

**CFRP İLE KESMEYE KARŞI GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME
KİRİŞLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE DOĞRUSAL
OLMAYAN ANALİZİ**

Nalan BULUT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKİM 2009
ANKARA**

Nalan BULUT tarafından hazırlanan CFRP İLE KESMEYE KARŞI GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERİN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİYLE DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç.Dr. Özgür ANIL

Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

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

Başkan : Prof. Dr. M. Emin TUNA

Mimarlık Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Üye : Doç.Dr. Özgür ANIL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Üye : Prof.Dr. Tekin GÜLTOP

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih: 02/10/2009

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

Prof. Dr. Nail ÜNSAL

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.

Nalan BULUT

**CFRP İLE KESMEYE KARŞI GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME
KİRİŞLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE DOĞRUSAL
OLMAYAN ANALİZİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Nalan BULUT

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ekim 2009**

ÖZET

Karbon polimer elyaflar (CFRP) kullanılarak betonarme elemanların güçlendirilmesi ve onarımı, günümüzde birçok deneysel araştırmanın odağı olmuş ve yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. CFRP malzemesi özellikle kirişlerin güçlendirilmesinde yoğun olarak kullanılmıştır. Kirişlerin risk oluşturan ve tasarım aşamasında özellikle kaçınılan göçme modlarında biri olan kesme kırılmasına karşı yaygın bir kullanım alanı bulan CFRP ile güçlendirme uygulamaları üzerine oldukça fazla sayıda deneysel çalışma yürütülmüştür. Ancak deneysel çalışmaların fazla mali kaynak ve özellikle laboratuvar alt yapısı gerektirdiği bir gerçektir. Her türlü parametrenin incelendiği kapsamlı deneysel çalışmaların yürütülmesi için hem çok fazla zaman hem de çok fazla mali kaynak gerektiği unutulmamalıdır. Bu nedenle deneysel sonuçlar kullanılarak doğrulanmış bir sonlu eleman modellemesi ile deneylerin bilgisayar ortamında simülasyonunun yapılmasıyla deneyi yapılmamış parametrelerin incelenebileceği ve genelleştirilmiş sonuçlara ulaşılabilmesi için gerekli olan verinin artırılabilceği düşünülmüştür. Bu amaçla daha önceden yürütülmüş deneysel bir çalışmanın sonuçları kullanılarak CFRP ile güçlendirilmiş kesme dayanımı yetersiz “T” kesitli betonarme kirişlerin ANSYS sonlu eleman programı kullanılarak modellenmesi yapılmıştır. Öncelikle deneyleri yapılmış olan betonarme kirişlerin sonlu eleman modelleri yapılarak

deneysel sonuçlara uygun sonuçlar elde edilip edilmediği incelenmiş ve sonlu eleman modelinin doğrulanması yapılmıştır. Daha sonra optimum CFRP şerit aralığının belirlenmesine yönelik deneyi yapılmamış analizler yapılarak seçilen parametreye yönelik sonuçların arttırılması amaçlanmıştır. ACI 440 Committee Report'da CFRP şerit aralığı için önerilen denklemin sonlu eleman sonuçları ile uyumu araştırılmış ve tasarımcılara fikir verebilecek bir sonuca ulaşılmıştır.

Bilim Kodu : 911.1.144

Anahtar Kelimeler : ANSYS, Sonlu elemanlar analizi, Betonarme kirişler, Kesmeye karşı güçlendirme, Lineer olmayan analiz

Sayfa Adedi : 70

Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Özgür Anıl

**NON LINEER FINITE ELEMENT ANALYSIS OF RC BEAM
STRENGTHENED WITH CFRP AGAINST SHEAR**

(M.Sc. Thesis)

Nalan BULUT

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

October 2009

ABSTRACT

Strengthening and retrofitting of reinforced concrete (RC) members by using carbon fiber reinforced polymer (CFRP) is a widely used technique and became the focal point of many experimental studies. CFRP material is frequently used especially for the strengthening of the beams. Many experimental studies performed on beam strengthening with application of CFRP that is used against shear cracks commonly. Shear failure is one of the failure modes especially avoided at the design stage. However, experimental studies require more financial resources and especially laboratory facilities. More financial resources and time is needed in order to carry out the comprehensive experimental studies at which every kind of parameters are investigated. For these reasons, the amount of data that is required for reaching generalized results and investigate parameters that are not tested, a confirmed finite element model by using experimental results can be used. For this purpose, previous experimental study results are used at which “T” cross-sectioned RC beams with insufficient shear strength is strengthened with CFRP. The same specimens are modeled by using ANSYS finite element program. Firstly, finite element modeling of the tested RC beams performed and then the results are investigated whether the obtained results are complying with the experimental results or not. As a result, the finite element model is verified. Later, analyses of the cases at which no test results are available are done by using the verified model. For example, these new analyses can be used for determining the optimum CFRP strip spacing. The aim

is to increase the data for the selected parameter. As a final step, the CFRP strip spacing that is calculated by using equation proposed in ACI 440 Committee Report is compared with the finite element model results. Finite element model results are obtained such an accuracy that can be used to give an idea to the designers.

Science Code : 911.1.144

Key Words : ANSYS, finite element analysis, RC beam, strengthening
nonlinear analysis

Page Number : 70

Adviser : Assoc. Prof. Özgür Anıl

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca beni yönlendiren tez danışmanım Doç.Dr. Özgür ANIL ve yardımları için Yük. Müh. Ali Baran DOĞAN'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. ONARIM VE GÜÇLENDİRME ÇALIŞMALARI	9
2.1. FRP Kompozitleri	10
2.1.1. FRP kompozitlerinin özellikleri	10
2.2. Kesmeye Karşı Betonarme Yapıların Güçlendirilmesi	11
2.2.1. FRP kompozitleri ile kesmeye karşı betonarme kirişlerin güçlendirme çalışmaları	11
2.3. Betonarme Elemanlarda Kesme Etkisi	12
2.3.1. Kesme donatısı bulunmayan eleman davranışı	13
3. BETONARME YAPILARDA DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ	16
3.1. Yapı Sistemlerinin Doğrusal Olmama Nedenleri	16
3.2. Ansys'te Nonlinear Davranış	17
3.3. Doğrusal Olmayan Sistemlerin Çözümü	18
3.3.1. Ardışık yaklaşım yöntemleri	19

	Sayfa
3.3.2. Yük artımı yöntemleri	19
4. SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ	20
4.1. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Bazı Terimler	20
4.2. Sonlu Elemanlar Yönteminde Hesap Basamakları	21
4.3. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Eleman Tipleri	22
4.4. Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantajları	23
4.5. Sonlu Elemanlar Yönteminin Dezavantajları	24
5. MODELLEMESİ YAPILAN KİRİŞLERİN TANITILMASI	25
5.1. Deney Düzeneği	28
6. ANSYS SONLU ELEMENLAR PROGRAMI	30
6.1. Ansys Yazılımında Main Menü	30
6.2. Ansys İle Analizin Basamakları	32
6.2.1. Model geometrisinin oluşturulması	33
6.2.2. Malzeme zelliklerinin girilmesi	34
6.2.3. Eleman seçimi	46
6.2.4. Modelin sonlu eleman ağını oluşturulması	49
6.2.5. Sınır şartların düzenlenmesi	50
6.2.6. Yükleme ve analiz	51
7. ANALİZ SONUÇLARI İLE DENEYSEL ÇALIşMANIN KARşILAşTIRILMASI	56
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	64
8.1. Sonuçlar	64
8.2. neriler	65

	Sayfa
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	70

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Yapı sistemlerinin doğrusal olmama nedenleri	17
Çizelge 5.1. Test edilen kirişlere ait özellikler	25
Çizelge 5.2. Donatılara ait mekanik özellikler	25
Çizelge 5.3. Cfrp şeritlerinin özellikleri	28
Çizelge 7.1. Göçme yüklerinin karşılaştırılması	60

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kesme etkisi altındaki kirişte çatlak gelişimi	13
Şekil 2.2. Simetrik tekil yük ile denenmiş kesme donatısız kiriş	14
Şekil 2.3. Eğik çatlakların oluşumu	15
Şekil 5.1. Kiriş2 güçlendirme detayı ve enkesiti	26
Şekil 5.2. Kiriş3 güçlendirme detayı ve enkesiti	26
Şekil 5.3. Kiriş4 güçlendirme detayı ve enkesiti	27
Şekil 5.4. Kiriş5 güçlendirme detayı ve enkesiti	27
Şekil 5.5. Deney düzeneği	29
Şekil 6.1. Ansys penceresi	30
Şekil 6.2. Ansys yazılımında main menü	31
Şekil 6.3. Ansys sonlu elemanlar programı ile analizin basamakları	33
Şekil 6.4. Beton basınç dayanımı	35
Şekil 6.5. Beton elastisite modülü	37
Şekil 6.6. Hognestad beton modeli	38
Şekil 6.7. Von-Mises akma yüzeyleri	41
Şekil 6.8. Bir A noktasının yeri	42
Şekil 6.9. Ansys'te beton malzeme özellikleri (kiriş4)	44
Şekil 6.10. Donatı için tipik gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi	45
Şekil 6.11. Ansys'te cfrp malzeme özellikleri	46
Şekil 6.12. Ansys'te beton modellemesi için kul. eleman tipi (Solid65)	47
Şekil 6.13. Ansys'te çelik yükleme plakası için kul. eleman tipi (Solid45)	48

Şekil	Sayfa
Şekil 6.14. Ansys'te cfrp şeritleri için kul. eleman tipi (Solid46)	49
Şekil 6.15. Mesh edilmiş ve mesnet koşulları ol. kiriş modeli (kiriş4)	51
Şekil 6.16. Yük uygulanmış kiriş modeli (kiriş5)	52
Şekil 6.17. Ansys'te nonlinear analiz adımları	54
Şekil 7.1. Kiriş1 için yük-deplasman grafikleri	57
Şekil 7.2. Kiriş2 için yük-deplasman grafikleri	58
Şekil 7.3. Kiriş3 için yük-deplasman grafikleri	58
Şekil 7.4. Kiriş4 için yük-deplasman grafikleri	59
Şekil 7.5. Kiriş5 için yük-deplasman grafikleri	59
Şekil 7.6. Kiriş6 için yük-deplasman eğrileri	62
Şekil 7.7. Kiriş7 için yük-deplasman eğrileri	62
Şekil 7.8. Farklı aralıklı cfrp şeritleriyle güç. kirişlerin karşılaştırılması	63
Şekil 7.9. Cfrp düzenleme aralığı ile yük taşıma kapasitesinin ilişkisi	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
a	Kesme açıklığı
d	Kiriş faydalı yüksekliği
$[d]$	Bilinmeyenler matrisi(yerdeğiştirme matrisi)
d_x	Yatay yerdeğiştirme
d_y	Düşey yerdeğiştirme
d_z	Düzleme dik yerdeğiştirme
E_c	Betonun elastisite modülü
$[F]$	Yük matrisi
f_c	Beton basınç dayanımı
f_{ctk}	Beton karakteristik eksenel çekme dayanımı
J_2	İkinci deviatorik gerilme invariantı
$[K]$	Sistem rijitlik matrisi
k	Von-Mises akma kriterinde kritik değer
L	Kiriş uzunluğu
mm	Milimetre
n	Serbestlik derecesi
$[P]$	Sabitler matrisi(yükleme matrisi)
Q	Donatı çapı
r	Deviatorik düzlemde yarıçap

Simgeler	Açıklama
$[S]$	Katsayılar matrisi(sistem rijitlik matrisi)
s_f	CFRP liflerinin aralığı
w_f	CFRP liflerinin genişliği
ϵ_c	Betonun şekil değiştirmesi
ϵ_{c0}	Betonun göçme anındaki şekil değıştrmesi
ϵ_{cu}	Betonda maksimum şekil değıştirme
θ	Meridyen açısı
θ_x	Yatay yönde dönme
θ_y	Düşey yönde dönme
θ_z	Düzleme dik yönde dönme
σ_c	Beton basınç gerilmesi
σ_y	Akma gerilmesi
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Asal gerilmeler
$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$	Asal gerilme bileşenleri
σ_v	Von-Mises gerilmeleri

Kısaltmalar	Açıklama
AFRP	Aramid Fiber Reinforced Polymer
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
FRP	Fiber Reinforced Polymer
FACM	Fixed Angle Crack Model
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
LVDT	Linear Variable Displacement Transducer
TB	Terra Bayt

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelerin hızla arttığı günümüzde insan hayatını etkileyecek bir çok projede emniyet en önemli konu olmaktadır. Bunun yanında malzeme ve iş gücü maliyetinin giderek artmasıyla birlikte optimum şartları elde etmek mühendislik alanında ayrıca önem arz etmeye başlamıştır. Modelleme gerçek bir sistemin bilgisayar ortamında oluşturularak davranışının ve özelliklerinin incelenmesidir. Böylece oluşturulan model üzerinde çalışmalar yapılarak istenen optimum özellikleri elde etmek, ilerde oluşabilecek aksaklıkları önceden görmek ve önlem almak mümkündür. Mühendislik, tıp, ulaştırma, uzay ve astronomi gibi birçok alanda modelleme çalışmaları yapılmaktadır.

Bir yapı elemanı işlevine uygun, emniyetli ve ekonomik olmalıdır. Ancak yapı elemanının yapılacağı yere ve kullanım amacına uygun olması, yapıda ilerde oluşabilecek aksaklıkların önüne geçebilmesi için bu gibi etkilerin neler olabileceğinin önceden bilinmesi gerekir. Modelleme çalışmalarının önemi bu noktada ortaya çıkmaktadır.

Yapı elemanının bilgisayar ortamında modellenmesi ile yapı davranışı çeşitli yük durumları altında gözlemlenebilmektedir. Modellemeyle yapıda sorun oluşturabilecek kısımları daha detaylı şekilde incelemek ve gerekli görülmesi durumunda da değişikliklere gitmek mümkündür. Bu çalışmalar ile yapı için en ekonomik kesitler de belirlenmektedir. Modelleme çalışmaları ile analitik çözüm sonuçlarına veya deneysel analiz sonuçlarına göre daha yaklaşık sonuçlar elde edilse de deneysel çalışmalar ile karşılaştırıldıklarında daha az zaman alan, daha ekonomik çalışmalardır.

Tez çalışması kapsamında da CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) kompozitleriyle kesmeye karşı güçlendirilmiş kiriş numunelerinin modellenmesi yapılmıştır. Malzeme özelliği gereği lineer olmayan betonarme kirişlere CFRP şeritleriyle yapılan böyle bir güçlendirme ile davranış daha da nonlinear hale gelmiştir. Bu şekilde güçlendirilmiş kiriş davranışlarını gerçeğe en yakın şekilde

gözlemleyebilmek için bünyesinde nonlinear elemanlar bulunduran ve nonlinear analizlerin yapılabilirdiği bir sonlu elemanlar programı olan ANSYS kullanılmıştır. CFRP kompozitleri FRP (Fiber Reinforced Polymer) kompozitlerinin bir türü olup yüksek çekme dayanımı, kolay şekil alması ve hafifliği gibi özellikleri nedeniyle onarım ve güçlendirme çalışmalarında kullanımı artmış, son yıllarda oldukça popüler olmuş malzemelerdir. Kullanımının artmasıyla birlikte onarım ve güçlendirme konusunda daha iyi sonuçlar alabilmek için araştırmacıların malzeme ile ilgili deneysel ve modelleme çalışmaları da artmıştır.

Qu (1994) yüksek lisans tezinde betonarme ve öngerilmeli beton yapı elemanlarını CFRP plakaları ile güçlendirmiş ve ayrıca nümerik modellerini ANSYS sonlu elemanlar programı ile oluşturarak deneysel sonuçlar ile karşılaştırmıştır. Deneysel çalışmalarda betonarme kirişlerin, öngerilmeli beton döşemelerin ve öngerilmeli boşluklu beton döşemelerin CFRP plakaları ile güçlendirilmesi yapılmıştır. Ayrıca güçlendirilen kiriş ve döşemeler dışında kontrol amaçlı olarak hiçbir güçlendirmenin yapılmadığı kontrol kirişi ile kontrol döşemeleri de üretilmiştir. Yapı elemanlarının sonlu elemanlar modellemesi yapılırken bütün elemanlarda beton ile donatı ve beton ile CFRP levhaları arasındaki aderansın tam olduğu kabul edilmiş, agrega kenetlenmesi gibi etkiler dikkate alınmamıştır. Göçme kriterinde ise betonda hem çatlamanın hem de ezilmenin birlikte olduğu kabulü yapılmıştır. Ayrıca bazı elemanların iki boyutlu bazılarının ise üç boyutlu modellemesi yapılmıştır. Çalışmada yük-deplasman ilişkisinin doğru tahmin edilmesinin modellemede, gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi, göçme kriteri, çatlaklar nedeniyle çekme dayanımındaki kayıp gibi etkiler için yapılan kabullerin doğruluğuna bağlı olduğu belirtilmiştir. Çalışma sonucunda betonarme kiriş için yapılan çekme dayanımındaki kayıp kabulünün yük-deplasman için yapılan kabulle de uyduğu ortaya konmuştur. Betonarme kirişin elastik modülünün hesaplanmasında kullanılan eşdeğer elastik modül formülü ile sonlu elemanlar modeli yakın sonuçlar vermiştir. CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin eşdeğer elastik modülleri ise kontrol kirişinden daha büyük çıkmıştır. Ayrıca hem teorik hem de deneysel çalışmaların sonucunda CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin dayanım ve rijitliğinin kontrol kirişinden önemli ölçüde daha büyük olduğu görülmüştür. Öngerilme kuvvetindeki kaybın yüksüz durumdan

hemen sonra tahmin edilmesi gerektiği ve öngerilme kaybının yükleme döngüsü sayısının bir fonksiyonu olduğu belirtilmiştir. Ayrıca CFRP plakalarının yapıştırılmasından sonra boşluklu döşemelerde rijitlikte önemli ölçüde artış gözlemlendiği, eşdeğer elastik modül ve ezilme parametrelerinin ön çatlaklı durumdan daha büyük olduğu ifade edilmiştir [1].

Fanning (2001) yaptığı çalışmada betonarme ve sonradan gerilmeli kirişleri laboratuvarında test etmiş ve ANSYS sonlu elemanlar programı ile modellemiştir. Çalışma kapsamında iki adet 3,0 m uzunluğunda dikdörtgen kesitli betonarme kiriş ve 9,0 m uzunluğunda T kesitli sonradan germeli kiriş üretilmiştir. Betonarme kirişler simetrik ve monotonik olarak yüklenmiştir. Deneyler dört nokta yüklemesi altında yerdeğiştirme kontrollü olarak yapılmıştır. Sonradan germeli kirişlerin kırılma deneyleri ise dönme ve birim şekil değiştirme kontrollü olarak yapılmıştır. Yükleme düzgün yayılı olarak iki noktadan uygulanmış olup kirişler taşıma gücüne ulaşınca kadar devam edilmiştir. Kirişlerin modellemesi ANSYS 5.5 programı ile yapılmıştır. Beton için Solid65, donatı için Link8 elemanları kullanılmıştır. Modellemede betonarme sistemin göçme anına kadar nonlinear eğilme davranışını tam olarak gösteren beton eleman kullanılmıştır. Bu elemanda donatının ayırık ya da dağılı olarak modellendiği durumlarda betondaki çatlaklara izin veren smeared çatlak modeli kullanılmıştır. Modellemede optimum stratejinin mesh yoğunluğunun kontrol edilmesi ve başlangıçta donatının ayırık modelleme ile kirişteki yerine yerleştirilmesi olduğu bulunmuştur. Bu nedenle hem betonarme kirişlerde hem de sonradan germeli kirişte donatı ayırık usulde modellenmiş, sonradan germeli kirişteki diğer donatılar ise betona dağılı olarak modellenmiştir. Sonuçta dağılı çatlak modelinin eğilmeden göçen betonarme sistemlerin modellenmesinde uygun bir nümerik model olduğu görülmüştür. Özellikle verilen yükleme altında taşıma gücüne kadar dönmelerin tam olarak hesaplanması istenen betonarme sistemler için tasarımcıların dikkatini çekmektedir [2].

Chansawat (2003) doktora tezinde FRP kompozitleri ile güçlendirilmiş betonarme yapıların sonlu elemanlar ile lineer olmayan analizi üzerinde çalışmıştır. Konuyu üç aşamada ele almış olup, birinci aşamada güçlendirilen kirişlerin sonlu elemanlar

modelleri yapılarak sonuçlar değerlendirilmiş, ikinci aşamada Horsetail Creek Köprüsünün enine kirişleri yeniden üretilerek güçlendirilmesi yapılmış ve ayrıca sonlu elemanlar modellemesi yapılarak deney sonuçları ile karşılaştırılmış, üçüncü aşamada da köprünün FRP ile güçlendirilmesinden önce ve sonra sonlu elemanlar modeli ile statik ve dinamik yükler altında değişik yük durumlarında karşılaştırılması yapılmıştır. Modellemede yapı davranışının gerçeğe daha yakın şekilde görülebilmesi için lineer olmayan analiz kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalarda eğilmeye, kesmeye, hem eğilme hem de kesmeye karşı CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) ve GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) şeritleri ile güçlendirilmiş kirişler ile herhangi bir güçlendirilme yapılmayan kontrol kirişi imal edilmiştir. Kirişler aynı geometri ve donatılı olarak üretilmiştir. Kesmeye karşı güçlendirilmiş kirişte GFRP sadece kiriş kenarlarına uygulanırken, eğilmeye karşı güçlendirilmiş kirişte CFRP kirişin alt yüzeyine uygulanmıştır. Eğilme ve kesmeye karşı güçlendirilmiş kirişte ise CFRP ve GFRP şeritlerinin her ikisi de kullanılmıştır. Bütün kirişlere kırılma yüküne kadar kısa süreli monotonik yük uygulanmıştır. Şekil değiştirmeler ve yerdeğiştirmeler ölçülmüş, elde edilen bu veriler sonlu elemanlar modeli ile karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar ile kirişlerin modellenmesinde beton, donatı ve FRP şeritleri ayrı ayrı elemanlarla modellenmiş, ayrıca beton-donatı ve beton-FRP şeritleri arasında aderansın tam olduğu kabul edilmiştir. Kirişlerin deney ve sonlu elemanlar modelleri karşılaştırıldığında sonlu elemanlar modelinde yük-deplasman eğrisinin eğiminin deneysel sonuçlardan biraz daha büyük olduğu görülmüştür. Bu sonuç betondaki mikro çatlakların sonlu elemanlar modelinde dikkate alınmaması ve ayrıca beton-donatı arasındaki aderansın tam kabul edilmesinin bir sonucu olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında teze konu olan Horsetail Creek Köprüsünün güçlendirilmesi ve sonlu eleman modeli yapılmıştır. Horsetail Creek Köprüsü 1914 yılında inşaa edilmiş ve hala kullanılmakta olan bir köprüdür. Horsetail Creek Köprüsünün enine kirişleri yeniden kesme donatılı olarak üretilmiş ayrıca donatı ve FRP şeritleri ile güçlendirilmiştir. Köprünün sonlu elemanlar modeli oluşturulurken ise diğer kiriş modellerinden farklı olarak zemin-yapı etkileşimi de modellenmiştir.

Üçüncü aşamada ise Horsetail Creek Köprüsünün sonlu elemanlar modeli servis limit durum, inelastik durum ve taşıma gücü durumu ile dinamik davranış olmak üzere üç kısımda incelenmiştir. Sonuçta modelin gerçek köprü davranışını daha iyi yansıtması için zemin ve mesnet şartlarının mutlaka modellemede dikkate alınması gerekliliği ortaya konmuştur. Ayrıca şekil değiştirmelerin deney sonuçlarına oldukça yakın değerler verdiği görülmüştür [3].

Jia (2003) yüksek lisans tezinde FRP şeritleri ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin sonlu eleman modelleri üzerinde çalışmıştır. Çalışma kapsamında CFRP şeritleri organik ve inorganik epoksi ile yapıştırılarak kirişler güçlendirilmiş daha sonra da kirişlerin sonlu eleman modeli yapılarak lineer davranıştan kırılma anındaki nonlinear davranışa kadar sonlu eleman modeli ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tez kapsamında aynı donatıda ve geometride toplam 20 adet kiriş üretilmiş olup, kiriş üst kısmında beton üzerindeki ve alt kısmında FRP üzerindeki şekil değiştirmeleri ölçmek için dört nokta yüklemesi yapılmıştır. Kirişler ANSYS sonlu eleman programı ile modellenmiştir. Modelde eleman tipi olarak beton için Solid65, donatı için Link8 ve CFRP şeritleri için Solid46 elemanı kullanılmıştır. Beton ve donatı arasındaki aderansın tam olduğu kabul edilmiştir. Çalışma sonucunda hem lineer hem de nonlinear davranışta sonlu eleman modelinin deney sonuçlarından biraz daha fazla rijitliğe sahip olduğu görülmüştür. Bu ise beton-donatı arasındaki aderansın tam kabul edilmesi ve kirişlerdeki mikro çatlakların sonlu elemanlar modelinde dikkate alınmaması ile açıklanmaktadır. Göçme yükü sonlu eleman modelinde %5,4-25,9 kadar daha fazla çıkmış olup bunun nedeni betonun sertleşme mekanizması etkisinin ihmal edilip, ölçülen değerler yerine kabul edilen malzeme özelliklerine ait değerlerin alınması olarak belirtilmiştir [4].

Santhakumar, Chandrasekaran ve Dhanaraj (2004) yaptıkları çalışmada Norris ve arkadaşları (1997) tarafından yapılan deneysel çalışmaları ANSYS sonlu elemanlar programı ile modellemişlerdir. Çalışmaya konu olan kirişler $\pm 45^0$ ve 90^0 lik lif açılı CFRP levhalarıyla güçlendirilen çatlaksız ve ön çatlaklı kirişler ile kontrol amacıyla üretilmiş ve hiçbir güçlendirme yapılmayan kontrol kirişidir. Kirişlerin sonlu eleman modellemesi yapılırken beton için Solid65, donatı için Link8, CFRP için Solid46

kullanılmış, ayrıca mesnet ve yükleme plakaları için Solid45 elemanı kullanılmıştır. Modellemede beton-donatı ve beton-CFRP arasındaki aderansın tam olduğu kabul edilmiştir.

Deney sonuçları ile nümerik modelleme sonuçları karşılaştırıldığında, nümerik modelde taşıma gücü yükünün kontrol kirişi ve çatlaksız kirişte %8 daha fazla olduğu, önçatlaklı kirişte ise %8 daha az olduğu görülmüştür. Bütün nümerik modellerde taşıma gücü durumunda dönmelerin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Lineer davranışta ise deneysel sonuçlara göre daha büyük rijitlikler elde edilmiştir. 90⁰ lik lif açılı CFRP levhalarıyla güçlendirilen çatlaksız ve ön çatlaklı kirişlerin nümerik modelleri karşılaştırıldığında donatı akana kadar aynı rijitlikleri göstermişlerdir. Taşıma gücü durumunda ise önçatlaklı kirişte yük %6,7 azalırken, deflectionlar %10,5 artmıştır [5].

Elyasian, Abdoli ve Ronagh (2006) FRP (Fiber Reinforced Polymer) kompozitleri ile kesmeye karşı güçlendirilmiş kirişleri ANSYS sonlu elemanlar programında modellemiştir. Çalışmada lif açısı, beton basınç dayanımı, çekme ve basınç donatılarının alanları, etriye aralıkları ve miktarları gibi parametreler incelenmiştir. Kentucky Üniversitesinde test edilen kirişler farklı lif açılı FRP plakaları ve FRP plakalarının farklı açılarda düzenlenmesi ile güçlendirilmiştir. Kirişler modellenirken beton için Solid65, donatı için Link8, FRP şeritleri için Shell43 elemanları kullanılarak ayrı modelleme yapılmıştır. Ayrıca mesnet ve yükleme noktasında da çelik plakalar için Solid45 elemanı kullanılmıştır. Beton ve donatı ile beton ve FRP arasında kayma olmadığı kabul edilmiştir. Analizlerde 90⁰ lik lif açılı fiberlerin yüksek dayanım ve daha çok düktilite sağladığı, donatının miktarına göre göçmenin eğilmeden kesmeye doğru değiştiği, kesme ile göçmede basınç donatısının çok etkisi olmadığı, kesme çatlaklarının gelişimini FRP plakalarının etriyelere göre daha iyi engellediği görülmüştür. Çalışma sonucunda ANSYS'in önceden yapılmış olan test sonuçları ile uygun sonuçlar verdiği görülmüş, FRP plakalarının uygulanma açısının dayanıma etkisi ortaya konmuştur [6].

Camata, Spacone, Zarnic (2007) yaptıkları çalışmada FRP plakaları ile eğilmeye karşı güçlendirilmiş betonarme elemanların gevrek kırılma modlarını deneysel ve analitik olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmada iki grup deney numunesi hazırlanmış, ilk grup 4 adet kirişten, ikinci grup ise 4 adet döşemeden oluşmuştur. Numuneler dört nokta yüklemesi altında test edilmiştir. Donatı oranı, betonarme elemanın geometrisi, düktilite gibi parametrelerin kırılma üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca kırılmada geometrik parametrelerin ve malzeme parametrelerinin etkisini gözlemlemek için sonlu elemanlar yöntemiyle de çalışılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde nonlineer kırılma mekaniği temel alınmıştır. Analizlerde çatlamadan sonraki rijitliği doğru tanımlayabilmek için yayılı çatlak modeli ve beton örtüde ayrılma olduğu durumlarda düğüm noktalarındaki süreksiz deplasmanları tam olarak hesaplayabilmek için ayrık çatlak modeli kullanılmıştır. Betondaki çatlamların, yapışkan tabaka davranışının, plaka uzunluğunun, genişliğinin ve rijitliğin kırılma mekanizmalarına etkisi incelenmiştir. Çatlak gelişimi, malzeme davranışı, beton çatlakları, kesit geometrisi gibi parametrelerin kırılma mekanizmaları üzerine etkisi araştırılmıştır. İki model geliştirilmiştir. Her iki model de deneysel çalışmayla yakın sonuçlar vermiştir. Model A ayrılma göçmesini doğru tanımlarken, Model B tüm kırılma modlarını ayrıntılı olarak tanımlamıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda kısa FRP plakalarında göçmenin plaka ucundan, uzun FRP plakalarında ise orta açıklıktan başladığı görülmüştür. Deneylerde yüksek yüzeysel güçlendirme oranının yük kapasitesini arttırdığı ancak düktiliteyi azalttığı gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda EB-FRP genişliğinin kiriş genişliğine oranı ayrılma ya da beton örtünün ayrılması nedeniyle oluşan göçmeyi hesaplamak için önemli olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca sonlu elemanlar analizleri de eğilme ve kesme çatlakları arasındaki uzaklığında önemli bir parametre olduğunu göstermiştir [7].

Hashemi, Rahgosar ve Maghsoudi (2007) yaptıkları çalışmada FRP plakaları ile güçlendirilmiş yüksek dayanımlı kirişlerin kullanılabilirlik durumlarını incelemişlerdir. Konu üç aşamada ele alınmıştır. Birinci aşamada farklı çapraz eğimli FRP ve farklı çekme donatılı yüksek dayanımlı kirişlerin eğilme testleri yapılmış, ikinci aşamada FRP plakalarının farklı yerleşiminin eğilme dayanımına etkisi

hesaplanmış, üçüncü aşamada deplasman ve çatlak genişliği yani kullanılabilirlik koşulları değerlendirilmiş, dördüncü aşamada ise 3 boyutlu nonlinear sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Kirişler, 2'si kontrol 4'ü güçlendirilmiş olmak üzere toplam 6 adet üretilmiştir. Güçlendirilen kirişlere 1 ile 4 CFRP tabakası uygulanmış ve bunlar kirişlerin çekme bölgesine yapıştırılmıştır. Kullanılabilirlik karakteristikleri çatlak genişliği, deplasman, beton ve donatıdaki gerilmeler açısından değerlendirilmiştir. Kirişlerin sonlu eleman modelleri oluşturulurken beton için Solid65, donatı için Link8 ve CFRP şeritleri için Solid46 elemanları kullanılmıştır. Eleman ve malzeme tipleri arasındaki aderansın tam olduğu kabul edilmiştir. Yani beton-donatı, beton-FRP ve ayrı FRP plakaları arasında kaymanın olmadığı kabul edilmiştir. Sünme, rötre ve sıcaklık değişimleri gibi zamana bağlı malzeme nonlinearlikleri dikkate alınmamıştır. Beton çatlama öncesi izotropik ve çatlama sonrası ortotropik kabul edilmiştir. Donatı izotropik kabul edilmiş, FRP malzemesi ise ortotropik ve enine izotropik kabul edilerek lif doğrultusuna dik iki yöndeki malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Kirişlerin nonlinear analizinde ise yakınsamama durumunu engelleyebilmek için yük derece derece artırılmıştır. Sonlu elemanlar modeli ile deneysel sonuçların karşılaştırılması deneme-yanılma yöntemi ile yapılmıştır. Yük-deplasman davranışı incelenmiş ve deney sonuçları ile yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Ortalama akma yükleri sonlu elemanlar analizinde deney sonuçlarından %9 daha büyük çıkmıştır. Ortalama dönme değerleri ise sonlu elemanlar analizinde deney sonuçlarından %22 daha düşük çıkmıştır. Ayrıca deney sonuçları yüksek dayanımlı betonda bütün yük seviyelerinde çatlak genişliğinin azaldığını göstermiştir. Kontrol kirişi ile güçlendirilen kirişler karşılaştırıldığında kontrol kirişinin daha az dönme yapma kapasitesi olduğu görülmüştür [8].

2. ONARIM VE GÜÇLENDİRME ÇALIŞMALARI

Yapı elemanları ömürleri boyunca çeşitli yüklere maruzdur. Bu yükler altında yük taşıma kapasiteleri düşmekte ve onarılmaları gerekmektedir. Ayrıca bazı yapı elemanlarının tasarım sırasındaki hatalar nedeniyle yeniden düzenlenmesi gerekmektedir.

Betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesi çeşitli yöntemlerle yapılmaktadır. Bu yöntemler arasında yapı elemanlarının mantolanması, çelik plakalarla güçlendirilmesi ve kompozit malzemelerle güçlendirilmesi gelmektedir.

Mantolama ile yapı elemanının kullanım yüküne uygun boyutlandırması yapılmakta ve eleman yeniden düzenlenmektedir. Böylece eleman istenilen kullanım yükünü taşıyacak hale getirilmektedir. Ancak bu yöntem uzun zaman alabildiği gibi yapının ağırlığını da arttırmaktadır.

Çelik plakalar ile güçlendirmede ise yapı elemanlarına çelik plakalar uygulanmakta böylece elemanların yük taşıma kapasitesi artırılmaktadır. Çelik plakalar ile güçlendirmede karşılaşılabilen en büyük zorluk ise çelik plakaların şekil almasının güç olmasıdır. Ayrıca yangın ve korozyon gibi dış etkilere karşı açık olmaları bu yöntemi etkileyen önemli faktörlerdir.

Kompozit malzemeler ile güçlendirmede ise elemanlara değişik yöntemlerle kompozit malzemeler uygulanmaktadır. Bu kompozitler, güçlendirilecek yapı elemanlarına epoksi gibi bir yapıştırıcı malzeme ile uygulanmaktadır. Kompozitler elemanın uzunluğu boyunca uygulanabileceği gibi aralıklarla da uygulanabilmektedir. Kompozitler ile yapılan güçlendirme de yapı elemanlarının yük taşıma kapasitesi diğer güçlendirme yöntemlerine göre önemli ölçüde artırılmaktadır. Ayrıca FRP kompozitleri hafif malzemeler olduğundan yapıya ek bir ağırlık getirmemektedir. Bu yöntemlerin en büyük dezavantajı ise maliyetin biraz daha fazla olabilmesidir.

Yapı elemanları eğilmeye ve kesmeye karşı güçlendirilmektedir. Çalışma kapsamında modellenmesi yapılan kirişler kesmeye karşı FRP kompozitleri ile güçlendirilmiş kirişlerdir. Bu kirişler kesme donatısız olarak üretilmişlerdir. Modellenen kiriş davranışının daha iyi anlaşılabilmesi için FRP kompozitleri ile kesme davranışının kısaca açıklanmasında fayda görülmüştür.

2.1. FRP Kompozitleri

İnşaat sektöründe en çok tercih edilen kompozitler FRP kompozitleridir. FRP kompozitleri fiberler ve matriks reçinesi olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Fiberler dayanımları oldukça yüksek olan malzemeler olup kompozitin sürekli kısmını oluşturmakta, matriks reçinesi ise bu fiberleri bir arada tutarak kuvvetin fiberler arasında iletilmesini sağlamaktadır (Head 1992). FRP kompozitleri liflerin kullanımına bağlı olarak CFRP (carbon fiber reinforced polymer), GFRP (glass fiber reinforced polymer) ve AFRP (aramid fiber reinforced polymer) olmak üzere üçe ayrılmaktadır [3].

Çalışma kapsamında modellemesi yapılan kirişler CFRP kompozitleriyle güçlendirilmiştir. CFRP poliester reçine içine gömülmüş 5-10 mikrometre çapında çok ince karbon elyaflardan oluşur [9].

2.1.1. FRP kompozitlerinin özellikleri:

Avantajları

FRP kompozitlerinin avantajları şu şekilde sıralanabilmektedir.

1. FRP kompozitleri korozyona, kimyasallara karşı genellikle daha dayanıklıdır (TENG et al. 2001) [3].
2. FRP kompozitleri yüksek dayanım/ağırlık oranına sahiptirler. Çeliğin %20 si kadar bir ağırlığa sahipken bile çelik plakalardan %20 daha güçlüdür [3].
3. FRP kompozitlerinin rijitlik/ağırlık oranları daha yüksektir [10].

4. FRP kompozitleri yüksek çekme dayanımına sahiptirler.
5. Kolay uygulanabildikleri gibi oldukça fazla şekilde uygulama yöntemi mevcuttur [11].
6. Kompozitler istenilen şekle ve yüzey özelliklerine göre şekillendirilebilirler [12].

Dezavantajları

FRP kompozitlerinin dezavantajları şu şekilde sıralanabilmektedir.

1. FRP kompozitleri çeliğe göre pahalıdırlar.
2. FRP kompozitleri anizotropik malzemelerdir. Farklı yönlerde farklı malzeme özellikleri göstermektedir [12].

2.2. Kesmeye Karşı Betonarme Yapıların Güçlendirilmesi

Kesme kırılması, eğilme ile karşılaştırıldığında oldukça ani ve gevrek bir göçme biçimidir. Eğilmeden farklı olarak çatlak gibi oluşumlarla önceden haber vermemektedir. Bu nedenle de yapı elemanlarının onarım ve güçlendirme çalışmaları sadece eğilmeye karşı değil aynı zamanda kesmeye karşı da yapılmaktadır. Betonarme yapıların kesmeye karşı onarım ve güçlendirilmesinde değişik teknikler uygulanmaktadır. Bu teknikler arasında FRP kompozitleri ile güçlendirme çalışmaları pahalı olmasına rağmen son yıllarda oldukça yaygın şekilde yapılmaktadır.

2.2.1. FRP kompozitleri ile kesmeye karşı betonarme kirişlerin güçlendirme çalışmaları

Yapı elemanlarının FRP kompozitleri kullanılarak yapılan onarım ve güçlendirme çalışmaları oldukça çeşitlidir. Bu çalışmalar kullanılan kompozite, kompozitin miktarına, uygulanma şekline, ankrajlanma yöntemlerine v.b. gibi değişkenlere bağlı olarak değişmektedir.

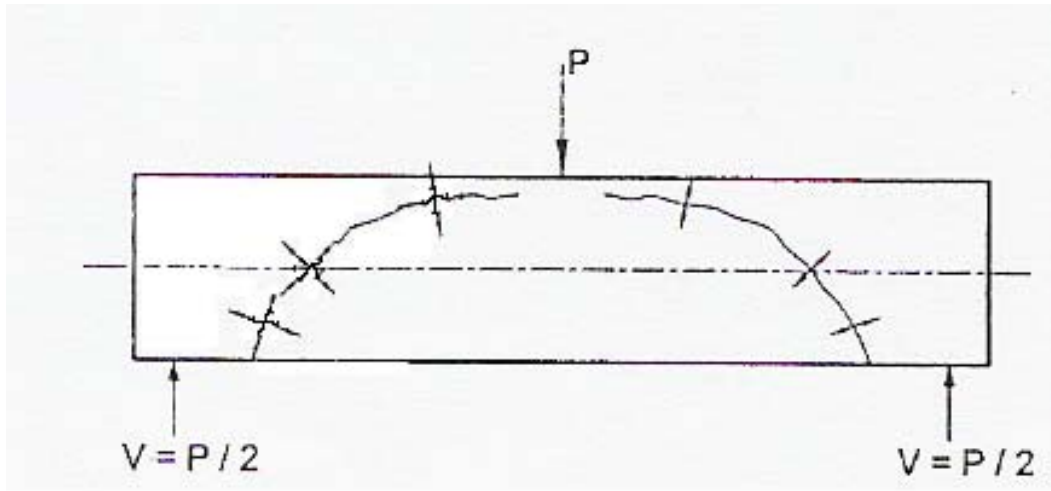
Bu tez kapsamında da kesmeye karşı güçlendirilen kiriş davranışları incelenmiştir. Modellemesi yapılan kirişlerin bir kısmı Özgür ANIL tarafından 2005 yılında Gazi Üniversitesi mekanik laboratuvarlarında test edilmiştir. Bu güçlendirme çalışmasında düşük dayanımlı olarak kesme donatısız üretilen kirişlerin CFRP levhalarıyla güçlendirilmesiyle davranışlarında oluşan değişiklikler incelenmiştir. Deneysel çalışma hakkında daha kapsamlı bilgi 5. Bölümde verilmiştir. Bunun dışında deneyi yapılmamış iki adet kirişin daha modellemesi yapılmıştır. Kiriş davranışlarının daha iyi anlaşılması için de kesme etkisi altındaki betonarme yapıların davranışının incelenmesi gerekir.

2.3. Betonarme Elemanlarda Kesme Etkisi

Betonarme bir yapı elemanı eğilme yanında kesme etkisi altında da bulunmaktadır. Beton bir elemanın kesme altındaki davranışını incelemekten önce eğik çatlak, eğik çekme gibi kavramların açıklanmasında davranışın daha iyi anlaşılabilmesi için yarar vardır.

Beton, kesme ve basınç dayanımı yüksek fakat çekme dayanımı düşük bir yapı malzemesidir. Bu nedenle de basit kesme durumunda bile kırılma asal çekme gerilmeleri nedeni ile olmaktadır. Asal çekme gerilmelerinin kırılmaya katkısının ne ölçüde büyük olduğu ilk kez Ritter tarafından öne sürülmüştür. Ritter'den önce kesme kuvveti ile ilgili sorunlar yatay kesme gerilmesi hipotezi kullanılarak çözümlenmeye çalışılmıştır. Bu hipotezle kirişlerde yatay kesme gerilmelerini karşılayacak düzenlemeler yapılmıştır. Ritter'in çalışmaları Mörsh tarafından deneylerle doğrulanmış ve genişletilmiştir. Mörsch önerdiği teoride asal çekme gerilmeleri yerine kesme gerilmelerini temel almıştır. Geliştirdiği kafes-kiriş analogisi ile kesme donatısının hesaplanabileceğini göstermiştir. Bu analogide eğik çatlama oluştuktan sonra betonun kesme dayanımına bir katkısı olmayacağını varsaymıştır. Sonraki yıllarda yapılan çalışmalar bazı durumlarda bu analoginin gerçeği yansıtmadığını göstermiştir. Son yıllarda Çubuk Analogisi de kesme donatısı hesabında yararlı olmaktadır.

Basit kesme durumunda asal çekme ve asal basınç gerilmeleri kesme gerilmesine eşit olmaktadır. Bu durumda kırılma çekme dayanımının düşük olması sebebiyle çekmeden kaynaklanmaktadır. Asal çekme gerilmeleri kesme gerilmesine 45^0 'lık açı yapan bir yüzeye etkidiğinden kırılma asal çekme gerilmelerine dik yönde oluşan eğik bir çatlakla gelişir. Bu çatlakla neden olan gerilme eğik çekme böyle bir çatlak da eğik çatlak olarak adlandırılmaktadır. Böyle çatlaklar son derece tehlikeli olup gevrek kırılmaya neden olabilmektedir. Bu çatlakların gelişimi asal çekme gerilmelerinin yönüne bağlıdır.

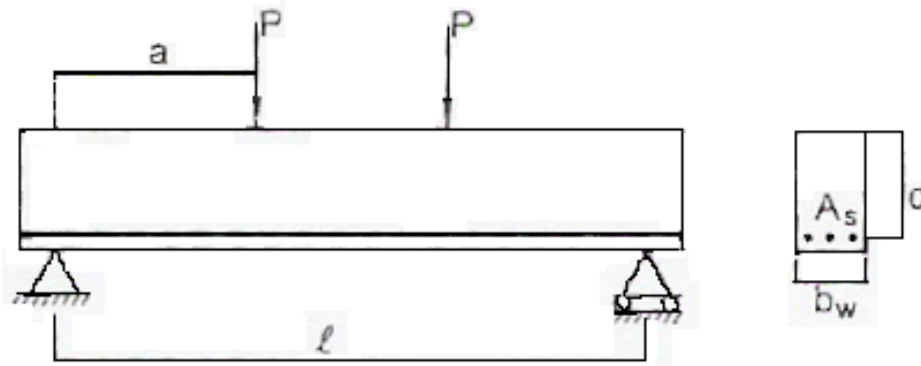


Şekil 2.1. Kesme etkisi altındaki kirişte çatlak gelişimi [13].

Yukarıda da belirtildiği ve Şekil 2.1'den de anlaşıldığı gibi kırılma asal çekme gerilmelerine dik yönde gerçekleştiğinden çatlak eğimi kiriş alt yüzünden üst yüzüne doğru azalmaktadır [13].

2.3.1. Kesme donatısı bulunmayan eleman davranışı

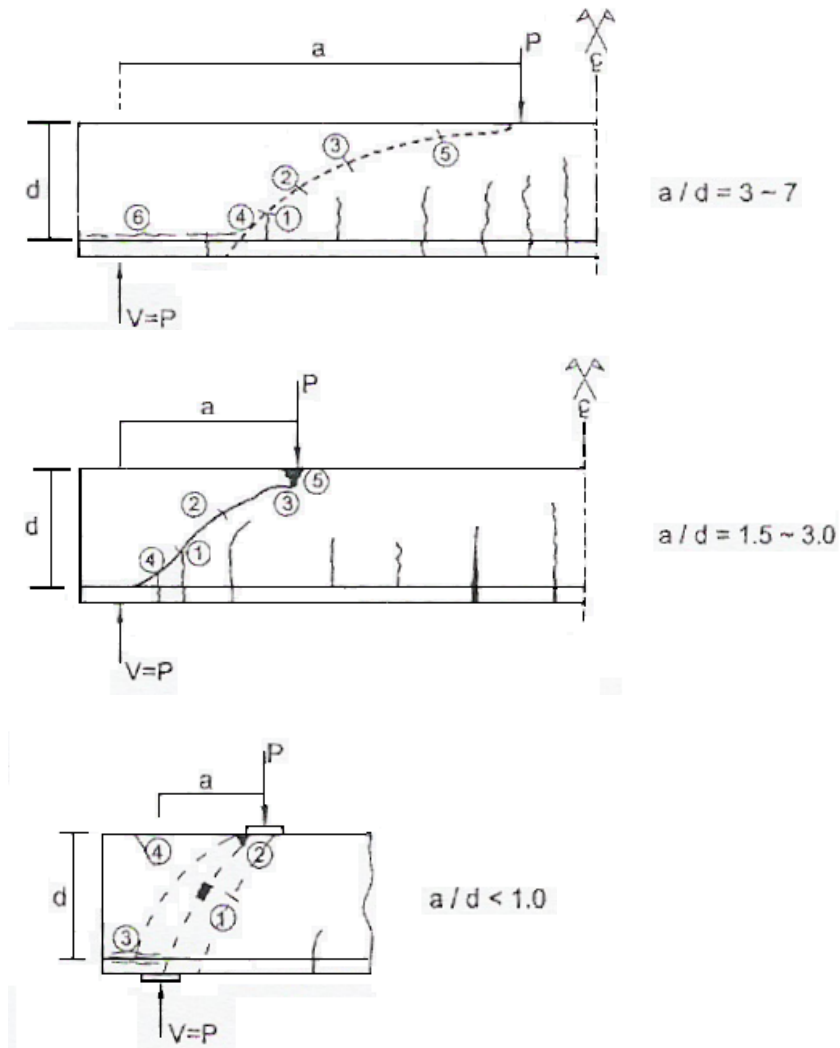
Kesmenin beton elemanlar üzerindeki etkisi araştırmacılar tarafından deneysel çalışmalar ile incelenmiştir. Bu çalışmalarda kesme etkisinin daha açık şekilde gözlemlenmesi için kesme donatısız üretilen betonarme kirişler kullanılmıştır. İki ucundan mesnetlenmiş kirişler, mesnet ortasına göre simetrik yerleştirilen tekil yükler altından denenmiştir. Bu kirişlerin sadece alt yüzeylerinde mesnetten mesnete uzanan çekme donatısı olduğu varsayılmıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Simetrik tekil yük ile denenmiş kesme donatısız kiriş [13].

Kirişlerde kesme davranışını etkileyen en önemli parametrelerden biri de kesme açıklığının kiriş faydalı yüksekliğine oranıdır (a/d). Kesme açıklığı tekil yük ile mesnet arasındaki mesafe olarak tanımlanmaktadır. Bu oranın büyük olduğu kirişlerde ($a/d > 7$) kirişi eğilme kapasitesine ulaştıran kesme kuvveti oldukça düşük düzeyde olduğundan kırılma üzerinde kesme kuvvetinin etkisi olmayacaktır.

Bu oranın ($3 > a/d > 7$) olduğu durumlarda ise kiriş eksenine dik yönde oluşan eğik çatlaklar yükün artırılmasıyla birlikte tarafsız eksene doğru uzar. Bu uzama esnasında çatlaklardan bir veya birkaçı asal çekme gerilmelerine dik yönde eğikleşmeye başlar (Şekil 2.3 1, 2, 3 nolu çatlaklar), yükün artırılmasıyla birlikte aniden eğik çatlak oluşur (Şekil 2.3 4 nolu çatlaklar). Bu durumda kirişte tam eğik çatlama durumu gerçekleşmiştir. Eğik çatlama donatıda ani bir gerilme artışına neden olduğundan, donatıya paralel aderans çatlakları oluşmaya başlar, yükün biraz daha artırılması durumunda çatlaklar hızla gelişir (Şekil 2.3 5, 6 nolu çatlaklar) ve son derece ani ve gevrek bir kırılma meydana gelir. Bu kırılma literatürde gerçek eğik çekme kırılması olarak adlandırılmaktadır. Böyle bir kırılmaya götüren çatlak gelişimi aşağıdaki şekillerde görülmektedir [13].



Şekil 2.3. Eğik çatlakların oluşumu [13].

3. BETONARME YAPILARDA DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ

Mühendislik uygulamalarında kullanılan malzemelerin birçoğu nonlinear özellik göstermektedir. Buna rağmen hassas çözümlerin istendiği durumlar dışında tasarım ve analizlerde bu malzemeler ve yapı elemanları lineer elastik kabul edilmektedir. Böylece yapı elemanlarının tasarımı doğrusal analiz yöntemleriyle yapılmaktadır [14].

Betonarme yapıların doğrusal analiz yöntemlerinde, yer değiştirmeler ihmal edilecek düzeyde kabul edilerek malzemelerin şekil değiştirme-gerilme bağıntıları lineer-elastik alınmaktadır [14]. Lineer-elastik malzeme, uygulanan yüklerle malzemede meydana gelen şekil değiştirmelerin doğru orantılı olduğu ve yük kaldırıldığında şekil değiştirmelerinde ortadan kalktığı malzeme çeşididir. Ancak betonarme yapılarda dış yüklerin etkisi altında zamanla çatlaklar gelişmekte ve çatlak gelişimi ile birlikte davranışın giderek doğrusal davranıştan uzaklaştığı gözlemlenmektedir. Yapı sistemlerinin analizinde yerdeğiştirmeleri göz ardı etmeden hesaplara katmak sonuçların gerçeğe daha yakın olarak elde edilmesini sağlamaktadır [14].

3.1. Yapı Sistemlerinin Doğrusal Olmama Nedenleri

Erkan Özer'in belirttiği gibi [14]

“Yapı sistemleri

1. Malzemenin doğrusal-elastik olmaması nedeniyle gerilme-şekil değiştirme bağıntılarının (bünye denklemlerinin) doğrusal olmaması
 2. Sistemin geometrisindeki değişiklikler nedeniyle denge denklemlerinin doğrusal olmaması
- sebepleriyle doğrusal değildir.

Yapı sistemlerinin doğrusal olmamasına neden olan etkenler ve bu etkenleri gözönüne alan teoriler Çizelge 3.1 üzerinde gösterilmiştir” .

Çizelge 3.1. Yapı sistemlerinin doğrusal olmama nedenleri [14].

Çözümün Sağlaması Gereken Koşullar	Doğrusal Sistemler	Doğrusal Olmayan Sistemler				
		Malzeme Bakımından	Geometri Değişimleri Bakımından		Her İki Bakımdan	
			İkinci Mertebe Teorisi	Sonlu Deplasman Teorisi	İkinci Mertebe Teorisi	Sonlu Deplasman Teorisi
Bünye Denklemleri (Gerilme-Şekildeğiştirme Bağlantıları)	Doğrusal-elastik	Doğrusal-elastik Değil	Doğrusal-elastik	Doğrusal-elastik	Doğrusal-elastik Değil	Doğrusal-elastik Değil
Denge Denklemlerinde Yerdeğiştirmeler	küçük	küçük	küçük Değil	küçük Değil	küçük Değil	küçük Değil
Geometrik Uygunluk Koşullarında Yerdeğiştirmeler	küçük	küçük	küçük	küçük Değil	küçük	küçük Değil

Betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışı çeşitli yöntemler ile incelenmiştir. Bu yöntemler deneysel çalışmalar, sayısal yöntemler ve bilgisayar simülasyonu olarak sıralanabilmektedir. Deneysel çalışmalar ile malzeme davranışı çok iyi gözlemlenmektedir. Ancak deneysel çalışmalar uzun zaman alan, mesnetlenme ve yükleme koşullarına bağlı, maliyeti yüksek çalışmalardır. Sayısal yöntemlerde ise çözüm için gerekli denklemleri elde etmek uzun zaman almaktadır. Ayrıca bu denklemlerin çoğunun çözümü mümkün olmamaktadır. Bilgisayar simülasyonu ise yaklaşık bir yöntemdir. Ayrıca çözümün doğruluğu malzeme ve geometri için uygun modellerin seçimine bağlı olmaktadır.

3.2. ANSYS'te Nonlineer Davranış

Mühendislik problemlerinin sayısal yöntemlerle çözümlerinde malzeme için malzeme modelleri kabulleri yapılmaktadır. Çalışmada ANSYS ile kirişlerin modellemesi yapılırken de malzeme modeli kabulleri yapılmıştır. Bu modellerin kabulünde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta malzeme davranışına en uygun modelin seçilmesidir. Böylece gerçek davranışa yakın sonuçlar elde etmek mümkün olmaktadır. Yürütülen tez çalışmasında da kirişler modellenirken bu nokta göz önüne alınmış ve nonlinear malzeme modelleri kullanılmıştır. ANSYS sonlu elemanlar programında nonlinearlik üç başlık altında dikkate alınmaktadır. Bunlar geometrik

nonlineerlik, malzeme nonlineerliği ve sınır şartlarında oluşan değişiklikler olarak sıralanabilmektedir.

*Geometrik nonlineerlik:*Yapıda büyük deformasyonlar mevcutsa bunun sonucunda yapı geometrisinde değişiklikler olucaktır. Bu değişiklikler de yapının nonlineer davranışına sebep olmaktadır. Burda geometrik nonlineerlik büyük yerdeğiştirmeler ve dönmeler ile ifade edilmektedir.

*Malzeme nonlineerliği:*Yapı alanında kullanılan malzemelerin hemen hemen hepsi nonlineer özelliğe sahiptir. Lineer malzemelerde malzemeye yük uygulandığında gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler doğrusal olarak artmakta, yük kaldırıldığında ise malzeme eski haline geri dönmektedir. Nonlineer malzemelerde ise gerilme ve birim şekil değiştirmeler arasında böyle bir doğrusal ilişki yoktur. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi üzerine etki eden her faktör nonlineerliğe de sebep olmaktadır. Rötire, sünme gibi malzeme bünyesinde zamanla meydana gelen deformasyonlar; ayrıca yükün uygulanma sıklığı ve büyüklüğu gibi birçok faktör malzeme davranışının nonlineer olması üzerinde etkili olmaktadır. ANSYS'te de malzeme nonlineerliği gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ile açıklanmaktadır.

*Sınır şartlarının değişmesi:*Yapı elemanının analizi sırasında sınır şartlarda değişiklik olması durumunda davranış nonlineer hale gelmektedir [15].

3.3. Doğrusal Olmayan Sistemlerin Çözümü

Erkan Özer doğrusal olmayan sistemlerin tanımı ve çözüm yöntemlerini açıklamaktadır [14].

“Bir problemin çözümüne ait denklemler problemin bilinmeyenlerini içeriyorsa yani problemin çözümü bilinmeyenlere bağlı ise bu tür problemlere doğrusal olmayan problemler denir”.

Bilinmeyenlerin yerdeđiřtirmeler olarak sečilmesi durumunda yerdeđiřtirmeleri veren denklem takımı matris formunda yazılacak olursa;

$[S]$ =Katsayılar matrisi (sistem rijitlik matrisi)

$[d]$ =bilinmeyenler matrisi (yerdeğiştirme matrisi)

$[P]$ =sabitler matrisi(yükleme matrisi) olmak üzere

$$[P] = [S] \times [d] \quad (3.1)$$

şeklindedir.

Dikkate alınan problemin türüne ve çözüm yöntemine bağlı olarak $[S]$ katsayılar matrisi ve $[P]$ sabitler matrisi çözüme ait yerdeğiştirmeleri ve şekil değiştirmeleri içermektedir (Eş.3.1).Doğrusal olmayan sistemlerin çözümünde Ardışık yaklaşım yöntemleri ve Yük artımı yöntemleri olmak üzere iki sayısal yöntem dikkate alınmaktadır [14].

3.3.1. Ardışık yaklaşım yöntemleri

Bu yaklaşım yönteminde önceki adımda elde edilen yerdeğiştirme veya şekil değiştirme dolaylarında sistem doğrusallaştırılmaktadır.Bu doğrusallaştırmaların çeşitlerine göre yöntem, başlangıç kirişi yöntemi, başlangıç teğeti yöntemi , teğet yöntemi , kiriş yöntemi olmak üzere alt sınıflara ayrılmaktadır [14].

3.3.2. Yük artımı yöntemleri

Yapı sisteminin belirli bir P yük parametresi değilde, yük parametresinin çeşitli değerleri için hesabının istenildiği durumlarda bu yöntem kullanılabilmektedir.Basit yük artımı ve düzeltilmiş yük artımı olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır [14].

4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi sayısal bir yöntem olup çeşitli mühendislik problemlerinin bilgisayar yardımıyla çözümü için geliştirilmiştir. Mekanik, akışkanlar mekaniği, ısı transferi, elektromanyetizma, lineer, lineer olmayan durumlar için gerilme analizi, şekil değiştirme analizinde, havacılık, otomotiv gibi birçok mühendislik alanında kullanılmaktadır [16,17].

Sonlu elemanlar yönteminin esasları havacılık ile başlamıştır. 1941 yılında Hrenikoff elastisite problemlerinin çözümünde kullanılan (frame work method) sunmuştur. 1943 yılında Courant burulma problemlerini modellemek için parçalı polinom interpolasyonunu üçgensel alt bölgeler (triangular subregion) üzerinde kullanmıştır. Courant'tan sonra sonlu elemanların kullanıldığı diğer önemli adım Boeign'in 1950'lerde uçak kanatları modellemek için üçgen gerilim elemanları kullanılmasıyla atılmıştır [9]. 1956 yılında çubuk, kiriş ve diğer elemanların rijitlik matrisleri bulunmuş, 1960'da ise Clough tarafından ilk defa sonlu eleman tanımı yapılmıştır. Yine bu dönemde mühendisler tarafından gerilme analizi, akışkanlar mekaniği, ısı transferi gibi alanlarda problemlerin yaklaşık çözümü için kullanılmıştır. İlk sonlu elemanlar kitabı ise 1967'de Zienkiewicz ve Chung tarafından yayınlanmıştır. 1960'lı yılların sonu ve 1970'li yılların başında nonlinear problemlerle büyük deformasyonlara uygulanmıştır [17].

4.1. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Bazı Terimler

Eleman: Sürekli ortamın ayrıldığı basit geometrik şekilli parçalar olarak tanımlanır.

Düğüm noktası(node): Elemanların birbiriyle kesişim noktalarıdır. Düğüm noktaları mutlaka belirli noktalardan hareketsiz bir şekilde sabitlenmelidir [16].

Serbestlik Derecesi: Bir düğüm noktasında elemanın yapabileceği deformasyonlar serbestlik derecesi olarak tanımlanır. Bir elemanın serbestlik derecesi elemanın bütün düğüm noktalarındaki serbestliklerin toplamı kadardır. Düğüm noktalarındaki

serbestliklerin sayısı problemin tek boyutta ya da iki veya üç boyutta dikkate alınmasına göre değişmektedir. “n” adet serbestliğin olduğu bir sistemde sistem rijitlik matrisinin [K] boyutu [nxn] kadardır. Düğüm noktalarındaki serbestlikler eleman tiplerinin özelliklerine göre değişmektedir.

İki boyutlu sürekli elemanlarda; yatay(d_x) ve düşey (d_y) yönde yerdeğiştirme olmak üzere her düğüm noktasında iki adet İki boyutlu yapısal elemanlarda yatay(d_x) ve düşey(d_y) yönde yerdeğiştirme ile düzleme dik yönde dönme (θ_z) olmak üzere her düğüm noktasında üç adet Üç boyutlu sürekli elemanlarda yatay (d_x) ,düşey (d_y) ve düzleme dik yönde (d_z) yerdeğiştirme olmak üzere her düğüm noktasında üç adet Üç boyutlu yapısal elemanlarda ise yatay ,düşey ve düzleme dik yönde yerdeğiştirmeler (d_x, d_y, d_z) ile yine yatay, düşey ve düzleme dik yönde dönmeler ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) olmak üzere her düğüm noktasında altı adet serbestlik vardır.

4.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Hesap Basamakları

Sonlu elemanlar yöntemiyle bir problemin çözümündeki hesap basamakları şu şekilde sıralanabilmektedir.

1. Sürekli ortamın elemanlara ayrılarak, eleman tipinin belirlenmesi.
2. Her bir eleman için eleman rijitlik matrisinin oluşturulması.
3. Global rijitlik matrisinin elde edilmesi.
4. Sınır şartlar gözönüne alınarak deplasmanların çözülmesi.

Bu adımlar kısaca şu şekilde açıklanabilir.

1. Sürekli ortamın elemanlara bölünmesi sonlu elemanlar yönteminde en kilit noktalardan biridir. Mesh etme olarak da isimlendirilen sürekli ortamın daha küçük elemanlara bölünmesi işleminde analiz sonuçlarının hassaslığı açısından mümkün olduğunca çok sayıda eleman kullanılması gerekse de belirli bir değerden sonra mesh yoğunluğunu artırmak sonuçları etkilememekte bilgisayara ayrıca yük getirmektedir. Bu nedenle elemanlara bölme işleminin dikkatle yapılması, gerekli olduğu durumlarda da yeniden mesh edilmesi gerekmektedir. Sistemin elemanlara

ayrılmasında geometriye uygun şekilde eleman seçilmeli, ayrıca yük ve geometrik değişimler de göz ardı edilmemelidir.

2. Sistemin elemanlara bölünmesinden sonra her eleman için lokal eksen takımlarında eleman rijitlik matrisleri hesaplanmaktadır. Eleman rijitlik matrisi $[K]$ elemanın geometrik ve elastik özelliklerinden elde edilir [1]. “n” tane serbestlik derecesine sahip bir elemanda eleman rijitlik matrisi $[n \times n]$ boyutunda olmaktadır.

3. Sürekli ortamı oluşturan her eleman için elemanların lokal eksen takımlarında elde edilmiş olan rijitlik matrisleri sistem için seçilmiş global eksen takımında her bir düğüm noktasına bağlanan elemanlar gözönüne alınarak birleştirilir ve sistemin global rijitlik matrisi oluşturulur.

4. Sürekli ortamın sınır şartları gözönüne alınarak sistem için Eş.4.1 yazılarak deplasmanlar hesaplanır.

$$\{F\} = [K] \cdot \{d\} \quad (4.1)$$

Deplasmanlar elde edildikten sonra da şekil değiştirmeler ve gerilmeler hesaplanabilir. Sonlu elemanlar yöntemi düğüm noktasına bağlı bir yöntem olup kuvvetler düğüm noktalarına etki ettirilir ve hesaplar sonucunda da bulunan yerdeğiştirmeler düğüm noktaları yerdeğiştirmeleridir.

4.3. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Eleman Tipleri

Sürekli ortam yapısına uygun olacak şekilde sonlu elemanlar yönteminde çeşitli tiplerde elemanlar kullanılır. Elemanlar sürekli (katı, iki boyutlu yüzey) elemanlar ve yapısal (kirişler, kolonlar) elemanlar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır.

Elemanlar boyutlarına göre ise tek boyutlu, iki boyutlu, üç boyutlu, dönel eleman ve izoparametrik elemanlar (eş parametrelili elemanlar) olmak üzere sınıflandırılabilir [16].

“Tek boyutlu elemanlar: Tek boyutta incelemenin yeterli olacağı problemlerin çözümünde kullanılırlar.Örneğin; yay problemi gibi.

İki boyutlu elemanlar: İki boyutlu problemlerin çözümünde kullanılırlar. Bu grubun temel elemanı üç düğümlü üçgen elemandır. Üçgen elemanın altı, dokuz ve daha fazla düğüm ihtiva eden çeşitleri de vardır. Düğüm sayısı seçilecek interpolasyon fonksiyonunun derecesine göre belirlenir.

Dönel elemanlar: Eksenel simetrik özellik gösteren problemlerin çözümünde dönel elemanlar kullanılır. Bu elemanlar bir veya iki boyutlu elemanların simetri eksenini etrafında bir tam dönme yapmasıyla oluşurlar.

Üç boyutlu elemanlar: Bu grupta en temel eleman üçgen piramittir. Bunun dışında dikdörtgenler prizması ve daha genel olarak altı yüzlü elemanlar üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipleridir.

İzoparametrik sonlu elemanlar: Çözüm bölgesinin sınırları eğri denklemleri ile tanımlanmış bölgelerin çözümünde kullanılırlar. Bu elemanlar üzerindeki düğüm noktaları bir fonksiyon ile tanımlanır. İzoparametrik sonlu elemanın özelliği, her noktasının konumunun ve yer değiştirmesinin aynı mertebeden aynı şekil (interpolasyon) fonksiyonu ile tanımlanabiliyor olmasıdır. İzoparametrik elemanlara eşparametrelili elemanlar da denir” .

4.4. Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantajları

Sonlu elemanlar yönteminin avantajları şu şekilde sıralanabilmektedir:

1. Betonarme yapıları nonlinear analizle çözümlemeye imkan sağlayarak yapı davranışın gerçeğe daha uygun şekilde anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.
2. Henüz tasarım aşamasındaki projelerin bilgisayar ortamında simüle edilmesini sağlayarak iaalarda ortaya çıkabilecek problemler hakkında fikir vermektedir.
3. Maliyeti oldukça yüksek olabilen deneysel çalışmalar sonlu elemanlar ile modellenerek maliyetten kazanç sağlanmaktadır.
4. Kompleks yapıli betonarme sistemlerin analizine olanak sağlanmaktadır.
5. Malzemenin zamana bağıli olarak değişen özellikleri kolaylıkla gözönüne alınabilmektedir.

4.5. Sonlu Elemanlar Yönteminin Dezavantajları

Sonlu elemanlar yönteminin dezavantajları şu şekilde sıralanabilmektedir:

1. Malzeme ve geometriye uygun elemanların seçilmemesi durumunda gerçek sonuçlardan oldukça farklı sonuçlarla karşılaşılabilir.
2. Ağ yoğunluğunun az tutulması durumunda sonuçlar deneysel sonuçlardan oldukça farklı olmaktadır. Ağ yoğunluğunu fazla tutulması durumunda ise bilgisayar kapasitesi analizi yapmada yetersiz kalabilmektedir.
3. Programın çalışması iyi bir donanımın olmasına bağlı olmaktadır.
4. Düğüm noktalarına bağlı bir yöntemdir. Yapı elemanına uygulanan yükler düğüm noktalarına uygulanmakta olup, analiz sonucu elde edilen deplasman ve gerilmeler de düğüm noktalarının deplasman ve gerilmeleridir.

5. MODELLEMESİ YAPILAN KİRİŞLERİN TANITILMASI

Çalışma kapsamında toplam yedi adet kiriş modellenmiş olup bunlardan beşi Özgür ANIL tarafından 2005 yılında Gazi Üniversitesi mekanik laboratuvarında test edilmiştir. Bu kirişlerin modellenmesi sonucunda deneysel çalışma sonucunda elde edilen yük-deplasman davranışına uyumlu analiz sonuçları bulunmuştur. Bu sonuçtan hareketle deneyi yapılmamış farklı aralıklı düzenlenmiş CFRP şeritleriyle güçlendirilen iki kiriş daha modellenmiştir. Yapılan analiz sonucunda kirişlerin yük deplasman grafikleri ve taşıma güçleri elde edilmiş ve CFRP şeritlerin düzenlenme aralığıyla taşıma gücü değeri arasındaki ilişkiye bakılmıştır. Kirişler aynı geometride, etriyesiz ve aynı miktarda boyuna donatılı olarak T kesit şeklinde modellenmiştir. Boyuna donatı olarak kirişin altında ve üstünde üçer adet olmak üzere toplam altı adet 20 mm'lik donatı kullanılmıştır. Kirişler düşük dayanımlı betondan üretilmiş olup numunelerin dayanımları standart silindir deneyi ile tespit edilmiştir. Kirişlere ait özellikler Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de verilmiştir.

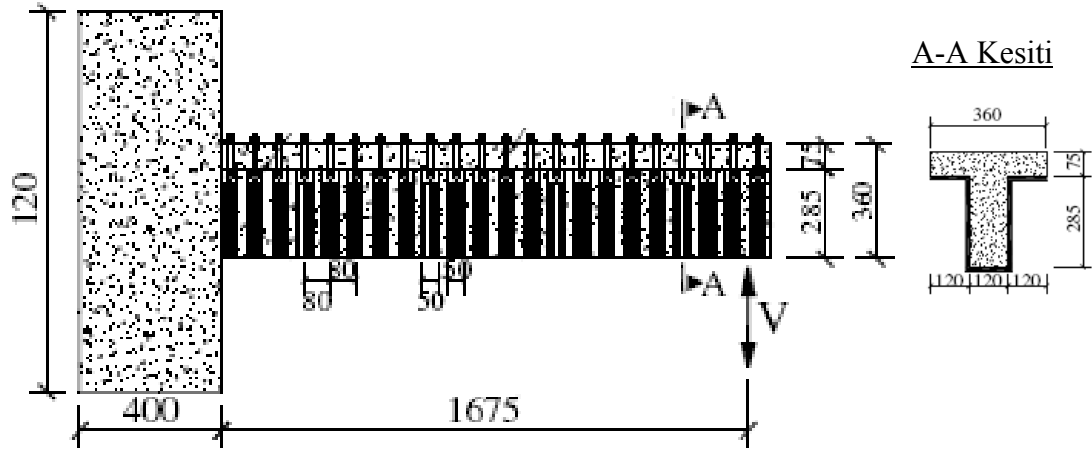
Çizelge 5.1. Test edilen kirişlere ait özellikler [18]

Kiriş no:	L (mm)	a (mm)	d (mm)	a/d	f_c (MPa)
Kiriş 1	1750	1675	335	5,0	15,0
Kiriş 2	1750	1675	335	5,0	14,0
Kiriş 3	1750	1675	335	5,0	14,5
Kiriş 4	1750	1675	335	5,0	14,8
Kiriş 5	1750	1675	335	5,0	14,2
Kiriş 6	1750	1675	335	5,0	14,8
Kiriş 7	1750	1675	335	5,0	14,8

Çizelge 5.2. Donatılara ait mekanik özellikler [18]

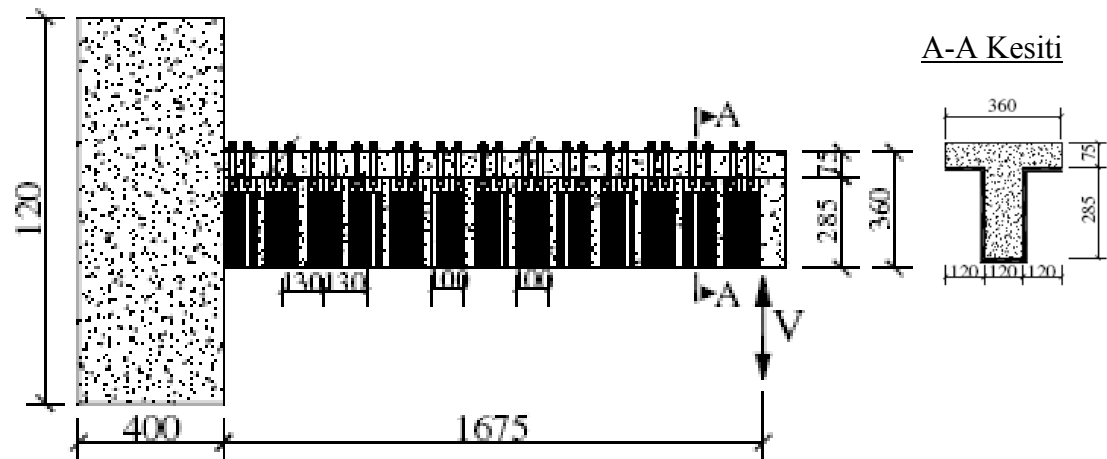
Donatı çapı (mm)	Akma dayanımı (MPa)	Kopma dayanımı (MPa)	Elastik modül $\times 10^3$ (MPa)
6	275,0	417,0	192
10	304,2	443,1	198
20 (nervürlü)	414,0	687,9	205

Kiriş 1 dışındaki bütün kirişler CFRP şeritleri ve/veya levhalarıyla güçlendirilmiştir. Kiriş 2 de 50 mm genişlikli U şeklindeki CFRP şeritleri 80 mm aralıklarla kiriş gövdesine uygulanmış ve tek ankrajla gövdenin üst kısmında kirişe bağlanmıştır.



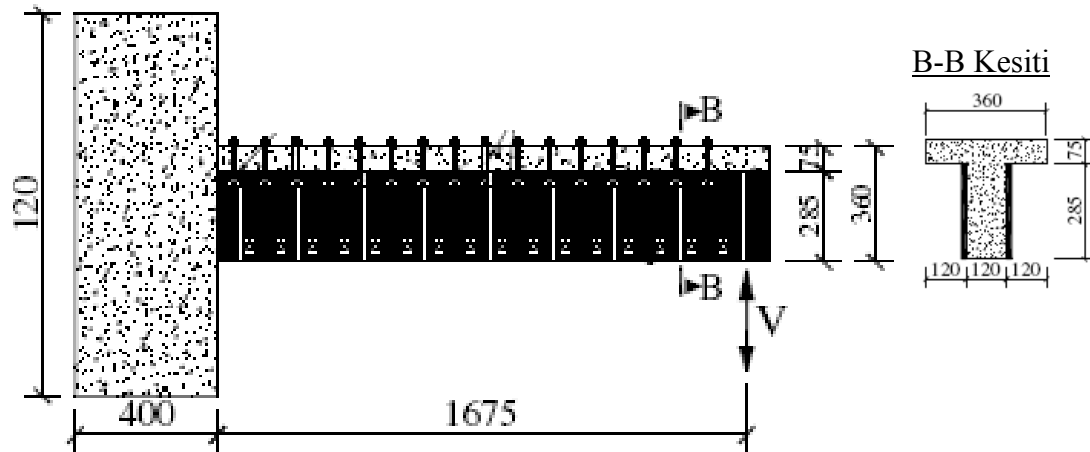
Şekil 5.1. Kiriş 2 güçlendirme detayı ve enkesiti [18]

Kiriş 3'de kiriş 2'dekine benzer şekilde 100 mm genişlikli U şeklindeki CFRP şeritleri 130 mm aralıklarla kiriş gövdesine uygulanmış ve tek ankrajla gövdenin üst kısmında kirişe bağlanmıştır.



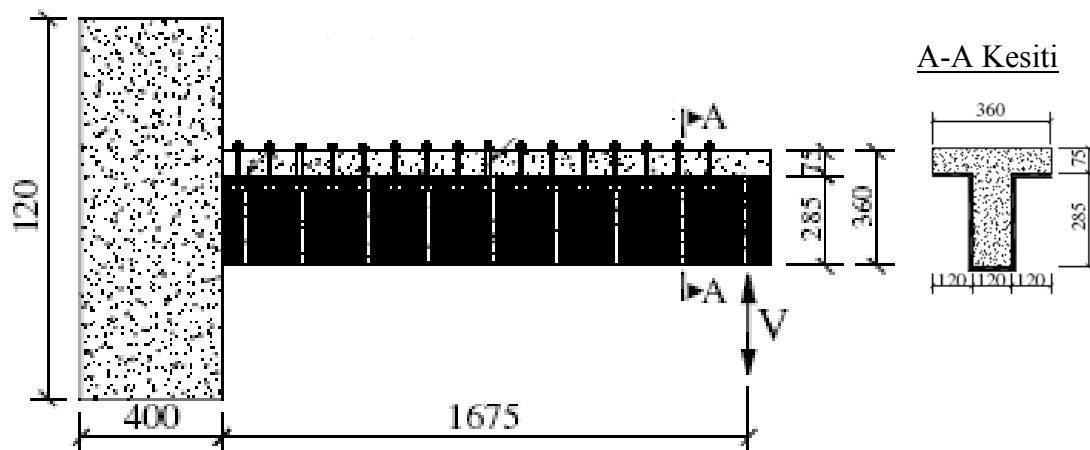
Şekil 5.2. Kiriş 3 güçlendirme detayı ve enkesiti [18]

Kiriş 4 CFRP levhalarıyla güçlendirilmiş olup, bu levhalar kiriş gövdesinin her iki kenarına kesme açıklığı boyunca uygulanmış ve gövdenin alt ve üst kısmında birbirine çakışmayacak şekilde yerleri belirlenen 16 adet ankrajla kirişe bağlanmıştır.



Şekil 5.3. Kiriş 4 güçlendirme detayı ve enkesiti [18]

Kiriş 5 CFRP levhalarıyla güçlendirilmiş olup levhalar kiriş gövdesinin alt kısmına ve iki yan kenarına kesme açıklığı boyunca uygulanarak gövdenin üst kısmında 16 adet ankrajla kirişe bağlanmıştır.



Kiriş 6 ve Kiriş 7 ise deneyi yapılmamış kirişler olup kiriş 2'dekine benzer şekilde 50 mm'lik U şeklindeki CFRP şeritleriyle güçlendirilmiştir. Kiriş 6'da CFRP şeritleri 120 mm aralıklarla kiriş 7'de ise 150 mm aralıklarla kiriş gövdesine uygulanmıştır. Çizelge 5.3 de güçlendirme yöntemlerine ait ayrıntılar görülmektedir.

Çizelge 5.3. CFRP şeritlerinin özellikleri

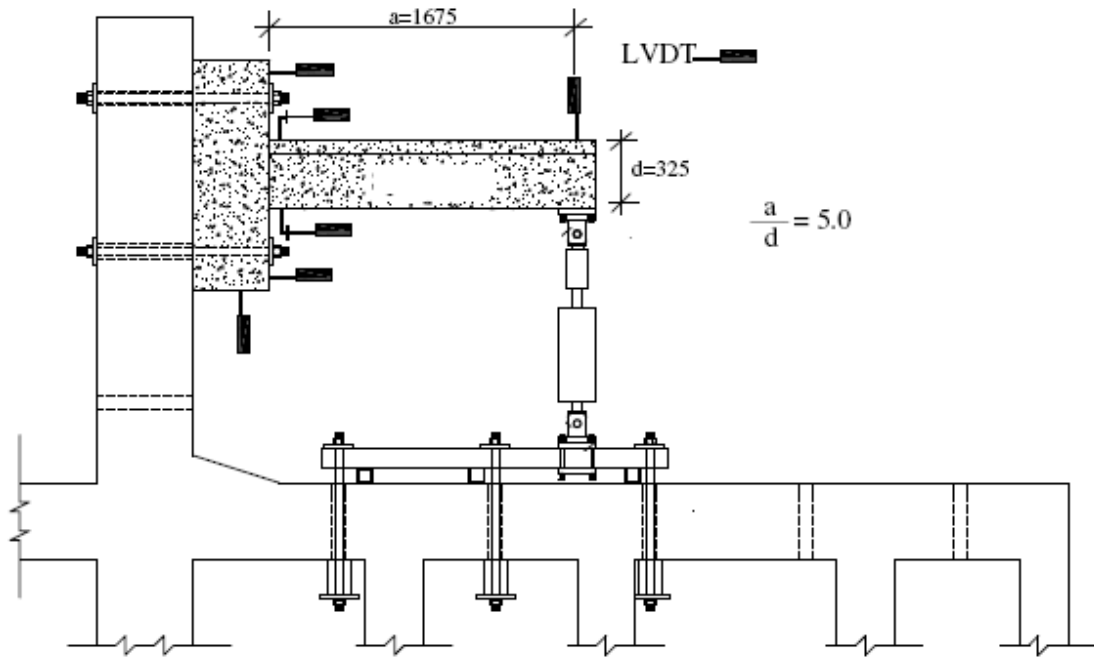
Kiriş no	Genişlik (mm)	Açı	Aralık (mm)	Ankraj	Düzenleme
Kiriş 2	50	90°	80	var	U sargı
Kiriş 3	100	90°	130	var	U sargı
Kiriş 4	1750	90°	----	var	Her iki yan kenar
Kiriş 5	1750	90°	----	var	U sargı
Kiriş 6	50	90°	120	----	U sargı
Kiriş 7	50	90°	150	----	U sargı

Deneysel çalışmada kirişlerin güçlendirme işleminde Sikawrap 160C CFRP şeritleri, sikadur 330 epoksi kullanılmıştır. CFRP şeritleri ve levhaları kirişlere yapıştırılmadan önce uygulanacak yüzeyler özel olarak hazırlanmıştır. Kiriş gövdelerinin her iki yan kenarları agregalar açığa çıkana kadar pürüzlendirilmiş, daha sonra da yüzey toz ve parçacıklardan temizlenmiştir. Yüzeylere yönergesine uygun olarak karıştırılan Sikadur 330 epoksi 1,5 mm kalınlığında sürülmüştür. Daha sonra CFRP şeritleri ve levhaları yüzeylere yapıştırılmıştır. Yapıştırma işleminden sonra ise lif doğrultusunda şeritlere el ile hafif basınç uygulanarak CFRP şeritleri ile beton yüzey arasındaki hava boşlukları yok edilmiştir. Ayrıca ikinci bir epoksi tabakası CFRP şeritlerini koruma amaçlı olarak lif doğrultusunda şerit üzerlerine 1,5 mm kalınlığında uygulanmıştır. İşlemler tamamlandıktan sonra numuneler test edilmeden önce 15 gün laboratuvar koşullarında kür edilmişlerdir [18].

5.1. Deney Düzenegi

Kirişler, 45 mm çapında yüksek dayanımlı çelikten yapılmış çubuklarla mesnetlenmiş rijit platform ve duvarda test edilmiştir. Kirişler ankastre olarak

mesnetlenmiştir. Yükleme düzeneği rijit platform ve kirişlerin boşta kalan uçlarının ikisine birden mafsallanmıştır. Yük kirişlerin boşta kalan ucuna uygulanmıştır. Yükleme 1000 kN kapasiteli hidrolik kriko ile yapılmış ve 600 kN kapasiteli load cell ile kontrol edilmiştir. Eğilme donatısının akma düzeyine kadar yükleme derece derece arttırılmıştır. Aynı döngüsel yükleme (loading cycles) tüm numunelere uygulanmıştır. Ancak numunelerin kesme taşıma kapasiteleri birbirinden farklı olduğu için yük adımları, ilk eğilme ve kesme çatlağını oluşturan yükten sonra numunelerin kapasite ve davranışlarına göre hesaplanmıştır.

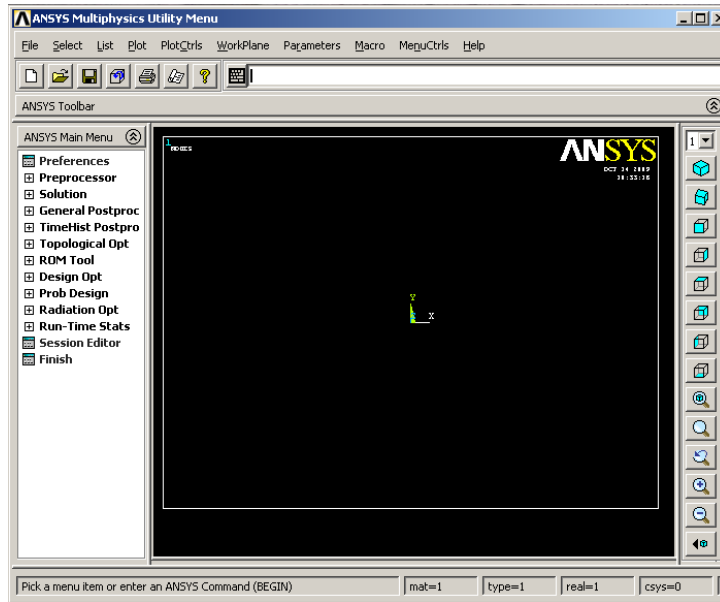


Şekil 5.5. Deney düzeneği [18]

Tüm numunelerde kesme açıklığı/etkili kiriş yüksekliği oranı $a/d=1675/335=5$ 'tir. Kirişin boşta kalan ucunda maksimum moment bölgesindeki dönme ve moment değerleri LVDT'ler ile, CFRP birim şekil değiştirmeleri ise strain gaugeler ile ölçülmüştür (Şekil 5.5) [18].

6. ANSYS SONLU ELEMANLAR PROGRAMI

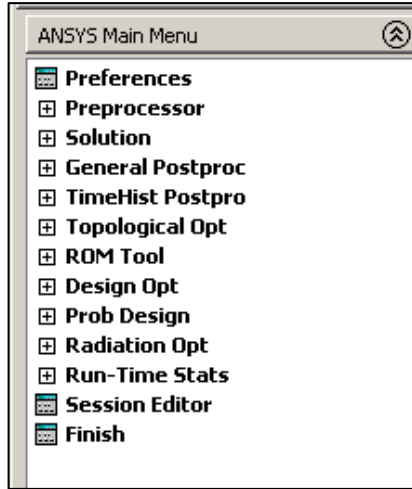
ANSYS çeşitli mekanik problemlerin sonlu elemanlar yöntemiyle çözümünde yaygın olarak kullanılan bir paket programdır. Swanson Analysis Systems tarafından, ilk kez 1971 yılında geliştirilmiştir. Statik ve dinamik çözüm, doğrusal ve doğrusal olmayan yapısal analiz, ısı transferi, akışkanlar problemleri ile akustik ve elektromanyetik problemlerin çözümü kullanıldığı yerler olarak sıralanabilir [19]. Ansys penceresi Şekil 6.1. de görülmektedir.



Şekil 6.1. Ansys penceresi

6.1. ANSYS Yazılımında Main Menü

Ansys programında modelle ilgili hemen hemen bütün çalışmaların yapıldığı menüdür. Preferences, preprocessor, solution, general postproc, timehistpostpro gibi birçok alt menüden oluşmaktadır. Modellemenin yapıldığı, modelle ilgili tüm detay çalışmaların yürütüldüğü ayrıca analizlerin yapılarak sonuçların değerlendirildiği kısımdır (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. Ansys yazılımında main menu

Alt menülerinin bazılarının özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

ANSYS Main Menu

Preferences: Analiz tipinin ve analizde kullanılacak yöntemin belirlendiği kısımdır. Modellemede kullanılacak analiz tipi seçimini sağlar.

Preprocessor: Modelle ile ilgili tüm çalışmalar bu menüde yapılmaktadır. Modelin oluşturulması, malzeme özelliklerinin belirlenmesi, elemanlara ayrılması, mesh edilmesi, sınır şartlarının oluşturulması, yükleme gibi birçok işlem bu kısımda gerçekleştirilmektedir.

Solution: Analizin yapıldığı menüdür. Ayrıca alt menülerinde yükleme, analiz tipiyle ilgili seçimler yapılabilmektedir.

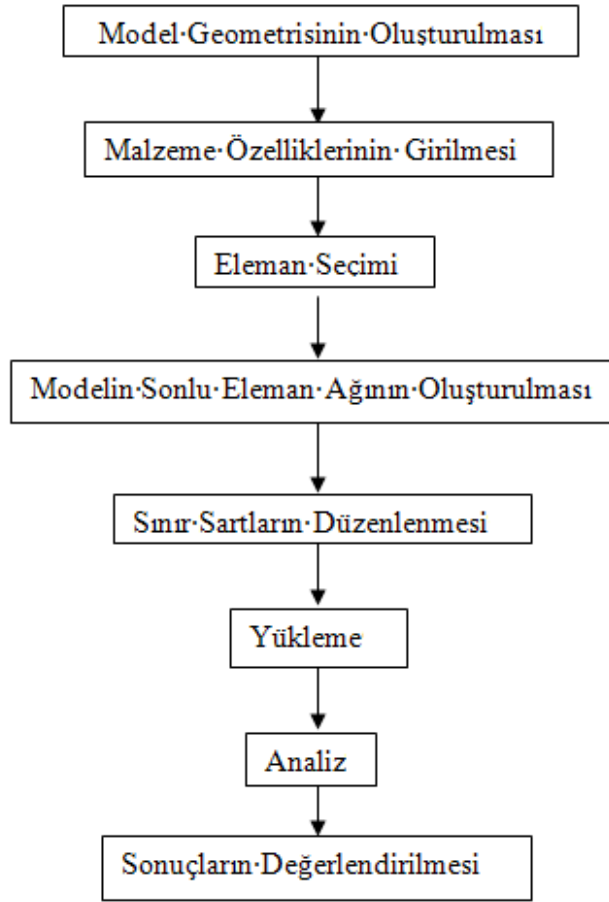
General Postprocessor: Analiz sonuçlarının değerlendirildiği kısımdır. Modelde istenilen noktalara ait her üç yönde deplasman, gerilme değerlerine bu alt menüden ulaşılmaktadır. Ayrıca yükleme sonunda deforme olmuş model de yine bu menüden görülebilmektedir.

TimeHist Postpro: Yapı elemanının istenilen bölgelerinde analiz sonuçların elde edildiği menüdür. Ayrıca geçmişteki çalışmalarla ilgili analizlere bu menüden ulaşmak mümkündür. Ancak bu menüde istenilen sonuçlar time sayacı cinsinden verilmektedir. Gerekli düzenlemeler yapılarak sonuçlar yük cinsinden elde edilebilir.

Ansys Output Window: Program çalışırken modelleme ve analizle ilgili yapılan tüm çalışmaların görüldüğü menüdür. Program çalışırken arka pencerede çalışır.

6.2. ANSYS ile Analizin Basamakları

Bir sonlu elemanlar programı ile analiz yapılırken öncelikle model geometrisi oluşturularak, model sonlu sayıda elemana bölünür. Bu elemanlar fiziki ortamın özelliklerini taşıyan küçük birimler gibidir. Bu elemanlar için eleman ve malzeme modelleri kabulleri yapıldıktan sonra sınır şartlar oluşturularak gerekli noktalara yükler etki ettirilir ve analizler yapılarak sonuçlar elde edilir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri sonlu elemanlar yönteminin düğüm noktalarına bağlı bir yöntem olmasıdır. Yani yapı elemanına etki ettirilecek yükler düğüm noktalarına uygulanır ve analizler sonucunda elde edilen gerilme ve deplasman değerleri düğüm noktalarındaki değerlerdir. ANSYS sonlu elemanlar programında bir analizin basamakları Şekil 6.3’de görüldüğü gibi şematize edilebilir.



Şekil 6.3. Ansys sonlu elemanlar programı ile analizin basamakları

Bu analiz adımlarındaki işlemler aşağıda açıklanmıştır.

6.2.1. Model geometrisinin oluşturulması

Analizi yapılacak olan yapı elemanlarının geometrisi oluşturulurken problemin hangi boyutta dikkate alındığı önemlidir. İki boyutta çözümün yeterli olduğu analizlerde noktalardan (keypoint) çizgileri (line), çizgilerden de alanları (area) oluşturmak yeterli olduğu gibi alt menülerden doğrudan alanlarda oluşturulabilmektedir. Üç boyutlu problemlerin çözümünde ise alanlar oluşturulduktan sonra alanların derinliği tanımlanarak hacimler oluşturulmakta ya da alt menülerden doğrudan hacimler tanımlanmaktadır.

Çalışma kapsamında doğrudan hacimler oluşturularak kirişler modellenmiştir. Modellemede donatılar beton içinde dağılı kabul edildiğinden donatıların konumuna dikkat edilerek hacimler oluşturulmuştur. Ayrıca beton pas payı da dikkate alınarak model oluşturulmuştur. Bu nedenle kiriş modeli tek bir hacimden değilde bir çok hacimin bir araya gelmesiyle oluşturulmuştur. Ayrıca kirişlerin geometrik olarak simetrik olmasından yararlanılmış ve yarım modelleme yapılmıştır.

6.2.2. Malzeme özelliklerinin girilmesi

Sayısal yöntemlerle problemlerinin çözümünde çözümün gerçeğe yakınlığı, malzeme özelliklerinin gerçeğe en yakın şekilde modellenmesine bağlıdır. Çalışma kapsamında beton, donatı ve CFRP malzeme özellikleri ayrı ayrı tanımlanmıştır.

Malzeme modelleri

Sayısal yöntemlerle mühendislik problemlerinin çözümünde yapı elemanları için malzeme modelleri kabulleri yapılmaktadır. ANSYS sonlu elemanlar yazılımıyla kirişlerin modellenmesinde de malzemeler için malzeme modeli kabulleri yapılmıştır.

Malzeme modeli kabulleri yapılmadan önce yapı elemanını oluşturulan malzemelerin mekanik özelliklerinin iyi bilinmesi, sağlıklı bir modelleme için önemlidir. Kirişleri oluşturan beton, donatı ve CFRP malzeme özellikleri aşağıda kısaca açıklanmaktadır.

Beton malzeme davranışı

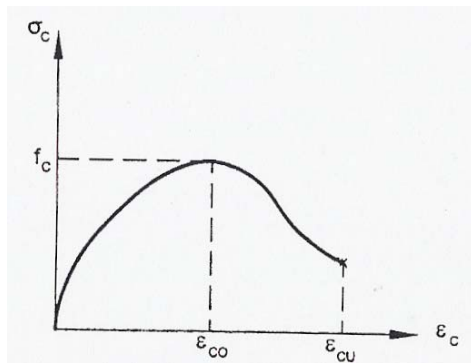
Beton genel olarak çimento, su, iri ve ince agreganın uygun oranlarda karıştırılması sonucu elde edilen kompozit bir yapı malzemesidir. Ayrıca beton zamana ve yüke bağlı olarak özellikleri değişen, nonlinear bir malzemedir. Yapılan deneysel çalışmalarda betonun belirli bir yük seviyesine kadar lineer davranış gösterdiği ancak uygulanan yükün artırılmasıyla birlikte bünyesinde oluşan mikro çatlakların büyüyerek makro çatlaklar haline geldiği bunun sonucunda da dayanımının düşerek

yük taşıma kapasitesinin azaldığı görülmüştür. Yani betonun yük ve deplasman eğrisi parabolik bir özellik göstermektedir. Bu nedenle beton modellenirken malzemeyi belirli bir yük seviyesine kadar lineer kabul etmek, bu yük seviyesinden göçme anına kadar ise nonlinear kabul etmek sonuçların hassasiyeti açısından önemlidir. Betonun mekanik özellikleri arasında basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü, poisson oranı gibi özellikleri sayılabilmektedir.

Beton basınç dayanımı

Bir çok gevrek malzemede olduğu gibi betonun da en önemli mekanik özelliği basınç dayanımıdır. Betonun basınç dayanımının tespitinde en çok kullanılan yöntemlerden biri standart silindir deneyidir. Standart silindir deneyinde betondan alınan numuneler standart silindir kalıplara yerleştirilmektedir. Standart silindir kalıplar 150 mm çapında 300 mm uzunluğundadır. Numuneler kür ortamında 28 gün mukavemetini kazanması için bekletildikten sonra, preslerde eksenel basınç uygulanmak suretiyle kırılmaktadır.

Betonun basınç dayanımı, kırılma yükünün silindir alanına bölünmesiyle elde edilir ve gerilme cinsinden ifade edilir (Şekil 6.4). Betonun basınç dayanımı numune geometrisi ve boyutları, yükleme hızı, malzeme oranları, deney presinin özellikleri gibi birçok değişkenden etkilenmektedir [13].



Şekil 6.4. Beton basınç dayanımı [13]

Beton çekme dayanımı

Betonun çekme dayanımı basınç dayanımının yanında oldukça düşüktür. Çekme dayanımının tespitinde direk çekme deneyi, silindir yarma deneyi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Direk çekme deneyinde, beton numuneler doğrudan çekme preslerine yerleştirilmiş ve numunelere eksenel çekme uygulanmıştır. Ancak bu işlem sonucunda pres başlarında gerilme yığılmaları olmuş ve numuneler kırılmıştır. Bu nedenle daha sonraki yıllarda betonun çekme dayanımını tespit etmek için dolaylı yöntemler geliştirilmiş ve kiriş numuneler kullanılmıştır. Çekme dayanımının dolaylı olarak saptanmasında kullanılan bir diğer yöntemde silindir yarma deneyidir. Bu deneyde 150 mm x 300 mm boyutlarında standart silindir numune pres tablasına yatay olarak yerleştirilmektedir. Daha sonra bu numunenin altına ve üstüne yerleştirilen çelik lamalara basınç uygulanarak deney gerçekleştirilmektedir. Ancak betonun tek yönlü gerilme altındaki davranışı, çok yönlü gerilme altındaki davranışından farklı olduğu için bu deneyden elde edilen çekme dayanımı betonun gerçek çekme dayanımı değerini vermemektedir.

Betonun çekme dayanım deneyleri ile ilgili ideale en yakın olan değerleri veren deneyler Prof H. Rüsch tarafından yapılmıştır. Rüsch eksenel çekme deneylerinde pres çenesinde gerilme yığılmalarından kaynaklanan kırılmaları engellemek için bu bölgelerde numunenin kesitini büyütmüş daha sonra bu uçlara epoksi ile yapıştırdığı çelik plakalar ile eksenel kuvvet uygulamıştır. Böyle bir deneyin laboratuvarlarda yapılması pratik olmadığından çekme dayanımının tespitinde kiriş ve yarma deneyleri standart deneyler olarak kullanılmaktadır [13].

TS500'de betonun çekme dayanımı, eksenel çekme elemanı deneylerinden elde edilen dayanım değeri olarak alınmaktadır [20]. Bu dayanım değeri de Eş.6.1 deki gibidir.

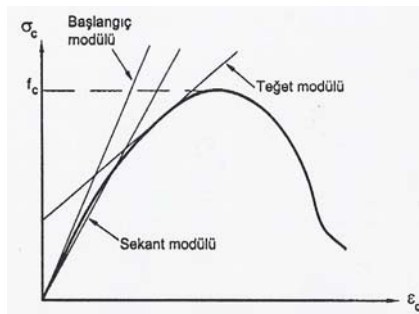
$$f_{ctk} = 0,35\sqrt{f_c} \quad (6.1)$$

Tez çalışmasında ise tek noktadan tekil yük ile yüklenen kiriş için kullanılan çekme dayanımı değeri hesaplarda esas alınmıştır. Bu değer kullanılması başlıca nedeni ise yükleme durumuna bağlı olarak betonun çekme dayanım değerlerinin değişmesidir. Eksenel çekme durumunda çekme dayanımı en düşük değerde olmasına rağmen tek noktadan uygulanan tekil yük durumunda ise en büyük değerini almaktadır. Modellemede kullanılan çekme dayanımı Eş. 6.2 deki gibi hesaplanmıştır.

$$f_{ctk} = 0,70\sqrt{f_c} \quad (6.2)$$

Beton elastisite modülü

Beton, özellikleri zamana göre değişen bir malzeme olduğu için elastisite modülünü hesaplamak zordur. Betonun elastisite modülünü hesaplamak için çeşitli yöntemler önerilmektedir. Bunlar başlangıç modülü, sekant modülü, teğet modülü olarak sıralanabilmektedir. Başlangıç modülünde betonun gerilme-birim şekil değiştirme eğrisine başlangıçta çizilen teğet eğimi dikkate alınmaktadır. Gerilme değerlerinin düşük olduğu durumlarda betonun elastisite modülü başlangıç modülü olarak alınmaktadır. Sekant modülü ise orjinden eğri üzerindeki herhangi bir noktaya çizilen sekantın eğimi olarak ifade edilmektedir. Teğet modülü de yine eğri üzerindeki herhangi bir noktaya çizilen teğetin eğimi ile hesaplanmaktadır (Şekil 6.5). Elastisite modülü, basınç dayanımına etki eden faktörler ile gerilme-şekil değiştirme eğrisine etki eden faktörler gibi birçok parametreden etkilendiği için hesabı oldukça zordur. Buna rağmen birçok standartta yaklaşık hesabı için formüller mevcuttur [13].



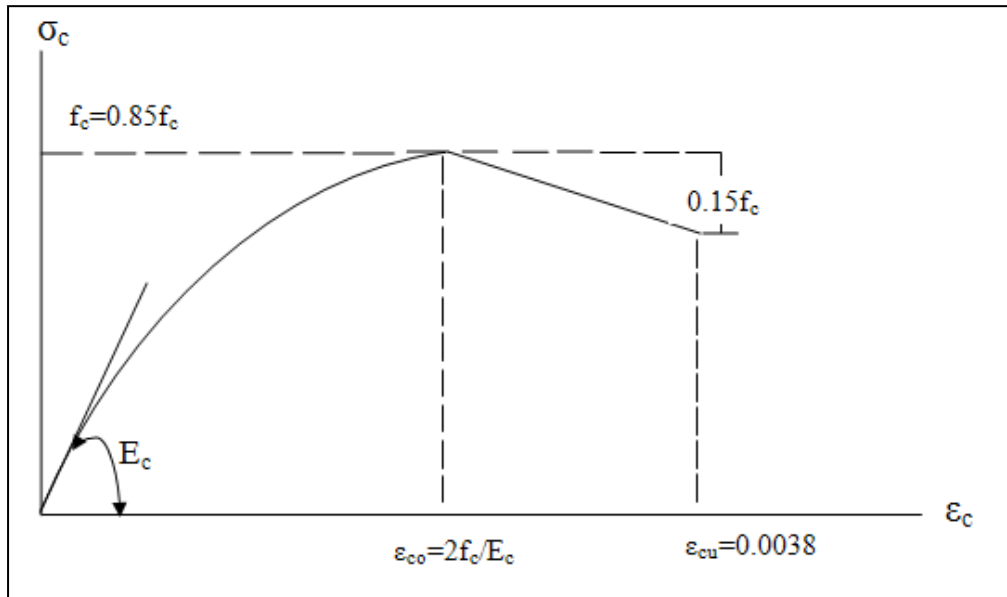
Şekil 6.5. Beton elastisite modülü [13]

Hognestad beton modeli

Kirişlerin modellenmesinde Hognestad tarafından önerilen beton modeli dikkate alınmıştır. Hognestad tarafından önerilen bu modelde betonun gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi iki kısımdan oluşmaktadır. Eğri tepe noktasına kadar ikinci dereceden bir parabol şeklinde, tepe noktasından kopma anına kadar ise lineer olarak devam etmektedir (Şekil 6.6). Hognestad tarafından önerilen bu model sargısız betonların modellenmesinde kullanılmaktadır [13]. Çalışmadaki kirişler de etriyesiz oldukları için bu beton modeli tercih edilmiştir.

Betonun elastik modülü Eş. 6.3 deki gibi hesaplanmaktadır.

$$E_c = 12680 + 460f_c \quad (6.3)$$



Şekil.6.6. Hognestad beton modeli [13]

Hognestad tarafından önerilen bu gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinde parabolik olan ilk kısmın denklemini Eş. 6.4 deki gibidir.

$$\sigma_c = f_c \left[2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right)^2 \right] \quad (6.4)$$

Eğride maksimum gerilmeye karşı gelen şekil değiştirme de Eş. 6.5 deki gibi tanımlanmaktadır.

$$\epsilon_{co} = \frac{2f_c}{E_c} \quad (6.5)$$

Modellemede beton malzeme davranışında gerilme-şekil değiştirme eğrisi oluşturulurken hem başlangıç bölgesinden hem de ikinci kısımdan noktalar seçilmesine dikkat edilmiştir. Böylece analizlerde betonun hem lineer hem de lineer olmayan bölgedeki davranışı modellenmiştir.

ANSYS'te beton malzeme multilineer izotropik hardening davranışta modellenerek Hognestad beton modeli ile elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme değerleri modele yansıtılmıştır.

Yük etkisi altında betonarme elemanlarda elastik sınır aşıldığında geri dönüşü olmayan plastik deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu nedenle betonarme elemanların davranışı incelenirken elastik sınırın ötesinde plastik davranışında dikkate alınması gerekir. Plastik deformasyon başlangıcı akma kriterleri ile belirlenmektedir. Bu akma kriterlerinden beton için tercih edilenlerden biri de Von Mises akma kriteridir.

Von Mises akma kriteri

Mühendislik ve malzeme biliminde Von Mises akma kriteri Von-Mises gerilmeleri (σ_v) ile formüle edilmektedir. Von Mises akma kriterine göre ikinci deviatorik gerilme invariantı J_2 kritik k değerine eşit olduğu zaman malzeme akmaya başlar. Von Mises akma fonksiyonu Eş. 6.6 daki gibidir.

$$f(J_2) = \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (6.6)$$

$$f(J_2) = J_2 - k^2 = 0$$

Burada k basit kesme durumunda akma gerilmesidir. Basit kesme durumunda akma başlangıcında kesme gerilmesinin büyüklüğü çekme gerilmesinden $\sqrt{3}$ kat daha düşüktür (Eş. 6.7).

$$k = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (6.7)$$

Von-Mises gerilmesi $\sigma_v = \sqrt{3}k$ olarak tanımlandığında, Von-Mises akma kriteri Eş. 6.8 deki gibi olmaktadır.

$$f(J_2) = \sqrt{3}k - \sigma_y = \sigma_v - \sigma_y = 0 \quad (6.8)$$

ifade gerilmeler cinsinden ise Eş. 6.9 daki gibi olmaktadır.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 6k^2 = 2\sigma_y^2 \quad (6.9)$$

gerilme tansörleri cinsinden yazılması durumunda ise ifade Eş. 6.10 daki

$$(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + 6(\sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2 + \sigma_{12}^2) = 2\sigma_y^2 \quad (6.10)$$

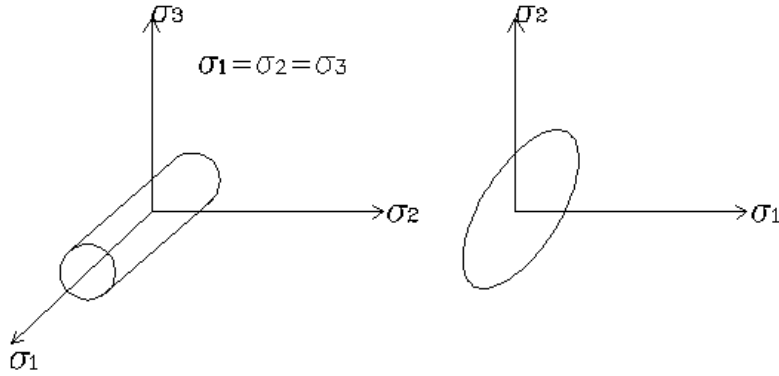
Bu eşitlikle tanımlanan yüzey akma yüzeyi olup dairesel silindir şeklindedir ve deviatorik düzlemde kesişimi yarıçapı $\sqrt{2}k$ ya da $\sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_y$ olan dairedir. Bu da akma koşullarının hidrostatik gerilmeden bağımsız olduğu anlamına gelmektedir.

Düzlem gerilme durumunda ise ifade Eş. 6.11 deki gibi olmaktadır.

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 = 3k^2 = \sigma_y^2 \quad (6.11)$$

Bu eşitlik $\sigma_1 - \sigma_2$ düzleminde elipsi göstermektedir (Şekil 6.7) [21]. Bu eşitliklerin göstermiş oldukları silindirik ve elips şeklindeki yüzeyler akma yüzeyi olup malzeme

gerilmesi bu yüzeylere ulaşmadıkça malzeme davranışı lineer-elastik sınır içinde kalacaktır. Malzeme gerilmesinin sınır değerlere ulaşması durumunda ise malzemede akma başlayacaktır. Bu yüzeylerin dışında ise malzeme plastik davranış gösterecek ve yük etkisinde bünyesinde meydana gelen deformasyonlar kalıcı olacaktır.



Şekil 6.7. Von-Mises akma yüzeyleri

Yapı elemanları ömürleri boyunca çeşitli yük etkilerine maruz oldukları için çok yönlü gerilmeler altındadırlar. Bu nedenle betonun modellenmesinde de çok yönlü gerilmeler altındaki malzeme davranışının dikkate alınması gerekmektedir. Betonun üç yönlü gerilme altındaki davranışı William-Warnke tarafından açıklanmıştır [22]. ANSYS'te beton malzemenin modellenmesinde de William-Warnke tarafından geliştirilmiş model kullanılmaktadır.

Uzayda herhangi bir noktadaki gerilme bileşenleri hidrostatik ve deviatorik olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Hidrostatik gerilme durumunda gerilmeler (Eş. 6.12) ve ortalama gerilmede (Eş. 6.13) deki gibi olmaktadır.

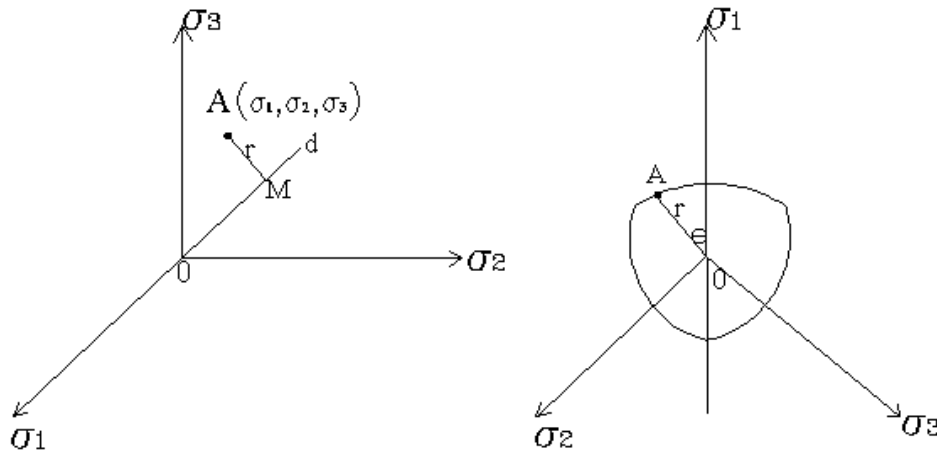
$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \quad \text{ve} \quad \tau = 0 \quad (6.12)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3} [\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3] \quad (6.13)$$

Deviatorik gerilmeler ise gerilme tansöründen hidrostatik gerilmelerin çıkarılmasıyla elde edilmekte ve bunun sonucu olarak da normal ve kayma gerilmeleri bileşenlerinden oluşmaktadır.

William-Warnke modelinde betonun göçme yüzeyi hidrostatik eksen ve deviatorik düzlemlerle açıklanmaktadır. σ_1 , σ_2 , σ_3 gerilmelerinin eksenleri oluşturduğu bir koordinat sisteminde her üç gerilmenin birbirine eşit olduğu eksen hidrostatik eksen, bu eksene dik düzlemde deviatorik düzlem olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 6.8’de görüldüğü gibi hidrostatik eksen d diagonalı ile gösterilmek üzere herhangi bir A noktasının yeri hidrostatik eksen üzerinde OM uzunluğu ile deviatorik eksen üzerinde ise r uzunluğu ve θ açıları ile belirtilmektedir [22].



Şekil 6.8. Bir A noktasının yeri

Ansys’te William-Warnke göçme kriterinin modele yansıtılması mevcut parametreler ile gerçekleştirilmektedir. Çalışmada bu parametrelerin dikkate alınmasıyla betonun çok yönlü gerilme altındaki davranışı da modellenmiştir. Concrete alt menüsü altında betonla ilgili parametreler şu şekilde sıralanabilmektedir:

ShrCf-Op: Açık çatlaklar için kesme transfer katsayısıdır. Bu değer “0 ile 1” arasında değişmekte olup “0” olması çatlakta hiç kesme tansferinin olmadığını “1” olması ise

çatlağın iki yüzü arasında kesmenin tamamem aktarıldığını göstermektir. Çalışmada bu değer “1” kabul edilmiştir.

ShrCf-Cl: Kapalı çatlaklar için kesme transfer katsayısıdır. Bu değer “0 ile 1” arasında değişmekte olup “0” olması çatlakta hiç kesme transferinin olmadığını “1” olması ise çatlağın iki yüzü arasında kesmenin tamamem aktarıldığını göstermektir. Çalışmada bu değer “1” kabul edilmiştir.

UnTenSt: Tek eksenli çekme dayanımıdır. “-1” kabul edilmesi durumunda çatlama ihmal edilmiş olur.

UnCompSt: Tek eksenli basınç dayanımıdır. “-1” kabul edilmesi durumunda betondaki ezilmeler ihmal edilmiş olur. Çalışmada bu değer “-1” kabul edilerek ezilmeler ihmal edilmiştir.

BiCompSt: İki eksenli basınç dayanımıdır. ANSYS bünyesinde tanımlandığından ayrıca değer girilmez, “0” kabul edilir.

HydroPrs: Hidrostatik gerilme durumudur.

BiCompSt: Hidrostatik gerilme durumunda iki eksenli basınç dayanımıdır.

UnTenSt: Hidrostatik gerilme durumunda tek eksenli çekme dayanımıdır.

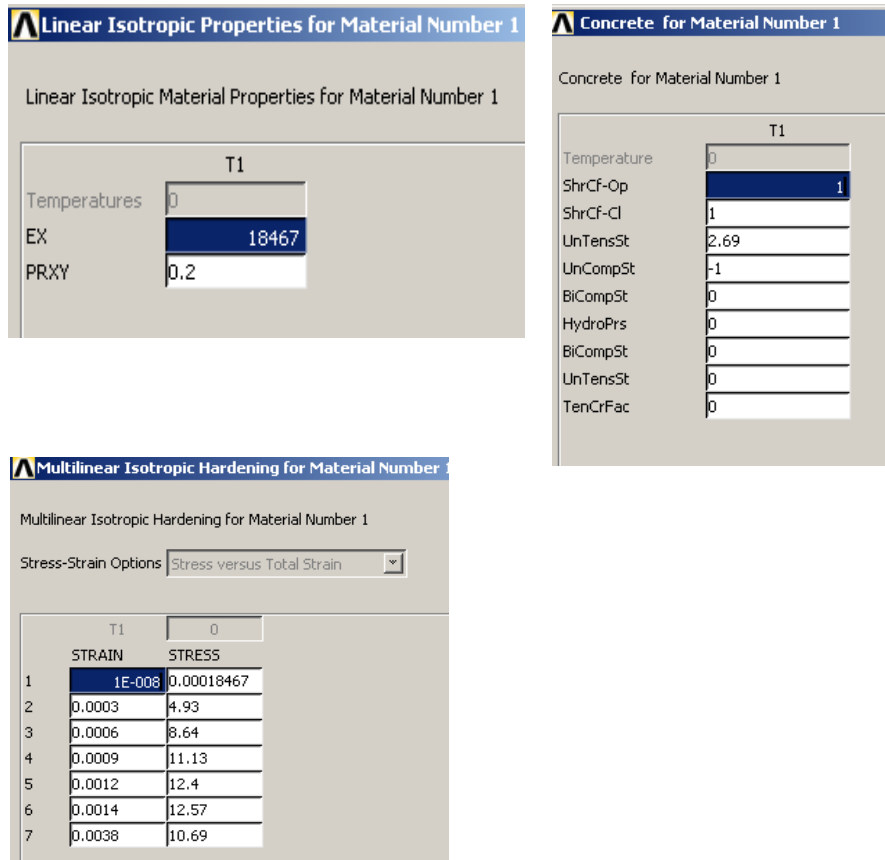
ShrCf-Op, *ShrCf-Cl*, *UnTenSt*, *UnCompSt* katsayıları girildiğinde *BiCompSt*, *HydroPrs*, *BiCompSt*, *UnTenSt* ANSYS bünyesinde oluşturulduğu için bu değerler ayrıca girilmez [15].

Poisson oranı

Enine yerdeğiştirmenin boyuna yerdeğiştirmeye oranı olarak bilinen poisson oranı beton için TS500 de 0,20 kabul edilmektedir. Çalışmada bu değer alınarak kirişler

modellenmiştir. Donatı çeliğinde ise bu değer biraz büyük tutularak 0,3 kabul edilmiştir.

ANSYS'te malzeme modelleri oluşturulurken beton malzeme 1, çelik malzeme 2 ve CFRP şeritleri ise malzeme 3 olarak adlandırılmıştır. Beton malzeme özellikleri Şekil 6.9 da görüldüğü gibi ANSYS modelinde kullanılmıştır.

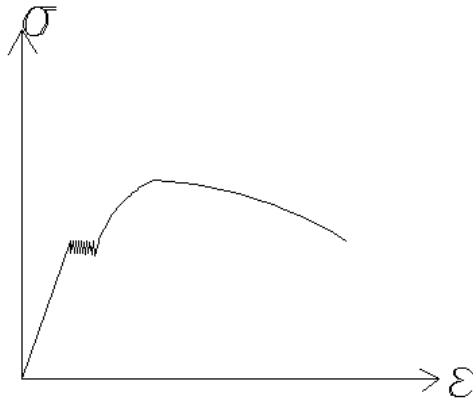


Şekil 6.9. Ansys'te beton malzeme özellikleri (kiriş4)

Donatı malzeme davranışı

Çelik hem çekme hem de basınç altında benzer davranış gösteren bir malzemedir. Çekme dayanımının yüksek olması nedeniyle betonarme yapılarda çekme gerilmelerinin karşılanması için kullanılmaktadır. Çeliğin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi incelendiğinde üç belirgin kısım görülmektedir. Eğrinin ilk kısmında malzeme lineer-elastik özelliktedir. Yani numune üzerine uygulanan yük

arttırıldıkça gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler doğru orantılı olarak değişmektedir. Ayrıca uygulanan yüklerin kaldırılmasıyla gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler ortadan kalkmakta ve başlangıç şartlarına geri dönülmektedir. Bu değişim belirli bir sınıra kadar devam etmektedir. Bu sınır akma sınırıdır. Bu sınırdan itibaren ise uygulanan yük artırılrsa da çelikteki gerilmeler değişmemekte, birim şekil değiştirmeler ise artmaya devam etmektedir. Bu bölge de akma sahanlığı olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgeden sonra pekleşme başlamakta ve pekleşme sınırına ulaşıldığında gerilme yeniden artmaya başlayarak, belirli bir değerde numune kesitinin küçülmesiyle kopma gerçekleşmektedir (Şekil 6.10) [13].



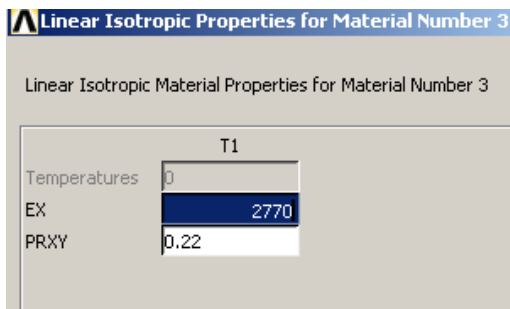
Şekil 6.10. Donatı için tipik gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi

Kirişlerin modellemesi yapılırken kirişte kullanılan betonarme donatısı lineer-elastik malzeme olarak tanımlanmış, elastisite modülü, akma dayanımı ve poisson oranı değerleri girilerek malzeme modellenmiştir.

CFRP malzeme davranışı

Yapı elemanlarının onarım ve güçlendirilmesinde en çok tercih edilen FRP kompozitlerinden biri CFRP'dir. CFRP poliestere reçine içine gömülmüş 5-10 mikrometre çapında çok ince karbon elyaflardan oluşmaktadır [9]. CFRP malzemesinin en önemli özelliği yüksek çekme dayanımına sahip olmasıdır. Ancak CFRP malzemesi anizotropik bir malzemedir. Yani liflerin düzenlenme doğrultusuna göre özellikleri değişmektedir.

Deneysel çalışmada kirişlerin güçlendirilmesinde 0,10 mm kalınlığında CFRP şeritleri kullanılmıştır. Ancak ANSYS'te birbirine bağlanan elemanların boyutlarıyla ilgili bir kısıtlama getirildiğinden CFRP şeritlerinin kalınlıkları modellemede 10 mm olarak alınmıştır ve kalınlıkta yapılan bu değişim aynı oranda elastisite modülüne de yansıtılarak elastisite modülü düşürülmüştür. Modellemede CFRP şeritleri lineer-elastik malzeme olarak kabul edilmiştir (Şekil 6.11).



Şekil 6.11. Ansys'te cfrp malzeme özellikleri

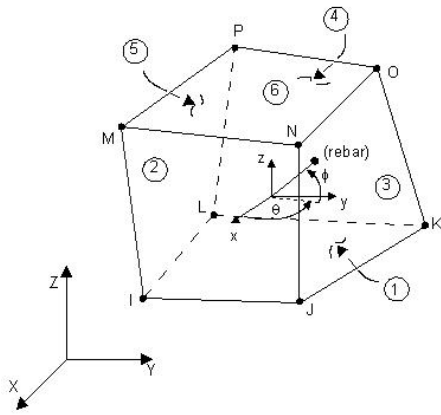
6.2.3. Eleman seçimi

ANSYS eleman kütüphanesinde 150'den fazla eleman çeşidi mevcut olup bunlar kontak, kabuk, plak, kiriş, çubuk elemanları gibi sıralanabilmektedir. ANSYS'te beton malzemenin modellenmesi için ise sadece Solid65 elemanı mevcuttur. Literatürdeki çalışmalarının hemen hemen hepsinde de beton malzemenin modellenmesi bu elemanla yapılmıştır. Çalışmada donatı beton eleman içinde dağılı olarak kabul edilmiş, donatı için ayrıca bir eleman tipi atanmamıştır. CFRP malzemesinin modellenmesinde ise Solid46 elemanı kullanılmıştır. Yüklemin uygulandığı bölgede yük artışı nedeniyle gerilme artışlarının ve yerel çatlakların oluşmasını engellemek için yükleme tek noktadan yapılmamış, bir yükleme plakası modellenmiştir. Bu plaka için ise Solid45 elemanı kullanılmıştır.

Modelde kullanılan eleman tiplerinin tanıtımı

Solid65 elemanı

Solid65 elemanı, betonun üç boyutlu modellenmesinde kullanılan, çekmede çatlama basınçta da ezilme yapabilen, her düğüm noktasında üç yönde serbestliğe sahip 8 düğüm noktalı bir elemandır (Şekil 6.12).



Şekil 6.12. Ansys'te beton modellemesi için kullanılan eleman tipi (Solid65)

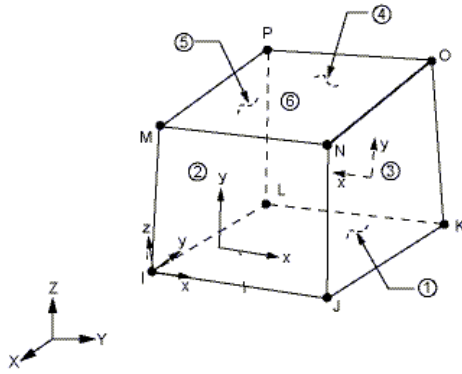
Bu eleman ile betonun hem donatılı hem de donatısız modellemesi yapılmaktadır. Elemanın en önemli özelliklerinden biri nonlinear malzeme davranışına sahip olmasıdır. Böylece betonun üç ortogonal yönde çatlama, ezilme, plastik deformasyon ve sünme davranışları ile donatının da basınç ve çekme altındaki davranışları, plastik deformasyonu ve sünme davranışı modellenebilmektedir. Şekil 6.12'de Solid65 elemanının geometrisi, düğüm noktaları ve koordinat sistemi görülmektedir. θ ve ϕ açıları eleman içinde donatının tanımlanması durumunda bu donatının x ve y eksenleri ile yapmış olduğu açıları göstermektedir. Solid65 elemanı izotropik malzeme özelliğinde tanımlanmaktadır [15]. Fanning (2001) şöyle demektedir [2].

“Eleman çekme ve basınç dayanımlarını aşana kadar lineer-elastik davranmakta, çatlama ya da ezilme başladığı anda elemanın integrasyon noktalarında ana gerilmeler çekme ve basınç dayanımına ulaşmaktadır. Çatlama ya da ezilme bölgesinde karşılıklı gelişen ayırık çatlaklar ana gerilmenin yönüne dik olacak şekilde

gelişmekte ve yerel olarak yayılmaktadır. Böylece eleman nonlinear hale gelip iterative çözüm gerekmektedir”.

Solid45 elemanı

Solid45 elemanı her düğüm noktasında üç yönde serbestliğe sahip sekiz düğüm noktalı, plastisite, sünme, rötne, büyük deplasman ve dönme yapabilen bir elemandır (Şekil 6.13).



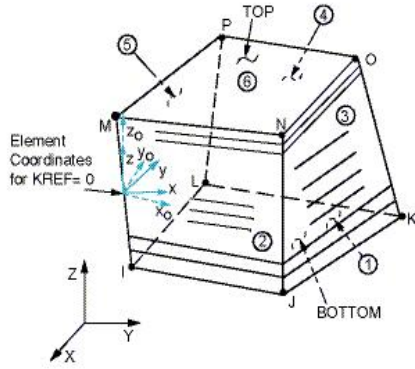
Şekil 6.13. Ansys’te çelik yükleme plakası için kullanılan eleman tipi(Solid45)

Üç boyutlu katıların modellenmesinde kullanılmaktadır [15]. Daha önceki yıllarda yapılan çalışmalarda betonun modellenmesi için de kullanılmış olmasına rağmen Solid65 elemanı gibi ezilme ve çatlama özelliklerine sahip değildir. Çalışma kapsamında kirişlerde yükleme sırasında oluşabilecek yerel gerilme yığılmalarını ve çatlakları önlemek için yükleme plakası oluşturulmuş ve bu yükleme plakası da Solid45 elemanı ile modellenmiştir.

Solid46 elemanı

Solid46 elemanı üç boyutlu, sekiz düğüm noktalı her düğüm noktasında x, y, z doğrultularında üç serbestliğe sahip olan bir elemandır (Şekil 6.14). Kalın kabukların ya da katıların modellenmesinde kullanılmaktadır. Bu elemanla 250 farklı tabakadan oluşan bir katının modellenmesi yapılabilmektedir. Bu eleman çalışma kapsamında CFRP şeritlerinin modellenmesi için kullanılmıştır. Modellemede CFRP şeritleri tek

tabakalı kabul edilmiştir. Solid46 elemanı ortotropik malzeme özelliğinde tanımlanmaktadır [15].



Şekil.6.14. Ansys'te cfrp şeritleri için kullanılan eleman tipi(Solid46)

6.2.4. Modelin sonlu eleman ağının oluşturulması

Bir tanım aralığını kendinden daha küçük tanım aralıklarına bölme işlemine mesh etme ya da ağ oluşturma denilmektedir. Sonlu elemanlar yönteminde çözümü yapılacak olan yapı elemanları elemanın geometrisine uygun şekilde daha küçük elemanlara bölünmektedir. Ağ oluşturma işleminde dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri ağ yoğunluğunun belirlenmesidir. Ağ yoğunluğunun yüksek tutulması analiz süresinin gereğinden fazla uzamasına ve bilgisayar kapasitesinin zorlanmasına sebep olmaktadır. Düşük tutulması ise istenilen yük düzeyine ulaşılamamasına neden olabilmektedir. Ayrıca geometri ve yüklemenin değiştiği bölgelerde mesh yoğunluğunun artırılması sonuçların hassasiyeti açısından önemlidir. Mesh işlemi gerçekleştirilirken dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise mesh sonucu oluşan elemanların boyutları arasında uyum olması gereğidir. Yani eleman boyutları arasındaki fark çok fazla olmamalıdır [15]. Boyutlar arasındaki farkın fazla olması yakınsama sorunlarına neden olabileceği için 0,10 mm kalınlığındaki CFRP şeritleri modellemede 10 mm olarak alınmış ve kalınlığında yapılan bu değişim kadar rijitliği de azaltılmıştır.

ANSYS paket programında ağ oluşturma işlemi serbest mesh (free mesh) ve düzgün mesh (mapped mesh) olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Serbest mesh, eleman

şekliyle kısıtlı olmayıp modele özgü uygulanma şekli yoktur. Düzgün mesh ise eleman tipiyle sınırlıdır. Düzgün mesh düzenli bir modele sahip olup eleman sütunları açıkça görülmektedir [15].

ANSYS'te beton için önerilen Solid65 elemanının geometrisi gereği bu elemanın kullanılması durumunda sadece düzgün mesh yapılabilir. Çalışma kapsamında kirişler modellenirken Solid65 elemanının bu özelliği dikkate alınarak başlangıçta mesh yoğunluğu büyük tutulmuş eleman kalınlıkları 25 mm olacak şekilde mesh işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylece 25x20x25mm, 20x20x25mm, 10x20x25mm boyutlarındaki elemanlar ile 5600 elemanlı bir ağ oluşturulmuştur. Ancak yapılan analiz çalışmalarında istenilen yük seviyesine ulaşılamaması ve ayrıca bazı modellerde cfrp şeritlerinin düzenlenme yerlerinin tam olarak belirtilmesi için eleman kalınlığı 10 mm olacak şekilde mesh yoğunluğu artırılmıştır. Sonuçta eleman sayısı 5600 ile 18000 arasında değişen kiriş modelleri oluşturulmuştur.

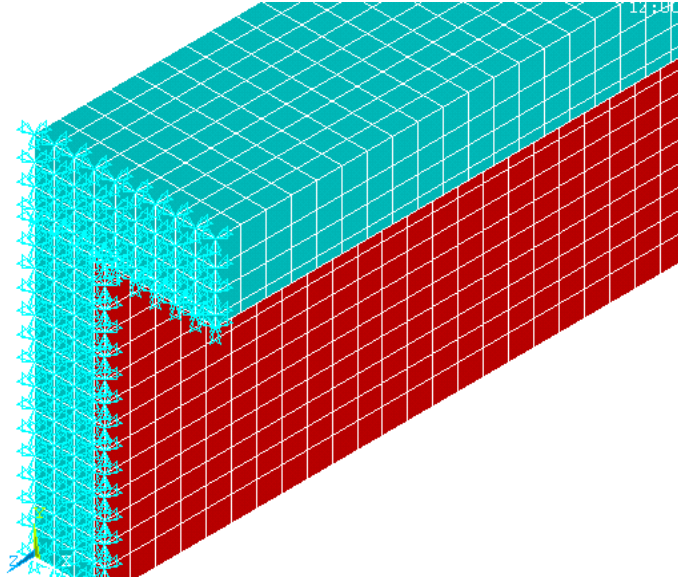
6.2.5. Sınır şartların düzenlenmesi

Deneyisel çalışmada kirişler bir uçlarından rijit duvara ankastre olarak mesnetlenmiş, boşta kalan diğer uçlarından ise kademeli olarak artırılan yüke maruz bırakılmışlardır. Kiriş modelleri oluşturulurken bu sınır şartlar göz önüne alınarak kirişlerin bir ucu ankastre mesnet olacak şekilde bu uçtaki düğüm noktaları tüm ortogonal yönlerdeki deplasman ve dönmeleri tutulu hale getirilmiştir (Şekil 6.15). Ayrıca kirişler geometrik açıdan simetrik olduklarından, kirişlerin yarısı modellenmiş ve modelin simetri eksenini tanımlamak için bu eksenenden geçen düğüm noktaları x yönündeki deplasmanları tutulmuş, sadece y yönünde deplasman yapmaları sağlanmıştır.

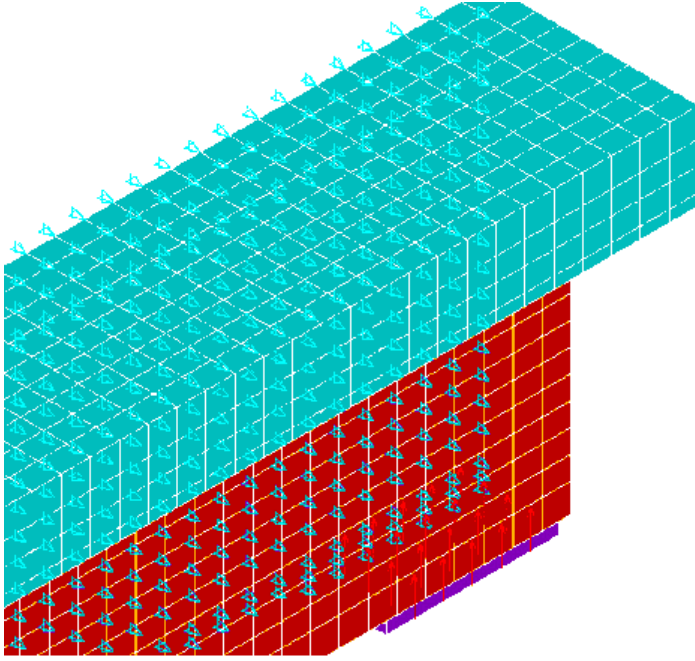
6.2.6. Yükleme ve analiz

Yükleme

Deneysel çalışmada rijit duvara bir ucundan ankastre olarak mesnetlenmiş kirişlere boşta kalan diğer uçlarından yük uygulanmıştır. Modellemede de deneysel çalışmaya benzer şekilde kirişlerin boşta kalan uçlarından yük uygulanarak kiriş davranışları gözlemlenmiştir (Şekil 6.16). Ancak modellemede yük tek bir noktadan değilde birçok noktadan tekil yük olarak kirişe etki ettirilmiştir. Böylece yükün uygulandığı bölgelerde yerel gerilme artışları nedeniyle oluşabilecek çatlaklar ve yerel göçmeler engellenmiştir. Düğüm noktası sayıları 4, 16, 20, 24, 28 ve 64 olmak üzere değişik kombinasyonlarda analiz yaptırılmıştır.



Şekil.6.15. Mesh edilmiş ve mesnet koşulları oluşturulmuş kiriş modeli (kiriş 4)



Şekil 6.16. Yük uygulanmış kiriş modeli (kiriş 5)

Analiz

ANSYS'te analiz çeşitleri

ANSYS ile yapısal, termal, akışkan ve elektromanyetik olmak üzere çeşitli analizlerin yapılması mümkündür. ANSYS'te yapısal analiz 7 kısımda incelenmektedir. Bu analizler şu şekilde sıralanabilmektedir.

Statik analiz: Statik yük durumları altında gerilme ve yer değiştirmeler hesaplanmaktadır. Hem lineer hem de nonlineer analiz yapılmaktadır.

Modal analizi: Yapı ya da makine elemanlarının titreşim karakterlerini hesaplamak için kullanılmaktadır.

Harmonik analiz: Yapının farklı zaman-yük durumunda harmonik davranışı hesaplanmaktadır.

Geçici dinamik analiz: Yapının istenilen süre-değişen yük durumunda davranışı hesaplanmaktadır.

Spektrum analizi: Deprem yükü, rüzgar yükü, okyanus dalgaları, roket motor titreşimi gibi zamana bağlı yükler altında yapı davranışının incelenmesinde time history analizi yerine kullanılmaktadır.

Burkulma analizi: Burkulma yükünü ve burkulma mode shape hesaplamak için kullanılmaktadır. Hem lineer hem de nonlinear burkulma analizi yapılmaktadır.

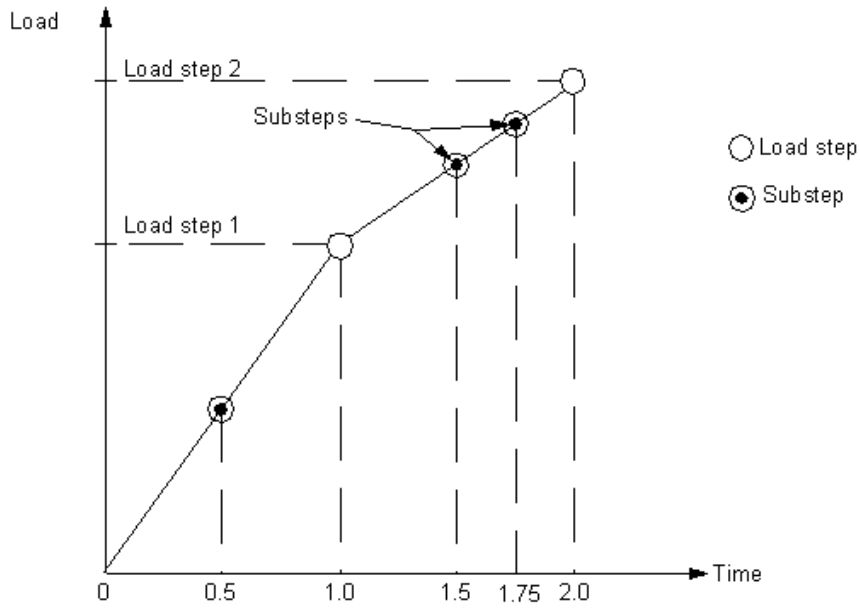
Explicit Dinamik analiz: Kompleks kontak problemleri ve büyük dinamik deformasyonların hızlı bir şekilde çözümü yapılmaktadır [15].

Analiz yönteminin tespiti

Betonarme yapılara etkiyen dış yükler zamanla işletme yükünü aştıklarında yapıda oluşan yerdeğiştirmeler ihmal edilemeyecek değerler almakta ve çatlak oluşumundan itibaren göçme anına kadar davranışın giderek artan nonlinear davranış olduğu gözlemlenmektedir [14]. Ayrıca beton heterojen ve anizotrop bir malzeme olup özellikleri zamana bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeplerle bir betonarme yapının sonlu elemanları esas alan bir program ile analizinde gerçek davranışa en yakın sonuçları elde etmek için doğrusal olmayan analiz ile çözümün yapılması gerekmektedir.

Nonlinear analiz

Nonlinear analiz yöntemlerinde yük adım adım elemana etkittirilip her adım bir önceki adımın sonuçları gözönüne alınarak işleme devam edilmekte ve böylece başlangıçtan göçme anına kadar yapı elemanının yük-yerdeğiştirme grafiği çizilmektedir [23].



Şekil 6.17. Ansys'te nonlinear analiz adımları [15]

ANSYS ile nonlinear analiz yaptırılırken load step, substep ve time gibi bilinmesi gereken bazı kavramlar vardır. Şekilde de görüldüğü gibi load stepler modele uygulanan yük adımları, substepler ise bu yük adımları altındaki daha küçük yük artırımlarıdır. Time kavramı ise statik analizde load step ve substep adımları kontörleri için kullanılmaktadır. Modelin kompleksliğine bağlı olarak yükleme sonucunda malzeme davranışını daha iyi gözlemleyebilmek ve yük-yer değiştirme eğrisindeki akma noktası, elastiklik sınırı gibi önemli noktaları gözlemleyebilmek için bu değerlerin mümkün olduğunca büyük tutulması gerekir.

Model geometrisi ve yükleme koşullarına göre analiz için bir load step (yük adımı) sayısı belirlendikten sonra elemana uygulanacak yük bu sayıya bölünür. Yine model ve yükleme koşullarına göre tespit edilmiş olan substep değeri de solution control menüsünden girildiğinde; yük modele load step sayısı kadar, adım adım uygulanırken her adımda substep sayısı kadar basamakta modele bu yük uygulanmaktadır (Şekil 6.17).

Çalışmada başlangıçta yük adımı sayısı (load step) 5, yük artımı sayısı (substep) ise 7 alınmıştır. Ancak yukarıda da bahsedildiği gibi malzeme davranışının iyi gözlemlenememiş olması nedeniyle daha sonraki analizlerde yük artımı sayısı (substep) 10 alınmıştır. Yük adımı sayısı ise (load step) modelin kompleksliğine bağlı olarak bazı kirişlerde 45 ,bazı kirişlerde ise 65 e kadar yükseltilerek değişik değerlerde kullanılmıştır.

Newton-Raphson yöntemi

ANSYS'te nonlinear analiz için Newton-Raphson yöntemi dikkate alınmaktadır. Newton-Raphson yönteminde elemana uygulanan yük, yük adımlarına bölünmektedir. Bu yük adımları da yük artımlarından oluşmaktadır. Analizler yakınsama sağlanana kadar devam etmektedir. Her bir çözümün yakınsama kriteri ise dengelenmemiş yük vektörüne göre yapılmaktadır. Dengelenmemiş yük vektörü, uygulanan yük ile elemanların gerilmeleri toplamı sonucunda elde edilen yük vektörünün farkıdır. Program bu vektörü kullanarak çözüm yapmaktadır. Yakınsama olmaması durumunda bu vektör yeniden hesaplanmakta, rijitlik matrisi güncellenerek yeni çözümler elde edilmektedir [15].

Yakınsama kriteri

ANSYS ile yapılan analizlerde iterasyonlar yakınsama sağlanana kadar devam etmektedir. Yakınsama değeri ise ANSYS'te TOLER*VALUE ile ifade edilmektedir. TOLER değeri hemen hemen bütün analizlerde kuvvet ve moment için %0.5 olarak alınmakta, dönmelerin dikkate alınması durumunda ise bu değere ek olarak yerdeğiştirmeler için de %5 değeri kabul edilmektedir. VALUE değeri ise dengelenmemiş kuvvetlerin karelerinin karekökleri toplamı ile bulunmaktadır [15]. Önceden yapılmış çalışmalarda [24] kuvvet ve moment için yakınsama kriteri analizlerde yakınsama problemlerine neden olduğundan bu çalışmada sadece yerdeğiştirme için yakınsama kriteri kullanılmıştır.

7. ANALİZ SONUÇLARI İLE DENEYSEL ÇALIŞMANIN KARŞILAŞTIRILMASI

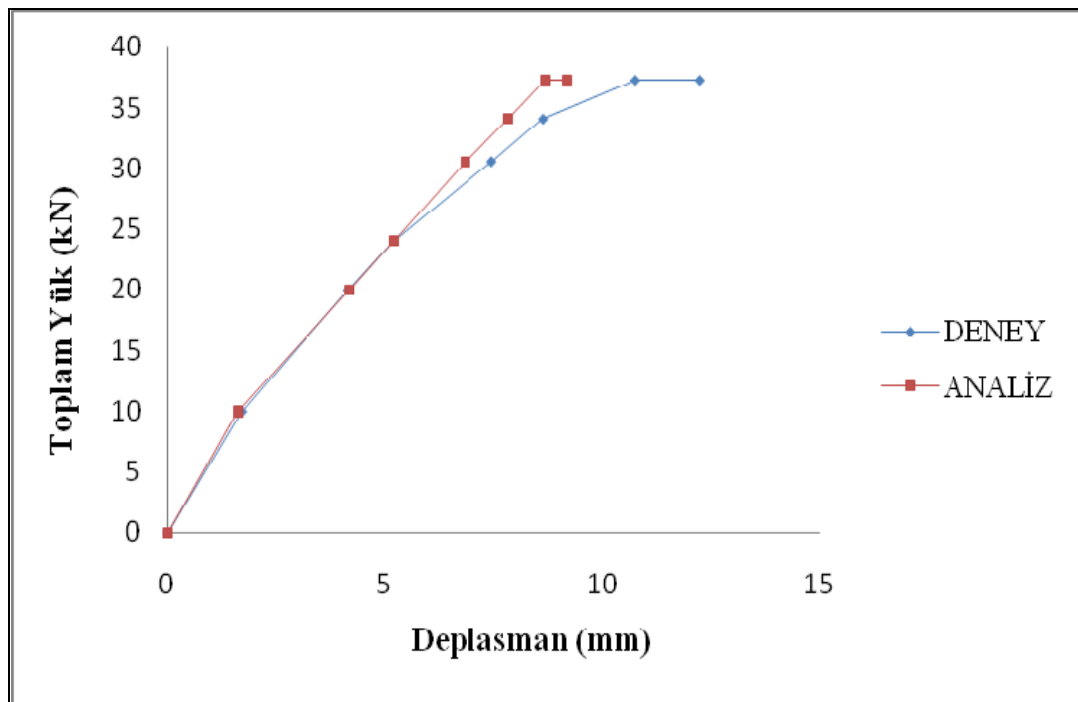
CFRP şeritleri ile kesmeye karşı güçlendirilmiş T kesitli düşük dayanımlı kirişlerin sonlu eleman modellemesi ve deneysel sonuçlarını karşılaştırmadan önce analizlerde yapılan kabuller kısaca aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

1. Beton malzeme modellenirken elastik, plastik davranışı ve aynı zamanda göçme anındaki malzeme davranışı modellenmiştir. Betonda hiç ezilme olmadığı kabulü yapılmıştır.
2. Donatı malzemesi çalışma kapsamında sadece akma gerilmesi ayrıca akma ve kopma gerilmeleri dikkate alınarak modellenmiştir.
3. CFRP malzemesi lineer-elastik malzeme özelliğinde modellenmiştir.
4. Eleman seçiminde beton için Solid 65 elemanı kullanılmıştır. Analizlerde yükleme sırasında temasa geçecek yüzeylerin tespitinin zor olması ve ek bir işlem hacmi gerektirmesi nedeniyle donatı için ayrı bir eleman tipi tanımlanmayıp beton içinde dağılı kabul edilmiştir. CFRP plakalarının modellenmesinde Solid46, yükleme plakasının modellenmesinde ise Solid45 elemanları kullanılmıştır.
5. Beton-donatı ile beton-CFRP arasında kayma olmadığı tam aderans olduğu (full bonding) kabul edilmiştir.
6. Kirişlerin geometrik simetri özelliklerinden yararlanılarak yarısi modellenmiştir.
7. Mesh yoğunluğu sonlu elemanlar yönteminde analiz sonuçlarının hassaslığı açısından önemli noktalardan biridir. Bu nedenle uygun mesh yoğunluğunu belirlemek için eleman derinlikleri 10 mm ve 25 mm olmak üzere iki farklı mesh aralığında modelleme yapılmıştır. Güçlendirilen kirişlerdeki CFRP düzenlemeleri de dikkate alındığında mesh yoğunluğu bakımından 5600 ile 18000 eleman arasında

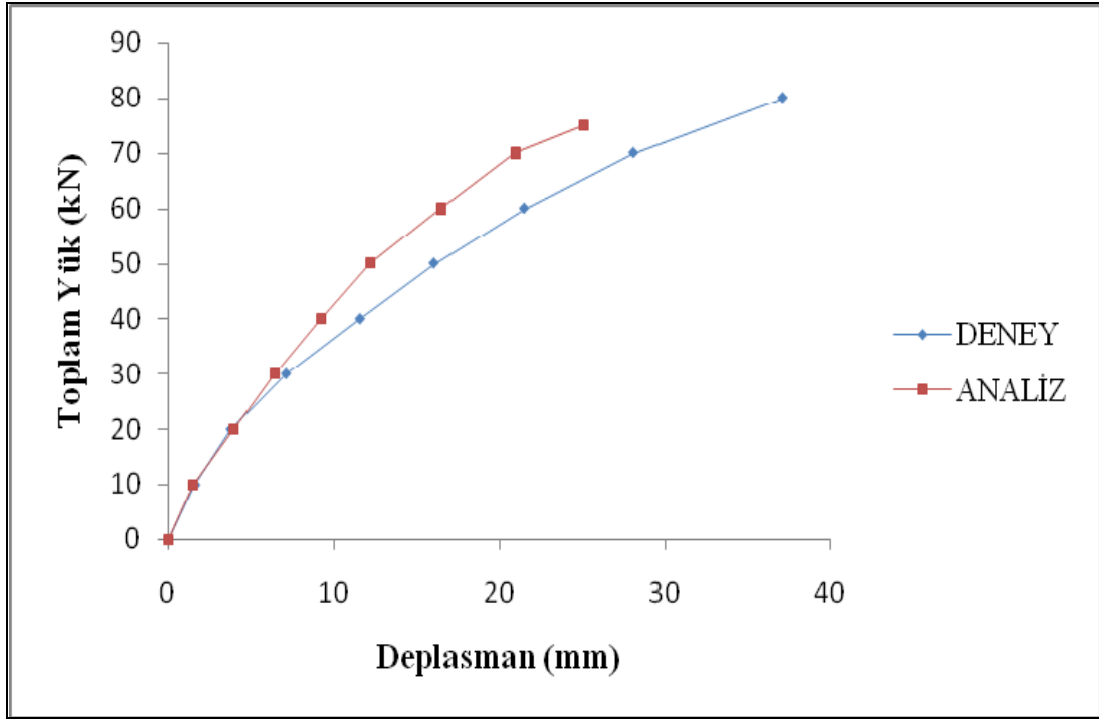
değişen modeller oluşturulmuştur. Kiriş 1, Kiriş 4 ve Kiriş 5’de yapılan analizler sonucunda 25 mm ile 10 mm’lik mesh yoğunluklu modellerde deplasman ve yük değerlerinden çok büyük farkın olmaması nedeniyle işlem hacmini ve bilgisayar kapasitesini zorlamamak için 25 mm’lik mesh yoğunluklu modeller uygun görülmüştür. Ancak kiriş 2, kiriş 3, kiriş 6 ve kiriş 7’deki CFRP şeritlerinin genişliği ve düzenlenme durumları nedeniyle düğüm noktalarının çakışmama ve yakınsama problemlerinin önüne geçilmesi için 10 mm’lik mesh yoğunluklu modeller kullanılmıştır.

8. Analizi yapılan kirişlerden ilk beş kiriş ANSYS sonlu eleman yazılımı kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modelinin deneysel çalışma ile doğruluğunu göstermek amacıyla, kiriş 6 ve kiriş 7 ise farklı CFRP aralığında kirişlerin yük-deplasman davranışının incelenmesi ve göçme yükünün tespiti için yapılmıştır.

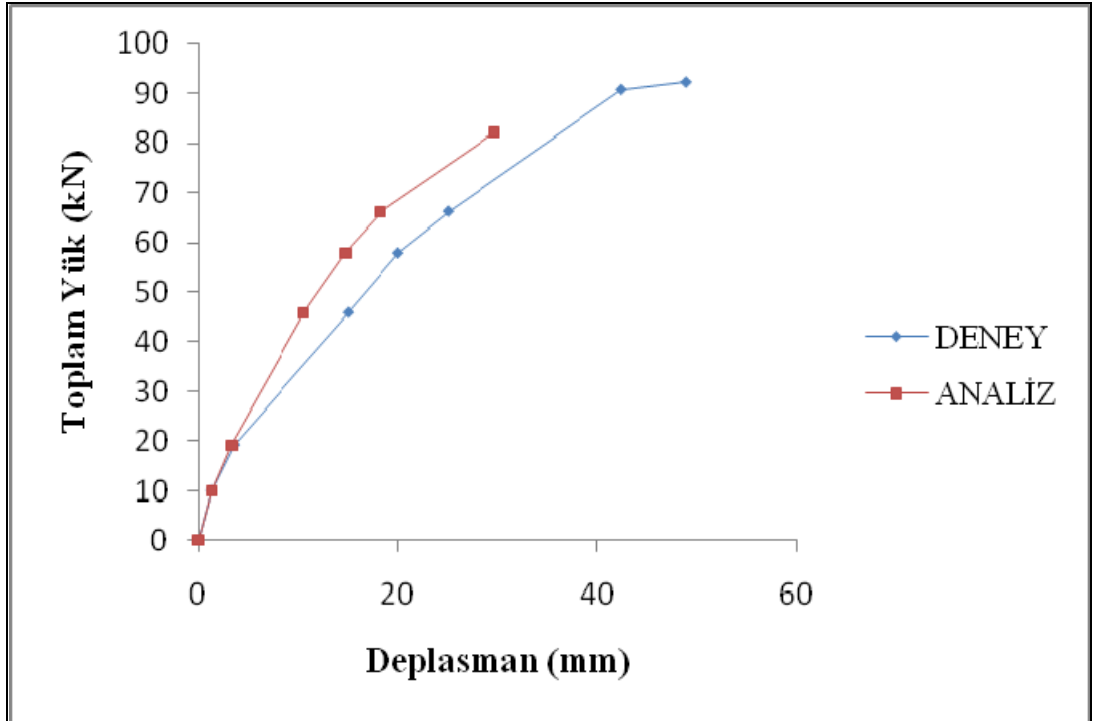
Analizleri yapılan kirişler için analiz ve deney sonuçlarının karşılaştırıldığı yük-deplasman grafikleri Şekil 7.1, Şekil 7.2, Şekil 7.3, Şekil 7.4, Şekil 7.5’te görülmektedir.



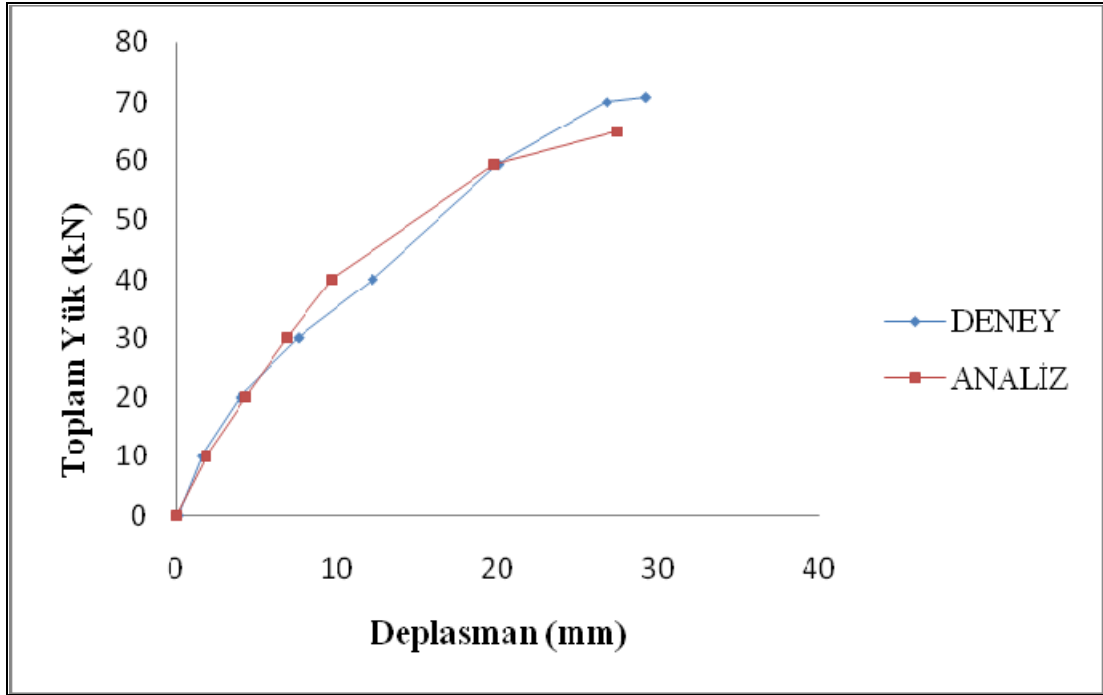
Şekil 7.1. Kiriş 1 için yük-deplasman grafikleri



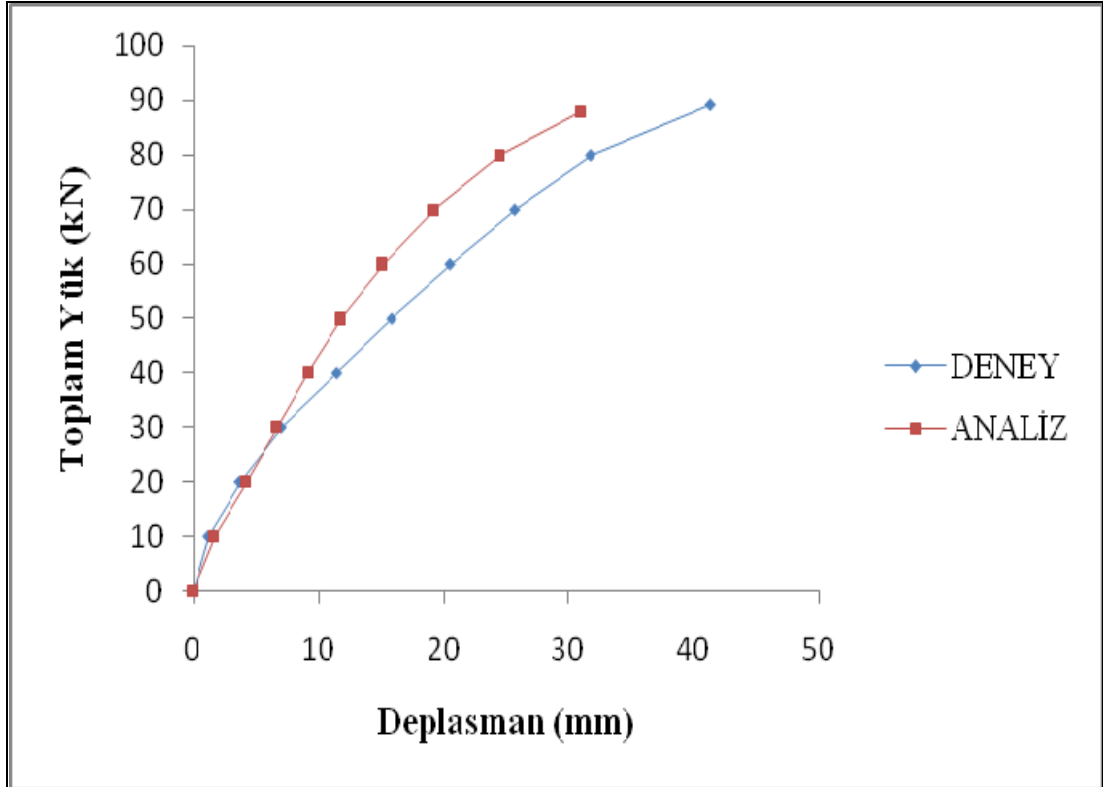
Şekil 7.2. Kiriş 2 için yük-deplasman grafikleri



Şekil 7.3. Kiriş 3 için yük-deplasman grafikleri



Şekil 7.4. Kiriş 4 için yük-deplasman grafikleri



Şekil 7.5. Kiriş 5 için yük-deplasman grafikleri

Şekil 7.1.'de görüldüğü gibi kontrol amaçlı olarak üretilmiş ve hiçbir güçlendirme yapılmamış olan kiriş 1'de yük-deplasman eğrisi göçme yüküne ulaşmaya kadar deneysel çalışmayla hemen hemen aynı eğimde devam etmiştir. Diğer kirişlerde ise yük-deplasman eğrilerinin başlangıç eğimleri deneysel çalışma ile yakın sonuçlar verse de yükün artımıyla birlikte göçme yüküne yaklaştıkça farklılık daha da artmıştır.

Bütün analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında %1-12 arasında değişen farkla göçme yükü değerleri elde edilmiştir. Bu yaklaşıklıkta sonlu elemanlar metodu için uygun bir sonuçtur. Analiz ve deneysel çalışma sonuçları göçme yükleri açısından Çizelge 7.1'deki gibidir.

Çizelge 7.1. Göçme yüklerinin karşılaştırılması

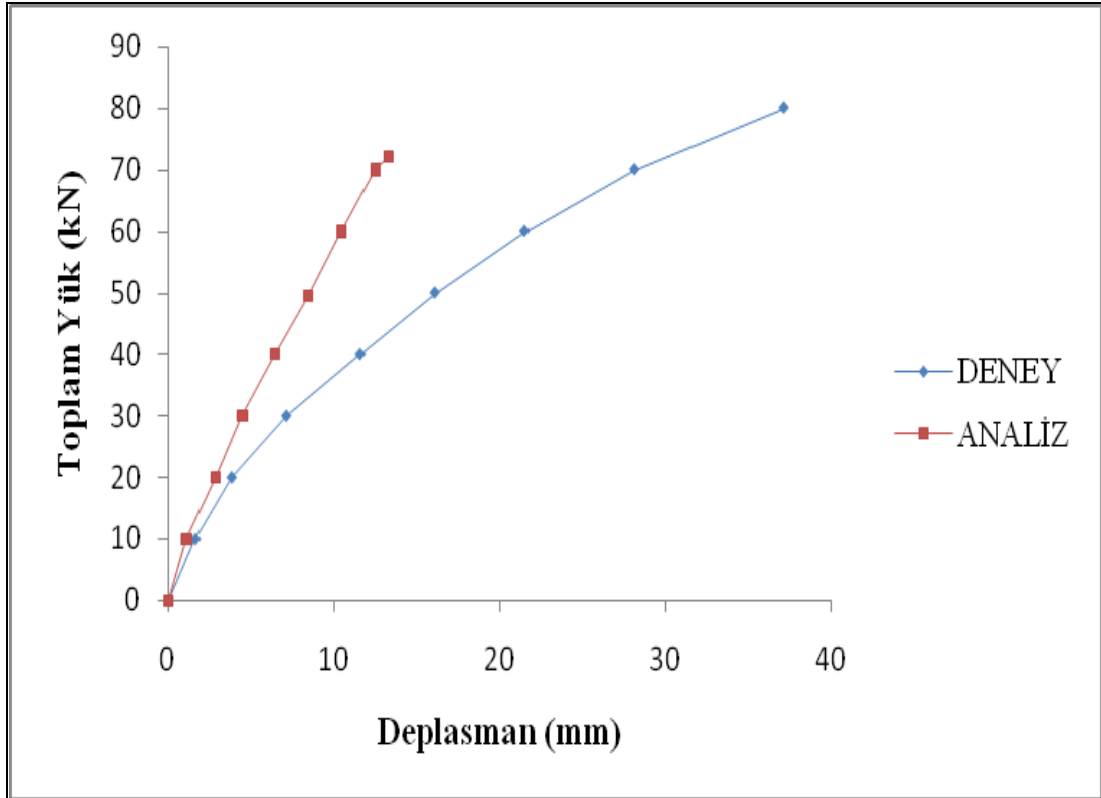
Kiriş No	Deneysel Göçme Yükü(kN)	Analiz Göçme Yükü (kN)	% Fark
Kiriş1	37.3	37.3	-
Kiriş2	80	75	6
Kiriş3	82.2	92.3	12
Kiriş4	64.8	70.8	8
Kiriş5	88	89.3	1
Kiriş6	-	72.1	-
Kiriş7	-	61.2	-

Ancak deplasman açısından analizler ile deneysel çalışma karşılaştırıldığında farkın göçme yüklerinde olduğu gibi kabul edilebilir sınırlardan fazla olduğu görülmektedir. Davranıştaki bu farklılaşma betonda artan çatlaklar sonucunda ANSYS'in beton için kabul ettiği çatlak modelinin davranışı tam olarak yansıtamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

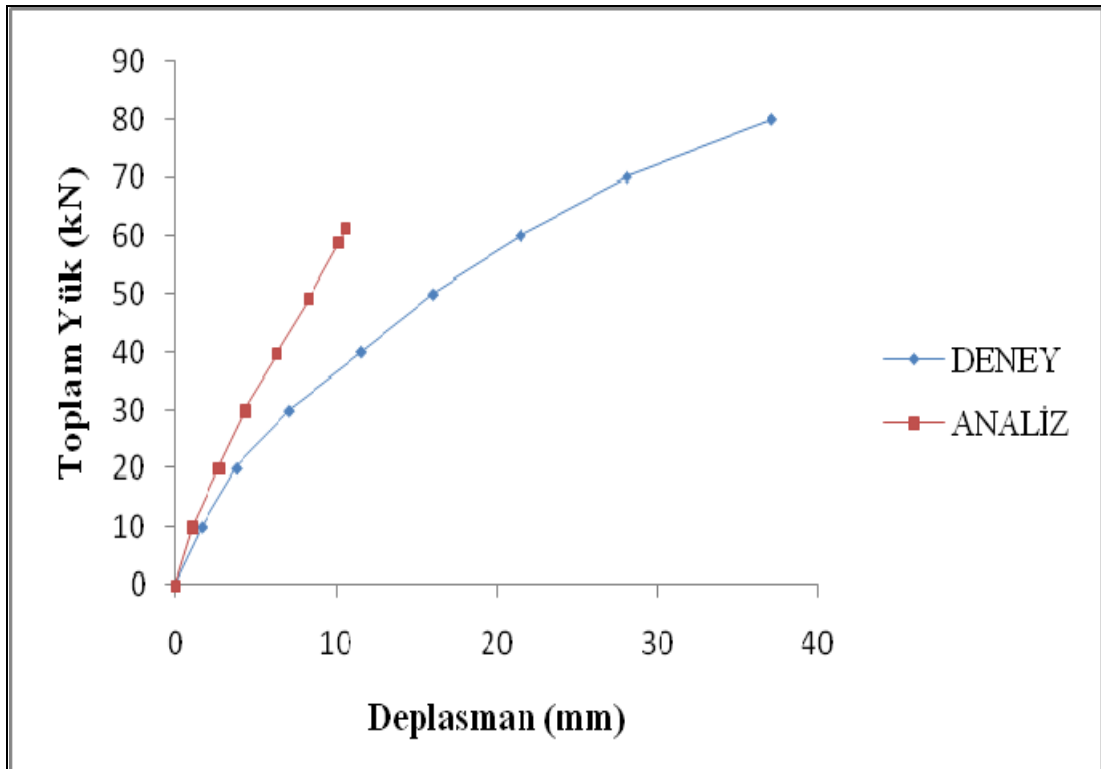
Lu, Jiang, Teng, Ye (2006) çalışmalarında da belirttiği gibi sonlu elemanlar metodu ile nonlinear problemlerin çözümünde birbirine bağlanan malzemelerin modellenmesinde iki yöntem vardır. Bu yöntemlerden birinde arayüz elemanları kullanılmakta, diğerinde ise ayrışma açıklanırken herhangi bir arayüz elemanı kullanılmadan doğrudan malzemeler için kabul edilen çatlak modelleri ile göçme açıklanmaya çalışılmaktadır. Ticari birçok sonlu elemanlar programında ikinci yöntem uygulanarak malzeme için kabul edilen çatlak modellerinin kullanımı ile göçme açıklanmaktadır. ANSYS, ABAQUS gibi sonlu elemanlar programları beton malzeme için sabit açılı çatlak modelini (FACM) kullanmaktadır. FACM modelinde çatlak asal gerilmelere dik yönde oluşup yönü değişmeden ilerlemektedir. FACM kesme yumuşamasını açıklamada yetersiz kalıp çatlamadan sonraki durumda bile kayma gerilme dağılımının artmaya devam ettiğini göstermektedir. Bu nedenle de araştırmacılar tarafından farklı çatlak modelleri geliştirilmesi konusundaki çalışmalar devam etmektedir [25].

Deneysel çalışması yapılan kirişlerin modellenmesi ve göçme yüklerinde gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmesiyle deneyi yapılmamış, CFRP şeritlerinin farklı aralıklarla düzenlenmesiyle güçlendirilmiş iki kiriş daha modellenmiştir. Bu kirişlerden 120 mm aralıklı 50 mm kalınlıklı CFRP şeritleriyle güçlendirilmiş kiriş 6'ya ait yük-deplasman eğrisi Şekil 7.6'daki gibi, 150 mm aralıklı 50 mm kalınlıklı CFRP şeritleriyle güçlendirilmiş kiriş 7'ye ait yük-deplasman eğrisi ise Şekil 7.7'deki gibidir.

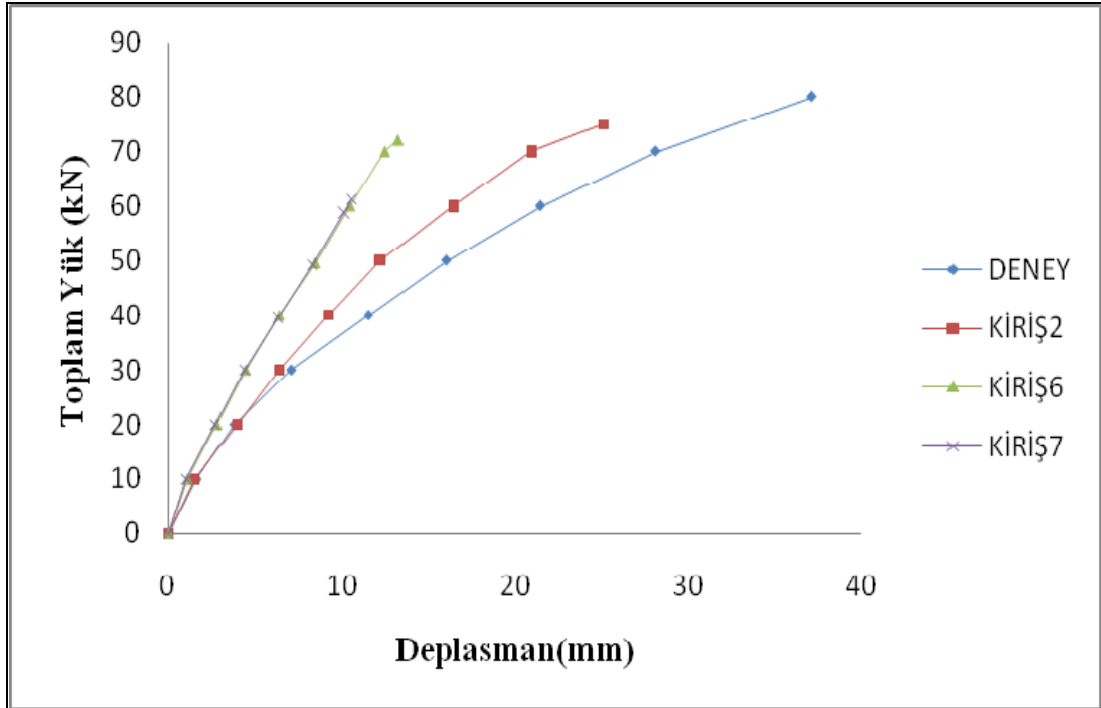
Şekil 7.6 ve Şekil 7.7'de kiriş 6 ve kiriş 7'ye ait yük-deplasman eğrileri, 80 mm aralıklı 50 mm kalınlıklı CFRP şeritleri ile güçlendirilmiş kiriş 2'nin deneysel çalışmasına ait yük-deplasman eğrisi ile karşılaştırılmıştır. Yük-deplasman eğrilerinde de görüldüğü gibi CFRP şeritlerinin düzenleme aralığı arttıkça kirişlerin yük taşıma kapasitesi düşmüş bunun yanında deplasman miktarları da azalmıştır. (Şekil 7.8-Şekil 7.9).



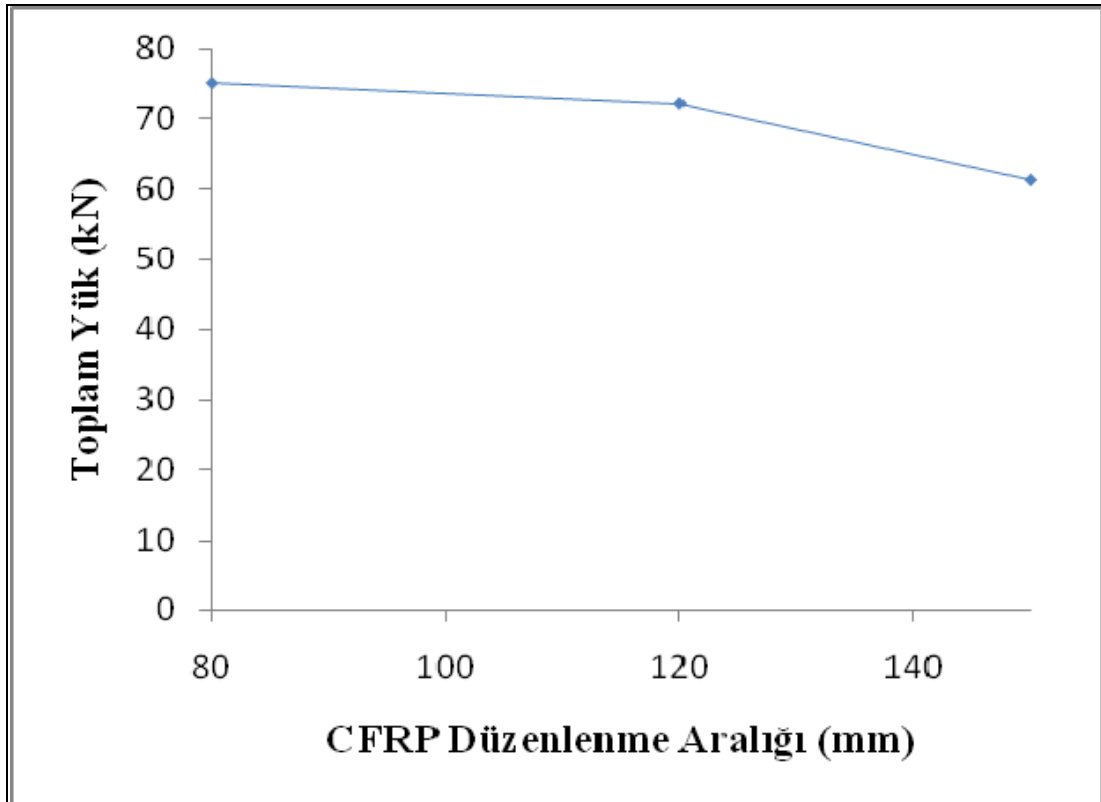
Şekil 7.6 Kiriş 6 için yük-deplasman grafikleri



Şekil 7.7 Kiriş 7 için yük-deplasman grafikleri



Şekil 7.8. Farklı aralıklı CFRP şeritleriyle güçlendirilmiş kirişlerin karşılaştırılması



Şekil 7.9. CFRP düzenleme aralığı ile yük taşıma kapasitesinin ilişkisi

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Çalışma kapsamında CFRP şeritleri ile kesmeye karşı güçlendirilen betonarme kirişlerin sonlu elemanlar programı ile modellenmesi yapılarak, beton ve donatı için farklı malzeme davranışları çeşitli yük durumlarında modele uygulanmış ve analizler sonucu elde edilen yük-deplasman eğrileri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Tüm kirişlerde analizlerde elde edilen göçme yükü değerleri gerçek değerlere oldukça yakın olmasına rağmen deplasman değerlerinde yakın sonuçlar elde edilememiştir.

Göçme yükü değerlerinde %5.5 civarında saptanan farklılığın sonlu elemanlar yöntemi açısından kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu tespit edilmiştir. Göçme yüklerinde elde edilen bu sonuçtan hareketle CFRP şerit genişliği kiriş 2 ile aynı ancak düzenlenme aralığı farklı iki kiriş daha modellenerek göçme yükleri hesaplanmıştır. Modelleme sonuçları ile de CFRP düzenleme aralığının artmasıyla güçlendirilen kirişlerin yük taşıma kapasitesinin azaldığı görülmüştür.

Göçme yükleri için elde edilen bu yaklaşık sonuçlar, deplasman değerlerinde elde edilememiştir. Bu da ANSYS'in önceki çalışmalarda da belirtildiği gibi [25] beton için kullandığı çatlak modelinin (FACM) davranışı tam olarak temsil edememesinden kaynaklanmaktadır.

Malzeme doğası gereği nonlinear olan betonun bünyesinde bulunan çatlaklar, üzerine uygulanan yükün arttırılmasıyla birlikte mikro düzeyden makro düzeye geçmekte, bu da betonun yük taşıma kapasitesini düşürdüğü gibi nonlinear özelliğini daha da arttırmaktadır. Yine de kiriş 1(kontrol kirişi) için elde edilen analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında ANSYS'in yük-deplasman davranışında ve göçme yükünde deneysel çalışma ile uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 nolu kirişlerde CFRP şeritlerinin modellenmesiyle nonlinear davranış daha da karmaşık bir hale gelmiş ve bunun sonucunda da göçme yükü değerlerinde

gerçeğe yakın sonuçlar elde edilse de deplasman değerlerindeki fark giderek artmıştır. Mesnetlenme ve yükleme koşullarının da simetrik olmaması da bu nonlineer davranışa ek bir katkı yapmıştır.

Yapılan analizlerde yük artım miktarındaki değişimin de kiriş deplasmanları üzerinde etkisi olduğu anlaşılmıştır. Yük artım miktarının düşük tutulduğu analizlerde kirişlerin yaptıkları deplasman miktarları daha fazlayken, yük artımının büyük tutulduğu analizlerde kiriş deplasmanlarının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle de gerekli görülen kirişlerde yük adımı sayısı 65'e kadar yükseltilerek yük-deplasman eğrisinin deneysel sonuçlara yakınlığı sağlanmaya çalışılmıştır. Ancak analiz sırasında program tarafından birçok alt dosya oluşturulmakta ve bu dosyalarda bilgisayar sabit depolama ortamında oldukça fazla yere ihtiyaç duymaktadır. 1-1.2 TB kadar yer kaplayan sonuç ve data dosyaları nedeniyle analizlerde bilgisayar kapasitesi yetersiz kalmış bunun sonucunda harici hard disk kullanılmıştır. Yük adımı sayısının artması programın kullandığı bellek miktarını da artırdığı için gerekli görülmedikçe yük adımı sayısı düşük tutulmaya çalışılmıştır.

8.2. Öneriler

Güçlendirilen kirişlerin davranışının sonlu elemanlar programı ile modellendiği ve incelendiği bu çalışmada analizler sonucu elde edilen göçme yükleri gerçeğe oldukça yakın olmasına rağmen deplasmanlar da uyumlu sonuçlar elde edilememiştir. Yapılacak olan yeni çalışmalar için farklı çatlak modellerinin kullanımı ile deplasman değerlerinin deneysel sonuçlarla daha uyumlu olabileceği düşünülmektedir. Ek olarak güçlendirme için kullanılan CFRP şeritler ve beton yüzey arasına yerleştirilebilecek olan kontak elemanları ile analizlerin yapılmasının daha başarılı yük-deplasman davranışlarının elde edilmesini sağlayabileceği düşünülmektedir. Ayrıca CFRP düzenleme aralığının yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin daha detaylı incelenmesi içinde farklı düzenleme aralıklı yeni kiriş modellerinin analizi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Qu, R., “Theoretical Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Bridge Members Strengthened with CFRP Laminates,” Master Tezi, **Florida Atlantic University**, 51, 101, 144-145 (1994).
2. Fanning, P., “Nonlinear Models of Reinforced and Post-tensioned Concrete Beams” **EJSE International Electronic Journal of Structural Engineering**, 2,; 111-119,(2001).
3. Chansawat, K., “Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates”, Doktora Tezi, **Oregon State University** , 6-10, 205-210 (2003).
4. Jia, M. “Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Composite Sheets”, Master Tezi, **The University of Alabama in Huntsville**, 4, 20, 22, 27-29, 60 (2003).
5. Santhakumar, R. and Chandrasekaran, E., Dhanaraj, R. “Analysis of Retrofitted Reinforced Concrete Shear Beams Using Carbon Fiber Composites” **EJSE International, Electronic Journal of Structural Engineering**, 4:66-74, (2004).
6. Elyasian, I. , Abdoli, N. and Ronagh , H.R. “Evaluation of Parameters Effective in FRP Shear Strengthening of RC Beams Using FE Method” **Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)** 7(3):249-257, (2006).
7. Camata, G. , Spacone, E. , Zarnic, R. “Experimental and Nonlinear Finite Element Studies of RC Beams Strengthened with FRP Plates” **Elsevier, Composites Part B:Engineering**,38:277-288,(2007).

8. Hashemi, S.H., Rahgozar, R. and Maghsoudi, A.A. “Finite Element and Experimental Serviceability Analysis of HSC Beams Strengthened with FRP Sheets” **American Journal of Applied Sciences** , 4 (9): 725-735, (2007).
9. İnternet: İstanbul Teknik Üniversitesi “Polimerik Malzemenin Bugünü ve Yarını” http://www.kimya.itu.edu.tr/ookay/Davetli_okay.pdf (2003).
10. Taljsten, B., “Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets”, **Elsevier , Construction and Building Materials**, 17:15-26, (2003).
11. Khalifa, A., Nanni, A., “Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites ”, **Elsevier , Cement and Concrete Composites** ,22:165-174, (2006).
12. Taljsten, B., Elfgren, L.,. “Strengthening concrete beams for shear using CFRP materials:evaluation of different application methods ”, **Elsevier, Composites Part B:Engineering**, 31:87-96, (2000).
13. Ersoy, U., Özcebe, G., “Betonarme” , **Evrım Yayınevi**, İstanbul, 17-46 , 459-464 (2001).
14. İnternet : İstanbul Teknik Üniversitesi “Prof. Dr. Erkan ÖZER Ders Notları”
[http://www.ins.itu.edu.tr/eozer/erkanhoca/Lineer%20Olmayan%20Hesaba%20Giris%20-%2005.02.2009%20\(1.%20Hafta\).pdf](http://www.ins.itu.edu.tr/eozer/erkanhoca/Lineer%20Olmayan%20Hesaba%20Giris%20-%2005.02.2009%20(1.%20Hafta).pdf)
[http://www.ins.itu.edu.tr/eozer/erkanhoca/Bolum%202-1%2012.02.2009%20\(2.Hafta\).pdf](http://www.ins.itu.edu.tr/eozer/erkanhoca/Bolum%202-1%2012.02.2009%20(2.Hafta).pdf) (2009).
15. ANSYS, ANSYS User’s Manual Revision 10.0, **ANSYS, Inc.**, Cannonsburg, Pennsylvania, (2005).

16. İnternet : Gazi Üniversitesi Otomotiv Bilim ve Teknoloji Topluluğu
http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/malzeme_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf (2007).
17. Chandrupatla, T. R., Belegundu, A.D. “Introduction to Finite Elements in Engineering ”, **Prentice-Hall International**, U.S.A., 1-2 (1997).
18. Anil, Ö. , “Strengthening of RC T-section beams with low strength concrete using CFRP composites subjected to cyclic load”, **Elsevier, Construction and Building Materials** , 22:2355–2368, (2008).
19. Stolarski, T., Nakasone, Y., Yoshimoto, S., “Engineering Analysis With ANSYS Software ”, **Elsevier**, 37 (2006).
20. “Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları”, TS500, Ankara, 12, (2000).
21. İnternet: Wikipedia İnternet Ansiklopedisi, *Göttin. Nachr. Math. Phys.* 1 (1913),
http://en.wikipedia.org/wiki/Von_Mises_yield_criterion#cite_note-0vonMises,1913 R. von Mises, *Mechanik der Festen Körper im plastisch deformablen Zustand* .
22. William, K. J. and Warnke, E. P., “Constitutive Model for the Triaxial Behaviour of Concrete”, IABSE, Report No.19, Bergamo, 1-30 (1974).
23. Anil, Ö. , Belgin, M.Ç., “Monotonik Yükleme Etkisi Altındaki Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Doğrusal Olmayan Analizi”, **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.** 22(1): 191-197, (2007).
24. Doğan, A.B., “Karbon Polimer Elyaf İle Güçlendirilmiş Beton Kirişlerin Sonlu Elemanlar Metodu İle Lineer Olmayan Analizi”, Master Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 40 (2008).

25. 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).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BULUT, Nalan
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 01.01.1980 Elazığ
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 582 32 54
Faks : 0 (312) 231 92 23
e-mail : nbulut@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Fırat Üniversitesi/İnşaat Müh.	2003
Lise	Bahçelievler Lisesi	1997

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-...	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2003-2005	Hona İnşaat	Teknik Ofis Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce