

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EĞİLMEYE KARŞI FRP KOMPOZİTLER İLE
GÜÇLENDİRİLEN BETONARME KİRİŞLERİN
SONLU ELEMAN YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Wael Mansur ALDHABIR

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : YAPI
Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Ali SARIBIYIK

Şubat 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EĞİLMEME KARŞI FRP KOMPOZİTLER İLE
GÜÇLENDİRİLEN BETONARME KİRİŞLERİN
SONLU ELEMAN YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

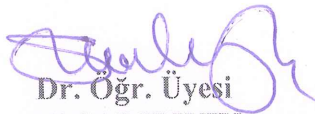
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Wael Mansur ALDHABIR

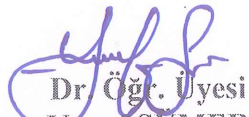
Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Bu tez 01 / 02 /2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Dr. Öğr. Üyesi
Ali SARIBIYIK

Jüri Başkanı


Dr. Öğr. Üyesi
Yusuf SUMER

Üye


Dr. Öğr. Üyesi
Hüseyin KASAP

Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Wael ALDHABIR

01.02.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ali SARIBIYIK’a teşekkürlerimi sunarım. SEM çalışmalarında bize desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Ergün NART, Dr. Öğr. Üyesi. Yusuf SÜMER, Öğr. Gör. İzzet DEĞİRMENCİ ’ye teşekkür ederim. Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığına destekleri için teşekkür ederim. Hayatımın her anında yanımda olan ve bir an olsun sevgi ve desteğini benden esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin İçeriği	3
BÖLÜM 2.	
BETONARME KİRİŞLERİN FRP KOMPOZİTLER İLE ONARIM VE GÜÇLENDİRME ÇALIŞMALARI.....	5
2.1. Onarım ve Güçlendirme.....	5
2.2. FRP Kompozitler	6
2.3. Betonarme Kirişlerin FRP ile Güçlendirme Yöntemleri.....	6
2.3.1. Kesmeye karşı güçlendirme yöntemleri	6
2.3.2. Eğilmeye karşı güçlendirme yöntemleri.....	8
2.4. FRP ile Güçlendirilen Kirişlerin Kırılma Biçimleri.....	9
2.4.1. Beton basınç kırılması	10
2.4.2. FRP kopması.....	10
2.4.3. Beton kesme kırılması	10
2.4.4. Plak uç delaminasyonu	11
2.4.5. Beton paspayı ayrılması.....	11

2.5. Kirişlerin Güçlendirilmesinde FRP Uygulamaları.....	12
2.6. Literatür Taraması.....	12

BÖLÜM 3.

BETONARME KİRİŞ NUMUNELERİN SONLU ELAMAN METODU

ANALİZİ.....	18
3.1. FRP ile Güçlendirilen Betonarme Kirişler.....	18
3.1.1. Betonarme Kiriş Numune Özellikleri ve Araştırma Parametreleri	19
3.1.2. Betonarme Kiriş numunelerde kullanılan malzeme bilgileri.....	20
3.1.3. Güçlendirilmiş Betonarme Kirişler Numunelerin Deneysel Sonuçları	21
3.2. ABAQUS Sonlu Elemanlar Programı.....	23
3.2.1. Program ara yüzü.....	23
3.2.2. Kullanılan birimler	23
3.2.3. Eleman Tipleri	24
3.2.4. Ana pencerenin bileşenleri	25
3.2.5. İşlem adımları	26
3.3. Kiriş malzemelerinin modeli.....	27
3.3.1. Beton basınç modeli	27
3.3.1.1. Mander tarafından önerilen model.....	27
3.3.1.2. Hognestad tarafından önerilen model	30
3.3.1.3. Geliştirilmiş Kent-Park tarafından önerilen model.....	31
3.3.1.4. Beton hasar plastisite	33
3.3.1.5. Beton çekme gerilmesi.....	35
3.3.2. Çelik malzeme	37
3.3.3. FRP modelleme	38
3.4. Kiriş Numunelerin Sonlu Elemanlar ile Modellenmesi.....	39
3.4.1. Malzeme özelliklerinin girilmesi.....	39
3.4.2. Donatıların gruplandırması.....	44
3.4.3. Modelinin çözüm ağı (mesh) oluşturulması	45

BÖLÜM 4.

FRP KOMPOZİTLER İLE GÜÇLENDİRİLEN BETONARME KİRİŞLERİN

NÜMERİK ANALİZİ.....	47
4.1. Betonarme kiriş model doğrulama çalışmaları	47
4.1.1. Kiriş numuneler için uygun dilasyon açısı parametresinin belirlenmesi	49
4.1.5. Kiriş numuneler için uygun Çözüm ağı parametresinin belirlenmesi	51
4.1.6. Kiriş numuneler için uygun viskozite parametresinin belirlenmesi	52
4.2. CFRP ile Güçlendirilen Betonarme Kirişlerin SEM Analizi	54
4.3. GFRP ile Güçlendirilen Betonarme Kirişlerin SEM Analizi.....	56
4.4. Parametrik Çalışmalar	59
4.4.1. CFRP ile güçlendirilmiş farklı donatılı kirişler SEM analizi	59
4.4.2. GFRP ile güçlendirilmiş farklı donatılı kirişler SEM analizi	61
4.4.3. Yan ve altı yüzeyleri CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin SEM analizi	63
4.4.4. Yan ve altı yüzeyleri GFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin SEM analizi.....	65

BÖLÜM 5.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	67
---------------------------	----

KAYNAKLAR.....	69
----------------	----

ÖZGEÇMİŞ	75
----------------	----

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ϵ	: Birim şekil değiştirme
σ	: Eksenel basınç gerilmesi
Δ_u	: Kopma anındaki şekil değiştirme
Δ_y	: Akma anındaki şekil değiştirme
CFRP	: Karbon Elyaf Takviyeli Polimer
GFRP	: Karbon Elyaf Takviyeli Polimer
SEM	: Sonlu Eleman Metodu
f_c	: Sargısız beton basınç dayanımı. Genelde $f_c=f_{ck}$ alınır (MPa)
f_{cc}	: Sargılı beton basınç dayanımı $f_{cc}=K f_c$. (MPa)
F_{su}	: Çelik donatının kopma dayanımı
F_{sy}	: Çelik donatının akma dayanımı
f_t	: beton çekme gerilmesi
$\emptyset$	: Donatı çapı
δ	: Orta nokta sehim
S	: Sargı donatısı aralığı (mm).
f_{yw}	: Boyuna donatısının akma dayanımı (MPa)
θ_x	Yatay yönde dönme Düşey
ϵ_{co}	: Sargısız betonun maksimum gerilme altındaki birim kısalmas
b_k	: Etriye dışından etriye dışına ölçülen çekirdek beton alanının küçük boyutu (mm)
h_k	: Etriyelerin arasında ölçülen çekirdek beton alanının büyük boyutu (mm)
ρ_s	: Sargı donatısının hacimsel oranı
A_o	: Boyuna donatısı kesit alanı (mm ²)

ϵ_{cu}	: Sargılı betonda maksimum birim şekil değıştirme
$\epsilon_t^{\sim pl}$	: Çekme gerilmesi altında plastik birim şekil değıştirme
$\epsilon_c^{\sim pl}$	: Basınç gerilme altında plastik birim şekil değıştirme :
$\epsilon_c^{\sim in}$	: Elastik olmayan basınç birim şekil değışimi.
$\epsilon_t^{\sim in}$	: Elastik olmayan çekme birim şekil değıştirmesi.
f_{cu}	: Beton kopma gerilmesi
BHP	: Beton Hasar Plastisite
d_c	: Basınç hasar değışkeni
d_t	: Çekme hasar değışkeni:
E	: Elastisite modülü
DA	: Dilasyon (genleşme) açısı
b	: Kiriş gövde genişliği
d	: Kiriş faydalı yüksekliği
A_o	: Sargı donatısı kesit alanı (mm ²)
l_s	: Kesitteki sargı donatısı ve çirozların toplam uzunluğu (mm)
s	: Sargı donatısı aralığı (mm)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Yapının onarım ve güçlendirilmesi stratejisinin şeması	5
Şekil 2.2. Güç tükenmesi ve çatlama biçimleri	7
Şekil 2.3. Harici bağlı FRP'yi kullanan tipik kesme kuvvetlendirme şemaları..	8
Şekil 2.4. Betonarme kirişler eğilmeye karşı FRP levha ve şeritlerle güçlendirilmesi	9
Şekil 2.5. Güçlendirilmiş kirişte basınç kırılması	10
Şekil 2.6. Güçlendirilmiş kirişte FRP kopma davranışı	10
Şekil 2.7. Güçlendirilmiş kirişte kesme kırılması	11
Şekil 2.8. Güçlendirilmiş kirişte plak uç delaminasyonu	11
Şekil 2.9. Güçlendirilmiş kirişte paspayı ayrılması.....	11
Şekil 2.10. FRP malzemenin kirişlerde uygulanması	12
Şekil 3.1. Betonarme kiriş elemanının geometrisi ve yükleme durumu	19
Şekil 3.2. Şahit kiriş ve CFRP ile güçlendirilen kirişlerin deneysel yük-sehim grafikleri	22
Şekil 3.3. Şahit kiriş ve GFRP ile güçlendirilen kirişlerin deneysel yük-sehim grafikleri	22
Şekil 3.4. ABAQUS/CAE 2016 Ara yüz ekranı	23
Şekil 3.5. Analizlerde kullanılan eleman tipleri	24
Şekil 3.6. ABAQUS'te ana pencerenin bileşenleri	25
Şekil 3.7. ABAQUS'te işlem adımları	26
Şekil 3.8. Mander beton davranış modeli.....	29
Şekil 3.9. Gelişmiş Hognestad beton davranış modeli.....	30
Şekil 3.10. Gelişmiş Kent ve Park beton davranış modeli	31
Şekil 3.11. Eksenel basınç altında beton davranışı	34
Şekil 3.12. Eksenel çekme altında beton davranışı	34
Şekil 3.13. Betonun deney metotlarına göre çekme dayanımı	36

Şekil 3.14. Geliştirilmiş betonun çekme dayanımı modeli	37
Şekil 3.15. Çelik malzeme davranışı	38
Şekil 3.16. FRP malzeme modeli	39
Şekil 3.17. Boyuna donatı ve etriye çekme gerilmesi-şekil değiştirme grafiği..	40
Şekil 3.18. Mander modeli- sargısız ve sargılı beton davranışı	42
Şekil 3.19. Kent Park model -sargısız ve sargılı beton davranışı.....	42
Şekil 3.20. Hognestad modeli -sargısız beton davranışı	43
Şekil 3.21. Beton çekme hasar davranışı.....	43
Şekil 3.22. FRP skin üzerine özellikler tanımlanması	44
Şekil 3.23. Donatıların birbirlerine gruplandırması	45
Şekil 3.24. Kiriş parçaya çözüm ağı atanması.....	45
Şekil 3.25. Elde edilen yük ve sehim noktaların belirlenmesi	46
Şekil 4.1. SEM analizi ile betonarme kiriş betonunda oluşan gerilme dağılımları	48
Şekil 4.2. SEM analizi ile betonarme kiriş donatısı ve FRP malzemesinde oluşan gerilme dağılımları	48
Şekil 4.3. Mander modeli Çözüm ağı türü Hex ve Hex-Dominated	49
Şekil 4.4. Kent -Park modeli, çözüm ağı türü Hex, Hex-Dominated.....	50
Şekil 4.5. Hognestad modeli, çözüm ağı türü ve boyutu: Hex, Hex-Dominated 50	50
Şekil 4.6. Mander model, Kent park modeli çözüm ağı türü ve boyutu: Wedge	50
Şekil 4.7. Mander modeli çözüm ağı türü : Hex-Dominated, A,45	51
Şekil 4.8. Kent-Park ve Hognestad modeli çözüm ağı türü: Hex-Dominated A,45	51
Şekil 4.9. Viskozite etkisi Mander modeli, çözüm ağı türü ve boyutu: Hex- Dominated, 50.....	52
Şekil 4.10. Viskozite etkisi Kent-Park modeli, çözüm ağı türü ve boyutu: Hex-Dominated, 50.....	53
Şekil 4.11. Viskozite etkisi Kent-Park modeli, çözüm ağı türü ve boyutu: Hex-Dominated, 50	53
Şekil 4.12. CFRP11 kiriş deney ve SEM analiz sonuçlarının karşılaştırılması .	55
Şekil 4.13. CFRP 22 kirişi deney ve SEM analiz sonuçlarının karşılaştırılması	55

Şekil 4.14. CFRP 21-1 kirişi deney ve SEM analiz sonuçlarının karşılaştırılması	55
Şekil 4.15. GFRP11 kirişi deney ve SEM analiz sonuçlarının karşılaştırılması	57
Şekil 4.16. GFRP 22 kirişi deney ve SEM analiz sonuçlarının karşılaştırılması	57
Şekil 4.17. GFRP 21 kirişi deney ve SEM analiz sonuçlarının karşılaştırılması	58
Şekil 4.18. GFRP 21-1 kirişi deney ve SEM analiz sonuçlarının karşılaştırılması	58
Şekil 4.19. GFRP20 kirişi deney ve SEM analiz sonuçlarının karşılaştırılması	59
Şekil 4.20. CFRP11 ile kiriş farklı donatı ve farklı etriye aralıkları çaplarının SEM analizi	60
Şekil 4.21. CFRP22 ile kiriş farklı donatı çapları ve farklı etriye aralıkları SEM analizi	61
Şekil 4.22. GFRP11 ile kiriş farklı donatı ve farklı etriye aralıkları çaplarının SEM analizi	62
Şekil 4.23. GFRP22 ile kiriş farklı donatı çapları ve farklı etriye aralıkları SEM analizi	62
Şekil 4.24. Yan ve altı yüzeyleri CFRP ile betonarme kirişlerin güçlendirilmesi	63
Şekil 4.25. Yan ve altı yüzeyinde CFRP ile güçlendirilmiş kiriş SEM analizi..	64
Şekil 4.26. Yan ve altı yüzeyleri GFRP ile betonarme kirişlerin güçlendirilmesi	65
Şekil 4.27. Yan ve altı yüzeyinde GFRP ile güçlendirilmiş kiriş SEM analizi..	66

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 3.1. Betonarme Kiriş numunelerin isimleri ve güçlendirme bilgileri	19
Tablo 3.2. Sikadur 330 epoksi yapıştırıcısının özellikleri.....	20
Tablo 3.3. Güçlendirmede kullanılan Sika Wrap 430 G/25 malzemesinin özellikleri	21
Tablo 3.4. Güçlendirmede kullanılan Sika Wrap 300 C/60 malzemesinin özellikleri	21
Tablo 3.5. CFRP betonarme kirişlerin deneysel yük ve sehim değerleri	21
Tablo 3.6. ABAQUS'te kullanılan birimler	24
Tablo 3.7. Beton mekanik özellikleri	41
Tablo 3.8. Beton mekanik özellikleri	41
Tablo 3.9. Beton çekme hasarı (Concrete Tension Damage).....	41
Tablo 3.10. Beton basınç davranışı (Compressive behavior)- Mander-sargısız model	41
Tablo 4.1. CFRP betonarme kirişlerin deneysel ve SEM yük ve sehim değerleri.	54
Tablo 4.2. GFRP betonarme kirişlerin deneysel ve SEM yük ve sehim değerleri	56
Tablo 4.3. CFRP11 ve CFRP22 ile güçlendirilmiş farklı donatı ve etriye aralığı kiriş numunelerinin kotlamaları	59
Tablo 4.4. CFRP ile güçlendirme parametrik numunelerinin kotlamaları	63
Tablo 4.5. GFRP ile güçlendirme parametrik numunelerinin kotlamaları.....	65

ÖZET

Anahtar kelimeler: betonarme kiriş, güçlendirme, Sonlu Elemanlar, Fiber Takviyeli Polimer, FRP, doğrusal olmayan analiz, ABAQUS.

Bu çalışmada, eğilme yüküne karşı Elyaf Takviyeli Polimer (FRP) kompozitler ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi üzerine çalışılmıştır. Yetersiz eğilme ve kesme donatısı kullanılarak üretilen dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerde, düşük dayanımlı beton, tek doğrultulu karbon ve cam kumaşlar kullanılmıştır. Karbon ve Cam Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP ve GFRP) kompozitler enine ve boyuna doğrultularda yönlendirilerek kirişler U şeklinde güçlendirilmiştir. Dört nokta eğilme testi ile test edilen kirişlerin eğilme davranışları tespit edilerek Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile doğrulama çalışması yapılmıştır.

SEM programında istenen parametreler, deneysel çalışmalardan, literatürden, modellemede yaygın olarak kullanılan bazı temel formüllerden elde edilmiştir. Çözüm ağı boyutu ve şekli, Dilasyon Açısı (DA), viskozite parametreleri ve araştırmacıların önerdiği bazı modeller kullanılarak betonarme kiriş numunelerinin davranışları SEM analizleri ile doğrulanmaya çalışılmıştır. Yük ve sınır şartları deneysel çalışmadaki gibi modele tanımlanmıştır. Betonarme kontrol kirişinin yük- sehim davranışı SEM analizi ile doğrulanarak FRP kompozitler ile güçlendirilmiş kirişlerin modeline geçilmiştir. SEM paket programına FRP kompozitler kabuk eleman olarak kirişin yüzeylerine tanımlanmıştır. Kirişlerin SEM analiz sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Modellenen betonarme kiriş numunemi üzerinde sadece güçlendirme şekilleri değiştirilerek veya güçlendirme şekilleri değiştirilmeden sadece boyuna ve enine donatılar değiştirilerek parametrik çalışma yapılmıştır.

SEM analizlerinden elde sonuçlara göre; çözüm ağı boyutu ve şekli DA ve viskozite gibi model parametreleri, betonarme kirişin davranışını önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiş ve betonarme kirişler için en uygun parametreler tespit edilmiştir. CFRP ve GFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin eğilme davranışları SEM analizleri ile iyi bir yakınsama ile doğrulanmıştır. Ayrıca güçlendirilmiş kiriş yük taşıma kapasitesi ve sehim değeri SEM analizi ile de doğrulanmıştır. SEM ile yeni deney numuneleri üretilerek güçlendirmeye etkiyen parametreler tespit edilmiştir.

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED BY FRP COMPOSITES UNDER FLEXURAL LOADING

SUMMARY

Keywords: Reinforced concrete beam, strengthened, finite element model, Fiber reinforced polymer, FRP, GFRP, Nonlinear Analysis, ABAQUS.

In this study, the behaviour of reinforced concrete beams strengthened with fiber Reinforced Polymer (FRP) composites is modelled by using finite element method under Flexural loads. Rectangular cross section reinforced concrete beams obtained by using low strength concrete, insufficient bending and shear reinforcement are strengthened using U shaped carbon and glass fiber (CFRP and GFRP) fabrics in transverse and longitudinal directions. The Flexural behaviour of the beams is determined by the four-point bending experiment and verified using Finite Element Method (FEM).

The parameters required in the FEM program were obtained from experimental studies, literature and some basic formulas commonly used in modelling. Model parameters, such as mesh size, geometric shape, dilation angle and viscosity and some models proposed by researchers are used to confirm reinforced concrete beam samples behaviour by FEM numerical analysis. Load and boundary conditions are defined like the experimental studies. The load-displacement behaviour of the control RC beam was confirmed by FEM analysis and the model of strengthened beams with FRP composites was introduced. FRP composites in FEM program are defined as shell elements on surfaces of the beam. The FEM results were compared with the experimental studies. parametric studies are carried out by only changing the shape of retrofit or by only changing longitudinal and transverse reinforcement while keeping the retrofit shape fixed.

According to the FEM analysis results, model parameters, like mesh size, geometric shape, dilation angle and viscosity have significant effect on the reinforced concrete beam behaviour, and the most suitable parameters have been determined. The flexure behaviour of RC beams strengthened by CFRP or GFRP was confirmed by a good convergence with FEM analysis. In addition, the strength capacity and deflection values of RC beams were confirmed by the FEM analysis. By using the FEM models, new numerical samples were produced and the parameters affecting the strengthening were determined.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Türkiye’de meydana gelen depremler, mevcut betonarme yapıların önemli bir bölümünün güçlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Türkiye’deki meydana gelen depremler sonrasında betonarme binaların çoğunda betonların basınç dayanımlarının oldukça düşük olması, donatı düzensizliği ve yetersizliği vb. nedenler ile betonarme yapılar hasar görmekte veya yıkılmaktadır [1]. Betonarme kirişlerin onarım ve güçlendirilmesinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemlerin başında kirişlerin betonarme elemanlar ile mantolanması gelmektedir. Ancak bu yöntemin zor ve zahmetli ve aşırı maliyetli olduğu bilinmektedir. Yapı ağırlığını artırmayan, kolay ve hızlı uygulanabilen, elemanların taşıma kapasitelerini artıran, güçlendirme sırasında yapının kullanımına imkân tanıyan Elyaf Takviyeli Polimer (FRP) kompozitler bu tür problemleri azaltarak betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. FRP kompozitler ile güçlendirilmiş kirişler üzerine yapılan deneysel çalışmalar ile kirişlerin taşıma kapasiteleri ve güçlendirme şekilleri araştırılmaktadır [2]-[11]. Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) programı betonarme kirişlerin modellenmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır [15]–[29], Deneysel çalışmalar zaman ve maliyete neden olduğundan yapılan çalışma sınırlı kalabilmektedir. Deneysel çalışmanın bir sonlu elemanlar yardımı ile hassas bir şekilde modellenmesi ve parametrik çalışmalar ile deneye gerek kalmadan deney verileri üretilebilmesi birçok açıdan avantaj sağlamaktadır. SEM günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde kullanılan ve fayda/maliyet/zaman vb. açısından çok avantajlı olan sayısal analiz metodudur. Modellemeyle yapı elemanlarındaki sorun oluşturabilecek kısımları detaylı bir şekilde analiz edilebilmekte ve yapı elemanının davranışını daha iyi anlamak mümkündür [30].

Bu çalışmada, mevcut betonarme yapılarıdaki düşük dayanımlı üretilen kirişler FRP kompozitler ile eğilme ve kesme kuvvetine karşı güçlendirilmiş ve sonlu elemanlar paket programı ile doğrulanmıştır. Elde edilen deneysel ve model sonuçları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Son yıllarda, inşaat malzemeleri teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak betonarme elemanların karbon ve cam takviyeli polimer plakalarla güçlendirilmesi büyük önem kazanmıştır. Bu malzemenin hafif, yüksek mukavemetli, korozyon özellikleri ve iyi bir yoğunluğa sahip olması nedeniyle alternatif bir güçlendirme malzemesi olmuştur. Gerçekleştirilen birçok deneysel ve nümerik çalışma ile hazırlanan modeller üzerinde güçlendirme yöntemlerinin betonarme elemanların eğilme ve kesme dayanımının arttığı belirlenmiştir. Bu çalışmalarda geliştirilen farklı analizler sonucunda CFRP ve GFRP kullanılarak güçlendirilen betonarme elemanların gerilme dağılımları, yük-deplasman değişimi ve oluşabilecek yenilme biçimleri ile ilgili ayrıntılı sonuçlar elde edilmiştir [31].

İnşaat sektörünün en önemli problemlerinden biri de modellemenin nasıl yapıldığıyla alakalıdır. Kirişin, tek tekil veya yayılı yükler etkisinde olduğu durumlarda kirişlerin bu yükler altında nasıl davrandığını anlamak ve analiz edebilmek için modellemesi ABAQUS programı yardımıyla kolaylıkla yapılabilir. Ayrıca hazırlanan model üzerinde güçlendirme yöntemlerinin betonarme elemanların eğilme ve kesme dayanımını arttığı belirlenmiştir. Kirişin modelinin oluşturduktan sonra kolayca birkaç parametre girilmesi mümkündür.

Betonarme yapılarda, değişen çevresel şartlardan veya kullanım amacı değişikliğinden dolayı ek zorlanmalar ve ek yükler oluşabilmektedir. Kirişlerde, kullanılan beton ve çeliğin gerekli dayanımda olmaması kirişlerde yeterli olmayan donatı kullanılması başlıca güçlendirilme nedenleri olarak sıralanabilir. Eğilme dayanımı, eğilme donatısı sayısı ya da uygulama alanında korozyon, yüksek sıcaklık, nem, kötü işçilik, zemin tuzluluğu, malzeme kusurları gibi nedenlerden dolayı azalmaktadır. Eğilme kapasitesi açısından yetersiz olan betonarme elemanlara güçlendirme amacı ile birçok metot uygulanmaktadır. Kirişlerin güçlendirilme çalışmalarında betonarme mantolamada

olduğu gibi kirişin kesitini artırmamak ve yapıya fazla yük getirmemek için karbon ve cam lifli polimerler CFRP ve GFRP şeritler kirişe dıştan U biçiminde sarılarak kullanılmaya başlanmıştır.

1.1. Tezin İçeriği

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde ve yapılan çalışma ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Amaç ve kapsamı açıklanmıştır.

İkinci bölümde, betonarme kirişlerin FRP kompozitler ile onarım ve güçlendirme çalışmaları, onarım ve güçlendirme tanıtımı, onarım ve güçlendirme ne zaman ihtiyacı olduğunu anlatılmış ve FRP kompozitler hakkında genel bilgiler verilmiştir. FRP kompozitlerin özellikleri, onarım ve güçlendirmede kullanılan FRP kompozitler FRP kompozitler ile betonarme kirişlerin kullanılmış güçlendirme yöntemleri özet olarak bahsedilmiştir. FRP kompozitler ile betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirme yöntemleri, FRP kompozitler ile betonarme kirişlerin eğilmeye karşı güçlendirme yöntemleri, kirişlerin güçlendirilmesinde FRP uygulamaları sunmuştur. Betonarme kirişlerin FRP kompozitler ile güçlendirilmesi üzerine yapılan deneysel ve sayısal çalışmaların literatür taraması yapılmış ve literatüre ait özet bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, yapılmış betonarme kiriş malzemeleri, betonarme kiriş özellikleri araştırma parametreleri, deneysel çalışmada kullanılan malzemeler anlatılmış, kullanılan kiriş betonu, kullanılan kiriş donatısı, onarım ve güçlendirme malzemeleri, epoksi tanıtımı ve özelliği, GFRP tanıtımı ve özelliği, CFRP tanıtımı ve özelliği, sonuçta deney sonuçları. (SEM) hakkında bilgiler bahsedilmiştir. Sonlu elemanlar analizi tanıtımı, sonlu elemanlar yönteminin avantajları ve dezavantajları, sonlu elemanlar yönteminde kullanılan bazı terimler, sonlu elemanlar yöntemi eleman tipleri, uygulama alanları, ABAQUS betonarme kiriş 3boyutlu modeli olarak ABAQUS programı kurulmuştur, ABAQUS programı genel tanıtımı, ABAQUS'te ana pencerenin bileşenleri, serbeslik derecesi, ABAQUS'te kullanılan birimler, malzem model doğrulama çalışmaları, beton basınç modeli, mander modeli, hognestad modeli, Kent-Park modeli, beton hasar plastisite, beton basınç parametre,

beton çekme parametre, etki edenler parametre Dilasyon Açısı (DA) ve çelik malzeme, FRP modellenme hakkında bilgiler yazılmıştır.

Dördüncü bölümde, FRP kompozitler ile güçlendirilen betonarme kirişlerin nümerik analizi, kontrol betonarme kiriş SEM çalışmaları, Mander, Kent-Park ve Hognestad modeli kontrol kiriş her model DA etkisinin SEM çalışmaları incelenmiştir. Aynı modeller çözüm ağı boyutu etkisi de modellenmiştir. CFRP ve GFRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin SEM analizi, şahit betonarme kirişlerin üzerine SEM analizinin viskozite hassasiyeti çalışmaları, Mander, Kent-Park ve Hognestad model kullanarak viskozite parametre değiştirerek SEM analizleri yapılan parametrik çalışılmıştır. Modellenen betonarme kiriş numunemi üzerinde sadece güçlendirme şekilleri değiştirilerek veya güçlendirme şekilleri değiştirilmeden sadece boyuna ve enine donatılar değiştirilerek parametrik çalışma yapılmıştır.

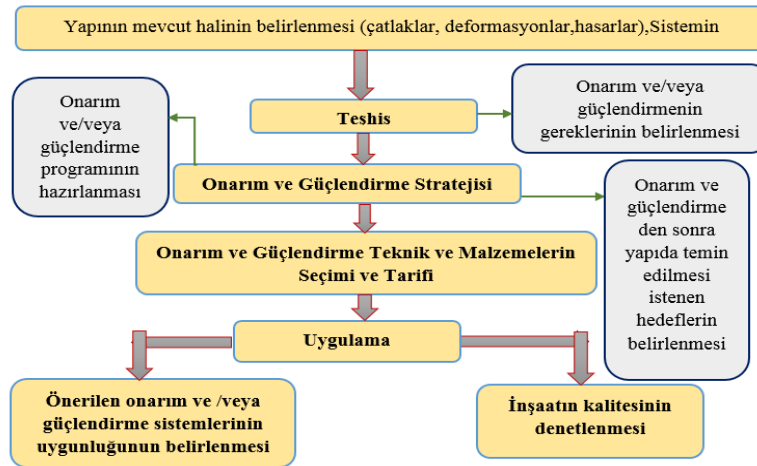
Beşinci bölümde sonuç ve önerileri özetlenmiştir.

BÖLÜM 2. BETONARME KİRİŞLERİN FRP KOMPOZİTLER İLE ONARIM VE GÜÇLENDİRME ÇALIŞMALARI

2.1. Onarım ve Güçlendirme

Yapı elemanların ömürleri boyunca çeşitli yüklere maruz kalmaktadır. Bu yükler altında yük taşıma kapasiteleri düşmekte ve onarılmalarının son derece önemli olduğu bilinmektedir. Deprem dayanımı düşük bina sayısının fazlalığı, bu binaların halen kullanılıyor olmaları, yapım yöntem ve tekniklerinin farklılığı gibi nedenlerle, her yapı türü için uygun onarım ve güçlendirme yöntemlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar halen devam etmektedir [5].

Tamir edilmesine ve / veya güçlendirilmesine karar verilen bir yapıda, öncelikle yapıyı analiz etmek ve hasar / zayıflık nedenlerini tayin etmek gerekmektedir. Ardından onarım ve güçlendirme yönteminin hasar ve çeşitli etki edenlere göre belirlenmesi gerekmektedir (Şekil 2.1.) [32].



Şekil 2.1. Yapının onarım ve güçlendirilmesi stratejisinin şeması

2.2. FRP Kompozitler

Son zamanlarda meydana gelen depremler, betonarme yapıların çoğunun depremler sırasında ciddi bir şekilde hasar gördüğünü ve büyük onarım çalışmalarına ihtiyaç duyduklarını göstermiştir. Dünyadaki birçok şehir ve ilçeler daha yüksek sismik bölgelere geçiş, yeni güçlendirme stratejilerinin geliştirilmesinde de zorunlu olmuştur. Betonarme yapı elemanlarını güçlendirme tekniklerinden biri, dayanımı ve sünekliği önemli ölçüde artırabilen FRP kompozitlerdir. FRP malzemeler, elemanların eğilme, kesme ve eksenel yük taşıma kapasitelerini arttırmak için betonarme elemanları güçlendirmek için kullanılmaktadır. [33].

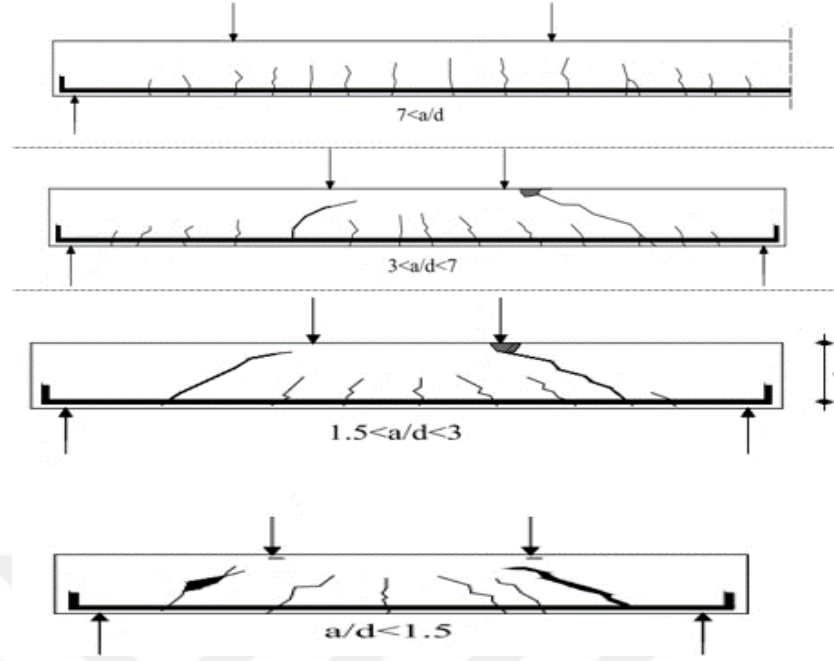
FRP kompozitler betonarme kirişlerin onarım ve güçlendirilmesinde dışarıdan farklı şekillerde sarılarak kullanılmaktadır. FRP kompozitlerle kirişlerin güçlendirme yöntemleri alt bölümlerde açıklanmıştır.

2.3. Betonarme Kirişlerin FRP ile Güçlendirme Yöntemleri

2.3.1. Kesmeye karşı güçlendirme yöntemleri

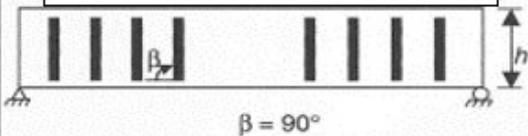
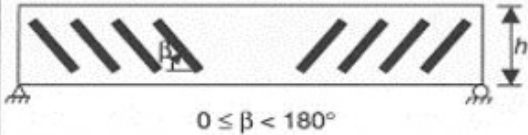
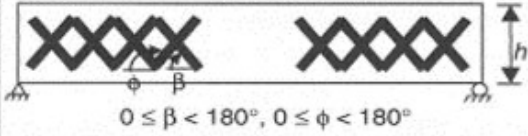
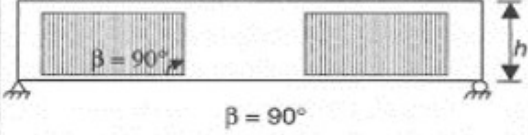
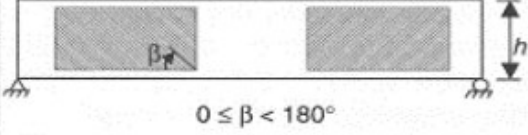
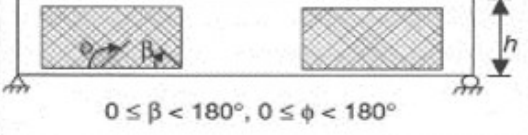
Literatürde betonarme kirişlerin kesmeye karşı FRP kompozitler ile güçlendirme çalışmalarının fazla olduğu görülmektedir. Günümüzde onarım ve güçlendirme yapmak için birçok yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan yöntem kirişlere dışarıdan yapıştırılan lifli polimer şeritlerdir. Bu güçlendirme yöntemiyle kesme donatısı yetersiz olan kirişlerde kesme dayanımı önemli oranda arttırılmaktadır [34].

Eğilme donatısı olan fakat kesme kuvveti donatısı bulunmayan basit mesnetli bir kirişte göçme mekanizmasını belirleyen en önemli faktörlerden biri kiriş kesme açıklığının (a), kiriş faydalı yüksekliğine (d) oranıdır. Yapılan deneysel çalışmalara göre a/d oranına göre kirişte güç tükenmesi ve çatlama biçimi dört grupta toplanmaktadır. Şekil 2.2.'de a/d oranına göre güç tükenmesi ve çatlama biçimleri gösterilmiştir. [35].



Şekil 2.2. Güç tükenmesi ve çatlama biçimleri

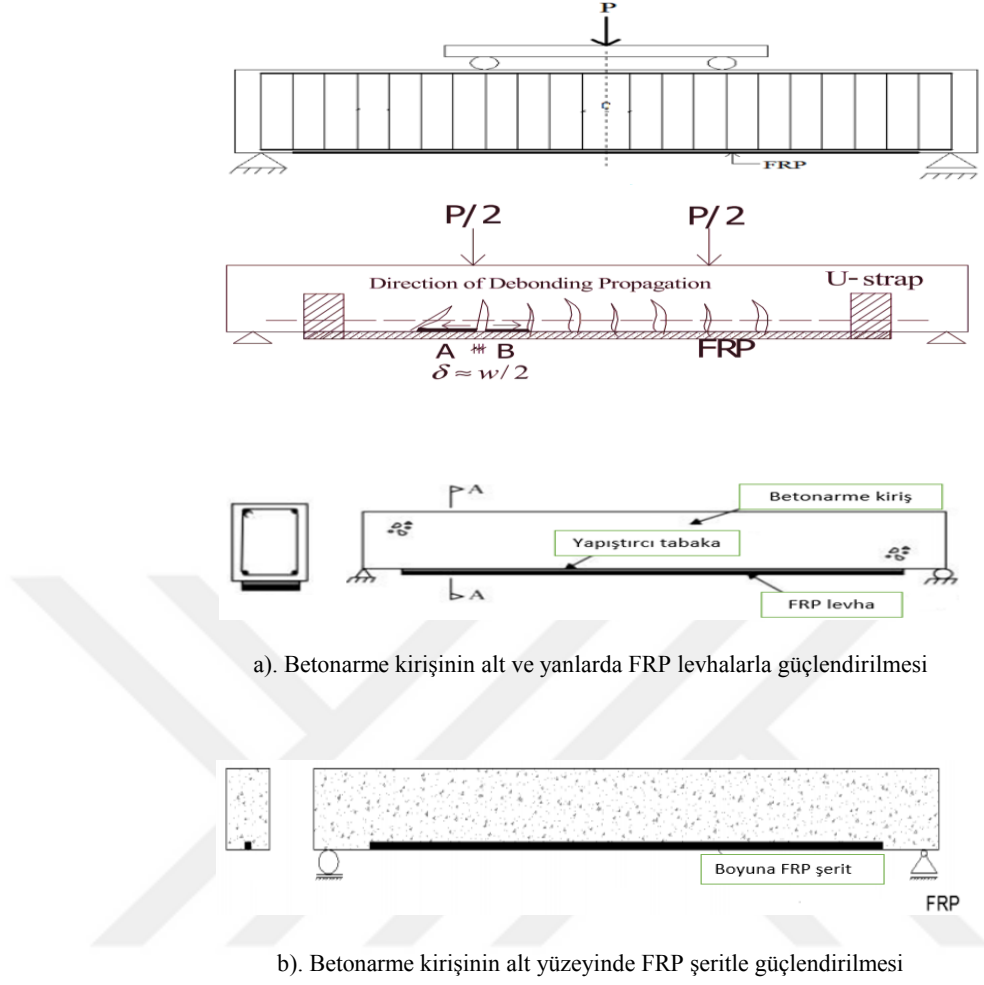
Betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesi ve onarılması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Betonarme kirişlerin kopmaya karşı onarım ve güçlendirilmesi üzerine birçok yöntem yaygın olarak uygulanmaktadır. Kirişler, FRP yan yüzlere, ve gerdirmeye yüzüne ya da tüm yüzlere tamamen sarılarak uygulanabilir. Kesmeye karşı etkili güçlendirme için, lifleri en yüksek ana gerilmesinin yönüne paralel olarak yönlendirmek (yani potansiyel kesme çatlaklarına dik olarak) gerektirir. Tipik kesme güçlendirme şemaları Şekil 2.3.'te gösterilmiştir [36].

Elyaf yönlendirme ve dağılımları	Yapışma Şekli		
 $\beta = 90^\circ$			
 $0 \leq \beta < 180^\circ$			
 $0 \leq \beta < 180^\circ, 0 \leq \phi < 180^\circ$			
 $\beta = 90^\circ$			
 $0 \leq \beta < 180^\circ$			
 $0 \leq \beta < 180^\circ, 0 \leq \phi < 180^\circ$			

Şekil 2.3. Harici bağlı FRP'yi kullanan tipik kesme kuvvetlendirme şemaları

2.3.2. Eğilmeye karşı güçlendirme yöntemleri

Betonarme kirişlerin eğilmeye karşı güçlendirilmesi ve onarımı için birçok yöntem geliştirilmiştir. Betonarme kirişlerin alt yüzeyinden kiriş boyuna doğrultuda FRP kompozitlerle etkili şekilde güçlendirilebilmektedir (Şekil 2.4.) [40-41].



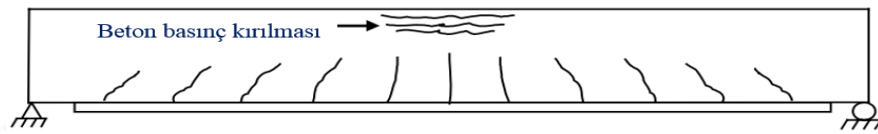
Şekil 2.4. Betonarme kirişler eğilmeye karşı FRP levha ve şeritlerle güçlendirilmesi

2.4. FRP ile Güçlendirilen Kirişlerin Kırılma Biçimleri

Geçmiş yıllarda FRP kompozitler kullanılarak güçlendirilmiş kirişler üzerine yapılan deneysel ve sayısal çalışmalarda, farklı göçme modları (kırılma şekilleri) gözlenmiştir [31, 39]. FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin kırılma biçimleri alt başlık halinde anlatılmıştır.

2.4.1. Beton basınç kırılması

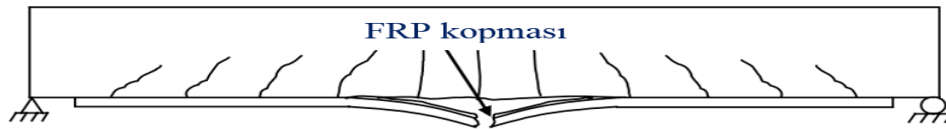
FRP malzeme kopma dayanımına ulaşmadan basınç bölgesindeki betonun çatlaması sonucu oluşur (Şekil 2.5.). Donatı, betonun çatlama gücünden elde edilen yenilgi şeklindedir ve akma dayanımına ulaşır. Genellikle betonarme kirişlerde düşük beton dayanımı ile görülen bir çatlama türüdür. Yükün uygulandığı alandan başlayıp betonun kırılmasıyla FRP'nin ayrılması çatlama mekanizmasıdır [31].



Şekil 2.5. Güçlendirilmiş kirişte basınç kırılması

2.4.2. FRP kopması

Donatı akma dayanımına ulaştığı anda beton basınç bölgesinde çatlak oluşumu başlar. Gerilmenin artmasıyla birlikte FRP maksimum eğilmenin olduğu bölgede kopma oluşur (Şekil 2.6.) [31].



Şekil 2.6. Güçlendirilmiş kirişte FRP kopma davranışı

2.4.3. Beton kesme kırılması

Betonarme kirişin ucundaki levhaların ucunda eğilme gerilmesinin etkisi altında çatlakların oluşmasından sonra, ince kalınlıktaki beton kaplamanın dahil edilmesiyle FRP'nin kiriş tabanından sıyrılmasıyla meydana gelen durumdur. Kirişin ortasındaki eğilme gerilmesi ile kesme gerilmeleri. FRP plakasının mesnete kadar uzatılmaması. Sonucunda oluşabilir (Şekil 2.7.) [31].



Şekil 2.7. Güçlendirilmiş kirişte kesme kırılması

2.4.4. Plak uç delaminasyonu

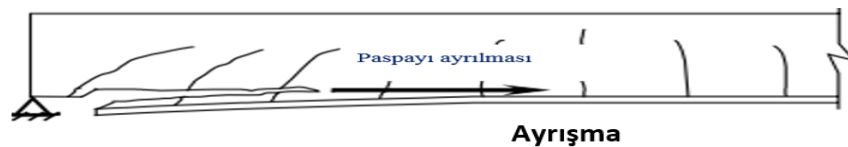
Beton ara yüzündeki ayrıştırma plaka uç noktasındaki yüksek, normal ve kayma gerilmelerinin bir sonucu olarak, uç bölgedeki yapıştırıcının ayrışması ile başlar. FRP levha çok ince bir beton tabaka ile ayrılmıştır (Şekil 2.8.) [31].



Şekil 2.8. Güçlendirilmiş kirişte plak uç delaminasyonu

2.4.5. Beton paspayı ayrılması

Levha uç noktası çatlamasında yüksek normal ve kesme gerilmeleri meydana gelir. FRP plakası, artan yükleme ile beton kapak ile ayrılmıştır. Betonarme kirişin FRP başlangıç ucu noktasından başlayarak çekme güçlendirmesinin içinden çatlaması sonucu oluşan yenilme şeklidir. Bu yenilme formu deneysel çalışmalarda en sık görülen tiptir (Şekil 2.9.) [31].



Şekil 2.9. Güçlendirilmiş kirişte paspayı ayrılması

2.5. Kirişlerin Güçlendirilmesinde FRP Uygulamaları

Betonarme kirişlerin çekme bölgelerine ve düşey yüzeylerine FRP, epoksi ile yapıştırılarak kirişler güçlendirilmektedir. Böylece kirişlerin eğilme ve kesme mukavemeti arttırılmaktadır. Kirişlerdeki uygulamaya ait örnekler Şekil 2.10.'da görülmektedir [39] [40].



Şekil 2.10. FRP malzemenin kirişlerde uygulanması

2.6. Literatür Taraması

Bu araştırmada, FRP kompozitler ile güçlendirilmiş ve statik veya herhangi bir tür yükleme koşullarına maruz kalan betonarme kirişleri analiz etmek için yakın zamanda yapılan deneysel ve analitik çalışmalar incelenmiştir. Literatürde yapılan betonarme kirişlerin ABAQUS ve farklı sonlu elemanlar paket programları kullanılarak modellenmesi üzerine yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Arduini ve Nanni (1997), yaptıkları çalışmada CFRP kompozitlerle çekme bölgesinden güçlendirilmiş, hasarlı ve hasarsız kirişler için; CFRP türü, tabaka sayısı ve konumu, farklı yüzey teknikleri farklı kiriş boyutları üzerine deneysel ve analitik çalışma yapmışlardır . ABAQUS paket programı ile yaptıkları analitik çalışmalarında, beton basınç ve çekme modelleri için CEB-FIB model kodu 90'ı kullanmışlardır. Boyuna donatılar için epoksi güçlendirilmiş plastik, FRP ve lineer elastik malzeme modellerini kullandıkları belirlenmiştir. SEM modeller, deney sonuçlarından daha sert davranışlar sergilemiş ve sonuç olarak, beton-FRP arayüz davranışı için kullanılan mükemmel güçlendirme durumunu göstermiştir [41].

Biggs ve arkadaşları (2000), sonlu eleman analizi ABAQUS paket programıyla betonarme kirişlerinin davranışlarının modellenmesi değerlendirilmiş ve ABAQUS'ta beton kabuk (shell), kullanılan çelik donatılar ABAQUS programında ise çubuk (beam) elemanı simüle ederken arasındaki etkileşimi tanımlayarak bunların aralarında olduğu görülmüştür. Dağınık çatlama (smeared ceacking) modelini kullanıp deneylerle elde edilemeyen davranışları tahmin etmiştir [42].

Rahimi ve Hutchinson (2001), yaptıkları çalışmalarında basit mesnetli kiriş üzerine deneysel ve nümerik modelini yapmışlardır. Deneysel çalışmalarında yapılan kiriş 200×150 mm kesit olarak 2300 mm uzunluğundadır. Kirişler için 54-69 MPa basınç dayanımında beton kullanılmıştır. Kirişler, CFRP ve GFRP plakalarının kirişlerin alt yüzeyine levha olarak yapıştırılarak takviye edilmişlerdir. Kirişlerdeki ana değişkenler boyuna donatı, FRP ve FRP katman miktarıdır. CFRP levhaları, kirişin sertliğini artırır, maksimum yük kapasitesi % 230 artmıştır. Kiriş kırılma şekilleri incelediğinde, paspayı kopması ve plaka deformasyonu biçiminde olduğu tespit edilmiştir. İki boyutlu sonlu eleman modelinin sonuçlarını deney sonuçları ile karşılaştırmış ve yakın sonuçlar elde etmişlerdir [43].

Husuan-Teh Hu ve arkadaşları (2004), FRP kompozitlerle güçlendirilmiş dikdörtgen kirişlerin maksimum yükleme kapasitesini için FRP kompozitler ya altta ya da her iki tarafta tahmin etmek için ABAQUS programı ile sayısal analizler yapmıştır. Kiriş uzunluğu, elyaf yönlendirmesi, ve donatı oranı, kiriş maksimum mukavemeti üzerindeki etki araştırılmıştır. Analizlerde, iki tür uzun ve kısa kiriş, iki tip donatı oranı (daha az ve daha fazla) kullandığı belirtmiştir. Nümerik çalışmalarda kullanılan çelik donatılar için elastik ve tam plastik model kullanılmıştır. Beton modellemek için, Saenz tarafından önerilen gerilme-şekil değiştirme modelini kullanmışlardır. Dağılımlı çatlak modelini analizlerde kullanarak, burada 0.001'lik çekme sertlik değerini ve maksimum kesme azaltması katsayısını kabul etmişlerdir. Kirişler modellemede $\frac{1}{4}$ (çeyrek), beton için 8 noktalı katı eleman ve FRP'deki 4 düğüm noktalı kabuk elemanı olarak modellenmiştir. Donatı, rebar layer özelliği kullanılarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak, FRP güçlendirilmiş kirişin çok kuvvetlendirildiği ve

çekme alanından gelen davranışının kiriş uzunluğu ile çok fazla değişmediği, ancak önemli ölçüde azaldığı ve FRP kompozitler güçlendirilen kirişin davranışını önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir [44].

Akbarzadeh ve Maghsoudi (2010), yapmış oldukları çalışmada altı adet 15×25 cm dikdörtgen kesitli 600 cm uzunluğunda iki açıklıklı betonarme kirişleri CFRP, GFRP ve hibrit olarak güçlendirme çalışmaları yapmışlardır. Kirişlerde 74 MPa ve daha yüksek basınç dayanımına sahip beton kullanmışlar ve kirişlerin alt ve üst bölgelerine 2Ø16"boyuna donatı yerleştirmişlerdir. FRP kompozitleri kirişlerin pozitif ve negatif moment bölgelerine yerleştirmişler ve kirişleri her bir açıklığın ortasından yükleyerek test etmişlerdir. FRP tiplerinin kiriş güçlendirmeye etkileri yük-sehim, kırılma modu, moment ve yük kapasitesi, moment yeniden dağılım ve süneklik açısından araştırılmıştır. CFRP veya GFRP ile güçlendirilen kirişler hibrit ile karşılaştırıldığında yük taşıma kapasitesinde önemli artışlar elde edilmiştir. GFRP ve CFRP ile yapılan güçlendirmeye göre karbon ve cam elyafın bir kombinasyonundan oluşan Hibrid FRP laminatlar, kirişlerin doğrusal olmayan davranış sergilemelerine katkıda bulunmuştur. Sürekli kirişlerde minimum moment dağılımlarını yeniden düzenlemede hibrit kullanımının gerekli olduğu belirtilmiştir. Betonarme sürekli kirişlerin güçlendirilmesinde CFRP ve GFRP ile yapılan güçlendirme yerine hibrit kullanımı taşıma gücü, süneklik ve momentin tekrar dağılım oranında önemli bir şekilde artırdığı belirtilmiştir [45].

Attari ve arkadaşları (2012), yaptıkları çalışmada eğilmeye karşı güçlendirilmiş 7 adet betonarme kirişi dört nokta eğilme deneyi test edilmiştir. Kirişler 150×16×10 cm boyutlarında olup kirişlerin alt bölgelerine iki adet Ø10"luk üst bölgesine ise iki adet Ø8"lik donatılar konulmuş, kirişler basınç dayanımı 39 MPa olan beton kullanılarak üretilmiştir. Kirişlerin bir adeti kontrol elemanı olarak üç adeti cam veya karbon kumaşla enine ve boyuna sarılarak güçlendirilmiş, diğer üç adedi ise karbon ve sekiz cam kumaşlarla enine ve/veya boyuna sarılarak hibrit olarak güçlendirilmiştir. Yapılan bu güçlendirilme çözümleri dayanım, sertlik, süneklik ve kırılma modları açısından ele alınarak incelenmiştir. Cam ve karbon kumaşların beraber kullanılması betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde etkili bir sonuç vermiştir. Kontrol kirişine kıyasla %114

dayanım artışı elde edilmiştir. Aynı zamanda bu artış aşırı süneklik kaybına sebep olmamıştır. Aksine, hibrit güçlendirme şeklinin kontrol kirişine göre 0.9 oranında daha süneklik olduğu gözlemlenmiştir. U-ankrajlı güçlendirilmesi eğilme mukavemetini, kirişlerin daha fazla deformasyonlar yapma kapasitesini artırarak ve iç kuvvetlerin yeniden dağıtılmasına katkıda bulunarak en iyi sonucu vermiştir. Yapılan diğer güçlendirmeler karşılaştırıldığında yalnız cam elyaf malzemenin güçlendirilmede kullanımı veya iyi bir kopma uzamasına sahip tek katlı hibrit kompozitin kullanımı kirişlerin sünekliğini artırdığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar genellikle FRP ile güçlendirilmiş kirişlerin kırılma anı olarak göçtüğü ve sünekliğinde düşüş olduğu gibi kabul edilen görüşleri çürütmektedir. Güçlendirilmesi yapılan betonarme elemanın eğilme dayanımını tespit etmek için bir analitik model geliştirilmiştir. Model sonuçları güçlendirilen betonarme kirişlerin davranışını tam olarak tahmin ettiğini göstermiştir. Mevcut testler aynı zamanda betonarme yapılar için çift kat cam-karbon FRP kumaşın maliyet etkinliğini bir güçlendirme şekli olarak ortaya koymaktadır. Yapılan çalışmada deney sayısının oldukça az olduğu kirişlerin üretiminde kullanılan beton basınç dayanımının oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Çalışmada tek bir kiriş parametresi üzerinde çalışma yapılmıştır [46].

Zidani ve arkadaşları (2015), betonarme kiriş boyutları 150*150 *1250 mm üzerinde analitik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada FRP levhaları ile tamir edilen başlangıçta hasar görmüş beton kirişlerin eğilme davranışını simüle etmek için öncelikle daha önce yapılan deneylerle çalışmışlardır. Yükler kirişe ilk yüklendiğinde hasar görmüş olan FRP levhalar uygulanmıştır. Bundan sonra kırılmaya kadar yeniden yüklenmiştir. Yapılmış olan analitik çalışma sonlu eleman metodu ile ABAQUS programı yardımıyla deneysel çalışmada kullanılan özelliklerini, güçlendirme çalışmalarında FRP levhalarda farklı kalınlık (1mm, 2mm, 3mm) arayüzey kesme gerilmelerin dağılımını, çatlak paternin ve kırılma mekanizmasının etkisini araştırmışlardır. Ayrıca levha kalınlığının kazanılan yük kapasitesinin hasar derecesi açısından da etkisi incelenmiştir. Kontrol kirişten yapılan güçlendirilen kirişler daha fazla hasar gördüğünü ortaya koymuştur. Bunun için yüksek hasarlı olan kirişlerde güçlendirme yaparken en olası beklenen hata, herhangi bir FRP levha kalınlığı için levha bağlantısıdır [47].

Djeddi ve arkadaşları (2016), yaptıkları çalışmada Eğilme ve kesme karşı güçlendirilmiş betonarme kirişlerinin hibrid FRP sistemleri ile esnek-deneysel ve sayısal modellemesi üzerinde deneysel ve analitik çalışmalar yapılmıştır. Basınç ve çekme dayanımı 22 MPa ve 3.6 MPa'dır. Donatıların sınıfı S420 (çekme yüzünde Ø10 ve basınç yüzünde Ø8), Elastisite modülünün 210 GPa ve akma dayanımı 450 MPa, (etriyeler Ø6 çaplı) Dıştan bağlı hibrid kumaş takviyeli polimer kompozitlerinin farklı kombinasyonları ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin deneysel ve sayısal bir araştırması incelenmiştir. Betonarme kirişlerin yük kapasitesini, sertliğini ve sünekliğini arttırmak için ve (bu istenen üç istenen mekanik özelliği sağlayan tipik bir takviye kirişi modeli elde etmek için) her bir elyafli kumaşın özellikleri birleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların incelemelerine ek olarak, deneysel çalışmalarında eğilme ve kesmeye karşı yük ve sehim ilişkileri, kırılma modlarını öngörmek için ABAQUS kullanılarak sayısal simülasyon geliştirilmiştir. Sonlu eleman modeli (ABAQUS) analitik çalışmalarında elde edilen sonuçlar ilgili deney sonuçları ile karşılaştırılarak yapılmıştır, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar SEM analiz ile incelediğinde iyi bir uyum gösterdiği belirtilmiştir [48].

Sagher ve Abed (2017), yaptıkları çalışmada betonarme kısa kirişlerin kesme dayanımının artırılması amacıyla parametrik bir çalışma yapılmıştır. GFRP donatılarıyla güçlendirilmiş kısa betonarme kirişlerin davranışı sunulmuştur. Parametrik analizi, üç boyutlu bir sonlu eleman geliştirilerek sayısal olarak yürütülmüştür. Her ikisini de dikkate alan eleman modeli geometrik ve materyal doğrusal olmayanlardır. SEM mevcut deney sonuçlarına göre doğrulanmış ve daha geniş bir parametre aralığı göz önüne alınarak genişletilmiştir. GFRP-RC ile güçlendirilmiş olan betonarme kirişlerin kesme dayanımı GFRP üzerindeki boyuna donatı oranının, açıklık oranının ve kirişin yüksekliğinin etkisi incelenmiştir. Sonuçlar kirişlerin donatı oranının arttığını göstermiş, güçlendirmiş oranı kısa kirişlerin kesme dayanımı arttırılmıştır. Kirişlerin yüksekliğindeki artış, kirişlerin kesme kapasitesinde bir artışa yol açtığı görülmüştür. Ayrıca yapılmış olan parametrik çalışmalar üç parametre betonarme kısa kirişler üzerinde yer alanı incelenmiştir [49].

Hawileh ve arkadaşları (2018), betonarme kirişler üzerine deneysel ve nümerik çalışmayı ile Elyaf Takviyeli Polimerler (FRP), dıştan HSF kompozit levhalarla güçlendirildiğinde, betonarme kirişlerin eğilme performansı araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarında, üretilen betonarme kirişler dikdörtgen kesit ve kirişin boyutu 120×240×1840 mm'dir. Deneysel sonuçları, Şahit kiriş numunesi kontrolüyle karşılaştırılmıştır. Beton basınç dayanımı 35 MPa. Kullanılan güçlendirme malzeme Elastisite modülü E190 Gpa. Güçlendirilmiş numunelerin sünekliği, beton kirişlerinin altına epoksi yapıştırıcılar ile dışarıdan güçlendirilen HSF tabakalarının etkili bir eğilme dayanımı kompozit malzeme olarak hizmet edebileceği sonucuna varılmıştır. HSF tabakaları, güçlendirilmiş kirişlerin kontrol kirişlerine göre %29 ila %62 yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Tüm Güçlendirilmiş kirişler, beton kapak ayrışma nedeniyle eğilme kırılma şekli olmuştur [50].

BÖLÜM 3. BETONARME KİRİŞ NUMUNELERİN SONLU ELAMAN METODU ANALİZİ

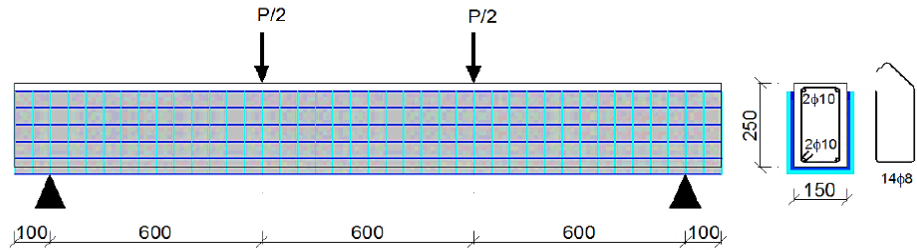
Son yıllarda daha hızlı ve çabuk sayısal hesap yöntemlerinde bilgisayar programları etkin olarak kullanılmaktadır. Sayısal çözüm yöntemi inşaat mühendisliği, makine mühendisliği, zemin mekaniği, uçak mühendisliği ve akışkanlar mekaniği gibi alanlarda problemlerin çözümü için yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar metotları (SEM), analitik olarak çözümü mümkün olmayan veya karmaşık olan mühendislik problemlerinin çözülmesinde kullanılan sayısal bir yöntemdir. Bu tür bilgisayar programlarından biri olan ABAQUS doğrusal ve doğrusal olmayan problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemiyle başarılı bir çözüm yapmak öncelikle malzeme modellerinin gerçeğe yakın şekilde tanımlanmasıyla mümkün olmaktadır. Bu bölümde FRP kompozitler ile kesme ve eğilmeye karşı güçlendirilmiş betonarme kirişlerin deneysel çalışma sonuçları verilmiş ve kiriş numunelerine ait malzeme modelleri üzerine çalışılmıştır. Alt bölümlerde deneysel çalışma sonuçları ve SEM model çalışmaları detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

3.1. FRP ile Güçlendirilen Betonarme Kirişler

Bu çalışmada kullanılan deneysel çalışma sonuçları “Beton Dayanımı Düşük Betonarme Yapı Elemanlarının Lifli Kompozitler ile Güçlendirilmesi ve Karşılaştırılması” başlıklı doktora tez çalışmasından alınmıştır[40]. Deneysel çalışma sonuçları kullanılan kiriş numunelerine ait bilgiler alt başlıklar halinde aşağıda sunulmuştur.

3.1.1. Betonarme Kiriş Numune Özellikleri ve Araştırma Parametreleri

Betonarme kirişler numuneleri 15×25 cm kesitinde ve 200 cm uzunluğundadır. Betonarme kiriş numunelerde S420 sınıfı nervürlü çelik donatı, C16/20 betonu tek doğrultulu karbon ve cam elyaf ve elyafın kiriş yüzeyine yapıştırılmasında epoksi reçine kullanılmıştır. Kiriş kesitinin altı ve üst bölgesine 2Ø10'luk eğilme donatısı, Ø8/15'lik kesme donatısı kullanılmıştır. Kirişler tek doğrultulu kumaşlar ile eğileme ve kesme kuvvetine karşı çeşitli şekillerde güçlendirilmiştir. Kirişler üzerinde dört nokta eğilme deneyi yapılmıştır (Şekil 3.1.). Eğilme deneyi ile betonarme kirişlerin eğilme ve kesme yükü taşıma kapasiteleri ve sehim davranışları incelenmiştir. Hazırlanan kiriş numunelerine ait kısaltma isimleri ve güçlendirme şekilleri Tablo 3.1.'de verilmiştir.

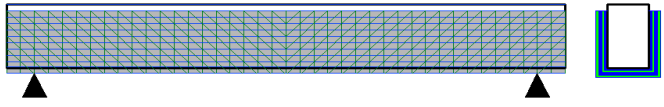
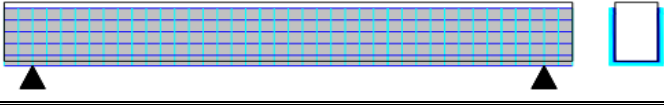
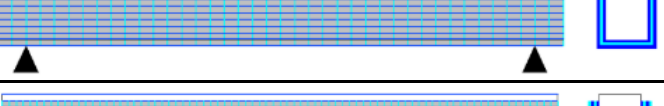


Şekil 3.1. Betonarme kiriş elemanın geometrisi ve yükleme durumu

Tablo 3.1. Betonarme Kiriş numunelerin isimleri ve güçlendirme bilgileri

Kiriş ismi	Kiriş şekilleri	Kiriş özellikleri
Ş.K		Şahit Kiriş
CFRP11		CFRP ile 1 kat boyuna, 1 kat 90° enine sargılı
CFRP22		CFRP ile 2 kat boyuna, 2 kat 90° enine sargılı

Tablo 3.1. (Devam)

CFRP21-1		CFRP ile 2 kat boyuna, 1 kat 90° enine, 1 kat 45° enine sargılı
GFRP11		GFRP ile 1 kat boyuna, 1 kat 90° enine sargılı
GFRP21		GFRP ile 2 kat boyuna, 1 kat 90° enine sargılı
GFRP22		GFRP ile 2 kat boyuna, 2 kat 90° enine sargılı
GFRP21-1		GFRP ile 2 kat boyuna, 1 kat 90° enine, 1 kat 45° enine sargılı
GFRP20		GFRP ile 2 kat boyuna sargılı

3.1.2. Betonarme Kiriş numunelerde kullanılan malzeme bilgileri

Betonarme kiriş numunelerde kullanılan betonun ortalama basınç dayanımı, şekil değiştirme kapasitesi ve Elastisite modülü sırasıyla, 17,13 MPa, 0,0025, 19450 MPa, çelik donatıların akma dayanımı boyuna donatı ve etriyede sırasıyla, 479 MPa ve 368 MPa, çekme dayanımı ise sırasıyla 599 ve 525 MPa'dır. Betonarme kiriş numunelerin güçlendirilmesinde kullanılan epoksi reçine (Tablo 3.2.), Cam ve karbon elyafa ait bilgiler, Tablo 3.3. ve Tablo 3.4.'te verilmiştir.

Tablo 3.2. Sikadur 330 epoksi yapıştırıcısının özellikleri

Malzeme Özellikleri	Epoksi Teçine
Yoğunluk (g/cm ³)	1,31
Çekme dayanımı (MPa)	30
Çekme elastik modülü (GPa)	4,50

Tablo 3.3. Güçlendirmede kullanılan Sika Wrap 430 G/25 malzemesinin özellikleri

Malzeme özellikleri	Cam elyaf kumaş
Yoğunluk (g/cm ³)	2,56
Çekme dayanımı (MPa)	2300
Çekme elastik modülü (GPa)	76
Dokuma kalınlığı (mm)	0,166

Tablo 3.4. Güçlendirmede kullanılan Sika Wrap 300 C/60 malzemesinin özellikleri

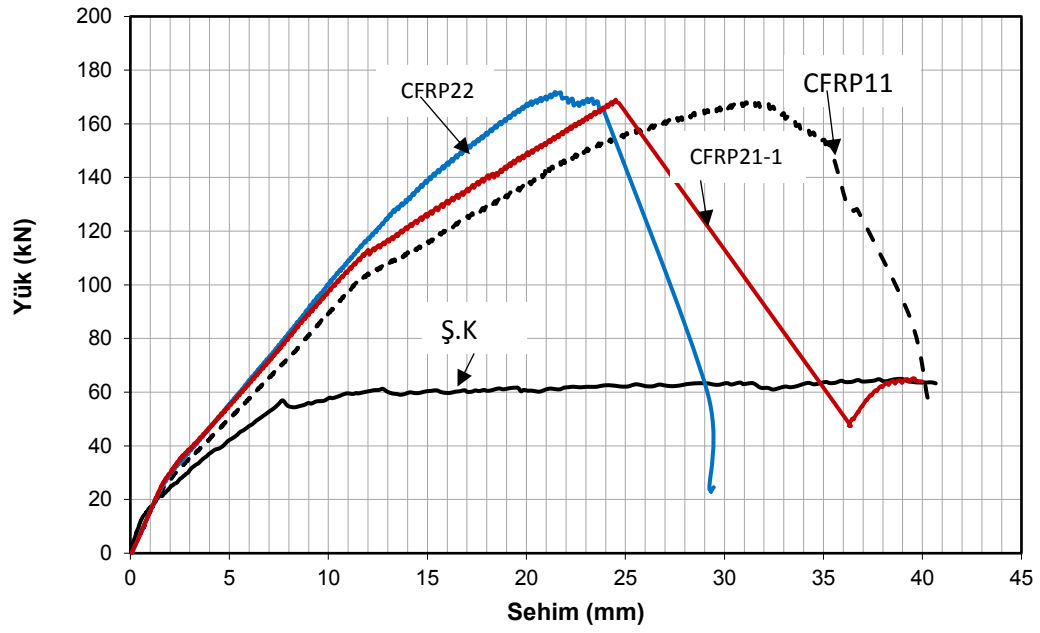
Malzeme özellikleri	Karbon elyaf kumaş
Yoğunluk (g/cm ³)	1,79
Çekme dayanımı (MPa)	3900
Çekme elastik modülü (GPa)	230
Dokuma kalınlığı (mm)	0,17

3.1.3. Güçlendirilmiş Betonarme Kirişler Numunelerin DeneySEL Sonuçları

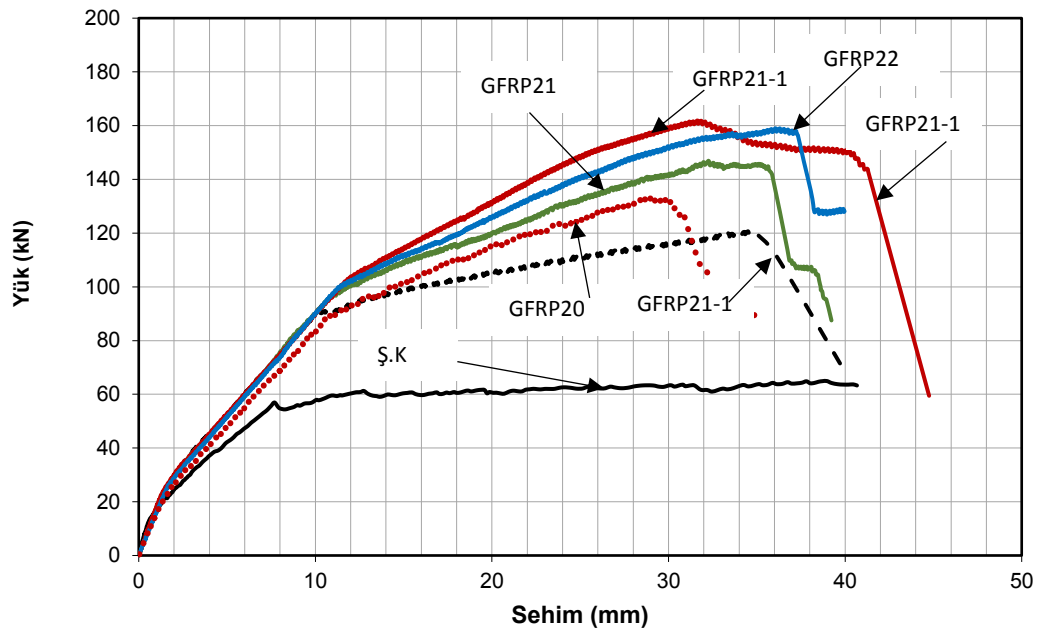
Şahit kirişi, CFRP ve GFRP ile güçlendirilen kirişlerin dayanımları Tablo 3.5.'te ve kirişlerin eğilme deneyi ile elde edilen yük sehim grafikleri Şekil 3.2. ve Şekil 3.3.'te sunulmuştur.

Tablo 3.5. CFRP betonarme kirişlerin deneysel yük ve sehim değerleri

Durum	Kırılma Yük (kN)	Sehim (mm)
Ş. K	64,9	38,9
CFRP11	168,0	31,1
CFRP22	171,8	21,5
CFRP21-1	168,0	24,5
GFRP11	121,17	34,9
GFRP22	159,02	36,1
GFRP21-1	161,93	31,6
GFRP21	146,89	32,2
GFRP20	132,4	29,3



Şekil 3.2. Şahit kiriş ve CFRP ile güçlendirilen kirişlerin deneysel yük-sehim grafikleri

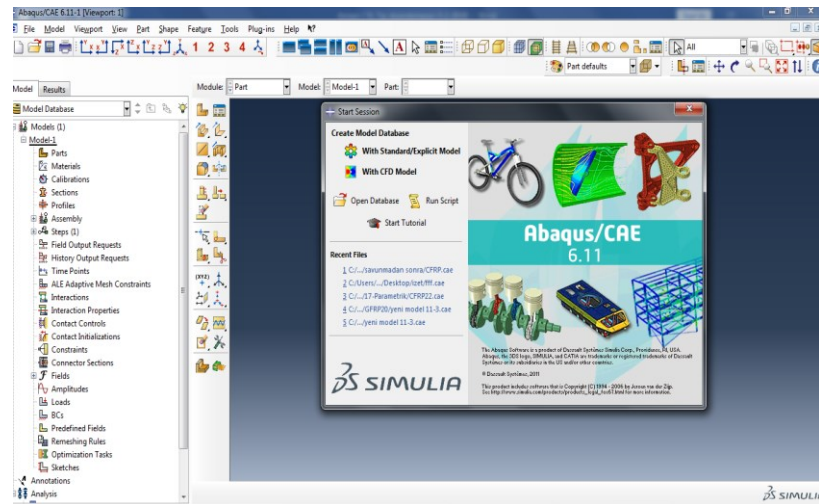


Şekil 3.3. Şahit kiriş ve GFRP ile güçlendirilen kirişlerin deneysel yük-sehim grafikleri

3.2. ABAQUS Sonlu Elemanlar Programı

3.2.1. Program ara yüzü

ABAQUS sonlu elemanlar programı, statik ve dinamik problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. ABAQUS programında yapılan her tanımlama, belli bir birim altında toplanmıştır. Program, malzeme özellikleri tanımlanması ve modellemesi, analiz, çözüm yönetimi ve sonuç değerlendirmesi işlemlerini bir arada, tek bir kullanıcı ABAQUS/CAE ara yüzünde sunmaktadır (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. ABAQUS/CAE 2016 Ara yüz ekranı

3.2.2. Kullanılan birimler

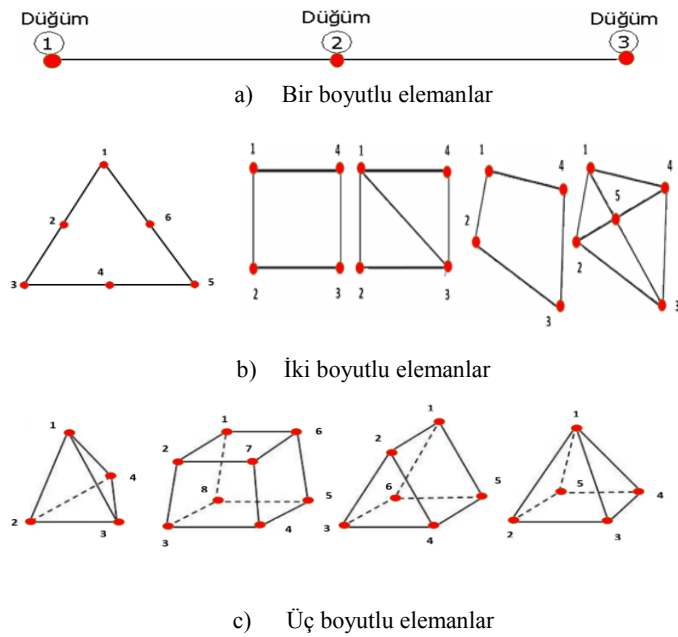
ABAQUS'te kullanılan üç birimin sistemleri SI, SI (mm), US Birim (inç) mevcuttur. Malzeme özelliklerinin tanımlanması, part oluşturulması ve yükleme tanımlanması için aynı birimin sistemini kullanmak gerekmektedir. Bu çalışmada sonlu elemanlar modellenmesi için SI (mm) birim sistemi kullanılmıştır (Tablo 3.6.) [51].

Tablo 3.6. ABAQUS'te kullanılan birimler

Miktar	SI	SI (mm)	US (in)
Uzunluk	m	mm	in
Yük	N	N	lbf
Kütle	kg	Tonne (10^3 kg)	$\text{lbf s}^2/\text{in}$
Zaman	s	s	s
Gerilme	$\text{Pa}(\text{N}/\text{m}^2)$	$\text{MPa}(\text{N}/\text{mm}^2)$	$\text{psi}(\text{lbf}/\text{in}^2)$
Enerji	J	$\text{mJ}(10^{-3}\text{J})$	in lbf
Yoğunluk	Kg/m^3	tonne/mm^3	$\text{lbf s}^2/\text{in}^4$

3.2.3. Eleman Tipleri

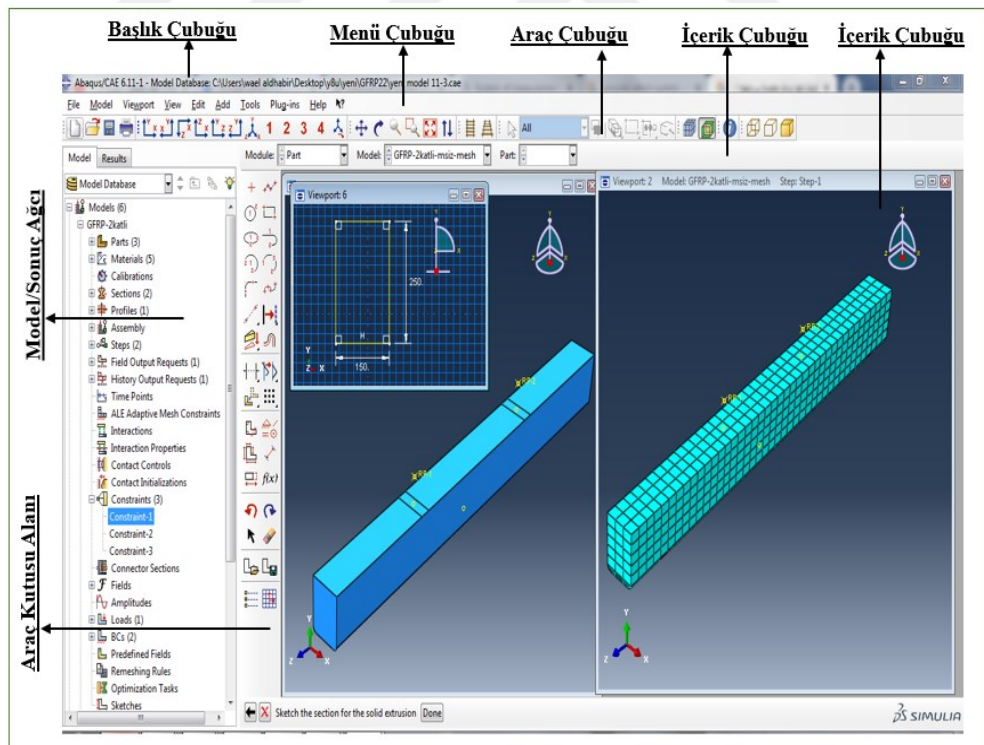
ABAQUS eleman kütüphanesinde 1 boyutlu (Şekil 3.5.a), 2 boyutlu (Şekil 3.5.b) ve 3 boyutlu sürekli elemanlar mevcuttur. Birinci derece elemanlar düğüm noktalarında deplasmanları hesaplamak için lineer enterpolasyon kullanırken, ikinci derece elemanlar kuadratik enterpolasyon kullanmaktadırlar. Üç boyutlu (Şekil 3.5.c) sürekli elemanlar kullanarak ABAQUS'te eleman doğrulanması gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada üç boyutlu sonlu elemanlar türü kullanılmıştır (Şekil 3.5.)[52].



Şekil 3.5. Analizlerde kullanılan eleman tipleri

3.2.4. Ana pencerenin bileşenleri

ABAQUS programında ana pencerenin bileşenleri Başlık Çubuğu, Menü Çubuğu, Araç Çubuğu, İçerik Çubuğu, Model Ağacı, Araç Kutusu Bölgesi ve Çizim Bölgesinden oluşmaktadır. Başlık Çubuğu, ABAQUS /CAE'nin versiyonunu ve model veri tabanının ismini belirtir. Menü Çubuğu, mevcut bütün menüleri içerir. Hangi modülü seçilirse o modül ile ilgili menüler gelmektedir. Araç Çubuğu, çok kullanılan bazı menülere hızlı erişimi sağlamaktadır. İçerik çubuğu, ABAQUS/CAE programı birtakım modüller sunar. Her bir modül oluşturulan modelin farklı bir aşamasına denk gelmektedir. İçerik çubuğunda bulunan “Modüle listesi bu modüller arasında geçiş yapmayı sağlamaktadır. Model Aracı, yapılmış işlem adımları bu araçta görülebilir ve tamamlanan modellerin çalışmasının üzerinde değişiklik yapabilme imkânı sağlamaktadır. Çizim bölgesi, oluşturacak parçalarının çizim ekranıdır (Şekil 3.6.) [52].



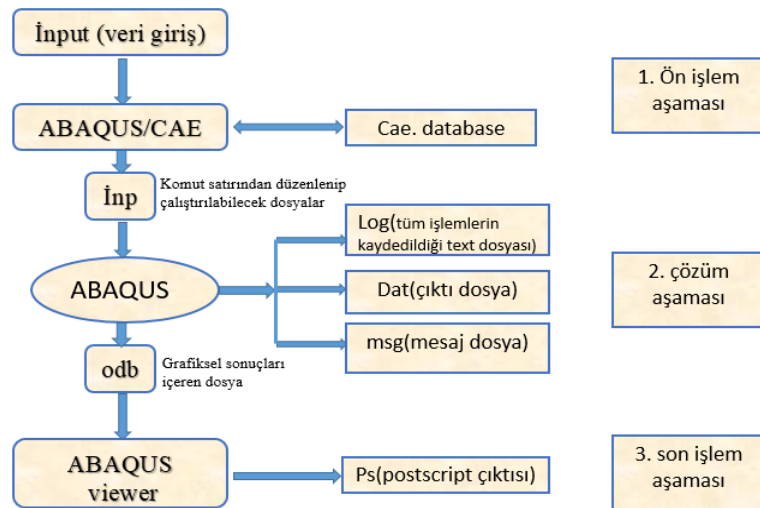
Şekil 3.6. ABAQUS'te ana pencerenin bileşenleri

3.2.5. İşlem adımları

ABAQUS'te işlem aşamaları sırasıyla ön işlem aşaması, çözüm aşaması ve son işlem aşamasından oluşmaktadır. Programın Part bölümünde, iki ya da üç boyutlu geometrik parçaların oluşturulması işlemi yapılabilmektedir.

Malzeme özellikleri (Property) bölümünde, malzeme özellikleri tanımlanması sağlanmaktadır. Bu çalışmada beton özelliklerinin tamamlanmasında Property kısmında bulunan Beton Hasarlı Plastisite yöntemi kullanılmıştır. Assembly bölümünde, parçaların birbirlerine montajının oluşturulması işlemi gerçekleştirilmektedir. Step bölümünde, analiz tipi, analiz adımları, çıktıları, analiz yapmak için kullanılacak çözücü ve çözüm tipi tanımlanması gerçekleştirilmektedir.

Yük kısmında, yükleme tipi, yükleme miktarı ve sınır şartları tanımlanması gerçekleştirilmektedir. Çözüm ağı (mesh) kısmında, geometri üzerine istenecek sayıda ve aralıkta nokta atanmaktadır. Job bölümünde, Çözüm yönetimi ve izleme işlemleri gerçekleştirilmektedir. ABAQUS'te İşlem Adımları Şekil 3.7.'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.7. ABAQUS'te işlem adımları

3.3. Kiriş malzemelerinin modeli

CFRP ve GFRP kompozitlerle güçlendirilmiş betonarme kiriş numunelerinin sonlu eleman modelleriyle doğrulaması çalışılmıştır. Öncelikle malzeme modelleri üzerinde çalışılmıştır. Beton ve çelik donatı malzeme bilgileri deneysel çalışma sonuçlarından frp ve epoksinin malzeme bilgileri ise üretici firmadan alınmıştır [39]. Alınan malzeme bilgileri ile araştırmacıların kurmuş oldukları malzeme davranış modelleri ile malzeme davranışları üzerine çalışılmıştır.

3.3.1. Beton basınç modeli

Sonlu elemanlar yöntemiyle başarılı bir çözüm yapmak öncelikle malzeme modellerinin gerçeğe yakın şekilde tanımlanmasıyla mümkün olmaktadır. Beton bir yapı malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmasına rağmen, çeşitli yükleme durumlarında fiziksel özellikleri ve mekanik davranışları hakkında daha ayrıntılı bilgi gereklidir. Elastik deformasyonlara ek olarak, doğrusal olmayan ve zamana bağlı deformasyonlar ayrıca yükleme sırasında meydana gelen mikro yapısal değişiklikler nedeniyle betonda da meydana gelir. Doğrusal olmayan deformasyonların ana nedenleri; iç sürtünmeden dolayı mikro çatlaklar ve kaymalar. Test numunelerinde gözlemlenen davranışların fiziksel tanımını yapmak için betonun mikro yapısı hakkında bilgi gereklidir. Bu bilgi, betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin makro düzeyde kurulmasına yardımcı olmaktadır. Burada, betonun davranışı hakkında kısa bir değerlendirme yapılmaktadır. Bu tezde Mander (Sargılı ve sargısız), Geliştirilmiş Kent-Park (Sargılı ve sargısız) ve Hognasted modeli formüller yardımıyla model oluşturmaktadır.

3.3.1.1. Mander tarafından önerilen model

Mander beton hesap modeli, yuvarlak, kare ve dikdörtgen kesitlerin, monotonik ve çevrimsel, statik ve dinamik yüklemeler altındaki sargılı beton gerilme-birim kısalma davranışını modellenmek için önerilmiştir. Modelde dairesel sargı donatısında,

dikdörtgen çevresel ve iç etriye ile çiroz gibi çeşitli enine donatı düzenleme koşulları dikkate alınmıştır. [34-57]

Sargılı beton için geliştirilecek gerilme-birim şekil değiştirme bağıntısının kuşatma elemanları tarafından oluşturulan iki eksenli basınç etkisini de dikkate alması gerekmektedir. Bu etkiyi dikkate almak için, birçok araştırmacı tarafından önermiştir (Şekil 3.8.). Sargısız beton için aşağıdaki (Denklem 3.1) kullanarak beton modellenmiştir:

$$f_c = \frac{\hat{f}_{co} x^r}{r-1+x^r} \quad \text{for } \varepsilon_c \leq 2\varepsilon_{co} \quad (3.1a)$$

$$f_c = f_{cu} - \frac{(\varepsilon_c - 2\varepsilon_{co})f_{cu}}{\varepsilon_{co}} \quad \text{for } 2\varepsilon_c < \varepsilon_c \leq 0.006 \quad (3.1b)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \text{ \& } r = \frac{\varepsilon_c}{E_c - E_{sec}} \text{ \& } E_{sec} = \frac{\hat{f}_{co}}{\varepsilon_{co}} \text{ \& } E_c = 4700 \sqrt{\hat{f}_{co}} \quad (3.1c)$$

$$f_{cu} = \frac{2\hat{f}_{co}r}{(r-1+2r)} \quad (3.1d)$$

Burada;

f_c : Sargısız betonun basınç gerilmesi,

ε_c : Basınç gerilmesinin altındaki birim şekil değiştirmesi,

$\hat{f}_{co}$: Sargısız betonun en yüksek basınç dayanımı,

ε_{co} : Basınç dayanımının altındaki birim şekil değiştirmesi ifade etmektedir,

E_c : Elastisite Modülü,

Sargılı beton için aşağıdaki (Denklem 3.2) kullanarak beton modellenmiştir.

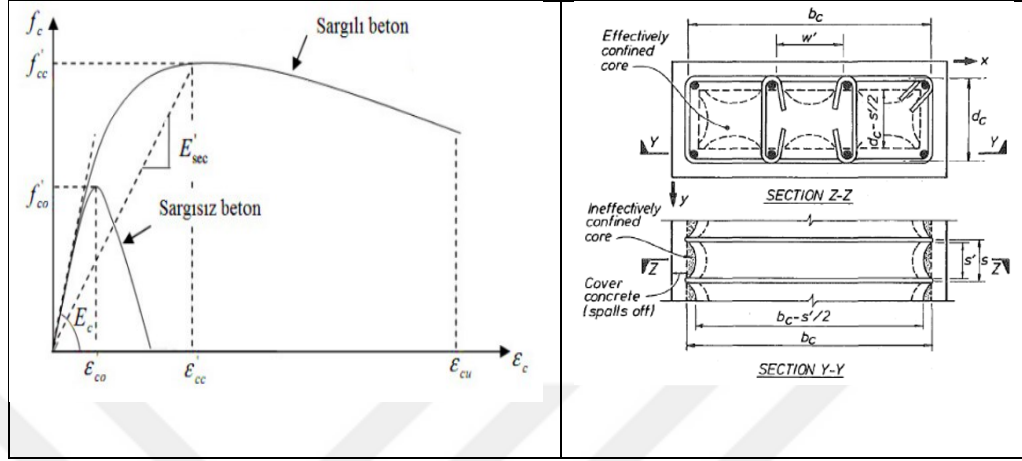
$$f_c = \frac{\hat{f}_{cc} x^r}{r-1+x^r} \quad (3.2a)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(s \frac{\hat{f}_{cc}}{\hat{f}_{co}} - 1 \right) \right] \quad (3.2b)$$

$$\hat{f}_1 = \frac{1}{2} k_e \rho_x f_{yh} \text{ \& } \rho_x = \frac{A_{sx}}{s d_c} \text{ \& } A_{sx} = \frac{\pi d^2}{4} n_{kol} \text{ \& } \rho_{cc} = \frac{A_{st}}{b_c d_c} \quad (3.2c)$$

$$\tilde{f}_{cc} = \tilde{f}_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 \tilde{f}_1}{\tilde{f}_{co}}} - 2 \frac{\tilde{f}_1}{\tilde{f}_{co}} \right) \quad (3.2d)$$

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{((w_i^{\sim})^2)}{6b_c d_c}\right) \left(1 - \frac{s^{\sim}}{2b_c}\right) \left(1 - \frac{s^{\sim}}{2d_c}\right)}{(1 - \rho_{cc})} \quad (3.2e)$$



Şekil 3.8. Mander beton davranış modeli

Dikdörtgen enine donatı için etkin kuşatılmış çekirdek beton alanı denklemlerdeki A_{sx} ve A_{sy} sırası ile x ve y doğrultusundaki toplam enine donatı alanlarını, s enine donatı merkezleri arasındaki uzaklığı, b_c ve d_c kesitin çevre enine donatısının merkezleri arasındaki boyutunu, ρ_x ve ρ_y sırası ile x ve y doğrultusundaki enine donatı oranını temsil eder (Şekil 3.8.) [53] [55].

Burada;

f_c : Kuşatılmış betondaki basınç gerilmesi,

f_{cc} : Kuşatılmış betondaki maksimum basınç dayanımı,

ϵ_c : Basınç gerilmesinin altındaki birim şekil değiştirmesi,

f_{co} : Sargısız betonun en yüksek basınç dayanımı,

Burada dikdörtgen kesitli elemanlarda;

ρ_s : Toplam enine donatının hacimsel oranını,

f_1 : Etkili sargılama basınç dayanımı;

k_e ise şu şekilde tanımlanan kuşatılma etiklik katsayısı verilmektedir,

3.3.1.2. Hognestad tarafından önerilen model

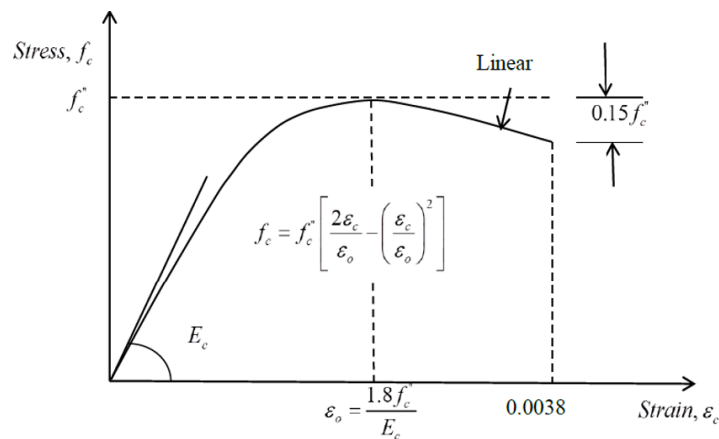
Son zamanlarda yaygın olarak birkaç beton modeller kullanmışlar, örnek olarak Hognestad tarafından önerilen bi model adı Hognestad modeli. Kullanılan beton modelde basınç dayanımı çoğunlukla silindir numune dayanımının %85'i olarak alınmıştır. Basınç dayanıma karşılık gelen strain (ϵ_{co}), f_c ; beton basınç dayanımını ($f_c = 0,85f_{ck}$), E başlangıç elastisite modülünü aşağıdaki Denklem 3.3'te göstermek üzere;

$$E = 12680 + 460f_c \text{ MPa} \quad (3.3a)$$

$$\epsilon_{co} = \frac{1.8f_c}{E_c} \quad (3.3b)$$

Düşen dallanma davranışının ölçüsü, kabul edilen faydalı beton şekil değiştirme sınırına bağlıdır. Çizginin eğimi, 0.0038 gerginlikte sonlanan sınırlandırma miktarından etkilenir. $\epsilon_{co} = 0,002$ ve $\epsilon_u = 0.0038$ alınmaktadır. Hognestad'ın beton için önerdiği gerilme-şekil değiştirme modelinde gerilme ile şekil değiştirme arasındaki ilişki ise Denklem 3.4'te belirlenmektedir (Şekil 3.9) [5] [27] [63].

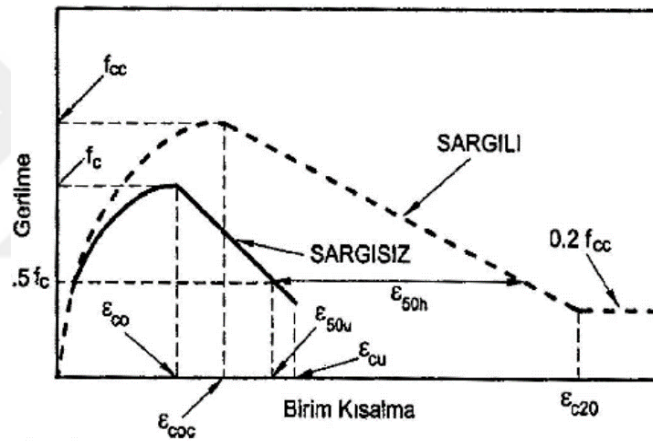
$$\sigma_c = f_c \left(\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_{co}} - \left(\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^2 \right) \quad (3.4)$$



Şekil 3.9. Gelişmiş Hognestad beton davranış modeli

3.3.1.3. Geliştirilmiş Kent-Park tarafından önerilen model

Kent ve Park (1971) hem sargılı hem de sargısız beton modeli sunabilecek bir gerilme-şekil değiştirme denklemi önerilmiştir. Basınç altında enine donatıyla sınırlandırılmış betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Yükselen eğri şu şekilde temsil edilir: (Bölge: $\epsilon_c \leq 0.002$) . Bu eğri, Hognestad'ın ikinci derece parabolünü değiştirerek, $0.85 f'_c$ 'yi f_c ve ϵ_{co} 'yu 0.002 ile değiştirerek elde edilir. En yüksek nokta tepede gerilmeye (f_c) karşılık gelen birim şekil değiştirme ϵ_{co} beton dayanımı testine göre (genelde $\epsilon_{co}=0.002$) geçildikten sonra gerilme düşer ve bu bölümde sargılı ve sargısız beton, eğimleri farklı olan iki doğru şeklinde tanımlanır (Şekil 3.10.) [56] [57].



Şekil 3.10. Gelişmiş Kent ve Park beton davranış modeli

Betonarme kesitlerde sargılı beton modeli, etriyeler veya fretler (spiral) ile sarılmış çekirdek için, sargısız beton ise aşağıdaki (Denklem 3.5) kullanarak modellenmiştir.

$$\sigma_c = f_c \left\{ \frac{2\epsilon_c}{\epsilon_{co}} - \left(\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^2 \right\} \quad (3.5a)$$

Gerilmenin azaldığı doğrusal kısım

$$\sigma_c = f_c \{ 1 - z(\epsilon_c - 0.002) \} \quad (3.5b)$$

$$Z_u = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} - \varepsilon_{co}} \quad (3.5c)$$

Sargılı Beton için aşağıdaki (Denklem 3.6) kullanılmaktadır.

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0.285f_c}{142f_c - 1000} \geq \varepsilon_{co} \quad (3.6a)$$

$$\sigma_c = f_{cc} \left\{ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0c}} - \left(\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0c}} \right)^2 \right\} \quad (3.6b)$$

$$\varepsilon_{coc} = K\varepsilon_{co} \quad (3.6c)$$

Doğrusal eğri kısmı aşağıdaki (Denklem 3.7) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{ywk}}{f_c} \quad (3.7a)$$

$$\sigma_c = f_{cc} \{1 - Z_c(\varepsilon_c - \varepsilon_{coc})\} \geq 0.2f_{cc} \quad (3.7b)$$

$$Z_c = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - \varepsilon_{coc}} \quad (3.7c)$$

$$\varepsilon_{50h} = 0,75\rho_s \left(\frac{b_k}{s} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.7d)$$

$$\rho_s = \frac{A_0 \times l_s}{s \times b_k \times h_k} \quad (3.7e)$$

Bu ifadelerde;

ε_{coc} : Sargılı betonda maksimum gerilme altındaki birim şekil değiştirme,

ε_{co} : Sargısız betonda maksimum gerilme altındaki birim şekil değiştirm,

Z_u : Sargısız beton gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin doğrusal bölümünün boyutsuz eğimi,

Z_c : Sargılı beton gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin doğrusal bölümünün boyutsuz eğimi,

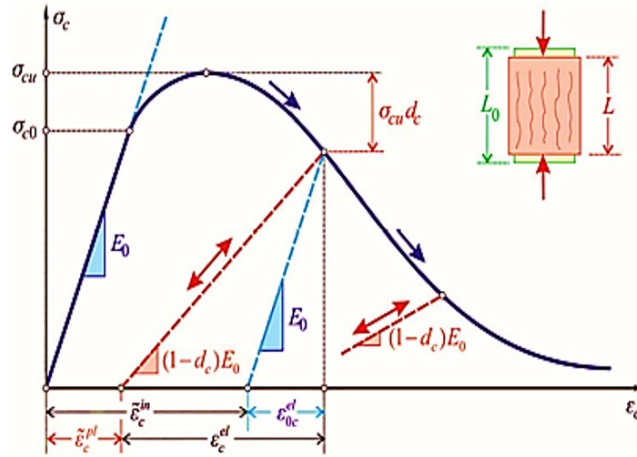
b_k : Etriye dışından etriye dışına ölçülen çekirdek beton alanının küçük boyutu (mm),

- h_k : Etriye dışından etriye dışına ölçülen çekirdek beton alanını büyük boyutu (mm)
 ρ_s : Sargı donatısının hacimsel oranı,
 σ_c : Beton basınç gerilmesi,
 ϵ_c : Beton birim şekil değiştirme,
 ϵ_{cu} : sargısız beton için en büyük birim şekil değiştirme,

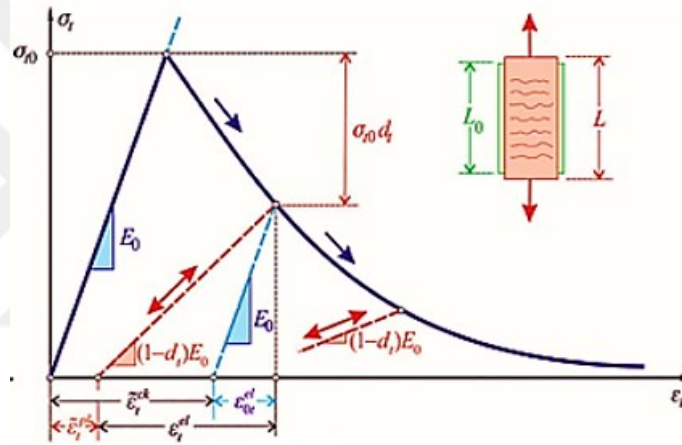
3.3.1.4. Beton hasar plastisite

Beton Hasar Plastisite (BHP) yöntemi, beton için sürekli plastisite dayalı bir hasar modelidir. BHP yöntemine göre çekme çatlaması ve basınç kırılması olmak üzere betonda temel iki önemli yenilme mekanizması vardır. Hasarın oluşumu ve elastik rijitlik değişimi tanımlamak için iki birim şekil değiştirme değişkeni sırasıyla çekme ve basma eşdeğer plastik gerilmeler olarak adlandırılmaktadır. SEM 'de eksenel basınç ve çekme altında beton davranış mekanizması sırasıyla Şekil 3.11. ve Şekil 3.12.'da gösterilmiştir [3, 27, 60].

Beton hasar plastisite yöntemi, beton için sürekli plastisiteye dayalı bir hasar modelidir. BHP yöntemine göre çekme çatlaması ve basınç kırılması olmak üzere betonda temel iki önemli yenilme mekanizması vardır. Hasarın oluşumu ve elastik rijitlikte değişimi tanımlamak için iki birim şekil değiştirme değişkeni (ϵ_t^{pl} ve ϵ_c^{pl}) sırasıyla çekme ve basınç eşdeğer plastik gerilmeler olarak adlandırılır. Betonun mekanik davranışları hakkındaki ana varsayımlar tartışılmaktadır. ABAQUS/Standart User Manual'den alınan BHP, betonun tek eksenli basınç ve çekme gerilmeleri altında gerilme-şekil değiştirme ilişkileri Şekil 3.11.'deki gibi ifade edilmektedir.



Şekil 3.11. Eksenel basınç altında beton davranışı



Şekil 3.12. Eksenel çekme altında beton davranışı

Beton davranışı çekme gerilmesine (σ_{t0}) kadar doğrusal bir ilişki izler. Maksimum çekme gerilmesine ulaşılmamasıyla betonda çekme çatlakları oluşur. Elastik rijitliğin bozulması, sıcaklığın ve alan değişkenlerinin işlevleri olduğu varsayılan iki hasar değişkeniyle (d_t ve d_c) karakterize edilmektedir:

$$d_t = d_t(\varepsilon_t^{\sim pl}, \theta, f_i); 0 \leq d_t \leq 1 \quad (3.8a)$$

$$d_c = d_c(\varepsilon_c^{\sim pl}, \theta, f_i); 0 \leq d_c \leq 1 \quad (3.8b)$$

Grafiklerde malzeme hasarlı olmayan Elastisite modülünü E_0 ile gösterilmekte ve $\varepsilon_c^{\sim pl}$, $\varepsilon_t^{\sim pl}$, $\varepsilon_c^{\sim in}$, $\varepsilon_t^{\sim in}$ sırasıyla; eksenel basınç plastik şekil değiştirmesini, eksenel çekme

plastik şekil değiştirmesini ve elastik olmayan basınç ve çekme şekil değiştirmelerini göstermektedir. Gerilme (σ_t, σ_c) -şekil değiştirmeler ($\varepsilon_t, \varepsilon_c$) arasındaki Denklem 3.9 ile ifade edilmektedir [27]:

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\varepsilon_t - \varepsilon_t^{\sim pl}) \quad (3.9a)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{\sim pl}) \quad (3.9b)$$

Denklem 3.10'de "Etkin" olan çekme ve basınç kohezyonu (cohesion) gerilmelerini (σ_t^-, σ_c^-) şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\sigma_t^- = \frac{\sigma_t}{(1-d_t)} = E_0 (\varepsilon_t - \varepsilon_t^{\sim pl}) \quad (3.10a)$$

$$\sigma_c^- = \frac{\sigma_c}{(1-d_c)} = E_0 (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{\sim pl}) \quad (3.10b)$$

Çekme rijitlik ve tek eksenel basınç altında doğrusal olmayan birim şekil değiştirmeler plastik ($\varepsilon_c^{\sim pl}, \varepsilon_t^{\sim pl}$) birim şekil değiştirmelere aşağıdaki (Denklem 3.11) ile tanımlanır [18] [58].

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (3.11a)$$

$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (3.11b)$$

$$d_c = 1 - \exp(-a_c \varepsilon_c^{in}) \quad (3.11c)$$

$$d_t = 1 - \exp(-a_t \varepsilon_t^{ck}) \quad (3.11d)$$

$$\varepsilon_c^{\sim pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (3.11e)$$

$$\varepsilon_t^{\sim pl} = \varepsilon_t^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (3.11f)$$

3.3.1.5. Beton çekme gerilmesi

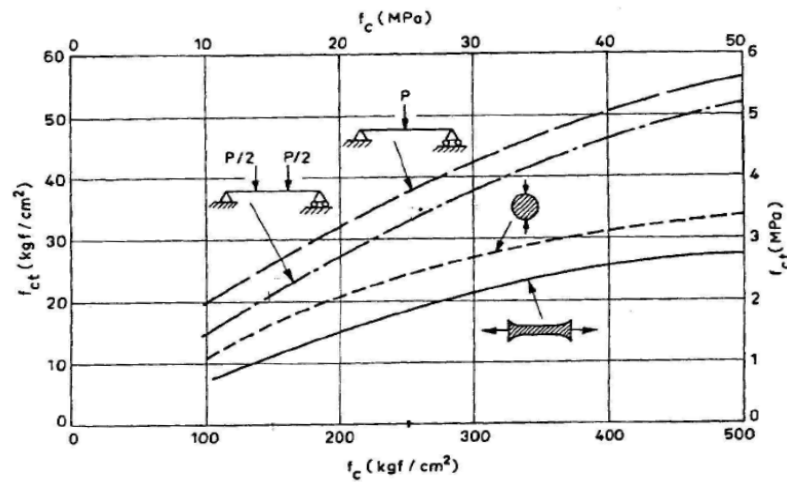
Donatısız beton kiriş davranışı için en kritik değişkenin çekme dayanımı olduğu göze çarpmaktadır. Betonarme hesaplarında ihmal edilen beton çekme dayanımı, bu tez

çalışması kapsamında yürütülen analizlerde en önemli ve hassas değişkenlerden biridir. Genel olarak TS500’de beton çekme dayanımı, basınç dayanımının bir fonksiyonu Denklem 3.12’de olarak verilmektedir [59].

$$f_t \cong 0.35\sqrt{f_c} \quad (3.12)$$

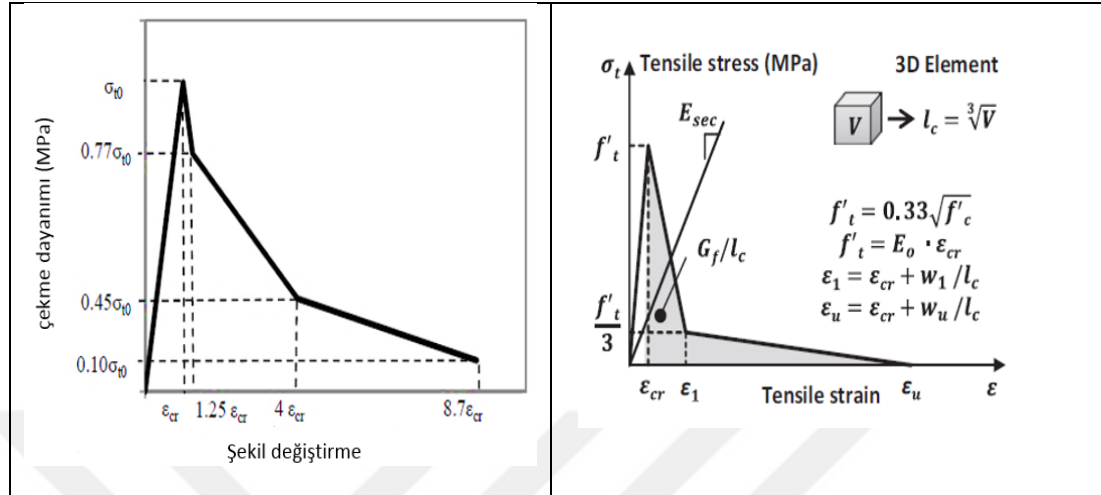
Bununla birlikte, birçok değişkene sahip betonun gerilme dayanımı, test yöntemine bağlıdır. Bu test yöntemleri; doğrudan çekme testleri, bölme deneyleri ve eğilme testleri. Dolaylı çekme testlerinde çekme dayanımı daha yüksektir. Doğrudan çekme testi hariç, diğer çekme yöntemleri dolaylı olarak çekme dayanımının belirlenmesi için kullanılır ve eğilme testlerinde bile, betonun çekme dayanımı, yüklemenin tek nokta veya iki nokta olmasına göre beton çekme dayanımı değişmektedir [16]. İki nokta yüklemesinde maksimum moment etkisi olan bölge daha geniş olduğundan, bu bölgedeki heterojen yapı nedeniyle yerel çatlak oluşma olasılığı daha yüksektir. Bu nedenle, tek nokta yükleme testleri daha yüksek dayanım vermektedir [59].

ABAQUS modelinde çekme dayanımı olarak, Şekil 3.13’de de yer alan grafikteki iki nokta yüklemesi için verilen değerler esas alınacaktır. Bu grafikteki değerler, H.Rüşh tarafından Münih Teknik Üniversitesi’nde yürütülen kapsamlı deney programından elde edilmiştir [59].



Şekil 3.13. Betonun deney metotlarına göre çekme dayanımı

Bu çalışmada betonun çekme dayanımı CEB-FIB code göre Denklem 3.17'de hesaplanmıştır şekil (3.14).



Şekil 3.14. Geliştirilmiş betonun çekme dayanımı modeli

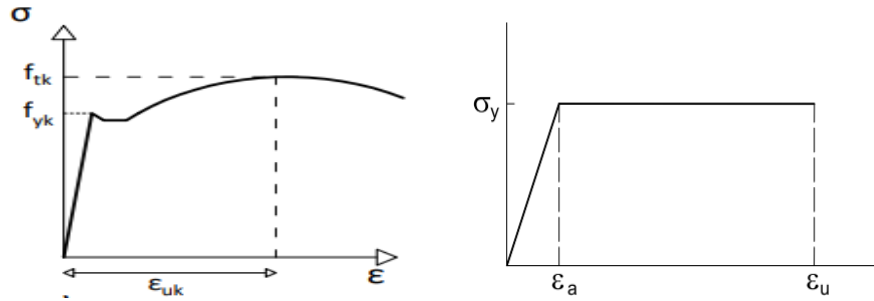
$$f_t^{\sim} \cong 0.33\sqrt{f_c^{\sim}} \quad \& \quad f_t^{\sim} = 1.4 * \left(\frac{f_{ck}-8}{10}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (3.17a)$$

$$E = 2.15 * 10^4 * \left(\frac{f_{co}}{10}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \& \quad f_t^{\sim} = E_o \varepsilon_{cr} \quad (3.17b)$$

3.3.2. Çelik malzeme

Çelik, betondan daha kolay ve doğru bir şekilde tanımlanabilen homojen ve izotropik bir malzemedir. Çelik donatının gerilme-şekil değiştirme ilişkisi başlangıçta doğrusal elastik olan bir malzemedir. Bu bölgede, yük kaldırıldığında deformasyonlar geri döner. Bu süneklik hali orantılılık sınırına kadardır ve doğrusallık akma noktasına kadar devam eder. Plastik deformasyonlar orantı sınırından sonra ortaya çıkmaya başlar. Orantı sınırı ve akma noktası arasındaki fark çok azdır. Bu nedenle, birleştirilerek tek bir nokta olarak kabul edilmiştir. Aslında, akma noktasından sonra bir akma plakası ve bir sonraki sertleştirme bölgesi vardır, araştırmacılar ise modellemede bu davranışını idealleştirir. Bu çalışmada, akışın ihmal edilmesinden sonra mukavemet artışı ve çelik malzeme fon misse akış ölçütüne dayanan doğrusal

elastik-tam plastik (Bilinear izotropik sertleşme plastisite) olarak tanımlanmıştır. (Şekil 3.15) [60] [61].



Şekil 3.15. Çelik malzeme davranışı

Nümerik analiz çalışmasında sonlu eleman metodu ile (SEM) ABAQUS program yardımıyla çelik donatılar tanımlamak gerekmektedir. Yapılan kiriş numerik modelinde çelik donatı malzeme, ideal elasto-plastik olarak malzeme davranışına göre tanımlanmıştır. Plastik deformasyonlar orantı ele alınmıştır. Beton ile donatı arasında şekil değiştirme oranı eşit kabul edilerek tam aderans kabulü ile donatı beton içerisine gömülü (embedded) olarak modellenmiştir. Donatı çubuklarının modellenmesi için iki noktalı doğrusal üç boyutlu çubuk eleman tanımlanmıştır [62].

3.3.3. FRP modelleme

Malzemeyi doğrusal olmayan kırılğan malzeme olarak modellemek gerekmektedir. FRP çekme etkisine sahip bir malzeme olduğundan, ABAQUS sonlu elemanlar programında modelleme yaparken gevrek bir malzemesinin davranışını temsil eder “brittlecracking” malzeme modeli kullanılmıştır. Analitik çalışmada çelik donatı gibi FRP malzeme çekme dayanımına ulaşana kadar doğrusal bir malzeme kabul edilmektedir.

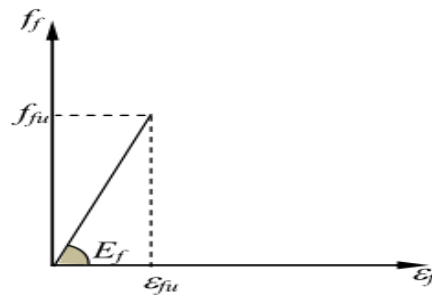
Analitik çalışmasında ABAQUS programı FRP kompozitler elemanları oluşturulduğunda, elemanlar birbirlerine birleştiren ara yüzlere (Temas nokta ya da aderans) ihtiyaç vardır. Betonarme kirişlerin sonlu eleman metodu (SEM) ile çalışmasında yapıştırıcı ara yüzey kalınlığı ince olduğu için çekme-ayrılma ilişkisinin

modellemesi yapılmamıştır. Yapıştırıcı elemanlar, deneysel çalışmalarda epoksi olarak kullanılmıştır [7].

FRP gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Şekil 3.16.'da gösterildiği gibi kopma anına kadar doğrusal elastik alınmış ve Denklem 3.18'de ile tanımlanmıştır.

$$f_f = E_f \varepsilon_f \quad \varepsilon_f \leq \varepsilon_{fu} \quad (3.18)$$

Denkleminde f_{fu} ve ε_{fu} sırasıyla FRP kompozitler donatı yada şeritler gerilme ve şekil değiştirmeyi ilişkisi; E_f FRP donatısının Elastisite modülünü ve ε_{fu} kopma anındaki şekil değiştirmesini göstermektedir [71-72].



Şekil 3.16. FRP malzeme modeli

3.4. Kiriş Numunelerin Sonlu Elemanlar ile Modellenmesi

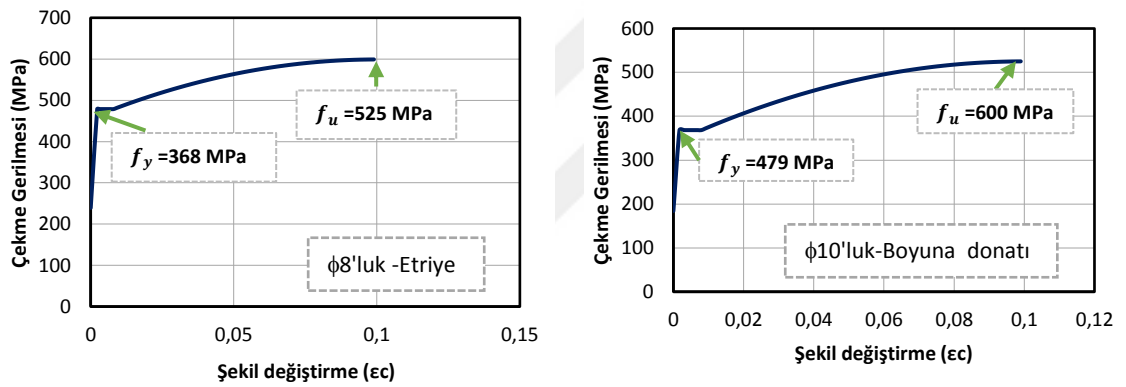
Betonarme kiriş numunelerinde kullanılan malzemelerin modelleri kurulduktan sonra ABAQUS'e malzeme bilgileri girilerek betonarme kontrol kirişinin SEM analizleri yapılmıştır.

3.4.1. Malzeme özelliklerinin girilmesi

Malzeme özellikleri (Elastisite modülü, poisson oranı, yoğunluk ve ayrıca gerekli olduğunda genleşme katsayısı, termal iletkenlik, özgül ısı vb.) tanımlanmalıdır. Modelleme yapıldıktan sonra modelin malzemesi tanımlanmalıdır. Tanımlama işlemi aşağıdaki gibi yapılmaktadır. Malzeme isimlendirildikten sonra malzemenin cinsi ve

davranışı seçeneklerden seçilmelidir. Aynı anda malzemeye birçok özellik tanımlanabilmekte ve en ince ayrıntısına kadar malzemenin davranışı programa tanıtılabilmektedir. Boyuna donatı ve etriyeler elemanların nümerik modelinde elastik-plastik malzeme modelleri kullanılmıştır. Öncelikle çelik akma dayanımı ve kopma dayanımına göre Türk standart yardımıyla çekme gerilmesi-şekil değiştirme ilişkileri grafiği çizilmektedir [68-69].

Çelik donatılar ABAQUS paket programında malzeme özelliklerini girmek için Elastik-Plastik malzeme tanıtılmaktadır. ABAQUS modelinde boyuna donatı ve etriyenin akma ve kopma dayanımına göre aşağıdaki grafikteki gösterilmektedir (Şekil 3.17.).



Şekil 3.17. Boyuna donatı ve etriye çekme gerilmesi-şekil değiştirme grafiği

Beton malzeme özelliklerinin girilmesinde, sonlu eleman yöntemiyle başarılı bir çözüm yapmak öncelikle malzeme modellerinin gerçeğe yakın şekilde tanımlanmasıyla mümkün olmaktadır. Beton dayanımına göre elde edilen beton özellikleri üç model üzerinde çalışılmaktadır. Bu tezde Mander (Sargılı ve sargısız), Geliştirilmiş Kent-Park (Sargılı ve sargısız) ve Hognasted modeli formüller yardımıyla model oluşturmaktadır. Bu çalışmanın amacı, farklı araştırmacılar tarafından önerilen malzeme modellerinin değişik beton basınç dayanımları ve sargı donatısı aralıkları dikkate alınarak betonarme eleman davranışı ve sistem davranışı üzerindeki etkilerini incelemektir Tablo (3.7.), Tablo (3.8.), Tablo(3.9.) ve Tablo (3.10.).

Tablo 3.7. Beton mekanik özellikleri

Kütle yoğunluğu (Mass density)	2.5e-09 t/mm ³
Elastisite modülü (Youngs modul Elastik)	19450 MPa
Poisson Oranı (Poisson ratio)	0.2

Tablo 3.8. Beton mekanik özellikleri

Dilasyon açısı (Dilation angle)	Eksantrisite (Eccentricity)	f _{bo} /f _{co}	K	Viskozite parametre (Viscosity Parameter)
45	0.05	1.16	0.666	0

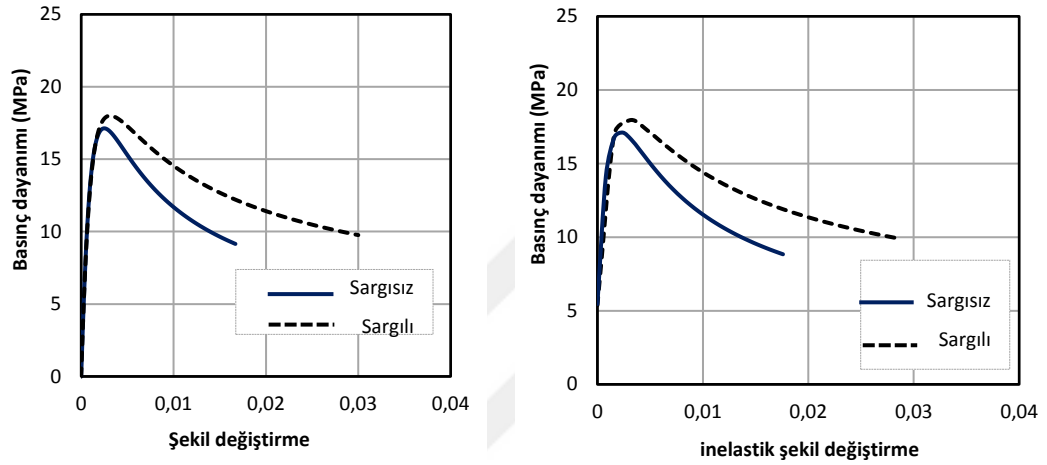
Tablo 3.9. Beton çekme hasarı (Concrete Tension Damage).

6 Akma gerilme (Yield stress)	Çatlama strain (Cracing Strain)
1.31757462	0
1.014532458	6.4E-05
0.592908579	0.000205
0.131757462	0.000446

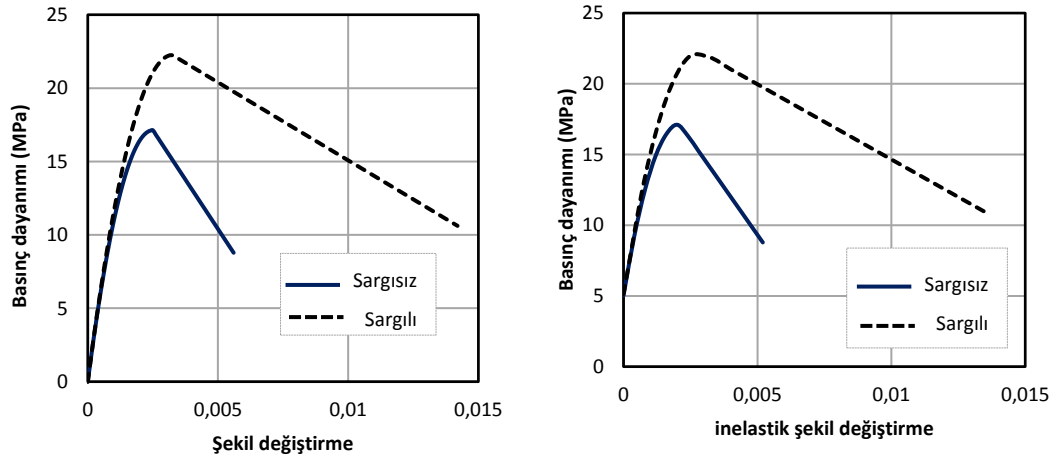
Tablo 3.10. Beton basınç davranışı (Compressive behavior)- Mander-sargısız model

6 (Akma gerilme)	ε (starın)	Hasar parametresi	In elastik Şekil Değiştirme
5,455685	0	0	0
14,09816	0,0008	0,095163	0,0008
16,77055	0,0016	0,181269	0,0016
17,10277	0,0024	0,259182	0,0024
16,64053	0,0032	0,32968	0,0032
15,93884	0,004	0,393469	0,003999
15,1971	0,0048	0,451188	0,004799
14,48644	0,0056	0,503415	0,005599
13,82974	0,0064	0,550671	0,006399
13,23134	0,0072	0,59343	0,007199
12,68851	0,008	0,632121	0,007999
12,19615	0,0088	0,667129	0,008799
11,74867	0,0096	0,698806	0,009599
11,34077	0,0104	0,727468	0,010398
10,96766	0,0112	0,753403	0,011198
10,62518	0,012	0,77687	0,011998
10,30971	0,0128	0,798103	0,012798
10,01813	0,0136	0,817316	0,013598
9,747768	0,0144	0,834701	0,014397
9,496307	0,0152	0,850431	0,015197
9,261759	0,016	0,864665	0,015997
9,042396	0,0168	0,877544	0,016797
8,836717	0,0176	0,889197	0,017596

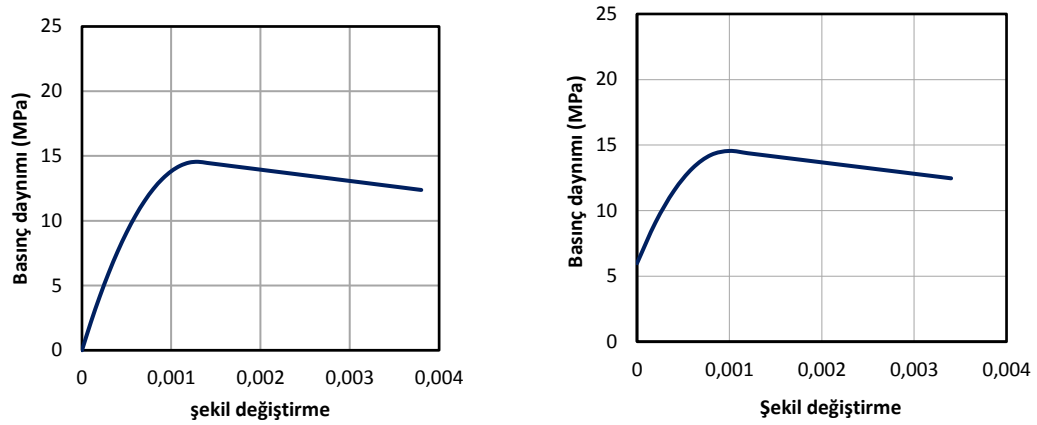
Beton hasar plastisite değerleri bulmak için Mander, Kent-Park ve Hognestad modelinde oluşturulan basınç dayanımının araştırmalara göre yaklaşık %(30-40) değerlerden ilk değer olması gerekmektedir (Şekil 3.18.), (Şekil 3.19.), (Şekil 3.20.) ve (Şekil 3.21.).



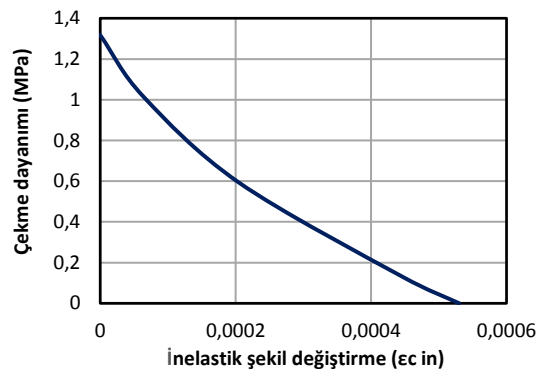
Şekil 3.18. Mander modeli- sargısız ve sargılı beton davranışı



Şekil 3.19. Kent Park model -sargısız ve sargılı beton davranışı

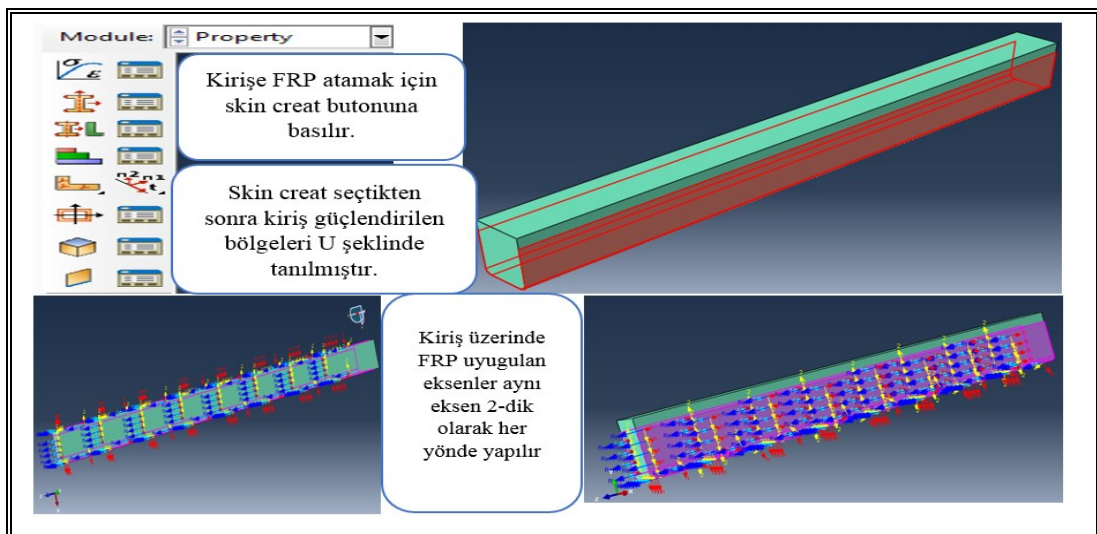


Şekil 3.20. Hognestad modeli -sargısız beton davranışı



Şekil 3.21. Beton çekme hasar davranışı

Modelin bölgelerine ait FRP kumaşlar atanması için skin olarak tanılamaktadır, Şekil 3.22.'de üzerinde de açıklamalı olarak gösterilmiştir.



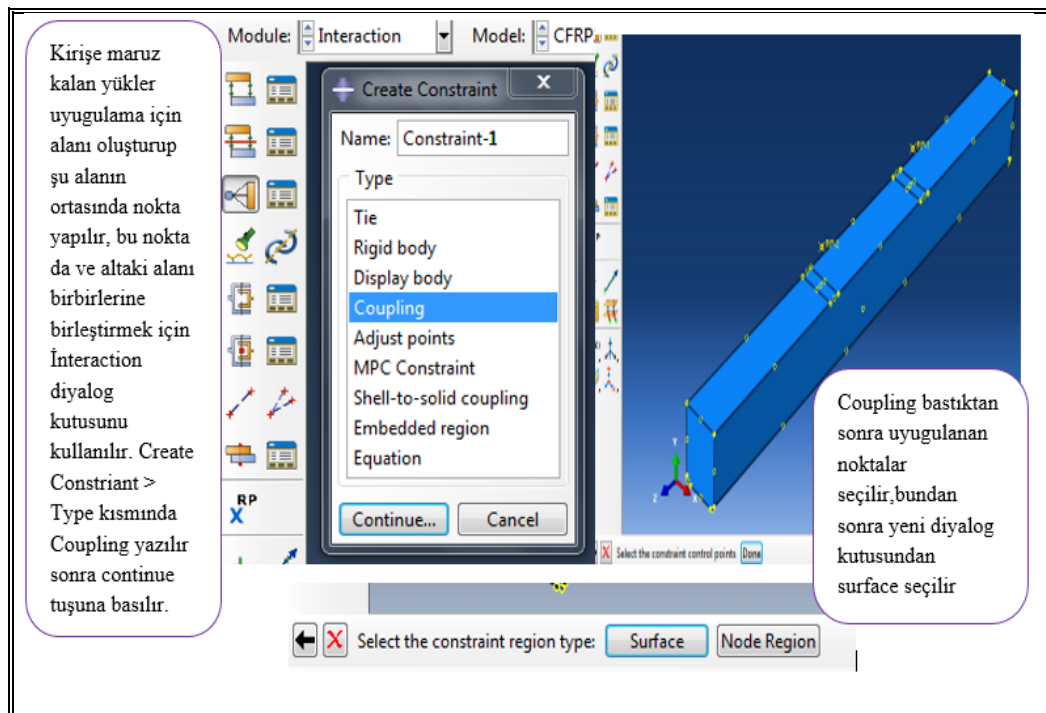
CFRP güçlendirme malzemesi						
E1	E2	Nu12	G12	G13	G23	
230000	4500	0.1	0.1	0.1	0.1	
Ten Stress Fiber Dir	Com Stress Fiber Dir	Ten Stress Transv Dir	Com Stress Transv Dir	Shear Strength	Cross-Prod Term Coeff	Stress Limit
3900	0.1	30	0.1	0.1	0.1	3900

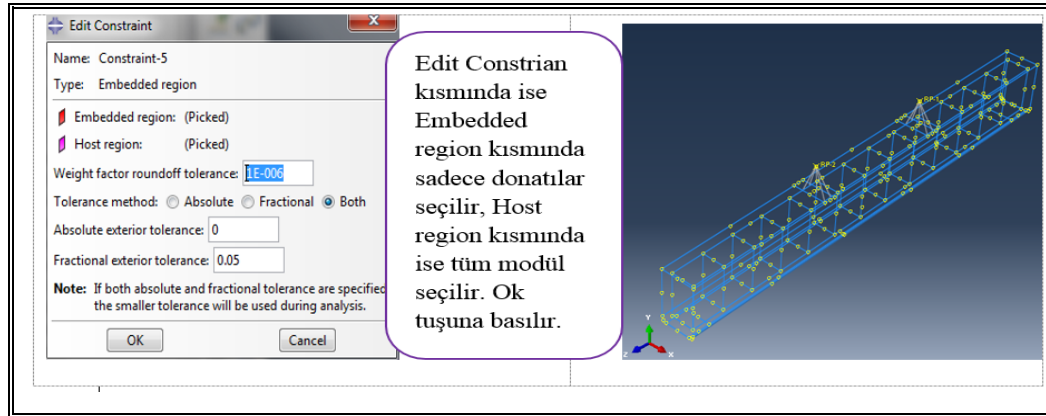
GFRP güçlendirme malzemesi						
E1	E2	Nu12	G12	G13	G23	
76000	4500	0.1	0.1	0.1	0.1	
Ten Stress Fiber Dir	Com Stress Fiber Dir	Ten Stress Transv Dir	Com Stress Transv Dir	Shear Strength	Cross-Prod Term Coeff	Stress Limit
2300	0.1	30	0.1	0.1	0.1	2300

Şekil 3.22. FRP skin üzerine özellikler tanımlanması

3.4.2. Donatıların gruplandırması

Kirişe maruz kalan yükler uygulamak amacı ile tekil yük olarak tanımlamak gerekmektedir. Bu yüzden iki nokta üst yüzeyinde alan ile bağlanmaktadır. Beton ile donatı arasında şekil değiştirme oranı eşit kabul edilerek tam aderans kabulü ile donatı beton içerisine gömülü (Embedded) olarak modellenmiştir (Şekil 3.23.).

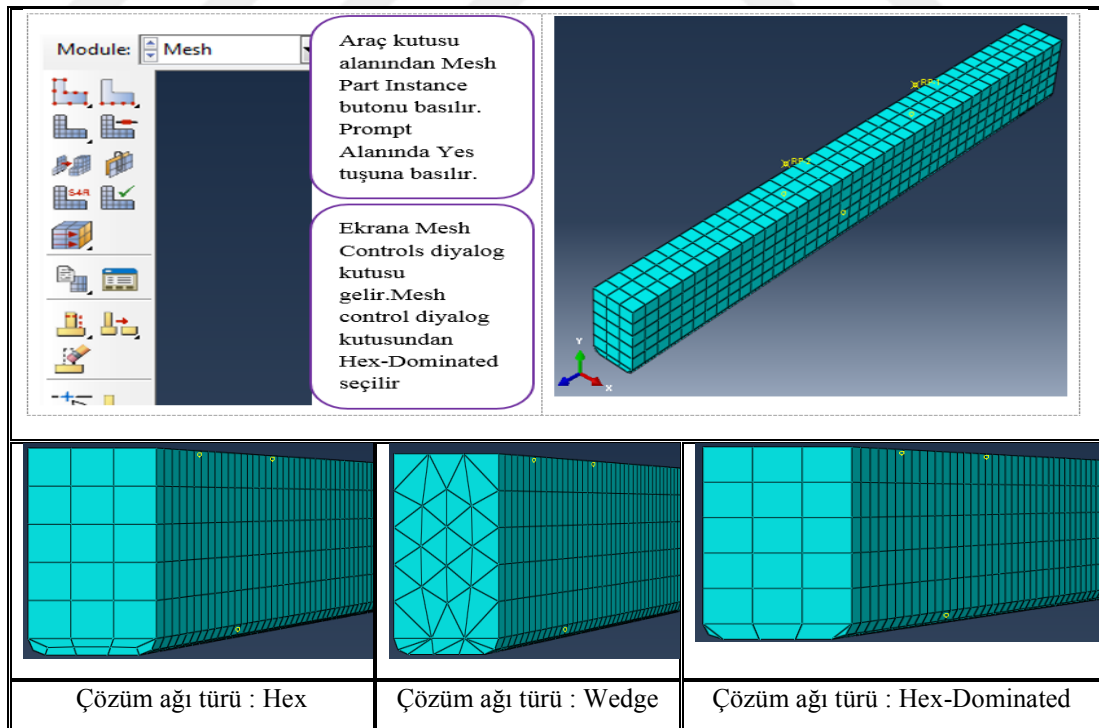




Şekil 3.23. Donatıların birbirlerine gruplandırması

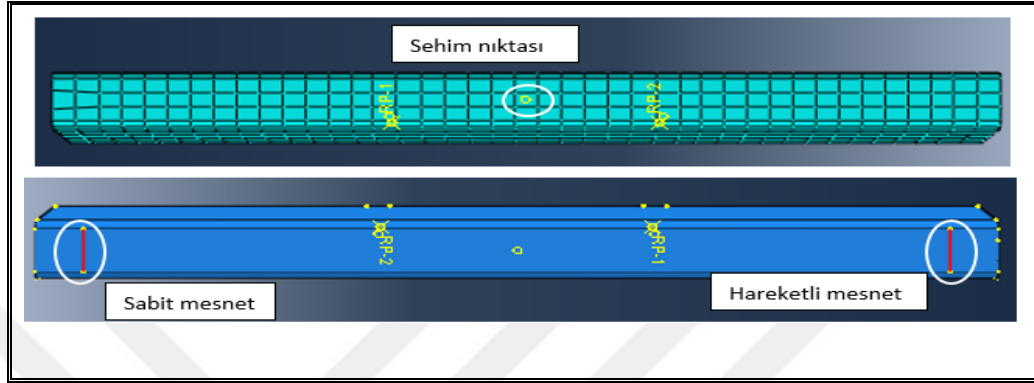
3.4.3. Modelinin çözüm ağı (mesh) oluşturulması

Montaj parçalarına çözüm ağı oluşturularak küçük parçalara böleriz. Eleman özellikleri belirlendikten sonra, model küçük elemanlara bölünür. Burada önemli olan seçilen eleman kullanılarak modelin nasıl daha iyi küçük parçalara, bazı paket programlar bunu otomatik olarak yapar. Şekil 3.24.'te üzerinde de açıklamalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Kiriş parçaya çözüm ağı atanması

Analitik çalışmaların sonuçlarını çıkarmak amacıyla programdan çözüm ağı yaptıktan sonra kirişin alt Kısımında orta nokta sehim göstermek için orta bölgesinde bir nokta tanımlamak gerekmektedir. Ayrıca mesnetlerin tipik kuvvetlerini çıkarmak için çizgi olarak tanımlamak gerekmektedir. Şekil 3.25.'te göstermektedir.



Şekil 3.25. Elde edilen yük ve sehim noktalarının belirlenmesi

BÖLÜM 4. FRP KOMPOZİTLER İLE GÜÇLENDİRİLEN BETONARME KİRİŞLERİN NÜMERİK ANALİZİ

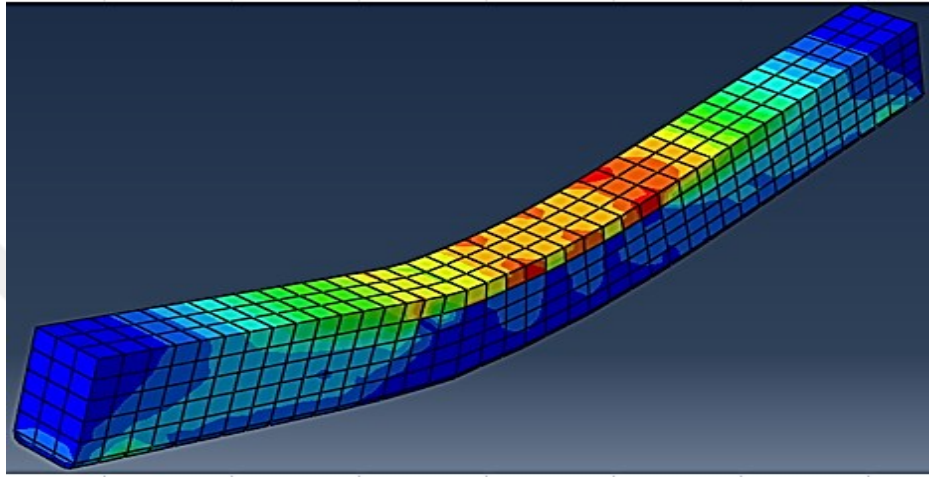
Betonarme kiriş ve (CFRP, GFRP) ile güçlendirilmiş kirişlerin sonlu elemanlar ile modellemesinde gerekli malzeme modeli elde edildikten sonra (Bakınız bölüm 3.) deneyde uygulanan sınır şartları dikkate alınarak kiriş modeli üç boyutlu olarak kurulmuştur. Programda yükleme deneysel çalışmayı temsilen kiriş üst yüzeyinde yapısal tekil yükler tanımlanmıştır. Kiriş numune mesnetleri bir taraf sabit, diğer taraf hareketli olacak şekilde tanımlanmıştır. CFRP veya GFRP kompozitler kiriş alt ve yan yüzeylerine kabuk (Skin) olarak tanımlanmıştır. Analiz türü statik riks olarak tanımlanmıştır. Statik RIKS yöntemi, bir yapının kararsız ve doğrusal olmayan göçmesini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu yöntemde yük büyüklüğü ilave bir bilinmeyen olarak kabul edilir ve yüklerle birlikte deplasmanlar eş zamanlı olarak çözülmemektedir. Analiz sonrası yükler mesnetlerden, sehim ise kiriş orta noktasında belirlenen bir noktadan okunmuştur. Çözüm ağı boyutu ve geometrik şekli, genişleme açısı ve viskozite gibi model parametreleri üzerinde değişiklikler yaparak ve araştırmacılardan elde edilen model bağıntıları ile kiriş numunesi modellenmeye çalışılmıştır.

4.1. Betonarme kiriş model doğrulama çalışmaları

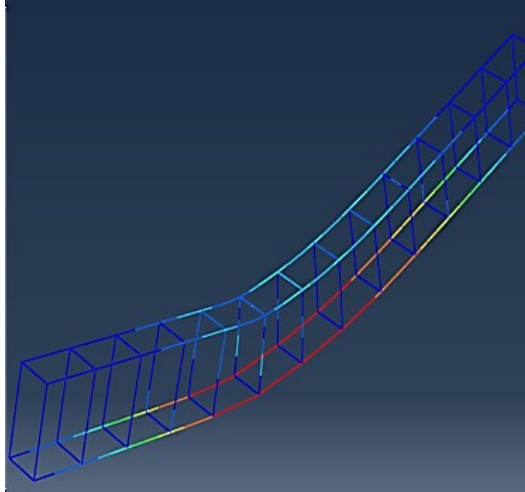
Üç boyutlu tasarımı ve malzeme modeli tamamlanan betonarme kirişlerin eğilme davranışı, model parametreleri girilerek modellenmeye çalışılmıştır. Betonarme kiriş modelinde Mander, Kent-Park ve Hognestad beton modelleri kullanılmıştır. Dilasyon Açısı (DA)[3], [15], çözüm ağı türü ve boyutu modelde değişken parametreler olarak kullanılmıştır. Çözüm ağı türü doğrusal (Hex, Hex-Dominated) ve dağınık (Wedge) seçilmiş ve DA 35-55 derece aralığında, çözüm ağı boyutu 40-60 aralığında

değişmektedir. Eksantrik: 0,05, f_{bo}/f_{co} : 1,16, K: 0,667 ve Visk. Parametresi:0 sabit değişkenlerdir.

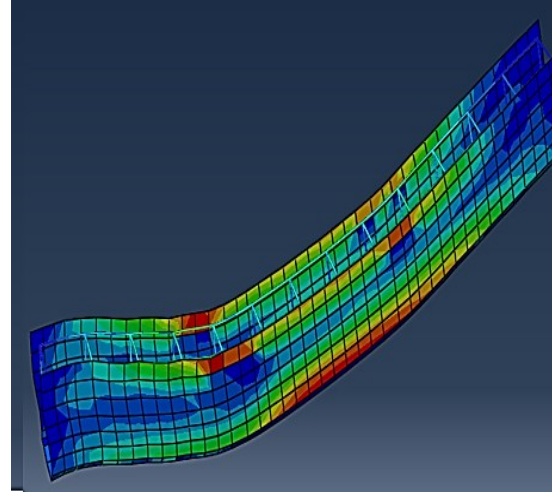
Modeli kurulan kirişler analiz edilerek kiriş betonu (Şekil 3.7., 3.8., 3.9., 3.10.) ve kiriş donatısı (Şekil 3.17.) ve FRP güçlendirme malzemesi (Şekil 3.22.) üzerinde gerilme dağılımları incelenmiştir (Şekil 4.1.) ve (Şekil 4.2.).



Şekil 4.1. SEM analizi ile betonarme kiriş betonunda oluşan gerilme dağılımları



a) Kiriş donatısı gerilme dağılımı



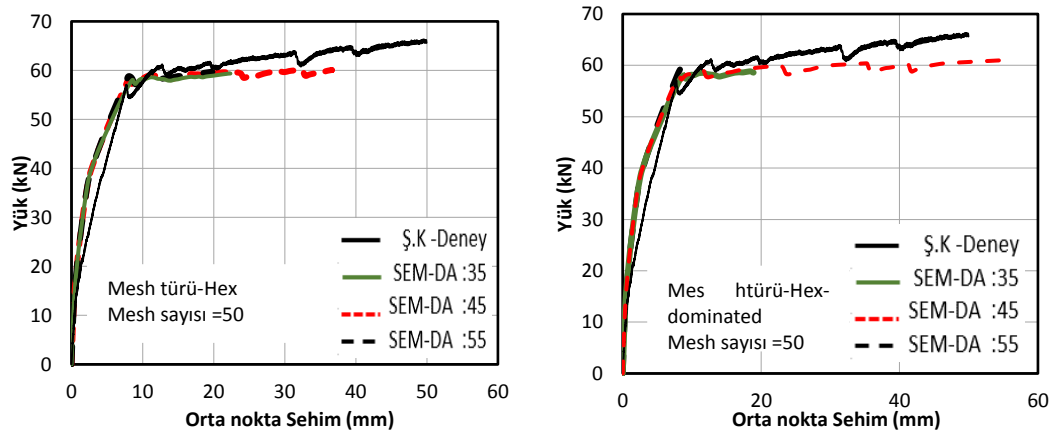
b) FRP malzemesinde oluşan gerilme dağılımları

Şekil 4.2. SEM analizi ile betonarme kiriş donatısı ve FRP malzemesinde oluşan gerilme dağılımları

4.1.1. Kiriş numuneler için uygun dilasyon açısı parametresinin belirlenmesi

Deneysel çalışma sonucundan anlaşılabacağı gibi kirişte iki bölge görülmektedir. Birincisi eğilme donatısının akamaya başlangıcına kadar devam eden elastik bölge, ikincisi ise sürekli akama bölgesi diye tabir edilen plastik bölgedir (Şekil4.3.). Modellemede bu iki bölge dikkate alınarak kiriş modeli doğrulanmaya çalışılmıştır.

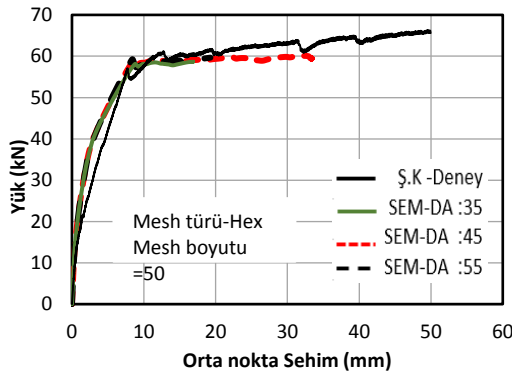
ABAQUS'te kontrol kirişlerinin modellenmesinde uygun Dilasyon Açısı (DA) belirlenirken; öncelikle çözüm ağı boyutu 50 mm kabul edilerek, doğrusal (hex) ve kesit alt bölgesinde dağınık (Wedge) çözüm ağı türü kullanılmıştır. Ayrıca Mander, Kent-Park ve Hognestad tarafından önerilen malzeme modellerinde kirişler için uygun DA belirlenmeye çalışılmıştır. SEM analizi ile betonarme kirişin elastik davranışı tüm parametre ve kullanılan malzeme modellerinde doğrulanmıştır. Ancak plastik bölgede 45 derece dilasyon açısı ile en iyi sonuç elde edilmiştir (Şekil4.3.). Hex ve Hex-Dominated çözüm ağı türü ile Mander, önerilen beton modeli deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen grafikler her model için farklı olmadığını görülmüştür (Şekil 4.3.), (Şekil 4.4.), (Şekil 4.5.) ve (Şekil 4.6.).



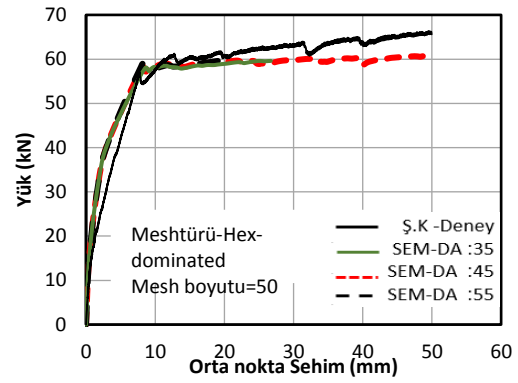
a) Çözüm ağı türü: Hex

b) Çözüm ağı türü Hex-Dominated

Şekil 4.3. Mander modeli Çözüm ağı türü Hex ve Hex-Dominated

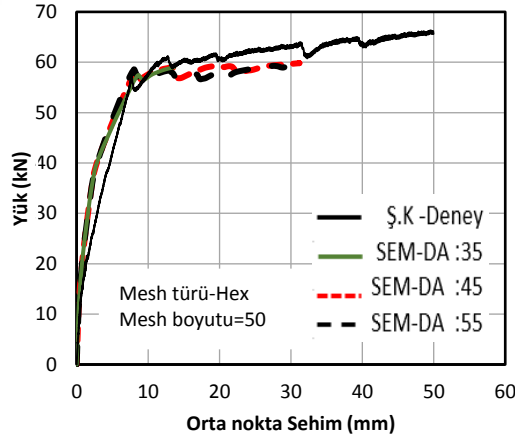


a) Çözüm ağı türü: Hex

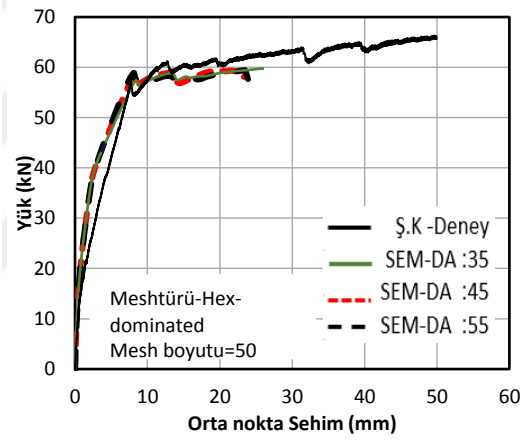


b) Çözüm ağı türü Hex-Dominated

Şekil 4.4. Kent -Park modeli, çözüm ağı türü Hex, Hex-Dominated

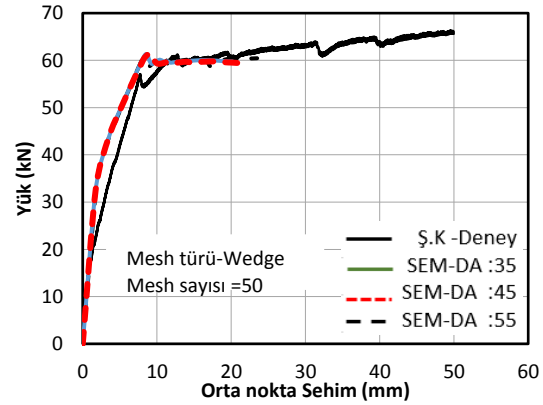
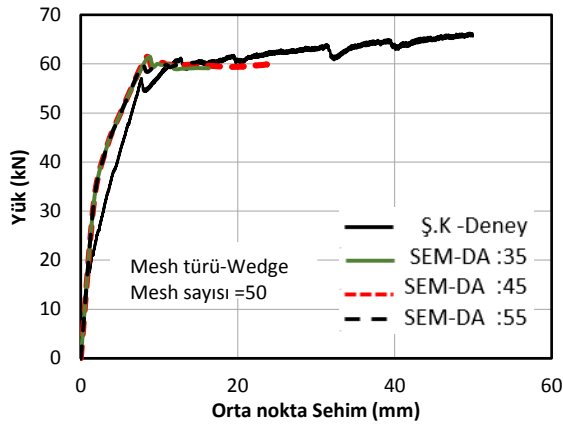


a) Çözüm ağı türü: Hex



b) Çözüm ağı türü Hex-Dominated

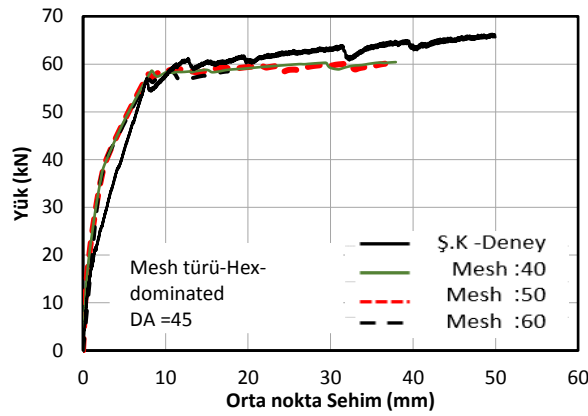
Şekil 4.5. Hognestad modeli, çözüm ağı türü ve boyutu: Hex, Hex-Dominated 50



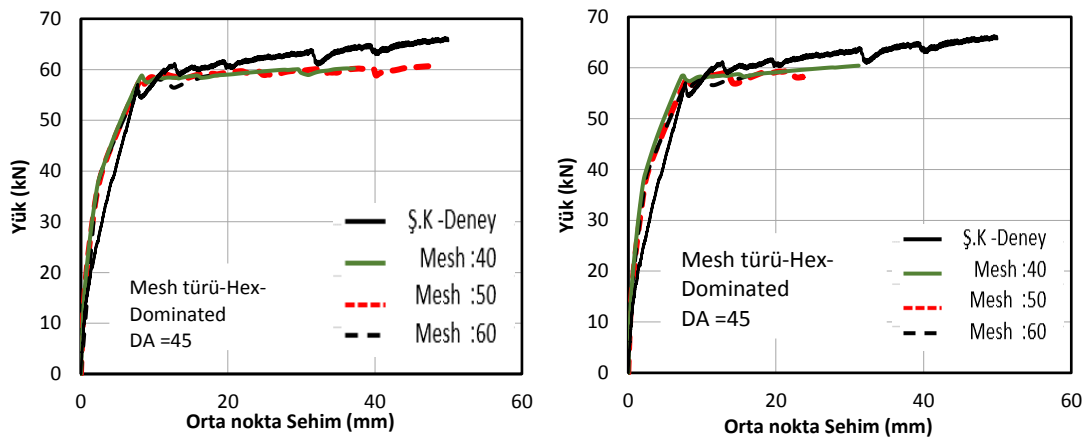
Şekil 4.6. Mander model, Kent park modeli çözüm ağı türü ve boyutu: Wedge

4.1.5. Kiriş numuneler için uygun Çözüm ağı parametresinin belirlenmesi

Uygun çözüm ağı türü ve boyutunu belirlemek için daha önce belirlenen 45 derece DA parametresi ve Mander, Kent-Park ve Hognestad modelleri kullanılmıştır. Çözüm ağı türü ve boyutu değiştirilerek (40-50-60) kiriş model davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucuna göre uygun çözüm ağı türü ve boyutu mander modelinde Şekil (4.7.), kent park Şekil (4.8.) ve hognestad Şekil (4.8.) olarak tespit edilmiştir. Bunlardan en uygun sonuç ise Mander modeli kullanılarak, Hex-Dominated çözüm ağı ve 50 çözüm ağı boyutu ile elde edilmiştir. Tüm analizler sonucunda Mander modeli ile doğrulanan kiriş modeli ve parametreleri kabul edilmiştir.



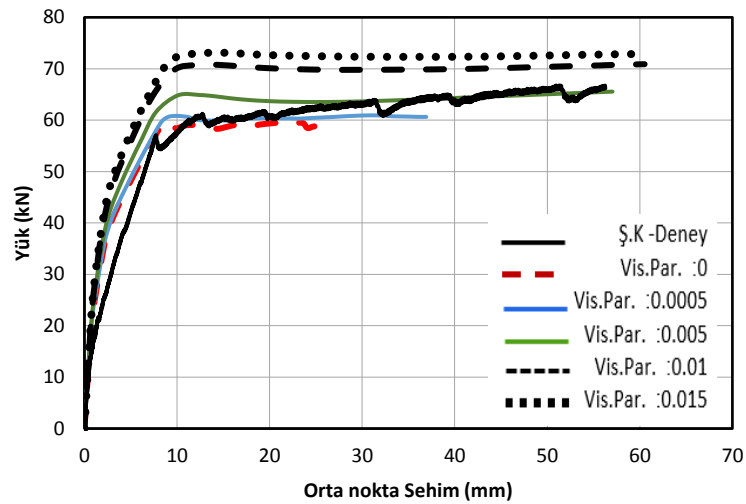
Şekil 4.7. Mander modeli çözüm ağı türü : Hex-Dominated, A,45



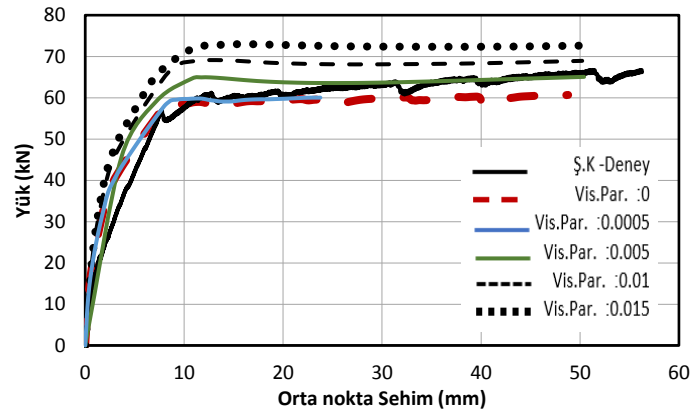
Şekil 4.8. Kent-Park ve Hognestad modeli çözüm ağı türü: Hex-Dominated A,45

4.1.6. Kiriş numuneler için uygun viskozite parametresinin belirlenmesi

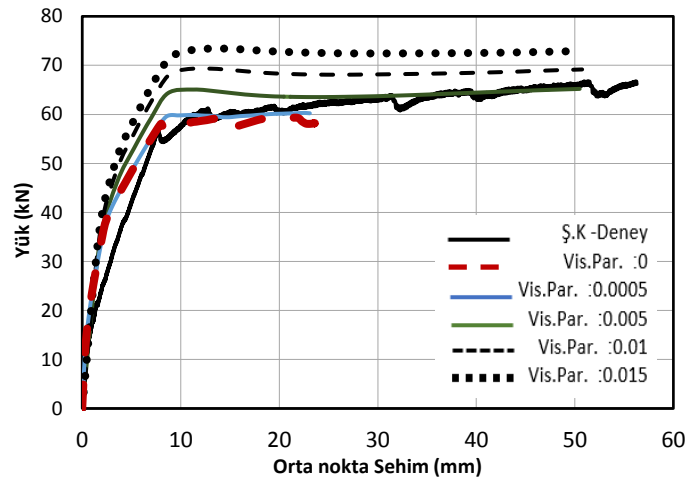
Betonarme kiriş modeli parametre ve malzeme modeli belirlenirken viskozite literatürden [60,70] alınan bilgilerle sıfır kabul edilmişti. Ancak bu bölümde viskozitenin kiriş model davranışına etkisi parametrik olarak çalışılmıştır. Mander kent park ve hognestad modellerinde parametreler; Eksantrisite (e.c): 0,05, $\frac{f_{bo}}{f_{co}}$:1,16, K: 0,666, DA: 45 derece, Çözüm ağı türü, boyutu: Hex-Dominated, 50 mm sabit kabul edilmiştir. 0-0.015 arasında değişen viskozite parametreleri kullanılarak SEM analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre viskozite arttıkça kiriş modeli deney sonuçlarından uzaklaştığı görülmektedir. Yapılan analiz sonuçlarına göre kiriş numuneleri için mander (Şekil 4.9.), Kent-Park (Şekil 4.10.) ve Hognestad (Şekil 4.11.) modellerinde viskozite değerinin sıfır olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.9. Viskozite etkisi Mander modeli, çözüm ağı türü ve boyutu: Hex-Dominated, 50



Şekil 4.10. Viskozite etkisi Kent-Park modeli, çözüm ağı türü ve boyutu: Hex-Dominated, 50



Şekil 4.11. Viskozite etkisi Kent-Park modeli, çözüm ağı türü ve boyutu: Hex-Dominated, 50

Kullanılan üç modelde çözüm ağı -Hex ve Hex-Dominated ağ türü, 50 mm ağ boyutu ve 45 derece DA deneye en yakın sonucu verdiği ve çözüm ağları büyüdükçe kırılma dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Ancak güçlendirilen kirişlerde mander beton modeli, Hex- Dominated çözüm ağ türü ve 50 mm çözüm ağı boyutu en uygun sonuç olarak kabul edilmiştir.

4.2. CFRP ile Güçlendirilen Betonarme Kirişlerin SEM Analizi

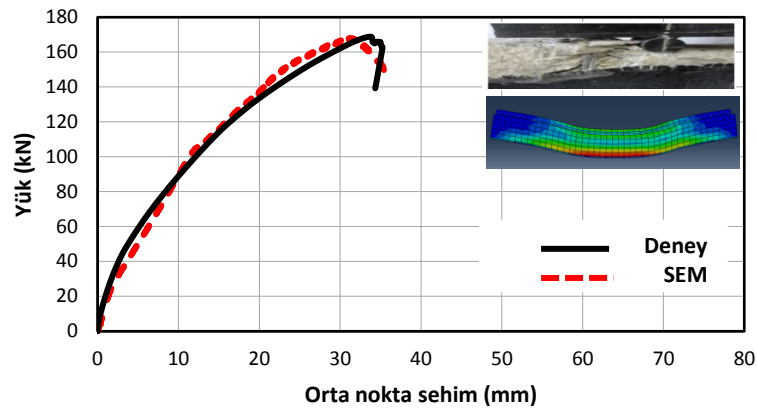
Betonarme kiriş numuneleri için tespit edilen parametreler kullanılarak CFRP kompozitler ile güçlendirilmiş betonarme kiriş numunelerinin SEM analizleri yapılmış ve parametreler yeniden gözen geçirilmiştir. Güçlendirilmiş kirişlerde DA parametresi 40 ± 2 arasında değiştiği, diğer parametrelerin değişmediği tespit edilmiştir.

CFRP kompozitler ile güçlendirilmiş betonarme kirişler SEM ile analiz edilmiş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Tablo 4.1.). Kirişlerde kullanılan, Hex-Dominated ağ türü ve 50 mm çözüm ağı boyutu, 40 ± 2 derece dilasyon açısı parametreleri deneysel çalışmaya daha uygun sonuç vermiştir.

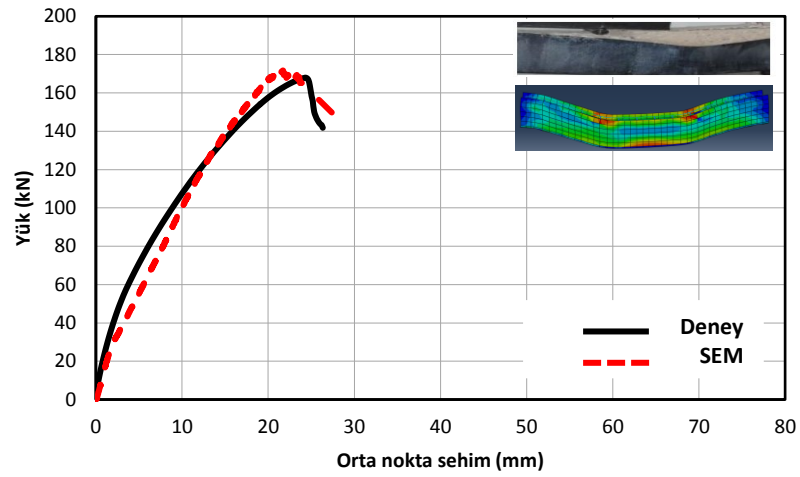
Tablo 4.1. CFRP betonarme kirişlerin deneysel ve SEM yük ve sehim değerleri.

CFRP	Durum	Kırılma Yük (kN)	Sehim (mm)
CFRP11	Deney	168,1	31,1
	SEM	168,8	33,9
CFRP22	Deney	171,8	21,5
	SEM	166,6	24,7
CFRP21-1	Deney	167,9	24,5
	SEM	170,4	25,3

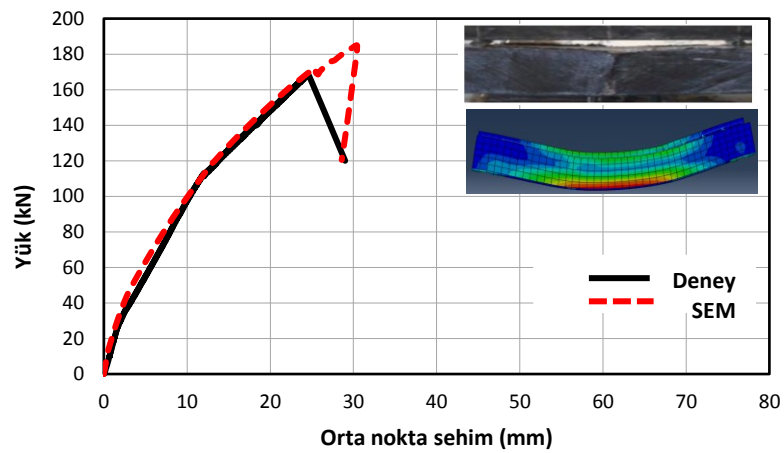
CFRP kompozitler ile farklı şekillerde güçlendirilen kirişlerin deney sonuçları ile SEM analiz sonuçları karşılaştırılmış ve yük-sehim grafikleri oldukça uyumlu çıkmıştır (Şekil 4.12.), (Şekil 4.13.) ve (Şekil 4.14.). Yük ve sehim sonuçları ise CFRP11 şeklinde güçlendirilen kirişlerde sırasıyla %98, %91, CFRP22 şeklinde güçlendirilen kirişlerde sırasıyla %97, %87, CFRP21-1 şeklinde güçlendirilen kirişlerde sırasıyla %98, %97, oranında doğrulanmıştır.



Şekil 4.12. CFRP11 kiriş deney ve SEM analiz sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.13. CFRP 22 kirişi deney ve SEM analiz sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.14. CFRP 21-1 kirişi deney ve SEM analiz sonuçlarının karşılaştırılması

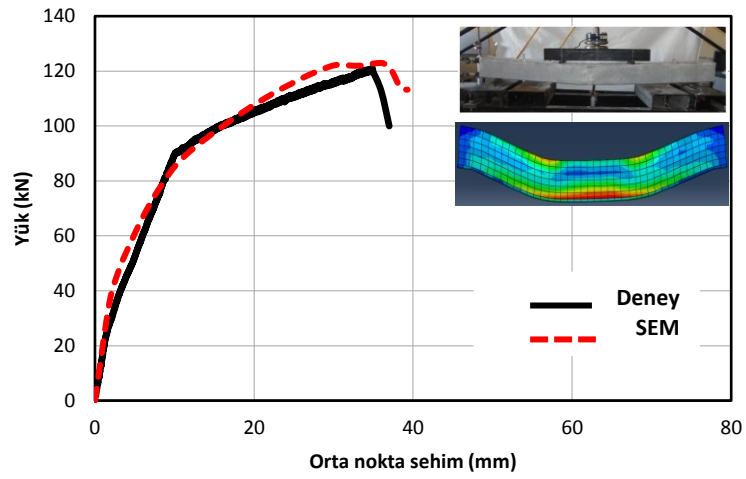
4.3. GFRP ile Güçlendirilen Betonarme Kirişlerin SEM Analizi

Betonarme kiriş numuneleri için tespit edilen parametreler kullanılarak GFRP kompozitler ile güçlendirilmiş betonarme kiriş numunelerinin SEM analizleri yapılmış ve parametreler yeniden gözen geçirilmiştir. Güçlendirilmiş kirişlerde DA parametresi 40 ± 2 arasında değiştiği, diğer parametrelerin değişmediği tespit edilmiştir. GFRP kompozitler ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin SEM analizinde GFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin parametreleri kullanılmış ve model doğrulanmıştır (Şekil 5.15.), (Şekil 5.16.), (Şekil 5.17.), (Şekil 5.18.) ve (Şekil 5.19.). Güçlendirilen kirişlerin modeli incelendiğinde yenilme zarf eğrisi deney sonuçları ile uyumlu çıkmıştır. Kirişlerin kırılma yük ve sehim değerleri %95 ve üzeri oranında yakalanmıştır. GFRP kompozitler ile güçlendirilmiş betonarme kirişler SEM ile analiz edilmiş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Tablo 4.2.).

Tablo 4.2. GFRP betonarme kirişlerin deneysel ve SEM yük ve sehim değerleri

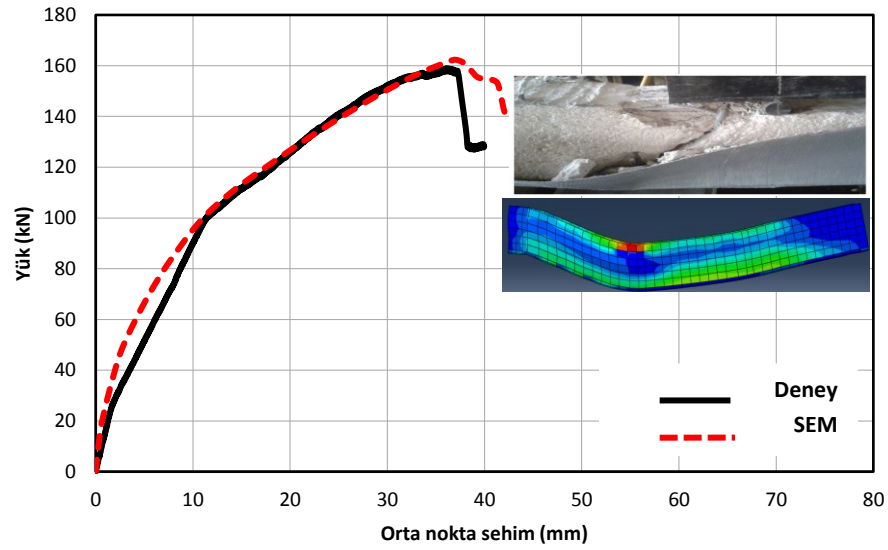
GFRP	Durum	Kırılma Yük (kN)	Sehim (mm)
GFRP11	Deney	121,2	34,9
	SEM	122,9	36,1
GFRP22	Deney	159,1	36,1
	SEM	161,3	37,8
GFRP21	Deney	146,9	32,3
	SEM	148,5	34,7
GFRP21-1	Deney	161,9	31,6
	SEM	190,3	46,6
GFRP20	Deney	132,4	29,3
	SEM	131,2	29,1

GFRP11 ile güçlendirilen betonarme kiriş elde edilen güçlendirme sonuçları SEM analizi ile karşılaştırıldığında yük taşıma kapasitesi ve sehim birbirine oldukça yakın çıkmıştır (Şekil 4.15.). Deneysel elde edilen yük-sehim grafiği sem ile iyi bir yakınsama ile doğrulanmıştır.



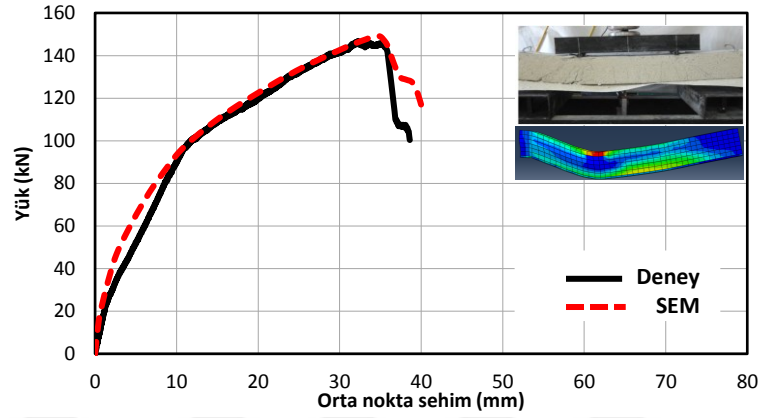
Şekil 4.15. GFRP11 kirişi deney ve SEM analiz sonuçlarının karşılaştırılması

GFRP 22 ile güçlendirilen kirişlerin modeli incelendiğinde yenilme zarf eğrisi deney sonuçları ile uyumlu çıkmıştır. Kirişlerin kırılma yük ve sehim değerleri birbirine uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.16.). Birinci zarf eğrisi akma dayanımına göre deneye ait grafiği ve SEM analizi karşılaştırıldığında iyi çıktığı görülmüştür.



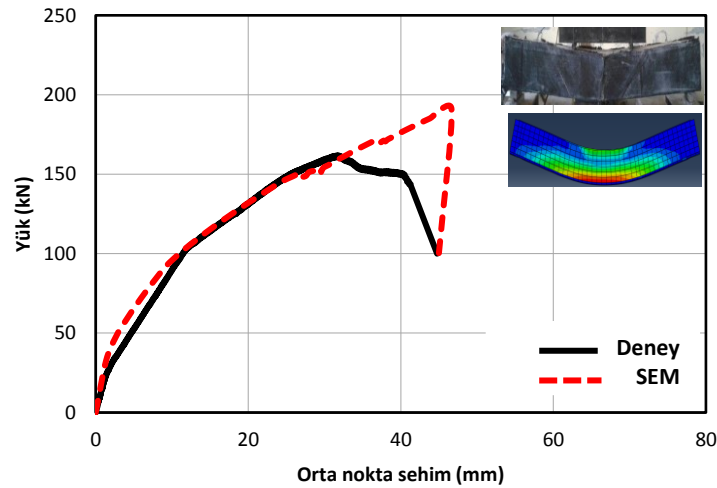
Şekil 4.16. GFRP 22 kirişi deney ve SEM analiz sonuçlarının karşılaştırılması

GFRP21 ile güçlendirilen betonarme kiriş deney sonuçlara göre elde edilen SEM analiz sonuçları ile incelediğinde grafik önemli çok uyumlu çıkmış ve yük taşıma ve sehim %95 ve üzeri oranında doğrulanmıştır (Şekil 4.17.).



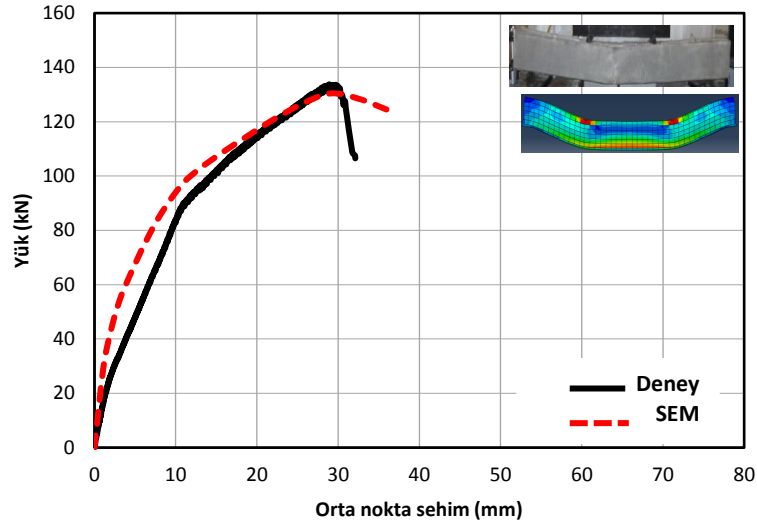
Şekil 4.17. GFRP 21 kirişi deney ve SEM analiz sonuçlarının karşılaştırılması

GFRP21-1 kiriş modelinde SEM analizinde kiriş kırılma yüküne erişince deformasyon başlamış ve yük bir miktar daha artmıştır. Kirişlerin kırılma yük ve sehim değerleri %85 oranında yakalanmıştır (Şekil 4.18.).



Şekil 4.18. GFRP 21-1 kirişi deney ve SEM analiz sonuçlarının karşılaştırılması

GFRP 20 ile güçlendirilen betonarme kiriş SEM analizi sonuçlara kıyasladığında birinci yenilme zarf eğrisi deney sonuçları ile az farklılık olduğu çıkmıştır. Ayrıca ikinci zarfta deney sonuçları ile uyumlu çıkmıştır (Şekil 4.19.).



Şekil 4.19. GFRP20 kirişi deney ve SEM analiz sonuçlarının karşılaştırılması

4.4. Parametrik Çalışmalar

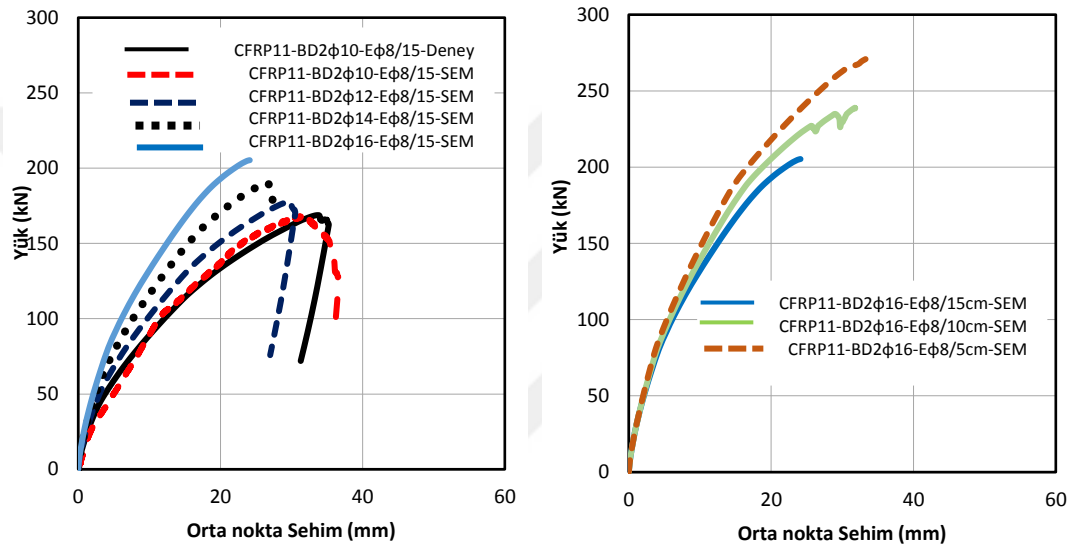
4.4.1. CFRP ile güçlendirilmiş farklı donatılı kirişler SEM analizi

Yapılan nümerik çalışmalarda CFRP11 ve CFRP22 güçlendirilen kiriş üzerinde boyuna donatının çapları değiştirilerek ve 15 cm etriye aralığı olarak SEM analizi modellenmiştir. Bundan sonra boyuna donatı 2Ø16 kirişe sahip üzerinde etriye aralıkları değiştirilerek SEM modellenmiştir Tablo (4.3.).

Tablo 4.3. CFRP11 ve CFRP22 ile güçlendirilmiş farklı donatı ve etriye aralığı kiriş numunelerinin kotlamaları

CFRP11-BD2Ø10-EØ8/15	Karbon kumaşlar (1 kat boyuna +1 kat enine) ile güçlendirilen betonarme kiriş-Boyuna donatı 2Ø10-Etriye Ø8/15cm aralığı
CFRP22-BD2Ø10-EØ8/15	Karbon kumaşlar (2 kat boyuna +2 kat enine) ile güçlendirilen betonarme kiriş-Boyuna donatı 2Ø10-Etriye Ø8/15cm aralığı

CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişler sonlu eleman metodu ile ABAQUS analiz sonucundan elde edilen grafiklerde yük taşıma kapasitesinde az artış olduğunu gözlenmiştir. Ayrıca orta noktadaki sehim ve yük taşıma fazla etkisinin olmadığı bulunmuştur. Ancak yük taşıma kapasitelerindeki artış donatının çapı artışla aynı oranda olmadığı tespit edilmiştir. Bunun için yeniden Ø16 olan boyuna donatı CFRP ile güçlendirilen betonarme kiriş etriye aralığı azaltmayı çalışılmıştır. Elde edilen grafiğin belirli bir seviyeye geldiği görülmüştür (Şekil 4.20.).

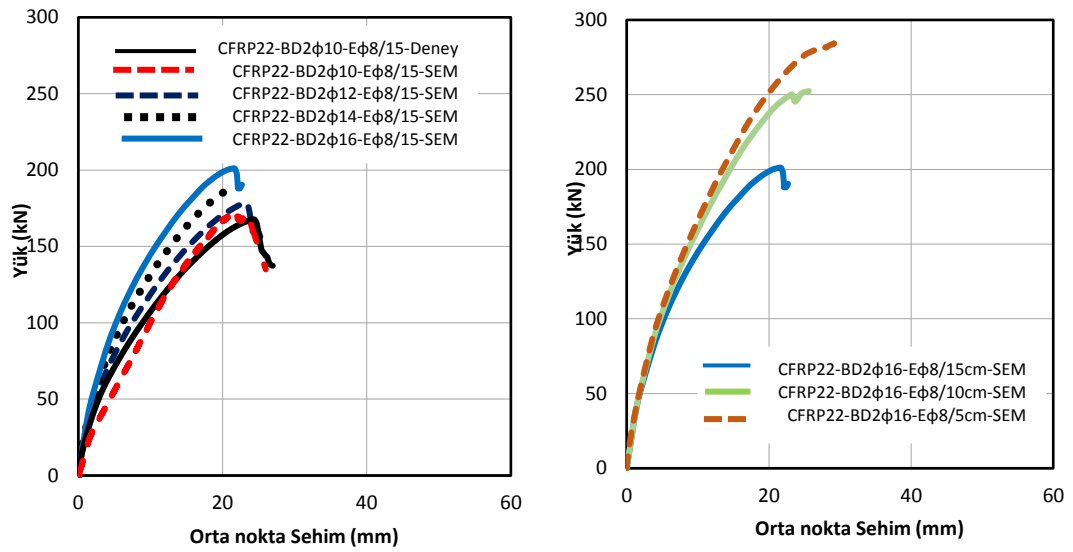


CFRP11 ile kiriş farklı donatı çaplarının SEM analizi

CFRP11 ile kiriş farklı etriye aralıkları SEM analizi

Şekil 4.20. CFRP11 ile kiriş farklı donatı ve farklı etriye aralıkları çaplarının SEM analizi

ABAQUS analiz sonucunda kiriş deformasyonu incelediğinde kesme bölgesinde kirişin hasar olduğu görülmüştür. Dolayısı ile kesme kırılması olmaktadır. Kesme donatısı artırarak kiriş yeniden analiz edilmiştir. Aynı zamanda CFRP ile güçlendirilen kirişlerin taşıma kapasitesindeki artışın GFRP kumaşlara nazaran daha fazla olduğu görülmüştür (Şekil 4.21.).



CFRP22 ile kiriş farklı donatı çaplarının SEM analizi

CFRP22 ile kiriş farklı etriye aralıkları SEM analizi

Şekil 4.21. CFRP22 ile kiriş farklı donatı çapları ve farklı etriye aralıkları SEM analizi

4.4.2. GFRP ile güçlendirilmiş farklı donatılı kirişler SEM analizi

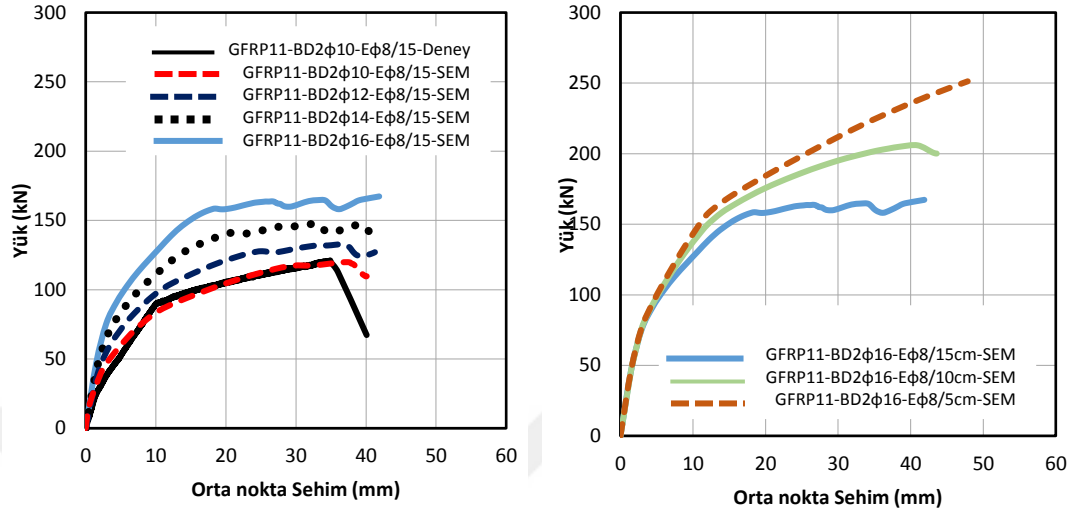
Yapılan nümerik çalışmalarda GFRP11 ve GFRP22 güçlendirilen kiriş üzerinde boyuna donatının çapları değiştirerek ve 15 cm etriye aralığı olarak SEM analizi modellenmiştir. Bundan sonra boyuna donatı 2 ϕ 16 kirişe sahip üzerinde etriye aralıkları değiştirerek SEM modellenmiştir Tablo (4.4.).

Tablo 4.4. GFRP11 ve GFRP22 ile güçlendirilmiş farklı donatı ve etriye aralığı kiriş numunelerinin kotlamaları

GFRP11-BD2 ϕ 10-E ϕ 8/15	Cam kumaşlar (1 kat boyuna +1 kat enine) ile güçlendirilen betonarme kiriş-Boyuna donatı 2 ϕ 10-Etriye ϕ 8/15cm aralığı
GFRP22-BD2 ϕ 10-E ϕ 8/15	Cam kumaşlar (2 kat boyuna +2 kat enine) ile güçlendirilen betonarme kiriş-Boyuna donatı 2 ϕ 10-Etriye ϕ 8/15cm aralığı

GFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişler sonlu eleman metodu ile ABAQUS analiz sonucundan elde edilen grafiklerde yük taşıma kapasitesinde az artış olduğunu gözlenmiştir. Ayrıca orta noktadaki sehimde ve yük taşımada fazla etkisinin olmadığı bulunmuştur. Bunun için yeniden ϕ 16 olan boyuna donatı GFRP ile güçlendirilen

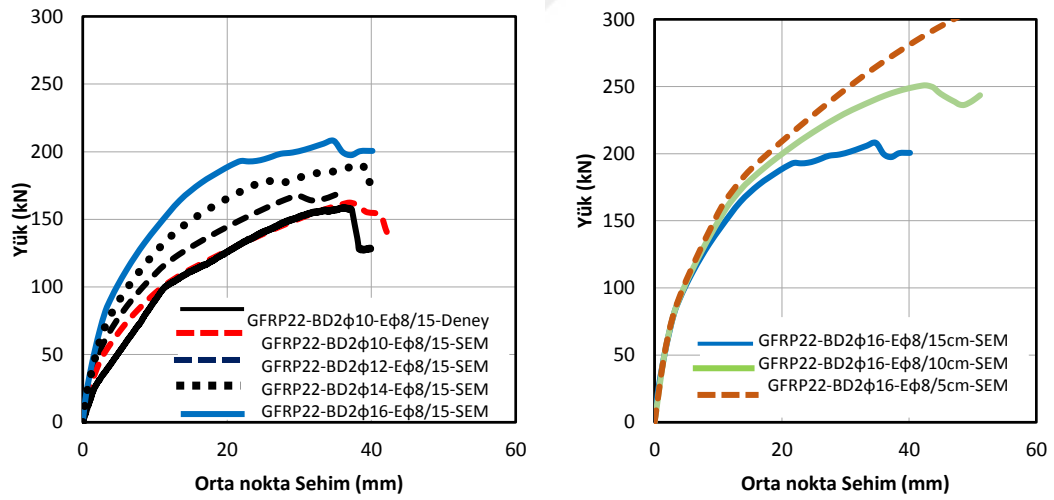
betonarme kiriş etriye aralığı azaltmayı çalışılmıştır. Elde edilen grafiğin belirli bir seviyeye geldiği görülmüştür (Şekil 4.22.) ve (Şekil 4.23.).



GFRP11 ile kiriş farklı donatı çaplarının SEM analizi

GFRP11 ile kiriş farklı etriye aralıkları SEM analizi

Şekil 4.22. GFRP11 ile kiriş farklı donatı ve farklı etriye aralıkları çaplarının SEM analizi



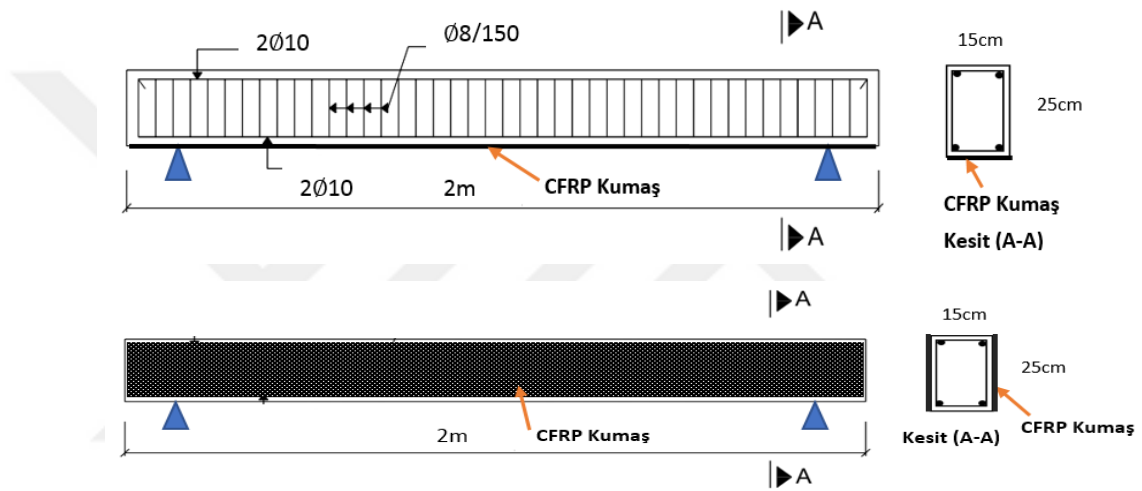
GFRP22 ile kiriş farklı donatı çaplarının SEM analizi

GFRP22 ile kiriş farklı etriye aralıkları SEM analizi

Şekil 4.23. GFRP22 ile kiriş farklı donatı çapları ve farklı etriye aralıkları SEM analizi

4.4.3. Yan ve altı yüzeyleri CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin SEM analizi

Betonarme kirişler boyutlar, yükleme ve sınır şartları altında bir parametre olarak farklı güçlendirme şekli kullanarak ABAQUS paket programı yardımıyla modellenmiştir. Yapılan nümerik çalışmalarda bir kat, iki kat ve üç kat karbon kompozitlerle kirişlerin altı ve yan yüzeyinde sarılarak SEM analizi modellenmiştir (Şekil 4.24.) ve (Tablo 4.5.) .



Şekil 4.24. Yan ve altı yüzeyleri CFRP ile betonarme kirişlerin güçlendirilmesi

Tablo 4.4. CFRP ile güçlendirme parametrik numunelerinin kotaları

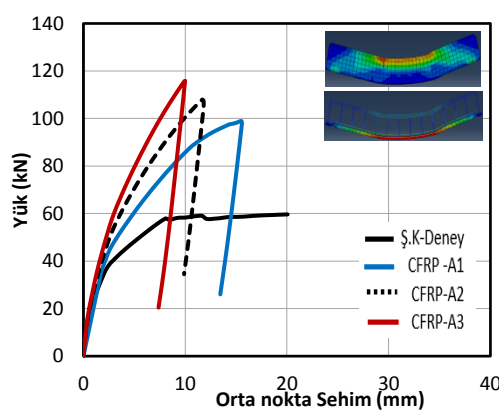
Numune kodu	Parametrik numune özellikleri
Ş.K	Kontrol kiriş
CFRP-A1	Alt yüzeyinde 1 kat boyuna yönde karbon kumaşla güçlendirilen betonarme kiriş
CFRP-A2	Alt yüzeyinde 2 kat boyuna yönde karbon kumaşla güçlendirilen betonarme kiriş
CFRP-A3	Alt yüzeyinde 3 kat boyuna yönde karbon kumaşla güçlendirilen betonarme kiriş
CFRP- Y1	Yan yüzeyinde 1 kat enine yönde karbon kumaşla güçlendirilen betonarme kiriş
CFRP- Y2	Yan yüzeyinde 2 kat enine yönde karbon kumaşla güçlendirilen betonarme kiriş
CFRP- Y3	Yan yüzeyinde 3 kat enine yönde karbon kumaşla güçlendirilen betonarme kiriş

Yapılan modelleme sonuçları kirişlerin alt yüzeyinde CFRP kumaş boyuna doğrultusunda yönlendirsek etkili olduğunu gözlenmiştir. Aynı zamanda yandan

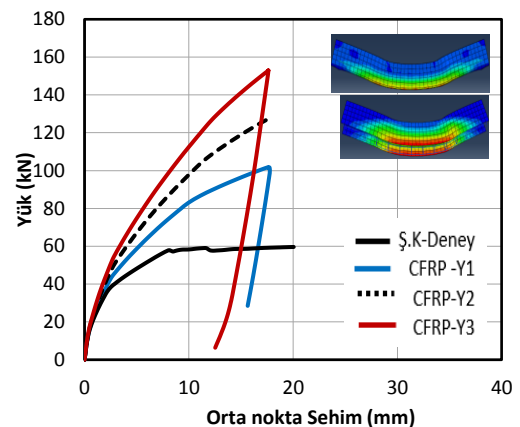
güçlendirme yapıldığında yan yüzeyinde CFRP kumaş enine doğrultusunda iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Yan ve altı yüzeyleri CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin SEM analiz sonuçları incelediğinde sargı katmanını arttıkça yük taşıma kapasitesi ve kiriş eğilme rijitlik artmıştır ancak sehim miktarı azalmıştır.

Altı yüzeyinde CFRP ile bir kat boyuna sarılarak güçlendirilen kirişlerde (CFRP-A1) şahit kirişe göre ortalama yük taşıma kapasitesi %153,19, CFRP ile iki kat boyuna sarılarak güçlendirilen kirişlerde (CFRP-A2) ortalama yük taşıma kapasitesi %164,1, CFRP ile üç kat boyuna sarılarak güçlendirilmiş kirişlerde (CFRP-A3) ortalama yük taşıma kapasitesi %176,6 artmıştır. Yük taşıma kapasiteleri ve sargı kolaylığı dikkate alındığında CFRP-A3 şeklindeki güçlendirmenin daha avantaj sağlayacağı açıktır (Şekil 4.25.).

Yan yüzeyinde CFRP ile bir kat enine sarılarak güçlendirilen kirişlerde (CFRP-Y1) şahit kirişe göre ortalama yük taşıma kapasitesi %156,925, CFRP ile iki kat enine sarılarak güçlendirilen kirişlerde (CFRP-Y2) ortalama yük taşıma kapasitesi %198,4, CFRP ile üç kat enine sarılarak güçlendirilmiş kirişlerde (CFRP-Y3) ortalama yük taşıma kapasitesi %234,3 artmıştır. Yük taşıma kapasiteleri ve sargı kolaylığı dikkate alındığında CFRP-Y3 şeklindeki güçlendirmenin daha avantaj sağlayacağı açıktır (Şekil 4.25.).



Alt yüzeyinde CFRP ile kiriş SEM analizi

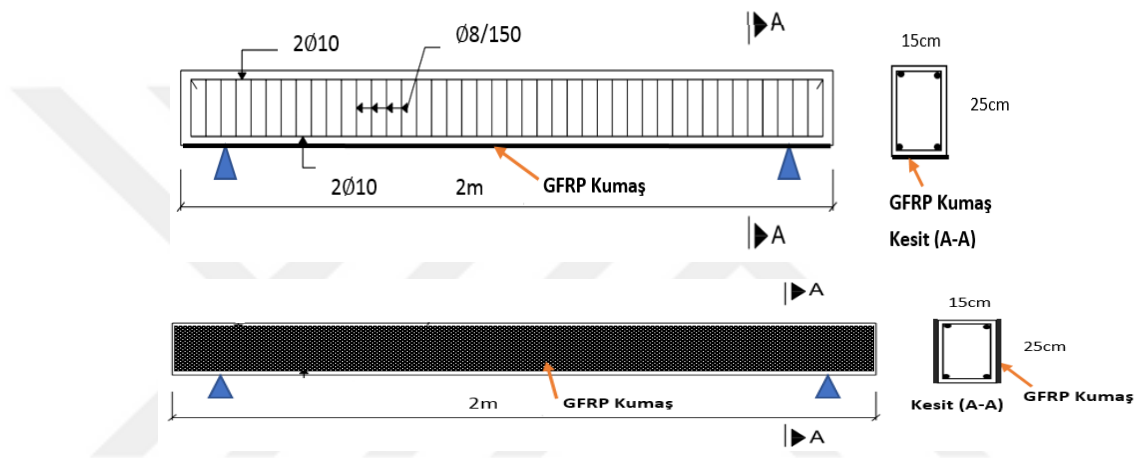


Yan yüzeyinde CFRP ile kiriş SEM analizi

Şekil 4.25. Yan ve altı yüzeyinde CFRP ile güçlendirilmiş kiriş SEM analizi

4.4.4. Yan ve altı yüzeyleri GFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin SEM analizi

Betonarme kirişlerin boyutları, yükleme ve sınır şartları altında bir parametre olarak farklı güçlendirme şekli kullanarak ABAQUS paket programı yardımıyla modellenmiştir. Yapılan nümerik çalışmalarda bir kat, iki kat ve üç kat cam kompozitlerle kirişlerin altı ve yan yüzeyinde sarılarak SEM analizi modellenmiştir (Şekil 4.26.) ve (Tablo 4.5.) .



Şekil 4.26. Yan ve altı yüzeyleri GFRP ile betonarme kirişlerin güçlendirilmesi

Tablo 4.5. GFRP ile güçlendirme parametrik numunelerinin kotlamaları

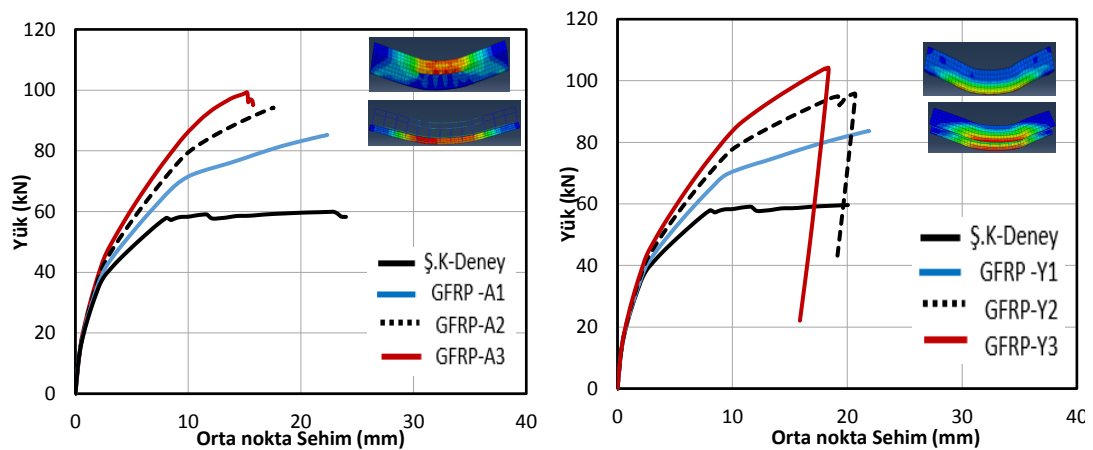
Numune kodu	Parametrik numune özellikleri
Ş.K	Kontrol kiriş
GFRP-A1	Alt yüzeyinde 1 kat boyuna yönde cam kumaşla güçlendirilen betonarme kiriş
GFRP-A2	Alt yüzeyinde 2 kat boyuna yönde cam kumaşla güçlendirilen betonarme kiriş
GFRP-A3	Alt yüzeyinde 3 kat boyuna yönde cam kumaşla güçlendirilen betonarme kiriş
GFRP- Y1	Yan yüzeyinde 1 kat enine yönde cam kumaşla güçlendirilen betonarme kiriş
GFRP- Y2	Yan yüzeyinde 2 kat enine yönde cam kumaşla güçlendirilen betonarme kiriş
GFRP- Y3	Yan yüzeyinde 3 kat enine yönde cam kumaşla güçlendirilen betonarme kiriş

Yapılan modelleme sonuçlarından kirişlerin alt yüzeyinde GFRP kumaş boyuna yönde etkili olduğu gözlenmiştir. Benzer şekilde yan yüzeyinde güçlendirme yapıldığında GFRP kumaşla enine yönde iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Yan ve altı yüzeyleri GFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin SEM analiz sonuçları incelendiğinde sargı katmanı arttıkça yük taşıma kapasitesi ve kiriş eğilme rijitlik artmıştır ancak sehım miktarı azalmıştır (Şekil 4.27.).

Altı yüzeyinde GFRP ile bir kat boyuna sarılarak güçlendirilen kirişlerde (GFRP-A1) şahit kirişe göre ortalama yük taşıma kapasitesi %132,8, GFRP ile iki kat boyuna sarılarak güçlendirilen kirişlerde (GFRP-A2) ortalama yük taşıma kapasitesi %146,9, GFRP ile üç kat boyuna sarılarak güçlendirilmiş kirişlerde (GFRP-A3) ortalama yük taşıma kapasitesi %154,6 artmıştır. Yük taşıma kapasiteleri ve sargı kolaylığı dikkate alındığında GFRP-A3 şeklindeki güçlendirmenin daha avantaj sağlayacağı açıktır (Şekil 4.27.).

Yan yüzeyinde GFRP ile bir kat enine sarılarak güçlendirilen kirişlerde (GFRP-A1) şahit kirişe göre ortalama yük taşıma kapasitesi %129,7, GFRP ile iki kat enine sarılarak güçlendirilen kirişlerde (GFRP-A2) ortalama yük taşıma kapasitesi %146,9, GFRP ile üç kat enine sarılarak güçlendirilmiş kirişlerde (GFRP-A3) ortalama yük taşıma kapasitesi %162,5 artmıştır. Yük taşıma kapasiteleri ve sargı kolaylığı dikkate alındığında GFRP-A3 şeklindeki güçlendirmenin daha avantaj sağlayacağı açıktır (Şekil 4.27.).



Alt yüzeyinde GFRP ile kiriş SEM analizi

Yan yüzeyinde GFRP ile kiriş SEM analizi

Şekil 4.27. Yan ve altı yüzeyinde GFRP ile güçlendirilmiş kiriş SEM analizi

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, eğilme ve kesme dayanımı yetersiz dikdörtgen kesitli kirişlerin Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile analizi üzerine çalışılmıştır. Yetersiz eğilme ve kesme donatısı kullanılarak üretilen kiriş numunelerde, düşük dayanımlı beton, tek doğrultulu karbon ve cam kumaşlar kullanılmıştır. Karbon ve Cam Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP ve GFRP) kompozitler enine ve boyuna doğrultularda yönlendirilerek kirişler U şeklinde güçlendirilmiştir. Dört nokta eğilme testi ile test edilen kirişlerin eğilme davranışları tespit edilerek Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile analiz edilmiştir. Çözüm ağı boyutu ve şekli, Dilasyon Açısı (DA), viskozite parametreleri değiştirilerek ve Mander, Kent-Park ve Hognestad tarafından önerilen beton modelleri kullanılarak betonarme kiriş numunelerinin davranışları SEM analizleri ile doğrulanmaya çalışılmıştır. Kiriş betonunun modelinde sonlu elemanlar paket programı içinde tanımlı Beton Hasarlı Plastisite (BHP) modeli kullanılmıştır. Yük ve sınır şartları deneysel çalışmadaki gibi, FRP kompozitler ile güçlendirilmiş kirişlerin modeline FRP kompozitler kabuk eleman olarak kirişin yüzeylerine tanımlanmıştır. Kirişlerin SEM analiz sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Modellenen betonarme kiriş numunemi üzerinde sadece güçlendirme şekilleri değiştirilerek veya güçlendirme şekilleri değiştirilmeden sadece boyuna ve enine donatılar değiştirilerek parametrik çalışma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- a. Hex-dominated çözüm ağı türü ve 50 mm çözüm ağı boyutu, 40-45 derece aralığındaki DA0 ve mander sargısız beton modeli ile betonarme kontrol kirişi iyi bir yakınsama ile modellenmiştir.
- b. FRP kompozitler ile güçlendirilmiş kiriş numunelerinin deney sonuçları ile ve SEM analiz sonuçları karşılaştırılarak uygun parametreler yeniden tespit

edilmiştir. Kiriş davranışlarında deneysel çalışmaya en yakın sonuç Mander beton modeli ve 40 ± 2 derece dilasyon açısı kullanılarak elde edilmiştir.

- c. Deney sonuçları incelendiğinde FRP sargı katmanını artırıldığında kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin arttığı ancak bu artışın FRP sargı katmanındaki artışla aynı oranda olmadığı SEM analizi ile de tespit edilmiştir.
- d. FRP'ler ile güçlendirilen kirişlerde kiriş dayanımı ve yenilme zarf eğrileri SEM analiz sonuçları deney sonuçları ile oldukça yakın çıkmış, kırılma yük ve sehim değerleri ise %95 ve üzeri oranında yakalanmıştır.
- e. Güçlendirilen kirişlerde boyuna donatının parametrik olarak çapları değiştirildiğinde yük taşıma kapasitesinde büyük artış olmadığı kesme kuvvetinin kritik olmaya başladığı tespit edilmiştir. Bu nedenle aynı model üzerine etriye aralığı azaltılmış ve yük taşıma kapasitesi ve sehim değerinde gözle görülür iyileşme olduğu bulunmuştur.
- f. Parametrik olarak betonarme kirişlerin alt ve yan yüzeyleri FRP kumaşlarla güçlendirilerek SEM analizi yapılmıştır. Yapılan modelleme sonuçlarında kirişlerin alt yüzeyinde FRP kumaşların boyuna doğrultusunda daha etkili olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda kirişlerin yan yüzeyinde FRP kumaşların enine doğrultusunda daha etkili olduğu gözlenmiştir Güçlendirilen kirişlerin taşıma kapasitesindeki artışın GFRP kumaşlara nazaran CFRP kumaşlarla daha fazla olduğu görülmüştür.

SEM kullanılarak betonarme kirişlerin FRP ile onarım ve güçlendirilmesinde daha hızlı, güvenilir ve ekonomik sonuçlar elde edilebilir. Ayrıca benzer özelliklere sahip kirişlerde FRP türü ve oranı, güçlendirme şekli vb. parametreler değiştirilerek deneysel çalışmaya gerek kalmadan sayısal deney numuneleri üretilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Sarıbyık, A., Betonların Güçlendirilmesinde FRP Kompozitlerin Hibrit Olarak Kullanımının etkisi. Sakarya Üniversitesi. J. Sci. , 383–391, 2018.
- [2] Zaman, A., Gutub, S., and Wafa, M, A review on FRP composites applications and durability concerns in the construction sector. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1966–1988, 2013.
- [3] Rehman, S., Finite Element Analysis of Impact-perforated Reinforced Concrete Slabs. Aalto University, Structural Engineering , Master Thesis ,2017.
- [4] Chen, S., Zhang, M., Allowable tensile strain of FRP in strengthening RC beam. 2 nternational Conference on Electric Technology and Civil Engineering, ICETCE 2011 - Proceedings , 2887–2890, 2011.
- [5] BULUT, N., CFRP ile Kesmeye Karşı Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Doğrusal Olmayan Analizi. GAZİ Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, ANKARA, 2009.
- [6] Yilmaz, M. C., Anil, Ö., Alyavuz ,B., and Kantar, E., Structure Concrete Load displacement behavior of concrete beam under monotonic static and low velocity impact load. İnternational journal of civil Engineering, no. 4, 2014.
- [7] Ağcakoca ,E., Z. Garip ,Ş., and M. Aktaş, HM-CFRP ile güçlendirilmiş çelik I kirişlerin eğilme davranışlarının YSA analizi ile incelenmesi The investigation of HM-CFRP reinforced steel beams analysis of bending behavior in YSA. SAÜ Fen Bil Der 20. Cilt, 2. Sayı, s. 359-370 2016.
- [8] Zhou ,H., Fernando ,D., G. Chen, and S. Kitipornchai, The quasi-static cyclic behaviour of CFRP-to-concrete bonded joints : An experimentAl study and a damage plasticity model. Engineering Structures 153, 43–56 Contents, pp. 43–56, 2017.
- [9] TETİK ,Y. O., Experimental Analysis Of Reinforced Concrete Beams' Behaviour With Steel Fibers Under Pure Torsion. Muğla Sıtkı Koçman University July, Master Of Science, 2016.
- [10] Wang ,J., Cohesive zone model of intermediate crack-induced debonding of FRP-plated concrete beam. International Journal of Solids and Structures no. 21, pp. 6630–6648, 2006.

- [11] Sharaky ,I. A., Torres ,L., Comas ,J., and C. Barris, Flexural response of reinforced concrete (RC) beams strengthened with near surface mounted (NSM) fibre reinforced polymer (FRP) bars. *Compos. Struct.*, vol. 109, no. 1, pp. 8–22, 2014.
- [12] Mínguez ,J., González ,D. C., and M. A. Vicente, Fiber geometrical parameters of fiber-reinforced high strength concrete and their influence on the residual post-peak flexural tensile strength. *Construction and Building Materials* 168 (906–922 , 2018.
- [13] M. Kaygusuz, Yangin Hasarina Uğramış Betonun Gfrp Ve Epoksi Enjeksiyonu İle Onarım Ve Güçlendirilmesi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, 2008.
- [14] G. Li, Pang ,S., Helms ,J. E., D. Mukai, S. I. Ibekwe, and W. Alaywan, Stiffness Degradation of FRP Strengthened RC Beams Subjected to Hygrothermal and Aging Attacks. Louisiana State University, Mechanical Engineering Department 795–812, 2002.
- [15] Demir ,A., Ozturk ,H., And Dok ,G., 3d Numerical Modeling Of Rc Deep Beam Behavior By Nonlinear Finite Element Analysis. *Disaster Science And Engineering* P. 13-18, 2(1), 2016.
- [16] Hamid,S.,R. C. C. Beams and R. C. C. Frames, Analytical Investigation on R.C.C. Beams And R.C.C. Frames.119–145, 2012.
- [17] Ali, O., Time-Dependent Reliability Of Frp Strengthened Reinforced Concrete Beams Under Coupled Corrosion And Changing Loading Effects.Unger University,Doctora thesis, 2014.
- [18] Almansa ,Lopez-,F., Alfarah B., and S. Oller, “Numerical simulation of RC frame testing with damaged plasticity model comparison with simplified models. 2nd Eur. Conf. Earthq. Eng. Seismol., no. November 2015, 1–12, 2014.
- [19] Tahmasebinia ,F., Numerical Modelling of Reinforced Concrete Slabs Subject to Impact Loading. University of Wollongong Thesis Collection University, Master of Engineering thesis, 2008.
- [20] J. Han, Z. Li, and J. Song, The Application of Finite Element Analysis Software (ABAQUS) in Structural Analysis. *International Conference on Computational and Information Sciences*, pp. 68–71, 2010.
- [21] Turner ,T. L. and Patel ,H. D., Analysis of SMA hybrid composite structures in MSC.Nastran and ABAQUS. *Journal Of Intelligent Material Systems And Structures*, Pp. 435–447, 2007

- [22] Jankowiak,T. and Lodygowski,T. i, Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model, Found. Civ. Environ., no. 6, pp. 53–69, 2005.
- [23] Riva ,P. and Minelli ,F., Numerical modeling of prestressed fiber reinforced high performance concrete beams subjected to shear. Dep. Civ. Eng. Univ. Brescia, Italy., 2004.
- [24] Feroj ,S., H. Master, and O. F. Sciencecivil, Numerical Modelling Of Reinforced Concrete Members Under Impact Load. Bangladesh University, Master Of Science In Civil Engineering, 2015.
- [25] Ullah ,S. N., L. F. Hou, Satchithanathan ,U., Chen ,Z., and H. Gu, “A 3D RITSS approach for total stress and coupled-flow large deformation problems using ABAQUS. Comput. Geotech., no. January, pp. 203–215, 2018.
- [26] Taqieddin ,Z. N., Elasto-plastic and damage modeling of reinforced concrete, Louisiana State University no. August, p. 173, 2008.
- [27] Sümer,Y., and Aktaş, M. Defining parameters for concrete damage plasticity model. Chall. J. Struct. Mech., no. 3, pp. 149–155, 2015.
- [28] Dalia ,S. M., Sanad ,A. M., and M. A. Moussa, Elastic-Plastic Analysis of Concrete Beams Using Finite Element Code . Abaqus , no. 4, pp. 4470–4475, 2016.
- [29] Al-Rahmani, A. and Abed ,F. H., Numerical investigation of hybrid FRP reinforced beams. 5th Int. Conf. Model. Simul. Appl. Optim. ICMSAO, 2013.
- [30] ARYAN ,A., Polipropilen Lif Takviyeli Betonarme Kirişlerin DeneySEL ve Analitik Olarak Araştırılması. 2014.
- [31] Mert, N., Karbon Fiber Takviyeli Polimer Plakalarla Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Doğrusal Olmayan Analizi. Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Doktora Tezi 2007.
- [32] Coşkun , E., Betonarme Yapıların Geleneksel Yöntemlerle Depreme Karşı Güçlendirilmesi. İstanbul Kültür Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2015.
- [33] Jeyabharathy ,A. S., Experimental Investigation On R.C.C Beam Retrofitted With Jute Fibre Sheet. International Conference on Current Trends in Engineering and Technology, ICCTET’13 ,pp. 3–5, 2013.
- [34] Y. Z. VULAŞ, Betonarme Kirişlerin Kesme Dayanımlarının Lifli Polimerlerle Arttırılması. Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Müh , Yüksek Lisans Tezi 2010.

- [35] Z. Ç. KANKAL, Betonarme Kirişlerin Cam Fiber Plakalarla Kesmeye Karşı Güçlendirilmesinde Ankraj Sayısının Etkisi. Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [36] A. RUTERS, Analytical Behaviour Of FRP Strengthened Reinforced Concrete Beams Under Low Velocity Impact Load Incorporating Rate Dependent Material Constitutive Models. University of Cape Town, Civil Engineering, Master thesis, 2014.
- [37] Parvin ,A. and Shah ,T. S., Fiber Reinforced Polymer Strengthening of Structures by Near-Surface Mounting Method. 2016.
- [38] Bocciarelli, M., Nisticò, N., Andrea, M., and Poggi, C., Composites : Part B Failure of RC beams strengthened in bending with unconventionally arranged CFRP laminates. Compos. Part B, 246–254, 2013.
- [39] ÖZCAN, Z., Betonarme Kirişlerin Kompozit Malzemeler ile Güçlendirilmesi. deprem sempozyumu, 1016–1022, Koceali 2005.
- [40] SARIBIYIK, A., Beton Dayanımı Düşük Betonarme Yapı Elemanlarının Lifli Kompozitler Güçlendirilmesi ve Karşılaştırılması. Sakarya Üniversitesi, İnşaat mühendisliği, Doktora tezi, 2013.
- [41] Arduini, A. ve Marco , N., Behavior of Precracked Rc Beams Strengthened With Carbon Frp Sheets. , no. May, pp. 63–70, 1997.
- [42] Biggs, G. Michael, Barton, Finite Element Modeling And Analysis Of Reinforced-Concrete Bridge Decks, 2000.
- [43] Rahimi, H., Concrete Beams Strengthened With Externally Bonded Frp Plates. Journal of Composites For Construction, 44–56, 2001.
- [44] Hu, H., Lin, F., and Jan, Y., Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams strengthened by fiber-reinforced plastics. Science direct, Composite Structures, 271–281, 2004.
- [45] Akbarzadeh, H., Flexural Strengthening of RC Continuous Beams Using Hybrid. The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE, 27–31, China, 2011.
- [46] Attari, N., Amziane, S., and Chemrouk, M., Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets. Construction and Building Materials, 746–757, 2012.
- [47] Zidani M., Belakhdar, K., Tounsi, A., and Adda Bedia, E., Finite element analysis of initially damaged beams repaired with FRP plates. Composite Structures, 429–439, 2015.

- [48] Djeddi, F., Ghernouti, Y., Abdelaziz, Y., and Alex, L., Strengthening in flexure-shear of RC beams with hybrid FRP systems: Experiments and numerical modeling. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1642–1660, 2016.
- [49] Sagher, A., and Abed, F., Finite element parametric study of the shear behavior of GFRP-RC short beams. *7th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization, ICMSAO*, 1–5, 2017.
- [50] Hawileh R., Nawaz, W., and Abdalla, J., Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with Hardwire Steel-Fiber sheets. *Construction and Building Materials*, 562–573, 2018.
- [51] Farah, A., Lecture 1 Introduction to ABAQUS, Sakarya Üniversitesi, 1, 2017.
- [52] DEMİR, H., Kompozit Yapıların Sonlu Elemanlarda Alt Modellenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2013.
- [53] BULUT, E., FRP Sargılı Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kolonların Yük Taşıma Kapasitelerinin Farklı Davranış Modellerine Göre İrdelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [54] ERDEMLİ, S., Principle of Strengthening Reinforced Concrete Structures Using Frp Composite Material. Dicle University, Civil Engineering, Master Of Science, 2012.
- [55] Mander, J., Theoretical Stress-Strain Model For Confined Concrete. *ASCE, Struct. Eng.*, 1804–1826, 1989.
- [56] KALTAKCI, M., Eksenel Yük Altındaki Çelik Lifli ve Lifsiz Etriyeli Betonarme Kolonların Davranışının Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, 61–73, 2006.
- [57] Ren, W., Sneed, L., Yang, Y., Numerical Simulation of Prestressed Precast Concrete Bridge Deck Panels Using Damage Plasticity Model. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 45–54, 2015.
- [58] A. Z. Kamali, “Shear Strength of Reinforced Concrete Beams subjected to Blast Loading. Royal Institute of Technology (KTH), Master of Science Thesis, Sweden, 2012.
- [59] DOĞAN, A., Karbon Polimer Elyafı ile Güçlendirilmiş Beton Kirişlerin Sonlu Elemanlar Metodu İle Lineer Olmayan Analizi, Gazi Üniversitesi Fen, İnşaat Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- [60] Anil, Ö., and Belgin, Ç., Monotonik yükleme etkisi altındaki dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin sonlu elemanlar yöntemi ile doğrusal olmayan analizi. Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, 191–197, 2007.

- [61] L. Bitusca and M. Thesis, “Finite element modelling : Analysis of Reinforced Concrete Elements. Alborg University, The School of Engineering and Science, Master’s Thesis, 2016.
- [62] ÇAĞLAR, N., ÖZTÜRK, H., DEMİR, A., AKKAYA, A., TDY2007’ye Göre Tasarlanmış Betonarme Bir Yapının Doğrusal Elastik Olmayan Analiz Yöntemleri ile İncelenmesi. ISITES2014 Karabuk - TURKEY, 2014.
- [63] ÜNSAL, İ., DÜNDAR, C., TANRIKULU, K., Çekme Rijitleşmesinin FRP ve Çelik Donatılı Betonarme Kirişlerin Yük-Deplasman Davranışı Üzerindeki Etkisi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 429–439, 2016.
- [64] SÜMER, Y., FRP Elemanlarla Güçlendirilmiş Hasarlı Betonarme Kirişlerin Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi. Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Doktora tezi, 1–18, 2005.
- [65] Basak, S., and Paul, D., Damage Evaluation Of A Rcc Containment Structure Subjected To Damage Evaluation Of A Rcc Containment Structure. International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST) 2012, 2014.
- [66] Seçkin, E., Çelik Levha Perdeli Yapı Sisteminin Levha Kalınlığına Bağlı Olarak İncelenmesi. İstanbul Kültür Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi , 2004.
- [67] Michał, S., and Andrzej, W., Calibration of the CDP model parameters in Abaqus. The Kielce University of Technology, 25–29, 2015.

ÖZGEÇMİŞ

Wael Mansur ALDHABIR, Yemenliyim, 1990'da Hajjah'ın Hajjah ilçesi'nde doğdu. İlkokulu Hajjah'ta tamamladıktan sonra ortaokul ve lise eğitimini Sana'da tamamladı. 2008 yılında Thamar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yapı Bölümüne girdi, Yapı Bölümü'nden fakülte birincisi ve bölüm birincisi olarak 2013 yılında mezun oldu. 2014 yılında Thamar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmayı başladı, 2015 yılında Sana'a şehrinde bir inşaat şirkette mühendis olarak çalıştı. 2016 yılında Türkiye bursları tarafından yüksek lisan okumak için burs verilmiş. 2016 yılında Sakarya Üniversitesi Yapı Eğitimi Anabilim Dalı'nda yüksek lisansını başladı.