

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

“Lifli Polimer Kompozit Malzemeler ile Güçlendirilen Beton Numunelerin Basınç Dayanımına Lif Türü ve Sarım Sayısının Etkisinin Deneysel Ve Analitik Yöntemlerle İncelenmesi” isimli tez çalışmasını bana öneren ve her aşamasında gerek bilgi ve tecrübelerini gerekse manevi desteğini benden esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNİŞİK'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı yürüttüğüm süreç içerisinde desteklerini esirgemeyen ve çalışmamın analitik kısmında değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan, Sayın Prof. Dr. Murat Emre KARTAL ve Sayın Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN hocalarıma çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamı başından beri takip eden, inceleyen ve her aşamasında bana yardımcı olan, Sayın Arş. Gör. Dr. Ali Fuat GENÇ'e ve tez dönemim boyunca emeği geçen tüm hocalarıma çok teşekkür ederim.

Yürüttüğüm tez çalışmasında her zaman yanımda olan ve destekleriyle bu çalışmanın başarıya ulaşmasında büyük katkıları olan Dr. Öğr. Üyesi Safa NAYIR'a, Arş. Gör. Dr. Fezayil SUNCA'ya, Arş. Gör. Dr. Ali KAYA'ya, Arş. Gör. Alihan BALTACI'ya, Arş. Gör. Yunus Emrahan AKBULUT'a, teşekkür ederim.

Yürüttüğümüz akademik çalışmalarda birbirimize katkı sağladığımız çalışma arkadaşlarım İnş. Yük. Müh. Rıdwan Adebayo BELLO'ya, İnş. Yük. Müh. Sara MOSTOFİ'e, İnş. Yük. Müh. Mustafa YILMAZ'a, İnş. Müh. Ali SARIKOÇ'a teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca bana her türlü desteği veren ve yanımda olan babam Ercüment Kaşif KARAHASAN'a, annem Leyla KARAHASAN'a ve abim Arş. Gör. Olguhan Şevket KARAHASAN'a teşekkür eder ve bu çalışmanın, yeni çalışmalara rehberlik etmesini ve ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Algıhan Kaşif KARAHASAN
Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Lifli Polimer Kompozit Malzemeler ile Güçlendirilen Beton Numunelerin Basınç Dayanımına Lif Türü ve Sarım Sayısının Etkisinin Deneysel Ve Analitik Yöntemlerle İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 03/07/2023

Algihan Kaşif KARAHASAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	3
1.2.1. Beton/Betonarme Yapıların Sonlu Eleman Modeli Hakkında Yapılan Çalışmalar	4
1.2.2. Yapıların veya Yapı Elemanlarının Onarılması veya Lifli Polimer Kompozit Malzemelerle Güçlendirilmesi.....	8
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği	17
1.4. Malzeme Davranışının Modellenmesi.....	19
1.5. Beton İçin Tasarlanan Gerilme-Şekil Değiştirme Modelleri.....	21
1.5.1. Kent-Park ve Geliştirilmiş Kent-Park Modeli	22
1.5.2. Hognestad Modeli.....	25
1.5.3. Sheikh-Üzümeri Modeli	26
1.6. Betonun Elastisite Modülü	27
1.6.1. Elastisite Modülünün Belirlenmesi.....	28
1.6.1.1. Sekant Modülü.....	29
1.6.1.2. Teğet (Tanjant) Modülü.....	29
1.6.1.3. Başlangıç Teğeti Modülü.....	30
1.7. Beton Hasar Plastisite Modeli (CDP).....	31
1.8. Fiber Takviyeli Polimerler (FRP).....	33
1.8.1. FRP Türleri	34

1.9.	Reçineler (Polimer Matrisler).....	36
1.9.1.	Termoplastikler.....	36
1.9.2.	Termosetler.....	36
1.9.2.1.	Epoksi.....	36
1.9.2.2.	Polyester.....	37
1.9.2.3.	Vinylester.....	37
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	38
2.1.	Giriş.....	38
2.2.	Deneyisel Çalışmalar.....	38
2.2.1.	Beton Numunelerin Geometrik Özellikleri.....	38
2.2.2.	Beton Numunelerin Tasarımı ve Üretimi.....	39
2.2.3.	Beton Numunelerin Yüzeyine Astar Malzemesinin Uygulanması.....	41
2.2.4.	Beton Numunelerin Yüzeyine Epoksi Yapıştırıcı Uygulanması.....	43
2.2.5.	Beton Numunelerin Yüzeyine FRP Kumaşların Uygulanması.....	45
2.2.6.	Beton Numunelere Uygulanan Basınç Deneyi.....	49
2.3.	Analitik Çalışmalar.....	58
2.3.1.	Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	58
2.3.2.	ABAQUS Sonlu Eleman Analiz Programı.....	59
2.3.3.	ABAQUS İçerisinde Sonlu Eleman Analiz Aşamaları.....	62
2.3.4.	Beton Numunelerin Sonlu Eleman Analizleri.....	62
2.3.4.1.	Referans Numunesinin ([1]-UW) Sonlu Eleman Analizi.....	63
2.3.4.2.	Karbon Lifli Polimer Kumaşlarla Güçlendirilmiş Beton Numunelerin ([2]-CW-2 ve [3]-CW-3) Sonlu Eleman Analizleri.....	73
2.3.4.3.	Cam Lifli Polimer Kumaşlarla Güçlendirilmiş Beton Numunelerin ([4]-GW-2 ve [5]-GW-3) Sonlu Eleman Analizleri.....	81
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	85
4.	KAYNAKLAR.....	89
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

LİFLİ POLİMER KOMPOZİT MALZEMELER İLE GÜÇLENDİRİLEN BETON NUMUNELERİN BASINÇ DAYANIMINA LİF TÜRÜ VE SARIM SAYISININ ETKİSİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Algıhan Kaşif KARAHASAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ahmet Can Altunışık
2023, 94 Sayfa

Bu tez çalışması kapsamında, lifli polimer kompozit malzemeler ile güçlendirilen beton numunelerin basınç dayanımına lif türü ve sarım sayısının etkisinin deneysel ve analitik yöntemlerle incelemesi yapılmıştır. Gerçekleştirilen tez çalışması üç ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, beton/betonarme yapıların sonlu eleman modeli hakkında yapılan çalışmalara, yapıların veya yapı elemanlarının onarılması veya lifli polimer kompozit malzemelerle güçlendirilmesi hususunda yapılan çalışmalara, lifli polimer kompozit malzeme hakkında genel bilgilere, geliştirilen malzeme modellerine ve bu bağlamda oluşturulan formülasyonlara yer verilmektedir. İkinci bölümde; tez kapsamında yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgulara yer verilmektedir. İkinci bölümde yapılan çalışmalar üç kısma ayrılmıştır. İlk kısımda; laboratuvar ortamında deneylerde kullanılacak olan beş adet numunenin üretimi gerçekleştirilmiştir. İkinci kısımda; üretimi gerçekleştirilen silindirik beton numunelere laboratuvar ortamında lifli polimer kompozit kumaşlarla farklı lif türü ve farklı sarım sayısı parametrelerine bağlı olarak güçlendirme işlemi uygulanmıştır. Üçüncü kısımda; güçlendirme uygulanan numunelerin basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Üçüncü bölümde ise; tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve önerilere yer verilmektedir.

Anahtar Kelimeler : Beton, Sonlu Eleman Modeli, Lifli Polimer Kompozit Malzeme, Güçlendirme, Basınç Analizi

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FIBER TYPE AND NUMBER OF LAYERS
ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE SAMPLES REINFORCED
WITH FIBER POLYMER COMPOSITE MATERIALS BY EXPERIMENTAL AND
ANALYTICAL METHODS

Algihan Kaşif KARAHASAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK
2023, 94 Page

Within the scope of this thesis, the effect of fiber type and number of layers on the compressive strength of concrete samples reinforced with fiber-reinforced polymer composite materials is investigated by experimental and analytical methods. The thesis study consists of three main parts. In the first chapter, studies on the finite element model of concrete/reinforced concrete structures, studies on repairing structures or structural elements or strengthening them with fibrous polymer composite materials, general information about fibrous polymer composite material, material models developed and formulations created in this context are given. In the second chapter; The studies carried out within the scope of the thesis and the findings obtained from these studies are included. The work done in the second chapter is divided into three parts. In the first part; The production of five samples to be used in experiments in the laboratory environment was carried out. In the second part; Reinforcement process was applied to the cylindrical concrete samples produced in the laboratory with fiber polymer composite fabrics depending on different fiber type and different layers number parameters. In the third part; Compression tests of the reinforced specimens were carried out. In the third chapter; The results and recommendations obtained from the thesis study are given.

Key Words: Concrete, Finite Element Model, Fiber Reinforced Polymer Composite, Reinforcement, Pressure Analysis.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Doğrusal elastik malzeme modeli.....	19
Şekil 1.2. Doğrusal olmayan elastik malzeme modeli	20
Şekil 1.3. Elasto-plastik malzeme modeli	20
Şekil 1.4. İdeal elasto-plastik malzeme modeli.....	20
Şekil 1.5. Pekleşen ideal elasto-plastik malzeme modeli.....	20
Şekil 1.6. Rijit plastik malzeme modeli	21
Şekil 1.7. Kent-park tarafından önerilen gerilme-şekil değiştirme modeli...	22
Şekil 1.8. Geliştirilmiş Kent-Park gerilme-şekil değiştirme modeli	23
Şekil 1.9. Hognestad tarafından geliştirilen gerilme-şekil değiştirme modeli	25
Şekil 1.10. Sheikh-Üzümeri tarafından geliştirilen gerilme-şekil değiştirme modeli	26
Şekil 1.11. Beton için oluşturulan elastisite modülleri	28
Şekil 1.12. Sekant Modülü	29
Şekil 1.13. Teğet (Tanjant) Modülü	29
Şekil 1.14. Başlangıç Teğeti Modülü	30
Şekil 1.15. Tek eksenli yükleme durumunda betonun tepkileri: (a) Basınç, (b) Çekme	32
Şekil 1.16. a) CFRP; b) GFRP; c) AFRP; d) BFRP	35
Şekil 2.1. Beton numunelere ait geometrik ölçüler.....	39
Şekil 2.2. Üretimde kullanılan mikser kazanı, ilave malzemeler ve kazan içerisindeki betonun durumu.....	40
Şekil 2.3. Üretilen betonun kalıplara doldurulması ve üst yüzeylerinin düzlenmesi	41
Şekil 2.4. Kür havuzunda bekleyen numuneler	41
Şekil 2.5. Astar malzemesinin beton yüzeylere uygulanması.....	43
Şekil 2.6. Astar uygulamasından sonra numunelerin görünümü	43
Şekil 2.7. Beton yüzeylere epoksi esaslı yapıştırıcı (reçine) uygulanması ...	45
Şekil 2.8. Reçine sürülmüş beton yüzeyine ilk kat FRP kumaş uygulaması	46
Şekil 2.9. Çok katlı FRP kumaş uygulaması.....	46
Şekil 2.10. [1]-UW Referans numunesi	47
Şekil 2.11. [2]-CW-2 ve [3]-CW-3 numuneleri	48
Şekil 2.12. [4]-GW-2 ve [5]-GW-3 numuneleri.....	48

Şekil 2.13.	Deneyslerde kullanılacak numunelerin genel görünümü	48
Şekil 2.14.	Deneyslerde kullanılan kompressometre.....	49
Şekil 2.15.	Deneysde kullanılan basınç makinesi.....	50
Şekil 2.16.	[1]-UW numunesinin basınç testi öncesi ve sonrası görüntüsü	50
Şekil 2.17.	[1]-UW numunesinin deneysel verilerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği	51
Şekil 2.18.	[2]-CW-2 numunesinin basınç testi öncesi ve sonrası görüntüsü.	52
Şekil 2.19.	[2]-CW-2 numunesinin deneysel verilerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği	52
Şekil 2.20.	[3]-CW-3 numunesinin basınç testi öncesi ve sonrası görüntüsü.	53
Şekil 2.21.	[3]-CW-3 numunesinin deneysel verilerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği	54
Şekil 2.22.	[4]-GW-2 numunesinin basınç testi öncesi ve sonrası görüntüsü.	55
Şekil 2.23.	[4]-GW-2 numunesinin deneysel verilerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği	55
Şekil 2.24.	[5]-GW-3 numunesinin basınç testi öncesi ve sonrası görüntüsü.	56
Şekil 2.25.	[5]-GW-3 numunesinin deneysel verilerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği	56
Şekil 2.26.	Tüm numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri	57
Şekil 2.27.	Dairenin çevresinin sonlu elemanlar yöntemi (yaklaşımı) ile bulunması	58
Şekil 2.28.	Sonlu eleman modelleri	59
Şekil 2.29.	ABAQUS/CAE 2022 paket programı.....	60
Şekil 2.30.	ABAQUS/CAE 2022 programı arayüzü.....	61
Şekil 2.31.	Model geometrisinin oluşturulması	63
Şekil 2.32.	Modeli eş hücrelere ayırma.....	63
Şekil 2.33.	Modele ait kütle yoğunluğu, elastisite modülü ve poisson oranının girilmesi	64
Şekil 2.34.	Modele ait Plasticity parametrelerinin girilmesi.....	65
Şekil 2.35.	Gerilme-inelastik şekil değiştirme değerlerinin girilmesi.....	66
Şekil 2.36.	Hasar parametreleri ve inelastik şekil değiştirme değerlerini girilmesi	66
Şekil 2.37.	Çekme davranışına ait değerlerin girilmesi	67
Şekil 2.38.	Create Instance bölümünün girilmesi	67
Şekil 2.39.	Step bölümünün girilmesi	68
Şekil 2.40.	Analiz için zaman periyot seçimi.....	68
Şekil 2.41.	Program çıktılarının düzenlenmesi	69

Şekil 2.42.	Model alt yüzeyi için girilen sınır şartları.....	70
Şekil 2.43.	Model üst yüzeyi için girilen sınır şartları ve deplasman değeri ..	70
Şekil 2.44.	Modele uygulanan ağ (mesh) aralığının tanımlanması.....	71
Şekil 2.45.	Mesh Controls kısmının girilmesi.....	71
Şekil 2.46.	[1]-UW numunesinin maksimum dayanımdaki gerilme dağılımı	72
Şekil 2.47.	Analiz sonunda gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması	72
Şekil 2.48.	Oluşturulan CFRP modelin eş parçalara bölünmüş hali	73
Şekil 2.49.	CFRP malzemenin kütle yoğunluğu ve elastik değerleri.....	74
Şekil 2.50.	Hashin Damage değerlerinin girilmesi	75
Şekil 2.51.	Hashin Damage parametrelerinin grafiksel gösterimi	75
Şekil 2.52.	Damage Evolution ve Damage Stabilization parametrelerinin girilmesi	76
Şekil 2.53.	[2]-CW-2 ve [3]-CW-3 numunesine ait CFRP katman parametreleri	77
Şekil 2.54.	FRP tanımlama işleminin ardından oluşan görüntü.....	77
Şekil 2.55.	Kontak işleminin uygulanması	78
Şekil 2.56.	[2]-CW-2 numunesinin maksimum dayanımdaki gerilme dağılımı	78
Şekil 2.57.	[2]-CW-2 numunesine ait gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması	79
Şekil 2.58.	[3]-CW-3 numunesinin maksimum dayanımdaki gerilme dağılımı	80
Şekil 2.59.	[3]-CW-3 numunesine ait gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması	80
Şekil 2.60.	GFRP'ye ait elastik değerlerin girilmesi.....	81
Şekil 2.61.	GFRP'ye ait Hashin Damage değerlerinin girilmesi	82
Şekil 2.62.	[4]-GW-2 numunesinin maksimum dayanımdaki gerilme dağılımı	82
Şekil 2.63.	[4]-GW-2 numunesine ait gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması	83
Şekil 2.64.	[5]-GW-3 numunesinin maksimum dayanımdaki gerilme dağılımı	83
Şekil 2.65.	[5]-GW-3 numunesine ait gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması	84

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Farklı türdeki liflerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları.	35
Tablo 1.2. Termoset reçinelerin mekanik özellikleri	37
Tablo 2.1. Numunelerin üretiminde kullanılan malzeme karışım miktarları.	39
Tablo 2.2. Astar malzemesinin teknik özellikleri	42
Tablo 2.3. Astar malzemesinin karışım oranları	42
Tablo 2.4. Uygulanan reçine karışımının teknik özellikleri.....	44
Tablo 2.5. Reçine bileşenlerinin karışım oranları	44
Tablo 2.6. Deneylerde kullanılan numunelerin isimlendirilmesi.....	47
Tablo 2.7. Güçlendirilmiş numunelerin, basınç dayanımına etkisinin yüzdesel ifadesi.....	57
Tablo 2.8. Maksimum basınç dayanımlarının karşılaştırılması	84

SEMBOLLER DİZİNİ

AFRP	: Aramid fiber takviyeli polimer
BFRP	: Bazalt fiber takviyeli polimer
CDP	: Beton hasar plastisite
CFRP	: Karbon fiber takviyeli polimer
FCC	: fiber takviyeli polimer ile sargılanmış beton
FE	: Sonlu eleman
FEA	: Sonlu eleman analizi
FRP	: Fiber takviyeli polimer
GFRP	: Cam fiber takviyeli polimer
PET	: Polietilen tereftalat
ρ	: Donatı oranı
$\rho_{\max}$	: Maksimum donatı oranı
f_c	: Standart silindirin beton basınç dayanımı
ϵ_c	: Betonun şekil değiştirmesi
σ_c	: Betonun basınç gerilmesi
A_w	: Enine donatı kesit alanı
ϵ_{50u}	: Sargısız beton için maksimum beton dayanımının %50'sine eşit olan gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirme
ϵ_{50c}	: Sargılı beton için maksimum beton dayanımının %50'sine eşit olan gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirme
s	: Enine donatı aralığı
a	: Kesitin kısa kenarı
b	: Kesitin uzun kenarı
f_y	: Donatının akma dayanımı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Gelişen teknoloji ile beraber mühendislik yapılarında kullanılan yapı malzemeleri de değişim göstermiştir. Bunlardan en önemlisi olan beton, günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesidir. Beton; çimento, agrega, su ve uygun görülmesi halinde yeterli miktarda kimyasal katkı maddelerinin karıştırılmasıyla oluşturulan, başlangıçta yüksek viskoziteli akışkan kıvamda olup şekil verilebilen sonrasında zamanla sertleşerek dayanımını kazanan bir yapı malzemesidir.

Betonun yapılarda giderek yaygınlaşan ve artmakta olan kullanımı, ek olarak diğer yapı malzemelerine oranla maliyetinin daha düşük olması, dayanımının yüksek olması, dış etkenlere karşı dayanıklı olması, içerisinde bulunan bileşenlerin kolay temini gibi sebeplerden dolayı talep gören bir yapı malzemesi olma özelliğini devam ettirecektir. Artan bu talepler araştırmacıları, bu konu üzerine daha fazla yoğunlaşarak betonu derinlemesine tanıma ve davranışını iyice gözlemleme gibi çalışmalara yöneltmiştir (Uzbaş, 2014).

Beton, homojen görünümlü kompozit ve gevrek bir malzemedir. Betonun mekanik özelliklerine bakıldığında göze çarpan en önemli özelliği basınç dayanımıdır. Gevrek bir malzeme olması sebebiyle beton, basınç dayanımı yüksek olmasına karşın çekme dayanımı düşük bir yapı malzemesidir. Başka bir şekilde ifade edilirse, betonun çekme dayanımı basınç dayanımının %10'u kadardır. Bundan dolayı hesaplamalarda çekme dayanımı çok dikkate alınmadığından, en önemli özelliği olan basınç dayanımı dikkate alınır ve kullanılır (Ararat, 2015).

Betonun standart basınç dayanımı; 28 gün suda beklemiş, uzunluğu 300 mm, çapı 150 mm olan silindir numunelere tek eksenli basınç dayanımı deneyleri uygulanarak bu deneylerden elde edilen sonuçlarla hesaplanır. Genellikle deneysel çalışmalarda uygulamada kolaylık olması bakımından silindir numunelere nazaran 150x150x150 mm küp numuneler tercih edilmektedir. Silindir ve küp numuneler arasındaki bağıntıyı çözebilmek için birçok deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılmış olan bu çalışmalara bakıldığında silindir şeklinde olan beton numunesinin dayanımının küp şeklinde olan beton numunesinin dayanımına oranı ortalama 0,7-0,85 arasında olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmalar doğrultusunda kesin

olmamakla beraber küp numune dayanımının 0,8-0,85 ile çarpılmasıyla silindir numune dayanımı bulunabilmektedir (Ararat, 2015).

Beton/Betonarme yapı elemanlarından oluşan mühendislik yapılarında; tasarım ve uygulamadan kaynaklı hatalar, zaman içerisinde elemanlarda yorulma ve zayıflamalar, korozyon ve en önemli etkilerden olan depremden dolayı yapının dayanım performansı zamanla düşebilmektedir. Bu gibi durumlardan sonra yapının onarım/güçlendirme teknikleriyle yeniden bu etkileri karşılayabilecek duruma getirilmesi sağlanabilir.

Güçlendirme ve onarım tekniklerinde, mevcut yapıların her biri kendine özgü özelliklere sahip olmasından dolayı uygulanacak teknikler de o yapıya özel olarak belirlenmelidir. Güçlendirme; var olan bir yapının veya yapı malzemesinin dayanım ve süneklik gibi özelliklerini mevcut halinden daha üst seviyelere çıkarmaktır. Onarım ise hasar almış bir yapı veya yapı elemanının eski haline döndürmek veya daha iyi bir duruma getirmektir (Çetinkaya, 2002).

Geçmişten günümüze devam etmekte olan deprem var olan mühendislik yapılarına etkisini sürdürmektedir. Deprem sonrasında zarar görmüş olan yapıların onarılması, yapısal anlamda statik olarak bozukluklara sahip yapıların güçlendirilmesi gerekmektedir. Yapının deprem kuvvetleri karşısında sünek davranış gösterebilmesi ve enerji yutma kapasitesinin yeterli olması büyük öneme sahiptir. Ülkemizdeki mevcut yapı stoklarında bu sünekliği azaltan sebeplerde enine donatılardaki yetersizlik ve düşük beton dayanımı gösterilebilir. Bu yüzden yapıların tasarımında bu gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Fakat mevcut yapılarda ise güçlendirme teknikleri kullanılarak buna çözüm üretilebilir (Bulut, 2006).

Yapılarda güçlendirme için uygulanan fazlaca teknik bulunmaktadır. Bu teknikler yapının içinde bulunduğu şartlara göre en uygun olanı seçilerek uygulanmalıdır. Zaman ve maliyet gibi kriterleri göz önüne alarak yapılacak bu güçlendirme tekniklerinden bir tanesi de lifle güçlendirilmiş polimer kompozit malzemeler, kısa adı ile FRP'ler (Fiber Reinforcement Polymer) ile güçlendirmedir. Karbon, cam ve aramid gibi malzemelerden üretilen bu lifler; yüksek elastisite modülüne ve dayanıma sahip, hafif, deneysel çalışmalarda kolayca uygulanabilen ve çevre şartlarına dayanıklı malzemelerdir (Bulut, 2006).

FRP tek yönlü ve çift yönlü liflerden oluşabilen hafif bir güçlendirme malzemesidir. Lifleri bir arada tutan polimer malzemesi olarak genellikle epoksi kullanılır. Liflerin türüne göre çeşitlendirilir. Bunlar; karbon lifleri ile güçlendirilmiş olanları karbon lifli polimer (CFRP), cam ile güçlendirilmiş olanları (GFRP), aramid ile güçlendirilmiş olanları ise (AFRP) olarak adlandırılır. FRP kompozit malzemeler uygulama yönü açısından önemlidir.

Sebebi ise FRP'lerin çalışma prensibi olarak lif eksenine paralel yönde olan çekme kuvvetlerini karşıladıkları içindir. Eğilme ve kesmeye karşı uygulanan güçlendirmelerde uygulama açısından kolaylık sağlamaktadır. Kumaşa benzer bir görünüme sahip olan bu elyaflar değişik boyutlarda olup rulolar halinde satılmaktadır (Başegmez, 2015).

Beton/Betonarme yapılarda FRP kompozit malzemenin uygulanması için yaygın iki yöntem kullanılır. Birinci yöntem olan ıslak tabakalandırma yöntemi, dokuma kumaş tabaka veya esnek elyaf tabakaya epoksi reçinenin yerinde uygulanmasından oluşur. İkinci yöntem ise kirişlere ve döşemelere yapıştırmak amacıyla veya kolonları sarmak için genellikle pultrüzyon yardımı ile fabrikada yapılan bir ön imalattır. Esnek elyaf/kumaş tabakaların kavisli yüzeylere ve kolonlara kolayca sarılabilmelerinden dolayı ıslak tabakalandırma yöntemi daha uygulanabilir. Ancak ikinci yöntemdeki prefabrikasyon işlemi daha iyi kalite kontrolü sağlar (Teng vd., 2003).

Zaman içerisinde bilgisayar alanındaki yenilikler ile mühendislik hesaplamaları ve modellemeleri de çeşitlenmiş ve hız kazanmıştır. Günümüzde inşaat mühendisliğinin uğraş vermiş olduğu yapı modellemelerinde sonlu elemanlar yöntemi/metodu kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar metodu, çözülmesi gereken bir yapının belirli sayıda küçük parçalara bölünerek yapılan analizlerde her bir parçanın matematiksel davranışının gözlemlenmesidir. Günümüzde sonlu elemanlar metodu uygulamasına sahip ABAQUS, Structural Analysis Program (SAP) ve ANSYS gibi paket programlar vardır. Bu gibi programlar çözülmesi beklenen birçok mühendislik problemlerine sonlu elemanlar metodu ile hizmet etmektedir.

Yapı ve yapı elemanlarının davranışlarının incelenmesinde deneysel çalışmaların yeri ve önemi büyüktür. Ama günümüzde bu durum artık yerini; bilgisayar ortamında yapıların modellenmesi, modellenen yapıların sonlu elemanlara ayrılıp gerekli analizler yapılarak elde edilen sonuçların deneysel çalışmalarla karşılaştırılıp tartışılmasına bırakmıştır. Bilgisayar ortamında yapılan analizler tasarım aşamasında fikir oluşturabilecek olanaklar sağlar. Deneysel çalışmadaki malzeme sayısı ve işçiliği optimize etmek için önemli bir aşamadır. Günümüzde ise deneysel ve numerik analizler artık bir gereksinim olup daha da yaygınlaşmaya devam edecektir.

1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Bu kısımda, konu ile ilgili daha önce gerçekleştirilen çalışmalara yer verilmektedir. Gerçekleştirilen çalışmalar iki kısma ayrılmıştır. Birinci kısımda, beton/betonarme yapıların

sonlu eleman modeli hakkında yapılan çalışmalara yer verilmektedir. İkinci kısımda ise yapıların veya yapı elemanlarının onarılması veya lifli polimer kompozit malzemelerle güçlendirilmesi hususunda yapılan çalışmalara yer verilmektedir.

1.2.1. Beton/Betonarme Yapıların Sonlu Eleman Modeli Hakkında Yapılan Çalışmalar

Wasti (1990), yaptığı çalışmada sonlu eleman yöntemi hakkında bilgilere değinmiş olup bu yöntemin matris formülasyonuna yer vermiştir. Lineer olmayan malzeme, aderans ve artan yükler altında malzemedeki deformasyonlarla veya çatlaklarla değişime uğrayan yapı geometrisinin nasıl modellendiği izah edilmiştir. Sonlu eleman yönteminin beton/betonarme yapılara uygulanması halinde kısmi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu sorunlar başlıca maddeler halinde sunulmuş olup bu sorunların az da olsa bilgisayar yardımıyla çözüme ulaştırılabileceğinden bahsedilmiştir. Betonun malzeme davranışının çok sayıda incelendiği, bu davranışın doğrusal olmadığı belirtilirken bu durumun; çimento, agrega, deney düzeneğinin yükleme hızı ve betonun sargılı veya sargısız olması gibi birçok etkene bağlı olduğundan söz edilmiştir. Betonunun malzeme davranışı, betonarme malzemelerde çeliğin davranışı lineer bağıntılarla ifade edilememesinden ötürü bilgisayar desteğine ihtiyaç duyulduğu görülmüştür.

Arslan (2004), yalnız çekme donatılı betonarme kirişte sonlu eleman boyutunun yük taşıma kapasitesine etkisinin “Drucker-Prager” ve “Çatlak Modeli” ile incelenmesi hedeflenmiştir. Açıklık ortasında tekil yük ile yüklenmiş kirişin sonlu eleman analizinde; donatı için Tresca akma kriteri, beton kırılma kriteri için ise Drucker-Prager ve Çatlak Modeli kullanılmış ve yük taşıma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Drucker-Prager malzeme modeli; betonun mekanik davranışını, plastik ve visko plastik teoriler yardımıyla ifade etmektedir. Bahsedilen bu modelde akma kriteri, von-Mises kriterinin genelleştirilmiş halidir. Çatlak modelinde büyüyen çatlak ile malzemenin yumuşadığı ve yük artması sonucunda dayanımını kaybettiği varsayılmıştır. Yapılan numerik çalışmalarda, sonlu eleman analizleri LUSAS paket programı ile yapılmıştır.

Dede (2009), betonarme kirişlerin lineer olmayan malzeme davranışını araştırmak amacıyla literatürde daha önce öne çıkarılan farklı basınç gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve farklı çekme gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerini derleyip bunları sonlu eleman metodu ile birlikte kullanmayı hedeflemiştir. Bu kapsamda yürüttüğü çalışmaları MATLAB programlama dilinde gerçekleştirmiştir. Çalışmanın içeriğinde sonlu eleman

metoduna bağılı olarak formülasyonda bir noktada 2 yer değiştirme serbestliğine ve toplamda 8 yer değiştirme serbestliğine sahip dikdörtgen bir eleman kullanmıştır. Elemanda oluşan gerilme durumlarını Gauss noktalarında hesaba katmıştır. Ayrıca bu çalışmada betonun lineer olmayan analizlerinde kullanılan akma kriterlerinden farklı olarak Bresler-Pister ile Hsieh-Ting-Chen iki yeni akma kriterine yer verilmiştir. Betonarme kirişlerin malzeme davranışı açısından lineer olmayan analizler gerçekleştirilerek literatür ile karşılaştırılmıştır.

Jawad (2014), monotonik yükleme altında betonarme silindir kabuk elemanlarının davranışını incelemiştir. Çalışmada; üç boyutlu, altı adet küçük ölçekli ve farklı uzunluk-yarıçap oranlarına sahip kabuk elemanlar kullanılmıştır. Bu 3 boyutlu modellerin sonlu eleman metot analizleri ANSYS bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır ve doğrusal olmayan tepkileri göçme gerçekleşene kadar tüm yük aralığı boyunca gözlemlenmiştir. Silindir kabuk elemanlar x,y,z düğüm noktalarındaki ötelemelere karşılık gelen her bir düğüm noktasında üç serbestlik derecesine sahip sekiz düğümlü altı yüze sahip olan ve ANSYS programı içerisinde bulunan SOLID65 seçeneği kullanılarak modellenmiştir. Bu eleman tipi 3 ortogonal yönde çatlama ve plastik deformasyon yapma yeteneğine sahiptir. Donatı için, donatının beton elemanlar boyunca üniform bir şekilde yayıldığı ve elik ile beton arasında iyi derecede bir bağ olduğu varsayımı yapılmıştır. Bir betonarme elemanın doğrusal olmayan davranışı kabaca üç farklı aralığa ayrılabilir: atlaksız elastik aşama, çatlak ilerlemesi ve plastik aşama. Doğrusal olmayan davranış, malzeme veya geometrik doğrusal olmama ya da bunların her ikisinin kombinasyonundan kaynaklandığı belirtilmiştir. Malzeme doğrusal olmama durumuna iki ana etkinin neden olduğuna değinilmiştir. Bunlar, betonun çatlaması ve donatının ve betonun plastisitesi olduğu ifade edilmiştir.

Tjitradi vd. (2017), çalışmalarında yapısal betonarme kiriş elemanının göçme davranışının üç boyutlu olarak ANSYS bilgisayar programında sonlu eleman modellemesini yapmışlardır. Farklı göçme mekanizmalarına sahip tek bir betonarme kiriş üzerinde meydana gelen eğilme momenti, deformasyon, gerilme-şekil değiştirme ve kırılma modellerinin kapasitesi belirlenmiştir. Normal dayanımlı betonarme kiriş numuneleri; çekme, dengeli ve basınçla çöken mekanizmayı temsil etmek için çekme elik donatı oranlarına sahip dikdörtgen kesitli olarak modellenmiştir. Kirişler orta orta açıklıkta tekil yük ile yüklenir ve ilk çatlak oluşumundan tamamen göene kadar göçme davranışı gözlemlenmiştir. Betonarme kirişlerin davranışı çekme ile çökmüş durumdaki kirişlerin daha düşük eğilme kapasitesine sahip olduğu ve çökme davranışının, basınçla çökmüş ve dengeli durumdaki

kirişe göre daha sünek olduğu hem el hesabı ile hem de sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenmiştir.

Dalgıç (2010), yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında, ekonomik ve düşük elastisite modülüne sahip bir tür cam lifli polimerle (LP) sargılanmış betonun eksenel yükleme altındaki davranışını incelemiş ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizini gerçekleştirmiştir. Bu çalışma için 6 adet düşük elastisite modülüne sahip beton silindir numuneler kullanmıştır. Silindir numuneler 2,4 ve 6 kat LP ile sargılanmış ve her bir gruptan 2 adet olacak şekilde eksenel basınç testi yapılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan silindir numunelerin sonlu eleman analizleri ANSYS bilgisayar programında gerçekleştirilmiştir. Bunun için çok eksenli gerilme hali altındaki beton davranışının iyi bir şekilde anlaşılmış olması gerektiğine değinilmiştir. Betonun davranış modelleri hakkında literatür incelemesi sonucunda sargılı beton için Drucker-Prager plastisite modeli ile modelleme yapılmasına karar vermiştir. Deneysel ve numerik çalışmalar karşılaştırılmış, gerilme ve şekil değiştirme sonuçları arasında gerekli şekilde bir uyum sağlamıştır. LP ile sargılanmış beton numunelerinin deneysel çalışmaları yapılmadan önce sonuçlarının sonlu eleman modeli ile tahmin edilebileceğini ifade etmiştir.

Si vd. (2021), çalışmalarında öngermeli polietilen tereftalat (PET) şeritler ve köşebent çeliği birleştirilerek güçlendirilmiş betonarme kolonların eksantrik yükleme altında davranışlarını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemeyi amaçlamışlardır. Bu güçlendirme yöntemi, güçlendirilmiş yapıların taşıma kapasitesini ve sünekliğini iyileştirmek için PET şeritler tarafından sağlanan aktif tutma kuvvetine ve köşebent çeliği tarafından sağlanan dikey taşıma kapasitesine dayanır. Yapılan bu çalışma hem deneysel hem de sonlu eleman yöntemi ile numerik olarak gerçekleştirilmiştir. Beton için sonlu eleman modeli olarak ABAQUS model kitaplığında bulunan plastisite hasar modeli kullanılmıştır. Betonun yapısal eğrisi için, Çin beton standardında (GB50010-2010) belirtilen beton çekme ve basınç oluşturma modeli kullanılmıştır. Betonun hasar plastisite modeli, betonun elastik olmayan davranışını temsil etmek için izotropik çekme ve basınç plastisitesi ile birlikte izotropik hasar esnekliği kavramlarına dayandığı ifade edilmiştir. PET kayışlar, köşebent çelik ve çelik donatılar için ideal bir elastoplastik model kullanılmıştır. Sonlu eleman analizlerinde eksantrik mesafesi, pakitleme (sarma) mesafesi ve pakitleme (sarma) yöntemi üzerinde çok parametrelili bir analiz yapılmıştır.

Polus ve Szumigala (2019), yürüttükleri çalışmada basınca tabi tutulan silindir beton numunelerin laboratuvar testlerinin ve sonlu eleman (FE) analizlerinin sonuçlarını

karşılaştırarak sunmuşlardır. Beton elemanların laboratuvar testleri, sekant elastisite modülünü ve beton için doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme ilişkisini belirlemek için yapmışlardır. Bu ilişki, basınca maruz kalan silindir beton numunelerin sayısal sonlu eleman modelini doğrulamak için yapılmıştır. Sonlu eleman yöntemi kullanılarak yapılan numerik çalışmada, basınca tabi tutulan silindir beton numunenin sayısal modeli ABAQUS paket programında yapılmıştır. Model bir beton silindir ve iki çelik plakadan oluşturulmuştur. Çelik plakalar azaltılmış integrasyona (S4R) sahip 4 düğümlü kabuk elemanlarla modellenmiştir. Beton için ise ABAQUS içerisinde yer alan C3D8R elemanları kullanılmıştır. C3D8R elemanları genellikle somut modelleri temsil eder. Bununla birlikte, eğilmeye maruz kalan modellerde C3D8R elemanları kullanıldığında sonlu elemanlar analizinde “kum saati etkisi” (sonlu eleman ağının yapay bir deformasyonu) oluşabildiğine yer verilmiştir. Sıkıştırmaya maruz kalan beton silindirlerin tepkisinin sayısal ve deneysel çalışmaların karşılaştırılmasıyla iyi bir sonuç verdiği ifade edilmiştir.

Lee vd. (2020), ardgermeli beton kirişlerin davranışını incelemek için ABAQUS bilgisayar programını kullanarak sonlu elemanlar analizi (FEA) gerçekleştirmiştir. Bu çalışma, ABAQUS programında bulunan beton hasarlı plastisite (CDP) modeli ve harici bir ardgerme (EPT) çelik çubuk sisteminin etkisini kullanarak beton hasar davranışını incelemeyi amaçlamıştır. Beton basınç ve çekmede farklı özellikler gösteren davranışıyla farklı alanlarda fazlaca kullanılan bir malzemedir. Aynı zamanda inelastik ve doğrusal olmayan bir davranış gösterdiğine değinilmiştir. Bu özellikler betonun modellenmesini veya simülasyonlarının gerçekleştirilmesini zorlaştırmaktadır. Betonarmede, beton ve çelik arasındaki aderans-kayma ilişkisi açısından özel zorluk bulunmaktadır. Bu yüzden yapılan bu çalışmada ABAQUS programı vasıtası ile beton kirişler için sonlu eleman analizi, beton ve çeliğin ilişkisi ve beton özelliği için CDP modeli dahil olmak üzere bazı varsayımlar gerçekleştirilmiştir. Analiz ve deneysel sonuçların karşılaştırılmasında; simüle edilmiş çekme deformasyonları, deneylerdeki gerçek çatlak modellerine benzer ve dış çubukların mukavemeti, bükülmesi ve gerilimi gibi analitik tepkiler, ölçülen tepkilerle iyi bir uyum içinde olduğu gösterilmiştir.

Lu vd. (2022), FRP ile güçlendirilmiş beton kolonların ön yükleme altında basınç davranışını incelemek amacıyla ABAQUS paket programı kullanılarak bir sonlu elemanlar (FE) analizi gerçekleştirmişlerdir. İlk olarak Beton Hasarlı Plastisite Modelindeki (CDPM) sertleşme/yumuşama kuralı, FRP sargılama üzerindeki ön yükleme etkisini ortaya çıkarmak için var olan deneysel verilere bağlı olarak değiştirilmiştir ve ön yükleme altında FRP ile

sargılanmış beton için sonlu eleman modeli (FE), ABAQUS'ta gerçekleştirilen eleman devre dışı bırakma ve yeniden etkinleştirme işleminin benimsenmesiyle oluşturulmuştur. Daha sonra, tüm yükleme süresi boyunca, ön yüklemenin FRP ile sargılanmış betonun (FCC) mekanik performansı üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Beton basınç dayanımının, FRP'nin sargı rijitliğinin ve ön yükleme oranının ön yüklü FRP sargılı betonun (FCC) davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için doğrulanmış sonlu eleman modeline (FE) dayalı olarak kapsamlı bir parametrik analiz de yapılmıştır. Son olarak, ön yükleme altında FCC'nin genleşme davranışını ve eksenel gerilme-şekil değiştirme tepkisini değerlendirmek için iki yeni model önerilmiştir. Teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki karşılaştırmalar, geliştirilen iki model için tatmin edici doğruluğun elde edilebileceğini ortaya koymaktadır.

Jankowiak ve Łodygowski (2005), yaptıkları çalışmada beton hasar plastisite yapısal modeli için malzeme parametreleri tanımlama yöntemi ve gerekliliklerini sunmaktadır. Betonun yapısal modelini test eden iki standart uygulama gösterilmiştir. İlki, üç nokta eğilmeli tek kenar çentikli beton kiriş numunesinin analizidir. İkincisi ise statik yükler altında dört nokta eğilmeli tek kenar çentikli beton kiriş numunesinin analizidir. Uygulamaların hesaplamalarında, ABAQUS/Explicit programında uygulanan sonlu eleman modelleri kullanılmıştır. Yapılan örnekler, Beton Hasar Plastisite (CDP) modelinin kullanılmasının, beton elemanlardaki göçme mekanizmalarının doğru bir şekilde tanımlanmasını sağladığını ortaya koymuştur. CDP, ileri yükleme durumlarında beton/betonarme yapıların ve diğer öngermeli beton yapıların davranışını modellemek için kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Çalışma aynı zamanda betonun gerçek davranışı ile sayısal modellemesi arasında bir köprü görevi görmüştür. Sonuç olarak, sayısal ve laboratuvar testlerindeki çatlak örneklerinin karşılaştırılması sunulmuştur.

1.2.2. Yapıların veya Yapı Elemanlarının Onarılması veya Lifli Polimer Kompozit Malzemelerle Güçlendirilmesi

İlki ve Kumbasar (2002), gerçekleştirdikleri çalışmada farklı özelliklere sahip, boyutları 200x200x2000 mm olan 28 adet betonarme elemanlara daha öncesinde eksenel yükler ve yön değiştiren tekrarlı eğilme etkileri altında deneye tabi tutmuşlardır. Deneyler sırasında tüm numuneler hasar görmüştür ve sonrasında onarılmıştır. Güçlendirme CFRP kompozit malzemenin boyuna ve enine doğrultularda uygulanması ile gerçekleştirilmiştir. Numuneleri güçlendirmeden önce eleman köşelerinde yoğunlaşan gerilme yığılmalarının önüne geçebilmek için pahlar oluşturulmuştur. Karbon lif tabakalar ile betonarme elemanlar

arasındaki aderansın iyi bir şekilde olabilmesi için yüzeylerde bulunan düzensizlikler yüzey hazırlama işlemleri ile giderilmiştir. Numunelerin alt ve üst yüzeyine, karbon lif tabakaları boyuna doğrultuda yapıştırılmıştır ve boyuna doğrultuda gerçekleştirilen bu yapıştırma işlemi farklı numunelerde farklı sayıdadır. Enine doğrultuda bir kat şeklinde yapılan karbon lif tabakası tüm numune boyunca uygulanmıştır. Onarım ve güçlendirmeden sonra numuneler tekrar aynı şekil ve şartlarda eksenel yüklere tabi tutulmuştur. Uygulanan bu teknik ile birlikte, numunelerin önceki haline göre yük taşıma kapasiteleri %28 ile %77 arasında bir oranla artış göstermiştir. Uygulanan onarım tekniğinin, elemanların hasar almadan önceki dayanım ve şekil değiştirme yeteneklerinin, büyük oranda hasar aldıktan sonra yeniden kazandırılmasında etkisi olmuştur ve yine bu uygulamayla numunelerin süneklik, eğilme rijitliği ve basınç dayanımı gibi özelliklerinin iyi yönde bir aşama gerçekleştirdiği görülmüştür.

Chansawat (2003) yaptığı doktora tez çalışmasında, FRP kompozit malzemeler ile güçlendirilmiş betonarme yapıların doğrusal olmayan davranışını sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirmiştir. Çalışma üç temel adımda değerlendirilecek olunursa, birinci adımda güçlendirme yapılan kirişlerin numerik analizleri gerçekleştirilip sonuçları tartışılmıştır, ikinci adımda yapısal anlamda yetersiz olarak sınıflandırılan Oregon'da bulunan Horsetail Creek Köprüsü'nün enine doğrultudaki kirişleri tekrardan üretilerek FRP kompozit malzeme ile güçlendirilmesi yapılmış aynı zamanda sonlu eleman yöntemi ile analizi gerçekleştirilerek deney sonuçları ve numerik çalışmalar karşılaştırılmıştır. Üçüncü adımda ise uygulanan FRP güçlendirme ile köprünün yapısal davranışının statik ve dinamik yükler altında, farklı yük kombinasyonları ile sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiş ve güçlendirmeden önceki ve sonraki durumlar karşılaştırılmıştır.

Archbold ve Tharmarajah (2012) yürüttükleri çalışmada, FRP ile güçlendirilmiş betonarme yapıların sonlu elemanlar yöntemi ile numerik analizini gerçekleştirmişlerdir. Basit mesnetli döşemeler ve düzlem içi sınırlandırılan döşemeler ANSYS paket programı ile modellenmiştir. Ayrıca ANSYS ile analizi gerçekleştirilen sınırlandırılmış döşemeler DIANA analiz sonuçları ile de karşılaştırılmıştır ve ANSYS ile analiz edilen basit mesnetli döşemelerin davranışı tartışılmıştır. Her iki yapı türü için yüke karşılık sapma ve nihai göçme yükü gösterilmektedir. Sonuçlar, FRP ile güçlendirilmiş betonarme döşemelerin lineer olmayan sonlu eleman modelleri ile göçmeye kadar test edilen deneysel değerlerin karşılaştırılması sunulmuştur.

Gotame vd. (2022), mevcut hasar almış betonarme yapıların hizmet ömrünü uzatmak için güçlendirilmesi gerektiğine değinip, fiber takviyeli polimerler (FRP), sağlam yapıları güçlendirmede yaygın olarak kullanılmasına karşın hasar almış beton/betonarme yapılar üzerindeki uygulamasını irdelemişlerdir. Bu kapsamda korozyona uğramış betonarme kirişler FRP ile güçlendirilmiş ve sonrasında kirişlerin eğilme davranışını değerlendirmek için sonlu elemanlar yöntemi ile doğrusal olmayan numerik analizler gerçekleştirmişlerdir. Analiz kirişlerin dört farklı kombinasyonu şeklinde olup bunlar sırasıyla; referans kiriş, korozyona uğramış ama güçlendirilme yapılmayan kiriş, korozyona uğramış ve cam FRP (GFRP) ile güçlendirilmiş kiriş ve korozyona uğramış ve karbon FRP (CFRP) ile güçlendirilmiş kiriş şeklindedir. Ayrıca güçlendirme uygulanan kirişler, kiriş alt yüzeyine U şeklinde uygulanan FRP'nin etkinliğini incelemek için farklı modelleme seçenekleri ile modellenmiştir. Çatlak yerlerinde beton elemanların çekme dayanımı azaltılarak ön yükleme ve korozyon kaynaklı çatlaklar dahil edilmiştir. Ölçülen korozyon seviyelerine karşılık gelen donatının enine kesit alanı azaltılarak ortalama ve oyuk korozyonu dahil edilmiştir. Beton ve FRP arasındaki ilişkiyi simüle etmek için arayüz elemanları kullanılmıştır. Modelleme yöntemleri deneysel sonuçlarla paralellik göstermektedir. Çukurlaşma/oyuk korozyonunun modellenmesinin özellikle oyukların yeri, uzunlukları ve dikkate alınan oyuk sayısının kirişlerin yük-deformasyon kapasitesinin tahmin edilmesinde etkili olduğu ortaya çıkarılmıştır. Kirişin altında bulunan boyuna doğrultudaki bir CFRP katman, uç noktalarda eğimli U mantolarla birleştiğinde yeterli eğilme mukavemeti sağladığı görülmüştür. Bu yüzden çalışılan kiriş geometrisi ve korozyon hasarları için ara U mantolar yük taşıma kapasitesini daha üste çıkarmadı. Bunun yanı sıra kiriş alt yüzeyinde bir katman GFRP kullanılan kiriş modeli için GFRP katmanının tam olarak çalışmasını sağlamak için hem eğimli hem de ara U mantolara ihtiyaç duyulmuştur. Öneri olarak ise daha sonraki güçlendirme uygulamalarının etkinliğini araştırmada, farklı boyutlardaki kirişlerin, korozyon modellerinin ve seviyelerinin ve FRP aralıklarının ve boyutlarının incelenmesi tavsiye edilmiştir.

Chakrabarti vd. (2008), FRP katmanlarla sargılanmış düz betonarme kolonların sonlu eleman modeli oluşturulup doğrusal olmayan analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Analiz için dairesel veya kare şeklinde iki kolon kesit tipi seçilmiştir. Geliştirilen model kullanılarak küçük ve büyük ölçekli FRP sarıli beton kolonların tek eksenli basınç altındaki davranışı incelenmiştir. Model daha önce yayınlanmış sonlu eleman analizleri (FEA) ve deneyler ile doğrulanmıştır. FRP levhaların kalınlığının, rijitliğinin ve lif oryantasyonunun (yönünün)

yanı sıra serbest beton (sargılanmamış) dayanımının güçlendirilmiş kolonların sargılanması ve rijitliği üzerindeki etkisini belirlemek için önerilen modeli kullanarak detaylı bir parametrik çalışma yapılmıştır. Çalışmada FRP kompozit katmanlarla sargılanmış dairesel ve kare kolonlar için sonlu elemanlar modeli ANSYS paket programında gerçekleştirilmiştir. ANSYS içerisinde yer alan ve sonlu eleman modelini oluşturan malzemeleri tanımlamak adına beton için SOLID65, donatı için LINK8, FRP kompozit malzeme için SOLID46 elemanları kullanılmıştır. Gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizde ‘Newton-Raphson’ yaklaşımı kullanılmıştır. Mevcut analiz sonuçlarına göre beton ve FRP’deki gerilim dağılımı da beton kolonların sargılama mekanizmasının anlaşılmasını geliştirdiğini göstermiştir.

Nanni ve Bradford (1995) yaptıkları çalışmada, deneysel veriler geliştirmek ve yanal olarak fiber takviyeli plastik (FRP) malzemelerle sarılmış beton elemanların davranışı için mevcut analitik modellerin geçerliliğini kontrol etmeyi amaçlamışlardır. Testlerde kullanılan numuneler 150x300 mm boyutlarında normal dayanımlı betondan oluşmaktadır. Numuneler tek eksenli basınç altında statik olarak yüklenmiştir. Anlaşılabilir bir karşılaştırma yapılabilmesi için deneylerde üç farklı tip FRP sargılama teknolojisi incelenmiştir. Bunlar örgülü aramid FRP, iplik sargılı e-cam FRP ve önceden şekillendirilmiş cam-aramid FRP kabuklardır. Deneysel sonuçlar, FRP sargılamanın betonun dayanımını ve sözde sünekliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. FRP ile sarılmış numunelerin gerilme-şekil değiştirme davranışını tahmin etmeye yönelik mevcut modellerle ilgili olarak, yalnızca basınç dayanımı artışının bir şekilde yaklaşık olarak ön görülebileceği bulunmuştur.

Tobbi vd. (2011) yaptıkları çalışmada; zorlu şartlarda beton yapılar için ana güçlendirme malzemesi olarak fiber takviyeli polimer (FRP) çubuklarının kullanılması, çeliğin korozyon probleminin üstesinden gelmek için yaygın olarak kabul gören bir çözüm olduğuna değinip ve nispeten piyasada bulunan diğer FRP türlerine göre cam FRP (GFRP) daha düşük maliyete sahip olması sebebi ile GFRP çubukların beton/betonarme yapılarda kullanımını geniş çapta incelemişlerdir. Bu bağlamda yapılan makale çalışmasında 350x350x1400 mm kare kesitli beton kolon numunelerinin GFRP çubuklarla güçlendirilerek, eş merkezli yükleme altındaki davranışının deneysel bir çalışması sunulmuştur. Bağlantı konfigürasyonu, bağlantı aralığı ve beton örtüsünün çatlaması gibi başlıca parametrelerin tesiri incelenmiştir. GFRP ile güçlendirilmiş kolonlar, çelik ile güçlendirilmiş kolonlara göre benzer ya da daha yüksek yüklere dayanmıştır. İyi sarılmış kolonların beton çekirdekleri için süneklik ve dayanım tepkileri kaydedilmiştir. Deneysel sonuçlar, ACI Building Code ve CSA S806-02 tarafından sağlanan eksenel basınç tasarım

hükümleri göz önüne alınarak karşılaştırılmıştır. Kullanılan GFRP çubuklar kolon kapasitesinin %10'una katkıda bulunmuştur ve bu durum çeliğin katkısına (%12) yeterince yakındır. Neticede GFRP çubukların, çubuğun burkulmasını ortadan kaldırmak için yeterli sınırlama olması koşuluyla basınç elemanlarında kullanılabileceğini göstermektedir.

Ibrahim ve Mahmood (2009), beton kirişlerin dışını fiber takviyeli polimer (FRP) tabakalarla güçlendirerek ANSYS paket programında sonlu elemanlar yöntemi ile analiz modelini oluşturmuşlardır. Sonlu eleman modelleri oluşturulurken, beton için sıvalı çatlama yaklaşımı ve FRP için üç boyutlu katmanlı elemanlar kullanılmıştır. ANSYS'de gerçekleştirilen sonlu eleman analiz sonuçları, araştırmalardan farklı koşullara sahip altı kiriş için (tüm kirişler yetersiz kesme donatılı) deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar göçme yükü ve kirişlerin orta açıklığındaki yük-sehim için yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar, kirişlere yapılan deneysel testler ile aynı yerde hesaplanmıştır. Yapılan numerik çalışmaların doğruluğu deneysel sonuçlarla paralellik göstermesi gerektiği için karşılaştırılarak değerlendirilmesi yapılmıştır. FRP tabakalarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin nihai kesme dayanımı, tam ölçeklendirilmiş deneysel çalışmalara kıyasla daha basit, daha hızlı ve daha ucuz bir olanak sağladığı için sayısal çözüm benimsenmiştir. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen yük-sehim eğrileri, doğrusal aralıktaki deneysel sonuçlarla uyumludur. Tüm durumlara bakıldığında nihai yüklerdeki maksimum fark %7,8'dir.

Esfahani vd. (2007), karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) levhalar kullanarak güçlendirdikleri betonarme kirişlerin eğilme davranışını incelemiştir. Ayrıca güçlendirilmiş kirişlerin eğilme dayanımı üzerindeki donatı çubuğu oranının (ρ) etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada üretilen 12 beton kiriş numunesi; 150 mm genişlik, 200 mm yükseklik ve 2000 mm uzunlukta olup deneye tabi tutulmuştur. Üretilen numunelerde boyuna çekme donatısı olarak üç farklı donatı oranına (ρ) sahip kiriş kesitleri kullanılmıştır. Numunelerin kategorizesi ise dokuz numune, CFRP levhalarla eğilmede güçlendirilmiş, diğer üç numune kontrol/referans numunesi olarak kabul edilmiştir. Güçlendirme uygulanan numunelerde CFRP levhaların genişliği, uzunluğu ve katman sayısı farklılık göstermiştir. Güçlendirilmiş numunelerin eğilme dayanımı ve rijitliği referans örneklerine göre artmıştır. Gerçekleştirilen çalışma sonuçlarına göre ACI 440.2 ve ISIS Canada tasarım yönetmeliklerinin CFRP levhaların maksimum değer olan ρ_{max} ile kıyaslandığında küçük ρ değerlerine sahip kirişlerin eğilme dayanımını artırmadaki etkisini olduğundan fazla tahmin ettiğini ortaya çıkarmıştır.

Hu vd. (2004), ABAQUS sonlu elemanlar programını kullanarak, dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin altına veya her iki tarafına fiber takviyeli polimerler ile güçlendirme yaparak nihai yükleme kapasitesini tahmin etmek için sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Lineer olmayan malzeme davranışı; çelik takviye donatıları, düz beton ve fiber takviyeli polimerler ile ilgili olduğu için uygun yapı modelleri kullanılarak simüle edilmiştir. Yapılan araştırmada lif oryantasyonunun, kiriş uzunluğunun ve donatı oranlarının kirişlerin nihai dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Fiber takviyeli polimerlerin kullanımının betonarme kirişlerin nihai dayanımını artırmasının yanı sıra rijitliklerini de kayda değer şekilde artırdığı gösterilmiştir. Alt tarafı güçlendirilmiş ve yüksek donatı oranına sahip kirişlerin davranışları kiriş uzunluğundan önemli miktarda etkilenmezken, yine alttan FRP ile güçlendirilmiş düşük donatı oranına sahip kirişler, kiriş uzunluğundan önemli ölçüde etkilendiği kaydedilmiştir. Alt taraftan güçlendirilmiş ve yüksek donatı oranına sahip kirişler, düşük donatı oranına sahip kirişlere göre orta bölgede daha fazla çatlaklara sahip olabileceği görülmüştür. Öte yandan alt taraftan FRP ile güçlendirilmiş düşük donatı oranına sahip kirişler, yüksek donatı oranına sahip kirişlere göre mesnet bölgelerinde daha fazla çatlaklara sahip olacağına değinilmiştir. Aynı katman sayıları kapsamında; her iki taraftan FRP ile güçlendirilmiş kirişlerin nihai dayanımı ve çatlak sayıları, alttan FRP ile güçlendirme olanlara kıyasla çok daha azdır. Bu yüzden betonarme kirişlerin eğilme direncini artırmak, enine kesme direncini artırmaktan daha önemli olduğu vurgulanmaktadır.

Liao vd. (2022) FRP spiral şeritlerle sarılı beton kolonlar için gerilme-şekil değiştirme davranışını incelemiş ve tasarım odaklı model oluşturmuşlardır. Betonarme kolonların güçlendirilmesinde uygulanan FRP tam sargılama tekniğinin yanı sıra FRP spiral şeritler ile kısmi sargılama daha iyi yangın direnci gibi bazı diğer avantajlar sağladığı öne sürülmüştür. Bununla birlikte, FRP spiral şerit sarılı beton kolonların güçlendirme mekanizması belirsizliğini korumasından ve üzerine mevcut çalışmalar sınırlı olmasından sebep bu makale çalışmasında, FRP spiral şeritlerle sarılmış 28 adet beton kolonlara eksenel basınç testleri uygulanmış ve sonuçları sunulmuştur. Yapılan çalışma, nihai eksenel gerilmenin ve eksenel gerilme-şekil değiştirme eğrisinin zirve noktasından sonraki lineer kısmının eğiminin, önerilen sargılama etkinlik çarpanından önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Numuneler için istenen sargılama etkinlik çarpanları, FRP şeritlerin spiral açısı, genişliği ve katman sayısı gibi sargılama parametreleri değiştirilerek elde edilebileceğine değinilmiştir. Tüm numuneler orta bölgedeki FRP şeritlerin çekme kopmasıyla deforme olmuştur. Daha küçük spiral açılara sahip numuneler, daha az beton

açığa çıktığı için daha az deformasyon gerçekleşmiştir. Tipik eksenel gerilme-şekil değiştirme tepkisi sırasıyla üç daldan oluşmaktadır: birinci kısım doğrusal yükselen dal, ikinci kısım geçiş evresi ve üçüncü kısım yine doğrusaldır. Son kısımdaki lineer dal, sargılama etkinliğine bağlı olarak ya yükselmekte ya da alçalmaktadır. Bu çalışmada bir araya getirilen yeni test veri tabanına bağlı olarak FRP spiral şeritle sarılmış beton için yeni bir tasarım odaklı gerilme-şekil değiştirme modeli önerilmiştir.

Zeng vd. (2018), büyük ölçekli ve dikdörtgen kesitli betonarme kolonların FRP ile güçlendirilmesi sonucunda eksenel basınç altındaki davranışlarını incelemiştir. Bu amaçla, sekiz tanesi FRP ile güçlendirilmiş ve bir tanesine FRP güçlendirme uygulanmamış toplam dokuz adet numuneye eksenel basınç testi uygulanmıştır. Deneysel çalışmalarda, ana test değişkenleri olarak kesit köşe yarıçapı ve FRP sargı kalınlığı incelenmiştir. Büyük ölçekli bir sargısız beton kolondaki beton basınç dayanımının, standart bir silindirik beton örneğine göre daha düşük bulundu ve arasındaki oran 0,94 olarak hesaplanmıştır. Köşe yarıçapı oranı ve FRP sargı kalınlığının her ikisi de FRP ile sargılanmış betonun gerilme-şekil değiştirme tepkisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. FRP sargı kalınlığının veya köşe yarıçapı oranının artmasıyla hem basınç dayanımı hem de nihai eksenel şekil değiştirme artmıştır.

Campione (2006), dıştan karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) levhalarla sarılmış, kare kesitli beton prizmaların basınç davranışı üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen deneyde; köşelerde ve sürekli katmanlardaki yerel güçlendirme, yatay ve düşey süreksiz şeritler, örneklerin uzunluğu ve sürekli katman sayısı gibi parametreler analiz edilmiştir. İncelenen farklı konfigürasyonlar ile kare kesitli ve dıştan FRP ile sarılmış beton elamanların maksimum taşıma kapasitesini belirlemek için analitik bir model önerilmiştir. Sürekli katmanların uygulanmasından önce köşelerde CFRP şeritler ile lokal güçlendirmeler, köşe kısımlarda olası lif kesilmesini önler. Lokal olarak hem tekli yatay şeritler hem de köşelerde güçlendirme, sürekli sargılamaya benzer etkiler göstermektedir. Takviye katmanların sayısındaki bir artış, maksimum basınç dayanımında ve maksimum şekil değiştirme kapasitesinde önemli artışlar sağlamıştır fakat bu etki katman sayısı ile doğru orantılı değildir. Ayrıca numunelerin yüksekliğindeki bir artış, maksimum dayanımda bir azalmaya neden olduğu görülmüştür.

Isleem vd. (2018), karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozit malzemelerle sargılanan ve tekrarlı ve monotonik yüklemeye tabi tutulan dikdörtgen kesitli betonarme kolonlar için bir gerilme-şekil değiştirme modeli sunmuşlardır. Yapılan çalışma, 24 büyük

boyutlu CFRP ile sargılanmış dikdörtgen kesitli donatılı ve donatısız beton kolonların monotonik ve tekrarlı yükleme altındaki testlerini içermektedir. Önerilen gerilme-şekil değiştirme modeli üç ana kısımdan oluşup bunlar: birinci kısım, döngüsel tepkinin zarf eğrisi için monotonik bir gerilme-şekil değiştirme modeli, ikinci kısım, boşaltma yolu için parabolik bir ifade ve üçüncü kısım ise yeniden yükleme yolu için düz bir çizgi şeklindedir. Model aynı zamanda enine kesit boyutu, en-boy oranı, CFRP'nin etkili kopma şekil değiştirmesi, boyuna ve çember çelik donatı gibi temel parametrelerin etkilerini de göz önüne almaktadır. Modelin performansı, bu model tarafından yapılan tahminlerin seçilen test sonuçlarıyla kıyaslanmasıyla doğrulanmıştır.

Youssef vd. (2007), elyaf takviyeli polimer (FRP) kompozit malzemelerle sarılmış beton için bir gerilme-şekil değiştirme modeli geliştirmişlerdir. Model, geniş çapta güçlendirme oranları sağlayan karbon/epoksi ve cam/epoksi levhalarla kaplanan büyük ölçekli dairesel, kare ve dikdörtgen kısa kolonları içeren kapsamlı bir deneysel çalışmanın sonuçlarına dayanmaktadır. Nihai dayanım, kopma şekil değiştirmesi, kaplama parametreleri ve enine kesit geometrisinin, FRP ile kaplanmış betonun gerilme-şekil değiştirme davranışını etkileyen önemli etkenler olduğu bulunmuştur. Bu tür parametreler, deneysel verilere bağlı bir biçimde istatistiksel olarak analiz edilmiş ve bu parametreleri teorik olarak tahmin etmek için denklemler sunulmuştur.

Xiao ve Wu (2000), 27 adet beton sindir numuneyi karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerle (FRP) güçlendirip aksenal basınç testlerine tabi tutmuşlardır. Deneysel parametreler, düz donatısız beton basınç dayanımı ve kompozit sargının kalınlığını içerir. Karbon fiber kompozit kaplamanın, betonun basınç dayanımını ve sünekliğini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Test sonuçları, enine sargılama gerilmesi ve enine şekil değiştirmenin oranı olarak tanımlanan beton dayanımı ve sargılama modülünün, kaplanmış betonun gerilme-şekil değiştirme davranışını etkileyen en önemli faktörler olduğunu göstermektedir. Sargılanmış betonun göçmesi, kupon çekme testlerinden elde edilen kopma şekil değiştirme değerinden çok daha küçük bir ortalama şekil değiştirmede sargılamanın kopması yoluyla belirlenir. Sargılı betonun temel mekanik özelliklerini tanımlamak için, elastisite teorisine ve testlerden belirlenen minimum ampirik denklem sayısına dayanan basit bir çift doğrusal gerilme-şekil değiştirme modeli önerilmiştir. Önerilen basit modelin, diğer araştırmacılar tarafından yapılan önceki çalışmalardan elde edilen test sonuçları ile karşılaştırılması gösterilmiştir.

Wang vd. (2018), kısmen fiber takviyeli polimer (FRP) ile sargılanmış betonun, şekil değiştirme-sertleşme veya şekil değiştirme-yumuşama tepkileri ile basınç davranışı hakkında yeni bilgiler sağlamaktadır. Tamamen FRP ile kaplanmış beton, farklı şerit boşluklarına sahip kısmen FRP ile kaplanmış beton ve herhangi bir sargı işlemi uygulanmamış serbest beton eksenel basınç altında test edilmiştir. Farklı şerit boşluklarına sahip numuneler için dört tip eksenel yük-eksenel deformasyon davranışı gözlenmiştir. Yüksek hacimsel FRP oranı uygulanmış olsa da şerit aralığı numunelerin çapını aştığında sargılama etkinliği ihmal edilebilir düzeyde olmuştur. Ayrıca sargılı ve sargısız betonun eksenel gerilme-şekil değiştirme davranışlarının farklı olduğu ve sargısız bölgede önemli şekil değiştirmelerin yer aldığı gözlenmiştir. Deneysel gözlemler ve detaylı bir literatür taramasına dayanarak kısmen FRP ile kaplanmış beton için bir sargılama tesir katsayısı önerilmiştir. Önerilen bu sargılama tesir katsayısı dikkate alınarak bir gerilme-şekil değiştirme modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen gerilme-şekil değiştirme modeli, mevcut literatürdeki diğer gerilme-şekil değiştirme modellerinden daha iyi ön görüler sağlamıştır.

Shahawy vd. (2000), lifli cam takviyeli polimer ile sarılı beton modeli doğrulamak için beş farklı sarım sayısı ile normal ve yüksek dayanımlı beton olmak üzere iki gruptan oluşan toplamda kırk beş adet karbon lif takviyeli polimer ile sarılı beton numuneleri eksenel basınç testine tabi tutmuşlardır. Ayrıca Drucker-Prager plastisitesine sahip doğrusal olmayan bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Aynı sargılama modelinin, sargının rijitliğinin bir fonksiyonu olarak betonun genleşme eğilimini içerdiği müddetçe hem karbona hem de cama uygulanabileceği görülmüştür.

Ismail vd. (2019), yatay ve sarmal şerit halinde kısmi olarak CFRP ile güçlendirilmiş, 150x300 mm boyutlarında 24 adet silindirin basınç davranışını incelemişlerdir. Her iki sargılama tekniği olarak 20,40 ve 60 mm şerit aralıklarına sahip kısmi CFRP ile yapılan güçlendirmelerin sonuçları, tam kaplanan ve sargılama yapılmayan düz beton örnekleriyle karşılaştırılmıştır. 20 mm yatay aralıklı şeride sahip kısmi CFRP ile güçlendirilmiş numune, tamamen CFRP ile kaplanan numuneden %1,04 daha düşük nihai basınç dayanımına ulaşmıştır. Bu nedenle yatay şeritli kısmi CFRP ile güçlendirilmiş numune, beton silindiri güçlendirmede eşit derecede yeterliliğe sahip olduğu görülmüştür. 20 mm aralıklara sahip yatay şeritlerle kısmi olarak CFRP ile güçlendirme yine aynı şekilde 20 mm aralıklara sahip spiral şeritlerden oluşan CFRP ile güçlendirmeden %18,2 daha yüksek nihai basınç dayanımı vermiştir.

Zeng vd. (2017) yaptıkları çalışmada, mevcut araştırmaların elyaf takviyeli polimer (FRP) kaplamanın dairesel kolonlar için etkili olduğunu fakat kare kolonlar için daha az etkili olduğunu gösterdiğinden dolayı kare kolonlar için FRP ile güçlendirme tekniğinin sargılama etkinliğini artırmak için FRP mantolama yapmadan önce bir kare kolonu daireselleştirilmesi gerektiğinden yola çıkarak daireselleştirilmiş kare kolonların basınç davranışını incelemişlerdir. Bu kapsamda 33 kolon numunesi hazırlanmış ve eksenel basın altında test edilmiştir. Kolon parametreleri; FRP sarma biçimlerini (tamamen sarma ve kısmen sarma), FRP hacim oranını, kesit şekillerini ve sargısız beton dayanımını içerir. Yapılan deney sonuçları, kare kolonların kesit daireselleştirilmesinin FRP kaplamanın etkinliğini önemli ölçüde artırabileceğini ve kısmi FRP sargılama ile birlikte kesit daireselleştirme kullanılarak kare kolonların güçlendirilmesinin, tamamen FRP kaplama ile güçlendirme tekniğine daha ekonomik bir alternatif olduğunu göstermiştir. Ayrıca kısmen FRP ile kaplanmış betonun eksenel gerilme-şekil değiştirme eğrisi iki aşama içerir. FRP hacim oranındaki bir artış genellikle hem nihai eksenel gerilmede hem de nihai eksenel şekil değiştirmede bir artışa yol açmaktadır. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinin ikinci aşamasının eğimi genellikle FRP sargılama rijitliği ile artmaktadır.

Pham vd. (2015), fiber takviyeli polimer ile tamamen sarılmış, kısmen sarılmış, farklı FRP planları ile sarılmış ve üniform olmayan şekilde sarılmış silindirik beton kolonların davranışını ve göçme modlarını araştırmışlardır. Bu çalışma; aynı miktarda FRP kullanarak geleneksel tamamen sarma planlarına kıyasla, FRP ile güçlendirilmiş beton için daha yüksek bir basınç dayanımı ve şekil değiştirmesi sağlayan yeni bir sarma planı önermiştir. Deneylerde üç tanesi referans numune olmak üzere geri kalanları farklı sarma planları ve farklı tipte FRP (CFRP, GFRP) ile sarmak için toplam 33 tane numune üretilmiştir. Üniform olmayan şekilde sarılmış numuneler, tamamen sarılmış numunelere kıyasla daha yüksek basınç dayanımı ve şekil değiştirme göstermiştir. Öte yandan kısmen sarılmış numuneler, tam olarak sarılmış numunelere kıyasla daha düşük bir basınç dayanımına ancak daha yüksek bir şekil değiştirmeye sahiptir. Ayrıca Kısmi sargılama planları, numunelerin göçme modlarını değiştirmektedir.

1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Gerçekleştirilen literatür araştırmasının iki bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde beton/betonarme yapıların sonlu eleman modeli hakkında yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Yapılan çalışmalar genelinde, incelenmekte olan yapı ve yapı elemanlarının deneysel araştırmaları gerçekleştirildiği gibi günümüzde bu çalışmaların n tespiti veya deneysel verilerin doğruluğunu anlayabilmek için sonlu eleman modellemesinin gerekliliğine değinilmiştir. İkinci bölümde ise, lif takviyeli polimer (FRP) kompozit malzemeler kullanılarak yapılan güçlendirme veya onarma uygulamalarının mühendislik yapılarına etkisinin incelendiği çalışmalara yer verilmiştir. Bu alışmalar kapsamında, lif takviyeli polimer (FRP) kompozit malzemelerin, beton/betonarme yapı elemanlarının; gerilme, şekil değiştirme, yer değiştirme, yük taşıma kapasitesi ve süneklik gibi parametrelerdeki değişimleri araştırılmıştır.

Yapılan tez çalışması kapsamında, farklı lif türü ve farklı sarım sayısı gibi parametreler ile güçlendirilen silindir beton numunelerin basınç dayanımlarındaki değişimleri deneysel ve analitik yöntemlerle belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla; bir tane silindir beton referans numunesi, 2 kat ve 3 kat karbon lifli polimer kumaşlarla güçlendirilmiş iki silindir numunesi ve 2 kat ve 3 kat cam lifli polimer kumaşlarla güçlendirilmiş iki silindir numunesi olmak üzere beş numune rneği kullanılmıştır. Hazırlanan tez çalışması genel anlamda  bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, konuyla ilgili daha önce yapılmış olan çalışmalar incelenmiştir ve konunun günümüzde oldukça önemli bir yere sahip olduğundan bahsedilmiştir. Daha sonra yapılan deneysel ve analitik çalışmalar, geliştirilen grafikler ve bu konu kapsamında hesaplamalarda kullanılan denklemlere yer verilmiştir.

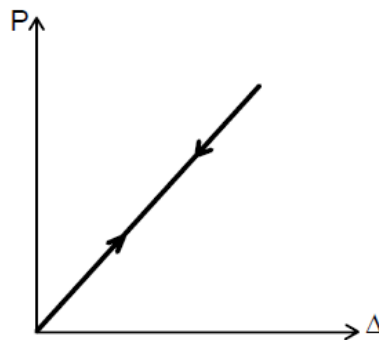
İkinci bölümde, gerçekleştirilen çalışmalar ve bu çalışmalar sonucunda elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Bu bölüm iki ana başlık altında toplanabilir. Birinci kısımda, deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında deneylerde kullanmak üzere beş adet silindir beton numuneler üretilmiştir. Sonrasında, numunelere farklı lif türü (karbon ve cam) ve farklı sarım sayısına (2 ve 3) göre güçlendirme işlemi uygulanmıştır. Deneysel çalışmanın son aşaması olarak basınç analizleri gerçekleştirilmiştir. Güçlendirme çalışmalarından sonra laboratuvar ortamında bulunan basınç makinesinde numunelere tek eksenli basınç testi uygulanmıştır. İkinci kısımda, basınç testi uygulanan numunelerin sonlu eleman modellemesi yapılarak basınç analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlardan ve analitik sonuçlardan elde edilen basınç dayanımları ve gerilme-şekil değiştirme grafikleri karşılaştırılmıştır.

Üçüncü bölümde ise tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel ve analitik çalışmaların sonuçları karşılaştırılmalı verilmiş olup sonrasında öneriler sunulmuştur. Bu bölümün ardından kaynaklar ve özgeçmiş verilmiştir.

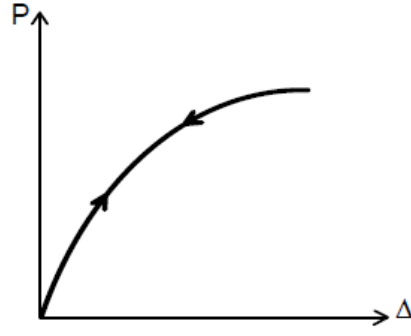
1.4. Malzeme Davranışının Modellenmesi

Bir yapı sisteminin, dış etkenler altında lineer olmayan davranışı başlıca iki sebeple ilişkilendirilmektedir. Bu sebeplerden biri, tam olarak bünye denklemlerinin lineer olmamasından kaynaklanmaktadır. Diğer sebep ise, geometrik değişimlerin tesiri sebebiyle denge denklemlerinin lineer olmaması olayıdır. Gerçek bir malzemenin davranışı, karmaşık bir durum sergilemektedir. Bu karmaşık değişim ise gerçek malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin lineer olmayışı ve malzeme özelliğine bağlıdır. Çözümlerde farklı yaklaşım oranlarında sonuç ortaya koymak için basit malzeme modelleri kabul edilmektedir.

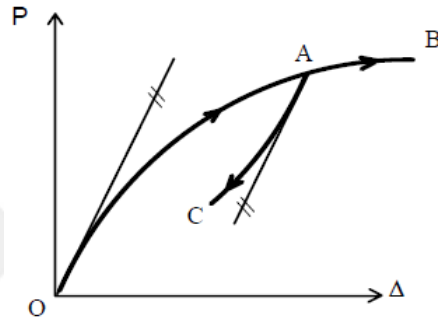
Bu yaklaşımla, kapalı matematiksel çözümler yardımıyla elemanların veya sistemlerin davranışını incelemek ve üzerinde tartışmak mevcut hale gelmiştir. İleri matematiksel modellerin tercihinde, yorumlama zor hale gelmektedir. Bu yüzden; basit malzeme modelleri kullanılarak yapılan çözümler, daha basit çözüm yolları ortaya koyması ve karmaşık çözüm sonuçlarını yorumlama bakımından olanak sağladığı için önemlidir. Başlıca idealize edilip tanımlanan malzeme davranış modelleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir (Karahasan, 2017).



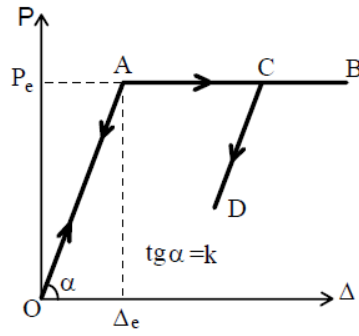
Şekil 1.1. Doğrusal elastik malzeme modeli



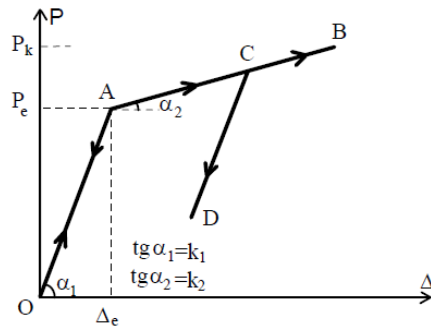
Şekil 1.2. Doğrusal olmayan elastik malzeme modeli



Şekil 1.3. Elasto-plastik malzeme modeli



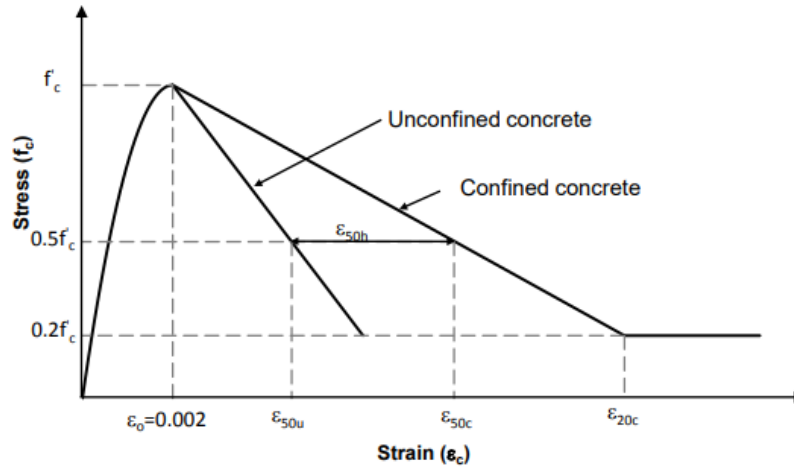
Şekil 1.4. İdeal elasto-plastik malzeme modeli



Şekil 1.5. Pekleşen ideal elasto-plastik malzeme modeli

1.5.1. Kent-Park ve Geliştirilmiş Kent-Park Modeli

1971 yılında Kent-Park tarafından önerilen model Şekil 1.7’de verilmektedir. Bu önerilen modeldeki gerilme-şekil değiştirme eğrisinin maksimum gerilmeye kadar olan ilk kısmı, Hognestad modeliyle de paralellik gösteren ikinci derece bir parabol şeklinde varsayılmaktadır. Modelin ikinci kısmına bakılırsa, aşağı yönlü iki doğru ileri sürülmektedir. Bunlardan biri sargısız betonun diğeri ise sargılı betonun davranışını temsil etmektedir. Maksimum gerilme noktasındaki f_c standart silindirin beton basınç dayanımını ifade etmektedir. Geliştirilen modelin şekil ve özellikleri aşağıda ifade edilmiştir (Uzbaş, 2008).



Şekil 1.7. Kent-park tarafından önerilen gerilme-şekil değiştirme modeli (Reddiar, 2009).

Geliştirilen bu modelin ilk kısmındaki f_c betonun basınç dayanımını, ε şekil değiştirmeyi temsil etmekte olup gerilme şekil değiştirme arasında;

$$\sigma_c = f_c \left\{ \frac{2\varepsilon_c}{0,002} - \left(\frac{\varepsilon_c}{0,002} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

Şeklinde bir bağıntı ile ifade edilmektedir. Modelin ikinci bölgesindeki alçalan dalları için, a ve b enine donatı ile sarılmış kesit boyutlarını, s, enine donatı aralığını ve A_w enine donatının kesit alanını göstermek üzere,

$$\sigma_c = \frac{2A_w(a+b)}{s(a)(b)} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3+0,0285f_c}{14,2f_c-1000} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{50h} = \frac{3}{4}\rho_s\sqrt{\frac{b}{s}} \quad (4)$$

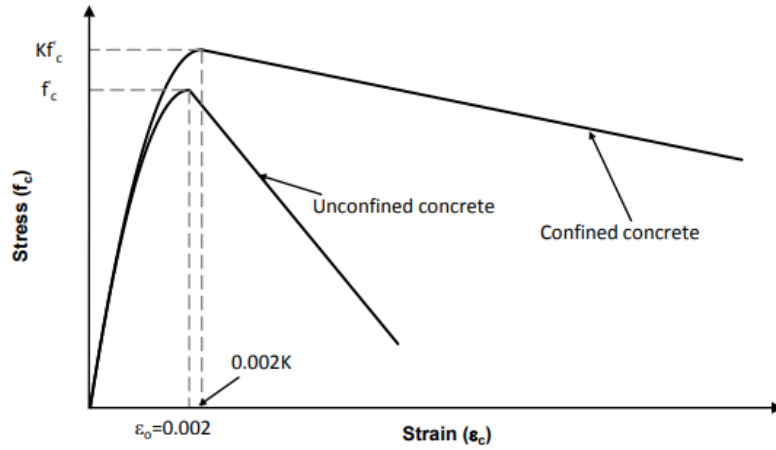
bağıntılarıyla ve bu verilere bağlı olarak $z=\tan\theta/f_c$ olmak üzere, başka bir ifade ile;

$$Z = \frac{0,5}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - 0,002} \quad (5)$$

bağıntısıyla hesaplanan bir katsayıyı göstermek üzere gerilme ile şekil değiştirme arasındaki ilişki;

$$\sigma_c = f_c \{1 - z(\varepsilon_c - 0,002)\} \quad (6)$$

bağıntısıyla açıklanmaktadır. Geliştirilmiş Kent-Park modeli, Kent-Park modelinin geliştirilmesiyle elde edilmiştir (Şekil 1.8).



Şekil 1.8. Geliştirilmiş Kent-Park gerilme-şekil değiştirme modeli (Reddiar, 2009).

Bu modelde sargı donatı etkisinin, maksimum gerilmeden sonra olduğu ve basınç dayanımında bir artışa etkisi olmadığı ilkesine dayanan Kent-Park modelinden ayrı olarak, maksimum gerilme üzerinde de etkili olduğu ön görülmektedir. İki bölgeden oluşan bu modelde ilk kısım, maksimum gerilme noktasına kadar parabol, ikinci kısımda ise

maksimum gerilme noktasından sonra azalan bir doğru parçası olarak ifade edilmektedir (Uzbaş, 2008).

Bu modelde; s enine donatı aralığını, A_w enine donatı kesit alanını, a kesitin kısa kenarını, ρ ; enine donatının hacimsel oranını göstermek üzere, q ve k_y sırasıyla,

$$\rho = \frac{4 \cdot A_w}{a \cdot s} \quad (7)$$

$$K_y = 1 + \frac{\rho \cdot f_y}{f_c} \quad (8)$$

bağıntısıyla ifade edilmekte, modelin ilk kısmındaki gerilme ile şekil değiştirme arasında,

$$\sigma_c = K_y f_c \left(\frac{2 \cdot \varepsilon_{c0}}{K_y \cdot \varepsilon_{c0}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{K_y \varepsilon_{c0}} \right)^2 \right) \quad (9)$$

denklemleriyle açıklanan bir ilişki olduğu, modelin ikinci kısmında ise modelde yer verilen, ε_{50u} , ε_{50h} ve z sırasıyla;

$$\varepsilon_{50u} = \frac{0,3 + 0,0285 f_c}{14,2 f_c - 1000} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{50h} = \frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{a}{s}} \quad (11)$$

$$z = \frac{0,5}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - K_y \varepsilon_{c0}} \quad (12)$$

denklemleriyle belirlenen verileri göstermek için

$$\sigma_c = K_y f_c \left(1 - z (\varepsilon_c - K_y \varepsilon_{c0}) \right) \quad (13)$$

ifadesiyle belirlenen bir ilişki olduğu kabul edilmektedir (Uzbaş, 2008).

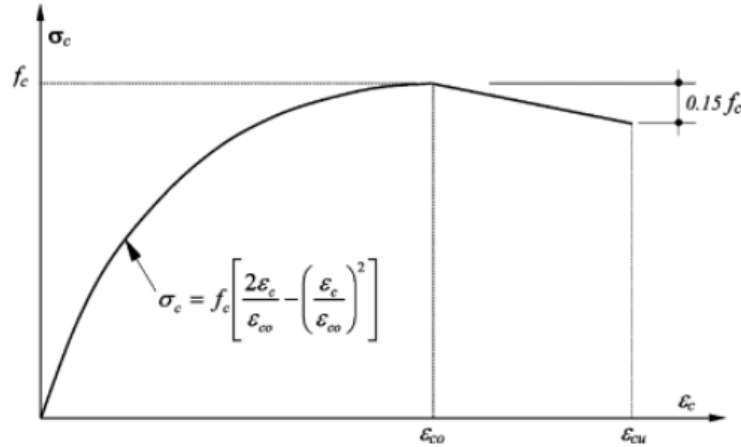
1.5.2. Hognestad Modeli

Hognestad tarafından geliştirilen, sıradan bir beton için en yaygın olarak kullanılan modellerden biridir. Model iki aşama şeklinde düşünülürse; birinci kısım, eğrinin zirve noktasına kadar ikinci dereceden bir parabol eğrisinden oluşmaktadır. İkinci kısımda ise lineer olarak azalan bir doğru parçasından oluşmaktadır (Şekil 1.9).

Önerilen modelde beton basınç dayanımı olarak genellikle silindir beton numune dayanımının %85'i alınmaktadır. Beton basınç dayanımı f_c simgesi ile gösterilir ($f_c = 0,85f_{ck}$). Dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme ϵ_{co} ve başlangıç elastisite modülü E ile gösterilir ($E_c = 1268 + 460f_c$). Bir bağıntı olarak gösterilirse,

$$\epsilon_{co} = \frac{2f_c}{E_c} \quad (14)$$

şeklinde ifade edilir. Bu değer normal betonda basitçe ifade edilirse $\epsilon_{co} = 0,002$ olarak alınmaktadır (Uzbaş, 2008).



Şekil 1.9. Hognestad tarafından geliştirilen gerilme-şekil değiştirme modeli (Hognestad vd., 1955).

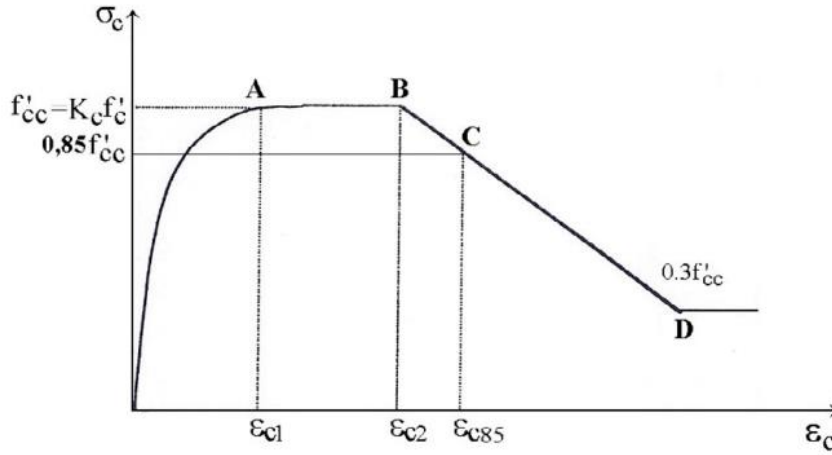
Hognestad beton için önerdiği gerilme-şekil değiştirme modelinde gerilme ile şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi,

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_{co}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (15)$$

bağıntısı ile ifade etmektedir (Bangash, 1989).

1.5.3. Sheikh-Üzümeri Modeli

Sargı donatılı kare kesitli kolonlarda davranış özelliklerini belirlemek üzere 305x305x1960 mm boyutlarında numuneler Sheikh ve Üzümeri tarafından eksenel basınç altında deneye tabi tutulmuştur (Sheikh ve Üzümeri, 1980). Model ana hatlarıyla dört kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım ϵ_{c1} noktasına kadar ikinci dereceden parabolik bir eğriyle, ϵ_{c1} ve ϵ_{c2} arasındaki kısım yatay doğrusal olarak, ϵ_{c2} ve ϵ_{c85} arasındaki kısım lineer olarak $0,85f'_{cc}$ değerine kadar azalan ve son olarak dördüncü kısımda ise aynı eğimle doğrusal olarak $0,3f'_{cc}$ değerine kadar azalıp sonrasında yatay olarak sabit bir doğru ile gösterilmektedir. Geliştirilen bu model Şekil 1.10'da verilmiştir (Kaltakçı vd., 2006).



Şekil 1.10. Sheikh-Üzümeri tarafından geliştirilen gerilme-şekil değiştirme modeli

$$K_c = 1 + \frac{b_c^2}{140P_{occ}} \left[\left(1 - \frac{nc^2}{5,5b_c^2} \right) \left(1 - \frac{s}{2b_c} \right)^2 \right] \sqrt{\rho_{sh} f_{sh}} \quad (16)$$

$$P_{occ} = 0,85f'_c(b_c^2 - A_s) \quad (17)$$

$$f'_{cc} = K_c f'_c \quad (18)$$

Burada;

b_c :	Sarılmış kesit genişliği
s :	Enine donatı aralığı
ρ_{sh} :	Sargı donatısının sarılmış kesitte hacimsel oranı
A_s :	Boyuna donatı enkesit alanı
f'_c :	Sarılmamış beton silindir basınç dayanımı
f'_{cc} :	Sarılmış beton basınç dayanımı
f_{sh} :	Enine donatı gerilmesi
n :	Kesitteki boyuna donatı sayısı
C :	Enine donatılar tarafından düzlem dışı hareketi önlenmiş boyuna donatılar arası mesafe
σ_c :	Beton basınç gerilmesi
ε_c :	Beton birim şekil değiştirmesi
ε_{c1} :	Denklem (19) ile hesaplanan birim şekil değiştirme
ε_{c2} :	Denklem (20) ile hesaplanan birim şekil değiştirme
ε_{c85} :	Denklem (21) ile hesaplanan birim şekil değiştirme

şeklindedir ve modeldeki ε_{c1} , ε_{c2} , ve ε_{c85} birim şekil değiştirmeleri aşağıdaki bağıntılarla hesaplanır.

$$\varepsilon_{c1} = 80K_c f'_c 10^6 \quad (19)$$

$$\varepsilon_{c2} = \varepsilon_{co} \left[1 + \frac{248}{c} \left(1 - 5 \left(\frac{s}{b_c} \right)^2 \right) \frac{\rho_{sh} f_{sh}}{\sqrt{f'_c}} \right] \quad (20)$$

$$\varepsilon_{c85} = 0,225 \rho_{sh} \sqrt{\frac{b_c}{s}} + \varepsilon_{c2} \quad (21)$$

1.6. Betonun Elastisite Modülü

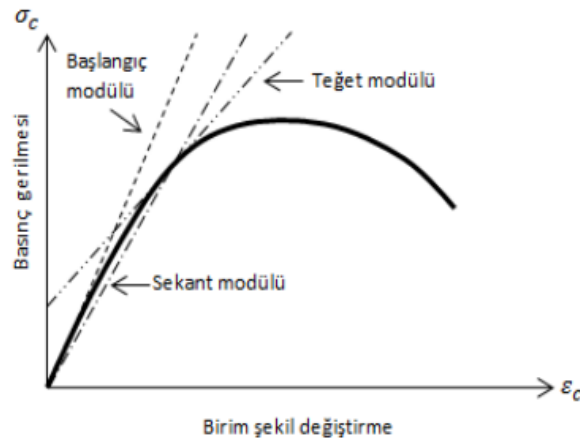
Bir malzemenin belirli bir yük altında şekil değişimine tabi tutulduktan sonra yükün kaldırılmasıyla, malzeme yük almadan önceki haline geri dönebildiği takdirde bu duruma

elastik şekil değiştirme adı verilir. Elastik sınır aşıldığında ise, malzeme plastik deformasyona uğradığı için eski haline geri dönemez ve bu duruma da plastik şekil değiştirme denilir. Elastik şekil değiştirme yapı malzemelerinin çoğunda doğrusal olarak gerilmeye bağlıdır. Tek eksenli yükleme altında bu denklem $\sigma = E \cdot \varepsilon$ (Hooke Kanunu) şeklindedir. Bu denklemdeki E katsayısına malzemenin “Elastisite Modülü” veya “Young Modülü” adı verilir (Kocataşkın, 1976).

Betonun elastisite modülünün bilinmesi beton bazlı yapıların deformasyonlarının hesaplanmasına olanak sağlar. Ayrıca deformasyonları ölçmek kaydıyla ve buna ek olarak elastisite modülünün de bilinmesi ile gerilmeler hesaplanabilir (Postacıoğlu, 1981).

1.6.1. Elastisite Modülünün Belirlenmesi

Genellikle betonun elastisite modülünü bulmak için bir beton numunesine basınç uygulanır ve bunun sonucunda gerilme şekil değiştirme eğrisi çıkarılır. Yapılan bu tip çalışmalarda çizdirilen gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin başlangıcında doğrusal bir çizgi yoktur. Bundan sebep birden çok elastisite modülleri bulunmaktadır. Bunlardan başlıcaları Şekil 1.11’de gösterildiği gibi sekant modülü, teğet modülü ve başlangıç teğeti modülüdür (Postacıoğlu, 1981).

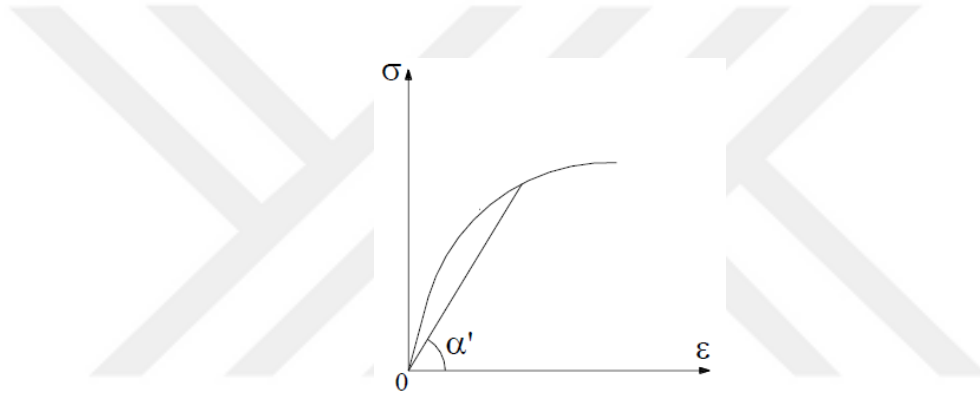


Şekil 1.11. Beton için oluşturulan elastisite modülleri

1.6.1.1. Sekant Modülü

Gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerinde herhangi bir M noktasından koordinat merkezine çizilen doğrunun (OM) eğimi ($E_s = \tan \alpha$) sekant modülü olarak adlandırılır ve E_s ile gösterilir (Şekil 1.12). Sekant modülü, kesiştiği noktaya göre farklı değerler alabilir fakat ortalama %40-%50 dayanıma karşılık gelmektedir (Postacıoğlu, 1981).

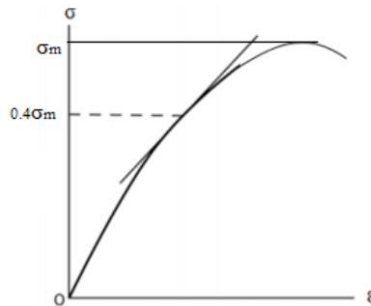
Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen analizlerde; betonun elastisite modülü, sekant modülü esas alınarak yapılmıştır. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde, maksimum beton basınç dayanımının %40'ına denk gelecek noktanın eğimi şeklinde olan bu değer, hesaplamalarda kullanılmıştır.



Şekil 1.12. Sekant Modülü

1.6.1.2. Teğet (Tanjant) Modülü

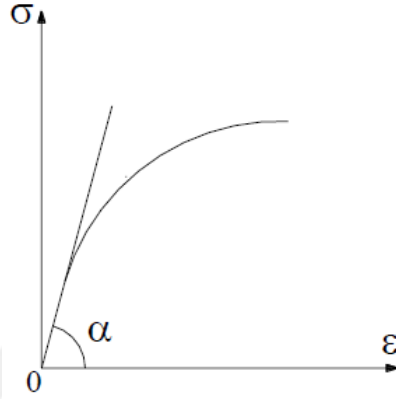
Gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerinde herhangi bir noktanın eğimi, teğet (tanjant) modülü olarak adlandırılır (Şekil 1.13). Bu değer lineer elastik bölgede elastisite modülüne eşittir (Aydemir vd., 2019).



Şekil 1.13. Teğet (Tanjant) Modülü

1.6.1.3. Başlangıç Teğeti Modülü

Başlangıç teğeti modülü, gerilme-şekil değiştirme grafiğinin sıfır noktasından eğriye çizilen teğetin eğimi olarak tanımlanmaktadır ve $E_t = \tan \alpha$ bağıntısıyla bulunabilmektedir (Şekil 1.14) (Postacıoğlu, 1981).



Şekil 1.14. Başlangıç Teğeti Modülü

Betonun elastisite modülü farklı yönetmeliklerde de yer aldığı gibi beton basınç dayanımının bir fonksiyonu şeklinde ifade edilmektedir. TS500 (2000)'de adı geçen karakteristik basınç dayanımı ise belli çerçevedeki deneysel verilere bağlı olarak belirlenen değerden daha küçük dayanım değeri ortaya çıkması olasılığı %10 olan dayanım değeri olarak ifade edilmiştir (Duran vd., 2017).

$$f_{cc} = f_{cm} - (128 \times StSap \cdot f_c) \quad (22)$$

$$E_{cj} = 3250\sqrt{f_{ckj}} + 14000 \text{ (TS500, 2000)} \quad (23)$$

$$E_c = 22000(f_{cm}/10)^{0,3} \text{ (Eurocode 2, 2004)} \quad (24)$$

$$E_c = 4700\sqrt{f_{cc}} \text{ (ACI 318-08, 2008)} \quad (25)$$

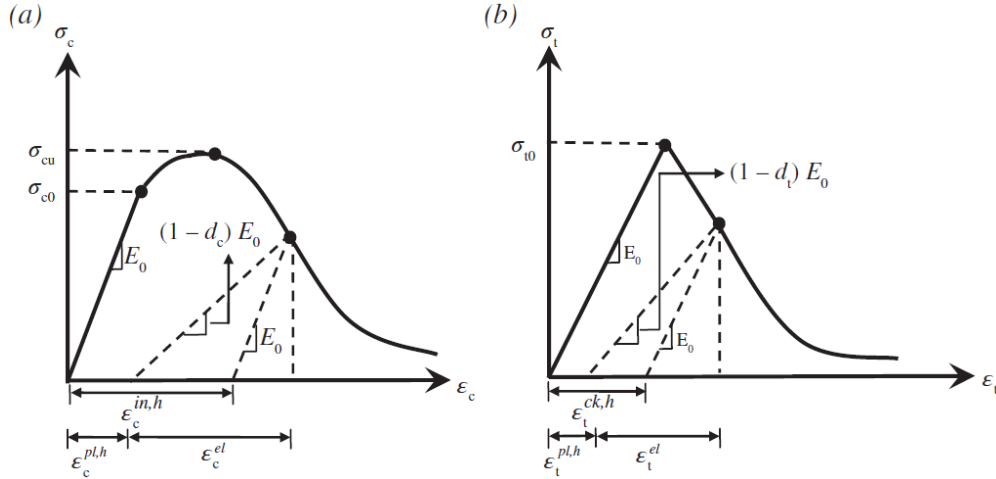
$$E_{cm} = 5000\sqrt{f_{cm}} \quad (26)$$

Eş. (23) ve Eş. (24)'te yer alan elastisite modülleri, yer aldıkları yönetmeliklerde, mevcut ve yapılması planlanan yapıların hesaplarında söz konusu beton dayanımına göre hesaplanmaktadır. Mevcut yapı stoğunun risk değerlendirme hesaplamaları, RYTEİE'de Eş. (26)'ya göre yapılmaktadır. TS500 ve ACI 318M-08'de yer alan elastisite modülü hesaplarında Eş. (22)'de hesaplanan karakteristik beton basınç dayanımına göre tanımlama yapılmıştır. Elastisite modülü tanımlaması ülke ve yönetmeliklere göre değişkenlik göstermektedir. Yapılan tanımlamalara göre sırasıyla; Eurocode 2, beton basınç dayanımının %40'ına göre çizilen sekant modülü olarak ifade ederken, ACI 318M-08, %45'ine göre tanımlamaktadır. RYTEİE ise Eş. (26) ile bu tanımlı yapmaktadır (Duran vd., 2017).

1.7. Beton Hasar Plastisite Modeli (CDP)

Yıllar içerisinde betonun doğrusal olmayan analizine yönelik birçok araştırmalar olmuş ve matematiksel modeller geliştirilmiştir. Betonun basınç altında ezilmesi ve çekme durumunda çatlaması, beton için genel iki başarısızlık modudur. Serbest haldeki betonun davranışını analiz etmek için malzeme modelleri geliştirilmiştir ve bunlardan en belirleyici olanlardan biri de beton hasar plastisite modelidir (CDP). Karmaşık olan bu model teorisi sadeleştirilerek basit bir hale getirilmiştir ve basitleştirilmiş beton hasar plastisite modeli olarak adlandırılmıştır (SCDP) (Hafezolghorani vd., 2017).

Sertleşme ve yumuşama değerleri değişkenleri sırasıyla çatlama ve ezilme eğilimlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu değerler akma yüzeyinin gelişimi ve elastik rijitlikten sorumludur. Basınç ve çekmedeki hasar durumları, iki sertleşme değişkeni tarafından bağımsız olarak karakterize edilmiştir. Bu değişkenler sırasıyla çekme ($\epsilon_t^{pl,h}$) ve basınçtaki ($\epsilon_c^{pl,h}$) eş değer plastik şekil değiştirmelerdir. Tek eksenli yükleme altında betonun basınç ve çekme davranışının grafiği Şekil 1.15'te verilmiştir (Hafezolghorani vd., 2017).



Şekil 1.15. Tek eksenli yükleme durumunda betonun tepkileri: (a) Basınç, (b) Çekme (Lubliner vd., 1989).

Beton hasar plastisite (CDP) modellerinde, basınçtaki plastik sertleşme şekil değiştirmesi ($\varepsilon_c^{pl,h}$), hasar parametreleriyle basınç dayanımı arasındaki ilişkinin bulunmasında önemli bir yer teşkil etmiştir. Betonun tek eksenli basınç altındaki davranışını analiz etmede aşağıdaki denklemler kullanılmıştır.

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl,h}) \quad (27)$$

$$\varepsilon_c^{in,h} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (28)$$

$$\varepsilon_c^{pl,h} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \left(\frac{1}{1-d_c} \right) \quad (29)$$

$$\varepsilon_c^{pl,h} = \varepsilon_c^{in,h} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (30)$$

Beton hasar plastisite modellerinde, çekme altında plastik sertleşme şekil değiştirmesi ($\varepsilon_t^{pl,h}$) ve çekme dayanımı denklemleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl,h}) \quad (31)$$

$$\varepsilon_t^{ck,h} = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (32)$$

$$\varepsilon_t^{pl,h} = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_0} \left(\frac{1}{1-d_t} \right) \quad (33)$$

$$\varepsilon_t^{pl,h} = \varepsilon_t^{ck,h} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (34)$$

beton hasar plastisite modelinde, beton basınç hasarı (d_c) ve beton çekme hasarı (d_t);

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}} \quad (35)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_{t0}} \quad (36)$$

şeklindeki denklemler yardımıyla hesaplanmaktadır (Hafezolghorani vd., 2017).

ABAQUS programı içerisinde yer alan beton hasar plastisite modeli analizlerinde çalışma prensipleri sırasıyla şöyle açıklanabilmektedir. Tek eksenli çekme altında, gerilme-şekil değiştirme tepkisi, göçme gerilmesi değerine ulaşana kadar doğrusal elastik bir ilişkiyi takip etmektedir. Buradaki göçme gerilimi, beton malzemedeki mikro çatlamanın başlangıcına karşılık gelmektedir. Göçme gerilmesinin ötesinde mikro çatlakların oluşumu, beton yapısında şekil değiştirme lokalizasyonuna sebep olan, bir yumuşama gerilme-şekil değiştirme tepkisi ile temsil edilmektedir. Tek eksenli basınç altında tepki, ilk akma değerine kadar doğrusaldır. Plastik şekillerde tepki tipik olarak dayanım sertleşmesi ve ardından nihai dayanımın ötesinde şekil değiştirme yumuşaması ile karakterize edilmektedir. Bu temsil, biraz basitleştirilmiş olmasına rağmen beton tepkisinin ana özelliklerini yakalamaktadır (URL-1, 2023). Bu tez kapsamında; basınç analizleri, beton için kullanılan ve ABAQUS sonlu elemanlar programının da içinde yer alan beton hasar plastisite modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

1.8. Fiber Takviyeli Polimerler (FRP)

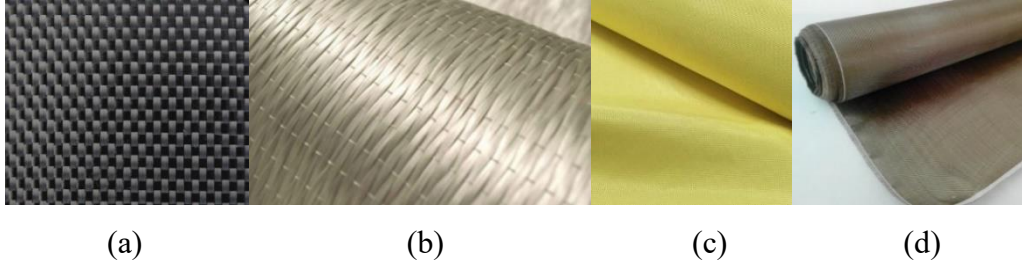
İngilizce olarak Fiber Reinforced Polymer (FRP) sözcüklerinin kısaltılmış hali ile tanınip dilimize Lifli Polimer (LP) veya Fiber Takviyeli Polimer şeklinde geçen bir yapısal güçlendirme malzemesidir. FRP; karbon, cam, aramid, kevlar veya bazalt gibi yüksek

fiziksel özellikli bileşenlere sahip olabilen kompozit malzemelerdir. Bir güçlendirme malzemesi olan FRP kompozit, geniş çapta kullanım alanlarına sahiptir. Beton, betonarme, tuğla, taş, çelik, ahşap vs. gibi yapı elamanlarına dıştan kolay bir şekilde uygulanarak güçlendirme yapılabilmektedir. Çeşitli bağlayıcılar (yapıştırıcı) ile hafif bir görünüme fakat yüksek mekanik dayanımlara sahip olmaktadır. LP kompozit malzemeler tek doğrultulu ve çift doğrultulu kumaşlar (fabrik) ve şeritler (plaka), çubuklar ve ankrajlar şeklinde üretilmektedir (Çelik ve Karaşin, 2014).

Karbon fiber bileşenli olan karbon elyaf kumaşlar, çok ince bir yapıya sahip olmasına rağmen dünya genelinde bilinen en sağlam malzemelerden biridir. Bir gömlek inceliğinde olan karbon elyaflar, çelikle kıyaslandığında; ağırlık bakımından çeliğin beşte biri, gerilmelere karşı gösterdiği dayanımda ise çeliğin on dört katı civarındadır. Makas yardımıyla kesilebilen bu kompozit malzeme, yapılara uygulandıktan sonra çok ciddi bir şekilde mukavemet kazanıp çelik levha gibi sertleşmektedir. Tuğla duvarlara uygulanan karbon lifli polimerler, yapının deprem anında düzlem içi veya düzlem dışı hareketini azaltarak rijitliğinin artmasını sağladığı için yapının deprem anında hasar alma ihtimalini azaltmaktadır. Duvarlara uygulanan FRP güçlendirmeler çok kolay bir şekilde dışardan uygulanan sıva veya alçıpan yardımıyla kapatılarak normal bir duvar görünümüne kavuşturulabilmektedir (Çelik ve Karaşin, 2014).

1.8.1. FRP Türleri

FRP kompozit malzemeler güçlendirme uygulamalarında kullanılan elyaf malzemelerdir. Oldukça mukavemet sağlayan bu malzemeler farklı bileşenlere göre farklı bir FRP formuna dönüşmektedir ve hepsi kendini oluşturan maddenin ismine göre adlandırılmaktadır. Pultrüzyon tekniği ile üretilen bu kompozitlerin başlıcaları; karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP), cam fiber takviyeli polimerler (GFRP), aramid fiber takviyeli polimerler (AFRP) ve bazalt fiber takviyeli polimerler (BFRP) şeklinde olup bu kompozitlerin bazıları Şekil 1.16'da gösterilmiştir.



Şekil 1.16. a) CFRP; b) GFRP; c) AFRP; d) BFRP

Güçlendirme çalışmalarında kullanılan karbon, cam ve aramid lifli polimer kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları Tablo 1.1’de gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Farklı türdeki liflerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları (Karahasan, 2017).

<u>Avantajları</u>	<u>Dezavantajları</u>
Karbon Lifi	
Sünme direnci mükemmel seviyededir, Termal genleşme katsayısı düşüktür, Düşük yoğunluğa sahiptir, Gerilme modülü yüksektir, Yüksek mukavemete sahiptir, Kimyasal etkilere dayanıklıdır, Düşük elektrik direncine sahiptir (düşük iletkenlik).	Yüksek maliyetlidir, Yırtılma anında düşük ϵ değeri sergiler, Gerilme mukavemetine göre düşük basınç davranışı sergiler, Anizotrop malzemedir, Nemli ortamlarda kullanılması bağ kuvvetini zayıflatabilir.
<u>Avantajları</u>	<u>Dezavantajları</u>
Cam Lifi	
Düşük maliyetlidir, Darbelere ve gerilmeye karşı yüksek mukavemetlidir, Yırtılma anında yüksek ϵ değerine sahiptir,	Düşük elastisite modülüne sahiptir, Düşük nem direncine sahiptir, Düşük yorulma direncine sahiptir, Lifler aşınmaya karşı hassastır.
<u>Avantajları</u>	<u>Dezavantajları</u>
Aramid Lifi	
Yüksek elastisite modülüne sahiptir, Yüksek mekanik özelliklere sahiptir, Termal direnci gelişmiştir, Mukavemet-ağırlık oranı yüksektir.	Yüksek derece anizotropdur, X doğrultusundaki özellikleri zayıftır, Epoksi reçinesi ile bağ yapamaz, Nemli ortamlarda önerilmez.

1.9. Reçineler (Polimer Matrisler)

FRP'nin içinde bulunan fiberleri birbirine bağlayan ve polimerlerle oluşturulan reçineler, lifler arasındaki yük akışını yaparak oluşması muhtemelen hasarlardan korumaktadır (Önal, 2014). Diğer bir adıyla matris olarak da bilinmektedir. Başlıca reçine türleri iki şekilde olup bunlar, termoplastik ve termoset reçinelerdir (Daniel vd., 2019). Aşağıda bu reçinelerden bahsedilmiştir.

1.9.1. Termoplastikler

Termoplastikler, molekül yapılarında bir değişime uğramadan belirli bir sıcaklık derecesinden sonra yumuşayıp şekil alabilen, soğuduktan sonra katılaşarak verilen şekilde formunu koruyabilen, ısıya bağlı şekil değişimi gösterebilen polimer bir malzemedir.

1.9.2. Termosetler

Termosetler, çoğunlukla diyagonal bağlı molekül yapılarında ortaya çıkan polimerleşme neticesinde, yumuşama esnasında ilk şekillerini koruyarak belli bir sıcaklık noktasından sonra erime göstermeksizin karbonlaşmaya uğrayan ve ısı karşısında artık değişim göstermeyen plastik malzemelerdir (Lee vd., 2000). Termosetler, piyasada en yaygın olarak kullanılan reçinelerdir ve birçok avantajı vardır. Bunlardan bazıları; kolay şekil verilebilme, priz alma süresinin kısalığı ve uzun ömürlü oluşudur (Maraş, 2021). Termosetlere örnek olabilecek Epoksi, Polyester ve Vinylester reçineler aşağıda tanımlanmıştır.

1.9.2.1. Epoksi

Epoksi; yüksek yapışma dayanımı, düşük rötne miktarı, ısısal kararlılık, kürlenme süresinin kısalığı ve uygulandıktan sonra hızlı ve güvenli şekilde kullanıma başlanabilmesi gibi iyi kimyasal ve mekanik özelliklere sahip bir termoset reçine türüdür (Swamy vd., 1987).

1.9.2.2. Polyester

FRP ile güçlendirme çalışmalarında polyester, geniş çapta kullanılan bir termoset reçine türüdür. Nispeten daha ucuz oluşu, korozyon gibi dış etkilere karşı dayanıklı olması ve kür süresinin düşük olması sebebiyle tercih sebebi olmaktadır (Chen vd., 2006).

1.9.2.3. Vinylester

Vinylester, bir epoksi reçinesinin doyumsuz bir monokarboksilik asit ile esterleştirilmesiyle elde edilen matrikstir. Cam lif takviyeli polimerlerin (GFRP) ve bazalt lif takviyeli polimerlerin (BFRP) yapıştırma uygulamalarında kullanılmaktadır (Shokrieh ve Omid, 2009).

Lif çeşidine ve polimer matrisine göre bu malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 1.2’de verilmiştir.

Tablo 1.2. Termoset reçinelerin mekanik özellikleri (Maraş, 2021).

Termoset reçineleri	Özgül Ağırlık (g.cm ⁻³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Kuruma büzülmesi (%)
Epoksi	1,2-1,3	55-130	2,75-4,1	1-5
Polyester	73-81	1,12-1,32	3,0-3,35	5,4-10,3
Vinylester	1,1-1,4	34,5-103,5	2,1-3,45	5-12

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

2.1. Giriş

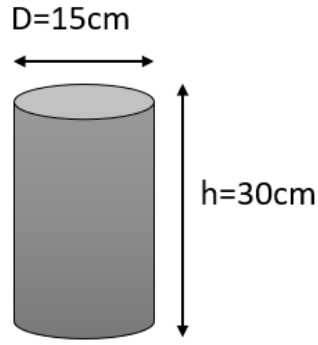
Bu tez çalışmasında, FRP kompozit malzemelerle güçlendirilmiş beton numunelerinin basınç dayanımlarında meydana gelen değişimlerin ve yapısal davranışlarının deneysel ve numerik yöntemler kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Uygulama olarak, beton numuneleri 150x300 mm boyutlarında olmak üzere laboratuvar ortamında üretilmiştir. Sonrasında FRP kompozit kumaşlarla sarılarak güçlendirme çalışması yapılmıştır. Son aşamada ise bu numunelerin yine laboratuvar ortamında basınç testleri yapılmıştır. Bu kapsamda yapılan deneysel çalışmalar, başlıca üç kısımda incelenmiştir.

2.2. Deneysel Çalışmalar

Tez çalışması kapsamında, FRP kompozit malzemelerin beton davranışına ve beton basınç dayanımına etkisini irdelemek amacıyla teorik ve numerik çalışmaların yanında deneysel çalışmalar da yürütülmüştür. Bir tanesi referans numunesi olmak üzere toplam beş adet silindir beton numune üretilmiştir. Üretilen beton numunelerine daha sonra FRP kompozit malzemelerle güçlendirme işlemi uygulanmıştır. FRP kompozit güçlendirme uygulaması, beton dış yüzeyine epoksi reçineler sürülerek sargılama tekniği ile uygulanmıştır. Beton numunelerine yapılan sargılama çalışmaları, FRP lif türü ve FRP katman sayısı gibi parametrelere göre şekil almıştır. Modeller daha sonra laboratuvar ortamında bulunan basınç makinesinde tek eksenli yüklemeye tabi tutulmuştur. Yapılan deneysel çalışmalarda, basınç makinesinde eksenel olarak yüklemeye tabi tutulan beton numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri, bilgisayar ve kamera yardımıyla okunarak bilgisayar ortamında grafikleri çizdirilmiş ve numunelerin davranışı irdelenmiştir.

2.2.1. Beton Numunelerin Geometrik Özellikleri

Çalışma kapsamında, laboratuvar ortamında üretimi gerçekleştirilen toplam beş numunenin geometrik ölçüleri; silindir numune çapı 150 mm, silindir numune boyu 300 mm şeklindedir. Numunelere ait ortak geometrik ölçülü görüntü Şekil 2.1’de verilmiştir.



Beton Sınıfı: C40/45

Şekil 2.1. Beton numunelere ait geometrik ölçüler

2.2.2. Beton Numunelerin Tasarımı ve Üretimi

Çalışma kapsamında, basınç dayanımı minimum 40-45 MPa olacak şekilde ve birim ağırlığı 2400 kg/m^3 'ü aşmayan beton üretimi amaçlanmıştır. Bu bağlamda gerçekleştirilen ön çalışma ile 1 m^3 beton üretimi için gerekli malzeme miktarları mutlak hacim yöntemi ile belirlenmiştir.

Beton üretiminde 60 lt kapasiteli düşey eksenli bir beton karıştırıcısı kullanılmıştır. Gerçekleştirilecek bu üretim için 35 lt'lik karışım hazırlanmıştır. Beton karıştırıcı kazan dökümler gerçekleştirilmeden önce su tutularak süzdürülmüştür. Daha sonra kuru halde bulunan, iri agregası ($844,65 \text{ kg/m}^3$) ile ince agregası ($1032,35 \text{ kg/m}^3$) karıştırıcı kazana dökülerek karıştırma işlemine başlanmıştır. İki tip agreganın karıştırıcıya dökülmesinden belli bir süre sonra karışıma sırasıyla çimento (350 kg/m^3) ve karışım suyu ($157,5 \text{ kg/m}^3$) ilave edilerek karıştırma işlemi tamamlanmıştır. Tüm karışımda su/çimento oranı 0,45 olacak şekilde ve karışım süreleri stabil tutulmaya çalışılmıştır. Laboratuvar ortamında üretilen betona ait malzeme karışım miktarları Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Numunelerin üretiminde kullanılan malzeme karışım miktarları

Bileşen	Miktar
İri Agregası	$844,65 \text{ kg/m}^3$
İnce Agregası	$1032,35 \text{ kg/m}^3$
Çimento	350 kg/m^3
Su	157 kg/m^3
Su/Çimento	0,45
Toplam	2384 kg/m^3

İri agregata ve ince agregata özgül ağırlıkları sırasıyla $2,62 \text{ g/cm}^3$ ve $2,70 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Yapılan karışımda iri ve ince agregata karışım oranları ise sırasıyla %45'e %55 olarak belirlenmiştir.

Hedef çökme için yapılan ön çalışmada belirlenen miktarda kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır. Tüm üretimde su/bağlayıcı oranı 0,45 olacak şekilde ve karıştırma süresi sabit tutulmaya gayret gösterilmiştir. Şekil 2.2'de karıştırma işlemi için kullanılan 60 lt'lik karıştırma kazanı, su ve katkı malzemesinin ilavesi ve karıştırma esnasında kazan içerisindeki betonun durumu görülmektedir.

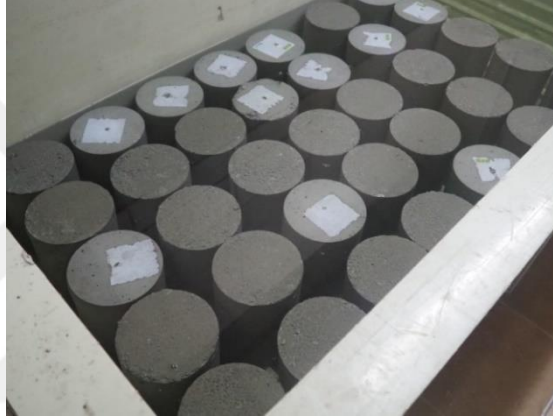


Şekil 2.2. Üretimde kullanılan mikser kazanı, ilave malzemeler ve kazan içerisindeki betonun durumu

Üretilen taze beton, kalıplara iki kademedede doldurulmuş olup ilgili standartta yer aldığı gibi yerleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kalıplara yerleştirilen betonun üst yüzeyi mala yardımıyla düzeltilerek üretim aşaması sonlandırılmıştır. Kalıplara alınan numuneler 24 saat bekletildikten sonra 28 gün boyunca standart kür koşullarında olmak üzere kür havuzunda bekletilmiştir. Şekil 2.3'de ve Şekil 2.4'de üretilen betonun kalıplara doldurulması, doldurulan kalıpların üst yüzeyinin düzleştirilmesi ve betonların kür havuzundaki görüntüleri yer almıştır.



Şekil 2.3. Üretilen betonun kalıplara doldurulması ve üst yüzeylerinin düzlenmesi



Şekil 2.4. Kür havuzunda bekleyen numuneler

2.2.3. Beton Numunelerin Yüzeyine Astar Malzemesinin Uygulanması

Beton numunelerinin üretimi gerçekleştirildikten sonra, numune yüzeyini daha düzgün ve sert bir hale getirmek ve FRP kompozitlerin daha iyi aderans sağlaması için astar uygulaması yapılmıştır. Uygulanan astar malzemesinin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (URL-2, 2023).

- Kolay uygulanır.
- Düşük viskozitelidir.
- Mekanik dayanımları yüksektir.
- Beton yüzeylere uygulandığında yüksek aderans sağlar.
- Solvent içermez.

Deneylerde kullanılan astar malzemesinin teknik özellikleri aşağıdaki Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Astar malzemesinin teknik özellikleri (URL-2, 2023).

Malzeme Yapısı	
MasterBrace® P 3500 Bileşen A	Epoksi Reçine
MasterBrace® P 3500 Bileşen B	Epoksi Sertleştirici
Renk	Şeffaf
Karışım Yoğunluğu	1,08 ± 0,024 kg/litre
Katı Madde Oranı	%100
Eğilme Dayanımı (7 gün) (TS EN 196)	> 20 N/mm ²
Yapışma Dayanımı (beton) (7 gün)	>otc (betondan kopma)
Uygulanacak zeminin sıcaklığı	+5°C - +30°C
Kullanma Süresi	
-1°C	8 saat
+7°C	2 saat
+21°C	45 dak.
+32°C	25 dak.
Uygulama Kalınlığı	0,1 – 0,2 mm
Yeniden Kaplanabilme Süresi	Min. 20 saat
MasterBrace® FRP ile kaplanma	
-1°C	9 saat
+7°C	5 saat
+21°C	3 saat
+32°C	Maks. 48 saat
Tam Kurlenme Süresi (+20°C)	7 gün

Astar malzemesinin uygulanmasından önce beton numunelerin yüzeyleri temizlenmiş, tozdan arındırılmış ve pürüzsüz hale getirilmiştir. Daha sonra karışım hazırlamaya geçilmiştir. Karışım hazırlanırken Tablo 2.3'te verilen katalog verileri (karışım oranları) baz alınarak yapılmıştır.

Tablo 2.3. Astar malzemesinin karışım oranları (URL-2, 2023).

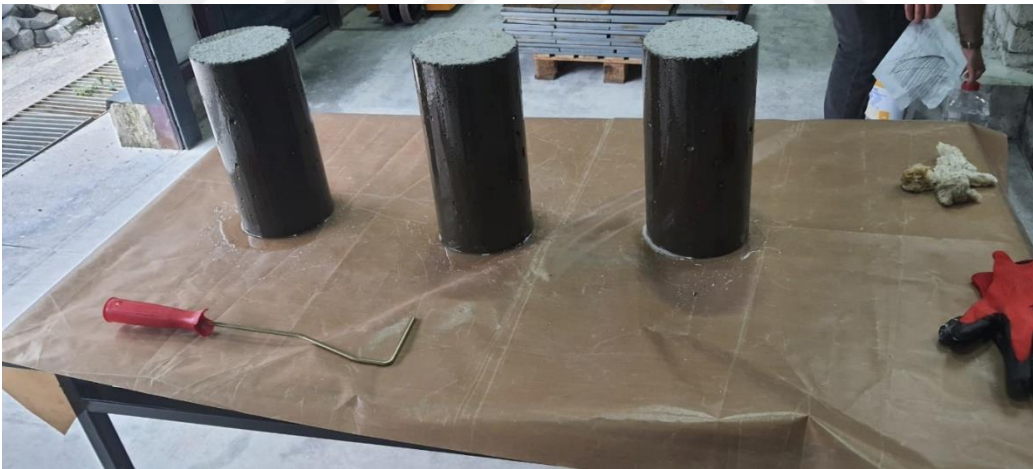
MasterBrace® P 3500	Bileşen A	Bileşen B
Karışım Miktarı	2,76 kg	1,24 kg
Karışım Yoğunluğu	~1,08 kg/litre	

Karışım laboratuvar ortamında ve normal hava şartlarında (24°C) gerçekleştirilmiştir. Bir kova içerisine önce A bileşeni boşaltılarak ortalama 30 saniye boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra B bileşeninin tamamı kova içerisinde bulunan A bileşeninin içine boşaltılmıştır. Bir karıştırıcı yardımı ile yaklaşık olarak 2-3 dakika boyunca homojen bir görünüm elde

edilene kadar karıştırılmıştır. Homojen bir hale gelen astar malzemesi Şekil 2.5'te gösterildiği gibi bir rulo ile beton numune yüzeylerine ince bir tabaka oluşturacak şekilde sürülmüştür ve Şekil 2.6'da gösterildiği gibi kurumaya bırakılmıştır.



Şekil 2.5. Astar malzemesinin beton yüzeylere uygulanması



Şekil 2.6. Astar uygulamasından sonra numunelerin görünümü

2.2.4. Beton Numunelerin Yüzeyine Epoksi Yapıştırıcı Uygulanması

FRP kompozit malzemelerin beton numune yüzeylerine uygulanmasından önce astar malzeme uygulaması gerçekleştirilmiş olup aradan ortalama 24 saatlik bir süre geçmesinin ardından, astarlanmış beton yüzeyler için reçine uygulamasına geçilmiştir. Deneylerde

kullanılan epoksi bazlı özel yapıştırıcı olan reçinenin avantajları aşağıda sıralanmıştır (URL-3, 2023).

- Kolay uygulanabilir.
- Mekanik dayanımı yüksektir.
- Solvent içermez.
- Düşük viskoziteye sahiptir.

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen reçine karışımının teknik özellikleri aşağıdaki Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4. Uygulanan reçine karışımının teknik özellikleri (URL-3, 2023).

Malzeme Yapısı	
MasterBrace® SAT 4500 Bileşen A	Epoksi Reçine
MasterBrace® SAT 4500 Bileşen B	Epoksi Sertleştirici
Renk	Mavi
Karışım Yoğunluğu	1,02 kg/litre
Viskozite	1500-2500 mPa.s
Basınç Dayanımı (7 gün) (TS EN 196)	> 60 N/mm ²
Eğilme Dayanımı (7 gün) (TS EN 196)	> 50 N/mm ²
Yapışma Dayanımı (Betona) (7 gün)	> 3,0 N/mm ²
Uygulanacak Zeminin Sıcaklığı	+5°C - +30°C
Kullanma Süresi (+20°C)	30 dak.
Yeniden Kaplanabilme Süresi (+20°C)	Min. 48 saat
	Maks. 7 gün
Tam Kurlenme Süresi (+20°C)	7 gün

Reçine sürme işleminden önce karışımın hazırlanması için hazırlıklar yapılmıştır ve Tablo 2.5'te verilen katalog verilerine uygun şekilde karışım hazırlanmıştır.

Tablo 2.5. Reçine bileşenlerinin karışım oranları (URL-3, 2023).

MasterBrace® SAT 4500	Bileşen A	Bileşen B
Karışım Miktarı	3,73 kg	1,27 kg
Karışım Yoğunluğu	1,02 kg/litre	

Karışım laboratuvar ortamında ve normal hava şartlarında (24°C) gerçekleştirilmiştir. Bir kova içerisine önce A bileşeni boşaltılarak ortalama 30 saniye boyunca karıştırılmıştır.

Daha sonra B bileşeninin tamamı kova içerisinde bulunan A bileşeninin içine boşaltılmıştır. Bir karıştırıcı mikser yardımı ile yaklaşık olarak 2-3 dakika boyunca homojen bir görünüm elde edilene kadar karıştırılmıştır. Daha sonra astarlanmış beton yüzeylerine ortalama 0,8-1 mm kalınlık olacak şekilde Şekil 2.7'deki gibi rulo yardımıyla sürülmüştür.



Şekil 2.7. Beton yüzeylere epoksi esaslı yapıştırıcı (reçine) uygulanması

2.2.5. Beton Numunelerin Yüzeyine FRP Kumaşların Uygulanması

Reçine sürme işlemi henüz yaşken, FRP kompozit kumaşların sargılama işlemine geçilmiştir. İlk önce karbon lifli polimer kumaşlar ve cam lifli polimer kumaşlar uygun ölçülerde kesilmiştir. Bu ölçüler iki katlı ve üç katlı sargılama işlemi için;

$$2 \times (2 \times \pi \times 7,5) + 20 = 114 \text{ cm} \quad (37)$$

$$3 \times (2 \times \pi \times 7,5) + 20 = 161 \text{ cm} \quad (38)$$

olacak şekilde ayarlanmıştır.

FRP kumaşların üzerlerindeki toz, kir veya yabancı madde varsa temizlenmiştir. Daha önce bir kat epoksi bazlı yapıştırıcı (reçine) sürülen beton yüzeylerine, FRP kumaşlar lif doğrultusunda gerilerek yapıştırılmıştır. Daha sonra aradaki hava boşluklarının alınması ve reçinenin FRP kumaşlar tarafından emilmesi için bir rulo yardımı ile lif doğrultusunda

bastırılarak işlem uygulanmıştır. İkinci kat kumaşın sargılama işlemi için aynı şekilde birinci kat FRP kumaş üzerine rulo yardımı ile reçine karışımı sürülmüştür ve sonrasında ikinci kat FRP kumaş gergin bir şekilde yapıştırılmıştır. Üçüncü kat FRP kumaş uygulaması yapılması halinde aynı işlem adımları uygulanmıştır. Çok katlı FRP kumaş uygulamalarında bindirmeler farklı yerlerden yapılmıştır ve bindirme boyu 20 cm olarak alınmıştır. FRP kompozit kumaşların uygulama görüntülerine Şekil 2.8 ve Şekil 2.9’da yer verilmiştir.



Şekil 2.8. Reçine sürülmüş beton yüzeyine ilk kat FRP kumaş uygulaması



Şekil 2.9. Çok katlı FRP kumaş uygulaması

FRP kumaşlar ile kaplanan beton numuneleri ortalama 7 gün boyunca kürlenmesi için uygun yerde muhafaza edilmiştir. Bu süre sonunda referans numunesi ve FRP kompozit kumaşlarla kaplanmış numuneler Tablo 2.6'daki gibi isimlendirilmiştir.

Tablo 2.6. Deneylerde kullanılan numunelerin isimlendirilmesi

Numune No	Numune Etiketi	Açıklama
[1]	[1]-UW	Referans numunesi UW (Unwrapped/Sargısız)
[2]	[2]-CW-2	2 kat CFRP uygulanmış numune CW (Carbon wrapped/Karbon FRP sarılı)
[3]	[3]-CW-3	3 kat CFRP uygulanmış numune CW (Carbon wrapped/Karbon FRP sarılı)
[4]	[4]-GW-2	2 kat GFRP uygulanmış numune GW (Glass wrapped/Cam FRP sarılı)
[5]	[5]-GW-3	3 kat GFRP uygulanmış numune GW (Glass wrapped/Cam FRP sarılı)

Basınç testi öncesinde FRP kompozit kumaşların sargılama işlemi tamamlanmış ve numunelerin isimlendirilmesi yapılmıştır. Genel olarak referans numunesi, karbon lifli polimer kumaşlarla (CFRP) sarılı numuneler ve cam lifli polimer kumaşlarla (GFRP) sarılı numunelerin görünümü Şekil 2.10, Şekil 2.11, Şekil 2.12 ve Şekil 2.13'te verilmiştir.



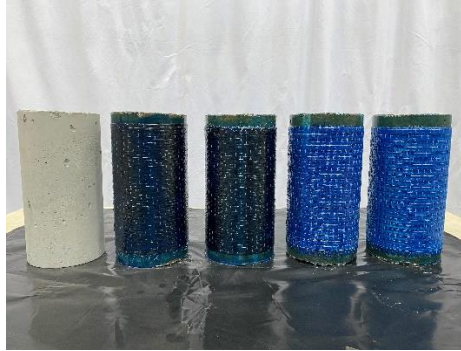
Şekil 2.10. [1]-UW Referans numunesi



Şekil 2.11. [2]-CW-2 ve [3]-CW-3 numuneleri



Şekil 2.12. [4]-GW-2 ve [5]-GW-3 numuneleri



Şekil 2.13. Deneylerde kullanılacak numunelerin genel görünümü

2.2.6. Beton Numunelere Uygulanan Basınç Deneyi

Deney düzeneği içerisinde bir adet basınç makinesi, üç adet kamera, bir adet tripod ve bir adet yatay ve düşey deplasmanları ölçen kompressometre yer almıştır. Deneye ilk olarak referans numunesine ([1]-UW) kompressometre yerleştirilmesiyle başlanmıştır. Numuneye yerleştirilen kompressometre, bir tane yatay deplasmanı ölçen dijital komparatör saati ve bir tane de düşey deplasmanı ölçen dijital komparatör saate sahiptir (Şekil 2.14). Deneyler sonunda ve daha sonraki süreçte yapılacak olan numerik çalışmalarda kullanılacak olan gerilme- şekil değiştirme grafikleri için düşey deplasmanı ölçen komparatör saati dikkate alınacaktır.



Şekil 2.14. Deneylerde kullanılan kompressometre (URL-4, 2023).

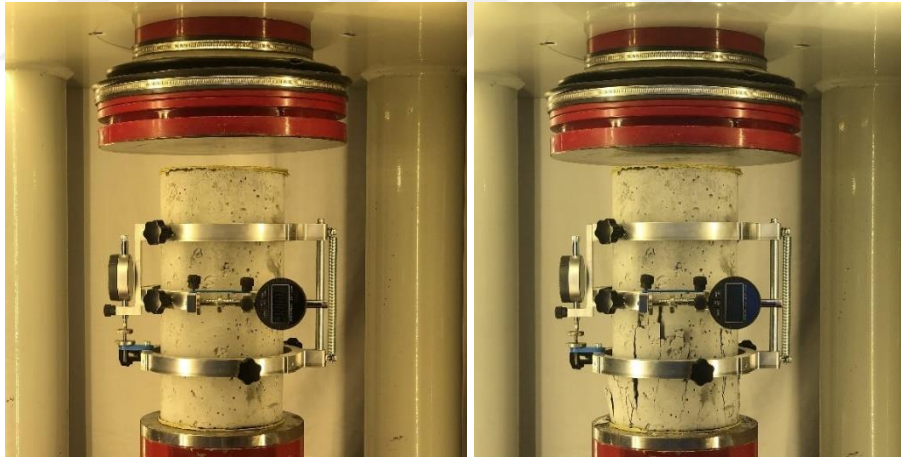
Kompressometre yerleştirilmiş ve dijital komparatör saatler de takılıp ayarlanmıştır. Daha sonra kompressometre takılı referans beton numunesi ([1]-UW), beton basınç makinesinin içerisine yerleştirilmiştir. Beton üzerinde yer alan kompressometredeki yatay ve düşey komparatör saatini görecek şekilde iki tane kamera yerleştirilmiştir.

Üretilen 5 adet silindir beton numunelerine basınç deneyi, laboratuvarında bulunan basınç makinesinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan BESMAK marka basınç makinesi (Şekil 2.15); 150x150x150 mm küp, 200x200x200 mm küp ve 150x300mm silindirik numunelere test yapmak için uygundur. 0,6 MPa/s yükleme hızına ve maksimum 300 ton yükleme kapasitesine sahiptir. İçerisinde var olan yazılım sayesinde bağlı olduğu bilgisayara deneyler esnasında uyguladığı basınç miktarını iletmektedir.



Şekil 2.15. Deneyde kullanılan basınç makinesi

Basınç testine referans numunesi ([1]-UW) ile başlanmıştır. Basınca maruz kalan referans numunesi maksimum 45.41 MPa gerilme değerine ulaşmıştır. Bu değere karşılık gelen düşey yer değiştirme ise 0.405 mm olarak okunmuştur. Basınç testi öncesi ve test sonrası oluşan deformasyon görüntüleri Şekil 2.16’da verilmiştir.

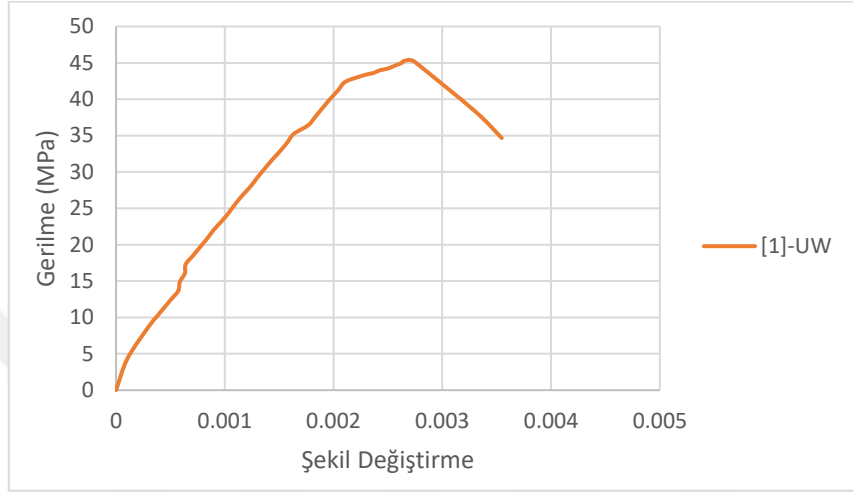


Şekil 2.16. [1]-UW numunesinin basınç testi öncesi ve sonrası görüntüsü

Basınç testi uygulanırken düşey deplasman değişimini kayda alan kamera ile deney düzeneğinin bağlı olduğu bilgisayarda test boyunca uygulanan basınç değişimini kayda alan kameradan aktarılan veriler, daha sonra bir bilgisayar ortamında adım adım okunarak birleştirilmiş olup numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği çizilmiştir (Şekil 2.17). Grafikte yer alan şekil değiştirme değerleri,

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (39)$$

formülüne göre hesaplanmıştır. Burada yer alan L_0 değeri düşey yönde deplasman ölçümünün yapıldığı aralıktır (150 mm).



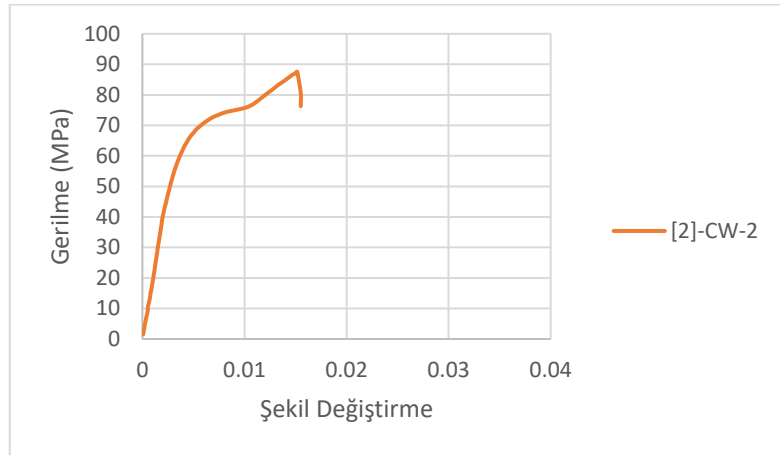
Şekil 2.17. [1]-UW numunesinin deneysel verilerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

Deneye karbon lifli polimer kumaşlarla kaplanmış (CFRP) numuneler ile devam edilmiştir. İki aşama olacak şekilde önce 2 kat CFRP ile kaplanmış olan [2]-CW-2 numunesi düzeneğe yerleştirilmiştir. Daha sonra teste başlanmıştır. Referans numunesinde ([1]-UW) yapılan işlem adımları aynı şekilde tekrar edilmiştir. Basınç testi öncesi ve test sonrası oluşan deformasyonların görüntüleri Şekil 2.18’de gösterilmiştir.



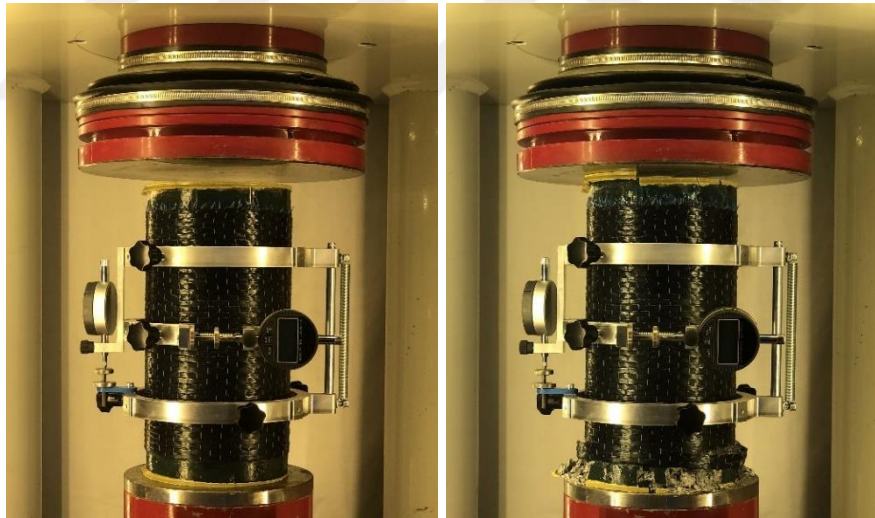
Şekil 2.18. [2]-CW-2 numunesinin basınç testi öncesi ve sonrası görüntüsü

Yapılan test sonucu [2]-CW-2 numunesi maksimum dayanım olarak 87.52 MPa değerine ulaşmıştır ve bu değere karşılık gelen düşey deplasman değeri ise 2.276 mm'dir. Gerçekleştirilen testlere göre 2 kat karbon lifli polimer ile sarılmış [2]-CW-2 numunesinin dayanımı, referans numunesine ([1]-UW) göre oldukça artmıştır. Burada; 2 kat CFRP uygulamasının, betonun basınç dayanımına etkisi oldukça fazla olduğu görülmüştür. Basınç dayanımı referans numunesine göre %92,73 artmıştır. Test sonucunda oluşturulan gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 2.19'da gösterilmiştir.

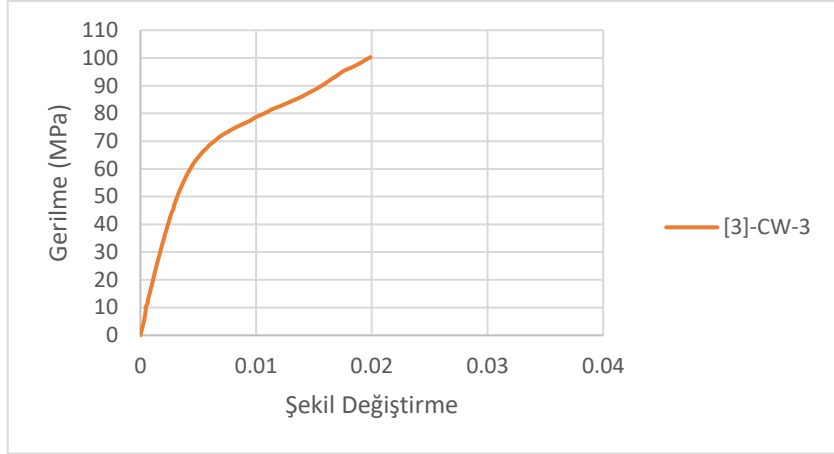


Şekil 2.19. [2]-CW-2 numunesinin deneysel verilerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

Daha sonra 3 kat CFRP ile kaplanmış olan [3]-CW-3 numunesine geçilmiştir. Numune düzeneğe yerleştirilmiştir ve aynı işlem adımlarına devam edilmiştir. [3]-CW-3 numunesi, test sonucunda basınç dayanımına bakıldığında maksimum 100.3 MPa değerine ulaşmıştır. Bu değere karşılık gelen düşey deplasman değeri ise 2.983 mm'dir. Gerçekleştirilen test sonucu 3 kat karbon lifli polimer ile sargılama işleminin basınç dayanımına etkisinin oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Referans numunesine ([1]-UW) göre bir kıyaslama yapıldığında basınç dayanımında %120,88'lik bir artış olduğu gözlemlenmiştir. 2 kat CFRP uygulanmış olan [2]-CW-2 numunesi ile kıyaslandığında ise %14,6'lık bir artış olduğu görülmektedir. Uygulanan testler sonunda, karbon lifli polimer ile güçlendirme işleminin beton numuneler üzerinde basınç dayanımına önemli ölçüde iyi yönde etki ettiği görülmektedir. Sarım sayısına bakılacak olunursa, sarım sayısı arttıkça da basınç dayanımında kayda değer bir artış görülmektedir. Basınç testi öncesi ve test sonrası oluşan deformasyon görüntüleri Şekil 2.20'de ve test verilerinden oluşturulan gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 2.21'de verilmiştir.



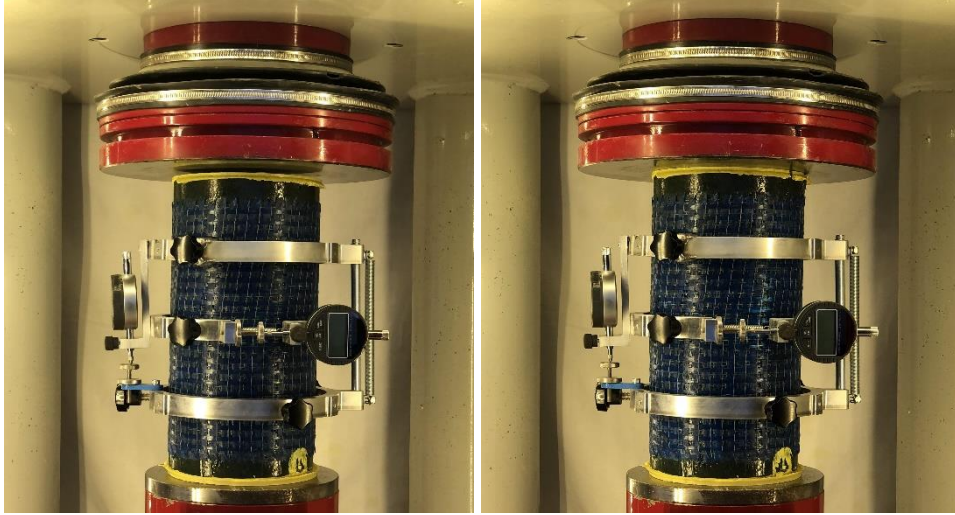
Şekil 2.20. [3]-CW-3 numunesinin basınç testi öncesi ve sonrası görüntüsü



Şekil 2.21. [3]-CW-3 numunesinin deneysel verilerine ait gerilme-şekil değişirme grafiği

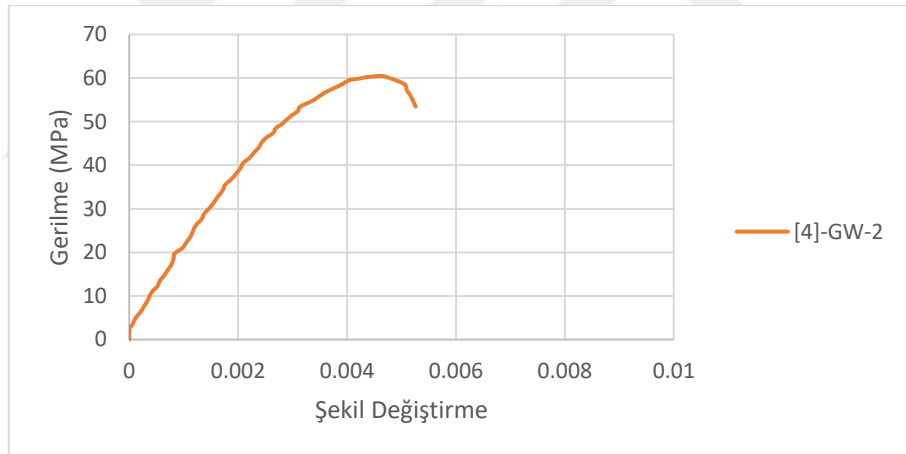
Son olarak tekrar iki aşamadan oluşan basınç testi uygulamasına geçilmiştir. Bu teste basınç uygulanacak numuneler, 2 kat cam lifli polimer ile güçlendirilmiş [4]-GW-2 numunesi ve 3 kat cam lifli polimer ile güçlendirilmiş [5]-GW-3 numunesi şeklinde olacaktır.

İlk olarak [4]-GW-2 numunesi deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Önceki deneylerde yapılan işlem adımları tekrar aynı şekilde gerçekleştirilmiştir ve numuneye basınç uygulanmıştır. Deney sonucunda, [4]-GW-2 numunesinin maksimum basınç dayanımı 60.47 MPa değerini görmüştür. Bu değere karşılık gelen düşey deplasman değeri ise 0.697 mm'dir. 2 kat cam lifli polimer ile sargılama işleminin basınç dayanımına iyi yönde etki ettiği görülmüştür. Referans numunesi ([1]-UW) ile karşılaştırıldığında basınç dayanımı %33,16 artmıştır. Basınç testi öncesi ve test sonrası oluşan deformasyon görüntüleri Şekil 2.22'de gösterilmiştir.



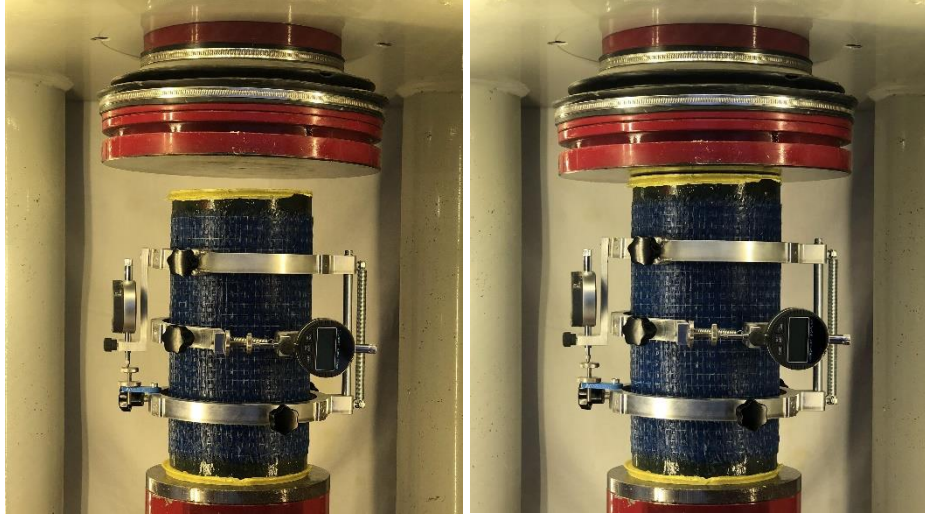
Şekil 2.22. [4]-GW-2 numunesinin basınç testi öncesi ve sonrası görüntüsü

Test verilerinden oluşturulan gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 2.23'te verilmiştir.



Şekil 2.23. [4]-GW-2 numunesinin deneysel verilerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

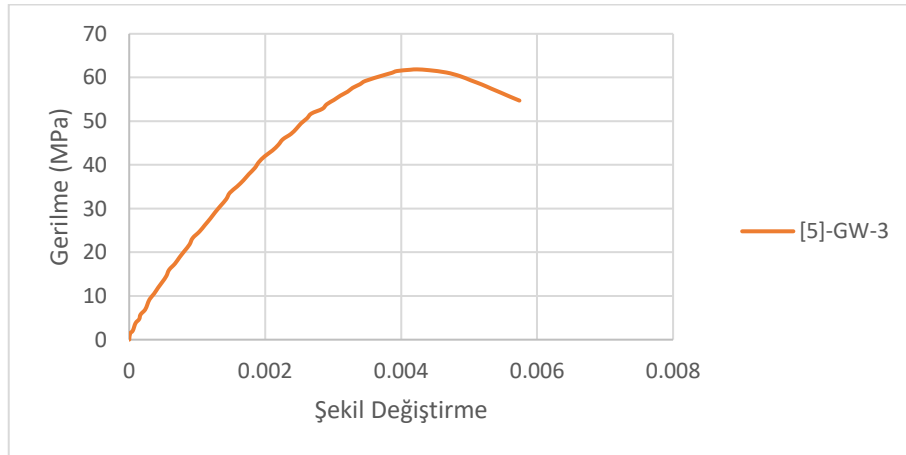
İkinci aşama olarak [5]-GW-3 numunesi deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Aynı işlem adımları tekrarlanmıştır ve basınç testi uygulaması yapılmıştır. Yapılan deney sonucunda, [5]-GW-3 numunesi maksimum basınç dayanımı olarak 61.86 MPa değerine ulaşmıştır. Bu değere karşılık gelen düşey deplasman değeri ise 0.635 mm'dir. Basınç testi öncesi ve test sonrası oluşan deformasyon görüntüleri Şekil 2.24'te gösterilmiştir.



Şekil 2.24. [5]-GW-3 numunesinin basınç testi öncesi ve sonrası görüntüsü

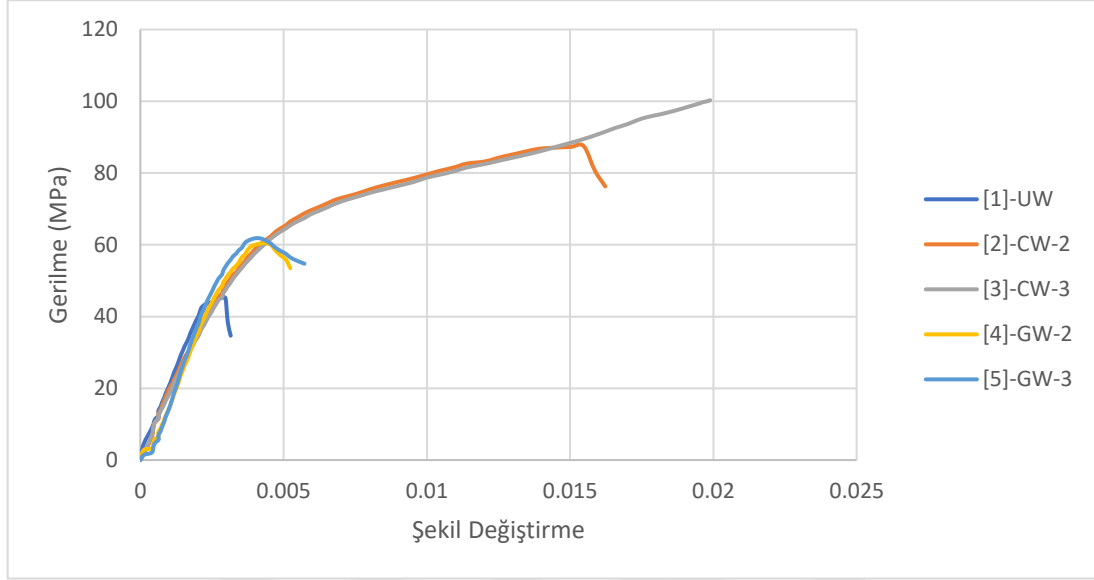
3 kat cam lifli polimer ile güçlendirme işleminin basınç dayanımına iyi yönde etki ettiği görülmüştür. Referans numunesi ([1]-UW) ile karşılaştırıldığında basınç dayanımı %36,22 artmıştır. Aynı karşılaştırma 2 kat cam lifli polimer ile güçlendirilmiş [4]-GW-2 numunesi ile yapıldığında arada bir artış olduğu fakat hemen hemen yaklaşık değerler olduğu görülmüştür. Yapılan kıyaslamada %2,3'lük bir pozitif fark kaydedilmiştir.

Basınç testi sonunda verilerden elde edilen [5]-GW-3 numunesine ait gerilme*şekil değiştirme grafiği Şekil 2.25'te verilmiştir.



Şekil 2.25. [5]-GW-3 numunesinin deneysel verilerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

Yapılan basınç testleri sonunda elde edilen veriler ışığında çizdirilen, tüm numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri tek bir grafikte olmak üzere Şekil 2.26'da gösterilmiştir.



Şekil 2.26. Tüm numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri

Farklı lif türüne ve farklı sarım sayılarıyla güçlendirilen numunelerin, referans numunesine göre basınç dayanımındaki artışlarının yüzdesel ifadeleri Tablo 2.7'de verilmiştir. Buna göre; [2]-CW-2 numunesi %92.73, [3]-CW-3 numunesi %120.88, [4]-GW-2 numunesi %33.16 ve [5]-GW-3 numunesi %36.22 oranında basınç dayanımına pozitif yönde etki etmiştir.

Tablo 2.7. Güçlendirilmiş numunelerin, basınç dayanımına etkisinin yüzdesel ifadesi

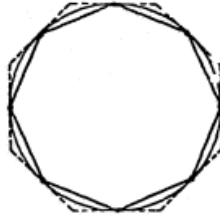
Numune No	Numune isim	Max. Basınç Dayanımı	Fark (%)
1	[1]-UW	45.41	-
2	[2]-CW-2	87.52	92.73
3	[3]-CW-3	100.3	120.88
4	[4]-GW-2	60.47	33.16
5	[5]-GW-3	61.86	36.22

2.3. Analitik Çalışmalar

2.3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, çağımızın kompleks mühendislik problemlerinin detaylı bir şekilde çözülmesinde aktif olarak kullanılan bir sayısal yöntemdir. Sonlu elemanlar yöntemi ve çözüm teknikleri zaman içerisinde gelişim göstermiş ve çok sayıda pratik problemlere çözüm üretmede kullanılan en iyi metotlardan biri haline gelmiştir. Sonlu elemanlar yöntemindeki esas durum, kompleks durumdaki bir problemi basite indirgeyerek çözüm bulmaktır. Bu yöntemde cisim, sonlu boyutta çok sayıda birbirine bağlı şekilde elemanlara ayrılmaktadır. Problemin basit parçalara ayrılarak çözülmesi ile kesin sonuçtan ziyade yaklaşık bir sonuç elde edilmekte, fakat bu indirgeme üzerinde daha fazla yoğunlaşarak iyileştirilmesi ile neredeyse kesin sonuca ulaşmak mümkün olabilmektedir (Arıkan, 2023).

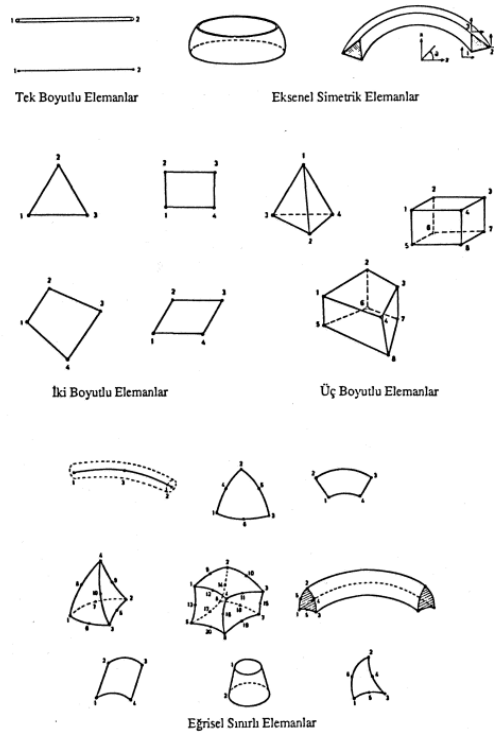
Geçmişte ilk matematik ile uğraşanlar, Şekil 2.27’de gösterildiği gibi daireyi çokgen şekline indirgeyerek var olan problemi basitleştirilmiş bir şekilde hesaplamışlardır. Bu durumda çokgenin her kenarı birbirine bağlı şekilde sonlu eleman niteliği taşımaktadır. Bu basitleştirilmiş çözümün incelenmesi halinde ortaya genel sonlu eleman çözümleri için de geçerli olan iki durum ortaya çıkmaktadır. İlk durum, dairenin iç ve dışında yer alan çokgenlerin çevreleri, dairenin çevresinin üst ve alt sınırlarını oluşturmaktadır. İkinci durum, Çokgenin kenar sayısı artırılması halinde, bu yöntem ile elde edilecek yaklaşık çözüm yukardan veya aşağıdan gerçek çözüme yaklaşacaktır (Arıkan, 2023).



Şekil 2.27. Dairenin çevresinin sonlu elemanlar yöntemi (yaklaşımı) ile bulunması

Sonlu elemanlar yöntemi bir tümevarım prensibine dayanmaktadır. Problemlerin çözümünde yer alan sonlu elemanlara bölme işlemini içeren bazı sonlu eleman modelleri Şekil 2.28’de verilmiştir. Probleme çözüm oluşturacak bölge sonlu sayıda elemanlara

bölünerek oluşturulan her bir sonlu elemanın fiziksel davranışı, diferansiyel denklemlerle ifade edilmektedir. Süreklilik ve denge şartları mevcut komşu elemanlarda sağlanarak çözümü oluşturan bu elemanlar bir araya getirilmektedir. Sınır şartlarının sağlanması ile tekil halde çözüm setleri ortaya çıkarılmaktadır (Fetvacı, 2002).



Şekil 2.28. Sonlu eleman modelleri (Arıkan, 2023).

2.3.2. ABAQUS Sonlu Eleman Analiz Programı

ABAQUS, basit doğrusal analizlerden en zorlu lineer olmayan simülasyonlara kadar uzanan sorunları çözebilen, sonlu elemanlar metoduna dayanan güçlü bir mühendislik simülasyon programları paketidir (Şekil 2.29). ABAQUS programının içinde, hemen hemen her geometriyi modelleyebilen kapsamlı bir eleman kütüphanesi yer almaktadır. Metal, kauçuk, polimer, kompozit malzeme, beton, betonarme, ezilebilir/esnek köpükler ve toprak ve kaya gibi jeoteknik malzemeler dahil olmak üzere en tipik mühendislik malzemelerinin davranışını simüle edebilen eşit derecede geniş bir malzeme modelleri listesine sahiptir. Genel amaçlı bir simülasyon aracı olarak tasarlanan ABAQUS, yapısal (gerilme-deplasman) problemlerinden daha fazlasını incelemek için kullanılabilir. Isı transferi, kütle difüzyonu,

elektrikli bileşenlerin termal yönetimi (birleşik termal-elektrik analizleri), akustik, zemin mekaniği (birleşik gözenek sıvısı-gerilme analizleri) ve piezoelektrik analiz gibi çok çeşitli alanlardaki sorunları simüle edebilmektedir (URL-5, 2023).

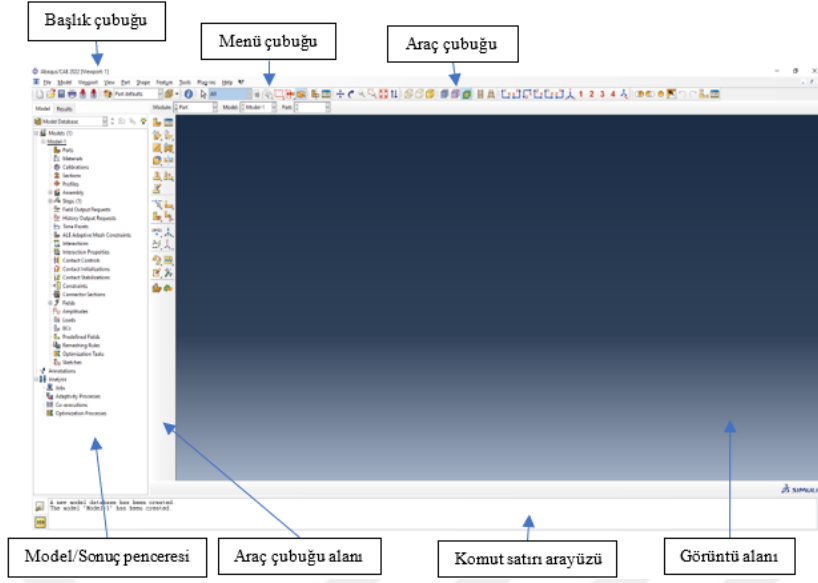


Şekil 2.29. ABAQUS/CAE 2022 paket programı

ABAQUS sonlu eleman analiz programı farklı mühendislik çalışmaları için farklı eklentilere sahiptir. Bu eklentiler aşağıda sıralanmıştır (URL-6, 2023).

- Abaqus/Standard, genel amaçlı bir sonlu eleman programı
- Abaqus/Explicit, açık bir dinamik sonlu eleman programı
- Abaqus/CFD, genel amaçlı bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı
- Abaqus/CAE, sonlu eleman modelleri oluşturmak, yapılan çalışmaları izlemek ve teşhis etmek, Abaqus analizlerini göndermek ve sonuçları değerlendirmek için kullanılan etkileşimli bir ortamdır.
- Abaqus/Viewer, Abaqus/CAE'nin yalnızca görselleştirme modülünün son işleme yeteneklerini içeren bir alt kümesidir.

Bu tez çalışması kapsamında ABAQUS/CAE 2022 paket programı kullanılmıştır. Programa ait arayüz görüntüsü Şekil 2.30'da gösterilmiş olup altına açıklamaları verilmiştir (URL-7, 2023).



Şekil 2.30. ABAQUS/CAE 2022 programı arayüzü

- Başlık çubuğu: Çalıştırmakta olduğunuz ABAQUS/CAE sürümünü ve geçerli model veri tabanının adını gösterir.
- Menü çubuğu: Menü çubuğu mevcut tüm menüleri içerir; menüler, ürünlerdeki tüm işlemlere erişim sağlar. İçinde; Dosya, Model, Görüntü alanı, Görünüm, Eklenti ve Yardım sekmeleri bulunur.
- Araç çubuğu: Menülerde de bulunan öğelere hızlı erişim sağlar.
- Model penceresi: Modelinizin yanı sıra parça, malzeme, aşama, yük ve çıktı gibi istekleri içeren nesnelerin grafiksel bir görünümünü sağlar.
- Sonuç penceresi: Çıktı veri tabanlarının ve X-Y grafikleri gibi çalışmaya özgü diğer verilerin grafiksel bir görünümünü sağlar. Çalışmanızda birden fazla açık çıktı veri tabanı mevcut ise, çıktı veri tabanları arasında geçiş yapmak için Sonuç penceresi'ni kullanabilirsiniz. Sonuç penceresi'ne alıştığınız takdirde, ana menü ve araç çubuğunda bulunan görselleştirme modülündeki eylemlerin birçoğunu hızlı bir şekilde gerçekleştirebilirsiniz.
- Araç çubuğu alanı: Bir modüle girdiğinizde araç çubuğu alanı, o modüle uygun araçları görüntüler. Araç çubuğu alanı, menü çubuğundan da kullanılabilen birçok modül işlemine hızlı erişim sağlamaktadır.
- Komut satırı arayüzü: Python komutları yazmak ve ABAQUS/CAE'de yerleşik Python yorumlayıcısını kullanarak matematiksel ifadeleri değerlendirmek için komut arayüzü kullanılabilir. Arayüz, Python sözdizimine uymak için komutları ne zaman

girintilemeniz gerektiğini belirtmek için birincil (>>>) ve ikincil (...) bilgi istemleri içerir.

- Görüntü alanı: ABAQUS/CAE programının modelinizi görüntülediği yerdir.

2.3.3. ABAQUS İçerisinde Sonlu Eleman Analiz Aşamaları

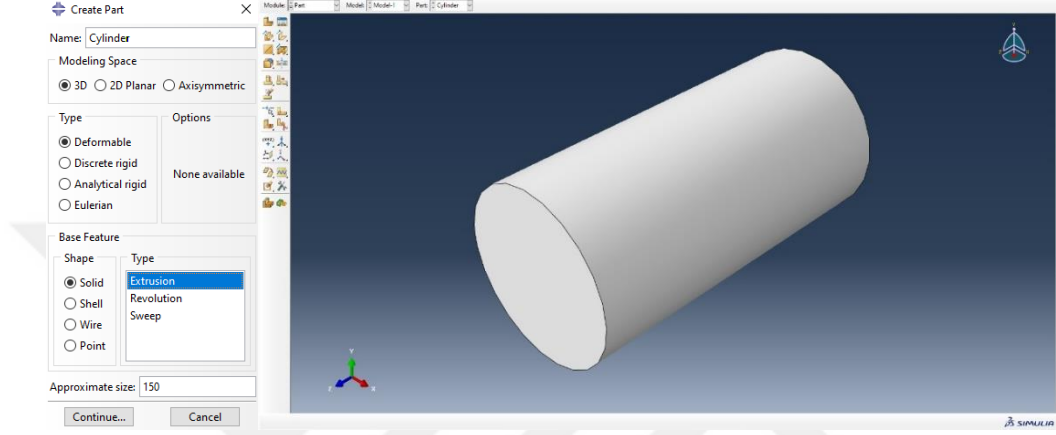
ABAQUS paket programı içerisinde gerçekleştirilecek olan sonlu eleman analizi için izlenecek yol haritası üç başlık altında özetlenebilmektedir. İlk bölüm, Ön İşleme: Bu bölümde, kullanıcı tarafından oluşturulan model, farklı düğüm noktalarında bağlanan bir dizi ayırık alt bölgelere veya elemanlara bölünür (ağlara ayırma işlemi). Yer değiştirme veya yükteki bazı düğüm noktalarına belirli sınır koşulları uygulanır. Ön işleme adımından sonra, sonlu elemanlar modeli çözüme sunulmaya hazır hale gelmektedir. İkinci bölüm, Çözüm/Analiz: Bu bölümde, sonlu eleman modeli sonlu eleman kodunda girdi olarak çözücüye sunulur. Düğüm noktaları üzerinde yer değiştirme, gerilme ve diğerlerinin çıktısını oluşturmak için bir dizi lineer veya lineer olmayan denklem çözülmektedir. Üçüncü bölüm, Son İşlem: Bu bölümde, kullanıcıların sonuçları daha iyi anlamalarına yardımcı olan renkli konturlarda veya diğer yaklaşımlarda çözümleri görüntülemeleri için kullanıcılara bir görselleştirme ortamı sağlar (URL-8, 2023).

2.3.4. Beton Numunelerin Sonlu Eleman Analizleri

Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında, sonlu eleman analizlerini gerçekleştirmek için ABAQUS programı kullanılmıştır. Analiz çalışmalarına modellerin geometrileri oluşturularak başlanmıştır. Geometrisi oluşturulan modellere malzeme modelleri atanmıştır. Sınır şartları ve mesnet şartları tanımlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında modellere uygun ağ işlemi (mesh) uygulanmıştır. Genel hatlarıyla işlem adımları bu şekilde gerçekleşmiş olup ara işlemler de ilerleyen bölümlerde yer almıştır. Basınç analizi gerçekleştirilirken modellere üst yüzeyden simetrik olarak deplasman verilmiştir. Analizler; referans numunesi ([1]-UW) ile başlayıp, 2 kat ve 3 kat karbon lifli polimer ile güçlendirilen ([2]-CW-2 ve [3]-CW-3) numuneler ile devam ederek, 2 kat ve 3 kat cam lifli polimer ile güçlendirilen ([4]-GW-2 ve [5]-GW-3) numuneler ile son bulmuştur.

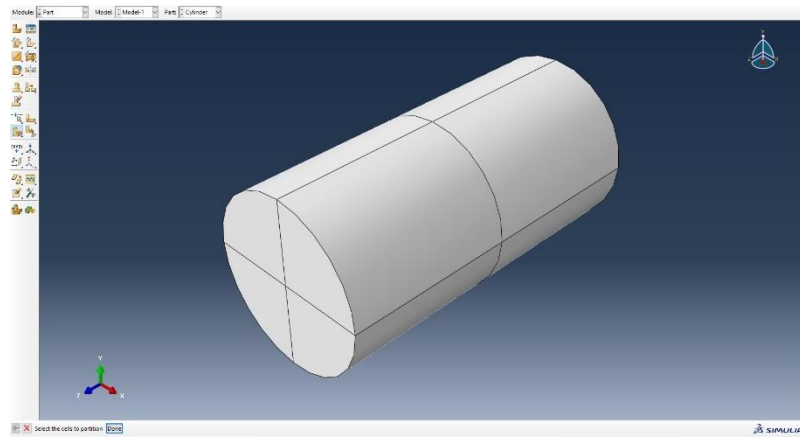
2.3.4.1. Referans Numunesinin ([1]-UW) Sonlu Eleman Analizi

Sonlu eleman analiz çalışmasına öncelikle model geometrisinin oluşturulması ile başlanmıştır. Part modülü içerisinde yer alan Creat Part bölümünden modele 150x300 mm boyutları girilerek silindir model görünümü elde edilmiştir (Şekil 2.31).



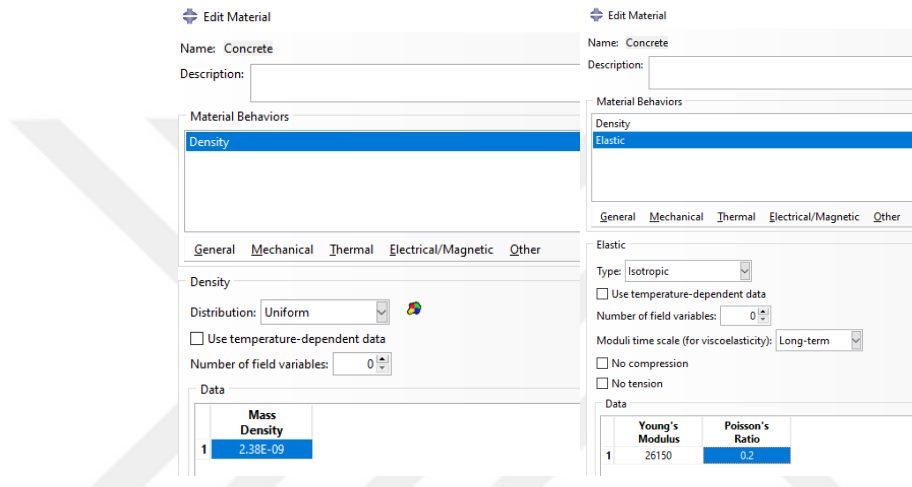
Şekil 2.31. Model geometrisinin oluşturulması

Model geometrisinin oluşturulmasının ardından modeli eş parçalara bölme işlemi uygulanmıştır. Bu işlemin uygulanma sebebi ise daha sonra yapılacak mesh (ağ yapısı oluşturma) işleminin daha iyi görünüm ve sonuç vermesi içindir. İşlem adımı Part modülü içerisinde yer alan Partition Cell bölümünden yapılmıştır (Şekil 2.32).



Şekil 2.32. Modeli eş hücrelere ayırma

Modelin geometrik aşamalarından sonra modele ait beton malzeme özelliklerinin girilmesi gerekmektedir. Bunun için Property > Material Manager > Creat butonlarına tıklanarak malzeme özelliklerinin girilmesi için ilgili bölüm açılır. Deneylerde kullanılan betona ait kütle yoğunluğu 2384 kg/m^3 olup birim değişimi yapılarak $2.38 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$ şeklinde General > Density sekmeleri altında girilmiştir. Betona ait elastisite modülü 26150 MPa ve poisson oranı 0.2 şeklinde Mechanical > Elastic sekmelerinde girilmiştir (Şekil 2.33).



Şekil 2.33. Modele ait kütle yoğunluğu, elastisite modülü ve poisson oranının girilmesi

Basınç analizi gerçekleştirilirken, betonun plastik davranışını tanımlamak gerekmektedir. Betonun plastik davranışını temsil eden özelliklerin girilmesi için gerekli literatür araştırmasının sonunda Mechanical > Plasticity > Concrete Damaged Plasticity işlem adımları izlenerek Plasticity parametreleri; Dilation Angle değeri 40, Eccentricity değeri 0.1, f_{b0}/f_{c0} değeri 1.16, K parametresi 0.66667 ve Viscosity Parameter değeri ise 0 olacak şekilde girilmiştir (Şekil 2.34).

Material Behaviors

Density

Elastic

Concrete Damaged Plasticity

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Concrete Damaged Plasticity

Plasticity Compressive Behavior Tensile Behavior

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

	Dilation Angle	Eccentricity	fb0/fc0	K	Viscosity Parameter
1	40	0.1	1.16	0.66667	0

Şekil 2.34. Modele ait Plasticity parametrelerinin girilmesi

Basınç analizlerinde programa, basınç gerilme-şekil değiştirme grafiği ve çekme gerilme-şekil değiştirme grafiğinin girilmesi gerekmektedir. Bunun için Mechanical > Plasticity > Concrete Damaged Plasticity sekmeleri altında bulunan; basınç gerilme-şekil değiştirme grafiğinin tanımlanması için Compressive Behavior bölümü, çekme gerilme-şekil değiştirme grafiğinin tanımlanması için Tensile Behavior bölümü kullanılmıştır. Compressive Behavior bölümü altında bulunan Yield Stress sekmesi içerisine girilmesi gereken gerilme değerleri için, tez kapsamında yürütülen basınç deneylerinden elde edilen gerilme değerleri kullanılmıştır. Aynı sekme içinde bulunan Inelastic Strain için ise aşağıda bulunan denklemler yardımıyla her bir gerilme değerine karşılık gelen inelastik şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır ve programa girilen değerler Şekil 2.35’te gösterilmiştir.

$$\varepsilon_{0c}^{el} = \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (40)$$

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (41)$$

	Yield Stress	Inelastic Strain
1	18.48	0
2	20.88	4.15208E-05
3	25.67	0.000118345
4	30.45	0.000202218
5	35.23	0.000286091
6	40	0.000437013
7	44.22	0.000808968
8	45.04	0.000910943
9	45.41	0.000963461
10	45.13	0.001020835
11	38.36	0.001833062
12	34.67	0.002220839

Şekil 2.35. Gerilme-inelastik şekil değiştirme değerlerinin girilmesi

Aynı bölüm içerisinde yer alan Suboptions > Compression Damage bölümü içerisinde yer alan Damage Parameter sekmesine girilmesi gereken hasar parametresi (d_c) için aşağıdaki denklem kullanılmıştır. Bu denklem yardımıyla hasar parametreleri her bir inelastik değerine karşılık gelecek şekilde hesaplanıp programa girilmiştir (Şekil 2.36).

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}} \quad (42)$$

	Damage Parameter	Inelastic Strain
1	0	0
2	0	4.15208E-05
3	0	0.000118345
4	0	0.000202218
5	0	0.000286091
6	0	0.000437013
7	0	0.000808968
8	0	0.000910943
9	0	0.000963461
10	0.006166043	0.001020835
11	0.155252147	0.001833062
12	0.236511782	0.002220839

Şekil 2.36. Hasar parametreleri ve inelastik şekil değiştirme değerlerini girilmesi

ABAQUS sonlu eleman analiz programında basınç analizinin gerçekleştirilebilmesi için basınç değerlerinin yanı sıra çekme davranışına (Tensile Behavior) ait değerlerin de girilmesi gerekmektedir. Çekmeye ait değerlerin çok bir öneme sahip olmamasından ötürü araştırmalardan elde edilen değerler, deneylerde kullanılan beton numunesini temsil edecek şekilde kullanılmıştır (URL-9, 2023). Girilen değerler Şekil 2.37’de gösterilmiştir.

The image shows the 'Concrete Damaged Plasticity' dialog box in ABAQUS, specifically the 'Tensile Behavior' tab. The 'Type' is set to 'Strain'. The 'Number of field variables' is 0. The 'Data' table contains 11 rows of values for 'Yield Stress' and 'Cracking Strain'. To the right, the 'Suboption Editor' is open, showing 'Concrete Tension Damage' with 'Type' set to 'Strain' and 'Compression recovery' set to 1. The 'Data' table in the suboption editor contains 14 rows of values for 'Damage Parameter' and 'Cracking Strain'.

	Yield Stress	Cracking Strain
1	4.5	0
2	3.18679325588975	0.000450092797216225
3	2.29876731156621	0.00090018559443245
4	1.71786832218396	0.00135027839164868
5	1.34375712340182	0.0018003711888649
6	1.10070387339027	0.00225046398608113
7	0.936023588873538	0.00270055678329735
8	0.815502445406812	0.00315064958051358
9	0.718410586359516	0.0036007423777298
10	0.633181154658334	0.00405083517494603
11	0.554073239622003	0.00450092797216225

	Damage Parameter	Cracking Strain
1	0	0
2	0.291823720913388	0.000450092797216225
3	0.489162819651954	0.00090018559443245
4	0.61825148395912	0.00135027839164868
5	0.701387305910708	0.0018003711888649
6	0.755399139246606	0.00225046398608113
7	0.791994758028103	0.00270055678329735
8	0.818777234354042	0.00315064958051358
9	0.840353203031219	0.0036007423777298
10	0.859293076742593	0.00405083517494603
11	0.876872613417333	0.00450092797216225
12	0.893602970092661	0.00495102076937848
13	0.909586103804384	0.0054011135665947
14	0.924738517162525	0.00585120636381093

Şekil 2.37. Çekme davranışına ait değerlerin girilmesi

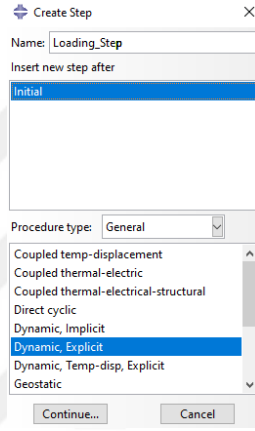
Girilen malzeme özelliklerinden sonra bu özelliklerin modele atanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için Property modülü içinde yer alan Assign Section sekmesi kullanılmıştır. Daha sonra Assembly modülü içerisinde yer alan Create Instance bölümü Şekil 2.38’deki gibi düzenlenmiştir.

The image shows the 'Create Instance' dialog box in ABAQUS. The 'Create instances from:' section has 'Parts' selected. The 'Parts' list contains 'Cylinder'. The 'Instance Type' section has 'Dependent (mesh on part)' selected. The 'Note' states: 'To change a Dependent instance's mesh, you must edit its part's mesh.' The 'Auto-offset from other instances' checkbox is unchecked. The 'OK' button is highlighted.

Şekil 2.38. Create Instance bölümünün girilmesi

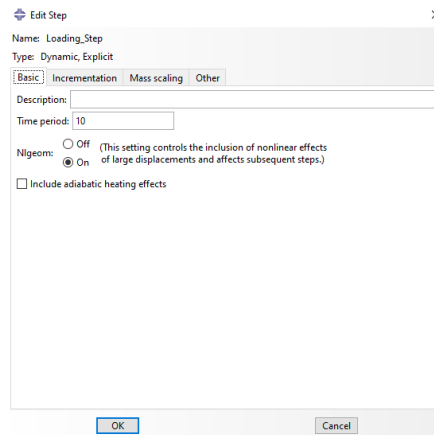
Analiz adımını tanımlamak için Step modülü içerisinde yer alan Create Step sekmesi kullanılır. Açılır pencerede analiz tipi olarak Dynamic, Explicit seçilir (Şekil 2.39). Dyanmic, Explicit; mevcut problem içerisinde doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik problemleri simüle etmek için geliştirilmiştir. Aşağıdaki bazı koşullarda Dynamic, Explicit önerilmektedir (URL-10, 2023):

- Büyük dinamik problemler
- Genel/karmaşık temas koşullarına ihtiyaç duyulduğunda
- Büyük deformasyonlar ve dönmeler meydana geldiğinde



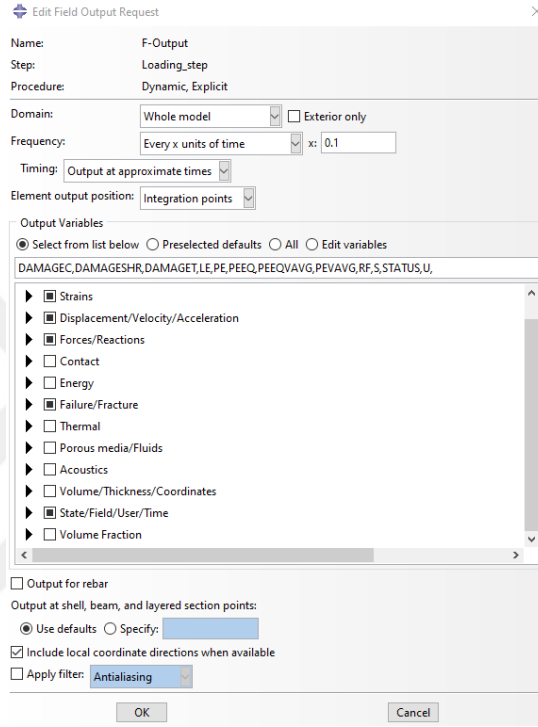
Şekil 2.39. Step bölümünün girilmesi

Dynamic, Explicit seçiminin ardından açılır pencerede zaman periyodu bölümü yer almaktadır ve bu değer 10 olarak seçilmiştir (Şekil 2.40). Bu değer gerçekleştirilecek olan analizin zaman aralığını temsil etmektedir.



Şekil 2.40. Analiz için zaman periyot seçimi

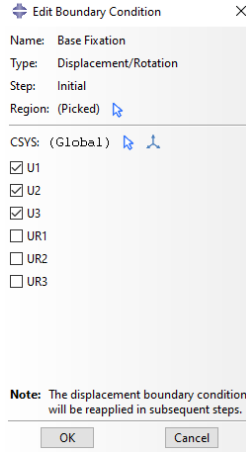
Gerçekleştirilen işlem adımlarından sonra analiz sonrası programdan istenen çıktılar düzenlenmiştir. Bunun için, Model/Sonuç Penceresi > Field Output Request > F-Output işlem adımları izlenir. Açılır pencerede frekans aralığı her 0.1 zaman aralığı okuma yapması için ayarlanmıştır ve analiz sonrası oluşturulacak çıktılar için Şekil 2.41'deki seçimler yapılmıştır.



Şekil 2.41. Program çıktılarının düzenlenmesi

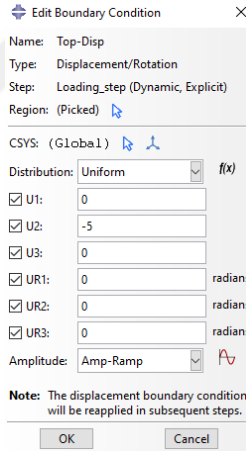
Modelin üst ve alt yüzeylerini rijit bir hale getirmek için Interaction modülü içerisinde yer alan Creat Constraint bölümü kullanılmıştır.

Modele uygulanacak olan sınır şartları ve modele uygulanacak basıncın üst yüzeyden deplasman şeklinde verilmesi için Load modülüne geçilmiştir. İlk önce modelin alt yüzeyi için sınır şartı tanımlaması yapılmıştır. Bunun için Load > Creat Boundary Condition işlem adımları izlenmiştir ve açılan pencerede Displacement/Rotation sekmesi seçilmiştir. Sonrasında açılan pencerede sınır şartları Şekil 2.42'deki gibi girilmiştir.



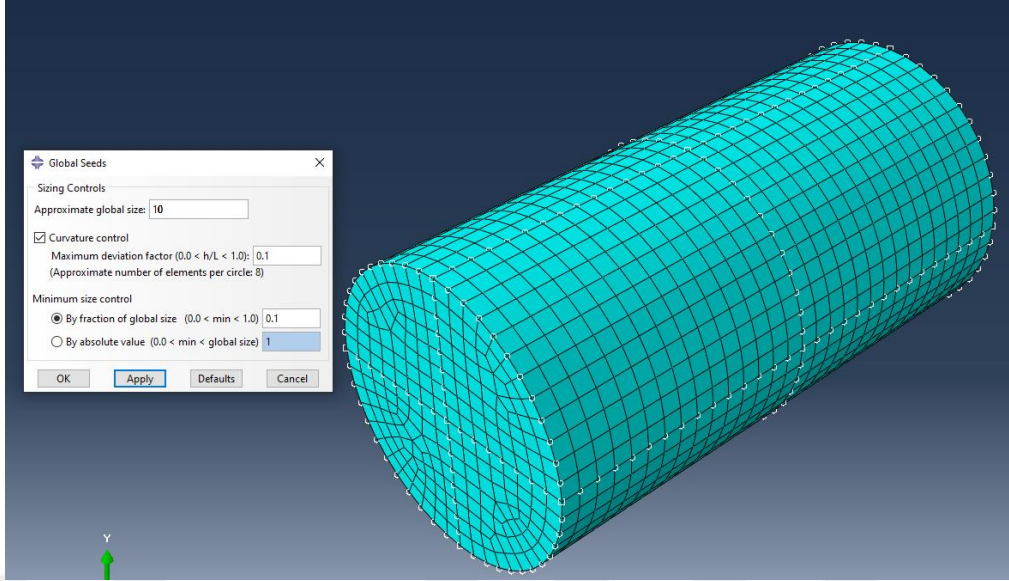
Şekil 2.42. Model alt yüzeyi için girilen sınır şartları

Aynı işlem adımları izlenerek; bu sefer model üst yüzeyi için, sınır şartları ve uygulanacak olan basınç, simetrik bir şekilde düşey yönde deplasman şeklinde girilmiştir (Şekil 2.43).



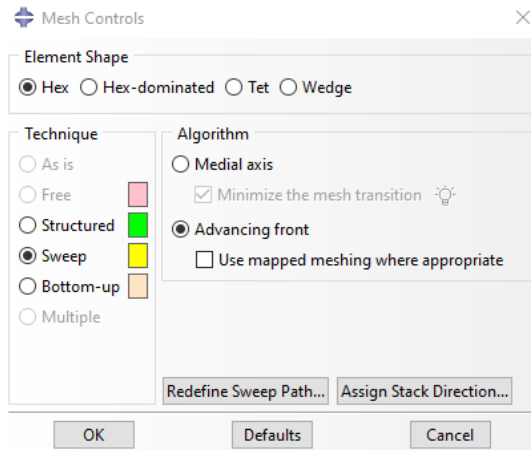
Şekil 2.43. Model üst yüzeyi için girilen sınır şartları ve deplasman değeri

Sınır şartları ve yükleme adımlarından sonra modele uygulanacak ağ işlemine (mesh) geçilmiştir. Bunun için Mesh modülü içerisinde yer alan Seed Part Instance sekmesi kullanılarak model için uygun ağ (mesh) aralığı değeri 10 olarak girilmiştir (Şekil 2.44).



Şekil 2.44. Modele uygulanan ağ (mesh) aralığının tanımlanması

Ağ (mesh) işleminin tamamlanması için gerekli bazı işlemler yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda Mesh > Assign Element Type adımları izlenerek açılır pencerede Element Library kısmı Explicit ve Element Control bölümü içerisinde yer alan Element Deletion kısmı Yes olarak seçilmiştir. Daha sonra tekrar Mesh modülü içerisinde yer alan Assign Mesh Control kısmı Şekil 2.45'teki gibi düzenlenmiştir.

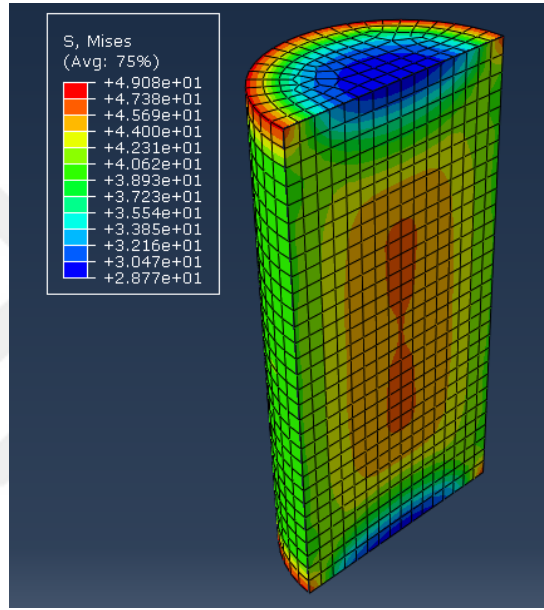


Şekil 2.45. Mesh Controls kısmının girilmesi

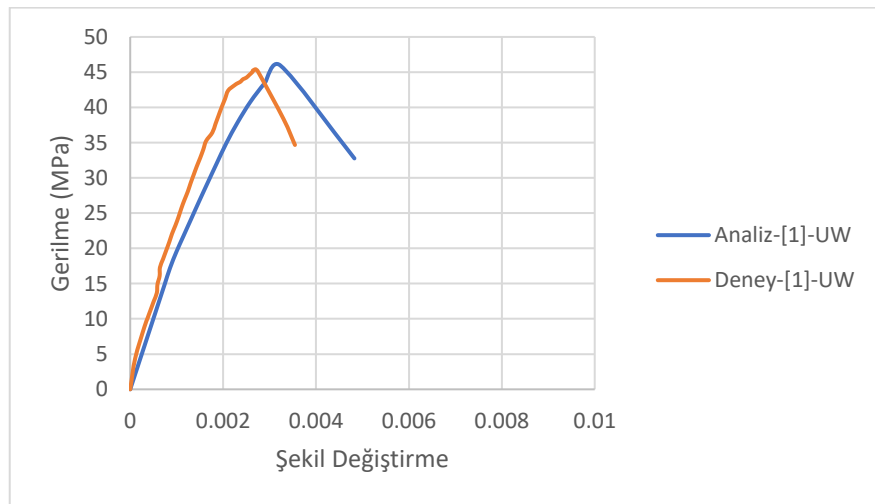
Analizi gerçekleştirmeden önceki son aşama Job kısmının düzenlenmesidir. Oluşturulan modelin iş tanımının yapıldığı bölümdür. Bu bağlamda Job > Job Manager > Create işlem adımları izlenerek tanımlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Yapılan tüm tanımlamalar ve gerçekleştirilen işlem adımlarından sonra model, analize hazır hale gelmiştir. Analizi başlatmak için Job > Job Manager adımları izlenerek daha önce tanımlanan iş bölümü seçilerek Submit butonu ile analiz gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen referans numunesinin ([1]-UW), ABAQUS sonlu eleman analiz programındaki basınç analizi sonrasında, elde edilen maksimum basınç dayanımındaki gerilme dağılımı Şekil 2.46'da ve analiz sonunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafiği, deneysel veriyle beraber karşılaştırılmalı olarak Şekil 2.47'de verilmiştir.



Şekil 2.46. [1]-UW numunesinin maksimum dayanımındaki gerilme dağılımı



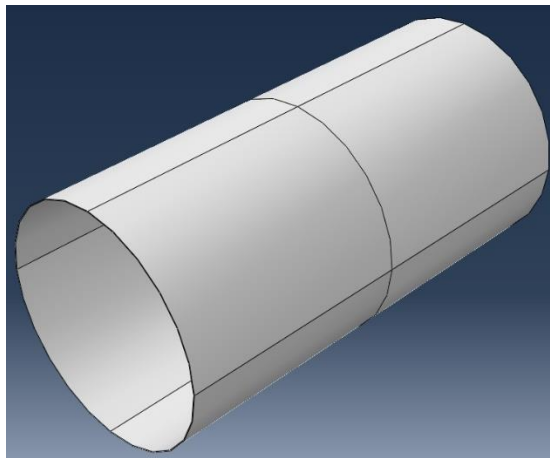
Şekil 2.47. Analiz sonunda gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması

Analiz sonucunda elde edilen maksimum basınç dayanımı 45.94 MPa'dır. Deneysel çalışmalardan elde edilen maksimum basınç dayanımı ise 45.41 MPa'dır. Bu bağlamda iki çalışma karşılaştırıldığında aradaki fark %1.17'dir. Buradan da anlaşılabacağı üzere deneysel çalışma analitik çalışma ile hemen hemen aynı sonuçtadır. Oluşturulan sonlu eleman modeli deneysel çalışmayı destekleyici niteliktedir.

2.3.4.2. Karbon Lifli Polimer Kumaşlarla Güçlendirilmiş Beton Numunelerin ([2]-CW-2 ve [3]-CW-3) Sonlu Eleman Analizleri

Karbon lifli polimer kumaşlarla güçlendirme uygulanan iki numune bulunmaktadır. Bunlar; 2 kat ve 3 kat sarım sayısına sahiptir. Bu bağlamda, gerçekleştirilecek analizler iki bölümden oluşmaktadır. Yapılan analizlerde beton numunenin model geometrisi değişiklik göstermediği için referans numunesi analizinde izlenen adımlar tekrarlanmıştır. İlk bölümde, 2 kat güçlendirme uygulanmış numunenin ([2]-CW-2) analizi gerçekleştirilecektir. İkinci bölümde ise 3 kat güçlendirme uygulanmış numunenin ([3]-CW-3) analizi gerçekleştirilecektir.

Sonlu eleman analiz çalışmasına [2]-CW-2 ve [3]-CW-3 numunelerine ait ortak CFRP model geometrisini oluşturarak başlanmıştır. Beton numunenin geometrisi oluşturulduktan sonra karbon lifli polimer kumaşın geometrisi (CFRP) oluşturulmuş ve daha önce yapılan çalışmalarda da anlatıldığı gibi betona uygulanan modeli eş parçalara bölme işlemi aynı şekilde CFRP model için de uygulanmıştır. (Şekil 2.48).



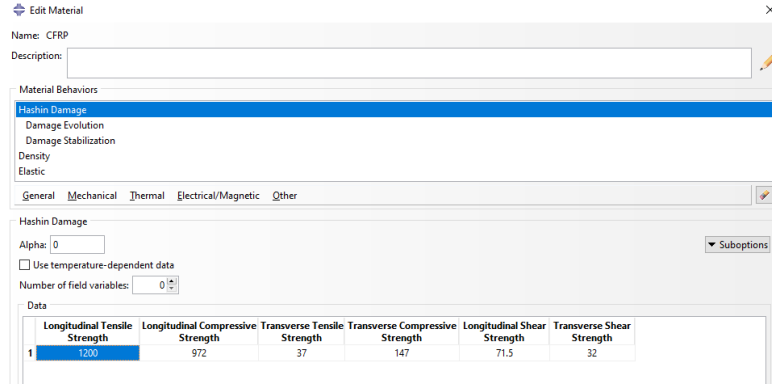
Şekil 2.48. Oluşturulan CFRP modelin eş parçalara bölünmüş hali

[2]-CW-2 ve [3]-CW-3 ortak modelin geometrisi oluşturulduktan sonra modele ait beton ve CFRP kompozit malzemenin değerleri girilmiştir. Beton malzeme özellikleri referans numunesi ile aynı olacak şekilde tanımlamaları yapılmıştır. CFRP kompozit malzeme özelliğini tanımlamak için Property > Material Manager > Creat işlem adımları takip edilerek malzeme özelliklerinin girileceği bölüm açılmıştır. CFRP kompozit malzeme özellikleri yapılan literatür araştırmalarından elde edilmiştir (URL-11, 2023). Bu doğrultuda iki numune için ortak olan CFRP'ye ait kütle yoğunluğu ve üç yönlü elastik davranışını temsil eden değerler Şekil 2.49'daki gibi girilmiştir.

	E1	E2	E3	Nu12	Nu13	Nu23	G12	G13	G23
1	105500	10000	10000	0.32	0.32	0.44	3300	3300	3600

Şekil 2.49. CFRP malzemenin kütle yoğunluğu ve elastik değerleri

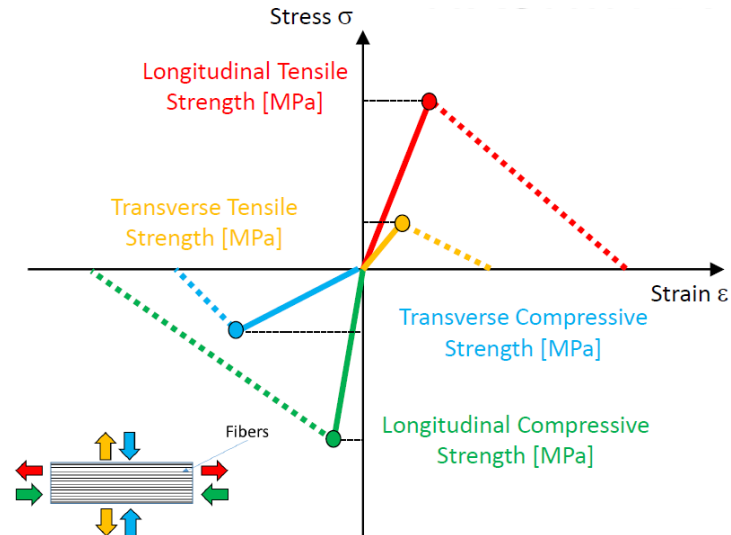
Girilen elastik değerlerden sonra CFRP kompozit malzeme için göçme kriterleri değerleri girilmesi gerekmektedir. ABAQUS paket programı bu durum içine kendi içerisinde Hashin'nin teorisini kullanmaktadır (Hashin, 1980). Property > Material Manager > Creat > Mechanical > Damage for Fiber-Reinforced Composites > Hashin Damage adımları izlenerek açılan pencerede ilgili değerler literatür incelemelerinin ardından Şekil 2.50'deki gibi girilmiştir (Wagner, 2021).



Şekil 2.50. Hashin Damage değerlerinin girilmesi

Burada yer alan değerler:

- Longitudinal Tensile Strength (MPa): Lif yönü doğrultusundaki (boyuna) çekme dayanımı
 - Longitudinal Compressive Strength (MPa): Lif yönü doğrultusundaki (boyuna) basınç dayanımı
 - Transverse Tensile Strength (MPa): Enine çekme dayanımı
 - Transverse Compressive Strength (MPa): Enine basınç dayanımı
- şeklinde tanımlanmaktadır ve aşağıdaki Şekil 2.51’de yer alan grafikte temsili gösterimi yapılmıştır.



Şekil 2.51. Hashin Damage parametrelerinin grafiksel gösterimi (Wagner, 2021).

CFRP'ye ait plastik davranışın tamamlanması için Hashin Damage bölümü içerisinde yer alan Damage Evolution ve Damage Stabilization değerlerinin de literatür araştırmaları sonucunda programa girilmesi Şekil 2.52'deki gibi gerçekleştirilmiştir (URL-11, 2023).

The image shows two screenshots of the 'Suboption Editor' dialog box. The top screenshot is for 'Damage Evolution' and the bottom is for 'Damage Stabilization'.

Damage Evolution Dialog:

- Type: Energy
- Softening: Linear
- ☐ Use temperature-dependent data
- Number of field variables: 0
- Data table:

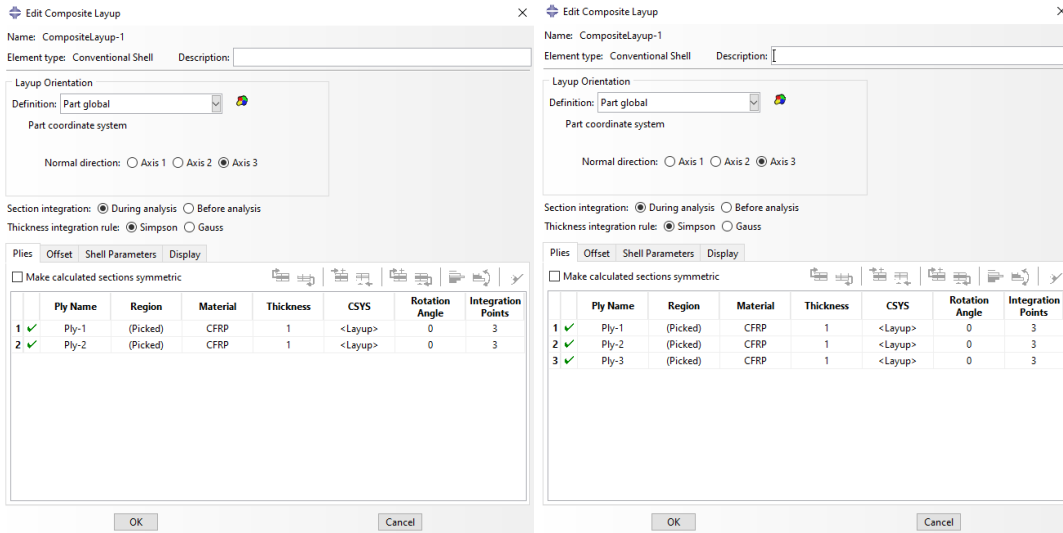
	Longitudinal Tensile Fracture Energy	Longitudinal Compressive Fracture Energy	Transverse Tensile Fracture Energy	Transverse Compressive Fracture Energy
1	40	60	4	8

Damage Stabilization Dialog:

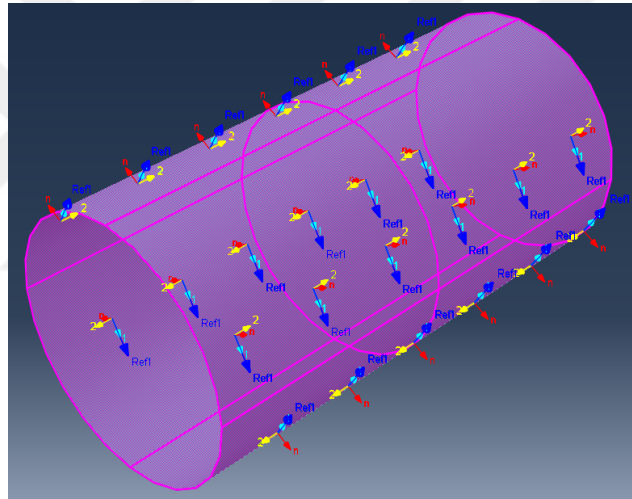
- Viscosity coefficient in the longitudinal tensile direction: 0.0001
- Viscosity coefficient in the longitudinal compressive direction: 0.0001
- Viscosity coefficient in the transverse tensile direction: 0.0001
- Viscosity coefficient in the transverse compressive direction: 0.0001

Şekil 2.52. Damage Evolution ve Damage Stabilization parametrelerinin girilmesi

CFRP'ye ait malzeme özelliklerinin girilmesinden sonra atama işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numuneye uygulanacak olan CFRP kompozit malzemenin katman sayısı, kalınlık ve dönme açısı gibi parametrelerinin programa tanımlanması yapılmıştır. Bunun için Property modülü içerisinde yer alan Create Composite Layup sekmesinden [2]-CW-2 numunesinin analizi için 2 katman ve [3]-CW-3 numunesinin analizi için 3 katman seçimi yapılmıştır. Burada CFRP katman kalınlıkları 1 mm olarak ve lif yönü sıfır olacak şekilde tanımlama yapılmıştır. Oluşturulan CFRP katman parametrelerine ait görüntüler Şekil 2.53'te ve tanımlama işleminden sonraki görüntü Şekil 2.54'te verilmiştir.

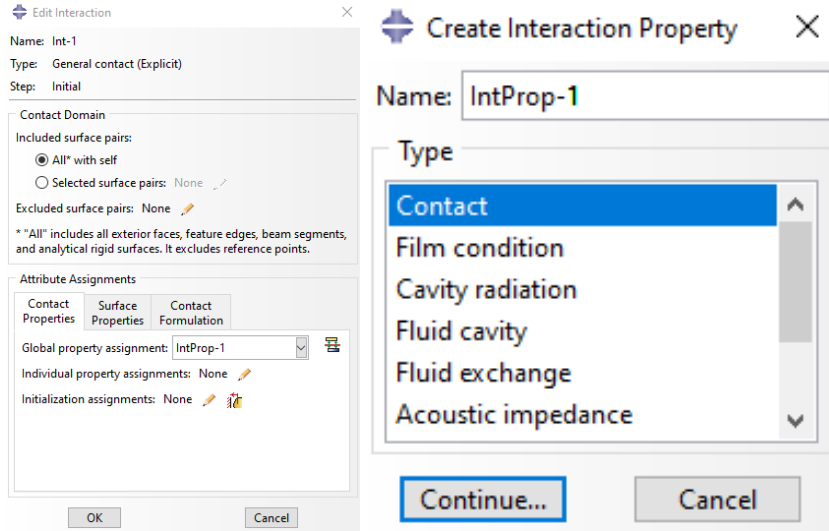


Şekil 2.53. [2]-CW-2 ve [3]-CW-3 numunesine ait CFRP katman parametreleri



Şekil 2.54. FRP tanımlama işleminin ardından oluşan görüntü

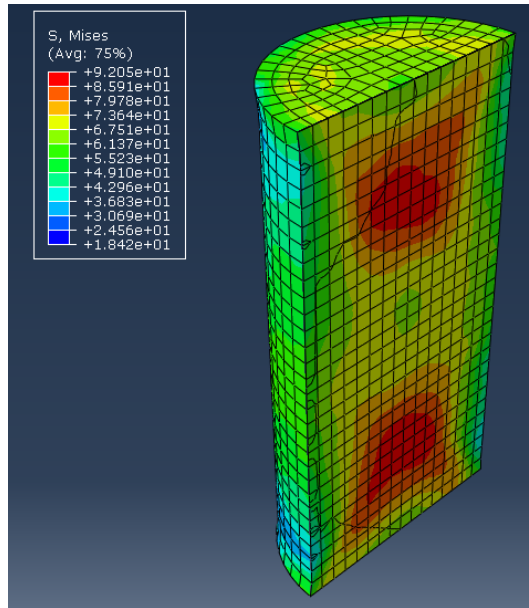
Beton ve CFRP kompozit malzemeye ait tüm malzeme özelliklerini girilmesi ve atama işleminin yapılmasının ardından gerçekleştirilecek iki analiz için; Step bölümü, analizler için zaman periyot seçimi, program çıktıları, modelin üst ve alt yüzeylerinin rijit hale getirilmesi işlemi, sınır şartları ve ağırlara bölme (mesh) işlemi referans numunesi analizinde gerçekleştirildiği gibi aynı şekilde yapılmış olup kontak atama işlemine geçilmiştir. Bu işlem için Interaction > Create Interaction işlem adımları izlenerek açılır pencerede General contact (Explicit) sekmesi işaretlenip Contact Domain bölümü içerisinde All with self kutucuğu seçilir. Contact Properties bölümü içerisinde Creat Interaction Property > Contact seçimi yapılmıştır (Şekil 2.55).



Şekil 2.55. Kontak işleminin uygulanması

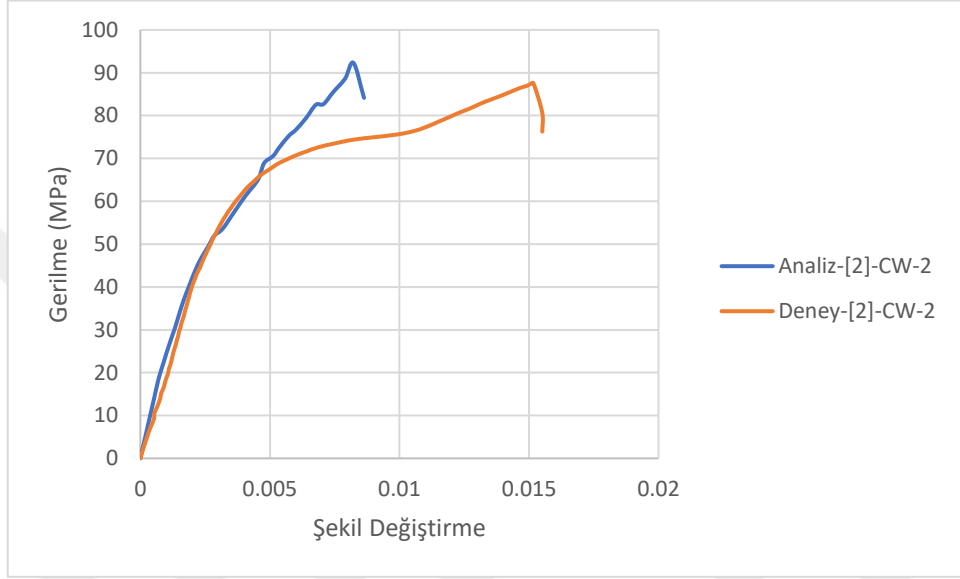
Yapılan tüm işlem adımlarından sonra numuneler analize hazır hale gelmiştir. Öncelikle [2]-CW-2 numunesinin analizi gerçekleştirilmiştir ve sonrasında [3]-CW-3 numunesi için aynı analiz tekrarlanmıştır.

Analizleri gerçekleştirilen [2]-CW-2 ve [3]-CW-3 numunelerinin maksimum basınç dayanım sonuçları incelenmiştir. Bu bağlamda [2]-CW-2 numunesinin yapılan basınç analizi sonucunda ortaya çıkan maksimum basınç dayanımı değeri 92.31 MPa'dır (Şekil 2.56).



Şekil 2.56. [2]-CW-2 numunesinin maksimum dayanımdaki gerilme dağılımı

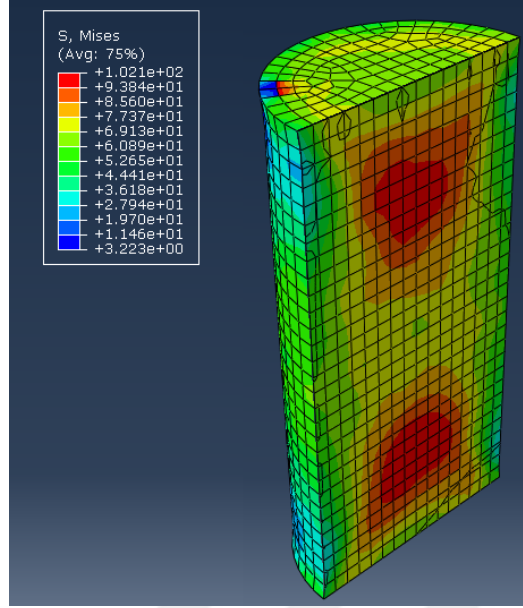
[2]-CW-2 numunesine ait basınç testinden elde edilen değer 87.52 MPa'dır. Deneysel veri ile sonlu eleman analizinden elde edilen veri karşılaştırıldığında aradaki fark %5.47'dir. Buradan da anlaşılabacağı üzere analitik sonuç, deneysel sonuca oldukça yakın ve iyi bir sonuç vermiş olup, destekleyici niteliktedir. İki çalışmanın gerilme-şekil değiştirme grafiği karşılaştırmalı olarak Şekil 2.57'de gösterilmiştir.



Şekil 2.57. [2]-CW-2 numunesine ait gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması

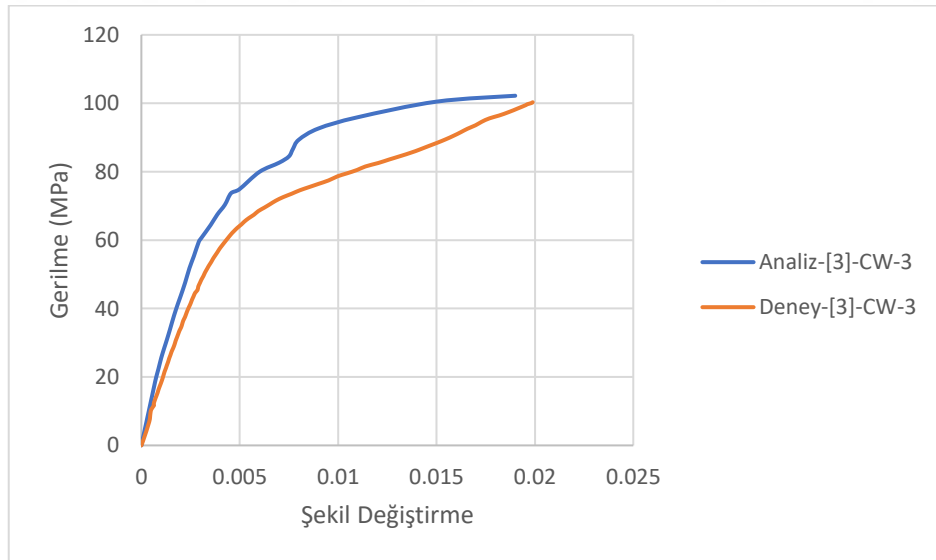
Grafikler incelendiğinde maksimum basınç dayanımı değerleri oldukça yakın olmasının yanında deneysel verilerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafiği analitik sonuçlardan elde edilene göre daha sünek davranış göstermiştir.

[3]-CW-3 numunesinin basınç analizi sonunda ortaya çıkan maksimum basınç dayanımı değeri 102.2 MPa'dır (Şekil 2.58). [3]-CW-3 numunesi üzerinde gerçekleştirilen basınç testinden elde edilen maksimum basınç dayanımı değeri ise 100.3 MPa'dır. Analiz sonucundan elde edilen değer ile deneysel sonuçtan elde edilen değer kıyaslandığında aradaki fark %1.89'dur. Yapılan bu karşılaştırmaya bakılırsa analitik sonuç, deneysel sonucu neredeyse yakalamış ve iyi bir sonuç vermiştir.



Şekil 2.58. [3]-CW-3 numunesinin maksimum dayanımdaki gerilme dağılımı

İki çalışmaya ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 2.59’de gösterilmiştir.



Şekil 2.59. [3]-CW-3 numunesine ait gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması

Grafikler irdelendiğinde, maksimum basınç dayanımı olarak birbirine oldukça yakın sonuç vermelerine karşın aynı şekil değiştirme değerlerinde, analiz sonucu daha yüksek dayanımlara ulaşmıştır.

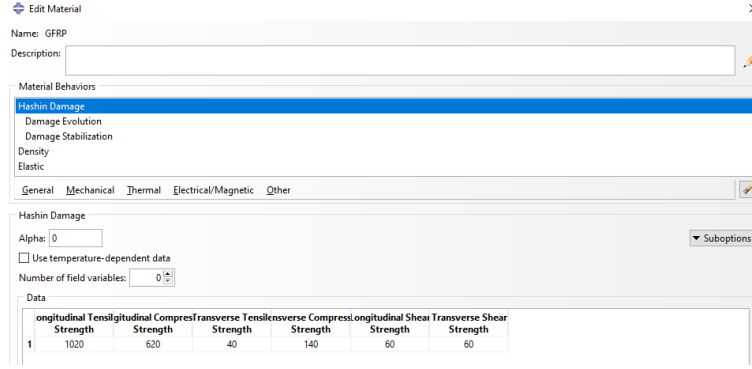
2.3.4.3. Cam Lifli Polimer Kumaşlarla Güçlendirilmiş Beton Numunelerin ([4]-GW-2 ve [5]-GW-3) Sonlu Eleman Analizleri

Cam lifli polimer Kumaşlarla güçlendirilen beton numunelerin ([4]-GW-2 ve [5]-GW-3) sonlu eleman modeli oluşturularak yapılacak olan basınç analizlerinde, betona ait olan tüm işlemler referans numunesinin analizinde izlenen işlem adımları ile aynıdır. Cam lifli polimer kompozit malzemeye ait modellemede izlenen yol ise daha önce analizi gerçekleştirilen karbon lifli polimer kumaşlarla güçlendirilen [2]-CW-2 ve [3]-CW-3 numuneleri ile aynıdır. Farklılık gösteren nokta ise GFRP'ye ait malzeme değerleri olup bu doğrultuda programa tanımlanmıştır. Burada GFRP'ye ait malzeme değerleri yapılan literatür araştırmalarından elde edilmiştir (Barbeo vd., 2013).

GFRP'ye ait kütle yoğunluğu $2 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$ girilmiş olup, elastik davranışı temsil eden değerler Şekil 2.60'de ve GFRP'ye ait plastik davranışı temsil eden Hashin Damage parametreleri Şekil 2.61'da gösterilmiştir.

	E1	E2	E3	Nu12	Nu13	Nu23	G12	G13	G23
1	44700	12700	6000	0.27	0.5	0.27	5800	5800	4500

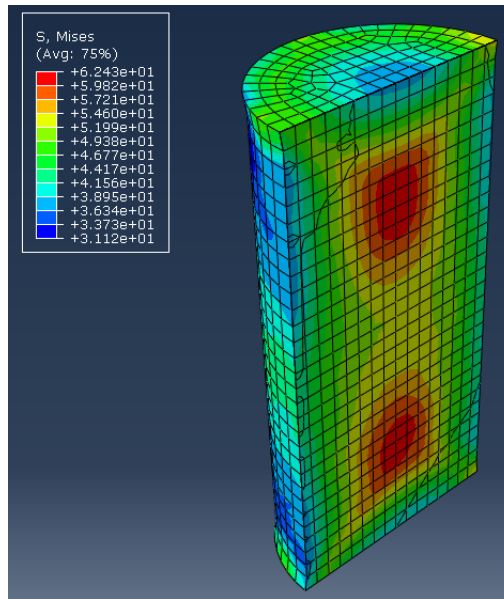
Şekil 2.60. GFRP'ye ait elastik değerlerin girilmesi



Şekil 2.61. GFRP'ye ait Hashin Damage değerlerinin girilmesi

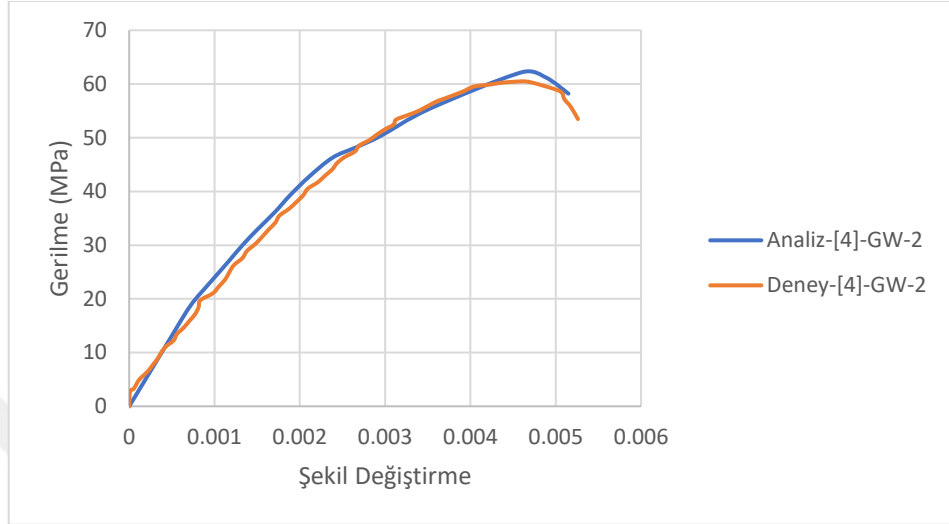
Analize gelmeden önce yapılan aşamalarda farklılık gösteren noktalar [4]-GW-2 ve [5]-GW-3 numunelerinde kullanılacak olan GFRP için düzenlenmiştir ve daha sonra analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde önce [4]-GW-2 numunesinin basınç analizi gerçekleştirilmiş olup daha sonra [5]-GW-3 numunesinin analizine geçilmiştir.

[4]-GW-2 numunesinin analizi gerçekleştirildikten sonra elde edilen maksimum basınç dayanımı değeri 62.43 MPa'a ulaşmıştır (Şekil 2.62). [4]-GW-2 numunesine ait deneysel sonuçlardan elde edilen maksimum basınç dayanımı değeri 60.47 MPa değerindedir. Deneysel sonuçlardan elde edilen değer ile analitik çalışmalar sonucu elde edilen değer arasında %3.24'lük bir fark oluşmaktadır. Buradan da anlaşılabacağı üzere, analitik çalışma deneysel çalışmaya yakın ve iyi bir sonuç vermiştir.



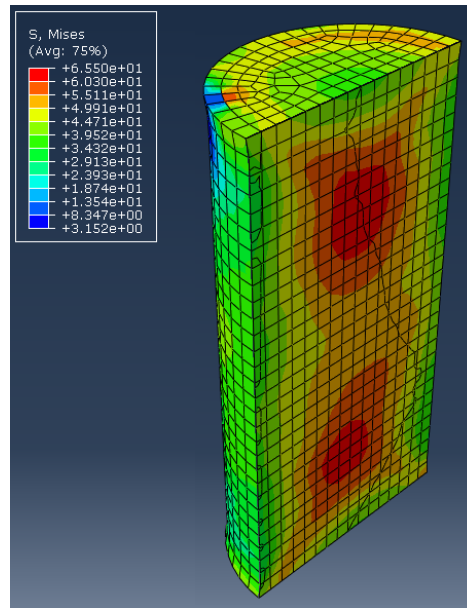
Şekil 2.62. [4]-GW-2 numunesinin maksimum dayanımdaki gerilme dağılımı

Deneysel ve analitik çalışmalardan elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 2.63'te gösterilmiştir.



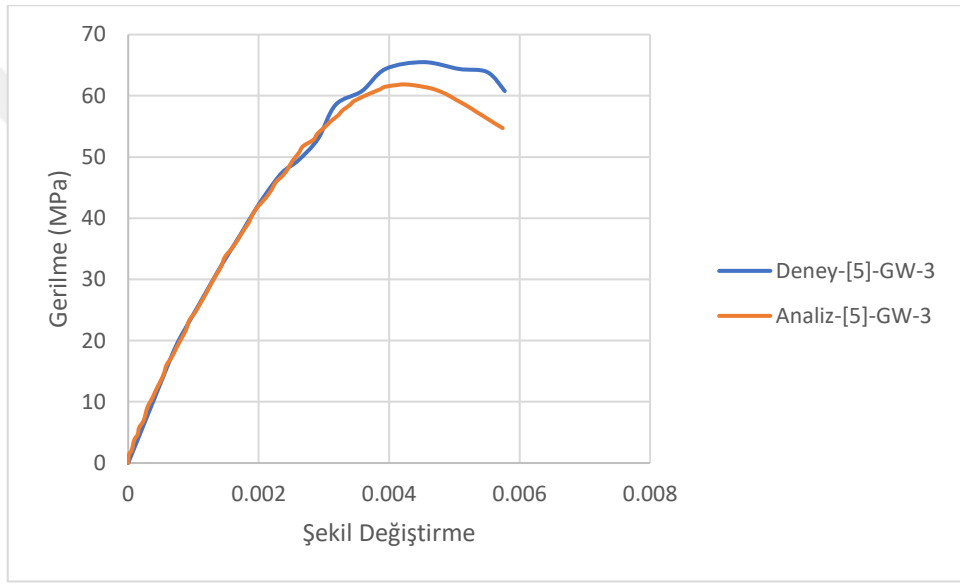
Şekil 2.63. [4]-GW-2 numunesine ait gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması

[4]-GW-2 numunesinin analizi gerçekleştirilip sonuçları incelendikten sonra [5]-GW-3 numunesinin analizlerine geçilmiştir. Gerçekleştirilen analizden sonra [5]-GW-3 numunesi maksimum basınç dayanımı olarak 65.5 MPa değerine ulaşmıştır (Şekil 2.64).



Şekil 2.64. [5]-GW-3 numunesinin maksimum dayanımdaki gerilme dağılımı

[5]-GW-3 numunesine ait deneysel sonuçlardan elde edilen maksimum basınç dayanımı değeri 61.86 MPa değerindedir. Deneysel ve analitik sonuçlardan elde edilen değerler karşılaştırıldığında %5.88'lik bir fark oluşmuştur. Bu bağlamda analitik çalışma ile deneysel çalışmaya yakın sonuç elde edilmiştir. İki çalışmaya ait gerilme-şekil değiştirme grafiği, karşılaştırmalı olarak Şekil 2.65'te gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde analitik sonuçlarının deneysel sonuçlara yakın değerler gösterdiği görülmektedir. Yapılan deneysel ve analitik çalışmalar sonucunda elde edilen maksimum basınç dayanımlarının karşılaştırılmalı tablosu, Tablo 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.65. [5]-GW-3 numunesine ait gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması

Tablo 2.8. Maksimum basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Numune No	Numune Etiketi	Maksimum Basınç Dayanımı		Fark (%)
		Deney	Analiz	
[1]	UW	45.41	45.94	1.17
[2]	CW-2	87.52	92.31	5.47
[3]	CW-3	100.3	102.2	1.89
[4]	GW-2	60.47	62.43	5.47
[5]	GW-3	61.86	65.5	5.88

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, lifli polimer kompozit malzemeler ile güçlendirilen beton numunelerin basınç dayanımına lif türü ve sarım sayısının etkisinin deneysel ve analitik yöntemlerle araştırılması yapılmıştır. Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar deneysel ve analitik olarak iki bölümde incelenmiştir. Deneysel bölüm ise kendi içerisinde üç kısma ayrılmıştır. İlk kısımda, basınç testlerinde kullanılacak olan beş adet silindirik beton numunenin laboratuvar ortamında tasarım ve üretimi gerçekleştirilmiştir. İkinci kısımda, üretimi yapılan numunelerin referans numunesi hariç geri kalan numunelere farklı lif türü ve farklı sarım sayısı gibi parametrelere bağlı olarak güçlendirme işlemi uygulanmıştır. Üçüncü kısımda, referans numunesi ve güçlendirme uygulanan numunelere laboratuvar ortamında basınç testleri uygulanmıştır. Basınç testlerinden elde edilen maksimum basınç dayanımı ve gerilme-şekil değiştirme grafikleri karşılaştırılmış ve her bir sonuç incelenmiştir. Analitik bölümde ise laboratuvar ortamında basınç testleri gerçekleştirilen numunelerin ABAQUS (2022) paket programında sonlu eleman modeli oluşturularak basınç analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen maksimum basınç dayanımları ve gerilme-şekil değiştirme grafikleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmuştur.

- Laboratuvar ortamında basınç dayanımı minimum 40-45 MPa olacak şekilde ve birim ağırlığı 2400 kg/m^3 'ü aşmayan beton üretimi gerçekleştirilmiştir.
- [2]-CW-2 ve [3]-CW-3 numunelerine sırasıyla 2 kat ve 3 kat karbon lif takviyeli polimer kompozit (CFRP) malzemeler ile güçlendirme işlemi uygulanmıştır.
- [4]-GW-2 ve [5]-GW-3 numunelerine sırasıyla 2 kat ve 3 kat cam lif takviyeli polimer kompozit (GFRP) malzemeler ile güçlendirme işlemi uygulanmıştır.
- Farklı lif türü ve farklı sarım sayısına bağlı olarak güçlendirilen numunelerin basınç testlerinden elde edilen, maksimum basınç dayanımları ve gerilme-şekil değiştirme grafiklerindeki değişimler incelenmiştir.
- [1]-UW, [2]-CW-2, [3]-CW-3, [4]-GW-2 ve [5]-GW-3 numunelerine ait laboratuvar ortamında gerçekleştirilen basınç testlerinden elde edilen maksimum basınç dayanımları sırasıyla 45.41 MPa, 87.52 MPa, 100.3 MPa, 60.47 MPa ve 61.86 MPa'dır.

- 2 kat CFRP kumaşlarla güçlendirilen [2]-CW-2 numunesinin basınç testinden elde edilen maksimum basınç dayanım değeri 87.52 MPa'dır. Bu değer aynı teste tabi tutulan referans numunesinin ([1]-UW) maksimum basınç dayanım değeri olan 45.41 MPa'dan %92.73 daha fazladır.
- 2 Kat CFRP uygulaması, silindir betonun numunenin basınç dayanımına etkisi oldukça yüksektir ve güçlendirme işlemi başarılı sonuçlanmıştır.
- 3 kat CFRP kumaşlarla güçlendirilen [3]-CW-3 numunesinin basınç testinden elde edilen maksimum basınç dayanım değeri 100.3 MPa'dır. Bu değer aynı teste tabi tutulan referans numunesinin ([1]-UW) maksimum basınç dayanım değeri olan 45.41 MPa'dan %120.88 daha fazladır.
- 3 kat CFRP uygulaması, silindir beton numunenin maksimum basınç dayanımını yüksek oranda artırmış ve etkili bir sonuç ortaya koymuştur.
- [3]-CW-3 numunesinin maksimum basınç dayanımı olan 100.3 MPa ile [2]-CW-2 numunesinin maksimum basınç dayanımı olan 87.52 MPa değerleri karşılaştırıldığında, silindir betonun basınç dayanımındaki artış %14.6 değerindedir.
- Silindir beton numuneler üzerinde yapılan, karbon lif takviyeli polimer kumaşlarla güçlendirme işlemleri maksimum basınç dayanımını artırmıştır.
- CFRP kumaşların sarım sayısı arttıkça maksimum basınç dayanımının da arttığı sonucuna ulaşılmıştır.
- 2 kat GFRP kumaşlarla güçlendirilen [4]-GW-2 numunesinin basınç testinden elde edilen maksimum basınç dayanım değeri 60.47 MPa'dır. Bu değer aynı teste tabi tutulan referans numunesinin ([1]-UW) maksimum basınç dayanım değeri olan 45.41 MPa'dan %33.16 daha fazladır.
- 2 Kat GFRP uygulaması, silindir betonun numunenin basınç dayanımını artırmıştır.
- 3 kat GFRP kumaşlarla güçlendirilen [5]-GW-3 numunesinin basınç testinden elde edilen maksimum basınç dayanım değeri 61.86 MPa'dır. Bu değer aynı teste tabi tutulan referans numunesinin ([1]-UW) maksimum basınç dayanım değeri olan 45.41 MPa'dan %36.22 daha fazladır.
- 3 kat GFRP uygulaması, silindir beton numunenin maksimum basınç dayanımını iyi oranda artırmıştır.
- [5]-GW-3 numunesinin maksimum basınç dayanımı olan 61.86 MPa ile [4]-GW-2 numunesinin maksimum basınç dayanımı olan 60.47 MPa değerleri karşılaştırıldığında, silindir betonun basınç dayanımındaki artış %2.3 değerindedir.

- Silindir beton numuneler üzerinde yapılan, cam lif takviyeli polimer kumaşlarla güçlendirme işlemleri maksimum basınç dayanımını artırmıştır.
- GFRP kumaşların sarım sayısı arttıkça maksimum basınç dayanımının da arttığı gözlemlenmiştir.
- Silindir beton numunelere uygulanan FRP güçlendirme uygulamasında lif türü değişimi incelendiğinde; karbon lif takviyeli polimer (CFRP) kumaşların, cam lif takviyeli polimer (GFRP) kumaşlara göre maksimum basınç dayanımına etkisi daha fazladır.
- Deneysel çalışmaları yapılan numunelerin daha sonra ABAQUS paket programında analizleri gerçekleştirilmiş olup karşılaştırılması yapılmıştır.
- ABAQUS paket programında analizleri gerçekleştirilen [1]-UW, [2]-CW-2, [3]-CW-3, [4]-GW-2 ve [5]-GW-3 numunelerinin maksimum basınç dayanım değerleri sırasıyla 45.94 MPa, 92.31 MPa, 102.2 MPa, 62.43 MPa ve 65.5 MPa'dır.
- Referans numunesinin ([1]-UW) basınç analizi sonunda elde edilen 45.94 MPa değerindeki maksimum basınç dayanımı, deneysel çalışmadan elde edilen 45.41 MPa değerindeki maksimum basınç dayanımı ile kıyaslandığında oldukça birbirine yakın değerler olup aradaki fark %1.17'dir.
- [2]-CW-2 numunesinin basınç analizi sonunda elde edilen 92.31 MPa değerindeki maksimum basınç dayanımı, deneysel çalışmadan elde edilen 87.52 MPa değerindeki maksimum basınç dayanımı ile kıyaslandığında hemen hemen yakın değerler olup aradaki fark %5.47'dir.
- [3]-CW-3 numunesinin basınç analizi sonunda elde edilen 102.2 MPa değerindeki maksimum basınç dayanımı, deneysel çalışmadan elde edilen 100.3 MPa değerindeki maksimum basınç dayanımı ile kıyaslandığında aradaki fark %1.89'dur.
- [4]-GW-2 numunesinin basınç analizi sonunda elde edilen 62.43 MPa değerindeki maksimum basınç dayanımı, deneysel çalışmadan elde edilen 60.47 MPa değerindeki maksimum basınç dayanımı ile kıyaslandığında hemen hemen yakın değerler olup aradaki fark %5.47'dir.
- [5]-GW-3 numunesinin basınç analizi sonunda elde edilen 65.5 MPa değerindeki maksimum basınç dayanımı, deneysel çalışmadan elde edilen 61.86 MPa değerindeki maksimum basınç dayanımı ile kıyaslandığında hemen hemen yakın değerler olup aradaki fark %5.88'dir.

- Silindir beton numunelerin hem deneysel hem de analitik olarak basınç dayanımlarındaki ve gerilme-şekil değiştirme grafiklerindeki değişim birbirlerine oldukça yakındır
- Analitik sonuçlar, deneysel sonuçları destekleyici niteliktedir.
- Deneysel sonuçlardan elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde güçlendirme uygulanan numunelerin daha fazla şekil değiştirme yeteneğine sahip olduğu sonucuna varılmıştır.
- Deneysel sonuçların irdelenmesiyle, CFRP kumaşlarla yapılan güçlendirme uygulamasının GFRP kumaşlar ile yapılan güçlendirmeye göre daha fazla şekil değişimi yapabildiği gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen bu tez kapsamında elde edilen sonuçlar öncülüğünde yapılan bazı öneriler maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır.

- Silindir beton numunelerin laboratuvar ortamında CFRP ve GFRP kumaşlar ile güçlendirilerek basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Farklı lif türleri için de bu uygulama gerçekleştirilebilir.
- Deneylerde kullanılan FRP kumaşların kalınlıkları 1 mm'dir. Yapılacak çalışmalarda farklı FRP kumaş kalınlıklarının dayanıma etkisi incelenebilir.
- Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda iki kat ve üç kat sarım sayısının dayanıma etkisi irdelenmiştir. Sarım sayısının daha fazla değişim aralığında tutulması ile çalışmalar genişletilebilir.
- FRP kumaşlarla yapılan güçlendirme işlemi, farklı yapı veya yapı elemanlarında kullanılarak etkisi irdelenebilir.

4. KAYNAKLAR

- Ararat, Ö., 2015. Beton Basınç Dayanımına Boyut ve Cidar Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Archbold, P. ve Tharmarajah, G., 2012. Nonlinear Finite Element Analysis of FRP Reinforced Concrete Structures, Bridge Research in Ireland and Concrete Research in Ireland Joint Symposium, September, Dublin, 1-5.
- Arıkan, M., A., S., Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikte Uygulamaları. <https://silo.tips/download/sonlu-elemanlar-metodunun-mhendslkte-uygulamaları> 8 Temmuz 2023.
- Arslan, G., 2004. Mesh Size Effect on Load Carrying Capacity of the Reinforced Concrete Beams without Stirrups by using Drucker-Prager and Cracking Concrete Fracture Criteria, Journal of Engineering and Natural Sciences, 3, 34-42.
- Aydemir, B., Elmas, B., S. ve Ayan. E., 2019. Çekme Deneyinde Elastisite Modülü Hesap Yöntemleri ve Hata Kaynakları, 4th International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2019), Antalya, 597-603.
- Bangash., M., Y., H., 1989. Concrete and Concrete Structures Numerical Modelling and Applications. Elsevier Science Publishers Ltd., England, 668 s.
- Barbero, E., J., Cosso, F., A., Roman, R. ve Weadon, T., L., 2013. Determination of Material Parameters for Abaqus Progressive Damage Analysis of E-Glass Epoxy Laminates, Composites Part B: Engineering, 46, 211-220.
- Başığmez, Ö., 2015. Betona Yapıştırılmış Ankrajlı CFRP Şeritlerin Lineer Olmayan Sonlu Eleman Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Bulut, E., 2006. FRP Sargılı Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kolonların Yük Taşıma Kapasitelerinin Farklı Davranış Modellerine Göre İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Campione, G., 2006. Influence of Frp Wrapping Techniques on The Compressive Behavior of Concrete Prisms, Cement and Concrete Composites, 28, 497-505.
- Chakrabarti, A., Chandra, A. ve Bharagava, P., 2008. Finite Element Analysis of Concrete Columns Confined with FRP Sheets, Journal of Reinforced Plastics and Composites 27, 12, 1349-1373.
- Chansawat, K., 2003. Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates, April, Doctoral Thesis, O.S.U, Institute of Science, Corvallis.

- Chen, Y., Davalos, J., F. ve Ray, I., 2006. Durability Prediction for GFRP Reinforcing Bars using Short-Term Data of Accelerated Aging Tests, Journal Composite Construction, 10, 4, 279–286.
- Çelik, K., V. ve Karaşin, H., 2014. Karbon Elyaf ile Betonun Güçlendirilmesi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 5, 1, 1-11.
- Çetinkaya, N., 2002. Betonarme Yapı Elemanlarının FRP Malzemelerle Onarım ve Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Dalgıç, K., D., 2010. Düşük Elastisite Modüllü Cam Lifli Polimerle Sargılanmış Düşük Dayanımlı Betonun Eksenel Yükler Altında Davranışı ve Sonlu Eleman Metodu ile Analizi, Haziran, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Daniel, A., Pohoryles, D., Jose, M., Tiziana, R. ve Humberto, V., 2019. Seismic Retrofit Schemes with FRP for Deficient RC Beam–Column Joints: State-of-the-Art Review, Journal of Composites for Construction, 23, 4, 1-18.
- Dede, T., 2009. Farklı Kriterler Kullanılarak Betonarme Kirişlerin Malzeme Bakımından Doğrusal Olmayan Davranışının Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Eylül, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Duran, B., Tunaboyu, O. ve Avşar, Ö., 2017. Düşük Dayanımlı Betonun Elastisite Modülünün Belirlenmesi ve RYTEİE ile Yapılan Risk Değerlendirmesine Etkisi, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32, 1, 253-264.
- Esfahani, M.R., Kianoush, M.R. ve Tajari, A., R., 2007. Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by CFRP sheets, Engineering Structures, 29, 2428-2444.
- Fetvacı, M., C., 2002. Sonlu Elemanlar Metodu ile Gerilme Analizi: Kalın Cidarlı Silindirik Borulara Uygulama, Mühendis ve Makina, 43, 508, 42-46.
- Gotame, M., Franklin, C., L., Blomfors, M., Yang, J. ve Lundgren, Karin., 2022. Finite Element Analyses of Frp-Strengthened Concrete Beams with Corroded Reinforcement, Engineering Structures, 257, 114007.
- Hafezolghorani, M., Hejazi, Farzad, Vaghei, R., Jaafar, M., S., B. ve Karimzade, K., 2017. Simplified Damage Plasticity Model for Concrete, Structural Engineering International, 27, 1 68-78.
- Hashin, Z., 1980. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites, J. Appl. Mech., 47, 2, 329-334.
- Hognestad E., Hanson NW. ve McHenry D., 1955. Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design, ACI Journal Proceedings, 52, 12, 455–79.

- Hu, H., T., Lin, F., M. ve Jan, Y., Y., 2004. Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Fiber-Reinforced Plastics, Composite Structures, 63, 271-281.
- Ibrahim, A.M. ve Mahmood M.S., 2009. Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Laminates, European Journal of Scientific Research, 30, 4, 526-541.
- Isleem, H., F., Daiyu, W. ve Wang., Z., 2018. Modeling The Axial Compressive Stress-Strain Behavior of Cfrp-Confined Rectangular Rc Columns under Monotonic and Cyclic Loading, Composite Structures, 185, 229-240.
- Ismail, Ruqayyah., Rashid, R., S., M., Chan, W., C., Jaafar, M., S. ve Hejazi, F., 2019. Compressive Behavior of Concrete Cylinder Fully and Partially Confined by Carbon Fibre-Reinforced Polymer (Cfrp), Construction and Building Materials, 201, 196-206.
- İlki, A. ve Kumbasar, N., 2002. Karbon Lif Takviyeli Polimer Kompozit Malzeme ile Hasarlı Betonarme Elemanların Onarım ve Güçlendirilmesi, İMO Teknik Dergi, 175, 2597-2616.
- Jankowiak, T. ve Lodygowski., 2005. Identification of Parameters of Concrete Damage Plasticity Constitutive Model, Foundations of Civil and Environmental Engineering, 6, 53-69.
- Jawad, D., 2015. Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Cylindrical Shells, Basrah Journal for Engineering Sciences, 15, 1, 86-97.
- Kaltakçı, M., Y., Köken, A. ve Yılmaz, Ü., S., 2006. Eksenel Yük Altındaki Çelik Lifli ve Lifsiz Etriyeli Betonarme Kolonların Davranışının Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 8, 1, 65-85.
- Karahasan, O., Ş., 2017. Betonarme Binaların Dinamik Davranışına Lifli Polimer Kompozit Malzeme Etkisinin Deneysel ve Analitik Yöntemlerle Belirlenmesi, Haziran, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Kocataşkın, F., 1976. Yapı Mühendislerine Malzeme Bilimi, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul, 160 s.
- Lee, C., Bonacci, J. ve Thomas, M., 2000. Accelerated Corrosion and Repair of Reinforced Concrete Columns using Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets, Canadian Journal of Civil Engineering, 27, 941-948.
- Lee, S., H., Abolmaali, A., Shin, K., J. ve Lee, H., D., 2020. ABAQUS Modeling for Post-Tensioned Reinforced Concrete Beams, Journal of Building Engineering, 30, 101273.

- Liao, J., J., Zeng, J., J., Jiang, C., Li., J., X. ve Yuan, J., S., 2022. Stress-Strain Behavior and Design-Oriented Model for Frp Spiral Strip-Confined Concrete, Composite Structures, 293, 115747.
- Lu, S., Wang, J., Yang, J. ve Wang, L., 2022. Numerical Analysis of Preloaded Frp-Strengthened Concrete Columns under Axial Compression, Construction and Building Materials, 357, 129297.
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. ve Onate, E., A., 1989. Plastic-Damage Model for Concrete. Int. J. Solids Struct., 25, 3, 299–326.
- Maraş, M., M., 2021. Betonarme Yapıların Güçlendirilmesinde Kullanılan FRP Kompozitin Yapısal Performansa Etkisi, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 23, 108-119.
- Nanni, A. ve Bradford, N., M., 1995. FRP Jacketed Concrete under Uniaxial Compression, Construction and Building Materials, 9, 2, 115-124.
- Önal, M., M., 2014. Strengthening Reinforced Concrete Beams with CFRP and GFRP, Advances in Materials Science and Engineering, 967964, 1-8.
- Pham, T., M., Hadi, M., N., S. ve Youssef, J., 2015. Optimized FRP Wrapping Schemes for Circular Concrete Columns under Axial Compression, Journal of Composites for Construction, 19, 6, 04015015, 1-10.
- Polus, L. ve Szumigala, M., 2019. Laboratory Tests vs. FE Analysis of Concrete Cylinders Subjected to Compression, AIP Conference Proceedings, 2078, 1, 020089.
- Postacıoğlu, B., 1981. Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri Cilt 1, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul, 614 s.
- Reddiar, M., K., M., 2009. Stress-Strain Model of Unconfined and Confined Concrete and Stress-Block Parameters, December, Master of Science, Texas A&M University, Institute of Science, Texas.
- Shahawy, M., Mirmiran, A. ve Beitelman, T., 2000. Tests and Modeling of Carbon-Wrapped Concrete Columns, Composites Part B: Engineering, 31, 471-480.
- Sheikh, S., A. ve Üzümeri S., M., 1980. Strength and Ductility of Tied Concrete Columns, ASCE Journal of the Structural Division, 106, 5, 1079-1102.
- Shokrieh, M. ve M, Omid, M., J., 2009. Tension Behavior of Unidirectional Glass/Epoxy Composites under Different Strain Rates, Composite Structures, 88, 4, 595–601.
- Si, J., Chen, J., Qiu, S., Feng, S. ve Guo W., 2021. Finite Element Analysis on Eccentric Compression of Reinforced Concrete Columns Strengthened by Prestressed Polyethylene Terephthalate Straps and Angle Steel, Advances in Structural Engineering, 24,15, 3534-3549.

- Swamy, R., N., Jones, R. ve Bloxham J., W., 1987. Structural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy Bonded Steel Plates, *Structural Engineer*, 65, 2, 59–8, 1987.
- Teng, J., G., Chen, J., F., Smith, S., T. ve Lam, L., 2003. Behaviour and Strength of Frp-Strengthened Rc Structures: A State-of-the Art Review, *ICE Proceedings Structures and Buildings*, 156, 1, 51-62.
- Tjitradi, D., Eliatun, E. ve Taufik, S., 2017. 3D ANSYS Numerical Modeling of Reinforced Concrete Beam Behavior under Different Collapsed Mechanisms, *International Journal of Mechanics and Applications*, 7, 1, 14-23.
- Tobbi, H., Farghaly. ve Benmokrane B., 2011. Concrete Columns Reinforced Longitudinally and Transversally with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars, *Aci Structural Journal*, 109, 4, 551-558.
- URL-1, <http://130.149.89.49:2080/v6.14/books/usb/default.htm?startat=pt05ch23s06abm39.html> Beton Hasar Plastisite Modeli. 8 Temmuz 2023.
- URL-2, <https://mbcc.sika.com/tr-tr/products/masterbrace/masterbrace-p-3500>, Epoksi Esaslı Astar Özellikleri. 8 Temmuz 2023.
- URL-3, <https://mbcc.sika.com/tr-tr/products/masterbrace/masterbrace-sat-4500->, Epoksi Yapıştırıcı Özellikleri. 8 Temmuz 2023.
- URL-4, <https://www.utest.com.tr/en/23425/Compressometer-Extensometer>, Kompresometre Özellikleri. 8 Temmuz 2023.
- URL-5, <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/gsa/default.htm?startat=ap02s09.html> Abaqus El Kitabı. 8 Temmuz 2023.
- URL-6, <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?startat=pt06.html#usbechapter> Abaqus El Kitabı. 8 Temmuz 2023.
- URL-7, <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usi/default.htm?startat=pt01ch02s02h1b01.html> Abaqus El Kitabı. 8 Temmuz 2023.
- URL-8, <https://intranet.birmingham.ac.uk/collaboration/hpc-research/documents/public/fem/1-Introduction-of-FEA-and-ABAQUS.pdf> Abaqus Temel Eğitim. 8 Temmuz 2023.
- URL-9, https://www.youtube.com/watch?v=Jm9a0dY_Qu0 Cdp Model Oluşturma Programı. 8 Temmuz 2023.
- URL-10, <https://davis68.github.io/me498cf-fa16/resources/alec07/notes-dynamics.pdf> Abaqus Programında Dinamik Analiz. 8 Temmuz 2023.

- URL-11, <https://www.youtube.com/watch?v=sFT6hzc7a5U&list=LL&index=18>
Cfrp Modelleme. 8 Temmuz 2023.
- Uzbaş, B., 2008. Çimento Esaslı Malzemelerin Tek Eksenli Yük Altındaki Davranışının Mezo Düzey Modellenmesi, Nisan, Yüksek Lisans Tezi, A.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Uzbaş, B., 2014. Beton İçin Geliştirilen Gerilme-Şekil Değiştirme Modellerinin Karşılaştırılması, Politeknik Dergisi, 17, 3, 115-126.
- Wagner, R., H., N., ABAQUS Tutorial: Damage for Fibre-Reinforced Composites – Material Model Explained - Hashin Damage.
https://www.researchgate.net/publication/349757002_ABAQUS_Tutorial_Damage_for_Fibre-Reinforced_Composites_-_Material_Model_Explained_-_Hashin_Damage 8 Temmuz 2023.
- Wang, W., Sheikh, M., N., Al-Baali, A., Q. ve Hadi, M., N., S., 2018. Compressive Behaviour of Partially Frp Confined Concrete: Experimental Observations and Assessment of The Stress-Strain Models, Construction and Building Materials, 192, 785-797.
- Wasti, T., S., 1990. Sonlu Eleman Yönteminin Betonarme Yapı Elemanlarına Uygulanması, İMO Teknik Dergi, 15, 199-208.
- Xiao, B., Y. ve Wu., H., 2000. Compressive Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets, Journal of Materials in Civil Engineering, 12, 2, 139-146.
- Youssef, M., N., Feng, M., Q. ve Mosallam, A., S., 2007. Stress–Strain Model for Concrete Confined by Frp Composites, Composites Part B: Engineering, 38, 614-628.
- Zeng, J., J., Guo, Y., C., Gao, W., Y., Li, J., Z. ve Xie, J., H., 2017. Behavior of Partially and Fully Frp-Confined Circularized Square Columns under Axial Compression, Construction and Building Materials, 152, 319-332.
- Zeng, J., J., Lin, G., Teng, J., G. ve Li, L., J., 2018. Behavior of Large-Scale Frp-Confined Rectangular Rc Columns under Axial Compression, Engineering Structures, 174, 629-645.

ÖZGEÇMİŞ

Algıhan Kaşif KARAHASAN, İlkokulu ve ortaokulu Trabzon İskenderpaşa Ortaokulu'nda tamamladıktan sonra lise öğrenimini Yavuz Sultan Selim Anadolu Lisesi'nde gördü. 2015 yılında girdiği Öğrenci Seçme Sınavı'nda gösterdiği başarı sonucu Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde "Lisans" eğitimi almaya hak kazandı. 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne geçiş yaptı. 2019 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu ve lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda "Yüksek Lisans" eğitimine bir yıl İngilizce Hazırlık eğitimi alarak başladı.