 2008 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Halen Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde görevine devam etmektedir.

Adres: Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü
38039-KAYSERİ
Telefon: 0352 437 49 01-32384
E-mail: fbirdal@erciyes.edu.tr