

**KARBON POLİMER ELYAFLAR İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETON
KİRİŞLERİN SONLU ELEMANLAR METODU İLE LİNEER OLMAYAN
ANALİZİ**

Ali Baran DOĞAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2008
ANKARA**

Ali Baran DOĞAN tarafından hazırlanan KARBON POLİMER ELYAFLAR İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETON KİRİŞLERİN SONLU ELEMENLAR METODU İLE LİNEER OLMAYAN ANALİZİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd.Doç.Dr. Özgür ANIL
Tez Danışmanı

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

Başkan : Prof.Dr. Mehmet Emin TUNA

Üye : Prof. Dr. Tekin GÜLTOP

Üye : Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA

Üye : Yrd.Doç.Dr. Özgür ANIL

Üye : Öğr. Gör. Dr. Sabahattin AYKAÇ

Tarih: 11/06/2008

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Ali Baran DOĞAN

**KARBON POLİMER ELYAFLAR İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETON
KİRİŞLERİN SONLU ELEMANLAR METODU İLE LİNEER OLMAYAN
ANALİZİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Ali Baran DOĞAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2008**

ÖZET

Karbon polimer elyaflarla (CFRP) betonarme elemanların güçlendirilmesi, günümüzde birçok deneysel araştırmanın odağı olmuştur. Özellikle beton-CFRP arayüzündeki gerilme ve şekil değiştirme dağılımı, bu kompozit sistemin davranışını büyük oranda tayin etmektedir. Parametrelerinin doğruluğu deney verileriyle ispat edilmiş sonlu elemanlar metodunun bu alanda kullanılması ise, deneyi yapılmamış modellerin simülasyonunu yapma imkanı sağlamaktadır. Bu amaçla tez kapsamında ANSYS sonlu elemanlar yazılımının özel eleman tiplerinden faydalanarak, deney kirişlerinin sonlu eleman modeli oluşturulmuş, malzeme özellikleri tanımlanmış, analiz ve deney sonuçları karşılaştırılarak sonlu eleman modelinin deney sonuçlarından sapma limitleri belirlenerek modelin uygulanabilirliği doğrulanmıştır. Daha sonra beton-CFRP arayüzündeki şekil değiştirme dağılımı ve etkili yapışma boyunun tayinine yönelik, deney kirişlerinin modellemesine ek olarak sonlu eleman simülasyonu gerçekleştirilmiş ve deney yapmaya gerek kalmadan bazı deney bilgileri elde edilmiştir. Yürütülen karşılaştırmalı analizlerle, şekil değiştirme dağılımının gerçeğe yakın elde edilebilmesi için ANSYS bünyesinde tanımlı özel bir temas yüzeyi

elemanın kullanılması gerektiği ortaya koyulmuş ve bu özel temas yüzeyinin parametreleri belirlenmiştir. CFRP uzunluğunun arttırılmasının şekil değiştirme dağılımı ve maksimum göçme yükü üzerindeki etkisi sonlu eleman çözümü üzerinden incelenmiş, etkili yapışma boyu belirlenmiş ve bu etkili yapışma uzunluğunun deney sonuçları ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 911.1.144
Anahtar Kelimeler : ANSYS, Sonlu elemanlar analizi, Beton kirişler, CFRP yapışma boyu, Temas yüzeyi
Sayfa Adedi : 71
Tez Yöneticisi : Yrd.Doç.Dr. Özgür Anıl

NON LINEER FINITE ELEMENT ANALYSIS OF CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS

(M.Sc. Thesis)

Ali Baran DOĞAN

GAZİ UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

June 2008

ABSTRACT

Retrofitting reinforced concrete structures with carbon fibre reinforced plastic has become main subject of many experimental studies. Stress and strain distribution over concrete-CFRP interface mostly governs the behaviour of this composite system. A finite element model, after being verified with experimental results, creates the possibility of making model simulation of experiments. In order to verify the finite element model, making use of the special element types of ANSYS program, a finite element model of experiment beams is constructed and load displacement behaviour is compared with the experiment results to check the extend of differences between experiment and analysis results. After obtaining a verification, the computer analysis of experiment beams is used together with computer simulations to obtain strain distribution in the CFRP-concrete interface and eventually effective CFRP length. A need for using special contact surface is pointed out. The effect of increasing CFRP bond length on strain distribution and maximum load is investigated and effective bond

length obtained from these observations are found to be in good agreement with experimental findings.

Science Code : 911.1.144
Key Words : ANSYS, Finite element analysis, Concrete beams, CFRP bond length, Contact surface
Page Number : 71
Adviser : Asist. Prof. Özgür Anıl

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında beni yönlendiren tez danışmanım Yrd.Doç.Dr. Özgür ANIL'a, destekleri için anne ve babama, tez aşamasında sağladığı değerli yardımları için eşim Jeo.Yük.Müh. Aslı DOĞAN'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİ.....	11
2.1. Giriş.....	11
2.2. Genel Teori	11
2.3. Nonlineer Davranış	12
2.3.1. Malzeme nonlineerliği.....	12
2.3.2. Malzeme modeli	13
2.3.3. Beton modeli	18
2.3.4. FRP kompozitleri.....	21
2.4. ANSYS Modellemesi.....	21
2.4.1. Eleman tipleri	23
2.4.2. Nonlineer çözüm	34
2.5. Deney Kirişi ve Sonlu Elemanlar Ağının Oluşturulması.....	40
2.5.1. Mesnet koşulları	42

Sayfa

2.5.2. FRP nin sonlu eleman ağına bölünmesi.....	45
3. DENEY ÇALIŞMASININ TANITIMI	46
4. YÜRÜTÜLEN SONLU ELEMAN ANALİZLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ	49
5. ANALİZ SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	51
5.1. Doğrulama Amaçlı Yapılan Analizler.....	51
5.2. Şekil Değiştirme Dağılımına Yönelik Sonuçlar	57
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	67
6.1. Sonuçlar	67
6.2. Öneriler	68
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ.....	71

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Malzeme özellikleri.....	27
Çizelge 3.1. Deney elemanlarının özellikleri	48
Çizelge 4.1. Deneyi yapılmış elemanlardan ANSYS modellemesi yapılanlar	49
Çizelge 4.2. Efektif yapışma boyu tayinine yönelik yürütülen analizler	50
Çizelge 5.1 Analizlerden elde edilen maksimum göçme yükü değerleri.....	51
Çizelge 5.2. Maksimum orta nokta deplasmanları	52
Çizelge 5.3. Maksimum CFRP şekil değiştirmesi.....	52

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. ANSYS bünyesinde kullanılan malzeme özellikleri	15
Şekil 2.2. Üç boyutlu William Warnke göçme yüzü	17
Şekil 2.3. William Warnke kriterinin $\sigma_1 - \sigma_2$ düzlemindeki izdüşümü	17
Şekil 2.4. Betonun iki eksenli göçme yüzeyi	19
Şekil 2.5. Hognestad beton modelinde yer alan parametreler	20
Şekil 2.6. Solid 65 elemanı (ANSYS,2005)	24
Şekil 2.7. Betonun deney metotlarına göre çekme dayanımı	25
Şekil 2.8. Solid 46 elemanı	28
Şekil 2.9. Solid 45 elemanı	29
Şekil 2.10. Coulomb sürtünme modeli grafiği.....	31
Şekil 2.11. Farklı T_{MAX} değerleri için şekil değiştirme dağılımları	33
Şekil 2.12. Şekil değiştirme dağılımının ani değişimi [9]	33
Şekil 2.13. Yük adımları ve alt adımları.....	35
Şekil 2.14. Newton-Raphson iterasyon prosedürleri	39
Şekil 2.15. Göçme yükünün eleman sayısı ile değişimi	41
Şekil 2.16. Sonlu eleman ağına bölünmüş deney kirişi ve eleman tipleri	43
Şekil 2.17. Modeldeki simetri düzlemleri	44
Şekil 2.18. Mesnet noktası detayı	44
Şekil 3.1. Deney yükleme düzeneği	47
Şekil 3.2. Deney elemanlarının geometrik boyutları	47
Şekil 5.1. Eleman 3 için yük şekil değiştirme ilişkisi	53
Şekil 5.2. Eleman 7 için yük şekil değiştirme ilişkisi	54

Şekil	Sayfa
Şekil 5.3. Eleman 11 için yük şekil değiştirme ilişkisi	54
Şekil 5.4. Eleman 13 için yük şekil değiştirme ilişkisi	55
Şekil 5.5. Eleman 14 için yük şekil değiştirme ilişkisi	55
Şekil 5.6. Eleman 15 için yük şekil değiştirme ilişkisi	56
Şekil 5.7. Eleman 16 için yük şekil değiştirme ilişkisi	56
Şekil 5.8. Eleman 13 için temas elemanlı ve elemansız dağılımlar	58
Şekil 5.9. Eleman 14 için temas elemanlı ve elemansız dağılımlar	58
Şekil 5.10. Eleman 15 için temas elemanlı ve elemansız dağılımlar	59
Şekil 5.11. Eleman 16 için temas elemanlı ve elemansız dağılımlar	59
Şekil 5.12. L=360mm için temas elemanlı ve elemansız dağılımlar	60
Şekil 5.13. L=420mm için temas elemanlı ve elemansız dağılımlar	60
Şekil 5.14. Eleman 13 için deneysel CFRP şekil değiştirme dağılımı	62
Şekil 5.15. Eleman 14 için deneysel CFRP şekil değiştirme dağılımı	62
Şekil 5.16. Eleman 15 için deneysel CFRP şekil değiştirme dağılımı	63
Şekil 5.17. Eleman 16 için deneysel CFRP şekil değiştirme dağılımı	63
Şekil 5.18. Farklı yapışma boyları için şekil değiştirme dağılımının karşılaştırılması	65
Şekil 5.19. Çalışan CFRP boyunun toplam CFRP boyu ile değişimi	66

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
b_{CFRP}	CFRP şerit genişliği
C	Kohezyon
E_c	Elastisite modülü
F^a	Yükleme vektörü
F_i^{nn}	Elemanların iç kuvvetini temsil eden yük vektörü
F_y	FRP malzemesinin çekme dayanımı
f_t	Betonun çekme dayanımı
f_c	Betonun basınç dayanımı
K_i^T	Tanjant rijitlik matrisi
L_{CFRP}	CFRP şerit uzunluğu
P	Uygulanan deney yükü
P_u	Göçme yükü
r	Deviatorik düzlemde yarıçap
T_{MAX}	Arayüzdeki maksimum kayma gerilmesi
U_i	Serbestlik derecesi matrisi
ϵ_{co}	Betonun göçme anındaki şekil değiştirmesi
ϵ_{cu}	Betonun maksimum şekil değiştirmesi
ϵ_c	Betonun şekil değiştirmesi
μ	Sürtünme katsayısı
σ_c	Basınç gerilmesi
σ_e	Eşdeğer gerilme
σ_t	Çekme gerilmesi
σ_y	Akma gerilmesi
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Asal gerilmeler

Kısaltmalar**Açıklama**

FRP

Fiber Reinforced Polymer

CFRP

Carbon Fiber Reinforced Polymer

RACM

Rotating Angle Crack Model

FACM

Fixed Angle Crack Model

GB

Gigabayt

1. GİRİŞ

Mühendislik yapılarının rehabilitasyonuna yönelik ihtiyaçlar, bu konuda dünya çapında birçok araştırmanın yapılması sonucunu doğurmuştur. Bu durum, inşaat mühendisliği alanında büyük bir kullanım alanına sahip betonarme için de geçerlidir. Bir betonarme elemanın kullanım ömrü boyunca karşı karşıya kalabileceği korozyon, kimyasal etkiler, yüksek yük seviyeleri ve çevresel faktörler gibi etkiler, elemanın tasarım aşamasında belirlenen performansının elde edilmesine engel olmaktadır.

Betonarme elemanların onarım ve güçlendirmesi için çelik lif uygulaması, kesite ek donatı eklenmesi, dıştan plaka uygulaması gibi birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerden metal plaka uygulaması, dünya çapında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak metal plaka uygulamasının bakım ve montaj zorluğu, ulaştırma sorunları, kendi ağırlığı sebebiyle yapıya aktardığı ek yükler ve korozyona hassas olması gibi olumsuz yönleri mevcuttur. Bunun bir sonucu olarak FRP (Fiber Reinforced Polymer) kullanımı eski yöntemlerin yerini almaya başlamıştır. FRP, yapının dış yüzeyine yapıştırıldığında donatı görevi gören, yüksek riitliğe ve dayanıma sahip kompozit bir malzemedir. Ayrıca hafifliği ve çevresel etkilere dayanımı çok önemli avantajlar sağlamaktadır.

Güçlendirmede, temel olarak gerekli yüzey hazırlığından sonra yapı yüzeyine kimyasal yapıştırıcılarla lifler sabitlenmekte ve üzerine koruyucu tabakalar uygulanmaktadır. FRP güçlendirmesi, hem eğilme hem de kesmeye karşı kullanılmaktadır.

Polimer bağlayıcı içerisine gömülü liflerden oluşan FRP, bu sebeple anizotropik ve heterojen bir malzemedir. Metaller gibi homojen-izotropik malzemeler için oldukça fazla çalışma olmasına rağmen, kompozit malzemeler için sistematik tasarım verileri yeterli değildir.

Ancak, dünya çapında yapılan birçok araştırmada, FRP-beton arayüz gerilme dağılımı, FRP nin süneklığe ve taşıma kapasitesine katkıları konu edilmektedir.

FRP güçlendirmesi ile ilgili olarak birçok deneysel veri mevcut olmasına rağmen, analitik çalışmalar oldukça sınırlı kalmıştır. Bu noktadan hareketle, tezin amacı, deney verileri ile doğrulanmış bir sonlu eleman modeli yaratarak, modelin eksik veya avantajlı taraflarını ortaya koyduktan sonra, deneyi yapılmamış elemanların model simülasyonunu gerçekleştirmektir. Böylelikle, deneyi yapılmamış bu elemanların yük deplasman ilişkileri, beton-FRP arayüzü birim şekil değiştirme dağılımları bazı limitler dahilinde belirlenebilecektir. Sonuç olarak, eldeki bilgilerin sayısı daha ekonomik yoldan arttırılacak ve kayma gerilmelerini taşıyan efektif plaka boyunun tayinine yönelik çalışma yapma imkanı doğacaktır.

Bu tez çalışması kapsamında, Yrd.Doç.Dr. Özgür ANIL tarafından gerçekleştirilen, FRP ile eğilme için güçlendirilmiş beton kirişlerin dayanım ve beton-FRP plaka arayüzündeki şekil değiştirme davranışını farklı yapıştırma boyları ve genişlikleri için inceleyen deneylerin sonlu elemanlar modeli oluşturulacaktır. Bu amaçla, akademik literatürde sıklıkla kullanılan, bünyesindeki lineer olmayan sonlu elemanlarla beton yapıları ve FRP temas yüzeyini modellemek için özel eleman tipleri bulunduran ANSYS yazılımında beton ve FRP davranışına dair gerekli tanımlamalar yapılacak ve lineer olmayan analizler yürütülecektir. Elde edilen analiz sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırılarak kurulan sonlu eleman modelinin doğruluğu sorgulanacak, modelin yetersiz ve/veya avantajlı yönleri ortaya koyulacaktır. Daha sonra belirli yapışma boyu ve genişliği için, seçilen bir deneyde FRP-beton temas yüzeyi parametreleri karşılaştırılacaktır. Uygun temas yüzeyinin seçiminden sonra, yapışma genişliği sabit tutularak deneyi yapılmamış farklı FRP uzunluklarına sahip deney elemanlarının simülasyonu yapılarak, efektif yapışma boyu ile ilgili gözlemler yapılacaktır.

Beton ve CFRP yüzeyleri arası dayanımın tayinine yönelik olarak, Yao, Teng ve Cheng (2005) tarafından yapılan çalışmada, yakın uç mesnetli tek çekme testlerindeki gerilme dağılımının CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin göçme modunu belirleyen kritik bölgelerindeki gerilme dağılımına benzer olması sebebiyle bu test tercih edilmiştir. Deney programı, 72 adet deney numunesi için yapışma uzunluğu, FRP-beton genişlik oranı, beton bloğun serbest yüksekliği gibi parametreleri kapsamaktadır. Yük deplasman, FRP deki şekil değiştirme dağılımı, serbest beton blok boyu yüksekliği, yapışma uzunluğu ve FRP-beton genişlik oranının deney sonuçlarına etkileri tartışılmıştır. Sonuç olarak elde edilen deney sonuçlarının Cheng ve Teng tarafından öne sürülen model ile uyum içerisinde olduğu belirlenerek bu model doğrulanmış, ayrıca standart bir deney metodu elde edilmesine yönelik olarak bu yakın uç mesnetli çekme deneylerinin CFRP-beton yüzeyinin dayanımını tayin etmek için uygun ve güvenilir olduğu saptanmıştır [1].

Yang, Chen ve Proverbs (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişin davranışını incelemek amacıyla kırılma mekaniği esaslı sonlu elemanlar analizi yürütülmüştür. Bu yöntemde, çatlak yayılmasının simulasyonu, en önemli faktör olarak belirtilmiş, ayrık çatlakların çoklu olarak yayılmasını modelleyebilen lineer elastik kırılma mekaniği esaslı bir sonlu elemanlar yazılımı geliştirilmiştir. Bu çalışmanın en önemli sonucu olarak; farklı yapışma boyunun kirişin göçme moduna çok önemli etkisi bulunduğu gözlemlenmiştir. Uzun yapışma boylarında kiriş sünek olarak donatının akması ile göçerken, kısa yapışma boylarında göçme yükünde bir azalma ile beraber daha gevrek olan FRP-kiriş yüzeyi ayrışması oluşmaktadır. Bu gözleme ek olarak, FRP kullanılmış beton kirişlerde, çatlak aralığı ve miktarı azalmaktadır [2].

FRP-beton yüzeyi göçmesi ile ilgili olarak Lu, Jiang, Teng ve Ye (2006) tarafından yapılan çalışmada, yüzey davranışının tahmin edilmesinde farklı çatlak modellerinin kullanımı karşılaştırılmıştır. Asal gerilmelerle şekil değiştirmenin aynı yönde olmaya zorlandığı ve sabit açılı çatlak modelinden

farklı olarak kesme yumuşaması davranışını kapsayan dönen açılı çatlak modelinin karmaşık FRP-beton yüzey davranışının modellenmesinde oldukça etkili olduğu belirtilmiştir. RACM kullanımı ile, FRP ile beton yüzey arasındaki yapıştırıcı tabakasının deformasyon ve slip davranışının etkisi ihmal edilebilmiştir. Ticari sonlu elemanlar paket programlarında kullanılan sabit açılı gizli çatlak modeli (FACM) ile betonun çatlama sonrasındaki kayma gerilmeleri dağılımının gerçekçi olmadığı, şekil değiştirme grafiğinde bir ayrılma, soyulma (debonding, peeling) bölgesinin bile ayırt edilemediği sayısal veri ve grafiklerle gösterilmiştir. Bunun sebebi, kesme yumuşaması davranışının FACM modeline dahil edilememesi sebebiyle çatlama sonrasında kırılma düzlemindeki gerilmelerin devamlı artması olarak gösterilmiştir. Dönen açılı çatlak modelinde çatlak yönü her zaman asal gerilmelere dik kalmaktadır ve şekil değiştirmeler asal gerilmelerle aynı yönde olmaya zorlanmaktadır. Düzlem gerilme durumu için öne sürülen beton modeli üzerinde betonun çekme ve kesme davranışı tanımlanmış, betonun kırılma sonrası davranışı için dönen çatlak modelinden (RACM) yararlanılarak modelin çekme testi sonuçları ile uyumlu olması için model parametreleri kalibre edilmiştir. Daha sonra bu çatlak modeli için bu değerler kullanılarak diğer sonlu elemanlar simülasyonları yapılmış, sonuçların oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir. Ancak, RACM modelinin bazı parametrelerinin bulunması için çekme deneylerinden yararlanılması modelin zayıf noktası olarak belirtilmiştir [3].

FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin deneysel ve sonlu elemanlar analizi üzerine Camata, Spacone ve Zarnic (2007) tarafından yapılan çalışmada, eğilmeye karşı FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin gevrek kırılma modları incelenmiştir. Beton kırılması, yapışkan tabaka davranışı, FRP uzunluğu ve genişliğinin göçme modlarına etkileri araştırılmıştır. Deney sonuçlarına paralel olarak, göçme moduna geometrik ve malzeme parametrelerinin etkilerini belirlemek için yapılan sonlu eleman analizinde, kırılmadan sonra betonarme elemanın rijitlik azalmasını modellemek için gizli çatlak modeli, beton pas payının ayrışmasından sonra nodlardaki devamsız

deplasmanları tanımlayabilmek için ise ayrık çatlak modeli kullanılmıştır. Yürütülen analizler sonucunda, kısa FRP plakalarında göçmenin plaka sonunda, uzun plakalar için ise kiriş ortasında başladığı, FRP tabakası genişliğinin azaldıkça, göçme modunun pas payı ayrışmasından FRP-beton ayrışmasına kaydığı ortaya koyulmuştur [4].

Yang, Peng, Kwan (2004) tarafından yapılan çalışmada, FRP ile güçlendirilmiş betonarme elemanların temas yüzeyindeki gerilmeler sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Tamamen FRP-beton yüzeyindeki gerilme dağılımına odaklanmış olan bu çalışmada, malzeme ve geometrik parametrelerin gerilmeye olan etkileri göz önünde bulundurulmuştur. Tek nokta yüklemesi altındaki basit mesnetli bir kiriş için betonarme ile FRP ve yapışkan tabakanın linear elastik davrandığı ve beton ile FRP arasındaki tabada boşluk, çatlak olmadığı kabulleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, FRP deki kayma gerilmesi değerleri plaka ucundan uzaklaştıkça hızla azalmakta, belirli bir noktadan sonra sabit kalmaktadır. Ancak plaka uç bölgelerinde dalgalanma gösteren normal gerilmeler plaka sonundan uzaklaştıkça sıfır değerine ulaşmaktadır. Bu iki gözlemden dolayı, FRP plakası uzak ucundaki normal ve kayma gerilmelerinin FRP-beton arayüzünde tabaka halinde kopmalara ve göçmeye sebep olduğu sonucu çıkarılmıştır. Çalışmanın diğer bir sonucu olarak, FRP tabakasının kalınlaştırılmasıyla kayma gerilmesi değerlerinin artması ancak yapıştırıcı tabakanın sonuçları fazla etkilememesi gösterilebilir. Ayrıca, betonun ve FRP riitliğinin gerilme değerlerini önemli miktarda etkilediği belirtilmiştir [5].

Yao ve Teng (2006) tarafından yürütülen çalışmada, farklı geometrik parametrelere sahip FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerde dört nokta ve üç nokta eğilme testerinde plaka ayrışması göçme modu incelenmiştir. Dört nokta yüklemesi altındaki (eğilme ayrışması) bütün elemanlar, beton pas payı ayrışması ile göçmüştür.

Dört nokta yüklemelerinde (kesme ayrışması) ise, beton paspayı ayrışması, kiriş ortasında oluşan çatlak sebebiyle ayrışma, plaka sonunda oluşan kesme çatlağı göçmesi ve FRP yapıştırılmamış bölümde oluşan betonda eğilme sebebiyle oluşan göçme gibi 4 değişik göçme modu göze çarpmaktadır. Her iki tip deneyin ortak noktası olarak, FRP-beton arayüzündeki ayrışmayı tanımlayan en kritik faktörün geniş FRP plakası durumunda boyuna donatı ile FRP- paspayının oluşturduğu kompozit kesit arasındaki gerilme olduğu, dar FRP plakası durumunda ise FRP beton alt yüzü arasındaki gerilmeler olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, kesmenin etkin olduğu deneylerde, betonun kesme dayanımı, göçme yükü için alt limit oluşturmaktadır. Momentin etkin olduğu deneylerde ise FRP siz betonarme kesitin moment dayanımı, bütün kiriş için bir üst limit oluşturmaktadır [6].

Yine Teng ve Yao (2006) tarafından yapılan, yukarıda anılan çalışmanın bir devamı niteliğinde olan çalışmada, farklı göçme modları ve plaka sonundaki kesme-moment kombinasyonları için güvenilir bir dayanım modeli oluşturmak amaçlanmıştır. Bu amaçla, literatürden yüksek moment-düşük kesme kuvvetleri altında incelenen FRP-beton ayrışma deneyleri kullanılarak bir dayanım modeli ortaya atılmış, aynı prosedür yüksek kesme-düşük moment yükleri altındaki kirişler için tekrarlanmıştır. Daha sonra, elde edilen bu iki model birleştirilerek kesme ve moment kuvvetlerinin her kombinasyonunu kapsayan bir model elde edilmiştir [7].

Sharma, Mohamed Ali, Goldar ve Sikdar (2006) tarafından yapılan çalışmada, FRP- beton arası kritik yapışma uzunluğunu ve dayanımı belirlemek üzere, 36 adet beton blok üzerinde tekli kesme deneyleri yürütülmüştür. Test programına, FRP yanında metal plakalar da dahil edilmiştir. Deney sonuçlarından hareketle, beton bloğa yapıştırılan FRP ve metalik plakaların kritik parametreleri olan çekme mukavemeti, elastik modülü, genişliği ve kalınlığı ile beraber betonun çekme mukavemetini de kapsayan tasarım ilkeleri geliştirilmiştir. Elde edilen formülasyon, plaka-beton arası dayanımı doğrulukla ortaya koymaktadır. Bu çalışmada öne çıkan en

önemli davranış, FRP-beton test elemanlarında ilk çatlağın gerilmelerin yüksek olduğu yüklenmiş uçta başlaması, yüklemenin arttırılmasıyla çatlağın serbest uca doğru ilerlemesidir. Bu davranış, etki kuvvetlerine karşı koyan efektif alanının ötelenmesi anlamına gelmektedir. FRP beton arayüzünün ayrışması ile tanımlanan bu göçme modunda, FRP ye yapışık olarak ayrılan beton tabakası kalınlığı 10-15 mm iken, plaka sonunda 2-3 mm ye kadar düşmüştür. Yüklenmiş uca yakın bölgelerde kayma gerilmeleri, göçme yükünün %63 seviyelerinde maksimuma ulaşmış, daha sonra aniden düşüş göstermiştir. Aynı anda, şekil değiştirme-yüklenmiş uçtan uzaklık grafiğinde içbükeyden dışbükeye doğru ani bir değişim meydana gelmiştir. Bu nokta, ilk çatlağın olduğu yük seviyesi veya ayrışmanın başlangıcı olarak tanımlanmıştır. İleriki yükleme adımlarında, azalan gerilme değerlerinin maksimum noktası plaka ucuna doğru hareket etmiştir. Yukarıda anılan gözlemler, yüklemeye karşı koyan alanın plaka sonuna doğru ilerlediğini açıkça göstermektedir [8].

Lu, Teng, Ye, Jiang (2005) tarafından yapılan çalışmada, literatürdeki mevcut FRP-beton arayüzü dayanım ve kayma modelleri 253 adet çekme testi ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar daha doğru bir modelin ortaya koyulması gerektiğini göstermiş, farklı 3 adet arayüz kayma modeli orta koyulmuştur. Arayüz gerilmesi-kayma miktarı grafiği olarak tanımlanan arayüz kayma modeli, FRP'deki şekil değiştirmelerden veya FRP elemanının yüklenmiş ucunun yük şekil değiştirme ilişkilerinden elde edilebilmektedir. İlk metotda, betondaki çatlaklar veya agrega boyutu doğru şekil değişimlerinin okunmasına engel olabilmektedir. İkinci metotda ise, aynı yüklenmiş uçtaki şekil değiştirme-yüklemeye grafikleri için farklı lokal gerilme-kayma grafikleri elde edilebilmektedir. Bu sebeplerden dolayı, arayüz kayma modeli, FRP plakasının eksenel şekil değiştirmesinden değil, eleman boyutlarının oldukça küçük tutulduğu sabit açılı çatlak modeli kullanılan bir sonlu eleman yazılımı ile tayin edilmiştir. Sabit açılı çatlak modelinin avantajı, malzeme parametrelerinin kapalı çözümler yerine açık fiziksel anlamları olması ve bu parametrelerin standart testlerle elde edilebilmesidir. Bu sonlu eleman

yazılımında, sabit açılı çatlak modelin çatlak gelişimini belirleyememesinden doğan yetersizlik, çok küçük elemanlar kullanılarak yokedilmeye çalışılmış, ayrıca analizi basitleştirmek için FRP-beton arayüzü, düzlem gerilme altında 4 nodlu isoparametrik elemanlarla modellenmiştir. Arayüz- kayma modeli grafiği ve bu grafik altında kalan alan olarak tanımlanan kırılma enerjisi , hiçbir model tarafından test sonuçlarına yakın şekilde tayin edilememiştir. Ancak sonlu eleman çözümünü ve deney sonuçlarını temel alan model, arayüz dayanımını ve FRP şekil değiştirmesini doğru olarak belirlemektedir. Ayrıca arayüz kayma miktarı- gerilme grafiğinde kayma miktarının artmasıyla gerilmelerin sıfıra yaklaşması, bir efektif yapışma boyunun varlığına işaret etmektedir [9].

FRP-beton davranışını araştıran Yuan, Teng, Seracino, Wu ve Yao (2004) tarafından yapılan çalışmada, ayrışma davranışını kapsayan kapalı formlu analitik çözüme ulaşılmıştır. Bu çözümde, elastik bi-lineer kayma modeli kullanılmış, değişik yük durumları için arayüz kayma gerilmelerini ve şekil değiştirmeleri veren kapalı formlu ifadeler elde edilmiştir. Ayrıca FRP-beton arayüzünün deneysel şekil değiştirme değerlerinden efektif FRP boyunu etkileyen kırılma enerjisi, lokal kayma modeli ve arayüz yük-şekil değiştirme ilişkisinin nasıl elde edilebileceği gösterilmiştir. Anılan yük-şekil değiştirme ilişkisi; lineer elastik, yumuşama, ayrışma, ve lineer yük boşalması kısımlarından oluşmaktadır. FRP uzunluğunun arttıkça sünekliğin arttığı belirtilmiş, ancak göçme yükünün sabit kaldığı bir efektif FRP uzunluğunun varlığına işaret edilmiştir [10].

Taljsten (1997) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, beton bloklara ankrajlanmış çelik ve FRP plakalar kayma testine tabii tutulmuşlardır. Bu deneylerde, efektif boy ve göçme anındaki kritik şekil değiştirme gibi kriterler incelenmiştir. Hem çelik, hem de FRP plakalarının eksenel şekil değiştirmesi incelendiğinde, göçme yüküne yakın yüklemelerde, grafiğindeki eğimin işaret değiştirmesi, yatay çatlak oluşumunu göstermiştir. Ayrıca, grafiğin plaka ucuna doğru kayması, çatlağın ilerleyişini temsil etmektedir. Elde edilen FRP

deki şekli değiştirme- plaka sonuna uzaklık grafiklerinden elastik yöntemlerle kayma gerilmeleri elde edilmiş, sadece düşük yük seviyelerinde uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Yük arttıkça, çatlaklar oluştuğundan davranış elastik olmaktan uzaklaşmış, FRP bağlanma boyu azalmış, FRP şekil değiştirmesi grafiğindeki ani değişikliklerle beraber deney sonuçları teorik sonuçlardan uzaklaşmıştır. Hem FRP hem de çelik plakalar için, betonun kırılmaya başladığı kritik şekil değiştirme değerleri tanımlanmış, malzeme özelliklerinin değiştirilmesiyle bu değerlerin değişeceği belirtilmiştir. Malzemenin elastik modülü arttıkça, aktardığı gerilmeler de artmaktadır. Bu davranışa ek olarak, deney sonuçlarından efektif plaka boyunun varlığı ortaya koyulmuştur [11].

Smith ve Teng (2001) tarafından plakalı kirişlerdeki arayüz gerilmeleri inceleyen çalışmada, literatürdeki mevcut kapalı formülü çözümler kabulleri ve sınırlamaları ile karşılaştırılmış, arasındaki farklar ortaya koyulmuştur. Bütün bu çözümlerde lineer elastik malzeme kabulleri yapılmış, yapıştırıcı tabakası kalınlığı boyunca normal ve kesme kuvvetlerinin sabit kaldığı varsayımı yapılmıştır. Daha sonra arayüz gerilmelerinin tayini için mevcut modellere benzer fakat daha doğru bir çözüm metodu geliştirilmiş ve nümerik karşılaştırmalar yapılarak model parametrelerinin gerilme sonuçlarına etkileri değerlendirilmiştir. Ortaya atılan çözüm, özellikle kiriş ve plaka rijitliklerinin yakın olması durumunda beton ve FRP den farklı kiriş ve plakalar için uygulanabilir ve bütün yükleme durumlarını (tek nokta, iki nokta ve yayılı yük) kapsamaktadır [12].

Teng, Zhang ve Smith (2002) tarafından yapılan çalışmada, FRP-beton arası arayüz gerilmeleri, sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Sonlu elemanlar modelinde, dört nodlu dörtgen yüzey gerilme elemanı kullanılmış, beton-FRP ve yapıştırıcı-FRP arayüzleri, yüksekliği 0.1mm'ye kadar azalan elemanlarla modellenmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda çözümü basitleştirmek için yapıştırıcı tabakasındaki sabit gerilme kabulü sonlu elemanlar çözümünde yapılmamıştır. Analiz sonucu elde edilen gerilme sonuçları, literatürdeki mevcut modellerle ve yine yazarlar tarafından öne sürülen kapalı formülü

özüm ile karşılaştırılmış ve doğruluğu sorgulanmıştır. Analiz sonuçları, beton-yapıştırıcı ve FRP-yapıştırıcı arayüzlerinde çok farklı gerilme dağılımlarına işaret etmektedir. Plaka sonunda, beton –yapıştırıcı arası çekme gerilmeleri mevcutken, FRP - yapıştırıcı arası basınç kuvvetleri mevcuttur. Bu gerilme durumu, FRP - yapıştırıcı arayüzünde herhangi bir göçme şekline deneylerde nadir karşılaşılmasının sebebi olarak gösterilmektedir. Yapıştırıcı tabakasında uniform gerilme kabulüne dayanan literatürdeki kapalı formlu özümelerde, bu karmaşık gerilme durumu elde edilememektedir. Buna rağmen literatürdeki mevcut elastik esaslara dayanan çözümlerin, tasarım ilkelerinin geliştirilmesi açısından kullanışlı sonuçlar verdiği kaydedilmiştir [13].

Anıl ve Belgin (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, dört nokta yüklemesi altında CFRP ile güçlendirilmiş 16 adet kiriş numunesi kullanılmıştır. Bu dolaylı çekme deneylerinden elde edilen verilerle, literatürde tek ve çift çekme deneylerinden elde edilen 12 adet beton-CFRP yapışma dayanımı modelleri karşılaştırılmıştır. Beton dayanımı, CFRP yapışma boyu ve yapışma genişliğinin değişken olarak alındığı bu çalışmada, en çok parametre içeren modellerin deney davranışını doğru olarak temsil ettiği belirlenmiştir [18].

2. TEORİ

2.1. Giriş

Sonlu elemanlar metodunun en genel uygulaması, yapı mekaniği problemlerinin çözümünde gerçekleştirilmektedir. Temel olarak bu yöntem, yapı mühendisleri tarafından elastisite ve yapı mekaniği problemlerinin çözümü için geliştirilmiştir. Kişisel bilgisayarların kullanım alanının artması ve işlem yeteneklerinin gelişmesi sayesinde, sonlu elemanlar esaslı paket programları yaygınlaşmıştır. Sonlu elemanlar yönteminin kullanımı, araştırmacılar ve uygulamada yer alan mühendisler için beton davranışına ilişkin bilgilerinin geliştirilmesi açısından çok büyük faydalar sağlamaktadır.

2.2. Genel Teori

Sonlu elemanlar metodu, yapı mekaniği problemlerin çözümü için yaklaşık bir çözüm metodudur. Yapı, düğüm noktalarında birbirlerine bağlanmış daha küçük elemanlardan oluşan, bir küme olarak modellenir. Bu sebeple sonlu elemanlar yöntemi; gerçek ve devamlı olan yapının parçalara bölünmesidir. Bilinenler; yapının ilk geometrisi, yapıyı oluşturan elemanların ilk rijitliği ve yapının mesnet koşullarıdır. Yapı yüklendikten sonra düğüm noktalarının deplasmanları nümerik yollarla yaklaşık olarak bulunur. Yapı nodlarının yer değiştirmesiyle ortaya çıkan şekil değiştirme enerjisi ile dış güçlerin yaptığı iş miktarı arasında bir denge kurulur. Bir sonraki aşamada, elemanlardaki gerilmeler nodların deplasmanı ve ilgili malzeme modeli kullanılarak belirlenir [14].

Sonlu elemanlar yöntemi, yapı mekaniğinde birçok problemin çözümünde kullanılabilir. Bu analiz metodunun temeli, termodinamiğin ilk yasası olan enerjinin korunumuna dayanır. Yapıyı şekil değiştirmeye zorlayan kuvvetlerin yaptığı iş, yapının iç şekil değiştirme enerjisine eşittir. Ayrıca bir işlemin geri dönüşlü olabilmesi için, deformasyonların geri dönüşlü olması gereklidir.

Ancak gerçek deformasyon, genelde plastikleşme ile enerji sönümleyen, bu sebeple geri dönüşlü olmayan bir olaydır. Bu sebeple dış kuvvetlerin yaptığı iş, şekil değiştirme enerjisi ile plastik deformasyon sebebiyle oluşan enerji kayıplarının toplamına eşittir.

Bir yapı mekaniği probleminin çözümünde, denge, uyum ve malzeme modelinin gereklilikleri sağlanmalıdır.

2.3. Nonlinear Davranış

Sonlu elemanlar metodunun analizlerde kullanılabilmesi ve doğru sonuçlar alınabilmesi için, modelin nonlinear davranmasına sebep olacak özelliklerin tayin edilmesi gereklidir.

Linear davranış, yükleme boyunca yük-şekil değiştirme ilişkisinin sabit kalması ile tanımlanabilir. Bu davranış, yapı riitliğinin her yük adımında sabit kalması, yani geometri ve malzeme özelliklerinin linear olması ile mümkündür.

Ancak, gerçek problemlerin çoğu linear değildir; yaklaşık linear özelliklerin kullanılması ise hatalı sonuçlar vermektedir. Bu nonlinear davranış, linear olmayan yük-şekil değiştirme grafiği ile devamlı değişen rijitlik ile tanımlanır. Yapının nonlinear davranmasına sebep olan en önemli etkenler yapı geometrisi ve malzeme nonlinearliği olarak ortaya çıkmaktadır. Geometrik nonlinearlik, yapının gerçekleştirdiği yüksek miktardaki deplasmanlar sebebiyle oluşur. Malzeme nonlinnerliği ise, malzemenin içsel veya çevre koşullara bağımlı olup aşığıda bahsedildiği gibi birçok sebepten oluşabilir.

2.3.1. Malzeme nonlinearliği

Isı etkileri, rötre ve yorulma gibi zamana bağlı olaylar malzeme nonlinnerliğine sebep olabilir. Buna ek olarak, bir malzeme yükleme hızına,

tersinir yükleme veya gerilme seviyesine göre lineer olmayan davranış gösterebilir. Betonarmeyi oluşturan bileşenler lineer malzeme özelliklerine sahip olsa bile, çatlaklar sebebiyle davranış nonlinearliğe kayabilir.

Genel olarak, malzemelerin ya lineer ya da nonlinear, ayrıca ya elastik ya da inelastik davranış sergiledikleri varsayılabilir. Lineer elastik bir malzeme yükleme boyunca sabit rijitlik gösterir, ve gerilme ile şekil değiştirme seviyesi yük durumuna özgü olarak belirlenebilir. Buna karşılık, nonlinear elastik bir malzemenin gerilme ve şekil değiştirme durumu yüklemenin izlediği yola bağımlı olduğu için bu değerle sadece yükleme değerine özgü olarak belirlenemez.

Aslında bütün gerçek malzemeler, gerilme şekil değiştirme ilişkilerinin bir bölümünde yaklaşık lineer davranış gösterse de aslında nonlinear ve inelastiktir. Bütün gerçek şekil değiştirmeler sonucu enerji harcanmakta ve az da olsa kalıcı deformasyon sağlanmaktadır. Bu sebeple, elastik malzemelerin aslında ideal olduğu söylenebilir. Bütün gerçek malzemeler geri dönüşsüz bir şekilde deformasyona uğrar, yani oluşan deformasyonu geri döndürmek için ek enerji harcanması gerekir.

Malzeme nonlinearliği ve inelastikliği, özellikle göçme yüküne yakın seviyelerde neredeyse bütün malzemelerde görülür. Nonlinear davranış, yükleme esnasında rijitlik değişimine sebebiyet vermekte, yükün geri çekilmesi durumunda ise sabit şekil değiştirmelerin kalmasına sebep olmaktadır. Gerilme durumu yük geçmişine bağlı olduğundan, inelastik malzemelerde istenen andaki gerilme ve şekil değiştirmelerin tayin edilebilmesi için yük geçmişinin bilinmesi gerekmektedir.

2.3.2. Malzeme modeli

Malzeme modeli, yükleme esnasında malzemenin gerilme - şekil değiştirme ilişkisinin matematiksel formülasyonudur. Hem elastik limit öncesi bölümü,

hem de akma sonrası pekleşme/yumuşama bölümünü matematiksel olarak belirleyen bu model, elastik veya inelastik davranış sergileyen lineer ve lineer olamayan malzemeler deney ve gözlemlere bağlı olarak tanımlanır. Malzeme özelliklerini tanımlayan bu matematiksel ilişkiler; ilk akma yüzeyini (akma kriteri) , akmadan sonraki yüklemeler plastik deformasyon yarattıkça değişebilen akma yüzeylerini (pekleşme) ve akma durumunda gerilme artışı için elastik ve plastik şekil değiştirme aralıkları belirler. Denge denklemleri ile uygunluk denklemleri arasındaki ilişki, bu gerilme-şekil değiştirme ilişkisinden bulunur. Temel olarak, betonun malzeme davranışının modellenmesi için, bir akma kriterine, gerilme şekil değiştirme ilişkisine ve pekleşme modeline ihtiyaç vardır. Hesaplanan asal gerilmeler, akma kriterine göre ortalama gerilmeye çevrilmekte, elde edilen bu gerilme değerleri ile şekil değiştirme-gerilme grafiğine göre davranış belirlenmekte, ve son olarak seçilen göçme kriterinde çatlama veya ezilme olup olmadığı belirlenmektedir. Sonuç olarak beton malzemesi için pekleşme modelinin içerisinde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi tanımlanmakta, plastisite limitleri bir akma kriteri ile belirlenmekte ve ve son olarak bir göçme modeli vasıtasıyla beton ezilme veya çatlama olayı tanımlanmaktadır. Bahsi geçen model ve kriterler, aşağıda açıklanmıştır.

Von Mises akma kriteri

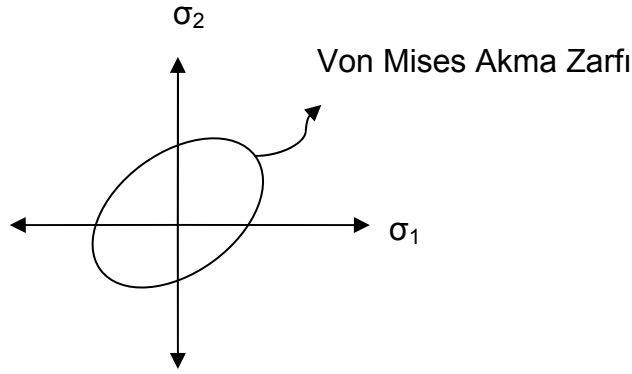
Plastik davranış, malzemenin akma sınırının aşılması ile, geri dönüşü olmayan şekil değiştirmelerin oluşması ile tanımlanır. Ayrıca yüklemenin hızı, büyüklüğü, tersinir olup olmaması gibi özellikleri, plastik davranışı etkilemektedir. Bu sebepler plastisite içeren analizlerde, yük adımları gereği kadar küçük tutulmalıdır.

Akma yüzeyi ise, plastik davranışın sınırlarını oluşturmaktadır. Başka bir deyişle, herhangi bir üç boyutlu gerilme kombinasyonu için elastik davranışın limitidir. Farklı malzemeler için değişik akma yüzeyleri tanımlanmıştır. Bunlar, maksimum asal gerilme, maksimum asal şekil değiştirme, maksimum kesme kuvveti, toplam şekil değiştirme enerjisi teorisi ve şekil bozulması enerjisi

teorilerine (distorsion energy theory) dayanır. Beton malzemesi için tercih edilen kriter ise, şekil bozulması enerjisi teorisine dayanan Von Mises kriteridir. (Eş.2.1)

$$\sigma_e = [1/2 [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]]^{1/2} \quad (2.1)$$

Burada $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ asal gerilmeleri, σ_e ise eşdeğer gerilmeyi ifade etmektedir. $\sigma_e < \sigma_y$ durumunda, gerilme durumu akma yüzeyinin dışına çıkamayacak ve malzeme lineer elastik davranacaktır. Bu denklem 3 boyutlu uzayda bir silindir, 2 boyutlu uzayda ise bir elips tanımlamaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. İki boyutlu Von Mises akma zarfı

Lineer veya lineer olmayan elastik malzemeler için göçme yüzeyi bütün yük durumları için sabit kalmaktadır. Bu göçme yüzeyi, pekleşen yani akmadan sonra gerilme artışına dayanabilen malzemelerde genişlemekte, yumuşayan malzemelerde ise daralmaktadır. İzotropik, kinematik ve karma olmak üzere üç adet pekleşme modeli mevcuttur.

İzotropik pekleşme olayında, akma yüzeyi düzgün olarak genişlemektedir. Göçme yüzeyinde herhangi bir şekil değişikliği, dönme veya ötelenme olmamaktadır. Bu model tipik olarak monotonik yüklemeler için kullanılmaktadır. Malzemenin ters yönde plastik deformasyona uğraması ile plastik deformasyona karşı koyma gücünün azalması olarak tanımlanan 'Bachinger Etkisi', izotropik pekleşme davranışında yer almamaktadır.

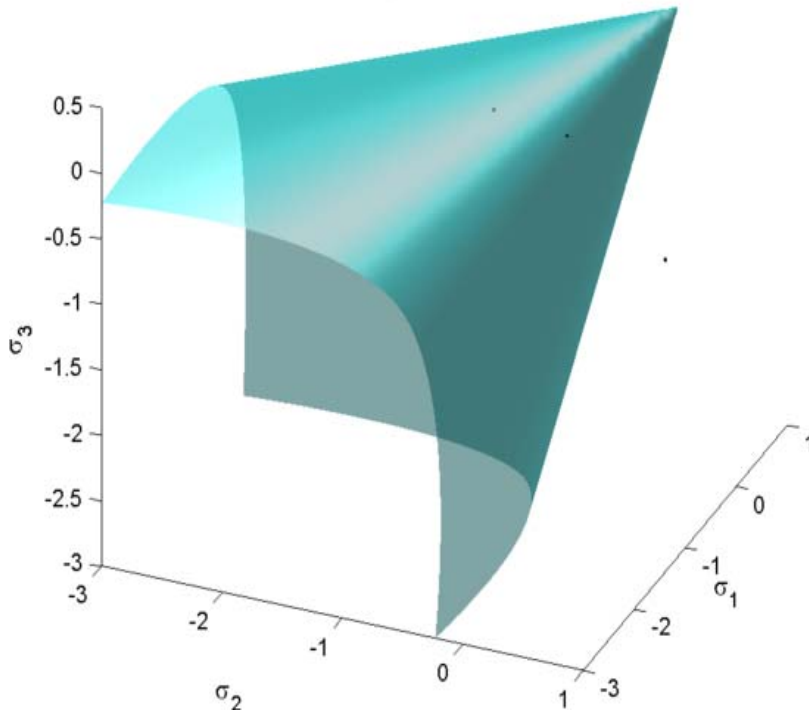
İzotropik pekleşme, karmaşık yükleme durumları ve tersinir-tekrarlanır yükleme durumlarında kullanılmamaktadır.

Kinematik pekleşmede ise, akma durumunda malzeme yüklendikçe, göçme yüzeyinin ötelenmesi esasına dayanır. Bu ötelenmede, herhangi bir şekil değiştirme yoktur. Yüklemenin ters çevrilmesiyle, akma yüzeyi eski haline döner; bu sebeple 'Bauschinger Etkisi' dahil edilmiş olur. Bu sebeple tersinir yükleme durumu için uygundur.

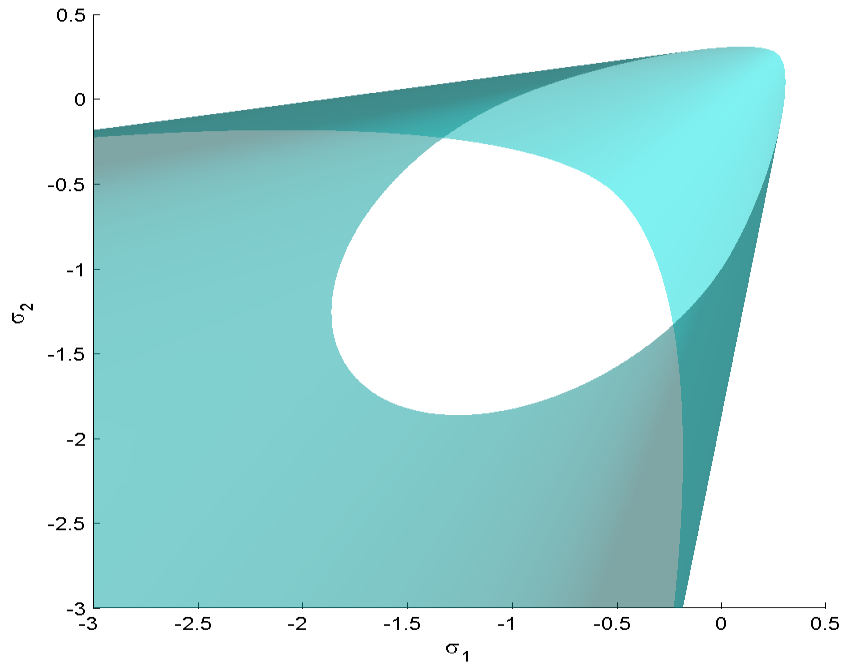
Karma pekleşme modelinde ise akma yüzeyinin hem uniform şekilde genişlemesi, hem de ötelenmesi öngörülür. Bu esnada orijinal şekli bozulmaz. Bauschinger Etkisini ile genişleme ve ötelenme miktarlarını kontrol etmek için iki adet pekleşme parametresi kullanır.

Göçme kriteri

Willam ve Warnke (1974), sargısız beton için geniş olarak kullanılan üç eksenli göçme yüzeyi modeli tanımlamıştır (Şekil 2.2, Şekil 2.3). Üç boyutlu gerilme durumu, hidrostatik ve diviatorik gerilmeler olarak bileşenlere ayrılabilir. Hidrostatik gerilme durumu, üç asal gerilmenin birbirine eşit olduğu, kayma gerilmelerinin olmadığı durumu temsil eder. Hidrostatik gerilme durumundaki gerilme, üç eksendeki gerilmenin ortalaması olarak tanımlanır. Gerilme tensöründen bu hidrostatik gerilmelerin çıkarılmasıyla ifade edilen deviatorik gerilmeler ise genelde hem kayma hem de normal gerilme bileşenlerinden oluşur. Hidrostatik gerilmeler, basıç veya çekme durumuna göre hacimsel genişleme ve büzülme yaratırken, normal ve kesme gerilmelerinden oluşan deviatorik gerilmeler malzemede şekil değiştirmeye yol açar [15].



Şekil 2.2. Üç boyutlu William-Warneke göçme yüzeyi



Şekil 2.3. William Warnke kriterinin σ_1 - σ_2 düzlemindeki izdüşümü

William-Warnke kırılma kriteri, toplam gerilme tensörünün ve deviatorik gerilme tensörünün invariantları cinsinden ifade edilebilir. Invariantlar, bu gerilme tensörlerinin koordinat sistemine bağlı olmayan büyüklükleri olup, toplam gerilme tensörü için I_1, I_2, I_3 olarak isimlendirilirken, deviatorik gerilme için J_1, J_2, J_3 olarak gösterilir. Kırılma kriteri invariantlar cinsinden yazıldığında Eş. 2.2 elde edilir.

$$f = \frac{1}{3z} \cdot \frac{I_1}{\sigma_c} + \sqrt{\frac{2}{5}} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\sqrt{J_2}}{\sigma_c} = 1 \quad (2.2)$$

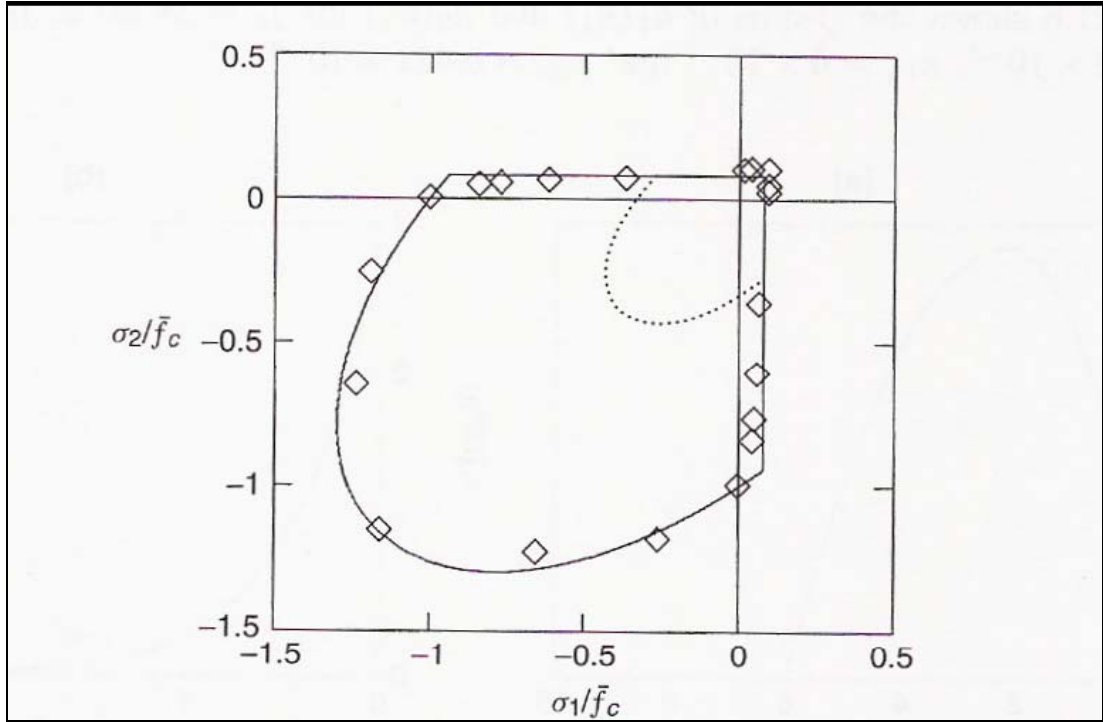
Eş. 2.2' de bahsi geçen r ve z değerleri, betonun çekme ve basınç değerlerine bağlı büyüklüklerdir. I_1 ve J_2 ise yukarıda bahsedildiği gibi gerilme tensörlerinin invariantları olup, asal gerilmelerin fonksiyonudur. Aslında Eş. 2.2 ile belirtilen kriter, Şekil 2.2 ile tanımlanan göçme yüzeyini temsil etmektedir. Bu yüzey üzerinde yer alan gerilmelerin aşılması durumunda, çatlak oluşmaktadır.

2.3.3. Beton modeli

Beton davranışının modellenmesi için uygun modelin bulunması, tez çalışmasının en kritik yerlerinden birini teşkil etmektedir. Beton, basınç ve çekme dayanımı birbirinden çok farklı olan, anizotropik, heterojen, nonlinear bir malzemedir. Ayrıca, özellikle çatlamış durumda, davranışı birçok ikinci derece mekanizmalardan etkilenir. Bir yapının dayanımını, sünekliğini, göçme modunu ve deplasmanı etkileyen bu faktörlerden bazıları basınç yumuşaması, agrega kilitlenmesi, donatının kaldırma etkisi, arayüz gerilmeleri, aderans, boyut etkisi, sünme ve rötredir.

Beton, basınç kuvvetlerine iyi bir şekil de karşı koyabilse de, çekme mukavemeti basınç mukavemetin yaklaşık 1/10'u oranındadır. Deneysel verilerle elde edilen iki eksenli göçme yüzeyi Şekil 2.4.'de yer almaktadır.

Şekil incelendiğinde, çekme kuvvetlerinin iki yönde etkimesi durumunda dayanımın tek eksenli çekme dayanımından farklı olmadığı görülmektedir. Ancak bir yüzeyde basınç, diğer yüzeyde çekme kuvvetleri olması durumunda dayanım azalmaktadır. İki yüzeyde de basınç durumunda, yaklaşık %25'ye kadar varan dayanım artışı gözlenmektedir [16].



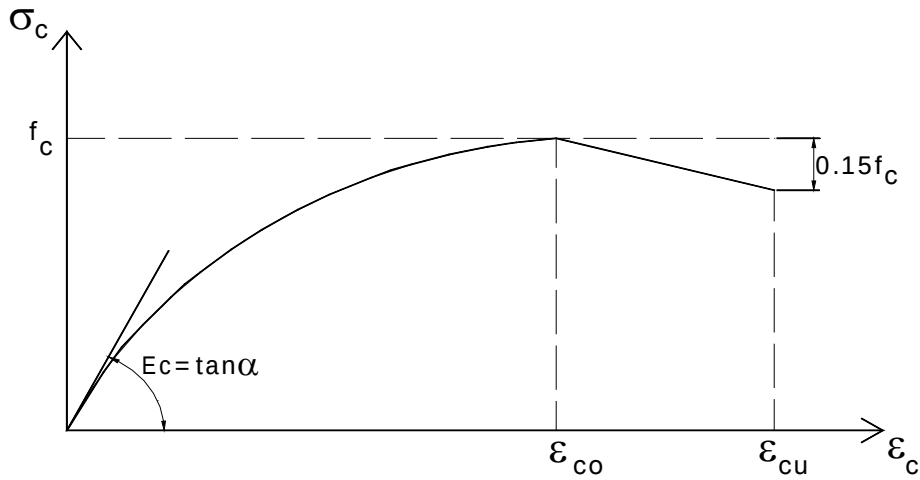
Şekil 2.4. Betonun iki eksenli göçme yüzeyi

Ayrıca beton davranışı, yükleme durumuna bağlıdır. Basınç altında nonlineer davranırken, çekmedeki davranışı lineer olmaktadır. Sargılı olması durumunda ise bir seviyeye kadar süneklik gösterebilirken, sargısız ve donatısız halde oldukça gevrekler. Basınç kuvvetleri altında dayanımının %30 oranına kadar lineer davranmakta, daha sonra oldukça geniş bir şekilde nonlineer davranış göstermektedir.

Beton davranışı incelendiğinde, elastik davranışının sonunda çatlakların oluşmasıyla rijitliğinin azaldığı, dayanımının sonuna ulaştığında ise daha az yüklü liflere yük aktarımı ile oluşan yeniden dağılım gereğince taşınan yükün

azaldığı ve maksimum basınç dayanımından daha düşük bir seviyede ezilme olduğu gözlemlenmektedir.

Betonun bu davranışı için, deney sonuçlarına dayanan birçok matematiksel model öne sürülmüştür. Hognestad, Kent ve Park, Üzümeri ve Sheikh bunlardan bazılarıdır. Tez çalışmasında, bu modeller arasında sargısız beton için geliştirilen Hognestad modeli kullanılacaktır [16]. Bu model genel parametreleri ile Şekil 2.5.'de verilmiştir.



Şekil 2.5. Hognestad beton modelinde yer alan parametreler

Bu modelde gerilme şekil değiştirme ilişkisi, tepe noktasına kadar parabol ile tanımlanmış olup, yumuşama bölümünün doğrusal olduğu varsayılmıştır. Bu parabolün denklemi, Eş. 2.3 ile tanımlanmıştır.

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (2.3)$$

Betonun basınç dayanımına karşılık gelen tepe noktasındaki şekil değiştirme Eş. 2.4 ile tanımlanmıştır. Maksimum gerilmedeki şekil değiştirmesi ise 0.0038 olarak alınmaktadır.

$$\epsilon_{CO} = \frac{2f_C}{E_C} \quad (2.4)$$

Hognestad modelinde betonun başlangıç elastisite modülü için Eş. 2.5 kullanılmaktadır.

$$E_C = 12680 + 460 f_C \quad (\text{Mpa}) \quad (2.5)$$

2.3.4. FRP kompozitleri

FRP kompozitleri, birbiri içinde çözünmeyen lif donatı ve polimer bağlayıcıdan (epoksi) oluşur. Karbon veya cam esaslı olabilen bu lifler, polimer bağlayıcı içinde gömülüdür ve bu epoksi bağlayıcıdan çok daha güçlüdür. FRP kompozitleri, anizotropiktir; elastik modül, Poisson Oranı gibi özellikleri her yönde farklıdır. Ancak çalışmamızda indirekt çekme kuvvetleri etkisindeki FRP plakalarının sadece lif doğrultusundaki özelliklerinden faydalanacağımız için, FRP kompozit malzemesi izotropik, lineer elastik model uygulanacaktır.

2.4. ANSYS Modellemesi

ANSYS, 1971 yılında ilk yayınlanmasından günümüze kadar; statik, dinamik, ısı transferi, akışkan mekaniği ve elektromanyetizma analizlerinde yaygın olarak kullanılmış olan kapsamlı ve çok amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Bu yapısı onun havacılık, otomotiv, elektronik ve nükleer alanlarında da uygulanmasını mümkün kılmaktadır.

Ülkemizde mühendislik uygulamalarında birçok ticari sonlu eleman yazılımları kullanılmaktadır. Genelde bu programlar, tasarıma yöneliktir. Bünyelerinde bulundurdıkları tasarım araçlarının, önceden tanımlanmış dünya şartnamelerinin ve tasarım tipinin (çelik- betonarme) kullanıcı

ihtiyaçlarına uygunluğu oranında kendilerine kullanım alanı bulurlar. Uygulamaya yönelik olduklarından bünyelerinde karmaşıık malzeme modelleri yoktur.

Tez alışması kapsamındaki ilgili deney modellerinin yapılmasında, yapısında özellikle beton için uygun malzeme modeli bulundurması ve çatlak modeline sahip olması sebebiyle ANSYS yazılımından yararlanılacaktır. ANSYS, alışması sırasında birçok dosya yazar; bu dosyalar yükleme durumu, malzeme özellikleri, yük adımları ve analiz tipine bağlı olarak değişen ve analiz özelliklerini saklayan dosyalardır [17]. Örnek olarak, 30 yük adımlı nonlinear bir analizde, yaklaşık 50 adet dosya yaratılmakta ve bir analiz için dosyaların kapladığı alan yaklaşık 1,8 GB olmaktadır.

ANSYS bünyesindeki temel sonlu eleman analizi adımları ve kullanılan işlemci tipleri aşağıda sıralanmıştır.

Önişlemci (Prep7)

- Eleman tiplerinin belirlenmesi
- Eleman sabitleri (real constants)
- Malzeme özelliklerinin tanımlanması
- Model geometrisinin girilmesi
- Sonlu elemanlar ağı özelliklerinin belirlenmesi
- Yaratılan geometriyi ağa bölmek

Çözüm İşlemcisi (SOLUTION)

- Sınır (mesnet) koşullarının belirlenmesi
- Dış yüklemenin girilmesi
- Nodal çözümün yapılması ve ilgili eleman özelliklerinin hesaplanması

Sonişlemci (POST1)

- Sonuç dosyasından sonuçların okunması

- Eleman sonuçları dosyasının okunması
- Sonuçların listelenmesi
- Sonuçların görselleştirilmesi

2.4.1. Eleman tipleri

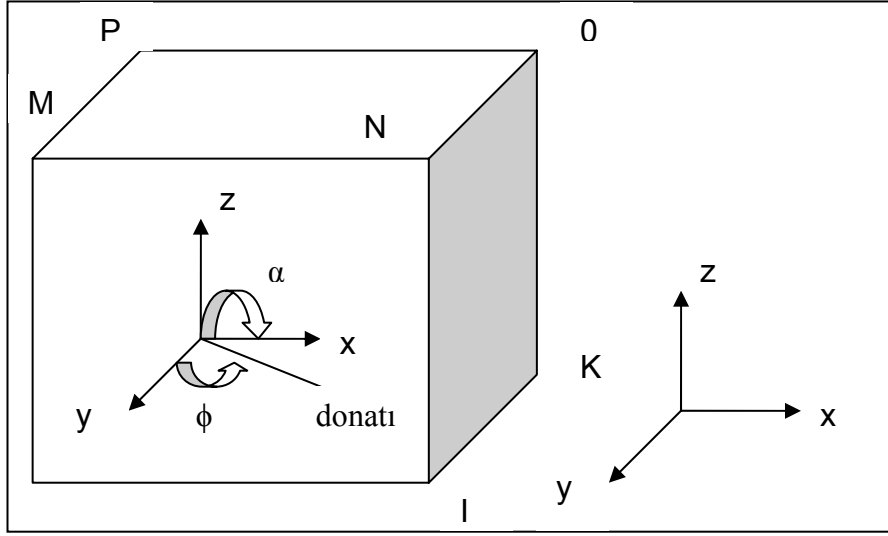
ANSYS yazılımında birçok eleman tipi bulunmaktadır. Deneyde yer alan farklı malzemeler için farklı eleman tipleri seçilmiştir. Eleman tipi seçiminde, nod sayısı, boyut sayısı, içinde gizli bir eleman bulundurması veya tabakalar halinde modellenebilirliği gibi kriterler göz önünde bulundurulur. Her ayrı eleman tipi için, daha karmaşık özelliklerin belirtilmesi amacıyla, malzeme sabiti grupları (real constant set) tanımlanmalıdır. Böylelikle aynı eleman ve malzeme tipi için farklı özelliklerde elemanlar yaratılabilir.

Takip eden bölümlerde her malzeme için modelleme kriterleri ortaya koyulacaktır.

Beton

Beton modellemesi için; özel olarak ANSYS eleman kütüphanesine dahil edilmiş, üç boyutlu, her düğüm noktasında üç serbestlik derecesine sahip 8 düğüm noktalı Solid 65 elemanı kullanılmıştır. Bu eleman, plastik deformasyon yapma, asal gerilmelere dik olarak çatlama ve ezilme davranışı gösterme özelliklerine sahiptir. Ayrıca, çoklu gerilme durumu için betonun kırılma kriteri de Solid 65 elemanında mevcuttur. Bu elemanın geometrisi ve düğüm noktaları Şekil 2.6.'da yer almaktadır.

Solid65 elemanı, daha önce bahsedilen eleman sabiti grupları sayesinde, içerisinde gizli donatı bulundurma özelliğine sahiptir. Bu donatı açılar ve hacimsel oran ile belirtilmektedir. Tez çalışması kapsamında donatı modellemesi bulunmamaktadır.



Şekil 2.6. Solid 65 elemanı [17]

ANSYS'de beton için tanımlanması gereken özellikler;

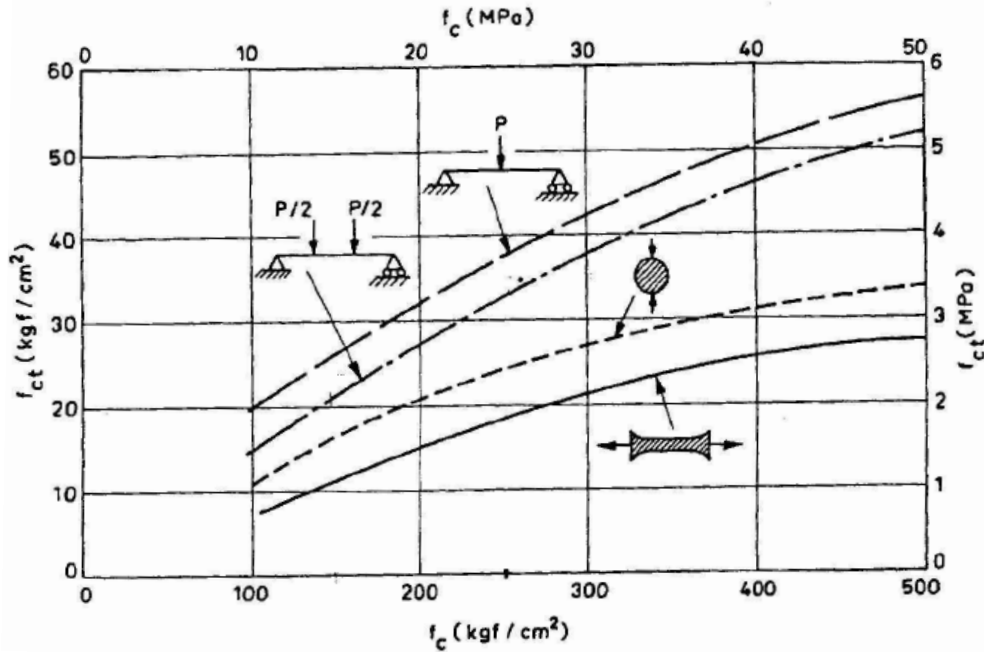
- Başlangıç elastik modül
- Tek eksenli basınç dayanımı
- Tek eksenli çekme dayanımı (kırılma modülü)
- Poisson oranı
- Kesme transfer katsayısı
- Basınç altında gerilme- şekil değiştirme ilişkisi

Analizlerde basınç dayanımı 15 Mpa ve 25 Mpa olan iki çeşit beton sınıfı kullanılmıştır. Her iki dayanım sınıfı için de başlangıç elastik modülü ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisi için Hognestad Modeli kullanılmıştır.

Donatısız beton kiriş davranışı için en kritik değişkenin çekme dayanımı olduğu göze çarpmaktadır. Betonarme hesaplarında ihmal edilen beton çekme dayanımı, bu tez çalışması kapsamında yürütülen analizlerde en önemli ve hassas değişkenlerden biridir. Genel olarak TS500'de beton çekme dayanımı, basınç dayanımının bir fonksiyonu olarak Eş. 2.6 ile verilmektedir.

$$f_t = 0,35\sqrt{f_c} \quad (2.6)$$

Ancak bünyesinde birçok değişken olan betonun çekme dayanımı, test metoduna bağlıdır. Bu test metotları; direkt çekme deneyleri, yarma deneyleri ve eğilme deneyleridir. Çekme dayanımı, dolaylı çekme deneylerinde daha yüksek olmaktadır. Direkt çekme deneyi hariç diğer deney metotları dolaylı yoldan çekme dayanımı tayinine yöneliktir ve eğilme deneylerinde bile, yüklemenin tek nokta veya iki nokta olmasına göre beton çekme dayanımı değişmektedir [16]. İki nokta yüklemesinde maksimum moment etkisindeki bölge daha geniş olduğundan, bu bölgede heterojen yapı sebebiyle lokal çatlak oluşma ihtimali daha fazladır. Bu sebeple tek nokta yüklemesi deneyleri daha yüksek dayanım vermektedir. ANSYS modelinde çekme dayanımı olarak, Şekil 2.7'de de yer alan grafikteki iki nokta yüklemesi için verilen değerler esas alınacaktır. Bu grafikteki değerler, H.Rüşh tarafından Munich Teknik Üniversitesi'nde yürütülen kapsamlı deney programından elde edilmiştir [16].



Şekil 2.7. Betonun deney metotlarına göre çekme dayanımı [16]

Poisson oranı beton için 0,2 alınmıştır.

Kesme transfer katsayısı olarak adlandırılan β_t çatlak yüzeyindeki durumu ifade etmektedir. β_t değerleri 0 ile 1 arasındadır ve 0 değeri kesme transferinin olmadığı düzgün yüzeyli çatlak, 1 değeri ise kesmenin tamamen transfer olduğu durumu ifade eder [17]. Tez çalışmasında β_t için 1 değeri kullanılmıştır.

Yukarıda anılan beton malzemesine ait bütün sayısal değerler, Çizelge 2.1'de yer almaktadır.

ANSYS'de tanımlı beton elemandaki herhangi bir yöndeki asal çekme gerilmesi kırılma yüzeyinin dışında kalıyorsa elemanda çatlak oluşmaktadır. Bu çatlak oluşumundan sonra, asal gerilmelere paralel yöndeki elastik modül sıfırlanmaktadır. Ezilme olayı ise, bütün asal gerilmelerin basınç olması durumunda oluşmaktadır. Betonun ezilmesine sebep olan bu gerilme durumu, göçme yüzeyinin dışında yer almakta olup, ezilmenin oluşmasıyla bütün yönlerdeki elastik modül sıfırlanmaktadır [17].

Modelleme kapsamında yürütülen analizlerde, çok erken yük seviyelerinde mesnet noktalarında ve yükleme bölgesinde betonun ezildiği, bu olayı takip eden birkaç adım sonra ise deplasmanların çok arttığı ve nonlinear analizin yakınsamadığı gözlemlenmiştir.

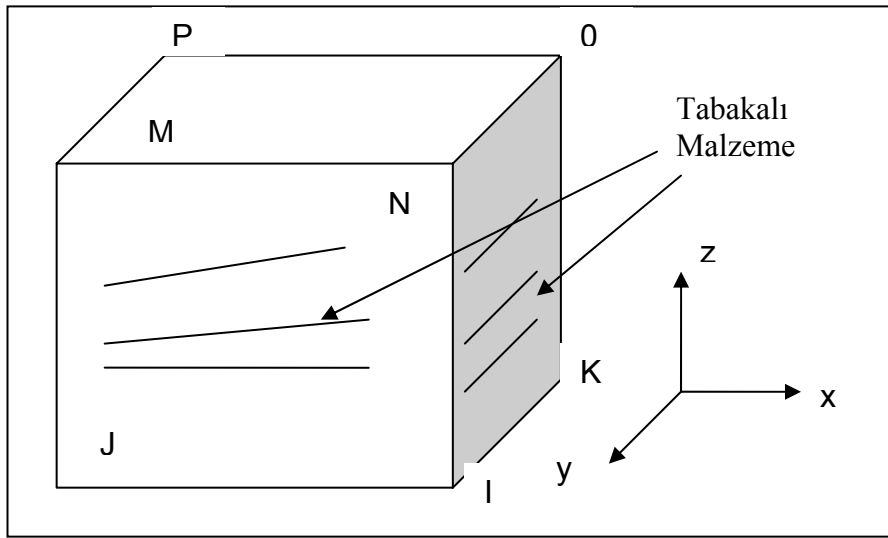
Aslında, betonun 'sadece ezilme' ile göçmesi pek muhtemel değildir. Silindir veya küp numunelerle yapılan beton basınç deneyi testlerindeki göçme modları incelendiğinde, betonun aslında ezilerek göçtüğü deney sayısının çok az olduğu görülür. Tek eksenli basınç kuvvetleri etkisindeki beton numunesinde, Poisson etkisi ile yükleme eksenine dik ikincil kuvvetler oluşur. Beton çekmede çok daha zayıf olduğundan, çekme çatlakları göçmeye sebebiyet verir. Bu sebeplerden dolayı, bu çalışmada betonun ezilmesi ihmal edilmiştir.

Çizelge 2.1. Malzeme özellikleri

Malzeme	Eleman Tipi	Malzeme Özellikleri		
1	Solid65	Lineer Isotropik Pekleşmeli		
		EX(MPa)	2,1E+4	
		PRXY	0,3	
		Multilineer Isotropik Pekleşmeli		
			Şekil Değ.	Gerilme (MPa)
		1.Nokta	0,0003	6.7
		2.Nokta	0,0004	8.7
		3.Nokta	0,0008	15.6
		4.Nokta	0,001	18.3
		5.Nokta	0.001718	24.3
		6.Nokta	0.002068	25
		7.Nokta	0.0038	21.25
		Beton		
		ShrCf-Op	1	
		ShrCf-Cl	1	
		UnTensSt(MPa)	3.2	
		UnCompSt(MPa)	-1	
		BiCompSt	0	
		HydroPrs	0	
		BiCompSt	0	
		UnTensSt	0	
		TenCrFac	0	
2	Solid 46	Lineer Isotropik		
		EX(MPa)	2770	
		PRXY	0.22	
3	Solid 45	Lineer Isotropik		
		EX(MPa)	2,1E+5	
		PRXY	0.3	
4	Targe170 Conta173	Lineer Isotropik		
		EX(MPa)	3800	
		TAUMAX T _{MAX} (Mpa)	20	

FRP kompozitleri

FRP tabakalarının modellenmesinde; Solid 46 elemanı kullanılmıştır (Şekil 2.8). Tabakalı malzemeleri modellemekte 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 verir [17]. Bu özelliği sayesinde Solid 46 içerisinde değişik lif sayısına, kalınlığa ve orientasyon açısına sahip FRP plakası modellenebilir.



Şekil 2.8. Solid 46 elemanı [17]

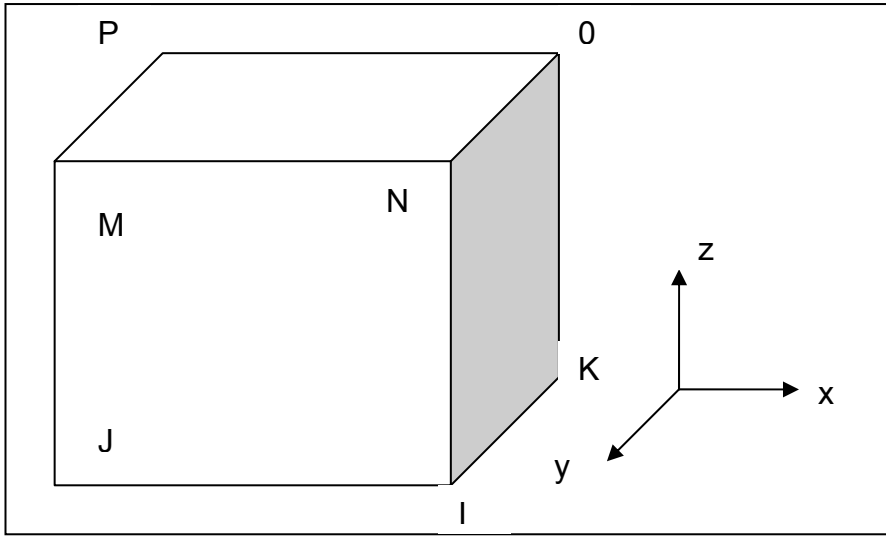
Bu elemanı tanımlamak için; tabaka kalınlıkları, doğrultu (yön) açıları, tabaka sayısı ve ortografik malzeme özelliklerinin girilmesi gerekmektedir [17]. Çalışmamızda, Solid 46 elemanının koordinat sistemini değiştirmeden sadece 1 adet tabaka tanımlanmış olup, lineer izotropik malzeme özelliği varsayılmıştır. Ayrıca, liflerin elastik modülü bağlayıcı epoksiden çok daha fazla olduğundan, liflerin elastik modülü kullanılmıştır.

FRP malzemesinin ANSYS modelinde kullanılan özellikleri Çizelge 2.1'de yer almaktadır. Özet olarak, bu elemanın modellemesinde; liflerin bağlayıcı içerisinde düzgün dağıldığı, bağlayıcı içerisinde boşluk bulunmadığı, yüklerin

lif doğrultusunda etki ettiği, her iki malzemenin de lineer elastik davrandığı ve lifler ile epoksi arasında mükemmel bağ olduğu kabulleri yapılmıştır.

Mesnet plakaları

ANSYS modellemesi bölümünde anılacağı üzere, mesnet noktalarında ve yük uygulama noktalarındaki lokal gerilme yığılmalarını önlemek üzere mesnet plakaları modele dahil edilmiştir. Bu amaçla, sekiz düğüm noktalı ve her düğüm noktasında üç serbestlik derecesine sahip Solid 45 elemanı kullanılmıştır (Şekil 2.9). Bu elemanda malzeme özelliği olarak tamamen elastik davranan çelik malzemesi kullanılmıştır.



Şekil 2.9. Solid 45 elemanı [17]

Temas (kontak) elemanları

Temas problemleri, yüksek derecede nonlineer özellik gösterir ve önemli ölçüde işlemci kaynağı gerektirir. Temel olarak temas yüzeyi modellemesinde iki adet problem bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, bazı durumlarda analiz tamamlanmadan hangi yüzeylerin temas halinde olacağını kestirilmesinin zor olmasıdır. Yüzeyler veya düğüm noktaları ani ve beklenmedik bir şekilde temas haline gelebilirler. İkincisi ise, birçok temas probleminin sürtünme

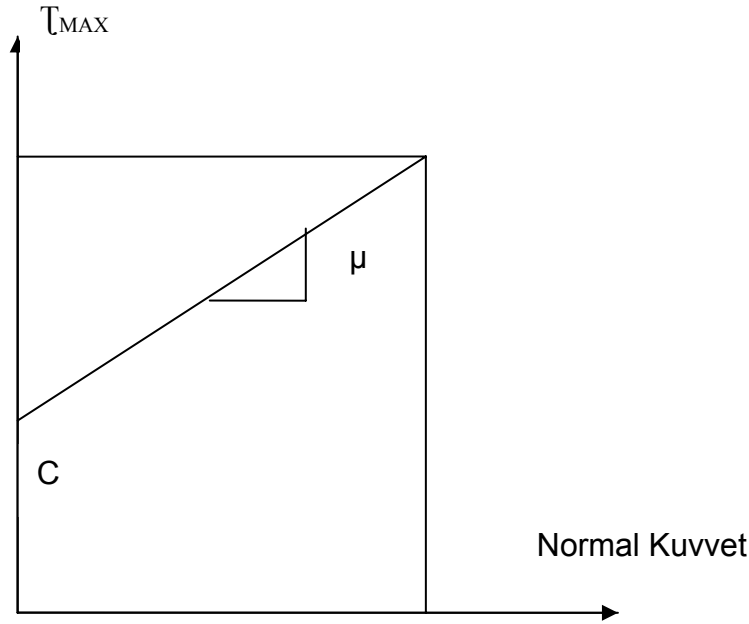
etkisi içermesi ve bu lineer olmayan sürtünme davranışının yakınsama problemleri yaratmasıdır.

Modelleme kısmında daha detaylı olarak açıklanacağı üzere, bazı analizler için beton-FRP arayüzünde temas yüzeyleri tanımlama gereği ortaya çıkmıştır. Bu temas yüzeyi, yüzeyler arasında, düğüm noktaları arasında veya yüzey ile bir düğüm noktası arasında olabilir. Tez çalışmasında kullanılacak olan yüzey-yüzey teması için ANSYS içerisinde temas yüzeyi, iki elemanın yüzey normallerinin karşılaştırılması ile oluşur. Rijitlikleri farklı olan iki eleman için bu olay, rijitliği yüksek elemana bir 'Target' elemanı, rijitliği düşük elemana ise bir 'Contact' elemanı atamakla mümkündür. Bu amaçla, bağlanacağı yüzeye uygun olmaları sebebiyle 'Targe 170' ve 'Conta 173' elemanları seçilmiştir. Bu elemanlar 4 düğüm noktalıdır, bağlandıkları Solid 65 (Beton) ve Solid 46 (CFRP) elemanları ile aynı serbestlik derecesine sahiptir ve ara düğüm noktaları bulunmamaktadır. Arayüzü oluşturan bu elemanlar, ilgili yüzeyin düğüm noktalarına bağlanır. Bu iki eleman tipinin, tek bir yüzey oluşturmaları için yüzey normalleri karşılaştırılır ve ikisi tek bir eleman sabiti grubu (Real Constant Set) ile tanımlanır. Bu temas elemanlarında, analiz tipine ve gereksinmelere bağlı olarak birçok farklı özellik atanabilir. Genel olarak daha rijit yüzeye bağlanan 'Target' elemanı içerisinde yüzey geometri özellikleri (çıkıntılı ve/veya yuvarlak yüzeyler) tanımlanabilmekte, FRP yüzeyinde yer alan 'Contact' elemanı için ise, Coulomb sürtünme katsayısı (μ), kohezyon (C) , normal ve kesme rijitliği ve tez çalışması için en önemli özellik olan iki yüzey arası maksimum gerilme (T_{MAX}) gibi değerler tanımlanabilmektedir. FRP beton arası etkileşim, klasik bir Coulomb sürtünme modelinden farklıdır. Çünkü klasik sürtünme modelinde, Şekil 2.10'da gösterildiği gibi yüzeye etkiyen normal kuvvetin sürtünme katsayısı oranındaki kısmı, yanıl kuvvet yaratmaktadır. Oysa ki FRP - beton arasında normal kuvvet etkisi ve sürtünme katsayısı olmadığından bir maksimum gerilme değeri tanımlanmalıdır. Bu amaçla, ANSYS'de iki yüzey arası maksimum gerilme değeri (T_{MAX}) tanımlamak gereklidir. Columb modelinde, ve birçok temas probleminde T_{MAX} değeri oldukça büyük (E+20 Mpa) alınması

gerekirken, FRP-beton arayüzünde bu noktada program değeri değiştirilerek Eş.2.7 önerilmektedir [17].

$$\tau_{MAX} = F_y \times 1/\sqrt{3} \quad (2.7)$$

Bu denklemde F_y FRP malzemesinin çekme dayanımını temsil etmektedir.



Şekil 2.10. Coulomb sürtünme modeli grafiği

Ayrıca, beton-FRP arayüzünü oluşturan bu iki eleman arasında belirli bir uzaklık sağlanabilmekte veya bu uzaklık tamamen ihmal edilebilmektedir.

Temas yüzeylerindeki davranışa yönelik olarak ANSYS farklı temas algoritmaları sunmaktadır. Bunlardan en önemlileri 'Penalty' metodu ve Langrange metodudur. Penalty yönteminde, arayüzde bir yay tanımlanarak iki temas yüzeyi arasında ilişki kurulur. Langrange metodu ise birçok 'penalty' metodunun iterasyonundan oluşur. Bu yöntemde, analiz sırasında düşeyde iki elemanın birbirinin içine girme miktarının tolerans sınırlarında olup olmadığı kontrol edilir. Bahsedildiği gibi, tez çalışmasında sadece yanal sürtünme mevcuttur. İki temas yüzeyi arasındaki kayma miktarı ise yanal

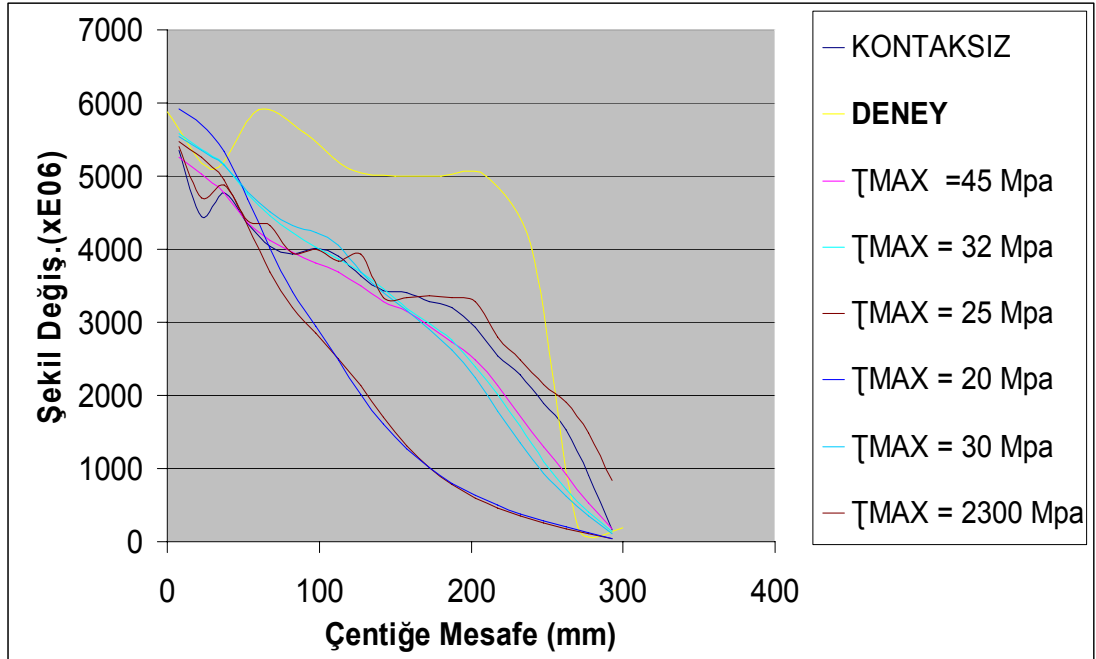
(tanjant) rijitlikle ilgilidir. Yüksek yanal veya düşey rijitlik, kayma miktarını azaltır ancak yakınsama problemlerine yol açar. Düşük rijitlik değerleri ise bir miktar kayma oluşur ve hatalı sonuçlara sebebiyet verir. Ideal durumda, kaymanın az olması için yeterince büyük, yakınsama problemlerinin önüne geçmek için ise yeterince küçük rijitlikler seçilmelidir.

Yukarıda anılan davranışlar, ANSYS üzerinde eleman sabitleri ve KEYOPT seçenekleri yardımı ile tanımlanabilmektedir. Ancak birçok durumda, bir temas yüzeyi rijitliği tanımlamaya gerek yoktur [17]. Yukarıda da anıldığı gibi, tez kapsamında yapılan birçok deneme yanılma analizi sonrasında, T_{MAX} değerlerindeki değişikliklerin çok önemli gerilme ve şekil değiştirme dağılımları oluşturduğu belirlenmiştir.

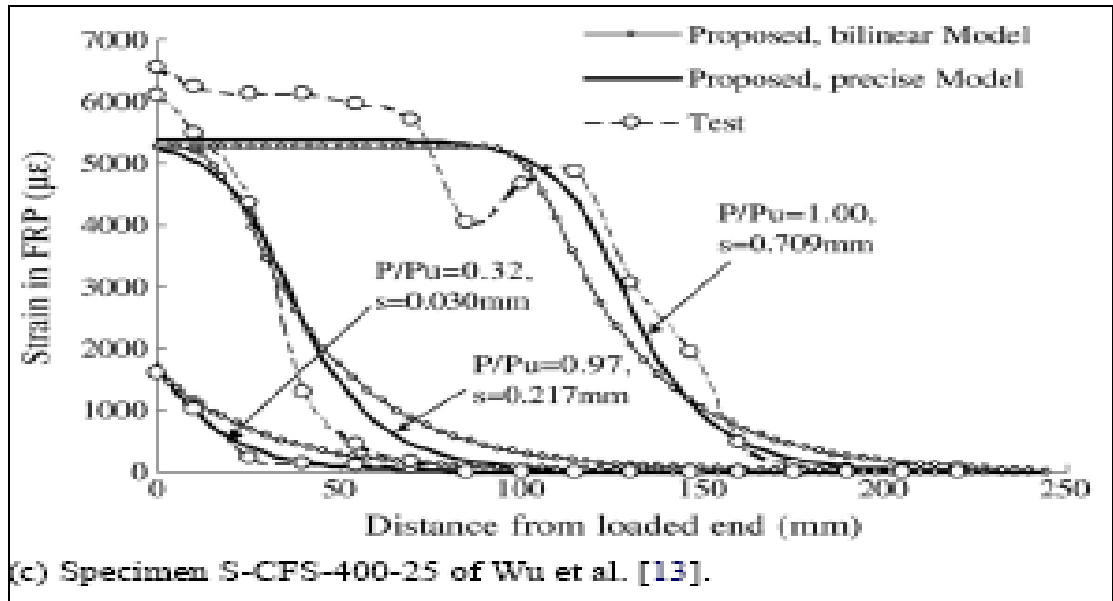
Temas yüzeyinin doğru olarak modellenmesi için, 16 numaralı deney elemanı üzerinde kontak elemanı kullanmadan CFRP-beton arayüzünde elde edilen çentiğe uzaklık- CFRP şekil değiştirme eğrisi, farklı T_{MAX} değerleri ile elde edilen dağılımlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 2.11 incelendiğinde, her ne kadar farklı T_{MAX} değerlerinde şekil değiştirmenin minimum ve maksimum değerleri fazla değişmese de dağılımın oldukça değiştiği göze çarpmaktadır. Ayrıca Eş. 2.7' ye göre elde edilen $T_{MAX} = 2300$ Mpa değeri kullanıldığında davranış temas elemanı kullanılmayan modelle yaklaşık aynı olmaktadır.

Aslında bu grafiğin en önemli özelliği, $T_{MAX} = 25-30$ Mpa aralığında şekil değiştirme dağılımının çok radikal bir biçimde değişmesidir. Gerilme dağılımındaki bu ani değişiklik, CFRP tabakasının yüzeyden soyulmasını temsil etmektedir. Deney elemanlarında bu soyulma etkili bir şekilde tayin edilememiştir. Deney parametreleri çok farklı olsa da, Lu, Teng, Ye ve Jiang (2005) tarafından farklı gerilme - kayma grafikleri kabulü ile elde ettiği farklı yük adımları için çizilen şekil değiştirme dağılımına çok yakındır (Şekil 2.12). Bu iki grafikteki dağılım şekilleri incelendiğinde, ANSYS modelinde T_{MAX} değerleri ile oynamanın, aslında farklı yük adımları arasında geçişi temsil ettiği söylenebilir. Ayrıca bu grafikte T_{MAX} değerlerinin belirli bir değerin

altında eğimin ani bir şekilde işaret değiştirmesi, soyulma davranışı ile uyumludur [8,11]. Bu durumda Şekil 2.11’de sarı ile gösterilen deney şekil değiştirmesi dağılımı, kopma anını temsil etmektedir.



Şekil 2.11. Farklı τ_{MAX} değerleri için şekil değiştirme dağılımları



Şekil 2.12. Şekil değiştirme dağılımının ani değişimi [9].

ANSYS'de efektif yapışma boyunun tayinine yönelik yapılacak olan çalışmada, maksimum değerlerden çok şekil değiştirme dağılımı önem kazanmaktadır. Şekil 2.12 incelendiğinde, 0,97 ve 1.0 yük seviyesindeki dağılımların oldukça farklı olduğu görülmektedir [9]. Bu davranış, soyulmanın başlamasıyla dağılımın şekil değiştirmesi ilişkisi ile de uyumludur [11]. Sonuç olarak, tez çalışması kapsamında, etkili yapışma boyunun tayini için soyulma anındaki değil, soyulmadan hemen önceki durumdaki dağılımın kullanılmasının daha gerçekçi olacağı değerlendirilmiştir. Bu amaçla, Şekil 2.11'de görüldüğü üzere, 16 numaralı deney kirişi üzerinde farklı temas parametreleri kullanarak yürütülen analizler sonucu, kabul edilebilir maksimum gerilme (T_{MAX}) değerlerinin 20Mpa civarlarında alınmasının kopmadan hemen önceki dağılımı gerçeğe yakın bir şekilde sağlayacağı belirlenmiştir. Aslında gerçeğe yakın bir dağılım elde etmek için olması gerekenden daha düşük seçilen bu değer daha da azaltılması, dağılımı etkilememektedir.

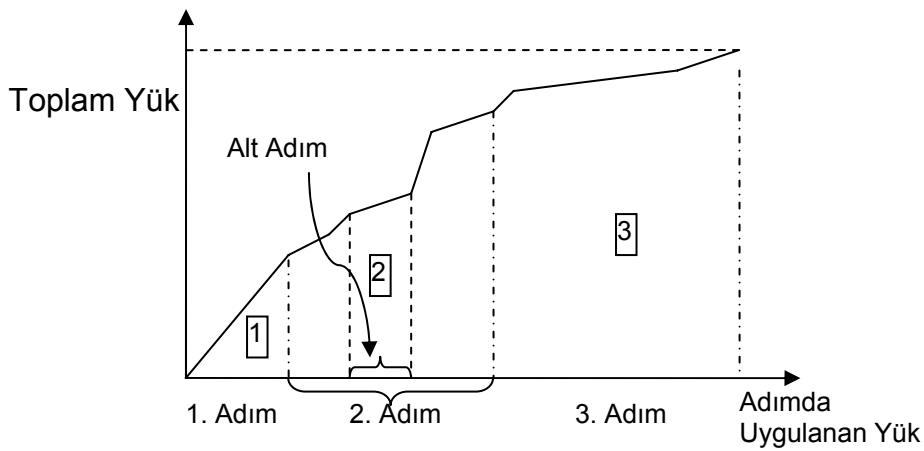
2.4.2. Nonlineer çözüm

Yükleme

Nonlineer analizde, sonlu elemanlar modeline etki eden toplam yük, yük adımı denilen küçük parçalara bölünmektedir. Lineer olmayan davranış sebebiyle, her yük adımından sonra modeldeki rijitlik değişimleri olmaktadır. Bu değişikliklerin çözüme yansıtılması için, her yük adımından sonra rijitlik matrisi güncellenmektedir. Bu noktadan hareketle, doğru analiz sonuçları elde etmek için yük adımlarının da doğru olarak tayin edilmesi gerekmektedir. ANSYS'de yük adımlarının kontrolü için farklı yöntemler mevcuttur. Toplam yük, kullanıcı tarafından yukarıda bahsedilen davranış esaslarına göre yük adımlarına ayrıldıktan sonra, bu adımların kaç parçaya bölüneceği ANSYS tarafından tayin edilebilmektedir. Yani ANSYS'in otomatik zaman adımlama (Automatic time stepping) özelliği sayesinde, yakınsama durumuna göre yük seviyeleri ayarlanmaktadır. Yakınsamanın kolay olduğu seviyelerde adım

sayısı azaltılmakta, zor yakınsama elde edilen bölümlerde ise adım sayısı arttırılmaktadır. Ancak bunun için, programın uygulayacağı ilk alt adım sayısının ve ANSYS'in seçeceği alt adım sayısının minimum-maksimum değerlerinin kullanıcı tarafından sağlanması gerekmektedir. Herhangi bir sebepten dolayı yakınsama olmaması durumunda yük alt adımı, belirlenen maksimum alt adım sayısı değerine kadar azaltılmaktadır. Yakınsamanın çabuk elde edildiği durumlarda ise alt adım sayısının minimum değeri kullanılmaktadır. Tez çalışmasında, minimum 10, maksimum 50 alt adım sayısı yeterli olmuştur.

Toplam basınç dayanımının sadece %30'una kadar lineer davranan betonda, lineer kısım için daha az yükleme adımına ihtiyaç varken, çatlaklar oluşuktan ve nonlineer davranış başladıktan sonra yük adımlarının küçültülmesi gerekmektedir. Örnek olarak, Şekil 2.13'de toplam yükün üçe bölünerek uygulandığı, yani üç yük adımına sahip bir analiz verilmiştir. İlk adım süresince davranış lineer olduğundan, ANSYS başlangıç alt adım sayısını değiştirmemiştir. Ancak 2. bölgeye geçildiğinde, yakınsama sorunlarından dolayı artık yük eşit parçalara bölünememiş, ANSYS'in otomatik zaman ayarlama sayesinde anlık rijitlik matrisi ve analizin yakınsama durumuna göre farklı büyüklüklerde uygulanmıştır.



Şekil 2.13. Yük adımları ve alt adımları

ANSYS yükleme ile ilgili bu özelliklere sahipken, niçin kullanıcının toplam yükü parçalara ayırarak girdiği sorgulanabilir; çünkü ANSYS zaten bu 'yük parçalaması' işini hem de anlık yakınsama durumuna göre alt adımlarda yapabildiğine göre, kullanıcının maksimum adım sayısını arttırmak kaydıyla (böyle bir durumda yazar tarafından maksimum adım sayısı 1000 olarak önerilebilir), üst adımlarda da yapabilir. Ancak, gerçekte durum böyle olmamakta, yukarıdaki örnekteki gibi 3 adım yerine 20-30 adım uygulanması gerekli olan bir nonlinear analizde yükü parçalara bölmeden girerek ANSYS tarafından uygulanacak maksimum adım sayısını arttırmak pratik olarak kabul edilemez bir analiz süresi ve yakınsama sorunu yaratmaktadır.

Yüklemede makro kullanımı

Tez kapsamında yürütülen analizlerde, birçok yük adımı kombinasyonu denenmiş, yukarıda bahsi geçen bölgeler için farklı büyüklüklerde yük adımları tek tek manuel biçimde programa girilmiştir. Bir analizin tamamlanması için yaklaşık 30 adet yük adımı ortaya çıkmış, modeldeki diğer değişkenler ve modellenecek kiriş sayısı de göz önüne alındığında böyle bir yöntemin pratikten çok uzak olduğu anlaşılmıştır. Bu sebeple yeterince küçük seçilen ilk yüklemenin manuel olarak girilmesinden sonra sonra yüklerin ilgili düğüm noktalarına otomatik olarak girilmesini sağlamak için aşağıda yer alan basit makro yazılmıştır. ANSYS' de makrolar txt formatında yazılarak saklanmakta, makro içinde parametre kullanımı da mümkün olmaktadır.

```
antype,static,new
```

```
F,2715,FY,-50
```

```
F,2740,FY,-50
```

```
F,2739,FY,-50
```

```
F,2726,FY,-50
```

```
SOLVE
```

```
*do,i,1,45
```

```

antype,static,rest,last,last,continue
fscale,1.1
solve
*enddo

```

İki bölümden oluşan bu makronun ilk bölümünde yeni bir statik analiz yaratılmakta, belirlenen yönde belirlenen düğüm noktalarına yeterince küçük (50N) ilk yükleme yapılmakta ve analiz çözülmektedir. Yazılımın ikinci kısmında ise, 45 defa tekrarlanan bir döngü içerisinde statik analiz, 'antype,static,rest,last,last,continue' satırı ile tanımlanan son yük adımının son alt adımından itibaren devam ettirilmektedir. Analizin yukarıdaki satırla devamı sağlandıktan sonra, mevcut yük 1.1 kat arttırılmakta, çözüm yapılarak döngü sonlandırılmaktadır.

Burada seçilen 45 sayısı, toplam analiz adımını kapsayacak şekilde yeterince büyük olmalıdır. Yük çarpanı olan 1.1 sayısı ise, farklı denemeler sonucunda elde edilmiş, yakınsama ve hesaplama zamanı arasında denge oluşturan bir sayıdır. Bu durumda, adımı sayısını ifade eden n sayısı ile herhangi bir yük adımının sonundaki yük seviyesi Newton cinsinden Eş. 2.8 ile ifade edilebilir. Bu denklem n sayısının tamsayı değerleri için geçerlidir; çünkü yukarıda ANSYS, her yük adımını yakınsama durumuna göre farklı büyüklükteki parçalara bölmektedir.

$$F_{\text{toplam}} = 50 \times 1.1^{(n-1)} \quad (\text{Newton}) \quad (2.8)$$

Şüphesiz ki böyle bir yaklaşım, alt yük seviyelerinde yükün küçük adımlarda, üst seviyelerde ise daha büyük adımlarla etki edilmesi anlamına gelmektedir. Bu ise, çatlak oluşumu ile beraber yük adımlarının küçültülmesi gerektiği gerçeğiyle çelişki içinde görünmektedir. Kiriş dayanımına bağlı olarak toplam 25-45 arası adım sayısı oluşturan yukarıdaki denklem, aslında göçme yüküne yakın yüklemelerde bile uygun yük arttırmaları içermektedir. Bunun sebebi, bu '1,1' çarpanının tasarımında bu yüksek yük adımlarının dikkate

alınmasıdır. Buradan hareketle, kullanılan 1,1 çarpanı, analiz başındaki yüklemeler için çok küçük olmakta dolayısıyla işlem süresini gereksiz yere arttırmaktadır. Ancak tek bir denklem ve tek bir makro kullanmanın pratikliği yanında bu dezavantaj oldukça makul görülmektedir.

Newton-Raphson yöntemi

ANSYS içerisinde, model rijitliğini yük adımları sonrasında güncellemek üzere, Newton-Raphson yönteminden faydalanılmaktadır. Temel prensip olarak, Newton-Raphson metodu, her yük adımından sonra kabul edilebilir limitler dahilinde yakınsama sağlanması için iterasyonlar yapılması esasına dayanır. Her çözümden önce artık yükleri tayin edilir. Bu artık yükler, uygulanan dış yüklerle eleman gerilmelerinden elde edilen kuvvetler arasındaki farktır. Bu artık kuvvetler uygulanarak lineer çözüm yapılır ve yakınsama kontrol edilir. Eğer yakınsama için koyulan kriter sağlanmazsa bu artık yükler yeniden hesaplanır ve rijitlik matrisi tekrar revize edilir. Bu iterasyon süreci, yakınsama sağlanana kadar devam eder.

Bu iterasyon sürecinde kullanılan denklem ve prosedürler aşağıda açıklanmıştır.

$$[K_i^T] \{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F_i^{nr}\} \quad (2.9)$$

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + \{\Delta u_i\} \quad (2.10)$$

Burada;

$[K_i^T]$ Tanjant Rijitlik Matrisi

$\{F_i^{nr}\}$ elemanların iç kuvvetlerini temsil eden yük vektörü

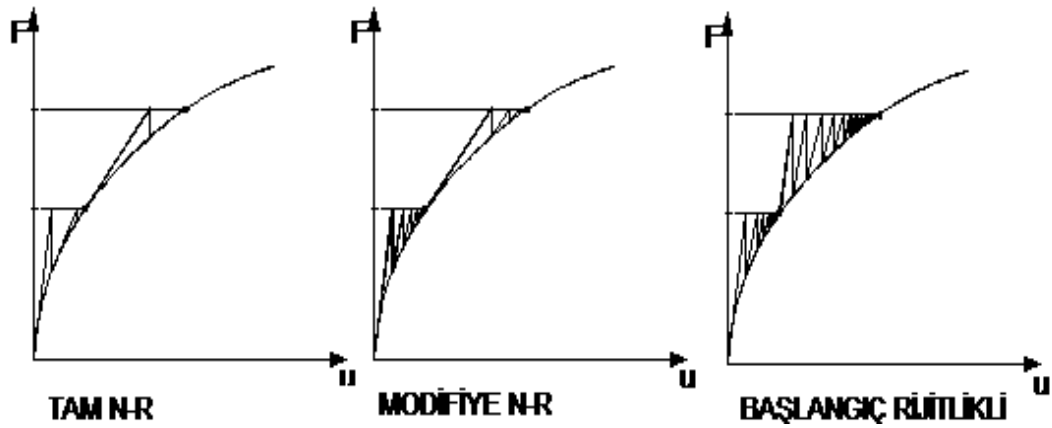
$\{F^a\}$ Yükleme vektörü

$\{u_i\}$ Serbestlik derecesi vektörü

Newton-Raphson iterasyonun temel adımları;

1. Bir $\{u_0\}$ değeri farzedilir. Bu değer, genelde bir önceki yakınsayan analize ait değerdir. İlk yük adımında $\{u_0\} = 0$ alınır.
2. $\{u_i\}$ vektörü Eş. 2.9'e göre hesaplanır.
3. $\{u_0\}$ değerine göre güncellenmiş tanjant matrisi $[K_i^T]$ ve iç kuvvet vektörü $\{F_i^{nr}\}$ değerleri bulunur.
4. $\{u_i\}$ ve $\{\Delta u_i\}$ Eş.2.10'a göre toplanarak bir sonraki deneme vektörü bulunur.
5. 2-4 arası adımlar, yakınsama elde edilene kadar devam ettirilir.

ANSYS Sonlu Elemanlar Programı nonlinear problemlerin çözümü için Newton – Raphson metodunu kullanır. Newton – Raphson metodunda üç yaklaşım vardır. Bunlar tam, Modifiye edilmiş ve başlangıç rijitlikli yaklaşımlardır (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Newton-Raphson iterasyon prosedürleri

Full(tam) N-R opsiyonu her iterasyonda rijitlik matrisini güncellerken modifiye edilmiş yaklaşımda rijitliği her alt adımda yalnızca bir kere günceller. Son olarak başlangıç rijitlikli yaklaşımda her iterasyonda başlangıçtaki elastik rijitlik değeri kullanılır. ANSYS, Solid 65 eleman tipi için Başlangıç rijitlikli opsiyonu kullanmaktadır [17].

Yakınsama kriteri

Yakınsama kriteri sağlanana kadar, yukarıda bahsedilen iterasyonlar tekrarlanır. Yakınsama kriteri ise ANSYS tarafından VALUEXTOLER çarpımı ile belirlenir. Buradaki VALUE, iterasyonlardaki dengelenmemiş yüklerin karelerinin karekökleri toplamı yöntemiyle (SRSS) bulunur. TOLER değeri ise, yük ve deplasman için ayrı ayrı tanımlanır ve ilk değerleri; deplasman için %5, yük için %0.5 dir. Daha sıkı yakınsama kriterlerinin kullanımı sonuçların doğruluğunu arttırmakla beraber iterasyon sayısını arttırır. Ayrıca beton gibi kırılğan malzemeler için yakınsama problemleri oluşturur [17].

Gerçekten de yukarıda anılan kriterler, analizin daha ilk adımlarında yakınsama problemlerine yol açmıştır. Deplasmanlar yakınsamakla beraber, yük değerleri yakınsamamaktadır. Bu sebeple deney kırışlerinin göçme yüküne kadar analizi devam ettirebilmek için yük kriteri iptal edilmiş, deplasman kriteri ise değiştirilmeden kullanılmıştır.

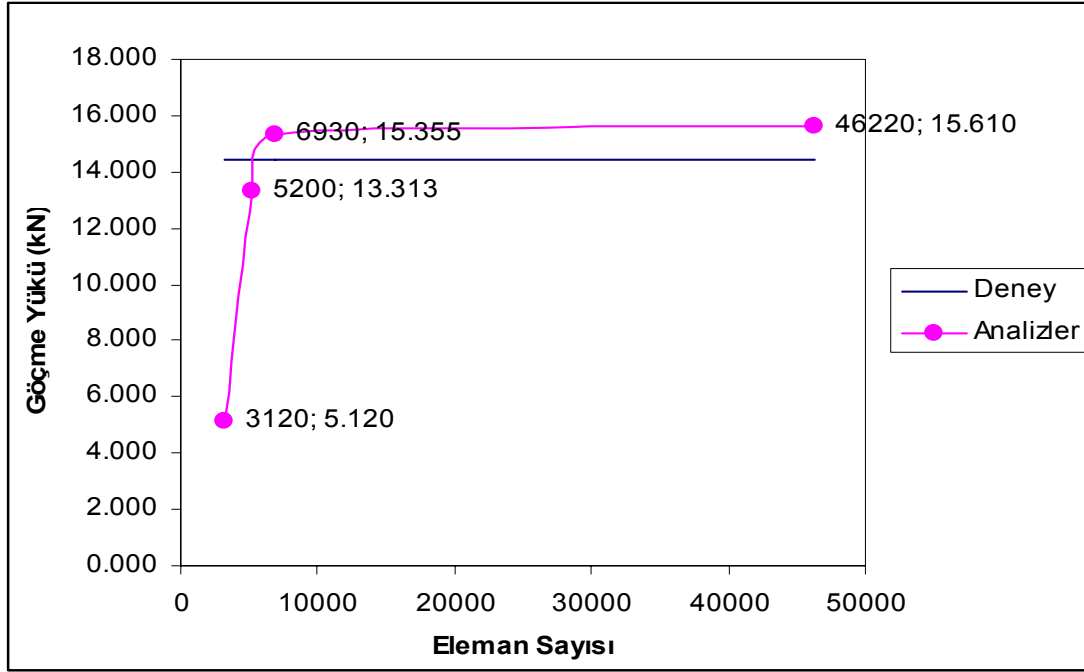
2.5. Deney Kirişi ve Sonlu Elemanlar Ağıının Oluşturulması

ANSYS yazılımından katı cisimlerin ağı bölünmesi için serbest ve düzgün olmak üzere iki çeşit yöntem mevcuttur. Serbest bölme işleminde, üçgen alan elemanlar veya dört yüzlü hacim elemanları kullanılırken, düzgün bölme yönteminde dört köşeli alan veya sekiz yüzlü hacim elemanları kullanılır [17]. Alan elemanlarda düzgün bölme yönteminin kullanılabilmesi için alanın üç veya dört kenarlı olması, karşı yüzlerde eşit sayıda eleman bulunması gereklidir. Hacim elemanlarında ise, dört, beş veya altı yüzlü olmalı ve yine her yüzde eşit eleman sayısına sahip olmalıdır [14].

Sonlu elemanlar ağıının kurulumunun sonuçların doğruluğu ve yakınsama üzerinde büyük etkisi vardır. Genel olarak ani boyut değişikliklerinden kaçınılmalıdır. Ayrıca lokal geometri değişiklikleri, temas yüzeyleri, gerilme

yığılma bölgeleri gibi yerlerde sonlu eleman ağını sıklaştırmak gerekmektedir [14].

Eleman sayısının artırılması her ne kadar gerçeğe daha yakın sonuçlar sağlasa da işlem hacmini büyük oranda arttırmaktadır. Belirli bir eleman sayısından sonra sonlu eleman sayısını arttırmak ise sonuçları fazla etkilememekte ve gereksiz işlem hacmi yaratmaktadır. Bu maksatla farklı farklı sonlu eleman sayıları için analizler yürütülmüş, göçme yükünün toplam eleman sayısı ile değişimi Şekil 2.15’de verilmiştir.



Şekil 2.15 Göçme yükünün eleman sayısı ile değişimi

Şekil 2.15 incelendiğinde, 6930 elemandan daha fazlasının göçme yükü sonuçlarını etkilemediği göze çarpmaktadır. Düşük eleman sayısı kullanıldığında ise, yakınsama ile ilgili sorunlar ortaya çıkmış ve analiz erken adımlarda sona ermiştir. Aslında 5200 elemanlık ağ ile 6930 elemanlık ağ arasında çok az fark mevcuttur ancak 15x15x25mm boyutlarında prizmatik elemanlar kullanılmasıyla elde edilen 6930 elemanlık sonlu elemanlar ağı,

kiriş geometrisini 15x20x25mm boyutlarında elemanlar kullanılmasıyla elde edilen 5200 elemanlık ağdan daha iyi yansıtmaktadır.

Gerilme, deplasman gibi analiz sonuçları Solid 65 elemanı için sadece nodlarda tanımlandığından çıktı istenen noktaların konumu da eleman boyutunun seçiminde önemli olmaktadır.

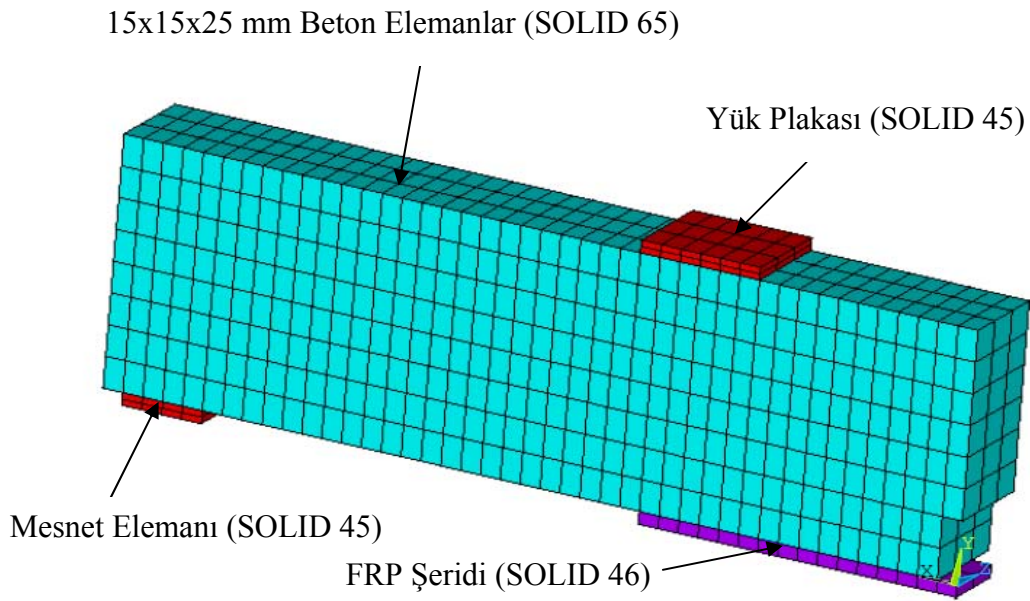
Bahsi geçen deney kirişlerinin modellenmesi için her ne kadar bazı bölgelerde daha büyük elemanlar kullanılarak işlem süresini azaltmak mümkün olabilse de, pratik olması sebebiyle tez çalışmasında bütün kirişte tek bir eleman boyutu kullanılmıştır. Boyut seçiminde çentik boyutu gibi geometrik kısıtlamalar da göz önünde bulundurularak deney kirişi 15x15x25mm lik sonlu eleman ağına bölünmüştür (Şekil 2.16).

Yukarıda belirtilenlere ek olarak, ANSYS'de yer alan sabit açılı çatlak modelini, -çatlağın dönmesine izin vermek suretiyle- gerçek davranışa yaklaştırmak için arayüzde çok küçük elemanların kullanımı düşünülebilir [3,9]. Ancak direk çekme deneyinde kullanılan beton bloklara göre çok daha büyük olan kiriş modellemesinde, belirtilenden daha küçük elemanların kullanılması pratik olmaktan uzaktır. Ayrıca, beton modellemesinde kullanılan Solid 65 eleman tipinde doğru sonuçlar alabilmek için, boyutları birbirine yakın prizmatik elemanların kullanılması gerekmektedir [17]. CFRP - beton arayüzünde çok küçük elemanlar kullanılarak diğer bölgelerde ani olarak eleman boyutlarının büyüülmesi yakınsama açısından sakınca yaratmaktadır. Anılan küçük eleman boyutlarının düzgün değişken bir şekilde arttırılması ise, toplam eleman sayısını arttırarak analiz verimini azaltacaktır.

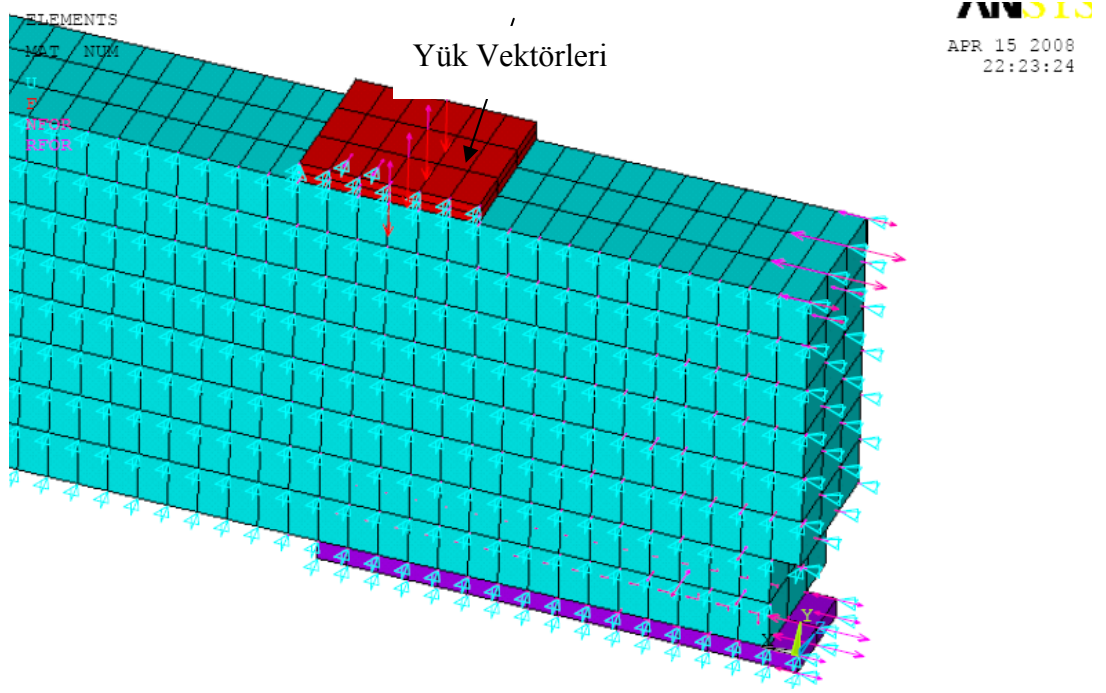
2.5.1. Mesnet koşulları

Deney kirişleri simetrik olduğundan, modellemede ayrıca simetriden de faydalanılmıştır. Toplam iki adet simetri ekseni mevcuttur. Şekil 2.17'de yer

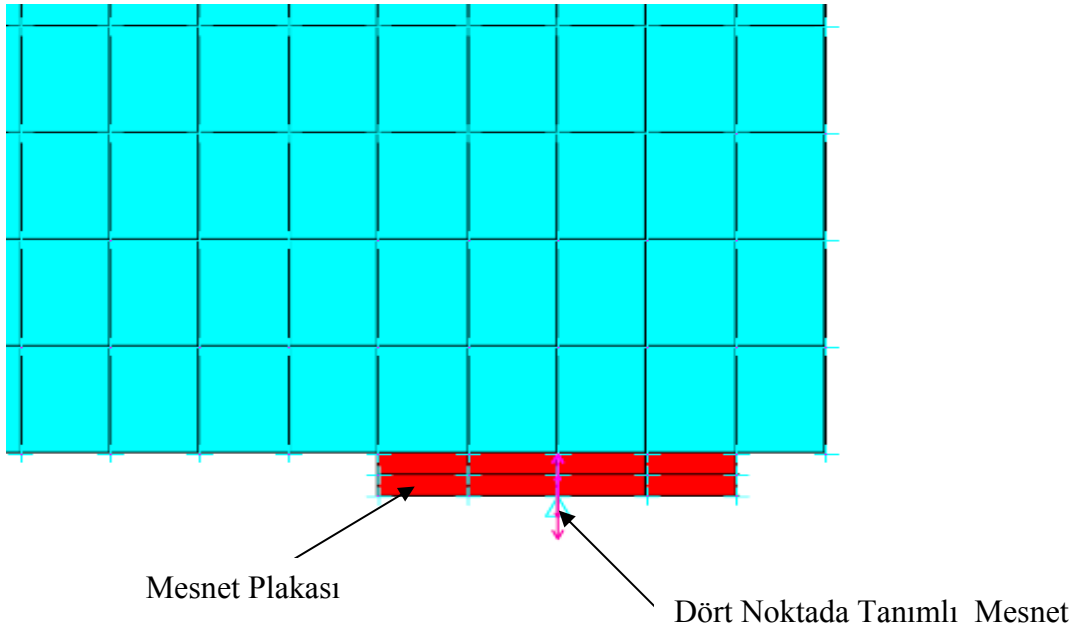
aldığı gibi modele kirişlerin dörtte birlik kısmı dahil edilmiş, sadece simetri düzlemlerine dik yönde deplasmana izin vermeyen mesnetler tanımlanmıştır. Analizin ilk adımlarında mesnet noktaları ve yük uygulama noktalarındaki lokal çatlaklar analizin ilerlemesine engel olmuştur. Bu sebeple, mesnet noktalarında mesnet plakası olarak SOLID 45 elemanı tanımlanmış ve mesnetteki dönmeden dolayı oluşabilecek çatlamanın önüne geçebilmek için Şekil 2.18'deki dönmeye izin veren detay kullanılmıştır. Yükleme noktalarında ise yük, Şekil 2.17'da yer aldığı gibi, yine noktasal yükler sebebiyle oluşan lokal çatlakları önlemek için SOLID 45 elemanının üzerinde 4 adet düğüm noktası üzerinde tanımlanmıştır.



Şekil 2.16 Sonlu eleman ağına bölünmüş deney kirişi ve eleman tipleri



Şekil 2.17. Modeldeki simetri düzlemleri



Şekil 2.18. Mesnet noktası detayı

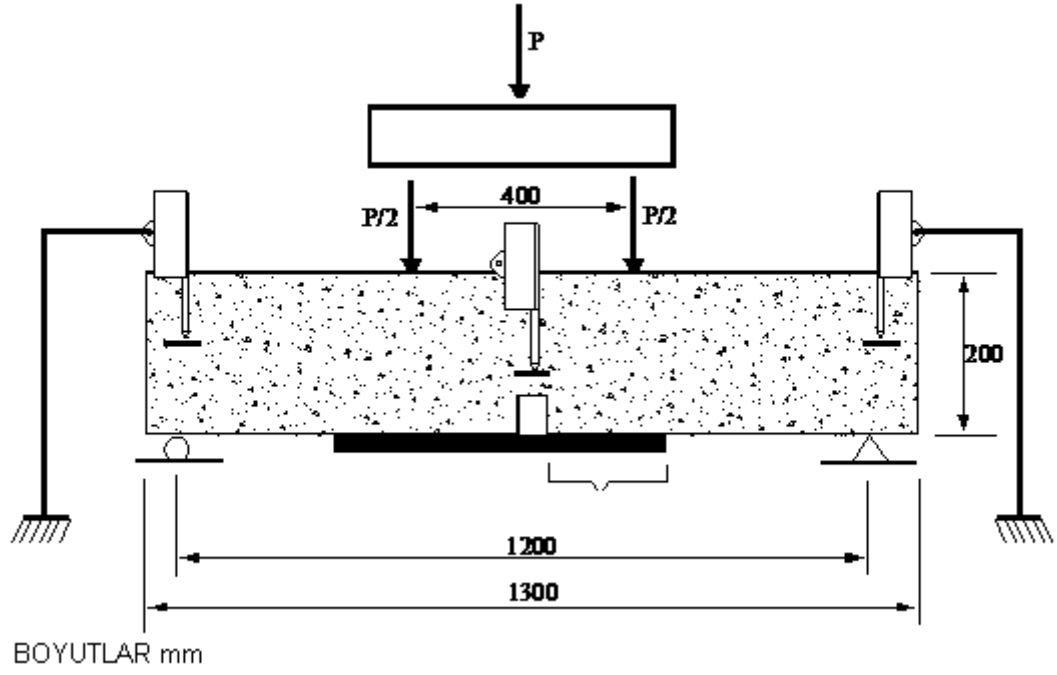
2.5.2. FRP'nin sonlu eleman ağına bölünmesi

Sonlu eleman ağının oluştururken, eleman boyutlarında ani değişimliklerin olmaması gerektiğinden ANSYS'de birbirine bağlanan elemanların boyutları için bir limit getirilmiştir. Bu sebeple gerçekte 0,12mm kalınlığında uygulanan FRP tabakası ANSYS'de 10 mm olarak modellenmiş, elastik modülünde kesit alanındaki artmayla doğru orantılı olarak azaltılmıştır. Nodları çakışması için, FRP elemanı boyutları, 10x15x25mm olarak belirlenmiştir.

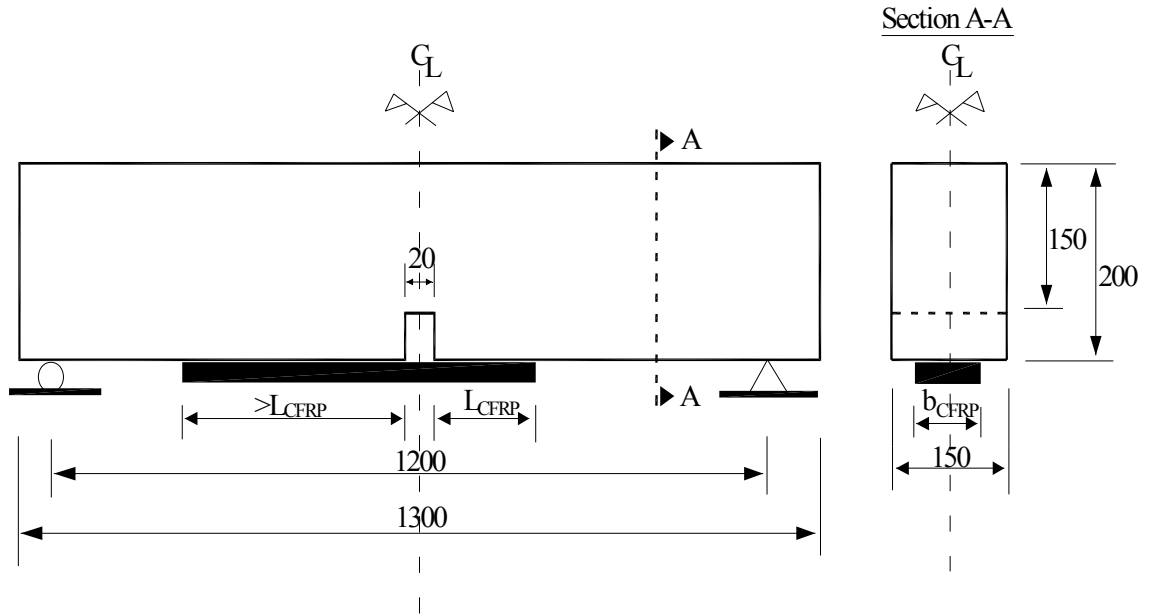
3. DENEY ÇALIŞMASININ TANITIMI

Yrd.Doç.Dr. Özgür ANIL tarafından CFRP şerit genişliği, yapışma uzunluğu, beton basınç dayanımı gibi parametreler kullanılarak, beton-FRP arasındaki gerilmelerin tayinine yönelik olarak yürütülen deneylerde, dört nokta yüklemesi altında eğilmeye karşı FRP plakası ile güçlendirilmiş 1300 mm uzunluğunda kirişler test edilmiştir. Ayrıca kiriş orta noktasında çentik olarak modellenmiş olan çatlağın gerilme dağılımı üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Belirli bir yapışma boyundan sonra, CFRP uzunluğunun dayanıma etki etmediği belirlenmiş, bu noktadan da efektif yapışma boyu tayin edilmiştir

Toplam 1300 mm uzunluğundaki deney kirişinin mesnet arası mesafesi 1200 mm olup, nokta yüklemeler arası mesafe 400 mm dir. CFRP genişliği 50 ve 100 mm olarak 150x200mm boyutlarındaki kiriş kesitinin alt yüzüne 0,12mm kalınlığında uygulanmıştır. Çatlak modellemesinde kullanılan çatlağın kiriş kesiti boyunca 20x15mm dir (Şekil 3.1,3.2). CFRP uygulamasında üretici tarafından sağlanan talimatlar izlenmiştir. Beton basınç dayanımı 15 MPa ve 25 MPa için 120 mm, 180 mm, 240 mm, ve 300 mm uzunluğundaki CFRP şeritleri 50 mm ve 100 mm genişliğinde yapıştırılmıştır. Toplam 16 adet olan Deney elemanlarının özellikleri, Çizelge 3.1’de özetlenmiştir.



Şekil 3.1. Deney yükleme düzeneği



Şekil 3.2. Deney elemanlarının geometrik boyutları

Çizelge 3.1. Deney elemanlarının özellikleri

Eleman #	Beton Basınç Dayanımı f_c (MPa)	CFRP Şerit Genişliği b_{CFRP} (mm)	CFRP Şerit Uzunluğu L_{CFRP} (mm)
1	15.2	50	120
2	14.8		180
3	14.4		240
4	15.6		300
5	15.8	100	120
6	14.2		180
7	14.7		240
8	15.3		300
9	25.0	50	120
10	26.0		180
11	24.0		240
12	25.2		300
13	24.8	100	120
14	24.4		180
15	25.6		240
16	25.0		300

4. YÜRÜTÜLEN SONLU ELEMAN ANALİZLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Tez çalışmasının temelini oluşturan deney elemanlarının ANSYS modellemesi iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda olarak halihazırda Yrd.Doç.Dr. Özgür ANIL tarafından deneyi yapılmış Çizelge 3.1’de yer alan deney elemanlarından bazıları modelleme amacıyla seçilmiştir. Bu seçim yapılırken, deney parametrelerini temsil etmesi açısından farklı beton basınç dayanımı ve CFRP genişliğine sahip elemanlar ele alınmıştır (Çizelge 4.1). Böylelikle deney verileri ANSYS sonuçları ile karşılaştırılarak hem ANSYS modelinin doğruluğu kontrol edilmiş, hem de ANSYS yazılımının deneye uygulanabilirliği sorgulanmıştır.

Çizelge 4.1. Deneyi yapılmış elemanlardan ANSYS modellemesi yapılanlar

Eleman #	Beton basınç Dayanımı (Mpa)	CFRP Şerit Genişliği (mm)	CFRP Uzunluğu (mm)
3	15	50	240
7	15	100	240
11	25	50	240
13	25	100	120
14	25	100	180
15	25	100	240
16	25	100	300

Modellemenin ikinci kısmında ise deney sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmış modeller üzerinde CFRP yapışma uzunluğu artırılmış ve beton CFRP arası şekil değiştirme dağılımı incelenmiştir.

CFRP-Beton arayüzündeki gerilme dağılımı ve efektif yapışma boyunun tayinine yönelik olarak, 25 MPa beton dayanımına ve 100 mm CFRP

genişliğine sahip 13, 14, 15 ve 16 numaralı deney elemanları, bu sefer CFRP-beton arayüzünde temas elemanı kullanılarak modellenmiştir. Daha sonra deneyi yapılmamış 360 mm ve 420 mm yapışma uzunluğuna sahip elemanların analizleri yürütülmüştür. Böylece, deneyi yapılmamış elemanların ANSYS'de modellenmesi ile verilerinin sayısını arttırma imkanı doğmuştur. Bu şekilde arttırılmış veri sayısı, daha doğru sonuçlara ulaşmayı mümkün kılmaktadır. Sonuç olarak, deneyi yapılmış ve yapılmamış elemanların ANSYS sonuçları üzerinde yapılan gözlemler sonucu efektif yapışma uzunluğunun tayini mümkün olmuştur. Modellemenin ikinci kısmında kullanılan eleman özellikleri, Çizelge 4.2'te yer almaktadır.

Çizelge 4.2. Efektif yapışma boyu tayinine yönelik yürütülen analizler

Eleman #	Beton basınç Dayanımı (Mpa)	CFRP Şerit Genişliği (mm)	CFRP Uzunluğu (mm)	Açıklama
13	25	100	120	Deneyi Yapılmış
14	25	100	180	Deneyi Yapılmış
15	25	100	240	Deneyi Yapılmış
16	25	100	300	Deneyi Yapılmış
-	25	100	360	Deneyi Yapılmamış
-	25	100	420	Deneyi Yapılmamış

Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 incelendiğinde, 13, 14, 15 ve 16 numaralı deney kırımları için hem temas yüzeyli, hem de temas yüzeyli analizlerin yürütüldüğü görülmektedir. 16 numaralı deney elemanında bu analizlerin sayısı farklı T_{MAX} değerleri ile arttırılarak, kontak yüzeyinde kullanılacak temas yüzeyi parametreleri tayin edilmiştir (Bkz. Şekil 2.11). Buna göre, daha önce de açıklandığı üzere $T_{MAX} = 20$ MPa civarlarındaki değerlerin şekil değiştirme dağılımını modellediği söylenebilir.

5. ANALİZ SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

5.1 Doğrulama Amaçlı Yapılan Analizler

Bu bölüm kapsamında yapılan analizlerde, temas elemanı kullanılmamış, CFRP ve beton düğüm noktaları karşılaştırılarak analizler yürütülmüştür (Bkz. Çizelge 4.1). Bu analizlerin her biri,

1. Göçme yükü
2. Göçme anında kiriş orta nokta deplasmanı
3. Yük-şekil değiştirme ilişkisi
4. Maksimum CFRP eksenel şekil değiştirmesi
5. CFRP boyunca şekil değiştirme ilişkisi

Davranışları bakımından incelenecektir.

Çizelge 5.1 Analizlerden elde edilen maksimum göçme yükü değerleri

Eleman #	ANSYS Göçme Yüğü (kN)	Deney Göçme Yüğü (kN)	% Fark
3	8.71	8.92	-2.4
7	12.74	14.08	-10.5
11	10.53	9.32	11.5
13	14.66	14.54	0.8
14	15.36	14.43	6.1
15	15.82	16.96	-7.2
16	16.43	14.62	11.0

Çizelge 5.2. Maksimum orta nokta deplasmanları

Eleman #	ANSYS Maksimum Deplasman (mm)	Deney Deplasman (mm)	% Fark
3	2.9	4.1	-41.4
7	2.38	3.52	-47.9
11	2.52	3.3	-31.0
13	1.15	2.62	-127.8
14	1.64	3.18	-93.9
15	2.12	3.81	-79.7
16	2.63	6.03	-129.3

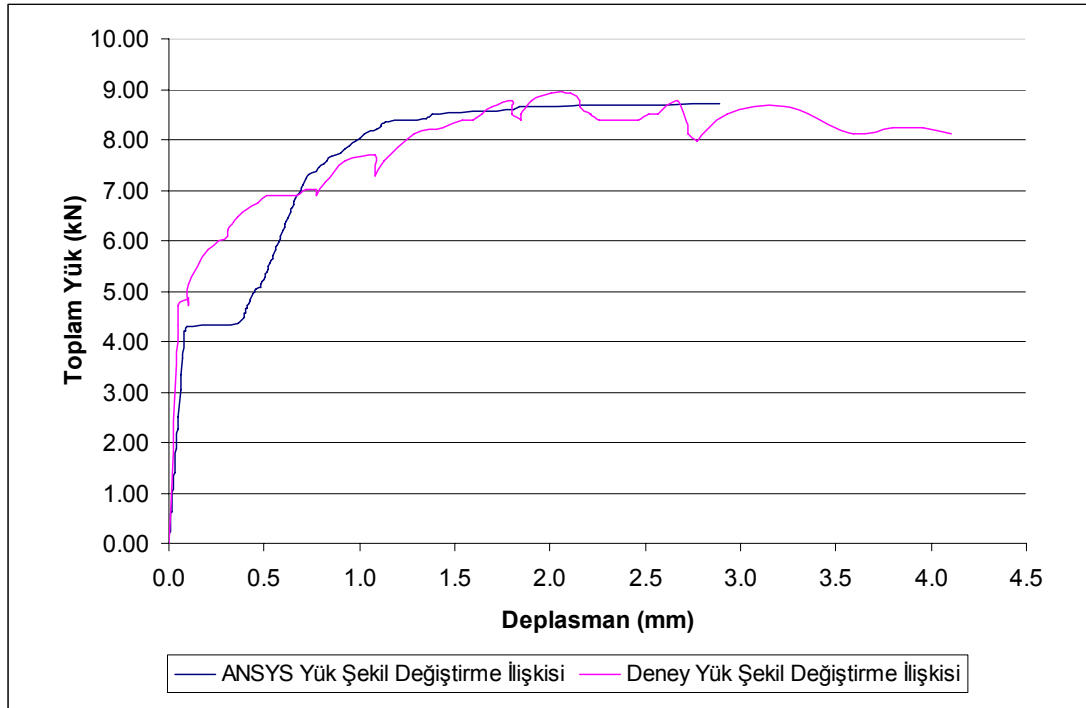
Çizelge 5.3. Maksimum CFRP şekil değiştirmesi

Eleman #	ANSYS Maksimum CFRP Şekil Değiştirme (mm)	Deney Maksimum CFRP Şekil Değiştirme (mm)	% Fark
3	5500	5213	5.2
7	4269	5668	-32.8
11	6573	5919	9.9
13	4545	5558	-22.3
14	4829	6027	-24.8
15	5039	5499	-9.1
16	5349	5880	-9.9

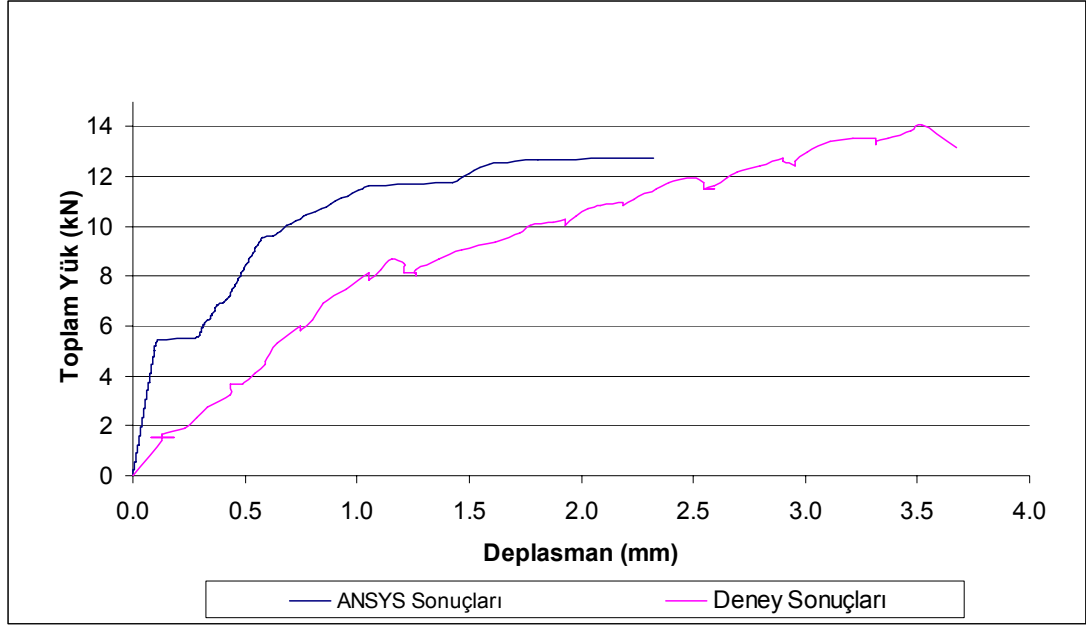
Çizelge 5.1 incelendiğinde, ANSYS modelinden elde edilen kiriş maksimum göçme yükünün deney sonuçlarının %10 sınırında olduğu açıkça görülmektedir. Bu sınır ise, sonlu elemanlar modelinin deney sonuçlarıyla uyumlu olduğunu göstermektedir.

Göçme anındaki maksimum orta nokta deplasmanlarını içeren Çizelge 5.2 incelendiğinde ise ANSYS sonuçlarının deney değerleri ile arasında %130'a varan büyük farklılıkların olduğu görülmektedir. ANSYS sonlu elemanlar modeli, kiriş sünekliliğini tanımlamada yetersiz kalmış ve deney sonuçlarının altında değerler vermiştir.

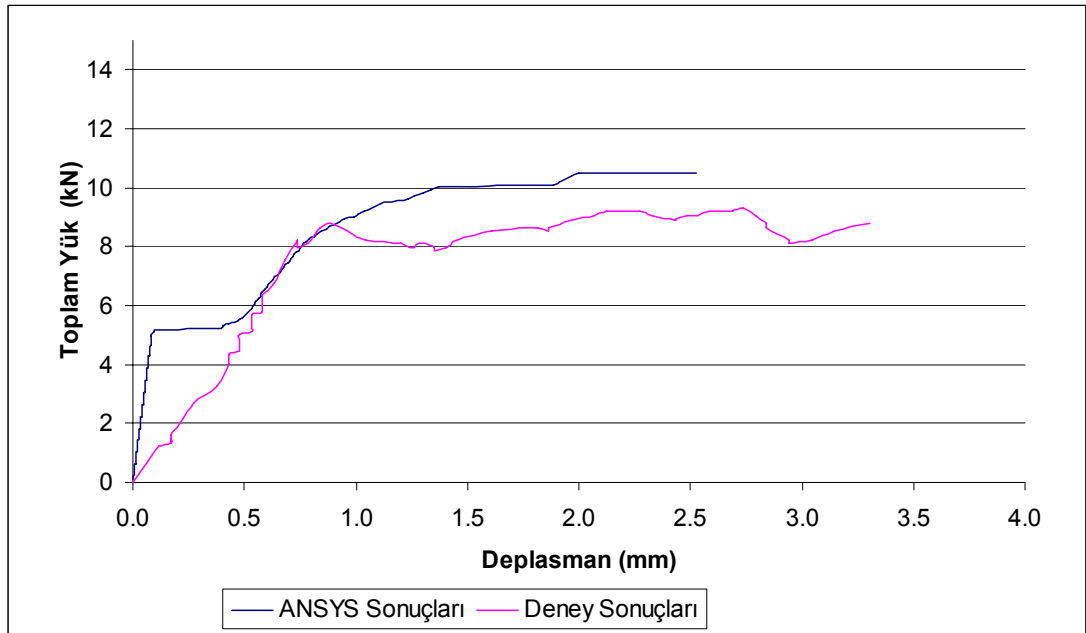
Çizelge 5.3'te yer alan maksimum CFRP şekil değiştirmeleri ise, $b=50\text{mm}$ genişliğindeki CFRP şerit için deney sonuçlarının üstünde, $b=100\text{mm}$ genişliğinde uygulanan CFRP şeritleri için ise deney sonuçlarının altında değerler vermektedir. Genel olarak %5- 20 arasında değişen bu fark, kabul edilebilir ölçülerdedir.



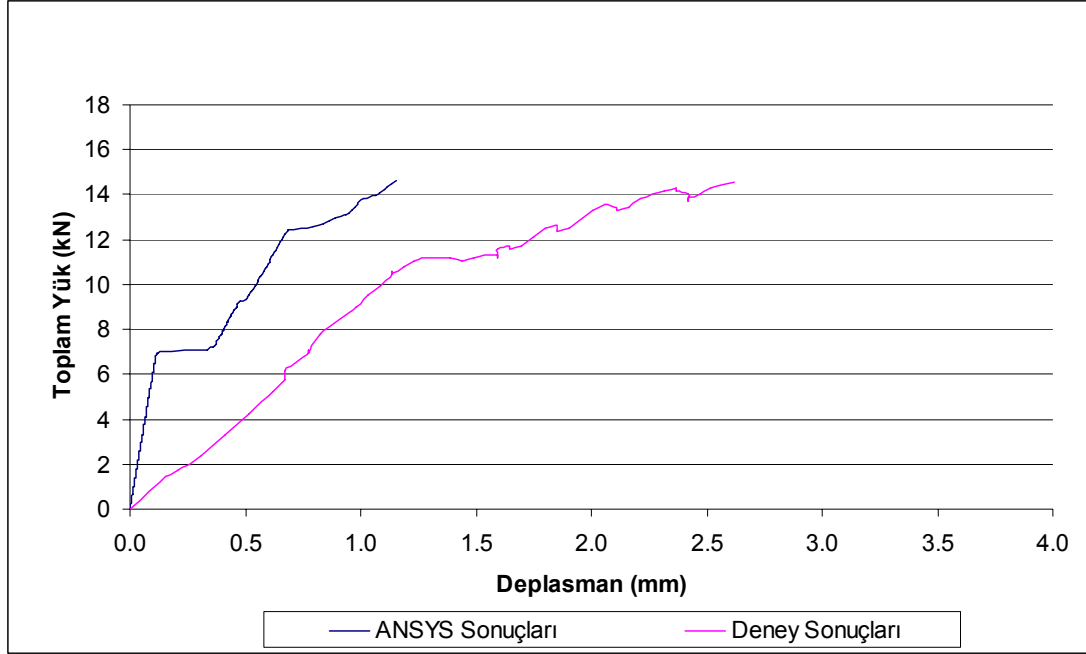
Şekil 5.1 Eleman 3 için yük şekil değiştirme ilişkisi



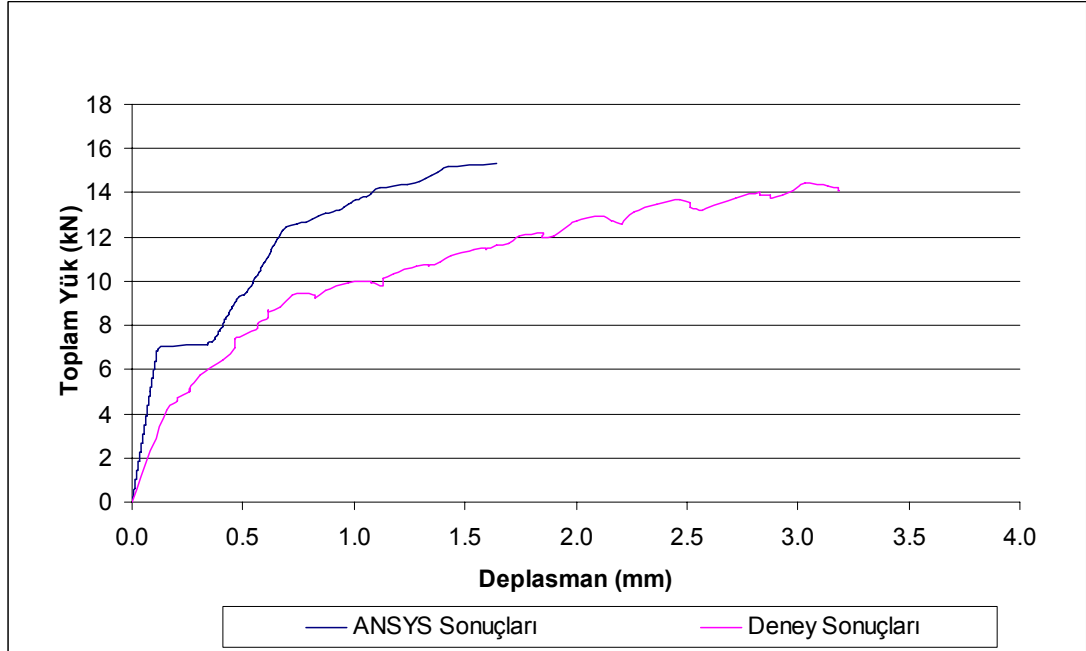
Şekil 5.2 Eleman 7 için yük şekil değiştirme ilişkisi



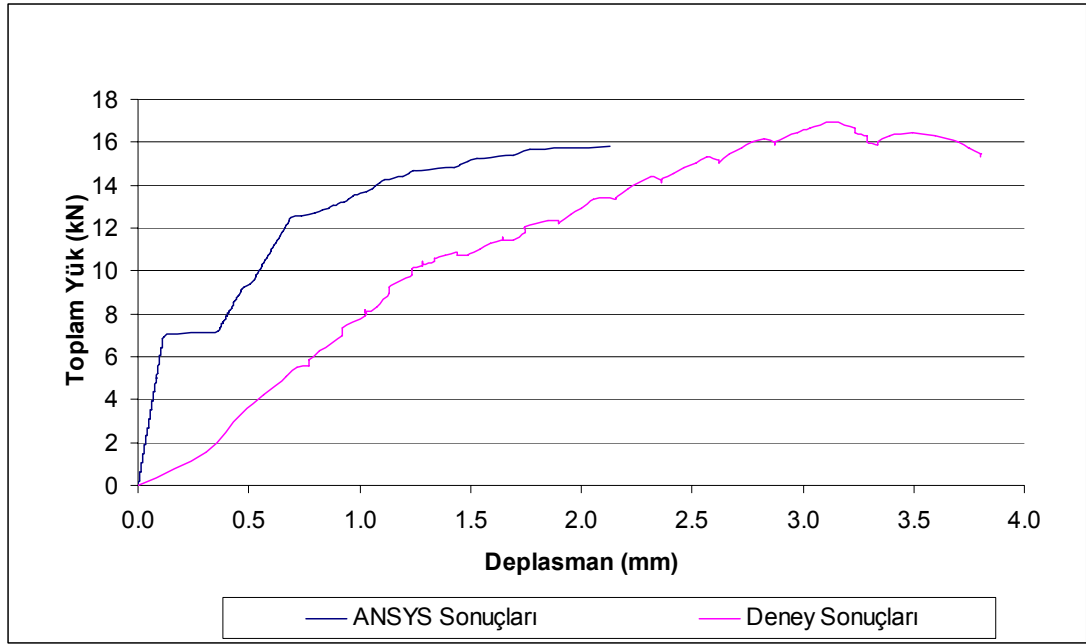
Şekil 5.3 Eleman 11 için yük şekil değiştirme ilişkisi



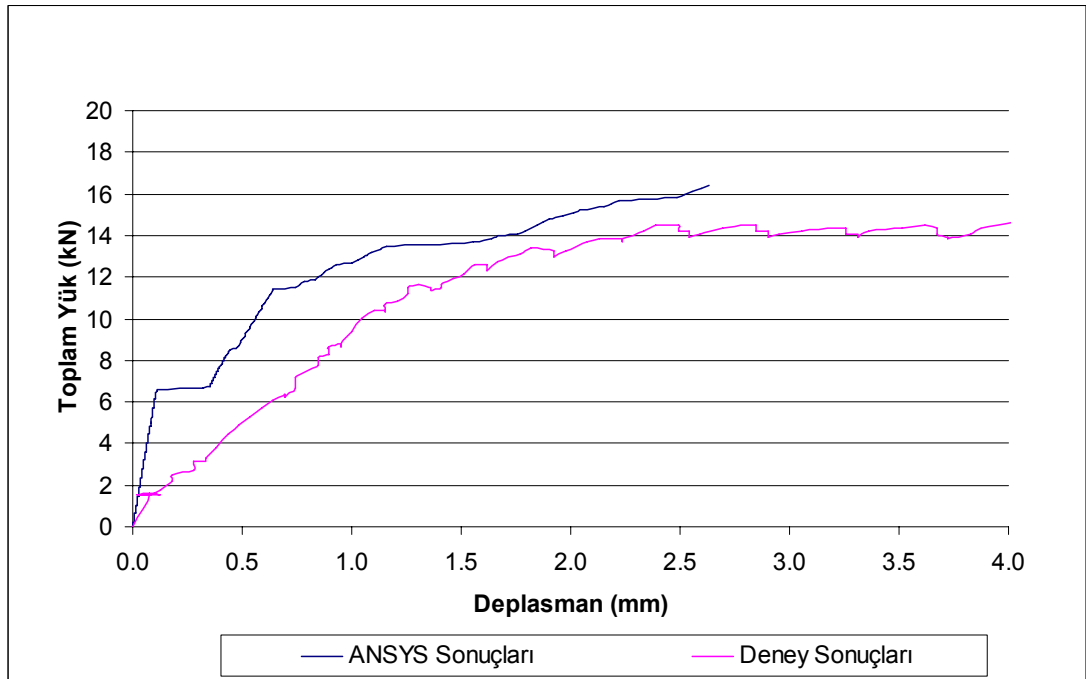
Şekil 5.4 Eleman 13 için yük Şekil değiştirme ilişkisi



Şekil 5.5 Eleman 14 için yük Şekil değiştirme ilişkisi



Şekil 5.6 Eleman 15 için yük şekil değiştirme ilişkisi



Şekil 5.7 Eleman 16 için yük şekil değiştirme ilişkisi

Deney davranışı ile sonlu eleman modeli arasındaki farkları daha iyi gözlemlemek maksadıyla, bu kirişlerin deneylerinde elde edilen yük-

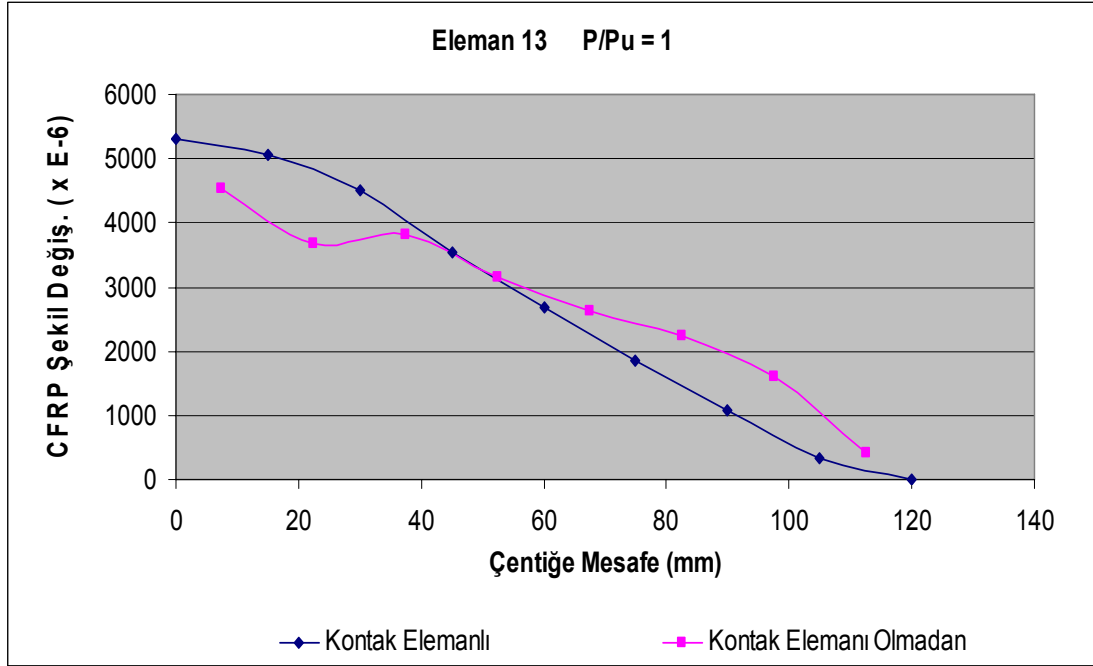
deplasman grafikleri ile ANSYS'de elde edilen yük-deplasman ilişkileri Şekil 5.1-5.7'de karşılaştırılmıştır. Genel olarak, ANSYS modellerinin başlangıç rijitliği daha yüksek olmaktadır. Ancak CFRP genişliğinin az olduğu 3 numaralı deney elemanı için, deney sonuçları ile ANSYS sonuçları oldukça yakındır. Yine aynı 50mm CFRP kalınlığının uygulandığı ama 3 numaralı deney elemanından farklı olarak 25 MPa beton basınç dayanımı kullanılan 11 numaralı deney elemanı için grafikler de oldukça yakındır. Bu yakınlık, yapıştırılan CFRP miktarının artmasıyla azalmaktadır. Sonuç olarak CFRP miktarının artması sisteme belirli bir mertebede belirsizlik sokmakta, deney sonuçları ile ANSYS sonuçları arasındaki farkı arttırmaktadır.

ANSYS'den elde edilen yük şekil değiştirme ilişkilerinin karakteristik özelliği, elastik davranışın bitiminde düz bir plato bölümüne sahip olmasıdır. ANSYS modelinde, eleman çatlamasıyla birlikte büyük riitlik değişimi olmakta ve artık kiriş lineer davranıştan uzaklaşarak lineer olmayan davranışa geçmektedir. Yük adımlarının yeterince küçük tutulması, bu ani geçişin yakalanabilmesine olanak tanımıştır.

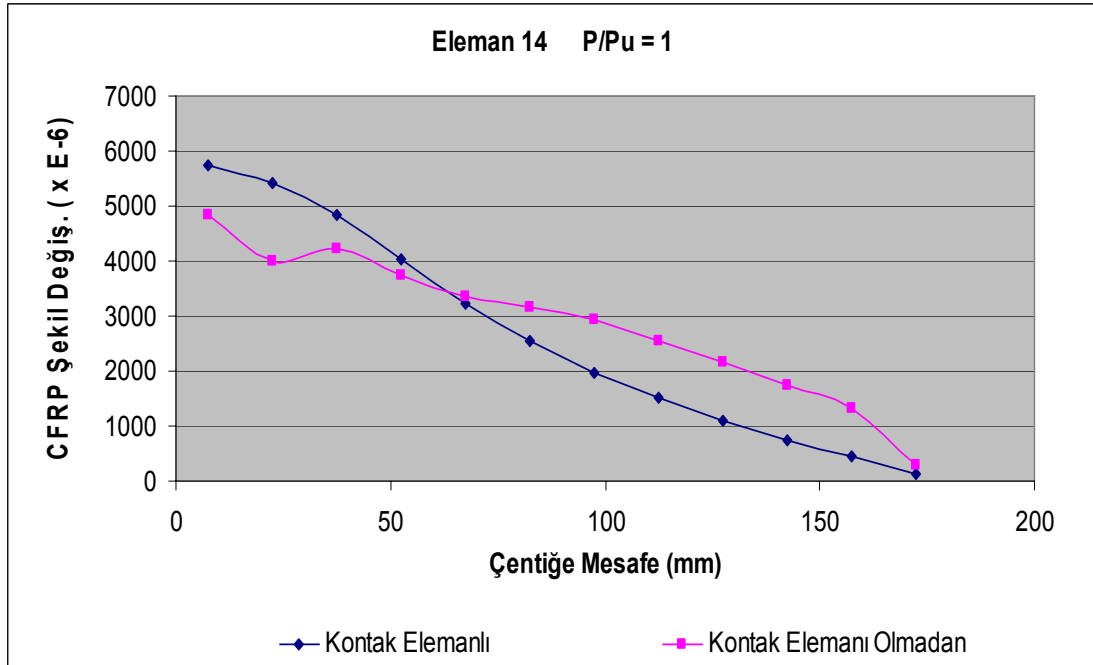
Süneklik ise, modellerin hiçbirinde gerçekçi olarak tespit edilememiştir. Bu farklılığın sebebi, kırılma anının ani olması, göçme öncesi karmaşık çatlak dağılımı ve ANSYS 'deki sabit açılı çatlak modelinin bu karmaşık çatlak davranışını kabul edilebilir limitler dahilinde temsil edememesidir [3,9].

5.2. Şekil Değiştirme Dağılımına Yönelik Yapılan Analizler

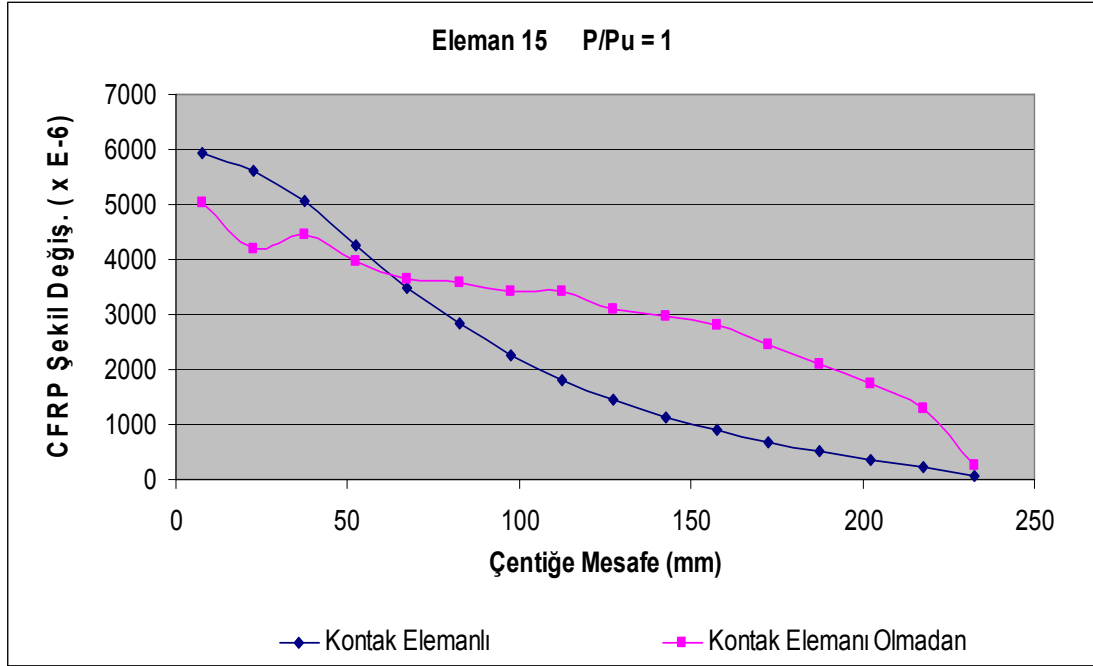
Bu amaca yönelik olarak Çizelge 4.2'de yer aldığı gibi, sabit CFRP genişliği 100 mm ve beton basınç dayanımı 25 MPa alınarak CFRP yapışma boyu arttırılmıştır. İlk olarak deneyi yapılmış 13, 14, 15 ve 16 numaralı kiriş elemanları hem temas elemanlı hem de temas elemanı olmadan modellenmiştir. Burada analiz daha da ileri götürülerek, deneyi yapılmamış 360 mm ve 420 mm CFRP uzunluğuna sahip elemanlar da modellenmiştir. Elde edilen şekil değiştirme dağılımları Şekil 5.8-5.13'da yer almaktadır.



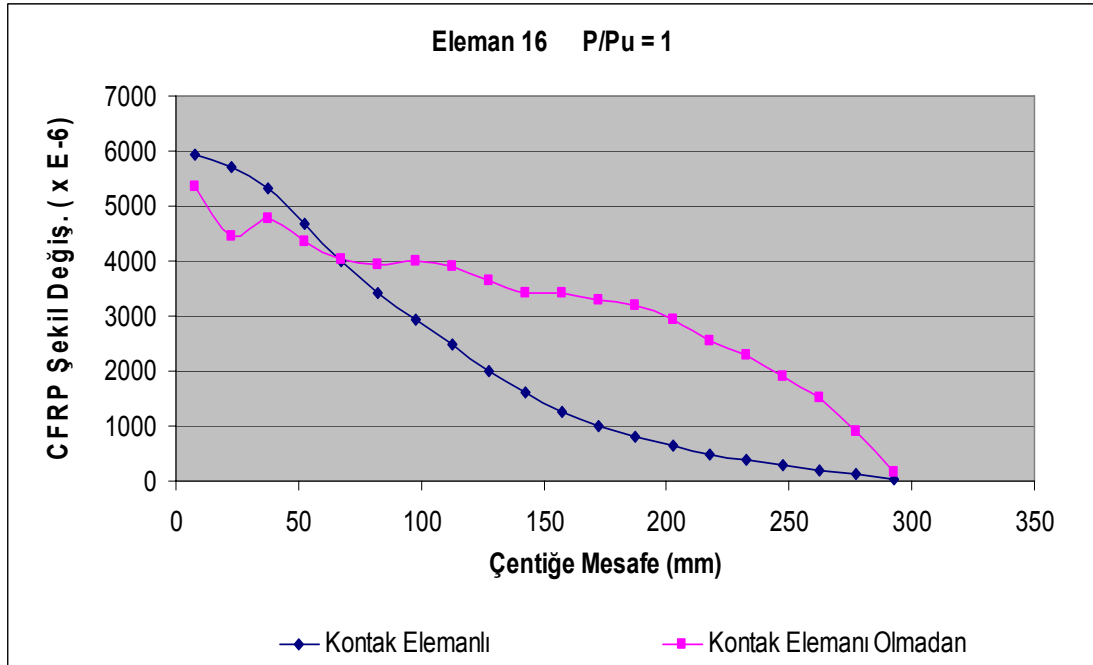
Şekil 5.8 Eleman 13 için temas elemanlı ve elemansız dağılımlar



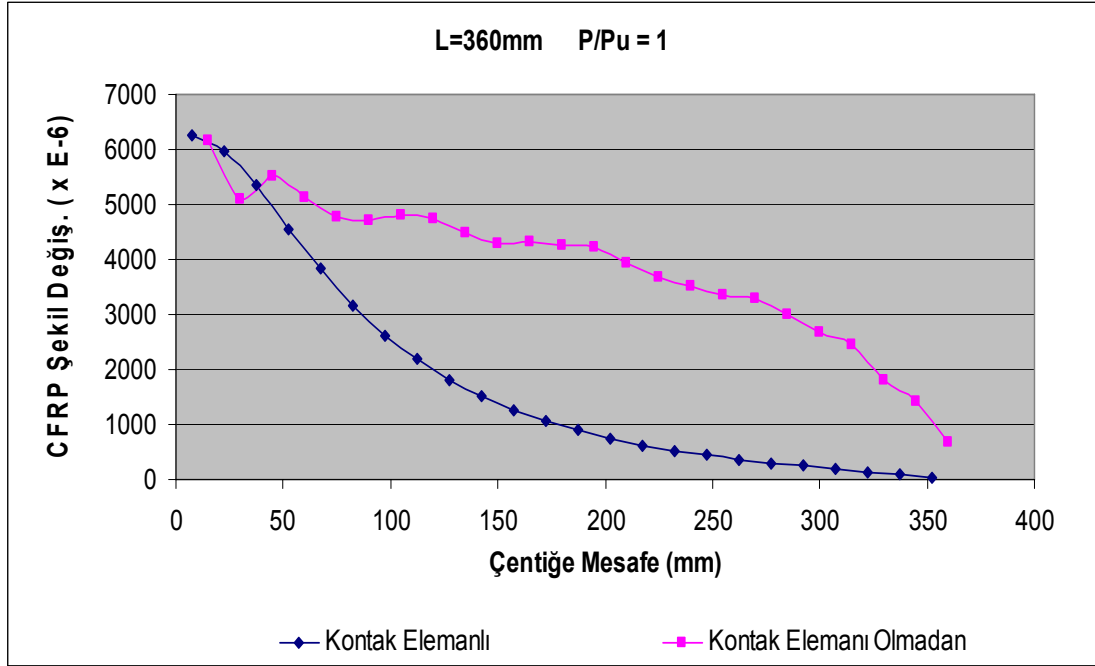
Şekil 5.9 Eleman 14 için temas elemanlı ve elemansız dağılımlar



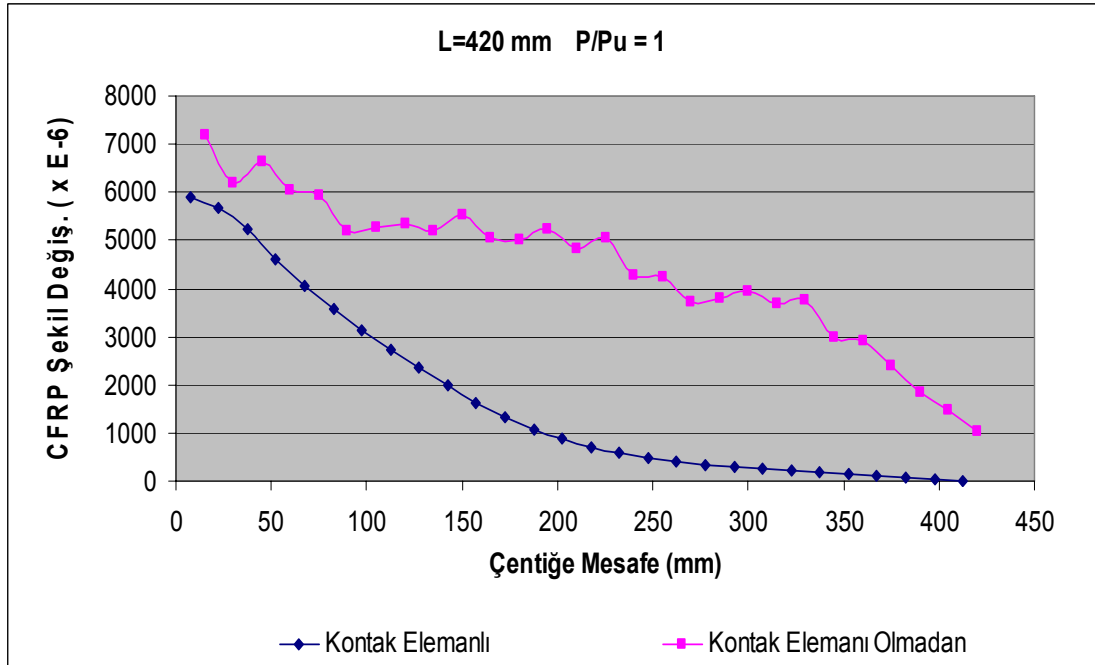
Şekil 5.10 Eleman 15 için temas elemanlı ve elemansız dağılımlar



Şekil 5.11 Eleman 16 için temas elemanlı ve elemansız dağılımlar



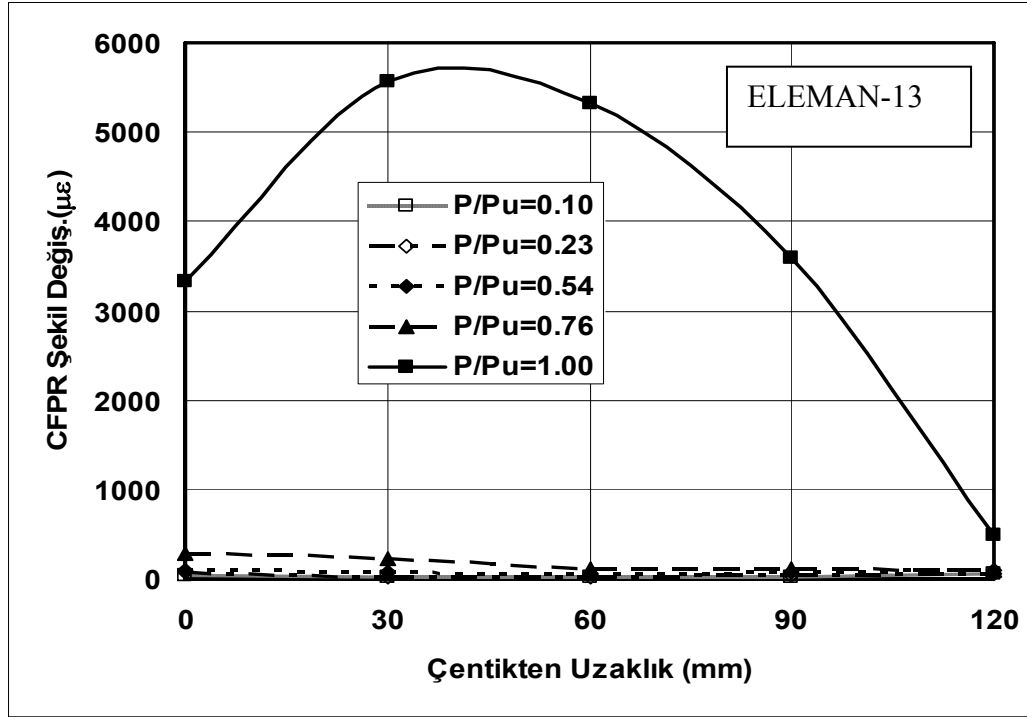
Şekil 5.12 L=360mm için temas elemanlı ve elemansız dağılımlar



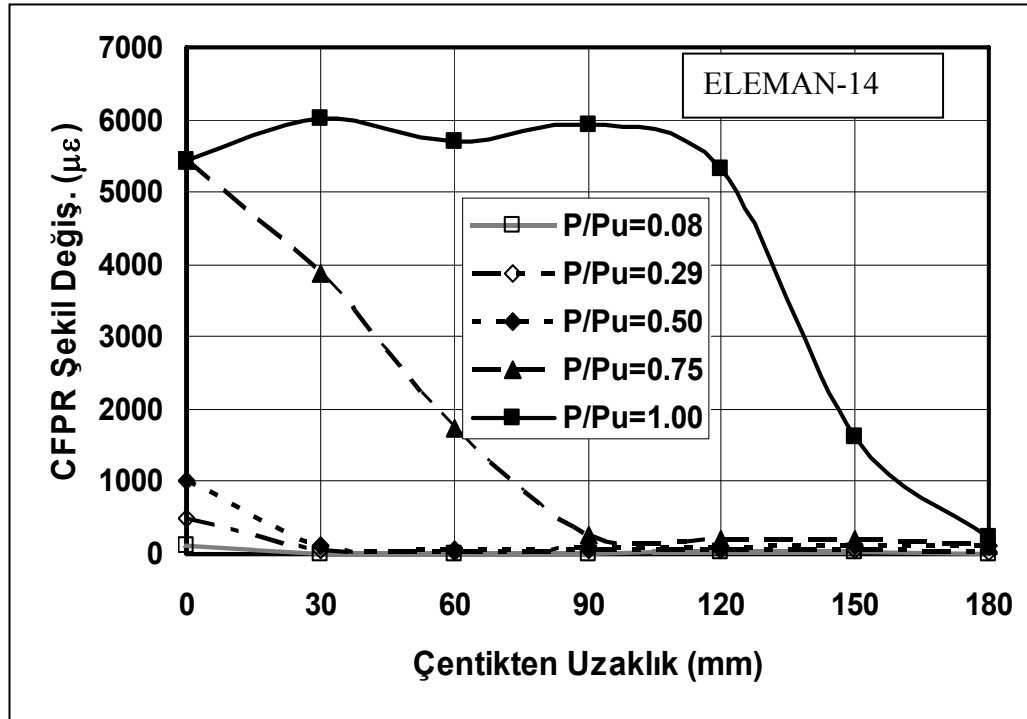
Şekil 5.13 L=420mm için temas elemanlı ve elemansız dağılımlar

Bu şekil değiştirme davranışları incelendiğinde, kısa yapışma boyları için aradaki farkın fazla olmadığı, grafik üzerinde maksimum ve minimum değerlerin kontak elemanı kullanımıyla çok az da olsa değişme eğilimi gösterdiği, ancak temas elemanı kullanmanın kopmadan önceki dağılımı daha gerçekçi olarak sağladığı göze çarpmaktadır. Buna örnek olarak, daha önce Lu, Teng, Ye, Jiang (2005) tarafından yapılan çalışmada elde edilen grafikte yer aldığı gibi, kopmadan hemen önce %97 yük seviyesindeki şekil değiştirme dağılımının, CFRP nin yüzeyden ayrışması ile ani olarak değişmesi örnek verilebilir [9]. Bu iki yük seviyesindeki dağılımlardaki farklılık, yukarıdaki grafiklerde yer alan kontak elemansız analiz ile kontak elemanlı analiz arasındaki fark gibidir (Bkz. Şekil 2.12). Aslında kontak elemanlı olarak yürütülen analizlerin sağladığı şekil değiştirme dağılımının kullanılması, göçme seviyesine yakın ama CFRP soyulmasından önceki durumu temsil ettiğinden daha doğrudur. Ayrıca lokal dalgalanmaları yok ederek düzgün bir dağılım sağladığı için efektif yapışma boyu tayini açısından daha kullanışlı olduğu söylenebilir.

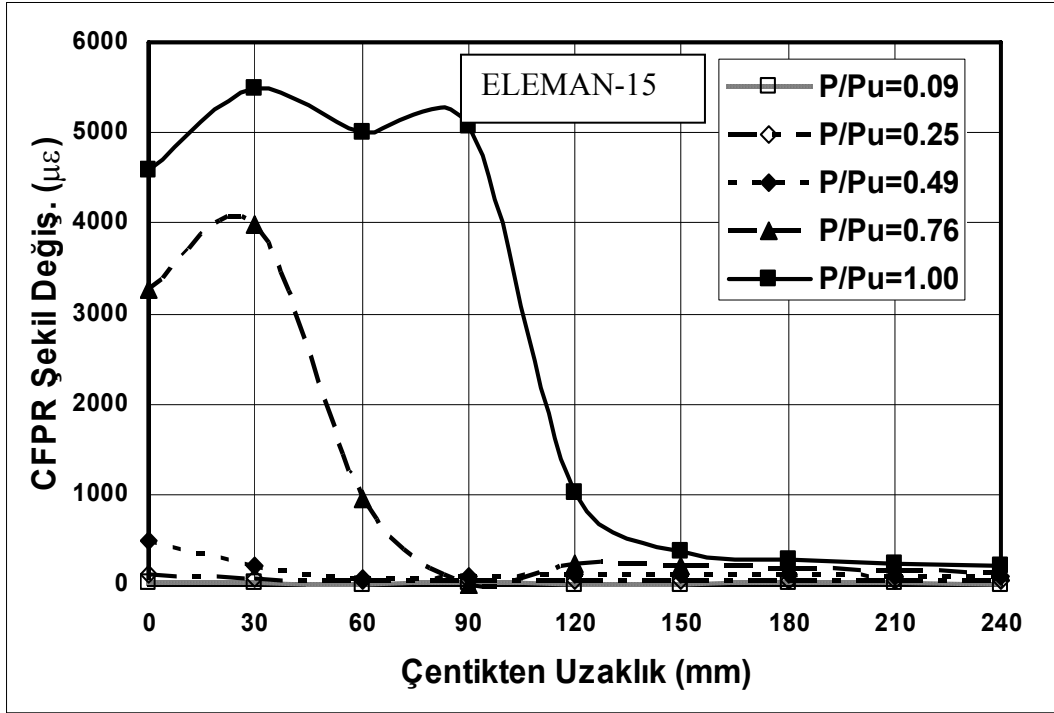
Şekil 5.14-5.17'de yer alan deney şekil değiştirme dağılımları ile incelendiğinde ilk göze çarpan özellik, şekil değiştirme değerlerinin ani düşüşünden önce sabit gitmesidir. Ancak göçme yükünün alt seviyelerinde bu sabit kısım yer almamaktadır. Yani deney elemanları için yük seviyesi arttıkça dağılım grafiği ani bir şekilde değişmiştir. Aslında deney grafiklerindeki bu sabit kısmı takip eden ani düşüş, FRP'nin beton yüzeyinden soyulmasını temsil etmektedir [8,11]. Soyulma miktarının artmasıyla bu grafik çentiğe doğru ilerleyecektir. Yani gerilmelere karşı koyan CFRP boyu plaka sonuna doğru ilerlemekte, daha sonra soyulmanın başlamasıyla soyulmanın olduğu bölgede bu ani şekil değiştirme davranışları gözlenmektedir [8]. Sadece deney elemanlarında gözlenen bu ani düşüş bölgesinin yeri, etkili yapışma boyunun tayini için bilgi sağlamaktadır.



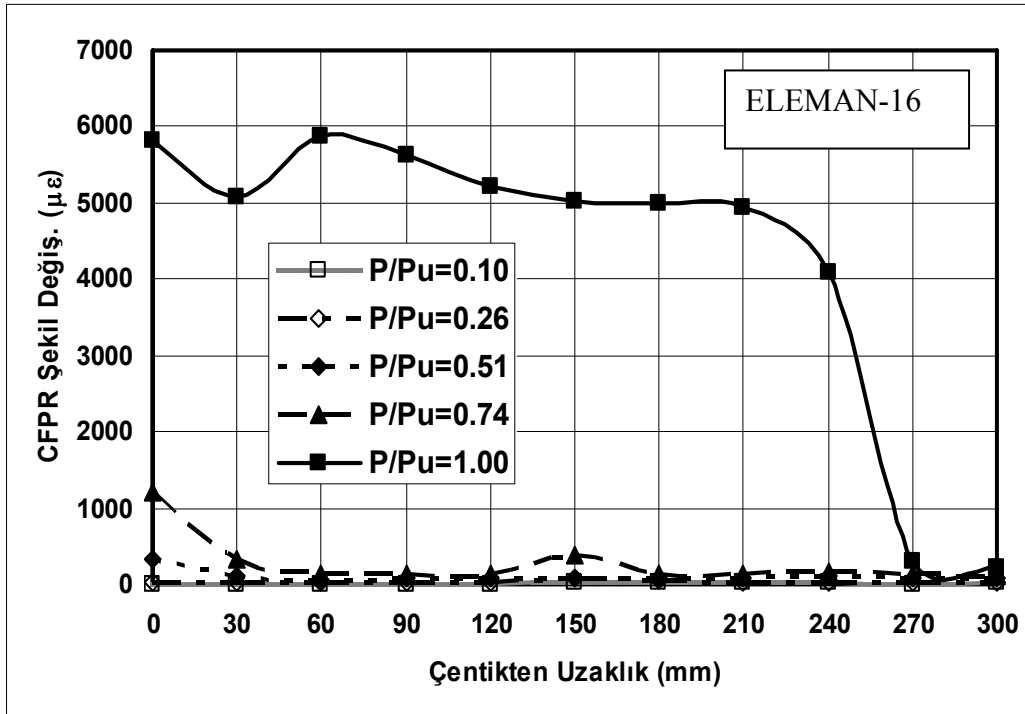
Şekil 5.14 Eleman 13 için deneysel CFRP şekil değiştirme dağılımı



Şekil 5.15 Eleman 14 için deneysel CFRP şekil değiştirme dağılımı



Şekil 5.16 Eleman 15 için deneysel CFRP şekil değiştirme dağılımı



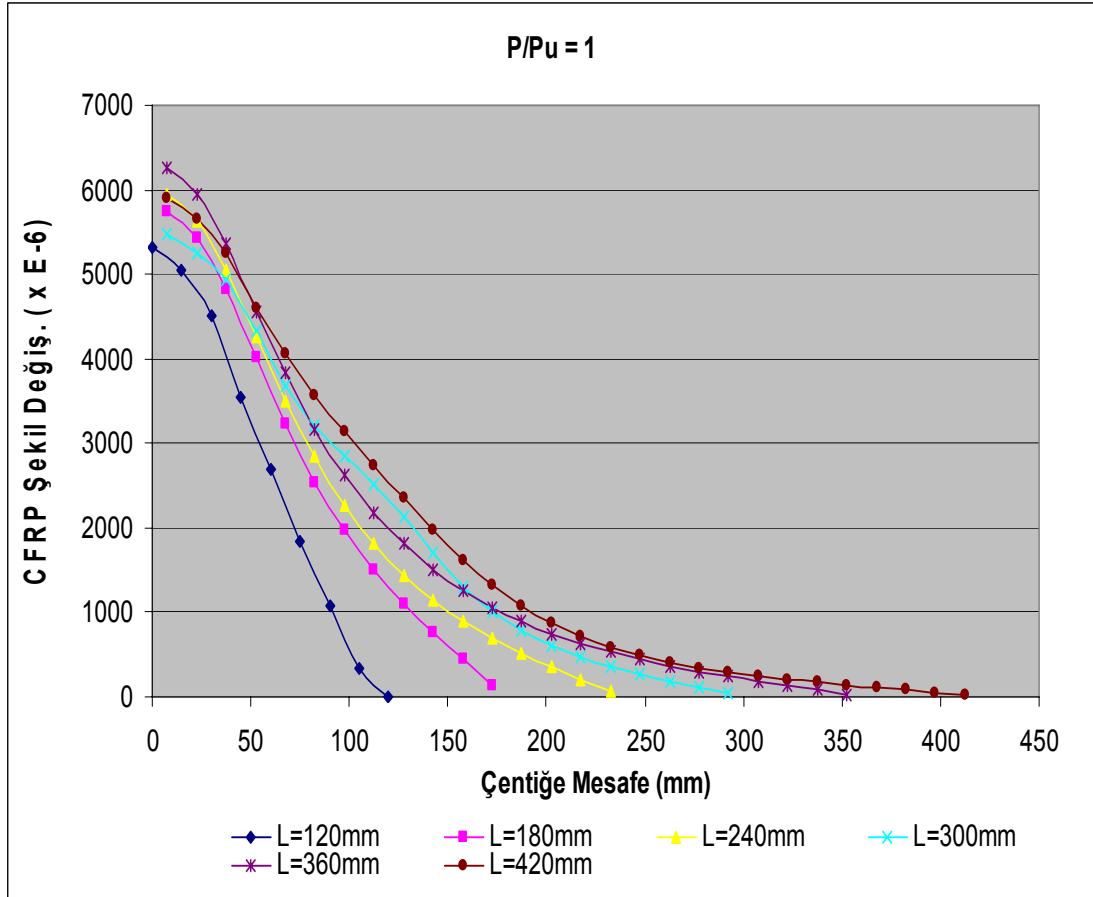
Şekil 5.17 Eleman 16 için deneysel CFRP şekil değiştirme dağılımı

Kontak elemanı kullanmadan yürütülen analizler, dağılımı deneye daha yakın olarak vermektedir. Kayma miktarı-gerilme ilişkisi sonlu elemanlar analizlerinde gerçeğe daha yakın olarak belirlenemediğinden şekil değiştirme dağılımlarda bazen beklenenden daha fazla farklar olmaktadır [9].

ANSYS çözümünden elde edilen Şekil 5.8-5.13 soyulma başlamadaki (göçmeden biraz önceki) duruma ait olup, deneyden elde edilen Şekil 5.14-5.17 ise soyulmanın başlaması ve ilerlemesi sonucunda oluşan göçme anını vermektedir. Bu sebeple bu iki dağılımı karşılaştırarak ANSYS sonuçlarının deney davranışını yansıtıp yansıtmadığını tartışmak gerçekçi olmayacaktır.

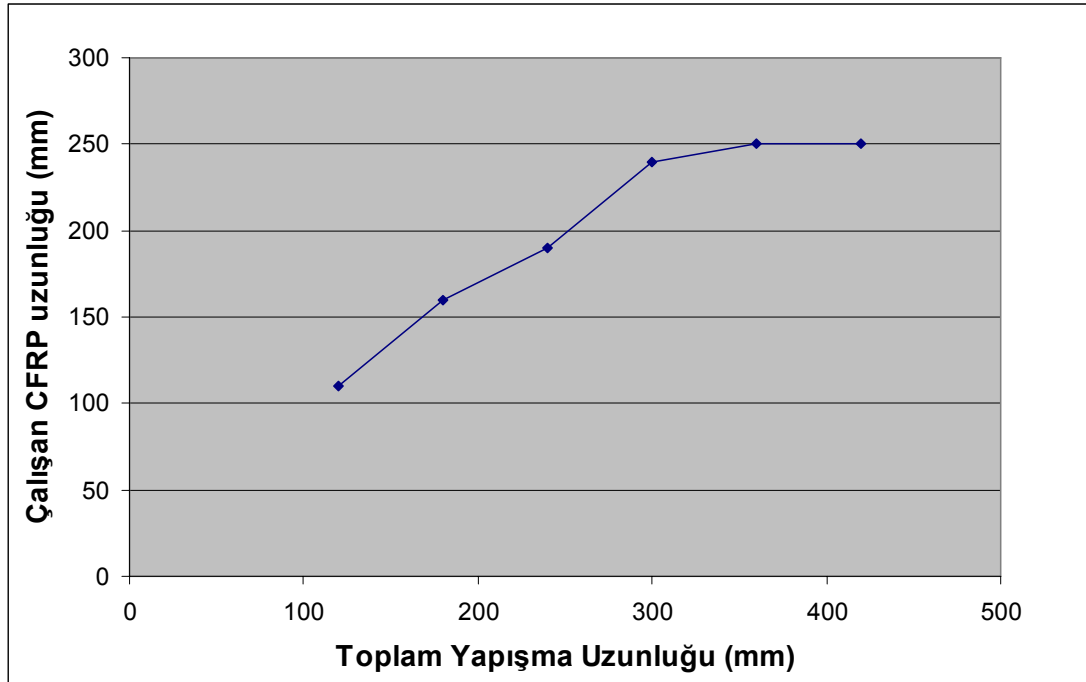
Farklı CFRP yapışma boyları için elde edilen şekil değiştirme dağılımları Şekil 5.18’de yer almaktadır. CFRP uzunluğu arttıkça CFRP uzak ucundaki şekil değiştirmeler grafik eğiminin değişmesiyle hızla azalmaktadır. Arttırılan CFRP uzunluğu, şekil değiştirmeleri etkili bir şekilde taşıyamamaktadır. Bu gözlem ve sonuçlar, ANSYS modelinde CFRP için etkili bir yapışma uzunluğunun varlığına işaret etmektedir [3, 5, 9, 10, 11].

Bu etkili yapışma boyunun tayinine yönelik olarak, şekil değiştirmelerin maksimum değerinin %10’una karşılık gelen noktadaki CFRP boyu, çalışan yapışma boyu olarak alınmış, daha sonra bu çalışan yapışma boyunun toplam yapışma boyu ile değişimi Şekil 5.19’da çizilmiştir. Görüleceği üzere, $L=240\text{mm}$ ’e kadar grafik 1:1 eğimine yakın gitmekte; yani toplam CFRP uzunluğu çalışan CFRP uzunluğuna yakın olmaktadır. Efektif boya henüz ulaşılammıştır. $L=240\text{mm}$ den sonra ise çalışan CFRP boyu sabit kalmaktadır. Bu nokta, toplam CFRP yapışma uzunluğu ne olursa olsun, şekil değiştirmelerin taşınacağı yapışma boyu olmaktadır. Çalışan CFRP boyu 240 mm olduğu noktada, toplam yapışma boyu 300 mm olmaktadır.



Şekil 5.18. Farklı yapışma boyları için şekil değiştirme dağılımının karşılaştırılması

Beton-CFRP arayüzündeki ayrışmanın sonlu elemanlar yönteminden farklı olarak şekil değiştirme dağılımında ani düşüş ile oluştuğu deneysel veriler ise, etkili yapışma boyunu 270 mm olarak işaret etmektedir (Bkz. Şekil 5.17).



Şekil 5.19. Çalışan CFRP boyunun toplam CFRP boyu ile değişimi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

ANSYS modelinin uygulanabilirliğinin tartışıldığı bu bölümde, Yrd.Doç.Dr. Özgür ANIL tarafından yürütülen deneylerden farklı beton basınç dayanımı, CFRP uzunluğu ve genişliğine sahip çoğunluğu temsil eden 7 adet örnek ele alınmış ve daha önceki modelleme esaslarına göre sonlu eleman modelleri oluşturularak lineer olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Göçme yükü ve maksimum CFRP gerilmesi için deney sonuçlarıyla arasında sırasıyla ortalama %10 ve %20 farklılıklar saptanmış, modellerin deney sonuçlarını makul limitler içerisinde temsil ettiği belirlenmiştir.

Yukarıda anılan hususlara ek olarak, maksimum kiriş orta nokta deplasmanı ve süneklik için tatmin edici sonuçlar elde edilememiştir. Bunun sonucu olarak [3,9] ile de ortaya konduğu gibi ANSYS çatlak modeli ile ilgili kuşkuvar doğrulanmıştır.

Sabit açılı çatlak modeli (FACM) de çatlak, asal gerilmeye dik olarak oluşmakta ve daha sonra yönü sabit kalmaktadır. Ancak daha sonra asal gerilmelerin yönü değişerek yüzeyde kayma gerilmeleri oluştuğunda çatlamış betonun kayma dayanımı, gizli çatlak modelinde 0 ile 1 arasında değişen bir transfer katsayısı ile modellenmiştir. Sabit açılı çatlak modelinde beton kırıldıktan sonra bile kayma gerilmeleri artmakta olduğundan, efektif gerilme transfer bölgesinin yer değiştirmesini kapsayan FRP- beton arası ayrışması olayının tanımlanmasında sabit açılı çatlak modeli yetersiz kalmaktadır [3]. Bu sebeple çatlak dağılımı ile yakın ilişki içerisinde olan CFRP yük şekil değiştirme davranışının incelenmesinde, ANSYS yazılımı bünyesinde yer alan temas yüzeyi elemanı kullanımı gereği doğmuştur.

Tez çalışmasının ikinci kısmını oluşturan ANSYS modelinde farklı yapışma boyları için analizi yürütülen deney kirişlerinde şekil değiştirme dağılımından

etkili yapışma boyu tayin edebilmek için, parabolik şekilli, düzgün ve CFRP-beton arayüzündeki ayrışmadan hemen önceki dağılımın kullanılması gerekmiştir. Bu dağılım, arayüzde ANSYS yazılımı bünyesinde bulunan eleman tipiyle bir temas yüzeyi tanımlayarak ve bu yüzeye bir maksimum gerilme değeri (T_{MAX}) atamakla mümkün olmaktadır. Temas yüzeyi ve dolayısıyla T_{MAX} değeri kullanılmadan yapılan analizlerde maksimum göçme yükü ve yük-şekil değiştirme ilişkisi gerçekçi olarak tayin edilebilse bile, arayüzde şekil değiştirme dağılımında ani düşüş bölgesi olmadığından CFRP-beton arayüzündeki ayrışma net olarak tayin edilememektedir.

Beton-CFRP arasındaki gerilme dağılımlarının farklı yapışma boyları için tayin edilmesiyle, belirli bir yapışma boyundan sonra şekil değiştirmenin CFRP tarafından etkili bir şekilde taşınmadığı ortaya koyulmuş ve etkili yapışma boyunun varlığına işaret edilmiştir. Analiz dağılımlarından elde edilen bu etkili yapışma boyu, deney verileriyle uyumludur. Böylelikle sonlu eleman analizleri amacına ulaşmış, modelde yapılan bazı modifikasyonlarla etkili yapışma boyu deney sonuçlarına yakın olarak elde edilmiştir.

6.2. Öneriler

Bu çalışma kapsamında, beton kirişlerdeki çatlak oluşumu, çatlakların ilerlemesi, dağılımı ve bu dağılımların deneysel verilerle karşılaştırılması gibi konular incelenmemiştir. Donatısız betonun davranışını yakından etkileyen çatlak davranışının analiz sonuçlarında incelenmesinin, sonlu elemanlar yönteminin simülasyon amacı ile kullanımında tasarıma yönelik daha faydalı sonuçlar vereceği değerlendirilmektedir.

Sonlu eleman simülasyonu yapılan deneyde, sadece kiriş alt yüzünde eğilme etkisiyle oluşan çekme kuvvetleri altındaki davranış incelenmiştir. Buna ek olarak, tek çekme deneylerinin de sonlu eleman analizlerinin yapılarak gerilme dağılımının incelenmesi, konuya daha geniş bir açıdan bakmayı mümkün kılacaktır.

KAYNAKLAR

1. Yao, J., Teng, J. G. and Chen, J. F. M., "Experimental Study on FRP-to-Concrete Bonded Joints", *Elsevier, Composites Part B: Engineering*, 36:99-113 (2005).
2. Yang, Z. J., Chen, J. F. and Proverbs, D., "Finite Element Modelling of Concrete Cover Separation Failure in FRP Plated RC Beams", *Elsevier, Construction and Building Materials*, 17:3-13 (2003).
3. Lu, X. Z., Jiang, J. J., Teng, J. G. and Ye, L. P., "Finite Element Simulation of Debonding in FRP-to-Concrete Bonded Joints", *Elsevier, Construction and Building Materials*, 20:412-424 (2006).
4. Camata, G., Spacone, E. and Zarnic, R., "Experimental and Nonlinear Finite Element Studies of RC Beams Strengthened with FRP Plates", *Elsevier, Composites Part B: Engineering*, 38:277-288 (2007).
5. Yang, Q. S., Peng, X. R. and Kwan, A.K.H., "Finite Element Analysis of Interfacial Stresses in FRP-RC Hybrid Beams", *Elsevier, Mechanics Research Communications*, 31:331-340 (2004).
6. Yao, J. and Teng, J. G., "Plate End Debonding in FRP-Plated RC Beams – I: Experiments", *Elsevier, Engineering Structure*, 29:2457-2471 (2007).
7. Teng, J. G. and Yao, J., "Plate End Debonding in FRP-Plated RC Beams – II: Strength Model", *Elsevier, Engineering Structure*, 29:2472-2486 (2007).
8. Sharma, S. K., Mohamed Ali, M. S., Goldar, D. and Sikdar, P. K., "Plate-Concrete Interfacial Bond Strength of FRP and Metallic Plated Concrete Specimens", *Elsevier, Composites Part B: Engineering*, 37:54-63 (2006).
9. Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L. P. and Jiang, J. J., "Bond-Slip Models for FRP Sheets/Plates Bonded to Concrete", *Elsevier, Engineering Structure*, 27:920-937 (2005).
10. Yuan, H., Teng, J. G., Seracino, R., Wu, Z. S. and Yao, J., "Full-Range Behavior of FRP-to-Concrete Bonded Joints", *Elsevier, Engineering Structure*, 26:553-565 (2004).
11. Täljsten, B., "Defining Anchor Lengths of Steel and CFRP Plates Bonded to Concrete", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 17:319-327 (1997).

12. Smith, S. T. and Teng, J. G., "Interfacial Stresses in Plated Beams", ***Elsevier, Engineering Structure***, 23:857-871 (2001).
13. Teng, J. G., Zhang, J. W. and Smith, S. T., "Interfacial Stresses in Reinforced Concrete Beams Bonded with A Soffit Plate: A Finite Element Study", ***Elsevier, Construction and Building Materials***, 16:1-14 (2002).
14. Moaveni, S., "Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS", ***Prentice-Hall***, New Jersey, 527, (1999).
15. William, K. J. and Warnke, E. P., "Constitutive Model for the Triaxial Behaviour of Concrete", ***IABSE, Report No.19***, Bergamo, 1-30 (1974).
16. Ersoy, U., "Reinforced Concrete", ***METU***, Ankara, 436, (2000).
17. ANSYS, ANSYS User's Manual Revision 10.0, ***ANSYS, Inc.***, Cannonsburg, Pennsylvania, (2005).
18. Anıl, Ö. ve Belgin, Ç., "Review of Bond-Strength Models and Application on CFRP-to-Concrete Bonded Joints across Crack" ***Science and Engineering of Composite Materials Journal***, 15 (2): 141-158, (2008).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DOĞAN, Ali Baran
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 03.09.1980 Üsküdar
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (312) 296 24 06
Faks : 0 (312) 230 41 11
e-mail : alibaran@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	ODTÜ/İnşaat Mühendisliği	2003
Lise	Ankara Atatürk Anadolu Lisesi	1998

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007-...	MİTAŞ	Tasarım Mühendisi
2004-2007	Milli Savunma Bakanlığı	Kontrol Mühendisi
2003-2004	GAMA Saudi Arabia	Teknik Ofis Mühendisi

Yabancı Dil

İspanyolca
İngilizce