



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**FİLAMAN SARIM FRP BORULARLA
GÜÇLENDİRİLMİŞ BETON KOLONLARIN
EKSENEL YÜK ALTINDAKİ DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

Merve ÇALIŞKAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Mart-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Merve ÇALIŞKAN tarafından hazırlanan "Filaman sarım FRP borularla güçlendirilmiş beton kolonların eksenel yük altındaki davranışının incelenmesi" adlı tez çalışması 08/03/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Ahmet CAN

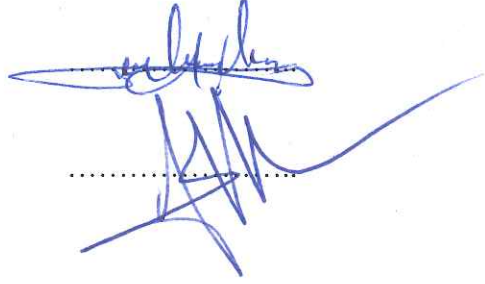
Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Lokman GEMİ

Üye

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman Savaş DURDURAN
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 181335001 nolu proje ile desteklenmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Alpaslan KÖROĞLU bu tez çalışmasının ikinci danışmanıdır.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Merve ÇALIŞKAN

Tarih:08.03.2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİLAMAN SARIM FRP BORULARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ BETON KOLONLARIN EKSENEL YÜK ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Merve ÇALIŞKAN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Lokman GEMİ

2019, xii + 81 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Lokman GEMİ

Doç. Dr. Ahmet CAN

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN

Günümüzde kompozit malzemelerin kullanımının yaygınlaşması sonucunda inşaat uygulamalarında hem yapısal hem de yapısal olmayan endüstriyel yapı elemanları olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle yapının yük taşıma elemanı olan kolon ve kirişlerde yapıyı güçlendirme ve koruma amacıyla kullanımları mevcuttur. Uygulamalarda kolonların güçlendirilmesi ve korozyona karşı direncin artırılması amacıyla imalat öncesi ve imalat sonrası çalışmalar yapılmaktadır. Bu tezin amacı; filaman sarım tekniği ile üretilmiş cam ve hibrid kompozit borularla güçlendirilmiş beton kolonların eksenel yük altındaki davranışının incelenmesi, güçlendirilmiş silindirik kolonların yük kapasitesi ve sünekliğine olan etkisinin araştırılmasıdır. Genleşen çimentolu betondan üretilen numuneler test edilmiş ve davranışları incelenmiştir. Su/ çimento oranının betonun yük dayanımına ve sünekliğine etkisinin araştırılması amacıyla bu oranlar 0,4-0,5 ve 0,6 olarak uygulanmıştır. Bununla birlikte aynı çimento su oranına sahip numuneler, $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı cam, $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı hibrid ve $(\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ)$ sarım açılı hibrid kompozit borularla güçlendirilerek üretilmiş ve test edilmiştir. Çalışmada karşılaştırılacak parametreler; beton basınç dayanımına filaman sargının etkisi ve genleşen çimentonun filaman sargılı kompozit borular içerisinde kullanıldığında borunun davranışına olan etkisidir. Yapılan deneysel çalışmalarda oluşan hasarlar gözlemlenmiş ve kayıt altına alınmıştır. Özellikle deneysel çalışma esnasında kompozit borunun taşıma yüküne etkisi ve boruda oluşan hasarlar incelenmiştir. Çalışma sonucunda kompozit borularla güçlendirilmiş kolonların referans numunelere oranla yük dayanımında yaklaşık 2 kat, deplasman da ise 5,5 kata kadar artış olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Filaman Sarım, Genleşen Çimento, Hasar Analizi, Kompozit Boru, Sargı Etkisi

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATING BEHAVIOUR OF CONCRETE COLUMNS STRENGTHENED WITH FRP FLAMENT WRAPPING UNDER AXIAL LOADING

Merve ÇALIŞKAN

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Asst. Prof. Dr. Lokman GEMİ

2019, xii + 81 Pages

Jury

Asst. Prof. Dr. Lokman GEMİ

Asst. Prof. Dr. Ahmet CAN

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN

Due to the widespread use of composite materials, it has started to be used as both structural and non-structural industrial construction elements. Especially, these materials are used as the load-carrying element of columns and beams, for helping to strengthen and protect these structures. In the application, pre-production and post-production works are carried out in order to strengthen the columns and increase the resistance against corrosion. The aim of this project; is to investigate the behaviour of concrete columns reinforced with glass and hybrid composite pipes produced by filament winding technique under axial load, to investigate the effect of cylinder columns on load capacity and ductility. Samples made of cemented concrete with were tested and their behaviour was examined. In order to investigate the effect of cement water ratio on the load strength and ductility of concrete, these ratios are applied as 0,4-0,5 and 0,6. Along with it, the same samples ($\pm 55^\circ$)₃ were also produced and tested using ($\pm 55^\circ$)₃ winding angle, ($\pm 55^\circ$)₃ winding angle hybrid and ($\pm 45^\circ/\pm 55^\circ/\pm 75^\circ$) winding angle hybrid composite pipes. The parameters to be compared in the study; The effect of the filament winding on the concrete compressive strength and the effect of the expanded cement on the behaviour of the pipe when used in the filament wrapped composite pipes. Damage in experimental studies has been observed and recorded. In particular, the effect of bearing load on the composite pipe and the damage to the pipe were investigated during the experimental study. As a result of the study, it has been determined that the columns reinforced with composite pipes have a significant increase in load resistance and displacement compared to the reference samples.

Keywords: Filament Winding, Composite Pipe, Expanding Cement, Damage Analysis, Confinement

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca maddi-manevi desteğini, rehberliğini, tavsiye ve teşviklerini eksik etmeyen, sabır ve hoşgörü anlayışı ile tüm zorluklarda yanımda olan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Lokman GEMİ'ye minnet ve teşekkürü borç bilirim.

Çalışmalarıma destek olan ikinci danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Alpaslan KÖROĞLU'ya teşekkür ederim.

Gece gündüz demeden desteğini hiç eksik etmeyen aileme, abim Bahadır ÇALIŞKAN'a, vefa ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmama 181335001 nolu proje ile maddi destek sağlayan Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne de teşekkürü bir borç bilirim.

Merve ÇALIŞKAN
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. GENEL BİLGİLER.....	11
3.1. Kompozit Malzemelerin Tanımı.....	11
3.2. Matris Malzemeleri.....	12
3.2.1. Termoset malzemeler.....	13
3.2.2. Termoplastik malzemeler	14
3.3. Takviye Malzemeleri	14
3.3.1. Cam elyaflar.....	15
3.3.2. Karbon elyaflar	15
3.4. Tabakalı Kompozitler	16
3.4.1. Polimer esaslı tabakalı kompozit malzemeler	17
3.5. Kompozit Malzemelerin Sağladığı Avantajlar	17
3.6. Kompozit Üretimi	18
3.6.1. Filaman sarım yöntemi	19
3.7. Kompozit Malzemelerin İnşaat Uygulamaları.....	20
3.7.1. FRP kompozit malzemelerinin yapılarda kullanımının incelenmesi	21
3.7.1.1. Güçlendirme sistemi olarak FRP kompozit.....	22
3.7.1.2. FRP kompozitlerin kolonlarda kullanımı	23
3.8. Su/ Çimento Oranının Betonun Basınç Dayanımına Etkisi.....	24
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	26
4.1. Kompozit Boruların Üretimi.....	26
4.2. Kullanılan Betonun Özellikleri.....	27
4.3. Gerinim Ölçer Uygulaması.....	30
4.4. Eksenel Basınç Testi.....	30
4.4.1. Eksenel kuvvet sonucu oluşan hasar modları	31
4.4.2. Basınç dayanımı analizi	34
4.4.3. Basınç gerilmesi ve basınç şekil değişimi	36
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	38
5.1. ($\pm 55^\circ$) ₃ GFRP Borunun-0,4 Basınç Deneyi Sonuçları.....	39
5.2. ($\pm 55^\circ$) ₃ GFRP Borunun-0,5 Basınç Deneyi Sonuçları.....	41
5.3. ($\pm 55^\circ$) ₃ GFRP Borunun-0,6 Basınç Deneyi Sonuçları.....	43

5.4. ($\pm 55^\circ$) ₃ Hibrid Kompozit Borunun-0,4 Basınç Deneyi Sonuçları	45
5.5. ($\pm 55^\circ$) ₃ Hibrid Kompozit Borunun-0,5 Basınç Deneyi Sonuçları	46
5.6. ($\pm 55^\circ$) ₃ Hibrid Kompozit Borunun-0,6 Basınç Deneyi Sonuçları	48
5.7. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) Hibrid Kompozit Borunun-0,4 Basınç Deneyi Sonuçları.....	51
5.8. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) Hibrid Kompozit Borunun-0,5 Basınç Deneyi Sonuçları.....	53
5.9. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) Hibrid Kompozit Borunun-0,6 Basınç Deneyi Sonuçları.....	55
5.10. Referans Kolonun-0,4 Basınç Deneyi Sonuçları	57
5.11. Referans Kolonun-0,5 Basınç Deneyi Sonuçları	58
5.12. Referans Kolonun-0,6 Basınç Deneyi Sonuçları	59
5.13. Basınç Deneyi Sonuçları ve Karşılaştırmalar	61
5.13.1. Referans ve GFRP numunelerin karşılaştırılması.....	64
5.13.2. Referans ve ($\pm 55^\circ$) ₃ hibrid numunelerin karşılaştırılması.....	66
5.13.3. Referans ve ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) hibrid numunelerin karşılaştırılması	67
5.13.4. Su/ çimento oranı 0,4 olan numunelerin karşılaştırılması	69
5.13.5. Su/ çimento oranı 0,5 olan numunelerin karşılaştırılması	71
5.13.6. Su/ çimento oranı 0,6 olan numunelerin karşılaştırılması	72
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	74
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ	81

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	13
Şekil 3.2. Kompozit malzeme üretim yöntemleri.....	18
Şekil 3.3. Kompozit boruların filaman sarım tezgahında üretimi	20
Şekil 3.4. FRP kompozit malzemelerin güçlendirme işleminde kullanılması.....	21
Şekil 3.5. Köprü kolon ve ayaklarının FRP kompozit malzeme ile güçlendirilmesi	22
Şekil 3.6. FRP kompozit malzemelerin kolonlarda kullanılması	24
Şekil 3.7. Basınç dayanımı – Su/çimento oranı ilişkisi	25
Şekil 4.1. Numune geometrisi	27
Şekil 4.2. Küp beton numunelerin test öncesi ve sonrası görünüşleri.....	28
Şekil 4.3. Deney numuneleri	28
Şekil 4.4. Genleşen çimentolu beton uygulaması.....	29
Şekil 4.5. Üretilen numunelerin geometrik ölçüleri	29
Şekil 4.6. Gerinim ölçer uygulanan kompozit borular	30
Şekil 4.7. Statik basma test cihazı	31
Şekil 4.8. Kompozit malzemelerdeki kırılma mekanizmaları 1) genel burkulma 2) bölgesel burkulma 3) kırılma 4) ilerleyen kırılma	32
Şekil 4.9. Kompozit malzemelerde oluşan hasar modları	32
Şekil 4.10. Hasar modlarının şematik görünümü	34
Şekil 4.11. FRP borunun beton basıncına etkisi.....	35
Şekil 5.1. Hazırlanan deney numuneleri.....	38
Şekil 5.2. $(\pm 55^\circ)_3$ GFRP-0,4 numunesinde oluşan hasar (deney öncesi-sonrası).....	39
Şekil 5.3. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı GFRP-0,4 numunenin yük-deplasman grafiği	40
Şekil 5.4. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı GFRP-0,4 numunenin gerilme-gerinim grafiği	40
Şekil 5.5. $(\pm 55^\circ)_3$ GFRP-0,5 numunesinde oluşan hasar (deney öncesi-sonrası).....	41
Şekil 5.6. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı GFRP-0,5 numunesinin yük-deplasman grafiği	42
Şekil 5.7. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı GFRP-0,5 numunenin gerilme-gerinim grafiği	42
Şekil 5.8. $(\pm 55^\circ)_3$ GFRP-0,6 numunesinde oluşan hasar (deney öncesi-sonrası).....	43
Şekil 5.9. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı GFRP-0,6 numunenin yük-deplasman grafiği	44
Şekil 5.10. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı GFRP-0,6 numunenin gerilme-gerinim grafiği	44
Şekil 5.11. $(\pm 55^\circ)_3$ hibrid kompozit boruda-0,4 oluşan hasar (deney öncesi-sonrası) ...	45
Şekil 5.12. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı hibrid-0,4 numunesinin yük-deplasman grafiği.....	46
Şekil 5.13. $(\pm 55^\circ)_3$ hibrid kompozit boruda-0,5 oluşan hasar (deney öncesi-sonrası) ...	47
Şekil 5.14. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı hibrid-0,5 numunesinin yük-deplasman grafiği.....	47
Şekil 5.15. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı hibrid-0,5 numunenin gerilme-gerinim grafiği.....	48
Şekil 5.16. $(\pm 55^\circ)_3$ hibrid kompozit boruda-0,6 oluşan hasar (deney öncesi-sonrası) ...	49
Şekil 5.17. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı hibrid-0,6 numunenin yük-deplasman grafiği	50
Şekil 5.18. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı hibrid-0-6 numunenin gerilme-gerinim grafiği.....	50
Şekil 5.19. $(\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ)$ hibrid kompozit boruda-0,4 oluşan hasar (deney öncesi-sonrası).....	51
Şekil 5.20. $(\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ)$ sarım açılı hibrid-0,4 numunenin yük-deplasman grafiği	52
Şekil 5.21. $(\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ)$ sarım açılı hibrid-0,4 numunenin gerilme-gerinim grafiği	52
Şekil 5.22. $(\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ)$ hibrid kompozit boruda-0,5 oluşan hasar (deney öncesi-sonrası).....	53
Şekil 5.23. $(\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ)$ sarım açılı hibrid-0,5 numunenin yük-deplasman grafiği	

.....	54
Şekil 5.24. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) sarım açılı hibrid-0,5 numunenin gerilme-gerinim grafiği	54
.....	54
Şekil 5.25. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) hibrid kompozit boruda-0,6 oluşan hasar (deney öncesi-sonrası)	55
.....	55
Şekil 5.26. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) sarım açılı hibrid-0,6 numunenin yük-deplasman grafiği	56
.....	56
Şekil 5.27. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) sarım açılı hibrid-0,6 numunenin gerilme-gerinim grafiği	56
.....	56
Şekil 5.28. Referans-0,4 numunede oluşan hasar (deney öncesi-sonrası)	57
Şekil 5.29. 0,4 su/ çimento oranına sahip referans numunenin yük-deplasman grafiği	58
Şekil 5.30. Referans-0,5 numunede oluşan hasar (deney öncesi-sonrası)	58
Şekil 5.31. 0,5 su/ çimento oranına sahip referans numunenin yük-deplasman grafiği	59
Şekil 5.32. Referans-0,6 numunede oluşan hasar (deney öncesi-sonrası)	60
Şekil 5.33. 0,6 su/ çimento oranına sahip referans numunenin yük-deplasman grafiği	60
Şekil 5.34. Deney numunelerinin maksimum yük dayanımı sonuçları	61
Şekil 5.35. Deney numunelerinin maksimum deplasman sonuçları	62
Şekil 5.36. Deney numunelerinin maksimum basınç dayanımı sonuçları	63
Şekil 5.37. Deney numunelerinin gerinim (şekil değişimi) sonuçları	63
Şekil 5.38. Referans numuneler ve GFRP numunelerin yük-deplasman grafiği	64
Şekil 5.39. Referans ve GFRP numunelerin deney sonrası görüntüleri	65
Şekil 5.40. Referans numuneler ve (± 55) ₃ hibrid numunelerin yük-deplasman grafiği	66
Şekil 5.41. Referans ve (± 55) ₃ hibrid numunelerin deney sonrası görüntüleri	67
Şekil 5.42. Referans numuneler ve ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) hibrid numunelerin yük-deplasman grafiği	68
.....	68
Şekil 5.43. Referans ve ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) hibrid numunelerin deney sonrası görüntüleri	69
.....	69
Şekil 5.44. Su/ çimento oranı 0,4 olan numunelerin yük-deplasman grafiği	70
Şekil 5.45. Su/ çimento oranı 0,4 olan numunelerin deney sonrası görüntüleri	71
Şekil 5.46. Su/ çimento oranı 0,5 olan numunelerin yük-deplasman grafiği	71
Şekil 5.47. Su/ çimento oranı 0,5 olan numunelerin deney sonrası görüntüleri	72
Şekil 5.48. Su/ çimento oranı 0,6 olan numunelerin yük-deplasman grafiği	73
Şekil 5.49. Su/ çimento oranı 0,6 olan numunelerin deney sonrası görüntüleri	73

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. E camı ve Karbon elyafların özellikleri	15
Çizelge 4.1. Kullanılan elyafların ve matrisin özellikleri.....	26
Çizelge 4.2. Beton karışım elemanları ve elde edilen mekanik özellikleri	29
Çizelge 4.3. FRP-sargılı betonun tasarım odaklı modellerinin özeti.....	36
Çizelge 5.1. Kullanılan parametreler	38



SİMGELER VE KISALTMALAR

%	: Yüzde
°C	: Derece santigrat
Ark.	: Arkadaşları
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CFFT	: Fiber Takviyeli Plastik Boru
CFRP	: Karbon Fiber Takviyeli Polimer
CTP	: Camelyaf Takviyeli Polimer
D	: Boru çapı
E	: Elastisite modülü
ϵ	: Gerinim (şekil değişimi)
FRP	: Fiber Takviyeli Polimer
GFRP	: Cam Fiber Takviyeli Polimer
H	: Yükseklik
kN	: Kilonewton
LP	: Lifli Polimer
mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal
P	: Basınç
T	: Boru cidar kalınlığı
UTM	: Üniversal Test Makinesi
δ	: Yer değiştirme
θ, α	: Elyaf sarım açısı
ρ	: Yoğunluk
σ	: Gerilme

1. GİRİŞ

Günümüzde FRP (fiber takviyeli polimer) kompozitler diğer adıyla LP (lifli polimer) malzemeler birçok mühendislik alanında olduğu gibi inşaat uygulamalarında; cephe giydirmelerinde, ulaşım sektöründe, köprülerde, zemin iyileştirmeleri ve güçlendirme alanlarında da yoğun olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzeme uzay ve havacılık sektöründen sonra yapı sektörü ve otomotiv sektöründe yoğun olarak ihtiyaca hitap etmektedir. Bu gibi kullanım özellikleri incelendiğinde kompozitlerin uzun yıllardır birçok sorun noktasında çözüm arayışına kolaylık sağladığı gözlenmektedir. Kullanımı yoğun olarak artan ve teknolojinin ilerlemesiyle sürekli geliştirilen kompozit malzemeler yapı teknolojilerinde ve tasarım geliştirme uygulamalarında çözüm elemanı olarak görülmektedir (Hollaway, 2001). Yapı uygulama sektöründe birçok ihtiyaca cevap veren kompozit malzemelerin yapı elemanı olarak yoğun bir şekilde kullanımı artmaya başlamıştır. FRP tipi kompozit malzemeler yapı sektöründe güçlendirme, tamir ve iyileştirme uygulamalarında kullanılmaktadır (Emmons, 1998). Güçlendirme uygulamalarında kirişlerin alt yüzeylerinde ve kolonların tüm yüzeylerinde sarma uygulaması yapılarak güçlendirmeye büyük etkisinin olduğu incelenmiş ve bu uygulamanın yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir (Hadi, 2006; Teng, 2002; Clarke, 2003; Koksal, 2009; Yi, 2001).

Çeşitli üniversitelerde yapılan araştırma ve deney uygulamaları genellikle yapı malzemesi olan betonla birlikte kompozit malzemelerin kullanılmasıyla hibrid çalışmalar sıklık kazanmıştır. Birçok uygulamada içerisi boşluk olacak şekilde tasarlanmış boru ya da kutu FRP malzemeler üzerinde çeşitli kombinasyonlar denenerek bu konuda araştırmalar yapılmıştır (Mirmiran, 1999; Fam, 2001; Becque, 2003; Yu, 2006). Bilimsel ve akademik çalışmaların eğilimi incelendikçe çalışmaların büyük çoğunluğu hibrid uygulamalar üzerinde olacağı gözlenmiştir (Hong, 2002). Bu yapılan çalışmalarda FRP kompozit malzemelerin yapı elemanı olan beton ile birlikte kullanılmasıyla, elde edilen sonuçlar incelenerek avantaj ve dezavantajların kıyaslaması yapılmıştır. Böylelikle yapılan kıyaslamalarla çözümler üretilerek malzemelerin kullanımının yaygınlaştırılması sağlanmaktadır (Schaumann, 2008).

Teknolojinin ilerlemesiyle ihtiyaçlar ve gereksinimler de değişmektedir. Bu sebepten dolayıdır ki malzeme alanında gün geçtikçe yeni ihtiyaçları karşılayacak spesifik özelliklere sahip kompozit malzeme ihtiyacı ortaya çıkmış ve bunun üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Kompozit malzemelerde kendi içinde birçok buluş

yapılmıştır. Özellikle polimer matrisli kompozitlerin hafiflik, yorulma dayanımı, korozyon direnci gibi özellikler açısından metallere karşı üstün olduğu bilinmektedir. Ayrıca üretim yöntemleri açısından filaman sarım gibi oldukça basit yöntemlerde bulunmaktadır ki bu da başlı başına önemli bir avantajdır.

Bu çalışma henüz ülkemizde kolonların çevresel etkilere karşı güçlendirilmesinde kullanılmayan filaman sarım kompozit borular ile betonun sarılması hipotezine dayanmaktadır. Ülkemizde ilk defa filaman sarım kompozit borular ile beton kolonlar güçlendirilecek ve hem dayanım hem de taşıma kapasitesi artırılarak daha fazla yükü daha uzun süre taşıması sağlanacaktır. Kullanılacak filaman sarım kompozit borular ile beton kolonlar daha uzun ömürlü ve dayanımlı olacaktır. Bu sayede kolonlar için sürekli bakım masrafı ortadan kalkacaktır.

Çalışma sonucunda betonarme kolonlarda dış etkiler sonucu oluşacak hasarlar engellenmiş özellikle köprü ayakları ve liman kolonları için bir alternatif sunulacak ve bu yapıların bakım maliyetlerinin azalmasıyla ulusal ekonomiye katkı sağlanacaktır. Bu çalışmadan elde edilen olumlu sonuçlar doğrultusunda ülkemizde üretilen filaman sarım kompozit borular için yeni bir çalışma sahası ortaya çıkacak ve bu filaman sarım kompozit borular ile betonarme kolonların taşıma kapasitesi ve kullanım ömrü artacaktır. Bu sayede daha az donatı ve betonla daha fazla yük taşıyabilen betonlar tasarlanacak ilave olarak daha uzun süre servis hizmeti verecek betonlar üretilecektir. Özellikle liman kentlerindeki kolonlar ve köprü ayakları için alternatif bir malzeme ortaya çıkacaktır. Bu uygulamanın artmasıyla ülkemizde üretilen filaman sarım kompozit boruların başka ülkelere ithali ile de ülke ekonomisine katkı sağlanacaktır.

Bu çalışmada amaç beton kolonlar için filaman sarım kompozit boru kullanarak hem betonun aksenal taşıma gücünü arttırmak hem de betonu dış etkilere karşı korumaktır. Uygulamada kolonların sünekliğini ve sargı etkisini kullanarak taşıma kapasitesini arttırmak için çelik donatılar kullanılmaktadır. Kullanılan çelik donatılar yetersiz pas payı, aşırı rutubet, tuzlu suyun etkisi vb. etkilerden dolayı korozyona uğramaktadır. Bu çalışmadaki amaç kolonun taşıma kapasitesini filaman sarım kompozit borular ile arttırmak hem de betonu dış etkilere karşı koruyarak betonun sürdürülebilirliğini arttırmaktır. Çalışmanın sonucunda filaman sarım kompozit boruların betonunun aksenal basınç dayanımını ve deplasmanını ne kadar arttırdığı tespit edilmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünde genel giriş yapıldıktan sonra ikinci bölümünde konuyla ilgili yapılmış çalışmalardan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde kompozit

malzemeler hakkında genel bilgi verilmiş, kompozit malzemelerin inşaat uygulamalarında kullanımından bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde basınç testinden bahsedilmiş oluşabilecek hasar modları hakkında bilgi verilmiştir. Beşinci bölümde ise kullanılan malzemeler ve numunelerin üretimi hakkında bilgi verilmiştir. Altıncı bölümde üretilen numunelere yapılan basınç testinin sonuçları incelenmiş, karşılaştırılmış ve grafiklerle gösterilmiştir. Yedinci bölümde elde edilen sonuçlar değerlendirilerek sonuç ve öneriler kısmı oluşturulmuştur.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Lifli Polimer (LP) malzemeler ile sargılama sonucunda betonun basınç dayanımında ve buna karşı gelen şekil değiştirmeler de sağlanan artışın belirlenmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar genellikle bir veya birkaç değişken göz önüne alınarak yapılan deneysel çalışmalardır.

İlki ve Kumbasar (2003) deneysel çalışmalarında hasarsız ve hasar görmüş beton numunelerin onarımından sonra, lifli polimer ile güçlendirilmesi sonucu tekrarlı ve monotonik aksenal basınç yükleri altındaki numunelerin performanslarını incelemiştir. Bu çalışmada daire (2002), dikdörtgen ve kare (2003) kesitli numuneler kullanılmıştır. Önceden hasar görmüş ve onarılmış hasarlı numunelerin veya tekrarlı yüklemelerin LP sargılama ile sağlanan dayanım artışını düşürmedikleri görülmüştür. Aynı zamanda araştırmacılar çalışmanın sonucunda lifli polimer ile sarılmış betonun davranış şeklini tanımlayan bir model önermişlerdir. Bu model aksenal basınç dayanımını tanımlayan alternatif iki ifade ve bunlara bağlı oluşan şekil değiştirmeyi tanımlayan bir model ortaya koymuştur.

İlki ve ark. (2004) yaptıkları diğer bir çalışmada ise düşük dayanımlı betonlarda lifli polimer uygulamasının dayanım ve şekil değiştirmeye katkısını incelemiştir. Çalışmadaki numuneler en kesitlerinde farklı derinlik/genişlik oranına sahiptir. Çalışmanın sonucunda derinlik/genişlik oranı arttıkça lifli polimer malzemenin etkisinin azaldığı görülmüş ve dikdörtgen kesitli numunelerde köşe yarıçapının önemi gözlemlenmiştir. Yazarlar yaptıkları deneysel çalışma sonucunda lifli polimer ile sargılanmış betonun gerilme – gerinim ilişkisi için bir ifade önermiştir.

Silva ve Rodrigues (2006) yaptıkları çalışmada 150 mm çapında ve değişken uzunluklara sahip dairesel numuneleri aynı kalınlıkta cam lifli polimer malzemeyle sargılanarak güçlendirilmiş ve basınç testi uygulanarak basınç dayanımı ve birim şekil değiştirme değerleri gözlemlenmiştir. Çalışmada numune uzunluklarının basınç dayanımı ve şekil değiştirme açısından önemli bir etken olmadığı, farklı uzunluklarda elde edilen deney sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, numune çapı büyütüldüğünde basınç dayanımında bir düşüş olduğu belirlenmiştir.

Shahawy ve ark. (2000) çalışmalarında yüksek ve normal dayanımlı betonlar kullanmışlar ve lifli polimer ile sarılmış 45 adet numuneye aksenal basınç testi yapmışlardır. Çalışmada birden beşe kadar farklı lifli polimer katmanları kullanılmış ve esas olarak betonla doldurulmuş cam lifli polimer borular için geliştirilmiş güçlendirme modeliyle bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda sargı malzemesi ile beton arasındaki yapışmanın numunenin güçlendirme davranışını önemli şekilde etkilemediği ve bu nedenle modellerin hem betonla doldurulmuş LP borular için hem de LP ile sarılmış beton elemanlar için kullanılabilmesi gözlemlenmiştir. Aynı zamanda modellerin hem cam hem de karbon LP malzemelerde kullanılabilmesi görülmüştür. Gerçek kopmada uzama değerinin, testlerden elde edilen değerlerin genel olarak altında kaldığı bu çalışmada da gözlemlenmiştir.

Sakino ve ark. (2004), dikdörtgen ve dairesel kesitli, farklı çap-kalınlık oranlarına, farklı çekme dayanımına ve farklı beton dayanımına sahip olan 114 kompozit numune örneği üzerinde basınç testi yaparak, kompozit numunelerin gerilme-şekil değiştirme bağıntılarını incelemiş ve bunun sonucunda bazı ampirik bağıntılar geliştirmişlerdir. Essopjee ve Dundu (2015) çalışmalarında farklı yüksekliğe sahip 32 adet kompozit kolon numunesinde yükleme testleri yapmışlardır. Çalışmada boru et kalınlığı, dış çapı, numune yüksekliği ve dayanımı parametre olarak belirlenmiştir. Bu şekilde, LP malzemeyle sarılmış elemanları çeşitli parametreler altında analiz eden çalışmaların yanında, daha önceden yapmış oldukları çalışma ve araştırmalara dayanarak oluşturmuş oldukları davranış modellerini daha fazla numune örneği üzerinde test eden çalışmaları da mevcuttur.

Ozbakkaloglu (2013) yaptığı çalışmada betonla doldurulmuş FRP tüplerinin aksenal sıkıştırma altında davranışını araştırmak için kapsamlı bir deney programı yürütmüştür. Bu çalışma, seçilen 92 adet dairesel, kare ve dikdörtgen CFFT'nin bir grubundan elde edilen sonuçları sunmakta ve kritik kolon parametrelerinin CFFT'lerin sıkıştırma davranışı üzerindeki etkisini tartışmaktadır. Bu parametreler, beton mukavemetini, miktarını ve FRP tüp malzemesinin türünü, tüplerin imalat yöntemini ve CFFT'lerin boyut ve şeklini içerir. Geleneksel FRP tüplerine ek olarak, FRP takviyeli yeni tip tüpler tasarlanmış ve test edilmiştir. Sonuçlar, beton mukavemetinin, kesit şeklinin ve tüp malzemesinin miktar ve tipinin, CFFT'lerin davranışını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Ayrıca, FRP takviyeli yeni geliştirilmiş kare ve dikdörtgen

CFFT'lerin, geleneksel CFFT'lere göre önemli ölçüde iyileştirilmiş davranış sergilediğini göstermektedir.

Gemi ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada iç basınç altında filaman sarım kompozit boruların yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Filaman sarımlı borular E-cam / epoksi'den yapılmış ± 75 sarım açısına sahip ve iki katlıdır. Yorulma testleri, 0,42 Hz frekans ve $R = 0,05$ gerilme oranını belirleyen ASTM D-2992'ye uygun olarak yapılmıştır. Testler, nihai mukavemet değerinin %30 ile %70 arası farklı yük seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. CTP boruların sızıntı ve sonuç hasarı ilerlemesi gözlenmiş ve bu hasarların oluştuğu S-N eğrileri elde edilmiştir.

Touhari ve Mitiche-Kettab (2016) çalışmalarında aksenal yük altında tutulan CTP sıkıştırılmış beton silindirlerin davranışını araştırmışlardır. 2 tip FRP kompozit sargılı, karbon elyaf takviyeli polimer ve cam elyaf takviyeli polimer içeren toplam 54 FRP beton silindir, monotonik aksenal yükleme altında test edilmiştir. Beton mukavemetinde, FRP kompozit tipi ve FRP tabaka sayısı gibi birçok parametrenin etkileri araştırılmıştır. Basınç dayanımı ortalaması 26, 40 ve 60 MPa olan üç farklı beton karışımı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, CFRP takviyeli silindirlerin GFRP ile güçlendirilmiş olanlara kıyasla, basınç dayanımında önemli bir artış sağladığını göstermektedir.

Ilki ve ark. (2008) çalışmalarında betonarme kolonları, CFRP tabakaları ile sarıldıktan sonra tek aksenli sıkıştırma altında test edilmiştir. Kırk numune, düşük mukavemetli beton ve yetersiz iç enine donatı kullanılarak dökülmüş, 28 numune ise orta mukavemetli beton ve yeterli iç enine donatı ile dökülmüştür. CFRP kılıfının kalınlığı, kesit şekli, beton dayanımı, iç enine donatı miktarı, köşe yarıçapı, iç hacmin varlığı, yükleme tipi, bağlama şekli ve CFRP tabakalarının bu deneysel çalışmanın ana test parametreleri olduğunu göstermiştir. Test sonuçları, CFRP tabakalarına sahip kolonların nihai mukavemet ve süneklikte artışa neden olduğunu göstermiştir. Dairesel kesitli numuneler için mukavemet artırımı daha belirgin olmakla birlikte, kare ve dikdörtgen kesitli numuneler, mukavemette önemli bir kayıp olmadan daha büyük aksenal deformasyonlar sergilemiştir.

Parvin ve Jamwal (2006) çalışmalarında, eksenel yüklü, küçük ölçekli ve FRP sarımlı beton kolonların çeşitli sarma açısı konfigürasyonları, sarma kalınlıkları ve beton mukavemetleri ile performansı nonlineer sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. 3 farklı sargı kalınlığı, 0° , $\pm 15^\circ$ ve $0^\circ/\pm 15^\circ/0^\circ$ lik sarma açısı konfigürasyonları, çevresel yöne göre ve 20 MPa ila 41 MPa arasında değişen beton dayanım değerleri göz önüne alınmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonuçları, FRP-sargılı beton silindirlerin eksenel basınç dayanımı ve sünekliğinin, serbest olmayan silindirlere kıyasla önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Sargı kalınlığındaki artış, aynı zamanda, beton kolonların eksenel mukavemetinin ve sünekliğinin artırılmasına da neden olmuştur.

Youssef ve ark. (2007) çalışmalarında FRP kompozitlerle sargılı beton için bir gerilme-gerinim modeli geliştirmişlerdir. Model, geniş bir dizi sınırlama oranı sağlayan karbon/epoksi ve E-cam/epoksi fiberlerle sarılmış dairesel, kare ve dikdörtgen kısa kolonları içeren kapsamlı bir deney programı içerir. Nihai gerilme, kopma gerilmesi, sarım parametreleri ve kesit geometrisi, FRP sargılı betonun gerilme-gerinim davranışını etkileyen önemli faktörler olarak bulunmuştur. Bu parametreler, deneysel verilere dayanarak istatistiksel olarak analiz edilmiş ve teorik olarak bu parametreleri tahmin etmek için denklemler sunulmuştur.

FRP sargılı beton kolonların boyut etkisi konusunda mevcut literatürde herhangi bir fikir birliği yoktur. Jiang ve ark. (2017) çalışmalarında, agrega büyüklüğünün FRP sargılı betonun gerilme-gerinim davranışı üzerindeki etkisini inceleyerek boyut etkisini irdelemişlerdir. Deneysel testler, farklı agrega boyutlarına ve sabit numune boyutlarına sahip beton silindirler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Agrega boyutu, serbest betonun gerilme-gerinim davranışı üzerinde hiçbir etki göstermez, ancak FRP sargılı betonun gerilme-gerinim eğrisinin geçiş bölgesinde önemli bir etkiye sahiptir. Bununla birlikte, gerilme-gerinim eğrisi ve FRP sargılı betonun nihai mukavemeti üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Deneysel sonuçlara ve Bazant'ın boyut etkisi yasasına dayalı olarak, boyut etkisine izin veren FRP sargılı betonun gerilme-gerinim ilişkisini modellemek için yeni bir yöntem önermişlerdir.

Karbon kompozit boru, geleneksel kolonlar için süneklik ve mukavemet sağlayarak uzunlamasına ve enine çelik donatıların değiştirilmesi veya tamamlanmasında önemli bir rol oynayabilir. Hong ve Kim (2004) yaptıkları çalışmada

karbon kompozit borularla sargılı geniş çaplı dairesel ve kare beton kolonların aksenal davranışlarının hem deneysel hem de analitik incelemelerini sunmuşlardır. Numuneler $90^\circ + 90^\circ$, $90^\circ \pm 60^\circ$, $90^\circ \pm 45^\circ$ ve bir borunun uzunlamasına eksenine göre $90^\circ \pm 30^\circ$ sarım açılarına sahip filaman sarım karbon kompozitlerdir. Büyük ölçekli beton kompozit kolonlar, 10 000 kN üniversal test makinesi (UTM) tarafından uygulanan monotonik aksenal yüklere maruz kalmıştır. Karbon kompozit borularla sargılı kolonların hem mukavemetini hem de sünekliğini belirlemek için önerilen denklemler, büyük ölçekli örneklerden elde edilen test verileriyle iyi bir korelasyon göstermektedir.

Ozbakkalolu ve Oehlers (2008) yaptıkları çalışmada, eş merkezli sıkıştırma altında kare ve dikdörtgen beton dolgulu FRP tüplerinin davranışları üzerine deneysel bir çalışmanın sonuçlarını sunulmaktadır. FRP tüpleri kolon tutturma takviyesi olarak tasarlanmış ve çember yönünde yönlendirilmiş lifleri olan tek yönlü karbon fiber tabakalar kullanılarak üretilmiştir. Tüpün kalınlık ve köşe yarıçapının, kesit en-boy oranının ve beton mukavemetinin CFFT'lerin aksiyel davranışları üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Test sonuçları, FRP sarılmasının hem kare hem de dikdörtgen kolonların sünekliğinde önemli bir iyileşmeye yol açtığını göstermişlerdir.

Bouchelaghem ve ark. (2011) çalışmalarında, tek yönlü karbon fiber/epoksi ve çift yönlü cam/polyester katmanlardan yapılan dış sargılarla takviye edilmiş silindirik beton numunelerin davranışları ile ilgili sonuçları sunulmaktadır. Örnekler, aynı numunenin ardışık yüklemesinden oluşan birinci yük adımı, kolonun bozulmasından önce sonlanan yeni bir tek eksenli sıkıştırma tekniğine tabi tutulmuştur. GFRP ve CFRP kompozitler ile dört tip sargılı numune incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar CFRP takviyeli kolonların güçlendirilmiş GFRP takviyeli olanlara kıyasla nihai basma gerilmesinde önemli bir artış sağladığını göstermektedir. Kompozit katmanlar tarafından sarılmış kolonların hasar mekanizmaları, seçilen takviye kuvvetine bağlıdır. Bu çalışmada önerilen hibrid kompozit sarımlar, aynı zamanda, kullanılan hammaddelerin düşük maliyeti ile birleştiğinde, basınç dayanımı ve maksimum radyal gerilimlerde de dikkate değer bir artış göstermektedir.

Cui ve Sheikh (2010) yaptıkları çalışmayı FRP sargılanmış betonun davranışına dair fikir edinmek için gerçekleştirmişlerdir. Her biri 150 mm çapında, 300 mm yüksekliğinde ve 112 MPa'a kadar beton dayanımı olan toplam 112 silindirik beton

numunesi monotonik tek eksenli basınç altında test edilmiştir. Test değişkenleri FRP'nin miktarı, FRP'nin dayanımı ve sertliği, beton mukavemeti ve güçlendirme sırasında betonun durumunu içerir. Elde edilen sonuçlar, betonarme mukavemeti arttıkça, FRP sarımların kopma mukavemeti, güç emme kapasitesi, süneklik faktörü ve iş (enerji) indeksinin önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Beton sünekliği ve FRP kopma gerilmesi arasında pozitif bir korelasyon bulunmuştur.

Gök (2010) yaptığı çalışmada, farklı su/çimento oranlarında (0,3–0,4–0,5–0,6) ve farklı agrega türlerinde (dere kumu, kaya kumu) hazırlanmış beton silindir numunelerin numune boy değişiminin ve su/çimento oranının betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelemiştir. Çalışma sonucunda su/ çimento oranının betonun basınç dayanımı üzerinde büyük bir etkisinin olduğu görülmüştür. Su/ çimento oranı arttıkça betonda oluşan boşluklardan dolayı mukavemetin azaldığı gözlemlenmiştir. Su/ çimento oranının çok düşük olması durumunda betonda aderansın zayıf olduğu ve yeterli mukavemete ulaşamadığı görülmüştür. Çalışma sonucunda en iyi sonucu su/çimento oranı 0,4 olan numuneler vermiştir.

Öncü ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada, karbon lifli polimer ile güçlendirilmiş beton numunelerin eksenel basınç yükleri altındaki davranışını incelemiştir. Bu nedenle beton dayanımı düşük olan bir binadan alınan örnekler laboratuvar ortamında eksenel basınç yükü altında kırılmıştır. Daha sonra numuneler CFRP ile sargılanarak basınç deneyi uygulanmıştır. Testlerden elde edilen verilere göre, taşıma gücünü kaybetmiş düşük basınç dayanımlı beton numunelerin bile CFRP ile güçlendirilerek dayanıma olumlu bir katkısının olduğu görülmüştür. Betonun eksenel basınç dayanımının yaklaşık iki katına çıkabileceği tespit edilmiştir.

Ertürkmen ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada basınç dayanımı 53.13-74.87 MPa arasında olan beton silindir numuneler çift yönlü karbon lifi kumaş kullanılarak sargılamışlardır. Numunelerin eksenel basınç yükü altında test edilmesiyle CFRP sargının betonun sünekliğine ve basınç dayanımına olan etkileri araştırılmıştır. Sonuçta CFRP sargılı numunelerin basınç dayanımında ve şekil değiştirme kapasitelerinde önemli şekilde artış tespit edilmiştir. Çift kat CFRP sargılı numuneden elde edilen gerilme-gerinim sonuçlarının, modellerden elde edilen değerlerle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Sarıbıyık (2018) yaptığı çalışmada, aynı boyutlarda üretilen silindirik betonların Elyaf Takviyeli Polimer kompozitle güçlendirilmesinde kullanılan sargı katman sayısının, farklı tür elyafın hibrid olarak kullanımı ve elyaf türünün etkisini araştırmıştır. Aynı şartlarda üretilmiş ortalama olarak 30,25 MPa basınç dayanımına sahip beton numuneler, karbon ve cam elyaf kumaşlarla enine doğrultuda bir, iki ve üçer kat halinde sarılmıştır. Ayrıca karbon ve cam elyaf kumaşlar hibrid olarak da sarılarak güçlendirilmiştir. Numuneler aksel basınç yükü altında sabit hızlı yükleme yapılarak test edilmiştir. Elyaf sargı kat sayısının, türünün ve hibrid kullanımının betonun davranışına etkileri karşılaştırılarak incelenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, sargı kat sayısı arttıkça betonun deformasyon kabiliyeti ve basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Ayrıca hibrid olarak güçlendirmenin daha etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Gemi ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada aksel basınç altında $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip filaman sarım cam/epoksi borularla (GFRP) sarılmış betonun dayanımı ve sünekliğini incelemişlerdir. Genleşen ve Portland çimentosu ile üretilen toplam 24 silindirik numune hazırlanmış ve aksel yük altında test edilmiştir. Test sonucunda, GFRP borularla sarılmış betonun basınç dayanımı ve aksel deformasyonu referans numuneye oranla ortalama 2.85 ve 5.57 kat arttığı görülmüştür.

3. GENEL BİLGİLER

3.1. Kompozit Malzemelerin Tanımı

Günümüzde, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte insanların ihtiyaçları artmakta ve bu ihtiyaçların başında ise yeni malzemelerin üretimi gelmektedir. Doğada düşük miktarda bulunan ana malzemeler ve bunlardan üretilen malzemelerin özellikleri teknolojinin ilerlemesiyle birlikte yetersiz kalmaktadır. Tasarımda istenen özellikleri verebilecek elverişli bir malzeme üretmek için, makro boyutta iki ya da daha fazla malzemenin birleştirilmesiyle elde edilen yeni malzeme türüne kompozit malzeme denir. Kompozit malzemeler, kendisini oluşturan malzemelerin üstün özelliklerini gösterecek şekilde, genel olarak matris adı verilen ana yapı ve takviye malzemesinden oluşmaktadır (Kara, 2006). Polimer matrisli bir kompozit yapısında matris malzemesi olarak vinilester, polyester, epoksi türünde reçineler kullanılırken, takviye malzemesi olarak da S-camı, E-camı, aramid ve karbon elyaf türü malzemeler kullanılmaktadır.

Başka bir deyişle iki veya daha fazla sayıdaki malzeme ile yeni bir malzeme tasarımında aranan özellikleri sağlayacak daha iyi bir malzeme oluşturmak amacıyla makro seviyede birbiri içinde çözünmeyecek şekilde birleştirilmesi sonucunda ortaya çıkan malzemeye kompozit malzeme denmektedir. Kompozit malzeme üretilmesiyle; hafiflik, tasarım esnekliği, yüksek dayanım, aşınma direnci, yüksek sıcaklık kapasitesi, yüksek rijitlik, iyi korozyon direnci, tasarım esnekliği, estetik görünüm ve iyi ısı iletkenliği gibi özellikler sağlanabilmektedir. Bütün bu özellikler birlikte oluşmaz ve herhangi bir uygulamada böyle bir gereksinime ihtiyaç duyulmaz. Özellikleri bilinen bileşenlerden faydalanılarak, kompozit malzemenin bilinen bazı özellikleri (elastiklik modülleri, çekme dayanımları, yoğunluk vb.) hesaplanabilir (Gemi, 2004).

Kompozit malzeme üretilmesinde kullanılan malzemelerin özelliklerinden faydalanılarak üretilen yeni malzemenin bazı özellikleri (elastiklik modülleri, çekme dayanımları, yoğunluk vb.) hesaplanabilir. Tasarımda istenilen özelliklerin sağlanmasıyla; denizaltılar, uzay ekipmanları, uçaklar ve malzeme özellikleri kritik önemde olan birçok tasarım elemanı kompozit malzemedan üretilmektedir.

Kompozit malzemeler matris ismi verilen ana bileşenle, yüksek elastiklik modülüne ve yüksek mukavemete sahip takviye edici (parçacık, elyaf, vs.) olarak isimlendirilen yapısal bileşenlerden oluşurlar. Matris yapısı, kompozit malzemelerin içerisinde takviye elemanı olan elyafları bir arada tutmayı sağlar, yani bağlayıcı olarak

görev yapar. Matris yapısının amacı takviye malzemesini korumak, desteklemek ve gerilmeleri üzerine transfer etmektir. Matrisin; yoğunlukları, mukavemetleri, rijitlikleri elyaflara oranla daha düşüktür. Bununla beraber elyaflarla birleştikleri zaman daha yüksek rijitlik özelliği olan ve daha mukavemetli bir malzeme oluşur (Şahin, 2004).

Kompozit malzemeler yeni bir saha olup II. Dünya savaşı sırasında mevcut konvansiyonel malzemeler tek başlarına teknoloji karşısında gereksinimlere cevap veremez duruma gelmesi ile kullanılmaya başlanmış ve o andan itibaren bu malzemelerin mekanik özellikleri ve üretimi üstüne araştırma ve geliştirme faaliyetleri artarak devam etmiştir.

Bu malzemelerin üretiminde birçok üretim yöntemi kullanılmaktadır. Bunlardan biride filaman sarım metodudur. Bu metotla çok farklı çeşitlerde ürünler üretilebilmektedir. Bu ürünlerden biri de; yüksek mukavemetli, yüksek sıcaklık ve düşük yoğunluk özelliğine sahip alternatifsiz bir malzeme olan cam/epoksi kompozit borular, özellikle savunma sanayi, uzay ve havacılık alanlarında ve diğer endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Aynı zamanda kafes kiriş sistemli yapılarda, askeri amaçlı köprü, launcher, lav, roketatar vb. silahların namlu yapımında depolama tankları, uçak, helikopter, rüzgar türbini kanatları, roket motor boruları, yapı elemanları, spor malzemeleri, miller, tork çubukları, pnömatik-hidrolik silindirler, elektrik izolatör gövdeleri üretimi gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Bu sayede; gerek endüstriyel amaçlı kullanım için gerekse savunma sanayisinde kullanım için, bu tür malzemelerin mekanik özelliklerinin, özellikle inşaat sektöründe güçlendirilmiş kolonlar için eksenel yükleme şartlarında hasar davranışlarının bilinmesi farklı kolon ve kirişlerin güçlendirilme tasarımı açısından çok önemlidir.

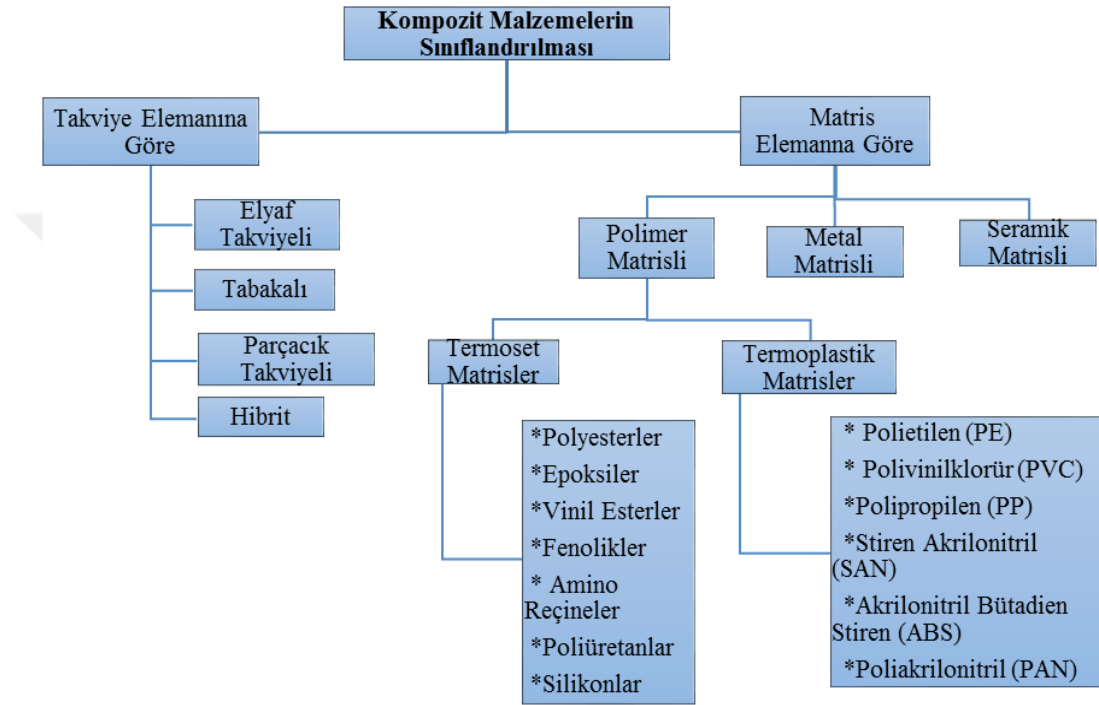
3.2. Matris Malzemeleri

Kompozit malzeme yapısında elyafları bir arada tutmak, malzemeye gelen yükü elyaflara aktarmak ve elyafları çevresel etkilere karşı korumak maksadıyla matris malzemesi kullanılmaktadır. Matris malzemesi ilk olarak düşük viskoziteli bir yapıdayken daha sonra elyafları uygun ve sağlam biçimde çevreleyebilecek katı forma kolayca geçebilmelidir.

Elyaf yönlenmesine dik doğrultuda, matris yapısının mekanik özellikleri ve matris ile elyaf arasındaki bağ (ara yüzey) kuvvetleri, malzemenin mukavemetini

belirleyen önemli etkenlerdir. Matris elyafa göre daha esnek ve zayıftır. Bu özellik kompozit malzemelerin tasarımında dikkate alınması gereken bir etkidir (Gemi, 2014).

Kompozit malzemeler takviye ve matris elemanına göre sınıflandırılarak, Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Kompozitlerde seramik, polimer ve metal esaslı matrisler kullanılmaktadır. Polimer esaslı matrisler termoplastik ve termoset matrisler şeklinde iki çeşit olarak bulunurlar.



Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Yılmaz, 2018)

3.2.1. Termoset malzemeler

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde genel olarak; epoksi, polyester, silikon ve fenolik reçine termoset matris malzemesi olarak kullanılır. Termoset plastikler sıvı olarak bulunurlar, kimyasal tepkimelerle ve ısıtılarak sertleşir ve sağlamlaşırlar. Termosetler termoplastiklerden farklı olarak geri dönüşemeyen matris malzemeleridir. Çok yüksek sıcaklıklarda bile yumuşamazlar. Çoğu termoset matrisin sertleşmemesi için dondurulmuş şekilde depolanmaları gerekmektedir.

Havacılık ve uzay gibi hafifliğin kritik öneminin olduğu ve yüksek dayanım beklenen yerlerde genel olarak epoksi reçine kullanılmaktadır. Polyester reçine gibi daha ucuz bir reçineye tercih edilme nedenleri, daha üstün yorulma dayanımı, ısı

dayanım, mekanik özellikler, sertleşme esnasında düşük çekme oranı ve takviye malzemesine iyi yapışma şeklinde sıralanabilir.

Epoksi reçinesi, epoksit grubunun polimerizasyonu sonucunda elde edilir. Birbirinden farklı formüller kullanıldığı zaman özellikleri değiştirilebilir. Çok farklı epoksiler geliştirilmiştir ve doğru bir seçim yapmak oldukça önemlidir. Kullanılan sertleştiricinin türü, oluşan yeni malzemenin özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Reçinenin homojen şekilde sertleşmemesi, gerilmeli korozyon olayında reçinenin değişik tepkiler vermesine neden olmaktadır. Sertleşme yaklaşık bir saat kadar olup 127 °C ve 177 °C sıcaklıklarında ve genel olarak basınç altında gerçekleştirilmektedir. Ayrıca epoksilerin 250 °C 'ye kadar ısıl kararlı çeşitleri de geliştirilmiştir. Sertleşme anında kendini çekme sorunu olmaz. Dayanımları oldukça yüksektir, birçok elyaf ile güçlü bir bağ oluştururlar ve kimyasal dayanımları da yüksektir (Kara, 2012).

3.2.2. Termoplastik malzemeler

Oda sıcaklığında katı halde bulunan termoplastikler, sıcaklığın artırılması ile erir ve viskoz bir yapıya dönüşürler. Soğutulduklarında ise katılaşırlar. Herhangi bir sertleştirme işlemine gerek yoktur. Termoplastikleri termosetlerden ayıran en önemli özellik; termoplastikler tekrar tekrar ısıtıldıkları zaman yapılarında bir bozulma olmaz, tekrar kullanılabilirler. Yani geri dönüşüm için uygun malzemelerdir. Bu özellik, özellikle parça maliyetinin yüksek olduğu üretimlerde çok büyük avantaj sağlamaktadır. Termoset malzemelerde ise bu şekilde geri dönüşüm sağlanamaz, tekrar ısıtma işlemi yapıldığı zaman yapıları bozulur ve yanarlar (Sönmez, 2009).

3.3. Takviye Malzemeleri

Elyaf lar kompozit malzemelerde en fazla kullanılan takviye malzemesidir. Elyaf lar uzunluğu çaplarından çok daha büyük olan malzemelerdir. Kompozit malzeme yapısında elyaf ların en önemli özelliği yükü taşımalarıdır. Elyaf lar, kompozit malzemeye dayanımın yanı sıra rijitlik de sağlarlar. Kompozit malzemelerdeki sürekli elyaf lara filaman ismi verilir. Elyaf ların geometrik şekli dikdörtgen prizması halinde ise yani kesit alanı dikdörtgen ise, dikdörtgen kenarlardan biri diğerinin dört katından fazla olursa bu şekil elyaf lar şerit olarak adlandırılır (Kara, 2012).

3.3.1. Cam elyaflar

Cam elyaflar, kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak fazlaca kullanılan ve ucuz olan elyaf malzeme türüdür. Cam elyafların genel olarak dayanım/ağırlık oranları yüksektir. Alüminyum alaşımlara kıyasla elastisite modülü yüksek olurken, aramid ve grafit elyaflara oranla daha düşüktür. Metallerin rijitlik/yoğunluk oranı, cam elyafı güçlendirilmiş plastiklerin rijitlik/yoğunluk oranına kıyasla daha yüksektir. Cam elyaflar yüksek kimyasal dirence sahiplerdir.

Cam elyaflar kimyasal bileşimlerine göre; C, E, D ve S camı olarak adlandırılmaktadır. Çizelge 3.1'de E camı ve karbon elyaflarının özellikleri gösterilmiştir (Gemi, 2014).

Çizelge 3.1. E camı ve Karbon elyafların özellikleri
(Cam Elyaf San. A.Ş. 2011, AKSA Karbon Elyaf San. A.Ş. 2011)

Özellikler	E camı	Karbon (12K A-42)
Yoğunluk, ρ (g/cm ³)	2,6	1,75
Elastiklik modülü, E (GPa)	73	230
Çekme dayanımı, σ (GPa)	2,4	3,5
Çekme uzaması, (%)	4	1,5
Özgül modül, E/ ρ ((MN/m)	28	131
Özgül dayanım, σ/ρ (MN/m/kg)	0,93	2

3.2.2. Karbon elyaflar

Karbon elyaf, gelişmiş polimer matrisli kompozitlerde takviye için en yaygın olarak kullanılan yüksek performanslı bir malzemedir. Karbon elyaflar, yüksek özgül modül ve özgül mukavemete sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda yüksek çekme modülü ve yüksek mukavemetlerini korurlar. Oda sıcaklığında karbon fiberler nem, çok çeşitli çözücüler, asitler ve bazlardan etkilenmezler. Bu elyafları içeren kompozitler yüksek mühendislik özellikleri sergilerler. Nispeten ucuz ve ekonomik elyaf ve kompozit üretim süreçleri geliştirilmiştir. Karbon fiber takviyeli polimer kompozitler günümüzde; spor ve eğlence araçları (olta, golf kulüpleri), elyaf sargılı roket motor gövdeleri ve basınçlı kaplarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Hem askeri hem ticari sabit kanatlı uçakların yapısal bileşenleri ile helikopterlerde (kanat, gövde, stabilizatör, ve dümen bileşenler gibi) kullanımı mevcuttur.

Karbon elyaflar; hazırlandığı maddeye bağlı olarak iki gruba ayrılmaktadır. Petrol türevlerinden üretilen zift esaslı elyaflar; genel olarak dayanım dışı amaçlarda kullanılırlar. Takviye malzemesi olarak genelde polyacrylonitrileden (PAN) üretilen fiberler kullanılır. Bu grup içerisinde yüksek dayanımlı elyaf türleri vardır. Karbon elyafların tasarım malzemesi olarak kullanılmaya başlanmasıyla, çok yüksek dayanımlı türleri üzerine yoğunlaşmaktadır. Karbon elyaflar; grafit tabakalarında karbon atomları arasındaki güçlü kimyasal bağ sebebiyle yüksek çekme dayanımı ve elastiklik modülüne sahiptirler. Grafit tabakalarının, elyaf eksenine paralel yönlendirildiği durumlarda yüksek dayanım değerlerine ulaşılır (Gemi, 2014).

3.4. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozitler bilinen en eski kompozit malzeme şeklidir. Tabakalı kompozit malzemeler en az iki değişik levha malzemesinin tabakalar şeklinde dizilerek oluşturduğu malzemeler olarak bilinir. Ayrıca, tabakalar halinde olması yapıdaki her bir tabakanın ayrı kompozit olmasına olanak sağlamaktadır. Tabakalı kompozitlerin standartlaştırma, üretim, tasarım ve kontrolü diğer kompozitlerden çok daha kolay olmaktadır. Tabakalı kompozitlerde bazı özel ihtiyaçları karşılamak maksadıyla birden fazla tabaka birlikte kullanılabilir. Bu malzemelere sandviç malzeme de denir. Bu tabakalama işlemiyle kompozit yapının aşınma direnci, mukavemeti, ısı yalıtımı, rijitlik özellikleri iyileştirilebilir.

Tabakalı kompozitler en az iki tabakadan oluşan malzemelerdir. Ancak, mekanik özelliklerin ve dayanımın önem taşıdığı durumlarda, malzemenin bu özellikleri taşıyabilmesi için tabaka sayısı üç veya daha fazla olmalıdır. Tabakaları oluşturan bu malzemeler farklı tür malzemedan oluşabileceği gibi aynı tür malzemelerden de oluşabilmektedir.

Tabakalı kompozitlerin üretiminde, genellikle tabaka niteliğindeki her çeşit malzeme kullanılabilir. Bunda ilke, birbirlerinin özelliklerini olumlu yönde etkileyecek bir kompozisyonun oluşturulmasıdır.

Tabakalı kompozit malzemelerin üretiminde farklı türden (hibrid) veya tek bir türden malzeme kullanılabilir. Tabakalı kompozit malzemeleri üretimde kullanılan malzemelerin çeşitlerinden yola çıkarak, tek tür malzemelerin kullanımıyla

oluşan tabakalı kompozit malzemeler ve farklı malzemelerin kullanılması ile oluşan tabakalı kompozit malzeme şeklinde iki grupta toplanabilir (Kara, 2012).

3.4.1. Polimer esaslı tabakalı kompozit malzemeler

Çeşitli polimer esaslı malzeme katmanlarının bir arada kullanılması ile farklı türde kompozit malzemeler üretilebilmektedir. Cam elyaf veya asbest elyaf dokumalara, silikon emdirilmesi ile yüksek sıcaklıklara dayanabilen tabakalı kompozit malzemeler oluşturulabilmektedir. Ayrıca naylon ve cam elyaf dokumalar çeşitli reçine türleriyle tabakalar şeklinde birleştirilerek; çok hafif, çarpmaya, herhangi bir nesnenin batmasına veya buna benzer etkilere dirençli kompozit malzemeler üretilmektedir. Bu kompozit malzemeler çeşitli kalkan, zırh ve benzeri elemanlarda da kullanılabilir. Polimer esaslı tabakalı kompozitlerin çok değişik türleri bulunmakta ve farklı alanlarda kullanılmaktadır.

3.5. Kompozit Malzemelerin Sağladığı Avantajlar

Yüksek mukavemet: Kompozit malzemeler yüksek mukavemet sağlayan malzemeler içerisinde en etkin olanlardan biridir.

Hafiflik: Kompozit malzemeler birim alan ağırlığında hem metallere hem de takviyesiz plastiklere oranla daha yüksek mukavemet değerleri sağlamaktadır.

Boyutsal stabilite: Çeşitli çevresel ve mekanik baskılar altında termoset kompozitler işlevselliklerini ve şekillerini korumaktadırlar.

Tasarım esnekliği: Kompozit malzemeler bir tasarımcının aklına gelecek her türlü fonksiyonel, karmaşık, küçük, geniş, basit, estetik, yapısal veya dekoratif amaçlı tasarlanabilir.

Korozyon dayanımı: Kompozit malzemelerin antikorozyon özelliği diğer malzemelerden üstün olan niteliklerinden biridir.

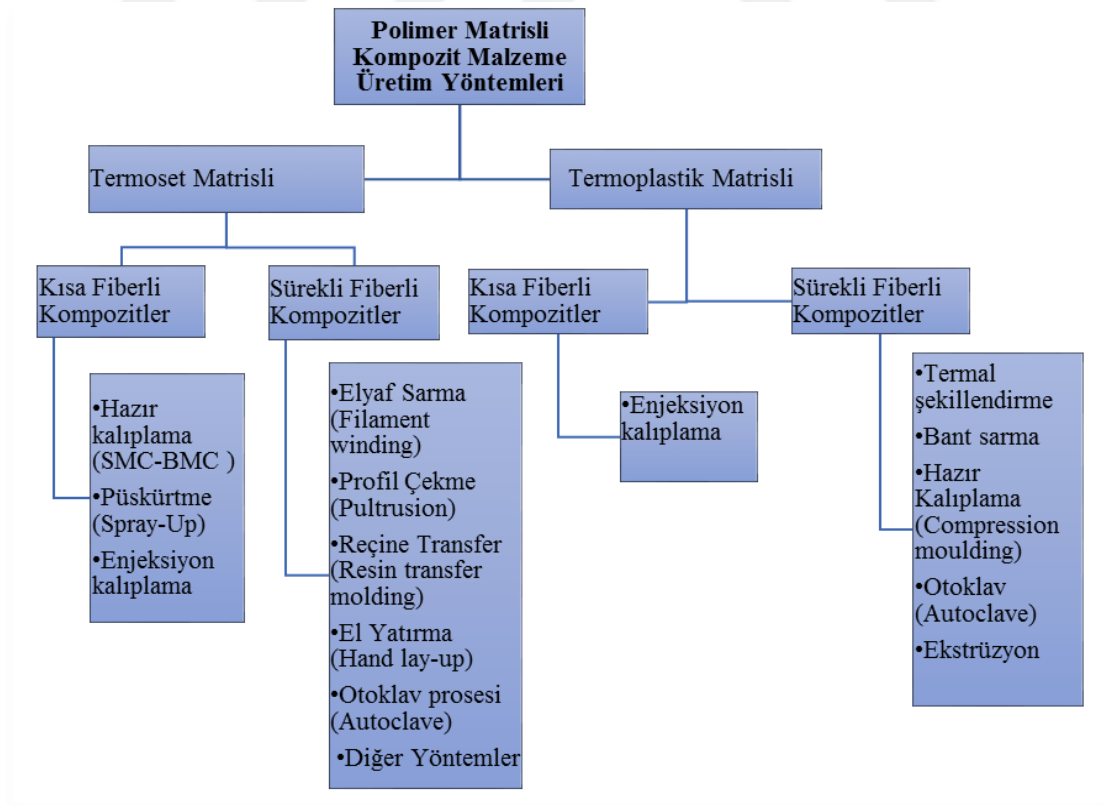
Beton yüzeylere uygulama imkanı: Kompozitler beton yüzeylere mükemmel yapışır. Betonun gözenekli olması sebebiyle, kompoziti oluşturan ana yapıdan polyester

reçinesinin beton gözeneklerinden sızması ve beton kütlesi içerisinde sertleşmesinden dolayı iyi bir yapışma sağlanmaktadır.

Yanmazlık özelliği: Kompozit malzemelerin alev dayanımı, kullanılan polyester reçinenin özelliklerine bağlıdır. Alev karşı dayanım özelliğinin arandığı yerlerde “Alev dayanımlı” polyester reçine kullanılmalıdır.

3.6. Kompozit Üretimi

Kompozit malzemelerin üretim metodu; üretilecek ürünlerin biçimlerine, malzeme bileşenlerinin özelliklerine, ürünün boyutlarına, son kullanımlarına ve mühendislik detaylarına bağlı olarak seçilir. Üretimde kullanılacak matris türleri, üretim prosesinin seçiminde önemlidir. Polimer matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri matris elemanına göre termoset ve termoplastik matris olmak üzere iki kısımda incelenir. Şekil 3.2.’de üretim yöntemlerini şematik olarak görebiliriz. (Sinha, 2006).



Şekil 3.2. Kompozit malzeme üretim yöntemleri (Mazumdar, 2002)

3.6.1. Filaman sarım yöntemi

Filaman sarım tekniği; sürekli takviye elemanlarının dönel bir mandrel yani kalıp üzerinde sarılması ile kompozit malzeme üretiminin gerçekleştirildiği, kompozit üretim metotları içinde basit sayılabilecek bir üretim metodudur. Özel tasarlanmış sargı makineleriyle mandrel (kalıp) ve kafa dönüş hızları ayarlanarak istenen sarım açılarında üretim yapılmaktadır. Şekil 3.3'de filaman sarım prosesi gösterilmektedir. Sarım birbirine yapışık bantlar şeklinde ya da tekrarlanan desenlerin tüm mandreli (kalıbı) kaplaması şeklinde gerçekleştirilir. İstenen kalınlığa ulaşılan kadar birbirini takip eden katmanlar aynı veya farklı sarım açılarında sarılmaktadır. Sarım açıları mandrel (kalıp) boyuna doğru 25° gibi düşük sayılan açılardan mandrel eksenine dik açığa kadar değişebilmektedir. Genel olarak elyaf arasındaki yapışmayı sağlayan reçine olarak termoset reçine kullanılmaktadır. Yaygın şekilde kullanılan ıslak sarımda, yapıştırıcı reçine sarım esnasında uygulanmaktadır. Alternatif yöntem olan kuru sarımdaysa, önceden reçine emdirilmiş, prepreg elyaf/reçine sistemleri kullanılmaktadır. Sarım işlemi bittikten sonra, parçalar yüksek sıcaklıklarda fırınlanmaktadır. Üretim prosesi, mandrelin çıkarılmasıyla sonlanır. Gerekli görülen hallerde parçanın üzerinde talaşlı imalat teknikleri uygulanabilmektedir. Üretim prosesinin; malzeme kombinasyonlarına, parça tipine, cihazlara ve tasarım özelliklerine bağlı olarak birçok şekli bulunmaktadır. Filaman sarım metodu ile üretilen malzemeler genel olarak silindirik yüzey şeklindedirler, bazı özel durumlarda birtakım sınırlamalar ile asimetric şekillerde üretilebilmektedirler. Parçalar, birkaç santimetreden metre boyuna kadar değişkenlik gösterebilen silindirler, tüpler ve borular olabilir. Küresel veya konik şekiller özel uygulamalarla üretilebilmektedir. Depolama tankları ve basınçlı tanklar da bu metodun yaygın uygulamalarındandır. Malzemeler, maruz kalacakları yüklere ve kullanılacakları alanlara göre özel tasarlanırlar. Ayrıca gerekli görülen hallerde kombinasyonlu üretimler de yapılabilmektedir. Bunlara örnek olarak ince metal basınçlı kap üzerine ve termoplastik boru üzerine sarım uygulamaları verilebilir.



Şekil 3.3. Kompozit boruların filaman sarım tezgahında üretimi (Gemi ve ark., 2018)

Filaman sarım metodunda neredeyse her türde sürekli elyaf kullanılabildiği halde filaman sarım yöntemi, esas olarak cam elyafı bir sarım yöntemidir. Grafit, Kevlar49 ve aramit gibi elyaflar, yüksek elastiklik modülü ve özgül dayanım gerektiren uzay ve havacılık alanlarında kullanılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan başlıca reçineler; epoksi reçine, vinilester ve polyester reçine olarak özetlenebilir. Filaman sarım makinelerden tamamen bilgisayar kontrollü üç veya dört eksenli makinelere kadar birçok çeşitleri bulunmaktadır.

Filaman sarım metodu ile üretilen boruların üretim parametreleri oluşan kompozit yapının özelliklerini büyük oranda etkilemektedir. Özellikle elyaf gerginliğinin az olması, reçinenin homojen olarak sertleşmemesi ve elyafların homojen dağılmaması nihai ürünün özelliklerini olumsuz etkileyen faktörler olarak sayılabilir (Şahin, 2004).

3.7. Kompozit Malzemelerin İnşaat Uygulamaları

Günümüzde inşaat pazarında bulunan çok çeşitli modern kompozit malzemeler ve ürünler, sektöre hem yapısal hem de yapısal olmayan endüstriyel yapı elemanlarında

kullanabilmek için çok sayıda kullanışlı olanaklar sunmaktadır. Modern kompozit malzemelerin temel avantajları: korozyon direnci, yoğunluğu, mukavemeti, kabul edilebilir şekil değiştirme kabiliyetleri, özel dizaynı ve mükemmel şekillendirilebilirlik ile karşılaştırıldığında modüler değerler, yeni elemanların imal edilmesine ve mevcut malzemelerin geleneksel malzemeye oranla yapısal iyileştirilmesine olanak tanır. Yeni endüstriyel yapılarda polimerik kompozitlerin uygulanabilirliğinin yüksek potansiyeli, modern güçlendirme solüsyonlarında kompozitlerin kullanımı ile birlikte üretim prosedürleri ile bağlantılı olarak sunulmaktadır.

3.7.1. FRP kompozit malzemelerinin yapılarda kullanımının incelenmesi

FRP'ler lif eksenine paralel olan çekme kuvvetlerini karşılayabildikleri için uygulamanın yönü önemlidir. Çift yönlü tabakalar halinde uygulandığında kirişlerde kesme ve eğilme dayanımının, kolonlarda sargılama ve eğilme etkisiyle basınç dayanımının artması mümkündür. Bu malzemelerin arasında en yaygın olarak kullanılanlar GFRP ve CFRP kompozitlerdir. Farklı durumlar için, değişik mekanik özelliklere sahip olan malzemelerden birinin kullanılması diğerlerine göre uygun olabilmektedir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. FRP kompozit malzemelerin güçlendirme işleminde kullanılması (Anonim, 2019a)

Fiber takviyeli polimer kompozit malzemeler inşaat altyapısında son zamanlarda sıkça kullanılmaktadır. Çubuk ve kiriş yapı elemanlarını güçlendirmesinde ve

kolonların sarılmasıyla iyileştirme alanında kullanılmaktadır. FRP kompozit malzemeler yapı malzemeleri ile hibrid olarak kullanılmasıyla tamamen kompozit profil malzemelerden oluşmuş sistemlerin bulunduğu uygulama alanlarında da görülmektedir (Karbhari 2004).

Epoksi, fiber matrisinden oluşan CFRP plakalar (Karbon Fiberle Güçlendirilmiş Polimerler) çelik plakaları her türlü fiziki değerde geride bırakmaktadır. Düşük uzama ve sünme gösterirler ve çeliğe kıyasla hafif, ince ve çekme dayanımları 5-10 kat daha yüksektir.

3.7.1.1. Güçlendirme sistemi olarak FRP kompozit

Kompozit güçlendirme sistemi betonarme yapılara dıştan uygulanan bir güçlendirme yöntemidir. Güçlendirmenin maliyetleri hesaplanırken estetiğin bozulması, kullanımın kısıtlanması, bakım masrafları, uzun ömürlü olup olmadığı hesaba katılmalıdır. Yaygın olarak kullanılan FRP malzemeler: cam, aramid, keklar ve karbon olmak üzere 4 gruba ayrılırlar. Bu malzemeler düşük ağırlığa sahip olmalarına rağmen antikorozyf özelliklere, çok yüksek mukavemetlere, yüksek fiziksel ve mekanik değerlere sahiptirler. Bu malzemelerin kullanılmasıyla yapı elemanının yük taşıma kapasitesinin geri kazandırılması veya artırılması hedeflendiği için bir onarımdan çok güçlendirme uygulamasıdır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Köprü kolon ve ayaklarının FRP kompozit malzeme ile güçlendirilmesi (Anonim, 2019b)

İncelenen bazı kompozit köprüler tamamen FRP kompozit malzemesinden imal edilmiş olması yanı sıra güçlendirme amaçlı yapı malzemeler ile birlikte kullanılmaları günümüzde FRP malzemelerin yoğun kullanıldığının ispatıdır. Ahşap, tuğla, betonarme, çelik gibi yapı malzemeleri ile birlikte kullanılan FRP kompozit malzemeler kullanımı sonrasında gösterdiği performansla diğer malzemelerle ne kadar uyumlu çalıştığını göstermektedir (Halliwell, 2004).

Karbon fiber adıyla bilinen bu malzeme; yüksek mukavemetli, hafif, liflerin dizilim yönleri değiştirilerek mukavemeti ayarlanabilen, çelik ve betonun giremeyeceği yerlere girebilen, uygulaması hızlı ve pratik, ince, uzun ömürlü, korozyona dayanıklı yeni nesil malzemelerdir.

3.7.1.2. FRP kompozitlerin kolonlarda kullanımı

Lifli polimer malzemelerin betonarme kolonlarda onarım ve güçlendirme amaçlı kullanımı son yıllarda yaygınlaşmış olup bu yöntemin köprü ayaklarında ve binalarda kullanılabilir pratik bir metot olduğu araştırmacılar tarafından gösterilmiştir. Deprem etkisi altındaki kolonlarda lifli polimerle sargılama, kolon yanal yük ve yanal rijitlik kapasitesinde yüksek bir artış olmadan deplasman istemlerini karşılayabilmeye imkân vermektedir. Dış cephe görünümünde bozulmanın istenmediği durumlarda yalnızca içeriden yapılan CFRP uygulamalarında fiber ankrajlarda kullanılarak kompozit malzemelerin duvarlarla beraber çalışması sağlanabilmektedir. Bu tip uygulamalarda amaç genellikle yapının deprem esnasında komple çökmesini engellemek ve can güvenliğini sağlamaktır. Özellikle sarma uygulaması yapıldığı takdirde yapının yük taşıma kapasitesinde ciddi miktarda artışlar elde edilebilmektedir (Şekil 3.6).



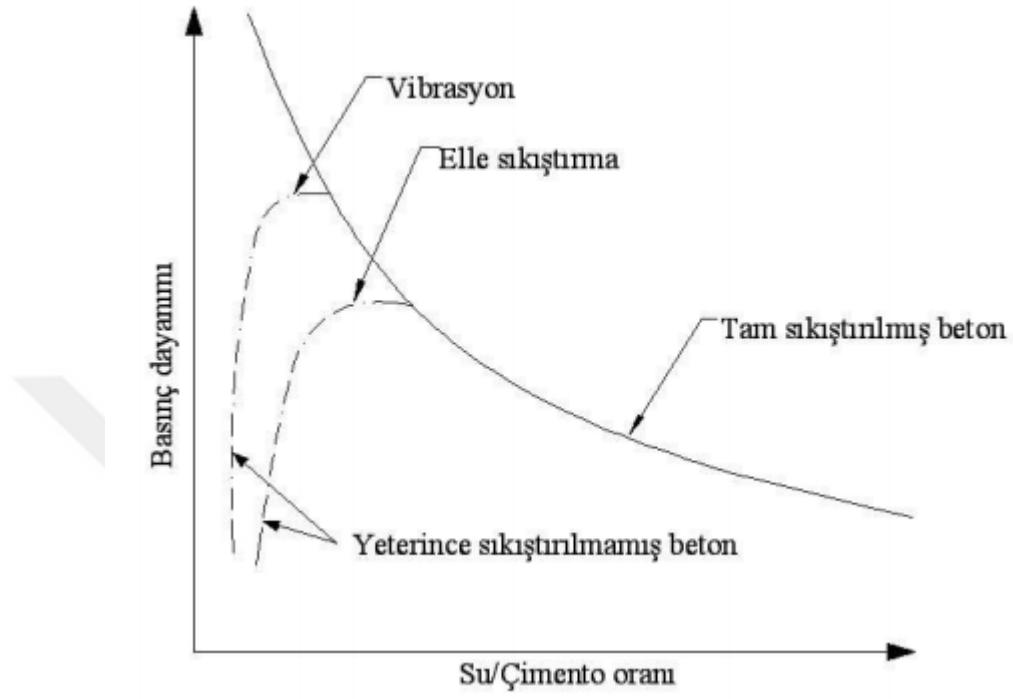
Şekil 3.6. FRP kompozit malzemelerin kolonlarda kullanılması (Anonim, 2019c)

3.8. Su/ Çimento Oranının Betonun Basınç Dayanımına Etkisi

Beton içerisinde bulunan karışım suyunun miktarı beton mukavemetine tesir etmektedir. Karışım suyu beton bileşiminde olan iri agrega ve kum taneciklerini ıslatır ve bağlayıcı olan çimento ile reaksiyona girerek bu maddelerin hidrasyonunu sağlar. Beton karışımında kullanılan su miktarı arttıkça, daha yüksek kıvama sahip beton oluşmaktadır. Öte yandan su miktarının çok yüksek olması durumunda, elde edilen beton yüzeyinde petekleşme gözükmemekte, yani betonun yüzeyinde istenmeyen büyüklükte gözenekler oluşmaktadır.

Karışımında yeterli miktarda suyun olmaması halinde, çimentonun hidrasyonu tam anlamıyla yapamayacağı yani agrega tanelerinin yüzeyleri tam olarak ıslanmayacağından, çimento ile agrega tanesi arasındaki bağın zayıf olacağı ve betonun yeterli dayanıma ulaşamayacağı bilinmektedir. W/C (su/çimento) oranının beton mukavemetine etki eden en önemli faktörlerden biri olduğu araştırmalar sonucu kabul edilmiştir. Su/çimento oranı yükseldikçe, beton içerisinde yer alan boşluk miktarı daha çok olmakta ve daha düşük beton dayanımı oluşmaktadır. Su/çimento oranı azaldıkça, beton dayanımı artmaktadır. Ancak su/çimento oranındaki azalma çok olduğu takdirde

böyle bir betonu tam olarak sıkıştırmak zor olmakta ve bu sebeple beton dayanımı düşük çıkmaktadır. Su/çimento oranının betonun basınç dayanımına etkisi Şekil 3.7.'de gösterilmektedir (Gök, 2010).



Şekil 3.7. Basınç dayanımı – Su/çimento oranı ilişkisi

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Kompozit Boruların Üretimi

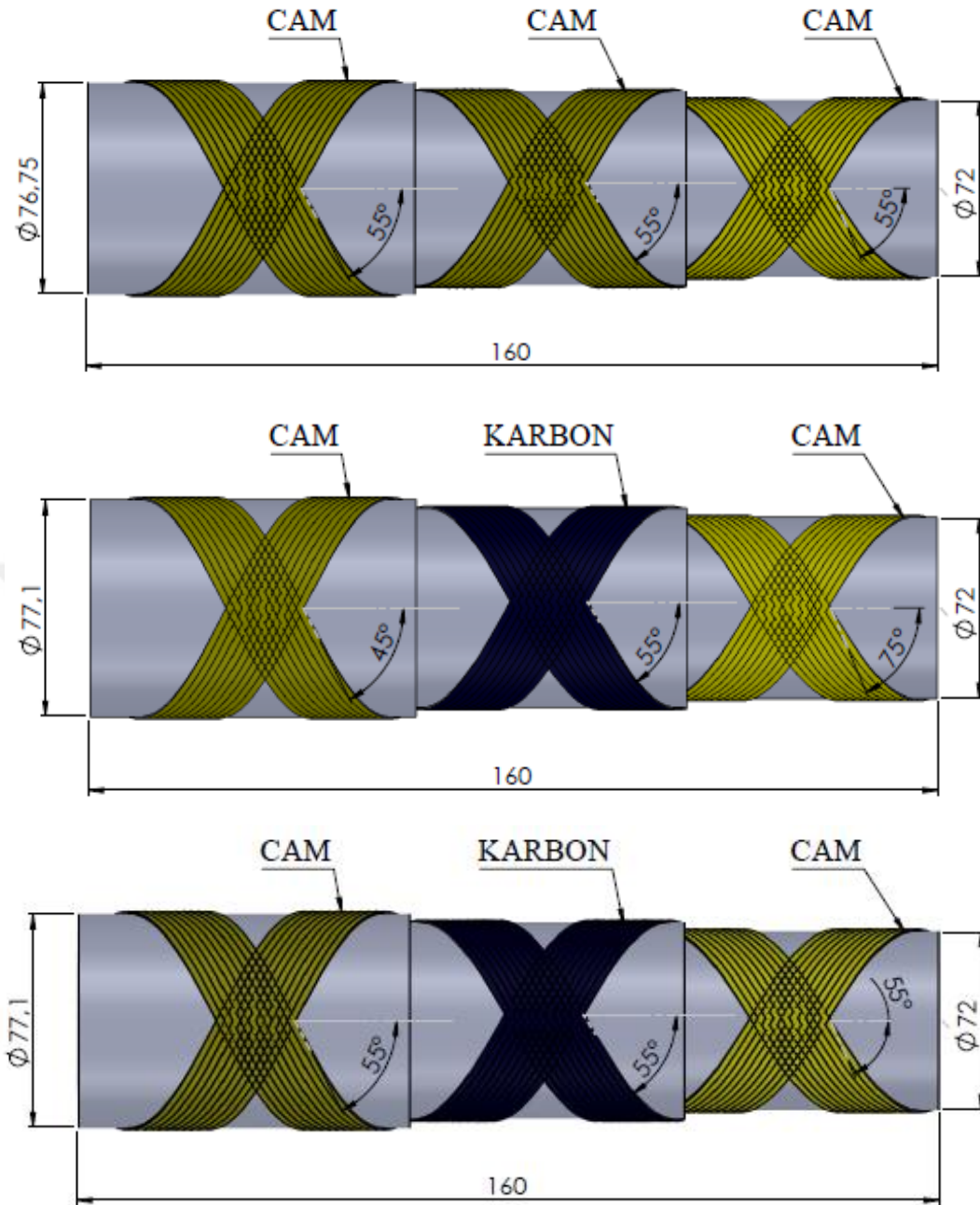
Bu çalışmada kullanılan $\pm 55^\circ$ E-camı/epoksi, cam-karbon elyaf/epoksi boruların hazırlanmasında, elyaf malzemesi olarak Cam Elyaf San. A.Ş. 1200 teks (17 μm çapında) E camı ve Aksa Karbon Elyaf San. A.Ş. 12K A-42 800 teks karbon elyaf, matris malzemesi olarak da Momentive, Bisphenol A, Epikote 828 reçine kullanılmıştır. Sertleştirici olarak Epikure 875 (Curing agent, Modified Carboxylic Acid Anhydride) kullanılmıştır. Üretimde yaş sarım metodu kullanılmıştır. Elyaf lar bir reçine banyosundan geçirilmiştir. Sarım işlemi başlamadan önce sarım esnasında soğuk mandrel in reçine sıcaklığını düşürmemesi için mandrel 60°C ye ısıtılmıştır. Reçine banyosunda reçine karışımın sıcaklığı 60°C de kontrol altında tutulmuştur. Mandreller in üzerine QZ-13 kalıp ayırıcı malzeme sürülmüştür. Kür işlemi ise 2 saat 135°C ve 2 saat 150°C de yapılmıştır. Üretim in yapıldığı malafa çapı 72 mm'dir. Sarım işlemi sonunda 1 m uzunluğunda, ortalama 77.1 mm çapında ve 6 tabakalı borular elde edilmiştir. Bütün bu işlemler cam/cam/cam istifleme sırasında $\pm 55^\circ/\pm 55^\circ/\pm 55^\circ$ sarım açılı cam borular, cam/karbon/cam istifleme sırasında $\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$ sarım açılı hibrid borular ve aynı işlemler cam/karbon/cam istifleme sırasında $\pm 55^\circ/\pm 55^\circ/\pm 55^\circ$ sarım açılı hibrid borular için de uygunlanmıştır. Kompozit boruların üretimi ve fırında sertleştirme işlemleri için, İzmir İzoreel Komp. Malz. San. ve Tic. Ltd. Şti. imkanlarından yararlanılmıştır. Çizelge 4.1.'de kullanılan elyafların ve matrisin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kullanılan elyafların ve matrisin özellikleri

	E (GPa)	$\sigma_{\text{çek}}$ (MPa)	ρ (g/cm ³)	ϵ_{kop} (%)
Elyaf: E-camı	73	2400	2,6	1,5-2
Elyaf: Karbon-12K A-42	230	3500	1,75	1,5
Matris: Epoksi Reçine	3,4	50-60	1,2	4-6

Not: E = elyafların elastisite modülü; $\sigma_{\text{çek}}$ = elyafların çekme gerilmesi; ρ = elyafların yoğunluğu; ϵ_{kop} = elyafların yüzde şekil değişimi

Üretilen boruların uzunluğu ve iç çapı sırayla 160 ve 72 mm'dir. Şekil 4.1'de numune geometrisi ve geometrik uzunlukları gösterilmiştir.

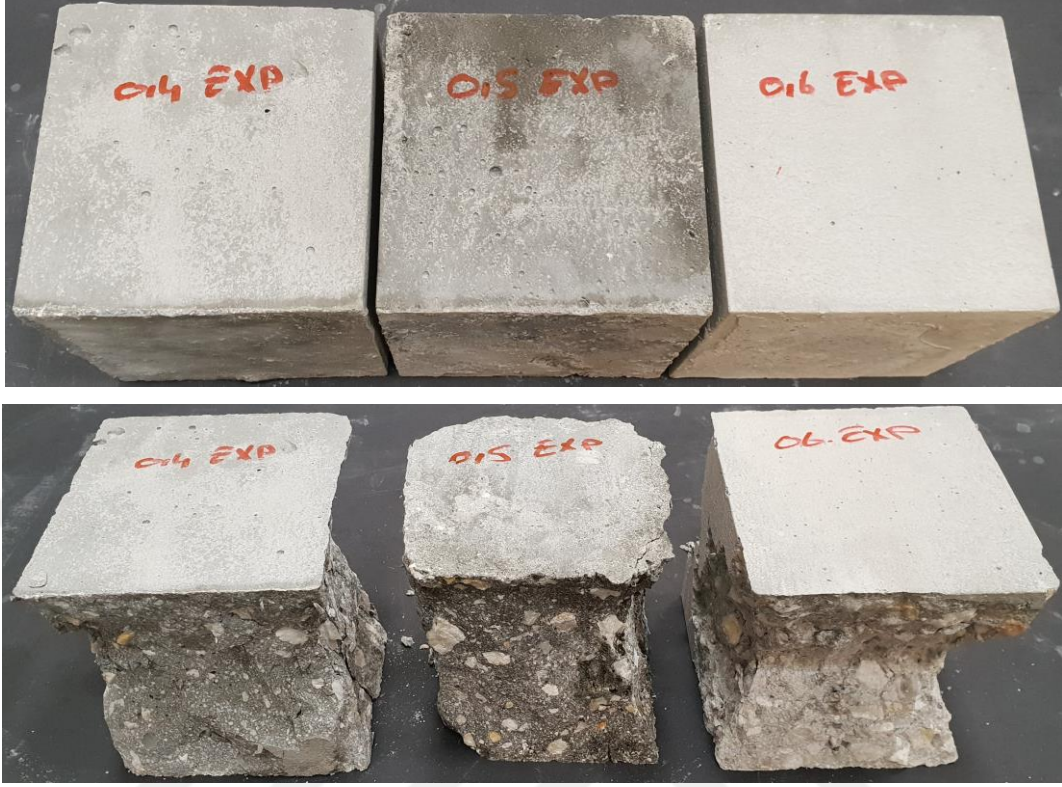


Şekil 4.1. Numune geometrisi

4.2. Kullanılan Betonun Özellikleri

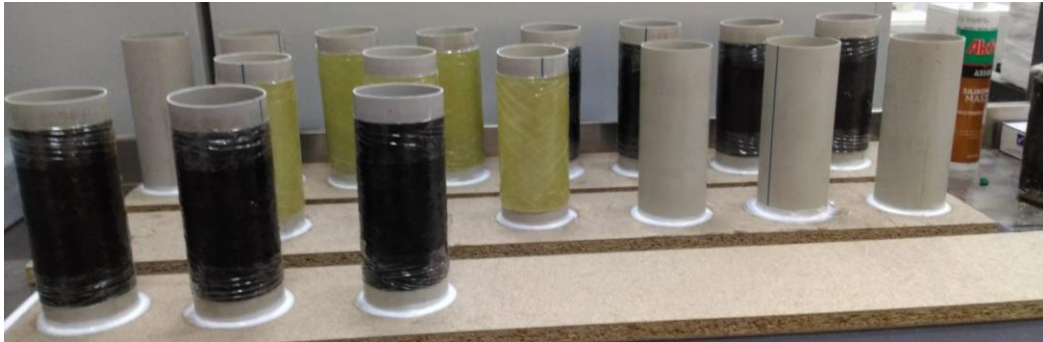
Beton üretiminde su/çimento oranı 0,4-0,5-0,6 olarak alınmıştır. Karışım, genişletilmiş çimento (EC) kullanılarak hazırlanmıştır. Kullanılan genişleyen çimentolu beton Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Üretilen bütün numunelerde vibrasyon ile sıkıştırma yapılmıştır. Kullanılan betonların mekanik özelliklerini belirlemek için 100*100*100

mm ölçülerinde küp numuneler üretilmiştir. Hazırlanan beton numunelerinin test öncesi ve sonrası görüntüleri Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Küp beton numunelerin test öncesi ve sonrası görüntüleri

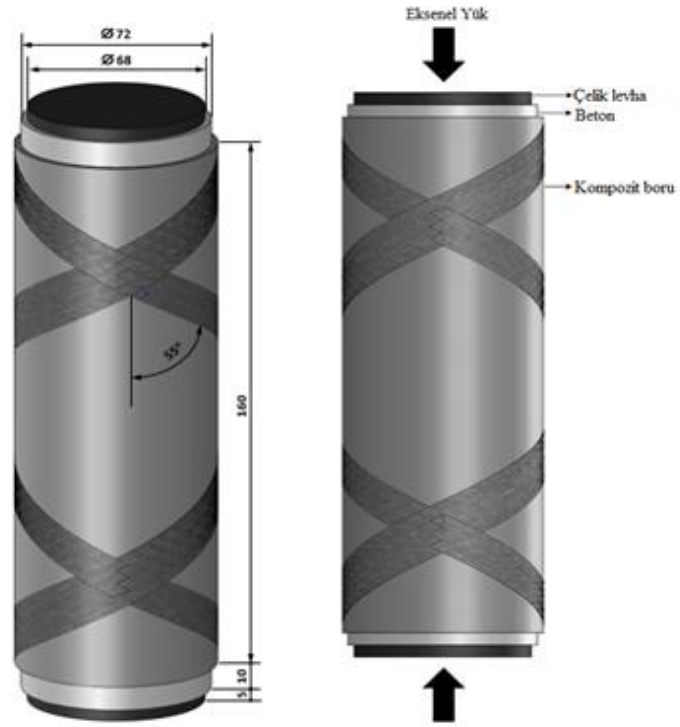
Üretilen referans numuneler Ref-0,4 Ref-0,5 Ref-0,6 olarak isimlendirilmiştir. Üretilen kompozit kolonlar $(\pm 55^\circ)_3$ GFRP-0,4-0,5-0,6; $(\pm 55^\circ)_3$ Hibrid-0,4-0,5-0,6; $(\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ)$ Hibrid-0,4-0,5-0,6 şeklinde kodlanmıştır. Numuneler Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Üretilen kompozit kolon numunelerinin geometrik ölçüleri Şekil 4.5’de verilmiştir. Çimento, agrega, kum, su ve katkı oranlarının bileşen oranları ve her karışımın 28 günlük basınç dayanımı Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Deney numuneleri



Şekil 4.4. Genleşen çimentolu beton uygulaması



Şekil 4.5. Üretilen numunelerin geometrik ölçüleri

Çizelge 4.2. Beton karışım elemanları ve elde edilen mekanik özellikleri

Çimento Tipi	Çimento (kg/m ³)	Kum (kg/m ³)	Agrega (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Lif (kg/m ³)	Su/Çimento oranı	28 Günlük basınç dayanımı (MPa)
Genleşen	975	1825	700	390	19	0,4	84,8
Genleşen	820	1680	800	410	19	0,5	69,9
Genleşen	750	1250	1500	450	19	0,6	45,9

4.3. Gerinim Ölçer Uygulaması

Gerinim ölçer (strain-gage) parçaların yüzeyinde oluşan birim uzamaları ölçmek için kullanılan sensörlerdir. Kesiti çok küçük iletken bir telin çok ince bir şerit üzerine tekrarlı sarımlar şeklinde yerleştirilmesinden oluşur. Uygulamadan önce gerinim ölçer yapıştırılacak yüzeyler zımparalanmıştır. Daha sonra zımparalanan yüzeyler asetonla temizlenmiştir. Temizlenen yüzeye gerinim ölçer eksenlenerek Loctite 496 markalı yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Son olarak kablolar lehimlenerek deneye hazır hale getirilmiştir. Numunelere uygulanan gerinim ölçer Şekil 4.6'de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Gerinim ölçer uygulanan kompozit borular

4.4. Eksenel Basınç Testi

Basınç testi, malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynayan bir deney metodudur. Bu deney, metot olarak çekme deneyinin tam zıttı bir işlemdir ve deneyin yapımında aynı cihaz kullanılır. Basınç deneyi her formdaki malzemelere uygulanabilir, ancak homojen bir gerilim dağılımı sağlamak için çoğunlukla yuvarlak kesitli numuneler kullanılır. Basınç testi numunelerinde, numunenin yüksekliği h_0 ile numunenin çapı d_0 arasındaki h_0/d_0 oranı önemlidir.

Numunenin h_0/d_0 oranının çok yüksek olması, numunenin deney sırasında burkulmasına ve homojen olmayan gerilim dağılımına neden olur. Bu oran küçüldükçe basınç plakaları ile numune arasında oluşan sürtünme test sonuçlarını çok fazla etkilemektedir (Kayalı ve ark., 1996).

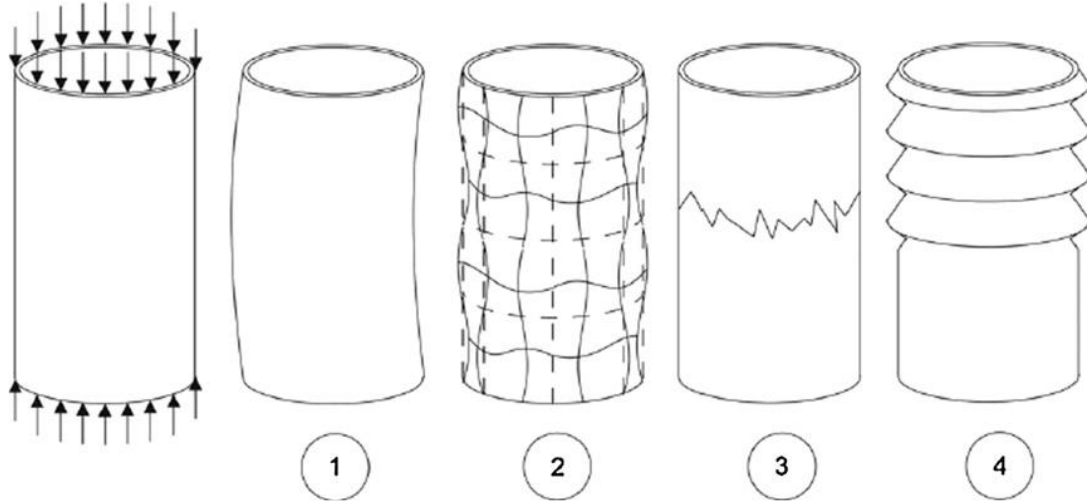
Deneyler hazırlanan numunelerin belirli sabit sıcaklık ve hızda sürekli olarak basma yüküne maruz bırakılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Necmettin Erbakan Üniversitesi Yapı Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 4.7'de resmi verilen test düzeneği ile yapılmıştır. Liya markalı statik basma hidrolik test cihazı 1000 kN'luk yükleme kapasitesine sahiptir. Elde edilen gerilme-birim uzama eğrilerinden malzeme ile ilgili mekanik özellikler tespit edilmiştir.



Şekil 4.7. Statik basma test cihazı

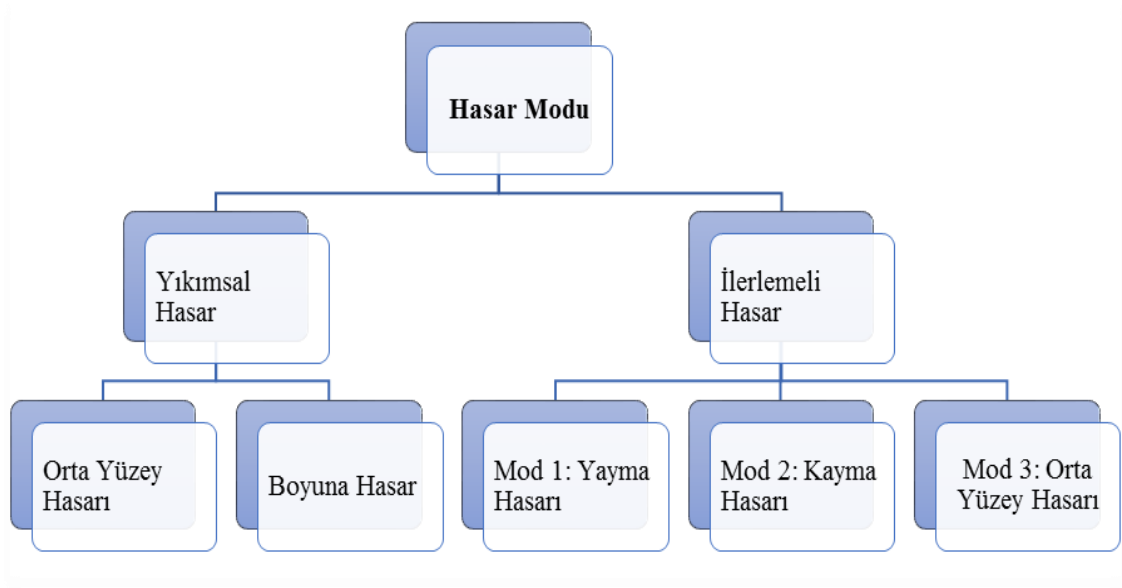
4.4.1. Eksenel kuvvet sonucu oluşan hasar modları

Kompozit malzemelerde eksenel basınç sonucu 4 farklı kırılma mekanizması oluşmaktadır. Bunlar genel burkulma, bölgesel burkulma, kırılma (çatlama) ve ilerleyen kırılmadır (Lau ve ark., 2012). Kompozit malzemelerde oluşan kırılma mekanizmaları Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



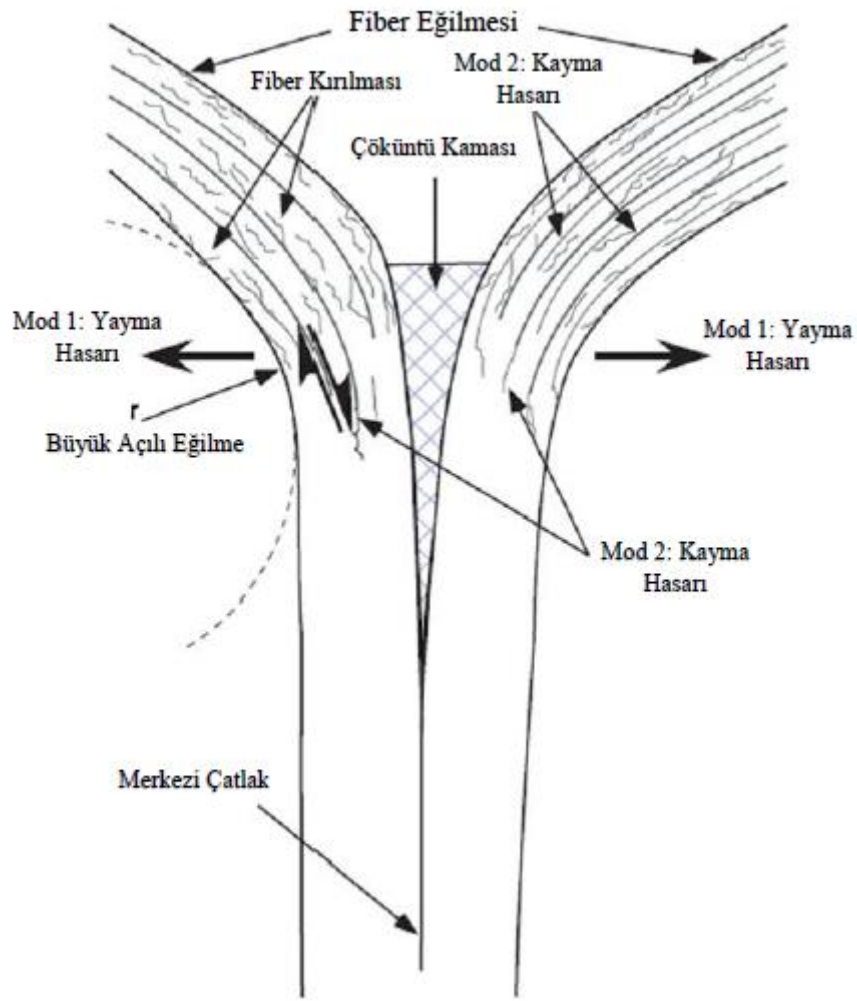
Şekil 4.8. Kompozit malzemelerdeki kırılma mekanizmaları 1) genel burkulma 2) bölgesel burkulma 3) kırılma 4) ilerleyen kırılma (Lau ve ark., 2012)

Bu kırılma türleri cam elyaf kompozit malzemelerde temel olarak iki farklı hasar modu oluşturmaktadır. Bunlar; yıkımsal (catastrophic) hasar ve ilerlemeli (progressive) hasardır. Yıkımsal hasar modu kendi içerisinde 2 farklı moda ayrılmaktadır. Bunlar; orta yüzey çatlakları ve boyuna çatlaklardır. İlerlemeli hasar modu ise 3 farklı moda ayrılmaktadır. Bunlar ise yayma, kayma ve orta yüzey çatlağıdır. Yıkımsal hasarlar matris ve takviye elemanı boyunca oluşmaktadır. İlerlemeli hasar ise matristeki kırılmalardan ve tabakalar arasındaki ayrılmalar sonucu oluşmaktadır. Hasar modları Şekil 4.9.'daki gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 4.9. Kompozit malzemelerde oluşan hasar modları (Cerit, 2011; Lau ve ark., 2012)

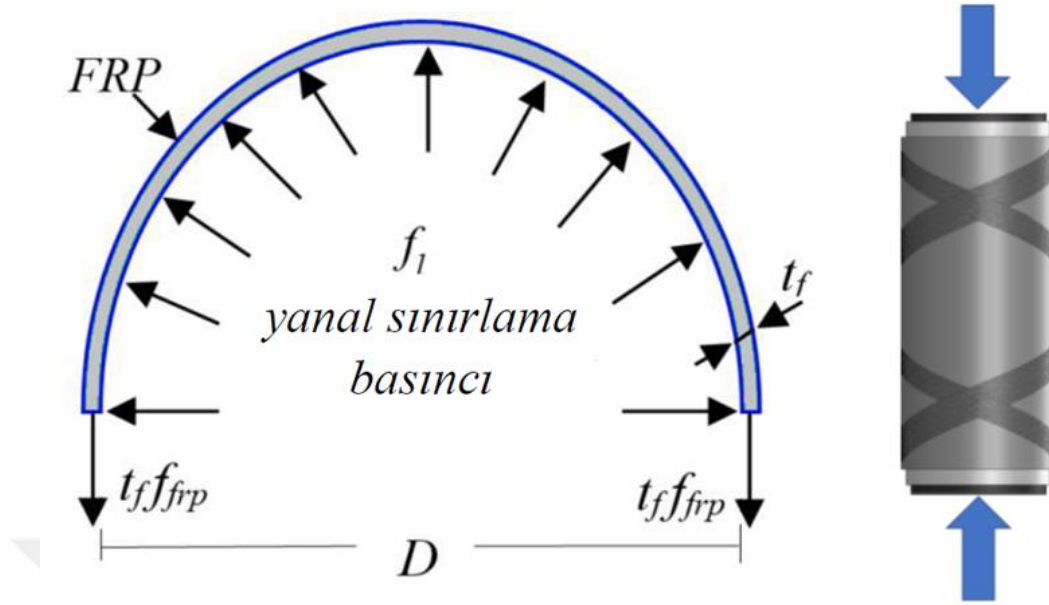
Hasar modlarının oluşumunda kompozit malzemenin; matris malzemesinin, takviye elemanının, elyaf örgü açılarının ve numune geometrisinin önemli rolü vardır. Yıkımsal hasar ve ilerlemeli hasar birbirine zıt durumlardır. Yıkımsal hasar genel burkulma sonucu oluşmaktadır. Yıkımsal hasarda oluşan orta yüzey çatlamları ve boyuna çatlama kuvvet en yüksek seviyedeysen hasar oluşmaktadır. Ancak bu ani kırılma sonucu malzeme daha fazla kuvveti taşıyabilir. Bu yüzden absorbe edeceği enerji miktarı da düşük olmaktadır (Cerit, 2011; Lau ve ark., 2012). İlerlemeli hasar ise bölgesel burkulmalar sonucu oluşmaktadır. Oluşan bu burkulmalar sonucu ortaya çıkan hasarlar 3 şekilde meydana gelmektedir. Bunlardan silindirik veya kare profil kompozitlerde oluşan hasar modları, Mod-1 (yayma) ve Mod-2 (kayma) hasarlarıdır. Mod-3 (orta yüzey) hasarı ise eliptiklik oranı 2,0 olan eliptik geometrideki parçalarda oluşmaktadır (Mahdi ve ark., 2005). Mod-1 hasarı, kuvvet uygulanan kompozit profilin matris ve takviye fazının ana çatlaktan kırılarak iki yana doğru yayılmasını ifade etmektedir. Mod-2 ise takviye malzemesinin tabakalarının arasındaki kaymadan dolayı meydana gelmektedir. Mod-1 ve Mod-2 hasarında oluşan enerji absorpsiyonu Mod-3 hasarında oluşan enerji absorpsiyonundan daha fazla olmaktadır (Cerit, 2011; Lau ve ark., 2012). Bunun nedeni bölgesel burkulma sonucu oluşan yayma ve kayma hasarının matris ve takviye elemanında yavaş bir kırılma oluşturmasıdır. Böylece enerji absorpsiyonu parça boyunca devam edebilir. Silindirik veya kare profillerde oluşan ilerlemeli hasar modları Şekil 4.10'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Hasar modlarının şematik görünümü (Lau ve ark., 2012)

4.4.2. Basınç dayanımı analizi

FRP kompozit boru ile sarılmış bir silindirik numunede, FRP tarafından betona sarılarak tutulan yanal kapatma basıncı, yük uygulanıncaya kadar pasiftir. Eksenel basınç yükü altında, beton basıncı yanal olarak yayılma eğilimindedir. Bununla birlikte, FRP boru betonun eksenel uzamasını kısıtlar. Bu nedenle, kompozit boru içinde ortaya çıkan dairesel bir gerilim bu genişleme ile korunur. Bu genişleme etkisinden dolayı meydana gelen reaksiyon, FRP malzemesinin ara yüzünde tek biçimli bir yanal basınç ile sembolize edilir (Şekil 4.11) (Gemi ve ark, 2018).



Şekil 4.11. FRP borunun beton basıncına etkisi

Şekil 4.11'den, borunun birim uzunluğunu göz önünde bulundurarak ve FRP borunun kuvvet dengesi kullanarak, aşağıdaki formül elde edilebilir:

$$f_1 D = 2t_f f_{frp} \quad (4.1)$$

Burada f_1 yanıl sınırlayıcı basınç, f_{frp} FRP'nin radyal yönde gerilme kopma dayanımı, D beton çekirdek çapı ve t_f FRP kalınlığıdır. Yukarıdaki denklemi yeniden düzenleyerek, yanıl sınırlama basınç f_1 şöyle yazılabilir:

$$f_1 = \frac{2t_f f_{frp}}{D} = \frac{1}{2} f_{frp} \rho_{frp} \quad (4.2)$$

Buradaki ρ_{frp} , aşağıdakilerle tanımlanan FRP hacimsel oranıdır:

$$\rho_{frp} = 4t_f / D \quad (4.3)$$

Literatürde, 1968'den beri betonun sargılı basınç dayanımı için çeşitli formüller geliştirilmiştir. FRP ile sargılı beton elemanlar için çeşitli tasarım kılavuzları tarafından önerilenler dahil olmak üzere bu formüllerin özeti Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. FRP-sargılı betonun tasarım odaklı modellerinin özeti

Model	Yıl	Kuvvet artırma oranı
Fardis ve Khalili	1982	$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 4.1 \frac{f_l}{f_{co}}$
Miyauchi ve ark.	1999	$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 2.98 \frac{f_l}{f_{co}}$
Bisby ve ark.	2005	$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 2.425 \frac{f_l}{f_{co}}$
Matthys ve ark.	2006	$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = \left(1 + 3.5 \left(\frac{f_l}{f_{co}}\right)^{0.85}\right) \cdot f_{co}$
Youssef ve ark.	2007	$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 2.25 \left(\frac{f_l}{f_{co}}\right)^{1.25}$, artan eğriler için; $\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3.0 \left(\frac{4E_{frp}\epsilon_{jt}/d}{f_{co}}\right)^{1.25}$, azalan eğriler için
Ciupala ve ark.	2007	$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 1.7 \left(\frac{2f_l}{f_{co}}\right)^{0.8}$
Vintzileou ve Panagiotidou	2007	$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 2.8 \frac{f_l}{f_{co}}$
Park ve ark.	2011	$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 0.7 + 3.7 \frac{f_l}{f_{co}}$
CAS (Kanada Standartları Birliği)	2002	$f_{cc} = 0.85f_{cc} + 6.7f_l^{0.83}$
ACI (Amerikan Beton Enstitüsü)	2008	$f_{cc} = f_{co} + \left(\psi_f 3.3 \frac{f_l}{f_{rr}}\right)$
TEC (Türk Deprem Yönetmeliği)	2007	$f_{cc} = f_{co} \left(1 + 2.4 \left(\frac{f_l}{r}\right)\right)$

Not: f_{cc} = sınırlandırılmış beton basınç dayanımı; f_{co} = beton çekirdeğin basınç dayanımı; E_{frp} = FRP elastisite modülü; ϵ_{jt} = birinci bölgeden ikinci bölgeye geçişte FRP borunun gerilmesi = 0.002; ψ_f = FRP gücü azaltma faktörü =0.85 esneklik için (tasarım malzemesi özelliklerine göre kalibre edilmiş) =0.85 kesme için (güvenilirlik analizine bağlı olarak) üç taraflı FRP U sargı için veya iki taraflı güçlendirme şemaları için = tam kesme için 0.95 bölümler (Rafiee ve Mazhari, 2016)

4.4.3. Basınç gerilmesi ve basınç şekil değişimi

Basma deneyinde de basma yükünün orijinal kesit alanına bölünmesiyle mühendislik basma gerilmesi hesaplanır.

$$\sigma_b = F_b / A_0 \quad (4.4)$$

Burada σ_b basma gerilmesi, F_b basma yükü ve A_0 orijinal kesit alanıdır. Basma deneyinde mühendislik şekil değişimi (e_b), numunenin yüksekliğindeki azalma miktarının orijinal yüksekliğe oranının yüzde olarak ifadesidir.

$$e_b = (h_1 - h_0 / h_0) \times 100 \quad (4.5)$$

Burada h_0 numunenin deney öncesi yüksekliği, h_1 numunenin deney sonrası yüksekliğidir. Basma gerilmesinde gerçek şekil değişimi hesaplanması denklem (4.6)'da gösterilmiştir.

$$\epsilon_b = \ln(h_1/h_0) = -\ln(h_0/h_1) \quad h_0 > h_1 \quad (4.6)$$

Basmada gerçek şekil değişimi oranı ile mühendislik şekil değiştirme oranı arasındaki bağıntı ise aşağıdaki gibidir.

$$\epsilon_b = \ln(1 + e_b) \quad (4.7)$$

Basma gerilmesi sonucu oluşan elastisite modülü (E) aşağıdaki denklemle hesaplanır.

$$E = \sigma_b / \epsilon_b \quad (4.8)$$

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

FRP kompozit malzemenin üzerinde yapılan testlerle malzemenin geliştirilmesi amaçlanmış bu amaçla malzemeler basınç testlerine tabi tutulmuştur. Çalışma değişkeni olarak FRP kompozit malzemenin içine doldurulan betonun su/ çimento oranının etkisi, kompozit borunun sarım açısı, hibrid ve cam kompozitlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışma kapsamında 3 farklı parametre kullanılmıştır. Kullanılan parametreler Çizelge 5.1’de, deneyde kullanılan numuneler ise Şekil 5.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1. Kullanılan parametreler

Parametreler			
Su/çimento oranı	0,4-0,5-0,6	0,4-0,5-0,6	0,4-0,5-0,6
Sarım açısı	($\pm 55^\circ$) ₃	($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$)	($\pm 55^\circ$) ₃
Sarım türü	GFRP	HB	HB



Şekil 5.1. Hazırlanan deney numuneleri

Deney sırasında yük ölçer ile kompozit boruya uygulanan yükler anlık olarak kaydedilmiş ve bununla birlikte deplasman ölçer vasıtası ile oluşan yer değiştirmeler ölçülmüştür. Veriler National Instruments cDAQ-9181 model veri toplama cihazına takılan NI-9219 modülü aracılığıyla toplanmıştır. Bu modül 4 kanallı universal analog bir veri giriş modülüdür. Kanal başına saniyede 100 örnekleme yapabilen modül ile gerinim pulu ve yük ölçer sensörlerinden alınan veriler yüksek doğrulukta ölçülebilmektedir. NI Signal Express yazılımı aracılığıyla veriler gerçek zamanlı olarak toplanmış ve daha sonra Microsoft Excel programına aktarılarak kuvvetin zamana göre değişim grafiği elde edilmiştir. Deney 25 °C sabit sıcaklık altında 2 kN/s sabit basma yükü altında gerçekleştirilmiştir. Gerilme, basma kuvvetinin beton alanına bölünmesiyle hesaplanmıştır.

5.1. ($\pm 55^\circ$)₃ GFRP Borunun-0,4 Basınç Deneyi Sonuçları

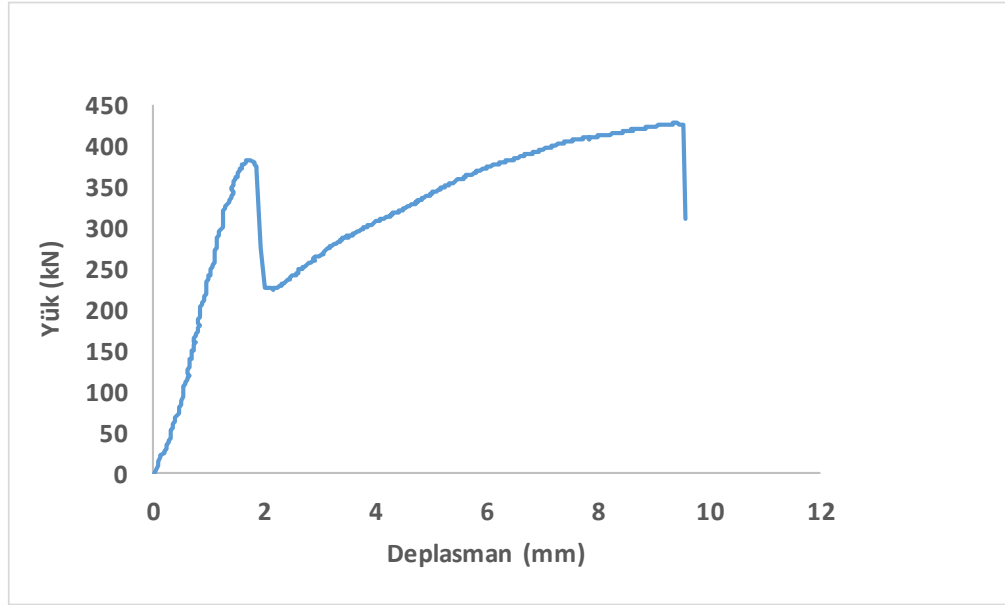
($\pm 55^\circ$)₃-GFRP-0,4 numunesinin basınç deneyinde yük uygulanmaya başlandıktan sonra kompozit borunun etkisiyle yük 380 kN seviyesine ulaşmıştır, bu yük seviyesine kadar kompozit numune ve beton yükü birlikte taşımıştır. Bu seviyede beton hasar görmüş ve betondaki çökmeden dolayı boru çapında artış gerçekleşerek beyazlaşmaların olduğu görülmüştür. Betondaki çatlak oluşumundan dolayı yükte ciddi miktar düşüş gerçekleşmiştir. Beton boydan boya çatlamış ve yük 240 kN'a kadar düşmüştür. Bu yük altında betondaki ezilme üst kısımda devam etmiştir. Kompozit borunun sargı etkisiyle beraber yük artarak 380 kN tekrar yükselmiştir. Bu yük değeri altında numunenin üst kısmında elyaf doğrultusunda beyazlaşmalar oluşmaya başlamış ve 400 kN yük seviyesinde matris çatlaklarının olduğu gözlemlenmiştir. Kompozit kolon numunesi hasar görmeden önce 9,59 mm seviyesinde deplasman değerine ulaşmıştır. Numunede şiddetli bir çatlama olmuş, cam elyaf kompozit boruda açısız bir kırılma gözlemlenmiştir ve numunenin deneyi sonlandırılmıştır.

Şekil 5.2'de numunede deney sonrasında oluşan hasar gösterilmektedir.



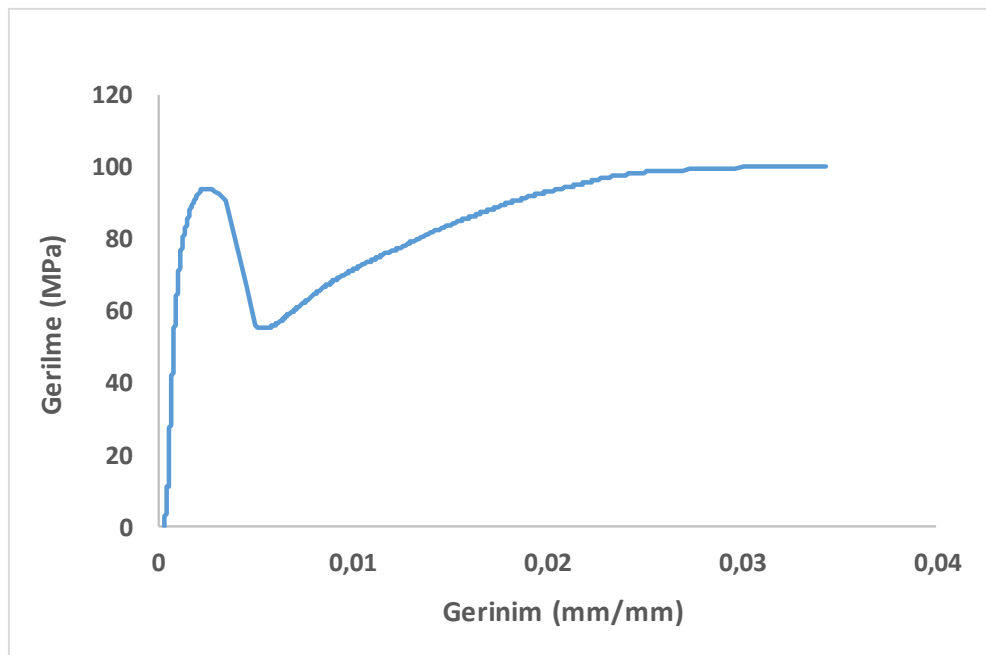
Şekil 5.2. ($\pm 55^\circ$)₃ GFRP-0,4 numunesinde oluşan hasar (deney öncesi-sonrası)

Şekil 5.3'de ($\pm 55^\circ$)₃ sarım açısı konfigürasyonuna sahip su/ çimento oranı 0,4 olan genişleyen çimentolu betonla doldurulmuş cam elyaf kompozit borunun basınç deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş yük-deplasman (yer değiştirme) grafiği görülmektedir.



Şekil 5.3. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı GFRP-0,4 numunenin yük-deplasman grafiği

Şekil 5.4’de $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açısı konfigürasyonuna sahip su/ çimento oranı 0,4 olan genişlen çimentolu betonla doldurulmuş cam elyaf kompozit borunun basınç deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş gerilme-gerinim (şekil değiştirme) grafiği görülmektedir. Numunenin maksimum basınç dayanımı 104,99 MPa, bu dayanıma karşılık gelen radyal yöndeki birim şekil değiştirme 0,03428 olarak bulunmuştur.

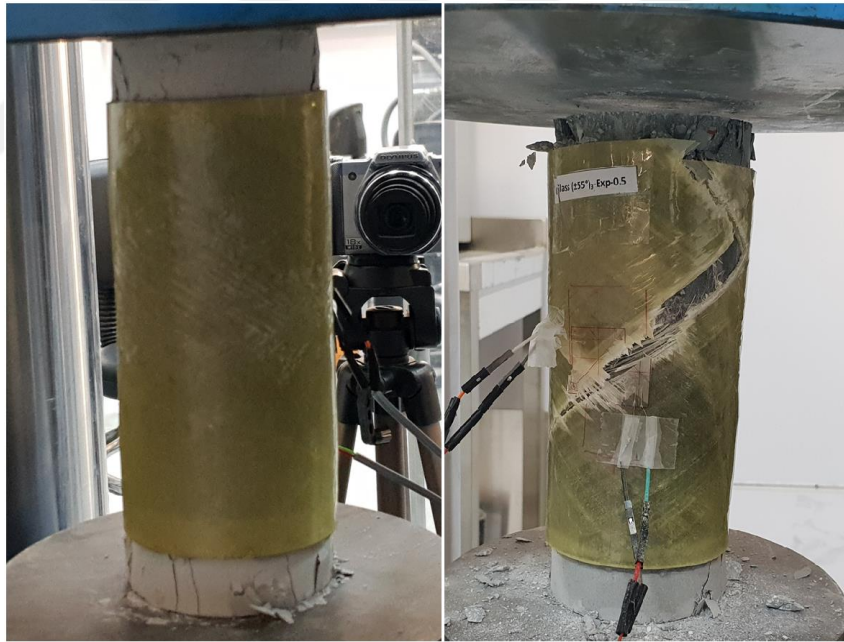


Şekil 5.4. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı GFRP-0,4 numunenin gerilme-gerinim grafiği

5.2. $(\pm 55^\circ)_3$ GFRP Borunun-0,5 Basınç Deneyi Sonuçları

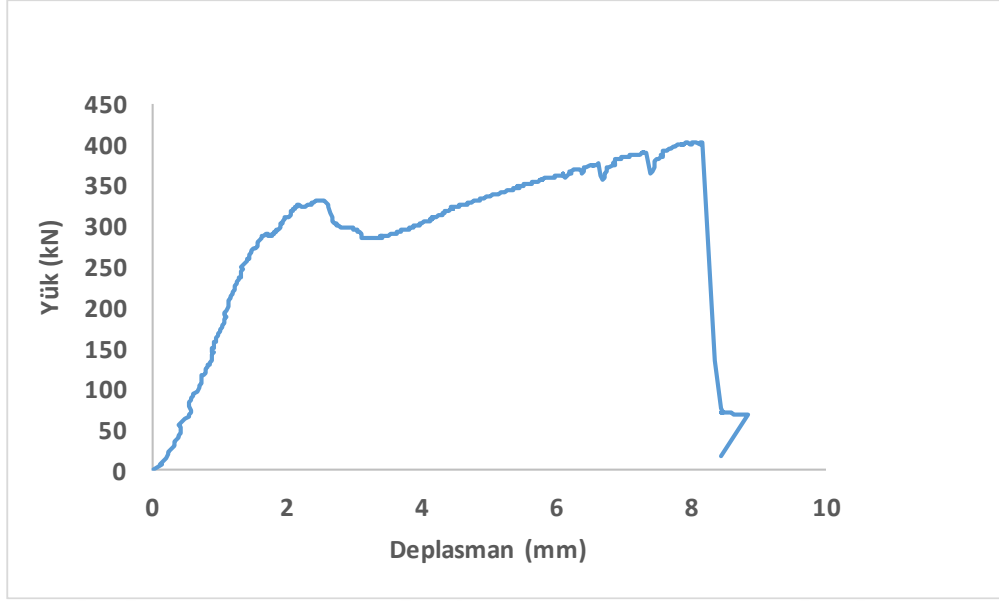
$(\pm 55^\circ)_3$ -GFRP-0,5 numunesinin basınç testinde yük 280 kN'a ulaştığında betonun üst kısmında ezilmeler oluşmaya başlamıştır. Yük 300 kN'a yükseldiğinde ise beton üst kısmındaki ezilmeler çatlamaya dönüşmüştür. Beton hasar gördüğü için cam elyaf kompozit boruda yük artışı olmuştur. Kompozit borunun sargı etkisi betonun dağılmasını engellemiştir. Çöken beton yükü kompozit numuneye aktarmıştır. Yüklemeye devam edilmiş ve çökmenin etkisiyle beraber yükte 270 kN'a kadar gerileme gözlenmiştir. Beton hasarı sonlanması ile beraber yük 320 kN'a yükselerek kompozit numunede beyazlaşmalar ve eğilme oluşmaya başlamıştır. Uygulanan yük 380 kN'a ulaştığında kompozit boru numunesinin üst kısımdan başlayarak hasar görmüştür. Betondaki ezilmeden dolayı \pm elyaf sarım açısı doğrultusunda ilerleyen hasar artmış ve sarım açısı doğrultusunda ilerleyerek sonuç hasarına ulaşmıştır.

Şekil 5.5'de numunede deney sonrasında oluşan hasar görülmektedir.



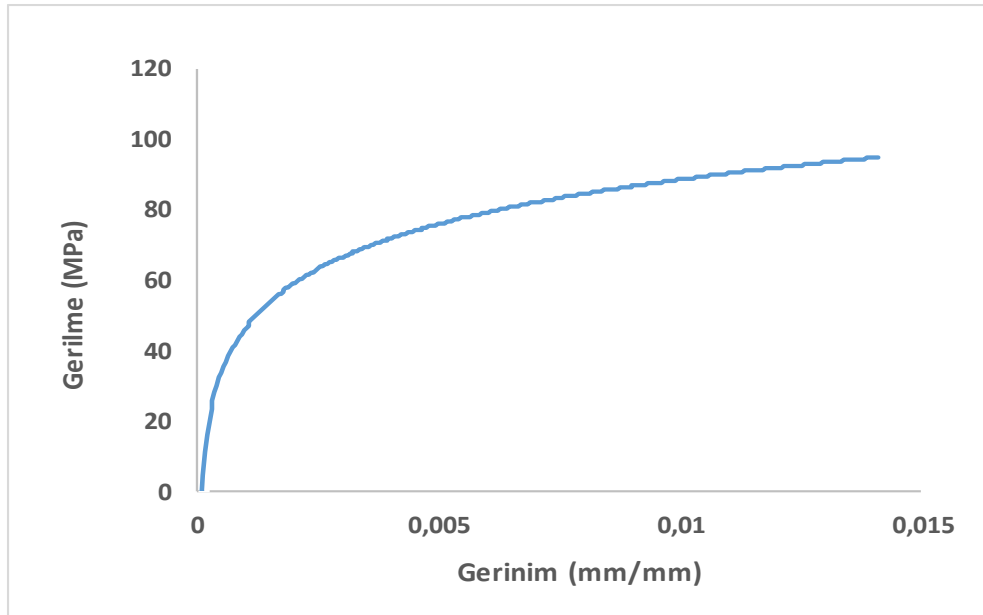
Şekil 5.5. $(\pm 55^\circ)_3$ GFRP-0,5 numunesinde oluşan hasar (deney öncesi-sonrası)

Şekil 5.6'da $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açısı konfigürasyonuna sahip su/ çimento oranı 0,5 olan genişlen çimentolu betonla doldurulmuş cam elyaf kompozit borunun basınç deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş yük-deplasman (yer değiştirme) grafiği görülmektedir.



Şekil 5.6. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı GFRP-0,5 numunesinin yük-deplasman grafiği

Şekil 5.7’de $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açısı konfigürasyonuna sahip su/ çimento oranı 0,5 olan genişleyen çimentolu betonla doldurulmuş cam elyaf kompozit borunun basınç deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş gerilme-gerinim (şekil değiştirme) grafiği görülmektedir. Numunenin maksimum basınç dayanımı 99,22 MPa, bu dayanıma karşılık gelen radyal yöndeki birim şekil değiştirme 0,01411 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.7. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı GFRP-0,5 numunenin gerilme-gerinim grafiği

5.3. $(\pm 55^\circ)_3$ GFRP Borunun-0,6 Basınç Deneyi Sonuçları

$(\pm 55^\circ)_3$ -GFRP-0,6 numunesinin basınç deneyinde yük uygulanmaya başlanmış ve yük 240 kN'a ulaştığında betonun alt kısmında ezilmeler başlamıştır. Yük 260 kN'a yükseldiğinde alt kısımda ezilmeler yoğun olarak devam etmiş ve 300 kN'a ulaştığında ise betonun alt kısmında yoğun şekilde hasar oluşmuştur. Yük 330 kN'a yükseldiğinde kompozit numuneden matris çatlak sesi gelmeye başlamıştır. 330 kN'da numunenin orta kısmında beyazlaşma başlamış ve yoğun şekilde beyazlaşma devam etmiştir. Betonun zayıf olması sebebiyle yoğun bir hasar oluşmuş ve oluşan hasar kompozit boru numunesinin iç yüzeyine yükü homojen olarak dağıtmıştır. Betonun ezilmesinin etkisiyle numunenin üst kısmında yoğun beyazlaşmalar oluşmaya başlamıştır. Yük 338 kN'da iken matris çatlak sesleri artarak devam etmiştir ve numunedeki beyazlaşmalar yoğunlaşmaya başlamıştır. 350 kN'a ulaştığında beyazlaşma numunenin orta kısmını tamamen sarmıştır. Yük artışıyla birlikte 357 kN'da matris çatlakları oluşmuş ve kompozit boru numunesinin üst kısmında oluşan yoğun beyazlaşma bölgesinde elyaf sarım açısı doğrultusunda şiddetli bir sonuç hasarı gerçekleşmiştir.

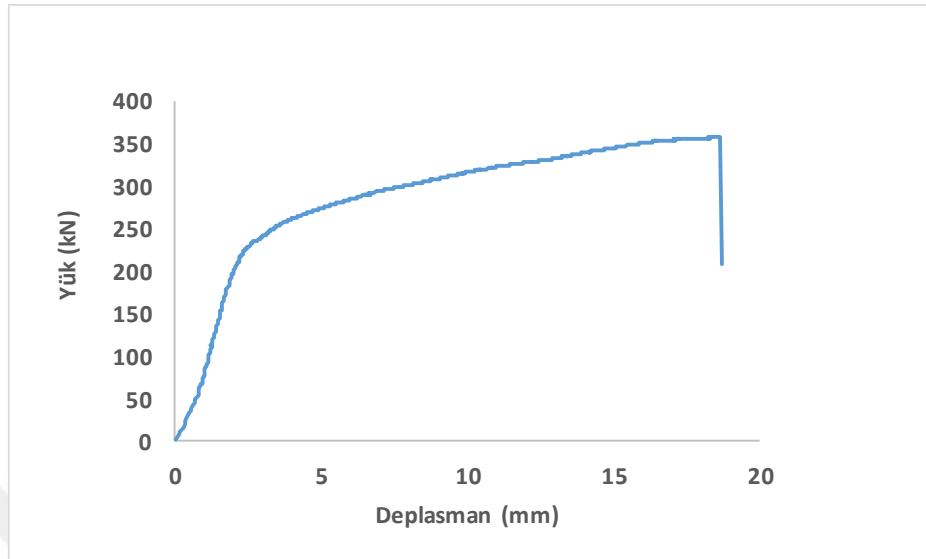
Şekil 5.8'de numunede deney sonrasında oluşan hasar gösterilmektedir.



Şekil 5.8. $(\pm 55^\circ)_3$ GFRP-0,6 numunesinde oluşan hasar (deney öncesi-sonrası)

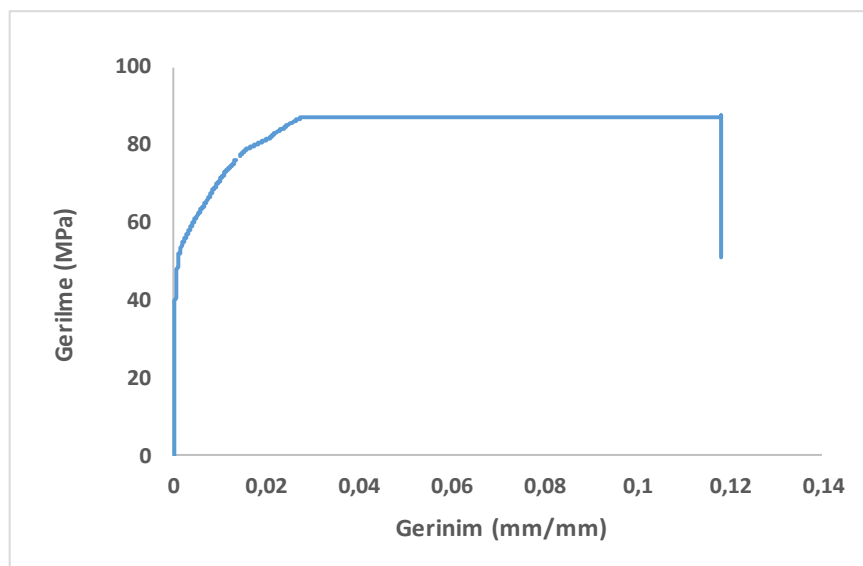
Şekil 5.9'da $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açısı konfigürasyonuna sahip su/ çimento oranı 0,6 olan genişlen çimentolu betonla doldurulmuş cam elyaf kompozit borunun basınç

deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş yük- deplasman (yer değiştirme) grafiği grlmektedir.



Şekil 5.9. ($\pm 55^\circ$)₃ sarım açılı GFRP-0,6 numunenin yük-deplasman grafiği

Şekil 5.10'da ($\pm 55^\circ$)₃ sarım açısı konfigürasyonuna sahip su/ imento oranı 0,6 olan genleşen çimentolu betonla doldurulmuş cam elyaf kompozit borunun basınç deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş gerilme-gerinim (şekil değiştirme) grafiği grlmektedir. Numunenin maksimum basınç dayanımı 87,81 MPa, bu dayanıma karşılık gelen radyal yöndeki birim şekil değiştirme 0,11823 olarak bulunmuştur.

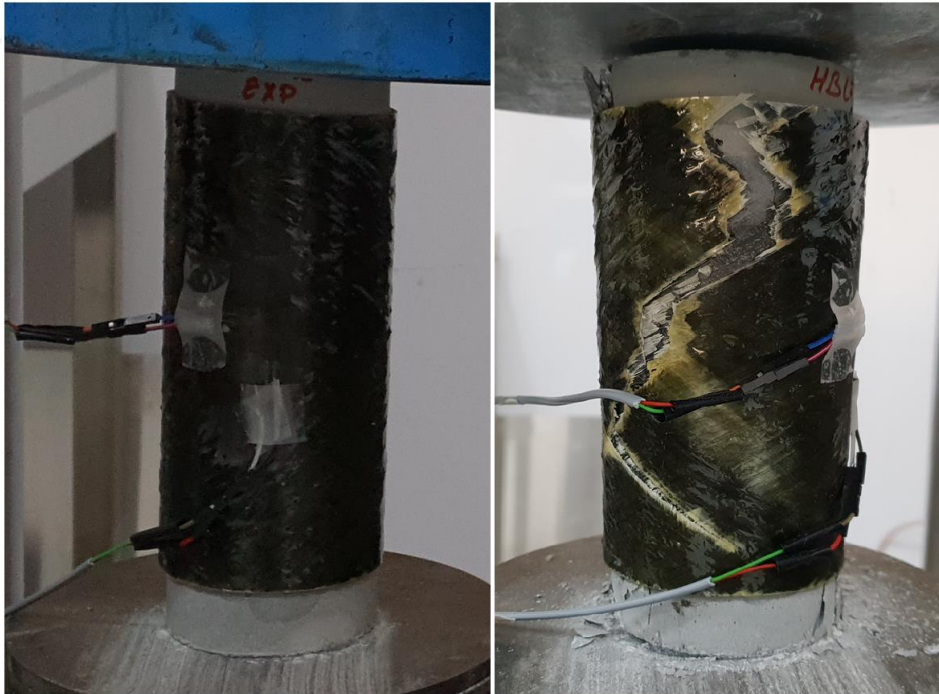


Şekil 5.10. ($\pm 55^\circ$)₃ sarım açılı GFRP-0,6 numunenin gerilme-gerinim grafiği

5.4. $(\pm 55^\circ)_3$ Hibrid Kompozit Borunun-0,4 Basınç Deneyi Sonuçları

$(\pm 55^\circ)_3$ -HB-0,4 numunesinin basınç deneyinde yük uygulanmaya başlandığında ilk olarak beton kısmında ezilmeler oluşmaya başlamıştır. Uygulanan eksenel yük 330 kN'a ulaştığında hibrid kompozit boruda herhangi bir hasar oluşmamıştır ancak betonda ezilmeler devam etmiştir. Yük 340 kN'a ulaştığında betonda dökülmeler başlamış ve hibrid kompozit borunun alt kısmında beyazlaşmalar oluşmuştur. Eksenel yük 350 kN'a ulaştığında betonda konik şeklide kırılmalar oluşmuş hasarlar birleşerek kum saati şekline dönüşmüştür. Betondaki kırılmadan dolayı yük 315 kN'a kadar düşmüştür. Kompozit numune yükü taşımaya devam etmiş ve 370 kN seviyesinde numuneden matris çatlak sesleri gelmeye başlamıştır. Bu yük altında kompozit boruda \pm elyaf sarım açısı doğrultusunda kırılmalar oluşmuştur. Çatlama hasarı kompozit borunun üst kısmından başlamıştır. Numunede oluşan hasarda tabakalar ayrılmış ve karbon tabakası ortaya çıkmıştır. Elyaf doğrultusunda çatlamlar devam etmiştir. Numune sonuç hasarına uğradığı için deneye son verilmiştir.

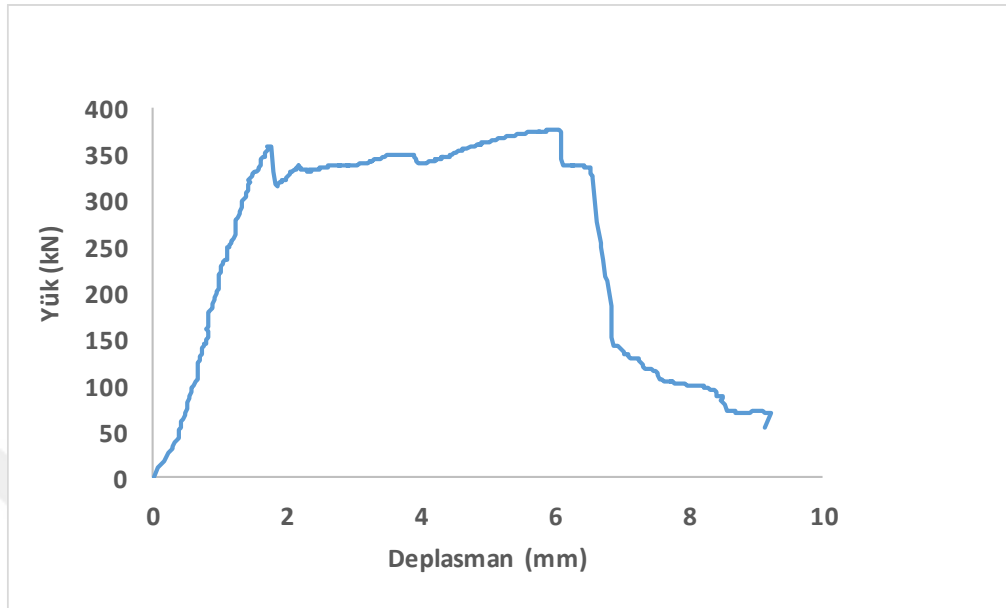
Şekil 5.11'de hibrid numunede deney sonrasında oluşan hasar gösterilmektedir.



Şekil 5.11. $(\pm 55^\circ)_3$ hibrid kompozit boruda-0,4 oluşan hasar (deney öncesi-sonrası)

Şekil 5.12'de $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açısı konfigürasyonuna sahip su/ çimento oranı 0,4 olan genişlen çimentolu betonla doldurulmuş hibrid kompozit borunun basınç deneyi

sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş yük-deplasman (yer değiştirme) grafiği görölmektedir.



Şekil 5.12. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı hibrid-0,4 numunesinin yük-deplasman grafiği

5.5. $(\pm 55^\circ)_3$ Hibrid Kompozit Borunun-0,5 Basınç Deneyi Sonuçları

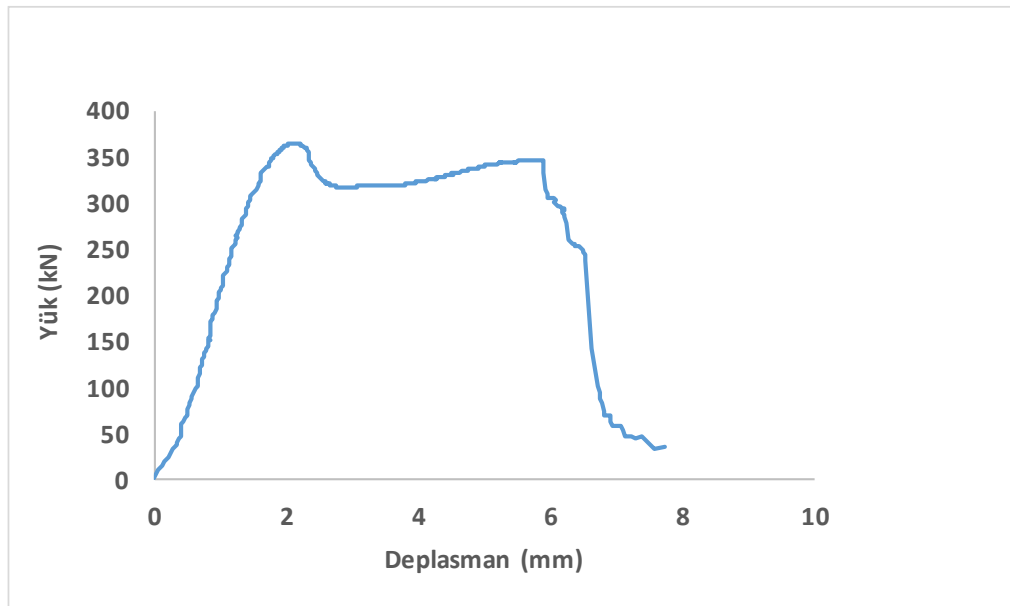
$(\pm 55^\circ)_3$ -HB-0,5 numunesine uygulanan aksinel yük sonucu ilk olarak betonun üst kısmında 350 kN'da ezilmeler başlamıştır. Betondaki ezilmeden dolayı yük 320 kN'a düşmüş ve betondaki ezilme çatlamaya dönüşmüş, çatlama olduktan sonra yük değeri sabit kalmıştır. Numunenin alt kısmında beton ezilmesi yoğunlaşmıştır. Yük 350 kN'a tekrar ulaştığında betonun üst kısmında çatlama devam etmiş. Aynı yük seviyesinde kompozit numuneden matriste çatlama sesleri gelmeye başlamış ve numunede eğilme meydana gelmiştir. Betonda oluşan hasardan dolayı yük 310 kN değerine düşmüştür. Yüklemenin devam etmesiyle beraber yükü kompozit boru taşımaya başlamıştır. Kompozit numunede 6,63 mm deplasman değerinde ve 335 kN yük değerinde \pm elyaf sarım açısı doğrultusunda betonun daha fazla hasar gördüğü alt kısımdan başlayarak şiddetli bir hasar oluşmasıyla numune deneyi sonlandırılmıştır.

Şekil 5.13'de hibrid numunede deney sonrasında oluşan hasar gösterilmektedir.



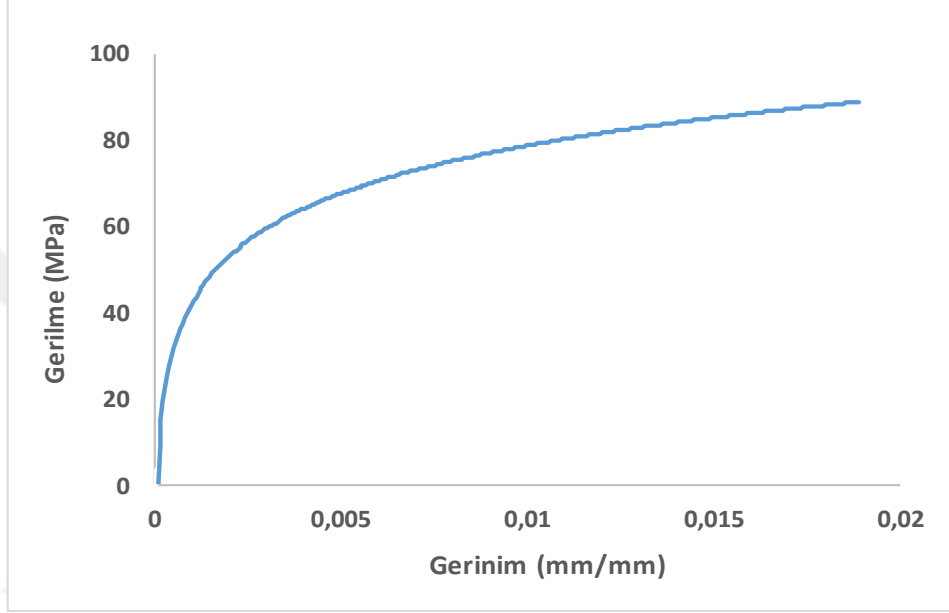
Şekil 5.13. $(\pm 55^\circ)_3$ hibrid kompozit boruda-0,5 oluşan hasar (deney öncesi-sonrası)

Şekil 5.14’de $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açısı konfigürasyonuna sahip su/ çimento oranı 0,5 olan genişlen çimentolu betonla doldurulmuş hibrid kompozit borunun basınç deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş yük-deplasman (yer değiştirme) grafiği görülmektedir.



Şekil 5.14. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı hibrid-0,5 numunesinin yük-deplasman grafiği

Şekil 5.15’de $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açısı konfigürasyonuna sahip su/ çimento oranı 0,5 olan genleşen çimentolu betonla doldurulmuş hibrid elyaf kompozit borunun basınç deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş gerilme-gerinim (şekil değiştirme) grafiği görülmektedir. Numunenin maksimum basınç dayanımı 89,07 MPa, bu dayanıma karşılık gelen radyal yöndeki birim şekil değiştirme 0,01892 olarak bulunmuştur.



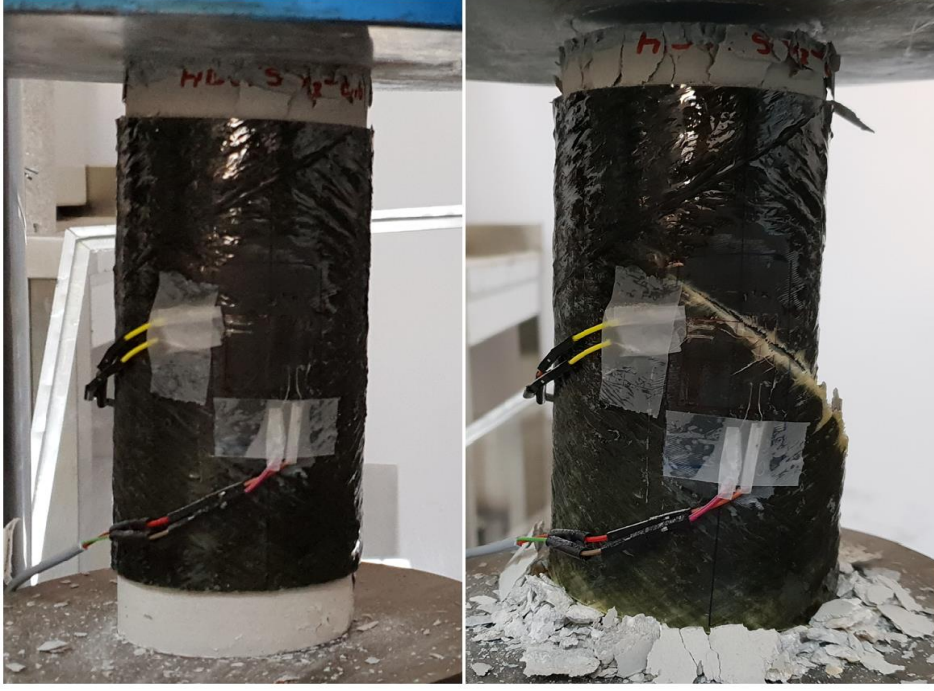
Şekil 5.15. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı hibrid-0,5 numunenin gerilme-gerinim grafiği

5.6. $(\pm 55^\circ)_3$ Hibrid Kompozit Borunun-0,6 Basınç Deneyi Sonuçları

$(\pm 55^\circ)_3$ -HB-0,6 numunesinin basınç deneyinde uygulanan eksenel yük 250 kN’a ulaştığında betonun alt ve üst kısımlarında ezilmeler başlamıştır. Yük artışıyla betonun alt ve üst kısımlarında ciddi şekilde ezilmeler oluşmuştur. Yük 300 kN’a geldiğinde betonda oluşan hasardan dolayı yükte düşüş olmuştur. Betonun genelinde oluşan hasardan dolayı kompozit boru içerisinde homojen bir yük dağılımıyla beraber beyazlaşmalar oluşmaya başlamış ve beyazlaşma artarak numunenin orta kısmında yoğunlaşmıştır. Beton deplasman yaptığı için yük 290 kN’a düşmüştür kompozit numune tüm yükü taşımaya başlamıştır. Kompozit borudaki beyazlaşma tüm yüzeyi sarmış ve betondan kaynaklı olarak deplasman artışı görülmüştür. Yük 280 kN’a geldiğinde matris malzemedan çatlak sesi gelmeye başlamıştır. Betonun dayanımının düşük olmasından kaynaklı kompozit numunenin alt kısmında beyazlaşmalar oluşmuş

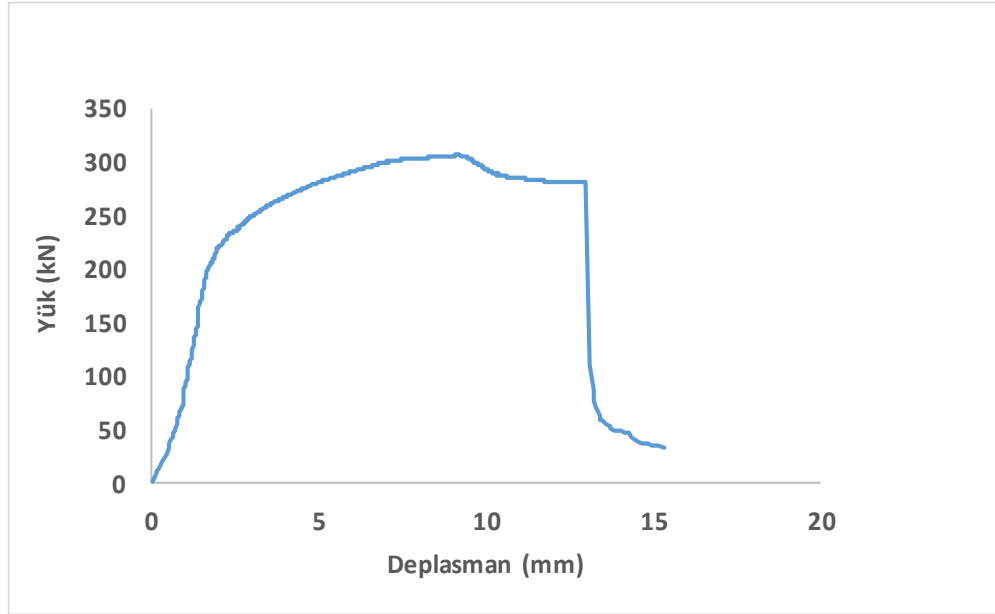
ve betonun daha çok ezildiği noktada hasar beklentisi gerçekleşmiştir. Kompozit kolon numunesi hasar görmeden önce 13,12 mm seviyesinde yüksek bir deplasman değerine ulaşmıştır. Beklenen yerden yırtılma hasarı numunenin alt kısımdan başlayarak 280 kN'da elyaf sarım açısı doğrultusunda yaprak şeklinde açılmayla gerçekleşmiştir.

Şekil 5.16'da hibrid numunede deney sonrasında oluşan hasar gösterilmektedir.



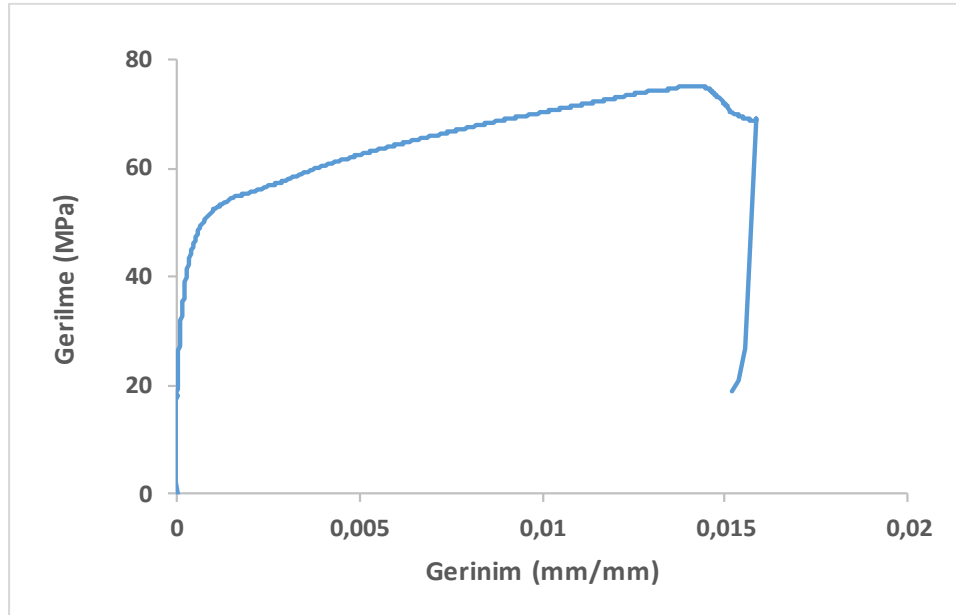
Şekil 5.16. $(\pm 55^\circ)_3$ hibrid kompozit boruda-0,6 oluşan hasar (deney öncesi-sonrası)

Şekil 5.17'de $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açısı konfigürasyonuna sahip su/ çimento oranı 0,6 olan genişlen çimentolu betonla doldurulmuş hibrid kompozit borunun basınç deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş yük-deplasman (yer değiştirme) grafiği görülmektedir.



Şekil 5.17. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı hibrid-0,6 numunenin yük-deplasman grafiği

Şekil 5.18’de $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı içerisine 0,6 su/ çimento oranına sahip betonla doldurulmuş hibrid numunenin basınç deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş gerilme-gerinim (şekil değiştirme) grafiği görülmektedir. Numunenin maksimum basınç dayanımı 75,14 MPa, bu dayanıma karşılık gelen radyal yöndeki birim şekil değiştirme 0,01587 olarak bulunmuştur.

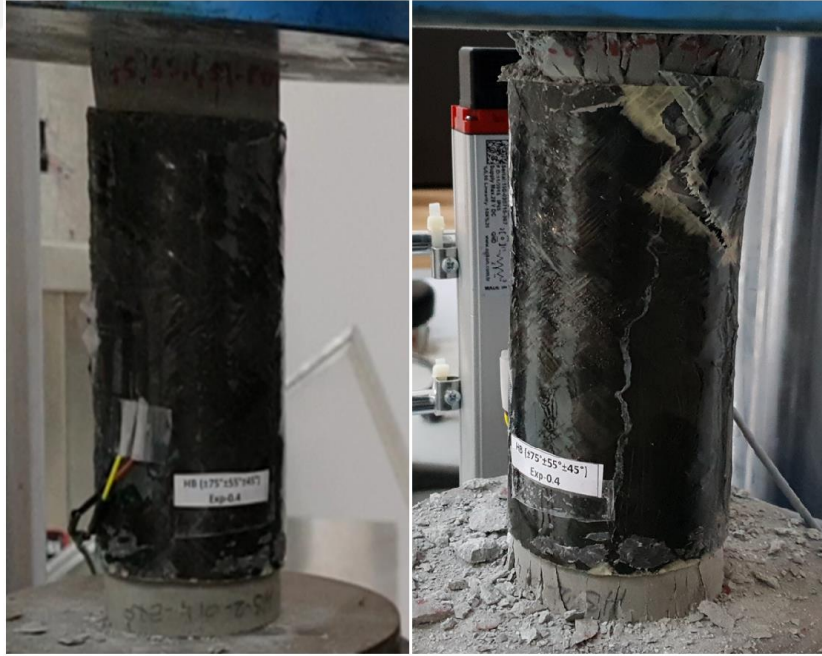


Şekil 5.18. $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açılı hibrid-0-6 numunenin gerilme-gerinim grafiği

5.7. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) Hibrid Kompozit Borunun-0,4 Basınç Deneyi Sonuçları

($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$)-HB-0,4 numunesinin basınç testinde uygulanan yük 220 kN'a ulaştığında betonun üst kısmında ezilmeler başlamıştır. Yük 230 kN'a yükseldiğinde betonun üst kısmında dökülmeler oluşmuştur. 250 kN'a ulaştığında ise beton ezilmeye devam etmiş ve ezilme yoğun olarak üst kısımda oluşmuştur. Kompozit numuneden 270 kN'da matris çatlak sesleri gelmeye başlamıştır. Yük 290 kN'a yükseldiğinde numuneden yoğun olarak matris çatlak sesleri gelmeye devam etmiştir. Yaklaşık 9,6 mm deplasman ve 310 kN yük değerinde numunenin üst kısmından beklenen yerden hasar görmüştür. Oluşan hasar farklı sarım açılarındaki her tabakada \pm elyaf sarım açısı doğrultusunda hasar oluşmuş ve yüklemeye beraber hasar ilerleyerek devam etmiştir. Hasar oluşumundan sonra yük 120 kN'a düşmesine rağmen yırtılma hasarının devam ettiği gözlenmiştir. Kompozit numune beklenen yükü taşımayacak derecede hasar gördüğü için numunenin deneyi sonlandırılmıştır. Numunelerde genelde beton hasarının yoğun olduğu yerlerden kompozit numune hasarının başladığı gözlemlenmiştir.

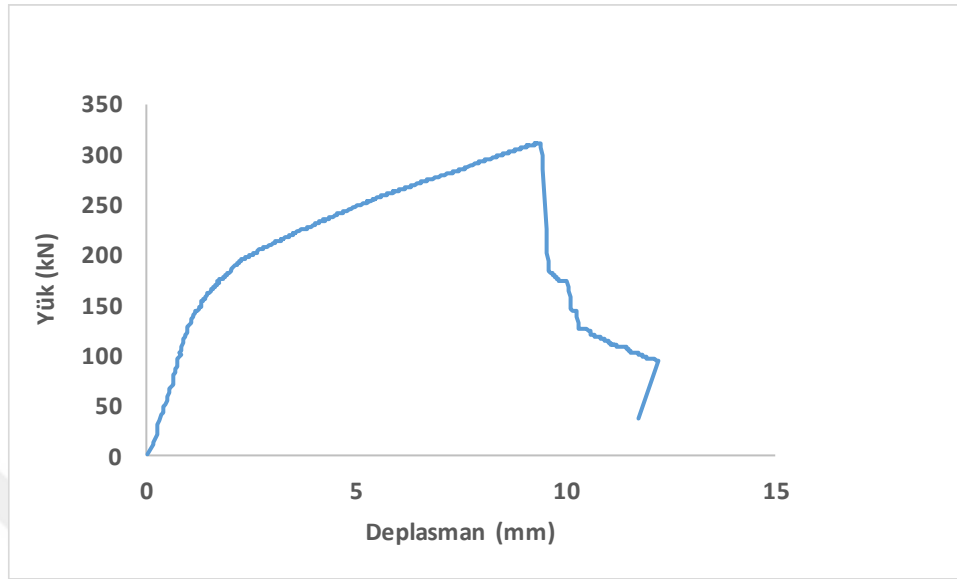
Şekil 5.19'da hibrid numunede deney sonrasında oluşan hasar gösterilmektedir.



Şekil 5.19. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) hibrid kompozit boruda-0,4 oluşan hasar (deney öncesi-sonrası)

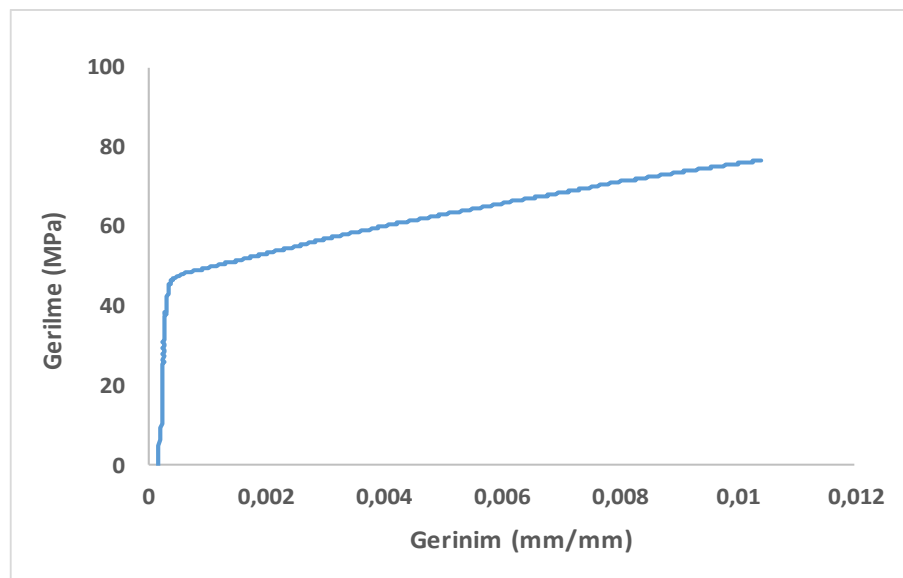
Şekil 5.20'de ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) sarım açısı konfigürasyonuna sahip su/ çimento oranı 0,4 olan genişletilmiş çimento betonla doldurulmuş hibrid kompozit borunun basınç

deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş yük-deplasman (yer değiştirme) grafiği görölmektedir.



Şekil 5.20. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) sarım açılı hibrid-0,4 numunenin yük-deplasman grafiği

Şekil 5.21’de ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) sarım açılı içerisine 0,4 su/ imento oranına sahip betonla doldurulmuş hibrid numunenin basınç deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş gerilme-gerinim (şekil değiştirme) grafiği görölmektedir. Numunenin maksimum basınç dayanımı 76,55 MPa, bu dayanıma karşılık gelen radyal yöndeki birim şekil değiştirme 0,01033 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.21. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) sarım açılı hibrid-0,4 numunenin gerilme-gerinim grafiği

5.8. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) Hibrid Kompozit Borunun-0,5 Basınç Deneyi Sonuçları

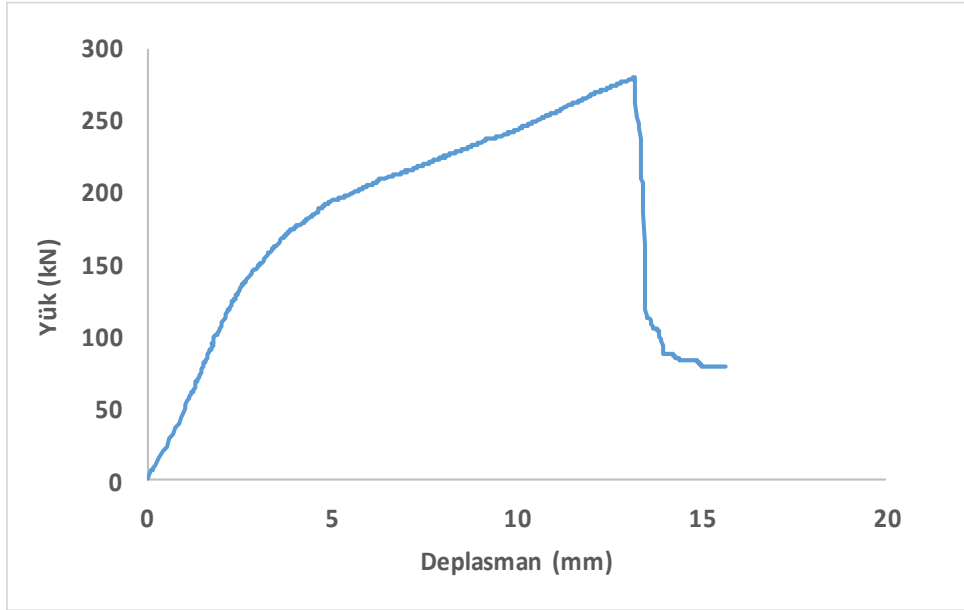
($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$)-HB-0,5 numunesinin basınç testinde uygulanan yük 60 kN'a ulaştığında betonun üst kısmında ezilmeler başlamıştır. Yük 190 kN'a geldiğinde betonun üst kısmındaki ezilmeler ciddi şekilde artış göstermiştir. Yük 220 kN'a ulaştığında ezilmeden kaynaklı betonda dökülmeler başlamıştır. Eksenel yük 280 kN'a yükseldiğinde kompozit numuneden matris çatlak sesleri gelmeye başlamıştır. Numunede elyaf doğrultusunda çatlak oluşmuş ve yük ani bir düşüşle 105 kN'a gerilemiştir. Yük düşüşü ile beraber \pm elyaf sarım açısı doğrultusunda oluşan çatlaklar ilerlemeye devam etmiş ve çatlak ilerlemesi 90 kN yük seviyesinde seyretmiştir. Numune yapısında ciddi bir hasar olduğu için numunenin deneyi sonlandırılmıştır.

Şekil 5.22'de hibrid numunede deney sonrasında oluşan hasar gösterilmektedir.



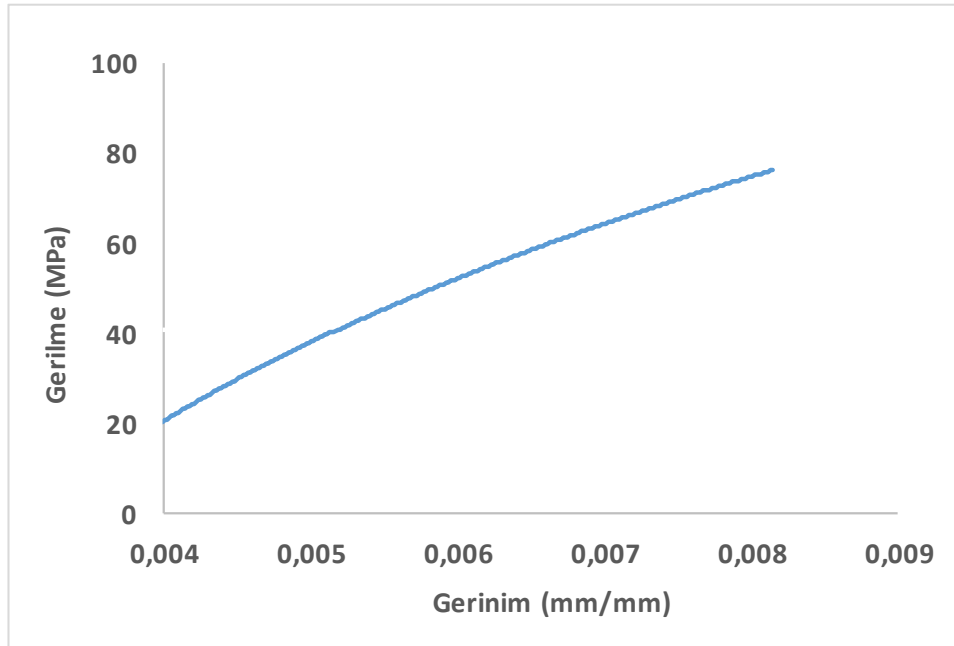
Şekil 5.22. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) hibrid kompozit boruda-0,5 oluşan hasar (deney öncesi-sonrası)

Şekil 5.23'de ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) sarım açısı konfigürasyonuna sahip su/ çimento oranı 0,5 olan geniş çimentolu betonla doldurulmuş hibrid kompozit borunun basınç deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş yük-deplasman (yer değiştirme) grafiği görülmektedir.



Şekil 5.23. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) sarım açılı hibrid-0,5 numunenin yük-deplasman grafiği

Şekil 5.24'de ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) sarım açılı içerisinde 0,5 su/ çimento oranına sahip betonla doldurulmuş hibrid numunenin basınç deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş gerilme-gerinim (şekil değiştirme) grafiği görülmektedir. Numunenin maksimum basınç dayanımı 68,67 MPa, bu dayanıma karşılık gelen radyal yöndeki birim şekil değiştirme 0,00819 olarak bulunmuştur.

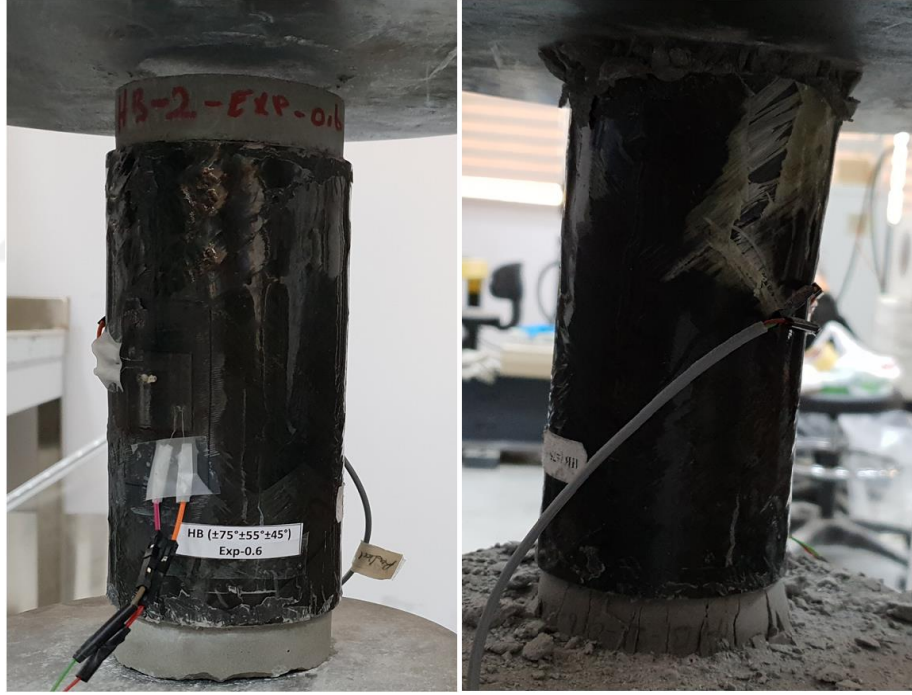


Şekil 5.24. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) sarım açılı hibrid-0,5 numunenin gerilme-gerinim grafiği

5.9. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) Hibrid Kompozit Borunun-0,6 Basınç Deneyi Sonuçları

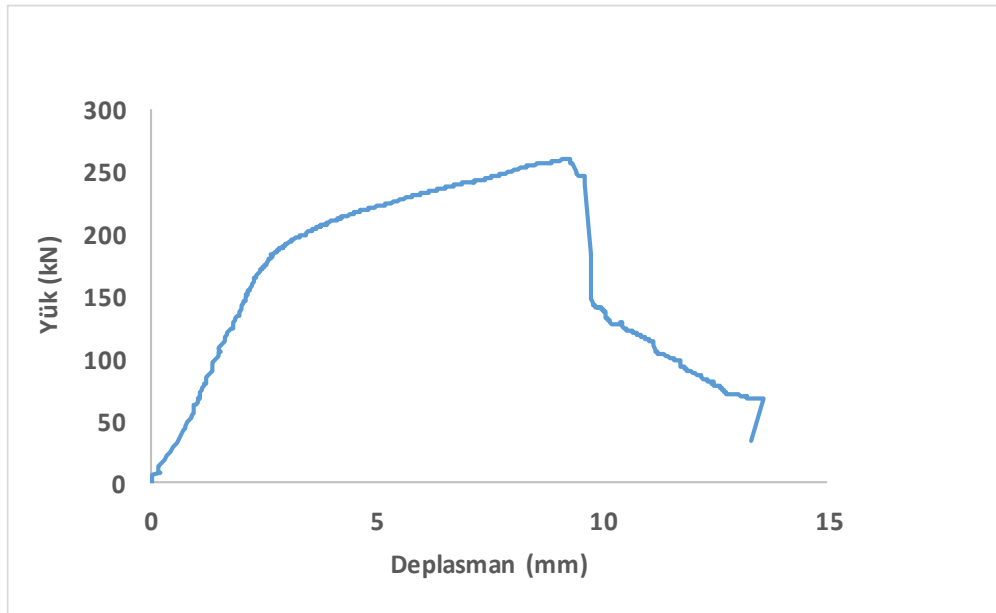
($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$)-HB-0,6 numunesinin basınç testinde uygulanan yük 120 kN'a ulaştığında betonun üst kısmında küçük dökülmeler oluşmuştur. Yük 250 kN'a geldiğinde betonda ciddi şekilde ezilmeler oluşmuş ve matrizen çatlak sesleri gelmeye başlamıştır. 260 kN yük seviyesinde kompozit numunede ani hasar oluşmuş ve hasar oluşumu ile beraber yük değeri 145 kN seviyesine gerilemiştir. Numunede yüklem eksenini doğrultusunda hasarın ilerlemesiyle beraber yük değeri 60 kN seviyesine kadar gerilemiş ve elyaf sarım açısı doğrultusunda çatlak ilerlemeye devam etmiştir. Oluşan hasarın ilerlemesi numunenin her tabakasındaki \pm elyaf sarım açısı doğrultusunda devam ettiği gözlemlenmiş ve elyaf hasarı olduğu için numunenin deneyi sonlandırılmıştır.

Şekil 5.25'de hibrid numunede deney sonrasında oluşan hasar gösterilmektedir.



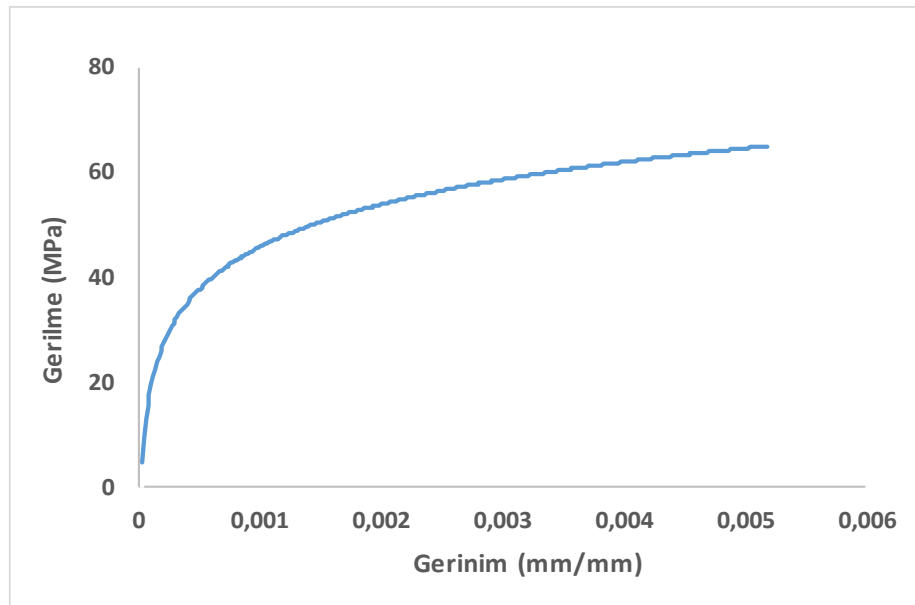
Şekil 5.25. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) hibrid kompozit boruda-0,6 oluşan hasar (deney öncesi-sonrası)

Şekil 5.26'da ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) sarım açısı konfigürasyonuna sahip su/ çimento oranı 0,6 olan geniş çimentolu betonla doldurulmuş hibrid kompozit borunun basınç deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş yük-deplasman (yer değiştirme) grafiği görülmektedir.



Şekil 5.26. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) sarım açılı hibrid-0,6 numunenin yük-deplasman grafiği

Şekil 5.27'de ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) sarım açılı içerisinde 0,6 su/ çimento oranına sahip betonla doldurulmuş hibrid numunenin basınç deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş gerilme-gerinim (şekil değiştirme) grafiği görülmektedir. Numunenin maksimum basınç dayanımı 63,99 MPa, bu dayanıma karşılık gelen radyal yöndeki birim şekil değiştirme 0,00518 olarak bulunmuştur.

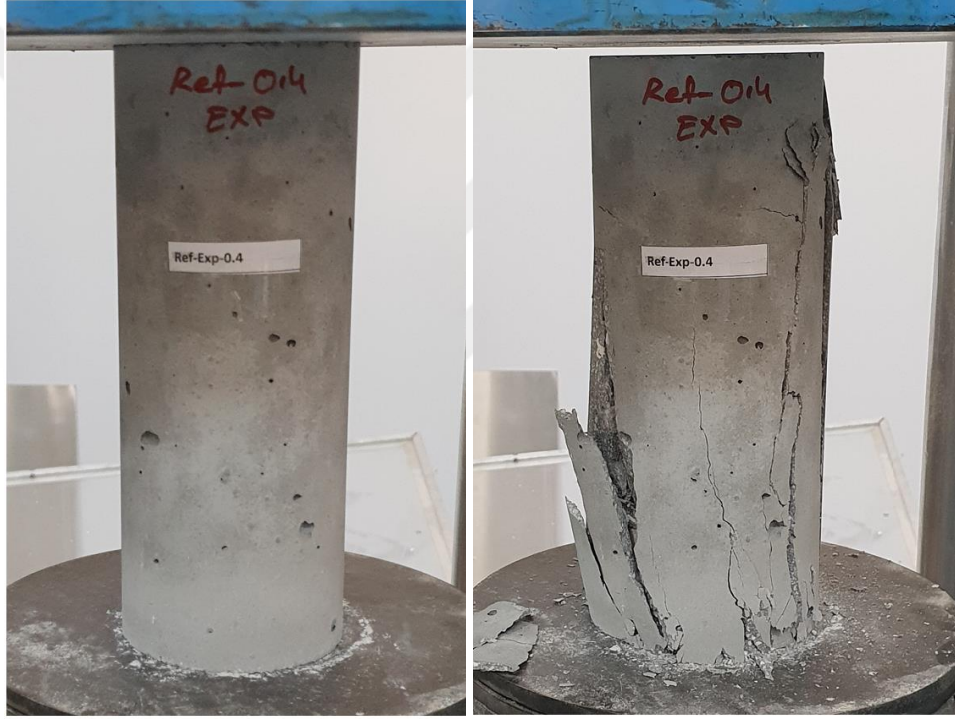


Şekil 5.27. ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) sarım açılı hibrid-0,6 numunenin gerilme-gerinim grafiği

5.10. Referans Kolonun-0,4 Basınç Deneyi Sonuçları:

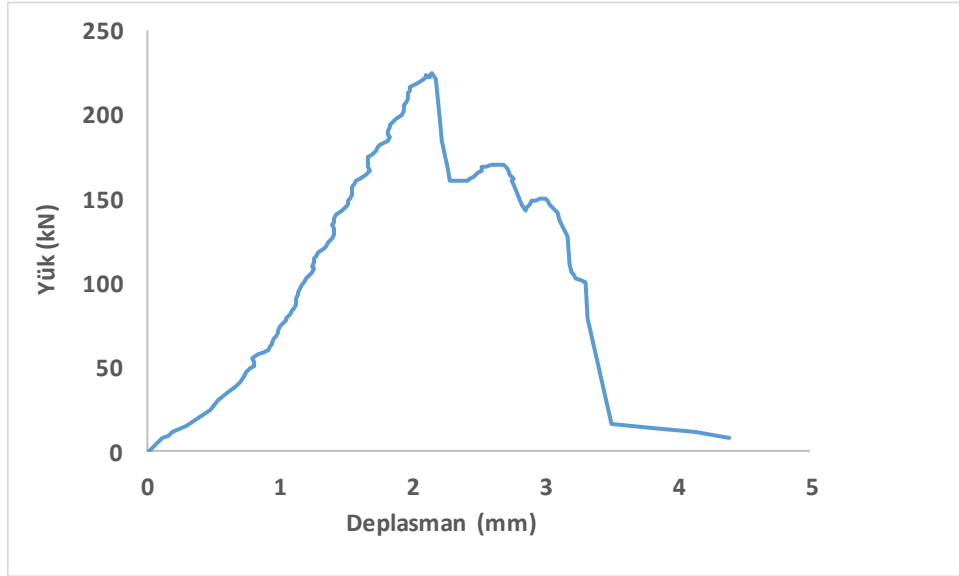
Su/ çimento oranı 0,4 olan genişleyen çimentoyla üretilmiş referans numunenin basınç testinde, uygulanan aksenal yük 160 kN'a ulaştığında betonun alt kısımda çatlak oluşmuştur. 224 kN'a kadar yük artışı gerçekleşmiş ve çatlamalardan dolayı yükte düşüş olmuştur. Çatlak aşağıdan yukarıya doğru ilerlemiş ve sonuç hasarına uğradığı için numunenin deneyi sonlandırılmıştır. Numunenin basınç dayanımı 55,14 MPa olarak bulunmuştur.

Şekil 5.28'de referans numunede deney sonrasında oluşan hasar gösterilmektedir.



Şekil 5.28. Referans-0,4 numunede oluşan hasar (deney öncesi-sonrası)

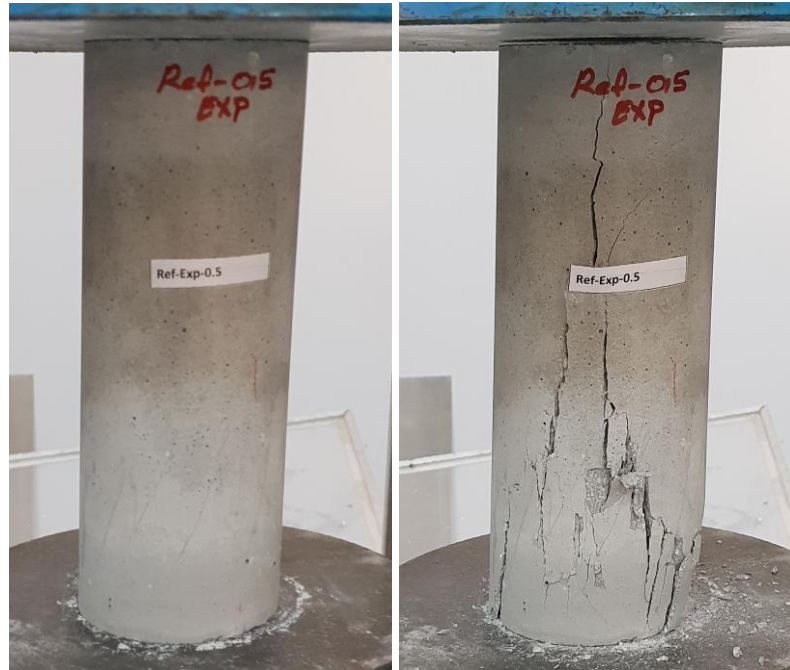
Şekil 5.29'da su/ çimento oranı 0,4 olan genişleyen çimentoyla üretilmiş referans numunenin basınç deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş yük-deplasman (yer değiştirme) grafiği görülmektedir.



Şekil 5.29. 0,4 su/ çimento oranına sahip referans numunenin yük-deplasman grafiği

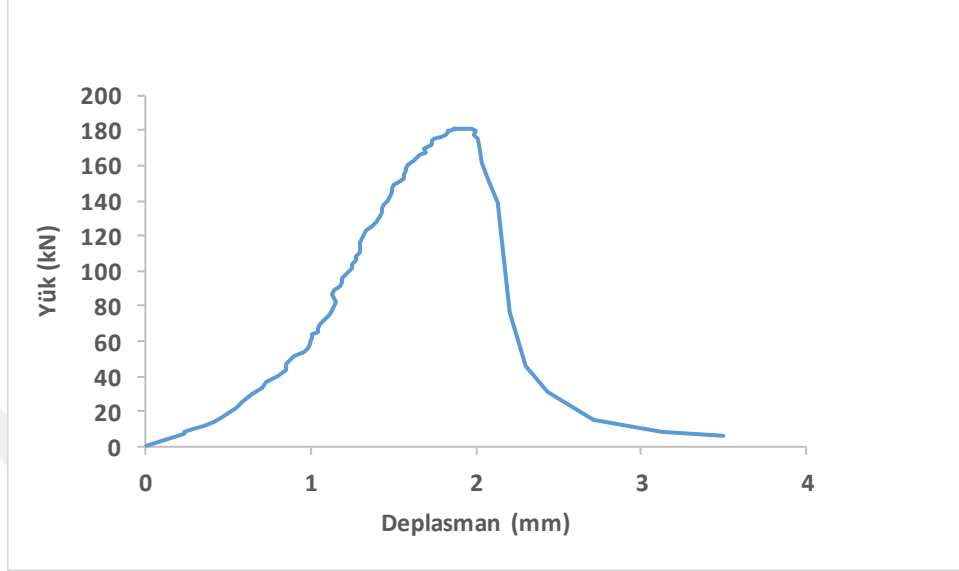
5.11. Referans Kolonun-0,5 Basınç Deneyi Sonuçları:

Su/ çimento oranı 0,5 olan genişletilmiş çimentoyle üretilmiş referans numuneye aksenal yük uygulanmaya başlanmıştır. 180 kN'a kadar yük artışı olmuş ve beton sonuç hasarına uğramıştır. Numunenin basınç dayanımı 44,52 MPa olarak bulunmuştur. Şekil 5.30'da referans numunede deney sonrasında oluşan hasar gösterilmektedir.



Şekil 5.30. Referans-0,5 numunede oluşan hasar (deney öncesi-sonrası)

Şekil 5.31’de su/ çimento oranı 0,5 olan genleşen çimentoyla üretilmiş referans numunenin basınç deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş yük-deplasman (yer değiştirme) grafiği görülmektedir.



Şekil 5.31. 0,5 su/ çimento oranına sahip referans numunenin yük-deplasman grafiği

5.12. Referans Kolonun-0,6 Basınç Deneyi Sonuçları:

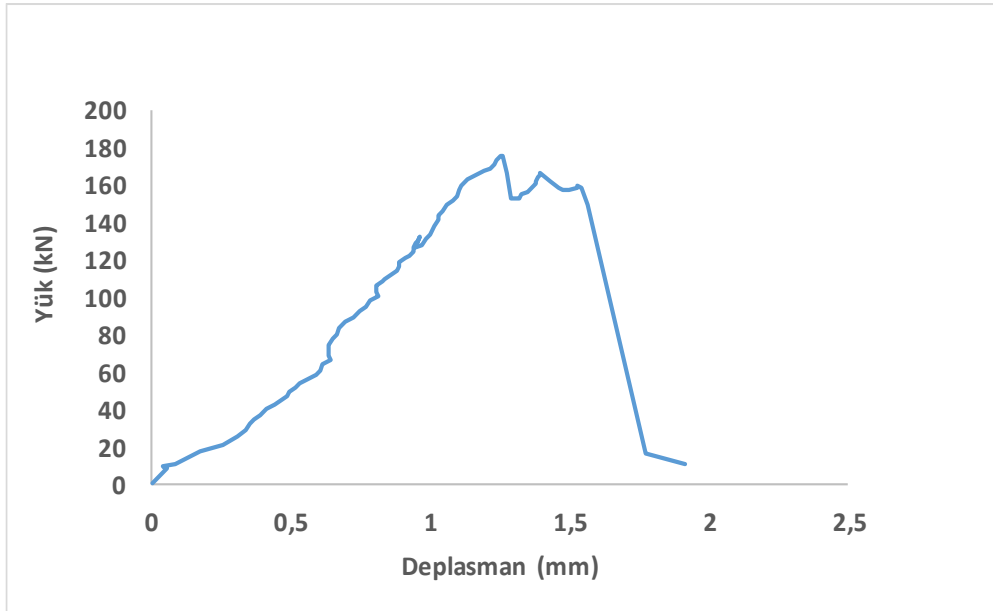
Su/ çimento oranı 0,6 olan genleşen çimentoyla üretilmiş referans numunenin basınç testinde uygulanan aksenal yük 170 kN'a ulaştığında betonun alt kısımda çatlaklar oluşmuş ve hızlı bir şekilde çatlak tüm yüzeyi sarmıştır. Sonuç hasarına uğrayan numunenin deneyi sonlandırılmıştır. Numunenin basınç dayanımı 43,16 MPa olarak bulunmuştur.

Şekil 5.32’de referans numunede deney sonrasında oluşan hasar gösterilmektedir.



Şekil 5.32. Referans-0,6 numunede oluşan hasar (deney öncesi-sonrası)

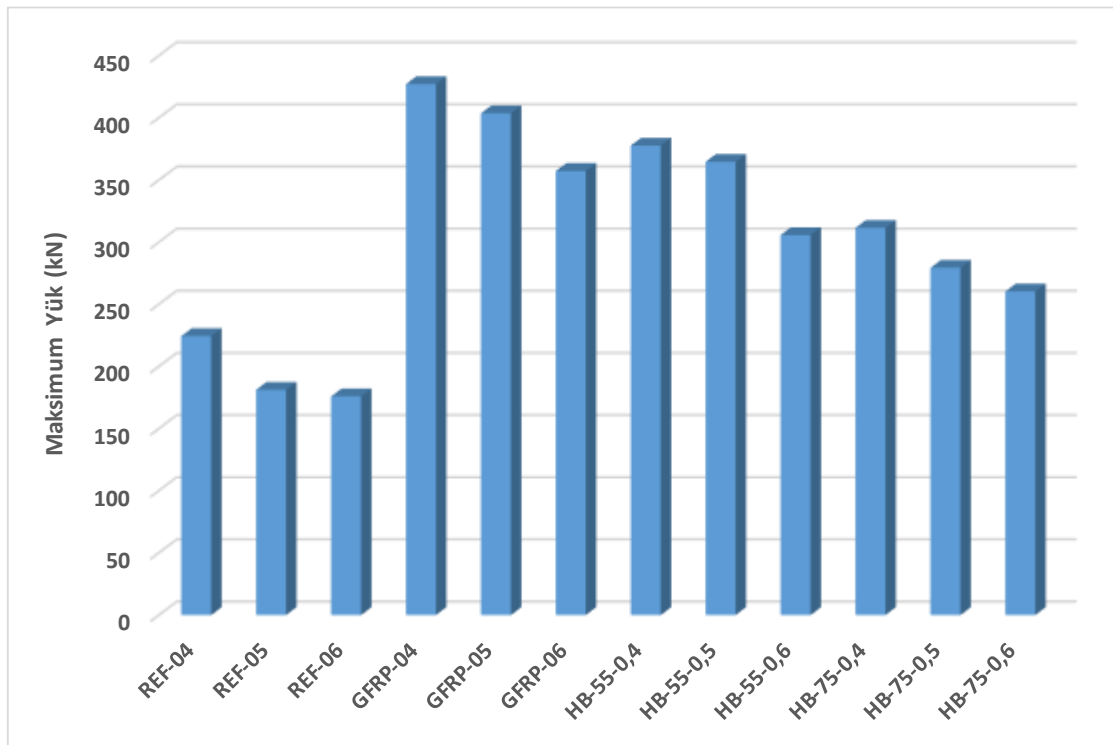
Şekil 5.33’de su/ çimento oranı 0,6 olan genleşen çimentoyla üretilmiş referans numunenin basınç deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş yük-deplasman (yer değiştirme) grafiği görülmektedir.



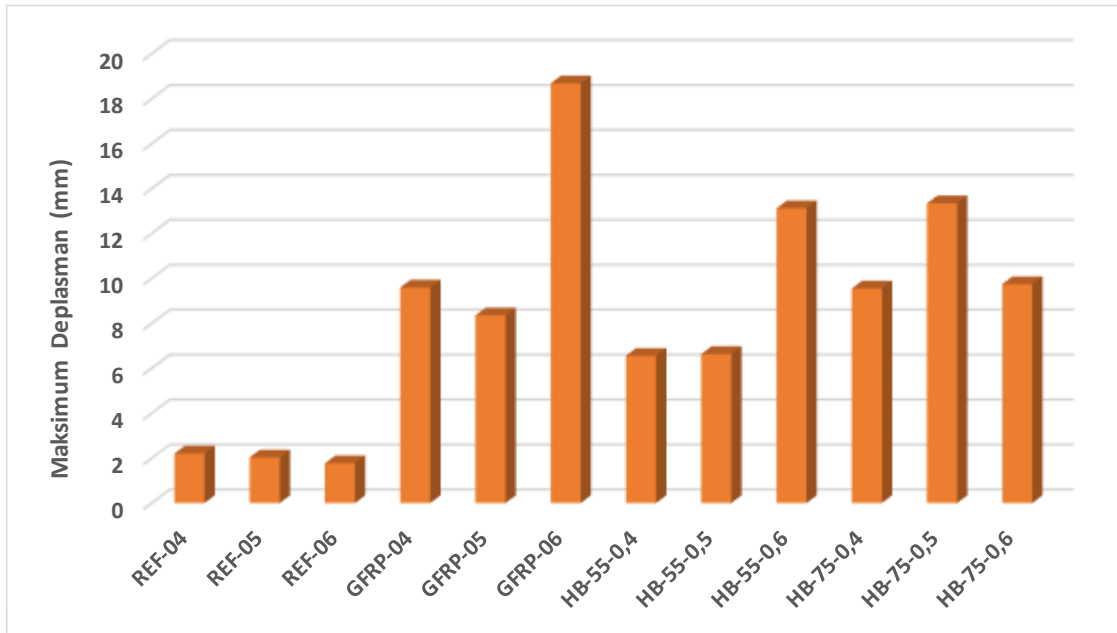
Şekil 5.33. 0,6 su/ çimento oranına sahip referans numunenin yük-deplasman grafiği

5.13. Basınç Deneyi Sonuçları ve Karşılaştırmalar

Yaptığımız deneysel çalışmaların sonuçları değerlendirilip, elde ettiğimiz değerlerin grafiksel olarak sonuçları ifade edilmiştir. Sonuçlara bakılarak malzemenin farklı kombinasyonlardaki deney basınç davranışları incelenmiş ve yorumlanmıştır. Ayrıca numunelerin basınç davranışı ile ilgili yaptığımız çalışmalara bakarak malzemenin kullanılabilirliği karşılaştırılmıştır. Farklı sarım açılı ve farklı su/ çimento oranına sahip genleşen çimentolu kompozit kolonlar ve referans numunelerin basınç testleri yapılmıştır. Deneyde 3 adet referans, 3 adet ($\pm 55^\circ$)₃ sarım açılı cam elyaf takviyeli kompozit numune kullanılmıştır. Bunun yanında 3 adet ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) sarım açılı cam/karbon/cam elyaf takviyeli hibrid kompozit numune, 3 adet ($\pm 55^\circ$)₃ sarım açılı cam/karbon/cam elyaf takviyeli hibrid kompozit numune olmak üzere toplamda 3 farklı parametrede 12 adet numune kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Numunelerin maksimum yük ve maksimum deplasman sonuçları Şekil 5.34 ve Şekil 5.35’de gösterilmiştir. Maksimum yük ve maksimum deplasman değerleri referans numunelerinde betonun tamamen hasar gördüğü değerler, kompozit kolon numunelerinde betonun çökmesinden sonra kompozit borunun hasar gördüğü yük ve deplasman değerleri dikkate alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır.



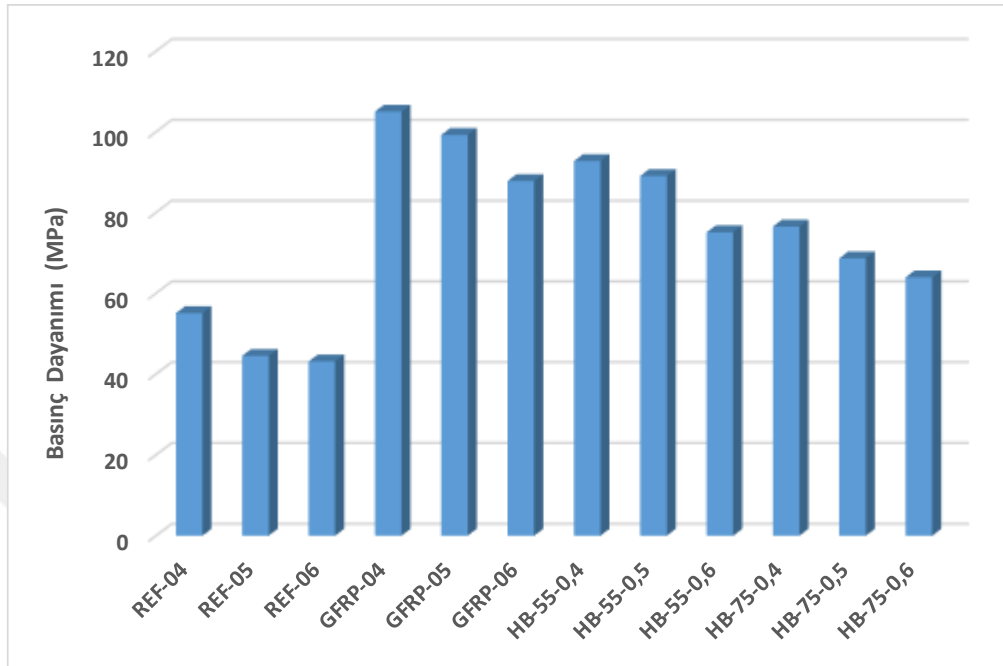
Şekil 5.34. Deney numunelerinin maksimum yük dayanımı sonuçları



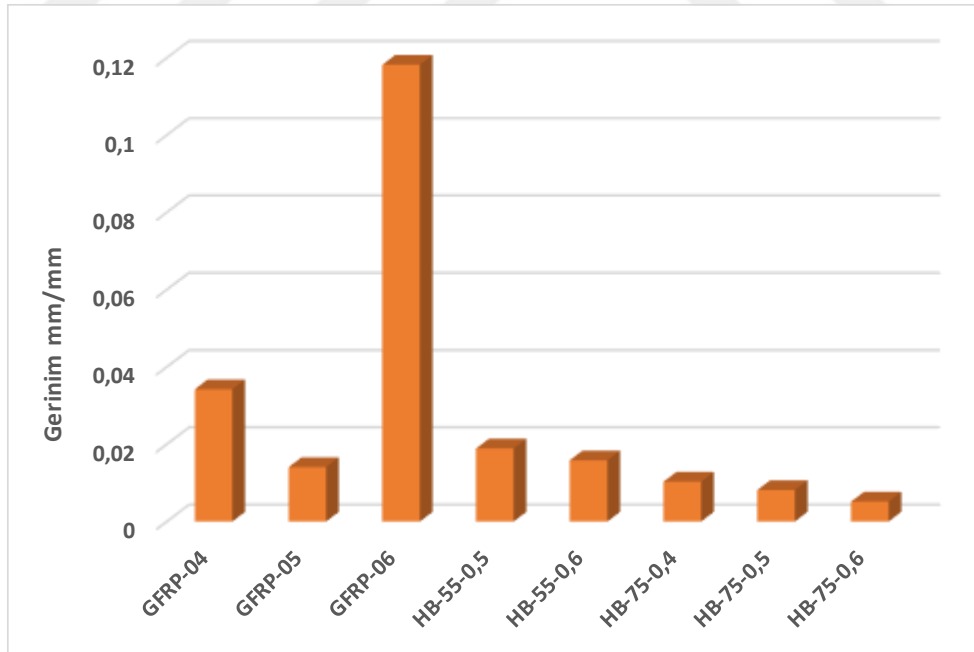
Şekil 5.35. Deney numunelerinin maksimum deplasman sonuçları

Deney numunelerine yapılan aksenal basınç testi sonucunda Ref-0,4 numunesinde maksimum yük 224 kN'a kadar çıkarken maksimum deplasman 2,20 mm gibi bir değere ulaşmıştır. Ref-0,5 numunesinde ise maksimum yük 181 kN değerine ulaşmış maksimum deplasman ise 2,03 mm değerini vermiştir. Ref-0,6 numunesinde maksimum yük 175 kN'a ulaşmış maksimum deplasman ise 1,77 mm değerini vermiştir. $(\pm 55^\circ)_3$ GFRP-0,4 numunesi 427 kN maksimum yüke ulaşmış maksimum deplasman 9,59 mm değerini vermiştir. $(\pm 55^\circ)_3$ GFRP-0,5 numunede maksimum yük 403 kN değerine ulaşmış maksimum deplasman 8,35 mm değerini vermiştir. $(\pm 55^\circ)_3$ GFRP-0,6 numune 357 kN maksimum yüke ulaşmış maksimum deplasman 18,68 mm gibi yüksek bir değere ulaşmıştır. $(\pm 55^\circ)_3$ Hibrid-0,4 numunesinde maksimum yük 377 kN'a ulaşmış maksimum deplasman 6,55 mm değerini vermiştir. $(\pm 55^\circ)_3$ Hibrid-0,5 numunesi 364 kN maksimum deplasman değerine ulaşmış maksimum deplasman 6,63 mm'ye ulaşmıştır. $(\pm 55^\circ)_3$ Hibrid-0,6 numunesi 305 kN maksimum yüke ulaşmış maksimum deplasman 13,12 mm değerini vermiştir. $(\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ)$ Hibrid-0,4 numunesinde maksimum yük 311 kN'a ulaşmış maksimum deplasman 9,55 mm olmuştur. $(\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ)$ Hibrid-0,5 numunesi 279 kN maksimum yük ve 13,34 mm maksimum deplasman yapmıştır. $(\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ)$ Hibrid-0,6 numunesinde maksimum yük 260 kN'a ulaşmış maksimum deplasman 9,74 mm değerini vermiştir.

Numunelerin maksimum basınç dayanımı ve maksimum şekil değişimi Şekil 5.36 ve Şekil 5.37’de verilmektedir.



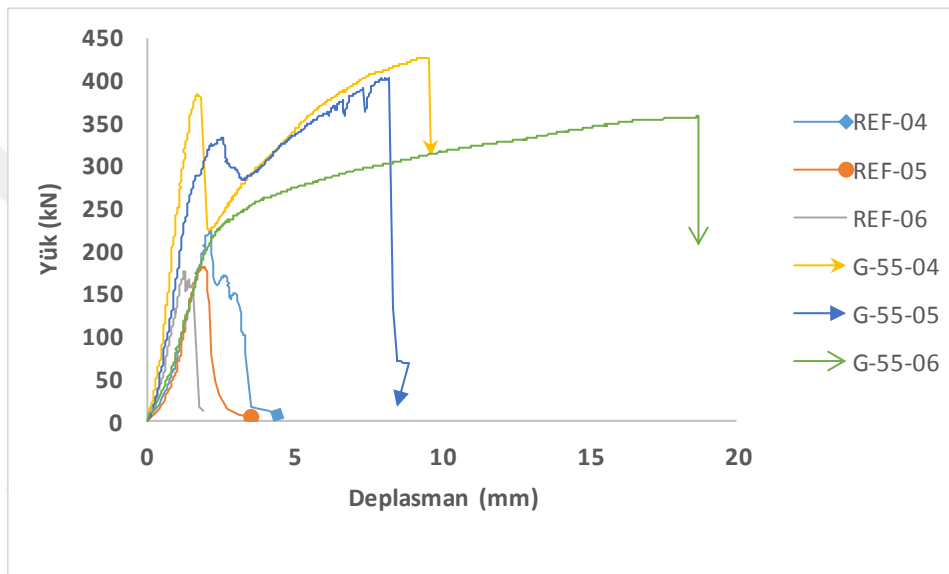
Şekil 5.36. Deney numunelerinin maksimum basınç dayanımı sonuçları



Şekil 5.37. Deney numunelerinin gerinim (şekil değişimi) sonuçları

5.13.1. Referans ve GFRP numunelerin karşılaştırılması

Genleşen çimentolu beton kullanılarak üretilmiş 0,4–0,5–0,6 su/ çimento oranına sahip referans numunelerle ($\pm 55^\circ$)₃ sarım açılı 6 tabakalı cam elyaf kullanılarak üretilmiş su/ çimento oranı 0,4-0,5-0,6 olan genleşen çimentolu betonla doldurulmuş kompozit numunelerin aksenal basınç testi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş maksimum yük-maksimum deplasman sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 5.38'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5.38. Referans numuneler ve GFRP numunelerin yük-deplasman grafiği

Basınç deneyi sonucunda Ref-0,4 numunesi 224 kN yük taşımış ve 2,20 mm şekil değişimine uğramış, cam elyaf kompozit boruyla güçlendirilmiş aynı su/ çimento oranına sahip G-55-0,4 numunesinde sargı etkisiyle birlikte 427 kN basınç yüküne ulaşmış ve 9,59 mm şekil değişimi olmuştur. Referans numuneye oranla cam elyaf kompozit boruyla güçlendirilmiş G-55-0,4 numunesinde yük taşıma kapasitesi %90 artmış, deplasmanın ise referans numuneye oranla %335 arttığı görülmüştür. Ref-0,5 numunesi su/ çimento oranındaki değişikliğin etkisiyle Ref-0,4 numunesine göre yükün bir miktar düşmesiyle 181 kN yük taşımış ve 2,03 mm deplasman yapmıştır. G-55-0,5 numunesi 403 kN maksimum yükte sonuç hasarına uğramış ve 8,35 mm deplasman yapmıştır. Aynı su/ çimento oranına sahip olan Ref-0,5 numunesine oranla G-55-0,5 numunesinin yük taşıma kapasitesi %122 artmış şekil değişimi %311 oranında yükselmiştir. Ref-0,6 numunesinde su/ çimento oranındaki artıştan dolayı referans

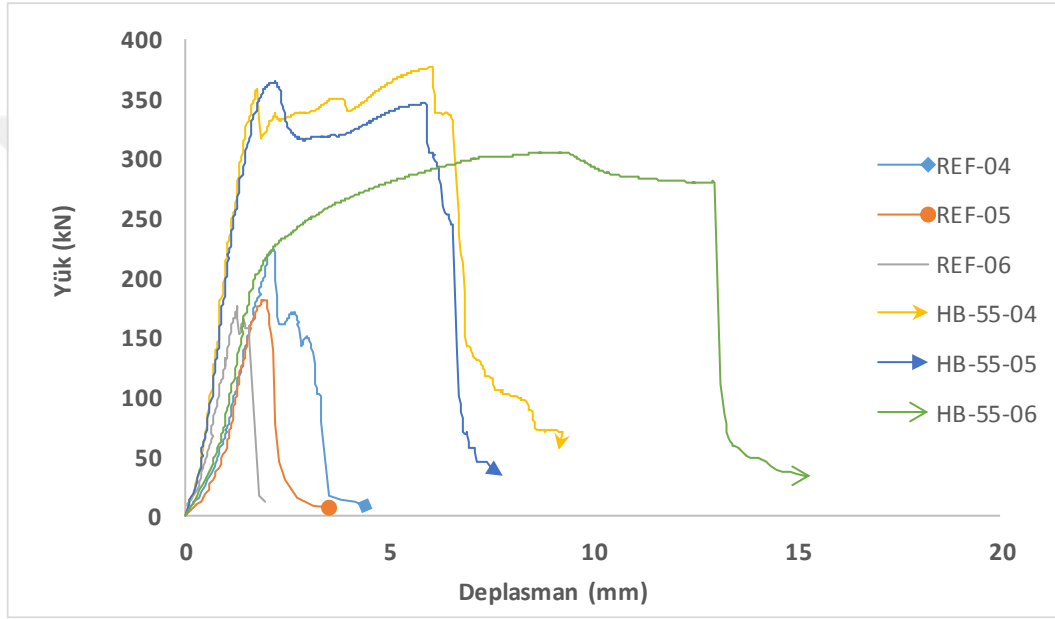
numunelere göre maksimum yük 175 kN'a düşmüş ve deplasman 1,77 mm olmuştur. G-55-0,6 numunesi 357 kN maksimum yük taşımış ve 18,68 mm gibi yüksek bir deplasman değerine ulaşmış ve numune sünek bir davranış göstermiştir. Aynı su/ çimento oranına sahip Ref-0,6 numunesine oranla G-55-0,6 numunesi %104 daha fazla yüke dayanmış ve deplasman %955 oranında artmıştır. Yük taşıma kapasitesinde en iyi sonucu su/ çimento oranı en düşük olan G-55-0,4 numunesi vermiş, en yüksek deplasman değerine ise su/ çimento oranı en yüksek olan G-55-0,6 numunesi ulaşmıştır. Numunelerin deney sonrası hasarlı görüntüleri Şekil 5.39'da gösterilmiştir.



Şekil 5.39. Referans ve GFRP numunelerin deney sonrası görüntüleri

5.13.2. Referans ve $(\pm 55^\circ)_3$ hibrid numunelerin karşılaştırılması

Genleşen çimentolu beton kullanılarak üretilmiş 0,4–0,5–0,6 su/ çimento oranına sahip referans numunelerle $(\pm 55^\circ)$ sarım açılı 6 tabakalı cam-karbon elyaf kullanılarak üretilmiş su/ çimento oranı 0,4-0,5-0,6 olan genleşen çimentolu betonla doldurulmuş kompozit numunelerin aksenal basınç testi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş maksimum yük-maksimum deplasman sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 5.40'daki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5.40. Referans numuneler ve $(\pm 55)_3$ hibrid numunelerin yük-deplasman grafiği

Basınç testi sonucunda su/ çimento oranı 0,4 olan HB-55-0,4 numunesi 377 kN maksimum yük taşımış ve 6,55 mm deplasman yapmıştır. Su/ çimento oranı aynı olan Ref-0,4 numunesine oranla yükte %68 artış olduğu gözlenmiştir. Deplasmanda ise %197 oranında artış olmuştur. Test sonucunda HB-55-0,5 numunesinde küçük bir yük düşüşü olmuş ve 364 kN'da sonuç hasarına uğramıştır ve 6,63 mm deplasman yapmıştır. Su/ çimento oranı 0,5 olan Ref-0,5 numunesine oranla maksimum yük taşıma kapasitesi %101 artmış ve deplasman %226 oranında yükselmiştir. HB-55-0,6 numunesinde su/ çimento oranındaki artıştan dolayı maksimum yükte düşüş gerçekleşmiş ve 305 kN'da sonuç hasarına uğramıştır, deplasman ise 13,12 mm'ye yükselmiştir. Aynı su/ çimento oranına sahip Ref-0,6 numunesine oranla %74 yük artışı olmuş deplasman ise %641 oranında artmıştır. Yük taşıma kapasitesinde en iyi sonucu

su/ çimento oranı en düşük olan HB-55-0,4 numunesi vermiş, en yüksek deplasman değerine ise su/ çimento oranı en yüksek olan HB-55-0,6 numunesi ulaşmıştır. Referans numuneye oranla çok daha sünek bir yapı elde edilmiştir. Numunelerin deney sonrası hasarlı görüntüleri Şekil 5.41’de gösterilmiştir.

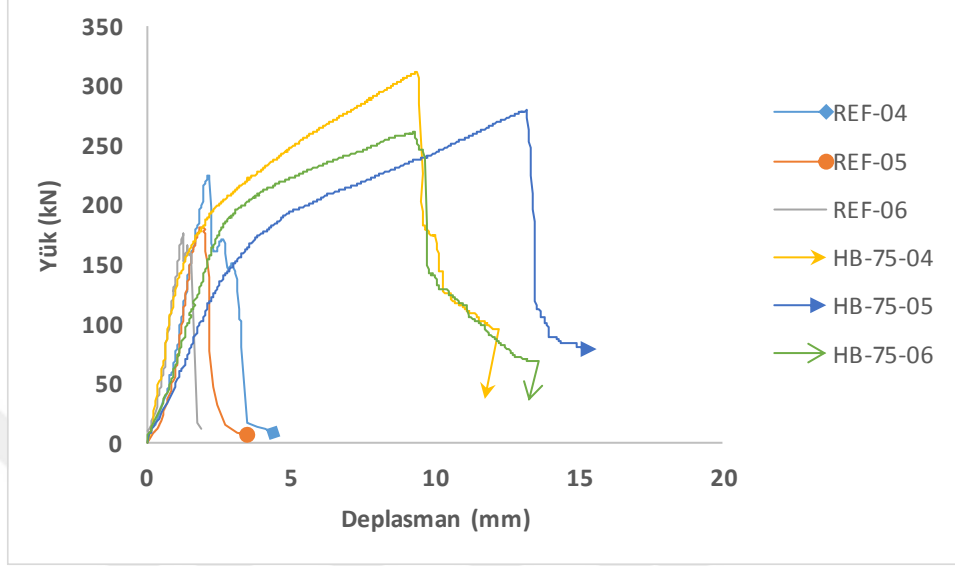


Şekil 5.41. Referans ve $(\pm 55)_3$ hibrid numunelerin deney sonrası görüntüleri

5.13.3. Referans ve $(\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ)$ hibrid numunelerin karşılaştırılması

Genleşen çimentolu beton kullanılarak üretilmiş 0,4–0,5–0,6 su/ çimento oranına sahip referans numunelerle $(\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ)$ sarım açılı 6 tabakalı cam-karbon elyaf kullanılarak üretilmiş su/ çimento oranı 0,4-0,5-0,6 olan genleşen çimentolu

betonla doldurulmuş kompozit numunelerin aksel basınç testi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş maksimum yük-maksimum deplasman sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 5.42'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5.42. Referans numuneler ve ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) hibrid numunelerin yük-deplasman grafiği

Deney sonucunda HB-75-0,4 numunesi sonuç hasarına 311 kN yükte uğramıştır. Deplasman ise 9,55 mm'dir. Aynı su/ çimento oranına sahip Ref-0,4 numunesine oranla %38 yük artışı gerçekleşmiş ve deplasman ise %334 oranında artmıştır. HB-75-0,5 numunesi 279 kN yük taşımış ve maksimum şekil değiştirme 13,34 mm'ye ulaşmıştır. Ref-0,5 numunesine oranla %54 yük artışı olmuş, deplasman ise %557 oranında yükselmiştir. HB-75-0,6 numunesinin sonuç hasarı 260 kN'da gerçekleşmiş ve 9,74 mm deplasman yapmıştır. Aynı su/ çimento oranına sahip Ref-0,6 numunesine oranla maksimum yük %48 yükselmiştir. Deplasman ise %450 artmıştır. Maksimum yük taşıma kapasitesinde en yüksek sonucu HB-75-0,4 numunesi vermiş en yüksek deplasmanı ise HB-75-0,5 numunesi vermiştir. Kompozit numunenin sarım açısındaki 45° derece numunenin elyaf doğrultusunda artı eksi yönde hasara uğramasını hızlandırmış yük taşıma kapasitesinin düşmesine neden olmuştur. En yüksek yük taşıma kapasitesini su/ çimento oranı 0,4 olan numunenin vermesi beklenmiş ve en yüksek değeri HB-75-0,4 numunesi vermiştir. Deplasmanda ise diğer kompozit numunelerde olduğu gibi su/ çimento oranı en yüksek olan numunenin vermesi beklenmiş ancak HB-75-0,5 numunesi en yüksek sonucu vermiştir. Bu sarım açısına sahip numuneler genel

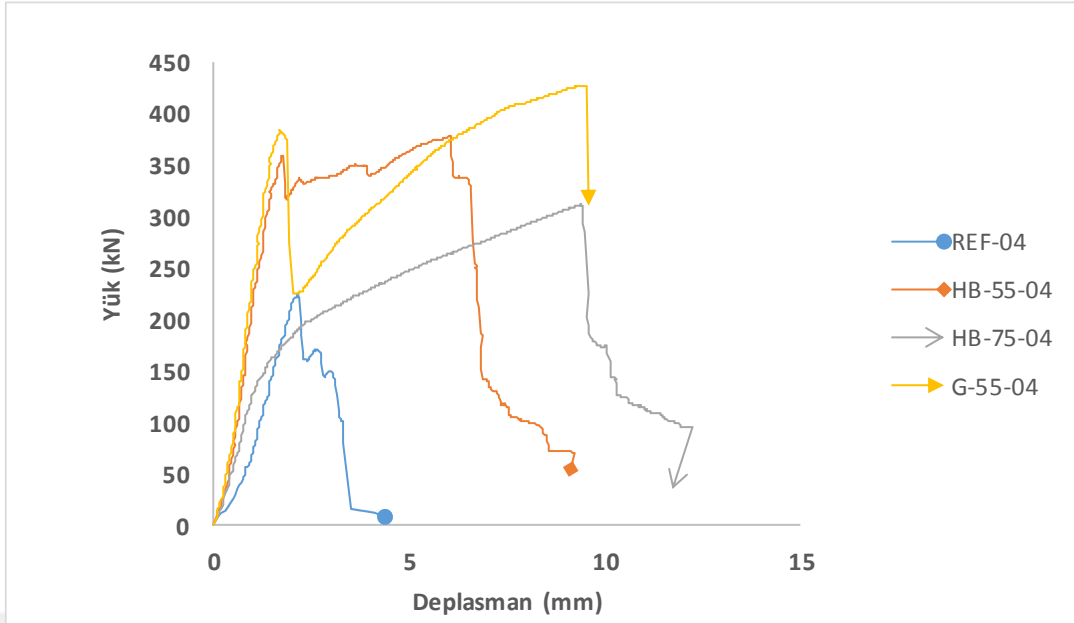
olarak birbirine yakın süneklik davranışı sergilemiştir. Numunelerin deney sonrası hasarlı görüntüleri Şekil 5.43’de gösterilmiştir.



Şekil 5.43. Referans ve ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) hibrid numunelerin deney sonrası görüntüleri

5.13.4. Su/ çimento oranı 0,4 olan numunelerin karşılaştırılması

Genleşen çimentolu beton kullanılarak üretilmiş 0,4 su/ çimento oranına sahip referans ve kompozit numunelerin aksenal basınç testi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş maksimum yük-maksimum deplasman sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 5.44’deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5.44. Su/ çimento oranı 0,4 olan numunelerin yük-deplasman grafiği

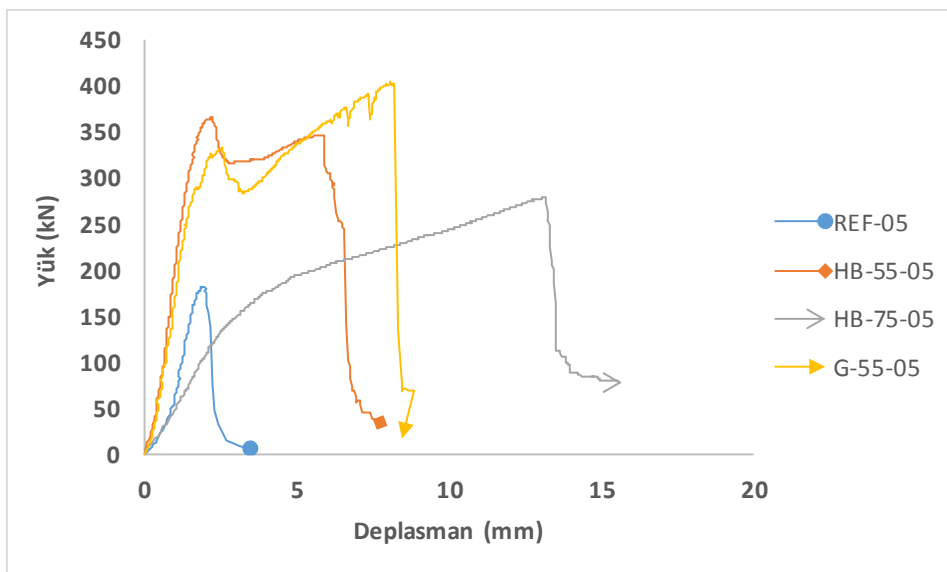
Basınç deneyi sonucunda su/ çimento oranı aynı olan numunelerden Ref-0,4 224 kN'da sonuç hasarına uğramış ve 2,20 mm deplasman yapmıştır. HB-55-0,4 numunesi 377 kN yük taşımış ve 6,55 mm deplasman yapmıştır. HB-75-0,4 numunesi 311 kN maksimum yüke ulaşmış ve 9,55 mm deplasman yapmıştır. G-55-0,4 numunesi sonuç hasarına 427 kN'da ulaşmış ve 9,59 mm deplasman yapmıştır. Deney sonuçlarına ve numune hasar görüntülerine bakınca kompozit numunelerin referans numuneye oranla yük taşıma kapasitesi en yüksek %90 oranında artmıştır. Süneklikte ise %335 oranında artış göstermiştir. En iyi yük taşıma kapasitesini cam elyaf takviyeli kompozit boru vermiştir. Hibrid kompozit numunelerde ise 55° yük taşıma kapasitesini arttırmış numunenin hasara uğramasını geciktirmiştir. 45° ise numunenin hasara uğramasını hızlandırmıştır. En iyi deplasmanı G-55-0,4 numunesi vermiştir. Numunelerin deney sonrası hasar görüntüleri 5.45'de gösterilmiştir.



Şekil 5.45. Su/ çimento oranı 0,4 olan numunelerin deney sonrası görüntüleri

5.13.5. Su/ çimento oranı 0,5 olan numunelerin karşılaştırılması

Genleşen çimentolu beton kullanılarak üretilmiş 0,5 su/ çimento oranına sahip referans ve kompozit numunelerin eksenel basınç testi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş maksimum yük-maksimum deplasman sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 5.46'daki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5.46. Su/ çimento oranı 0,5 olan numunelerin yük-deplasman grafiği

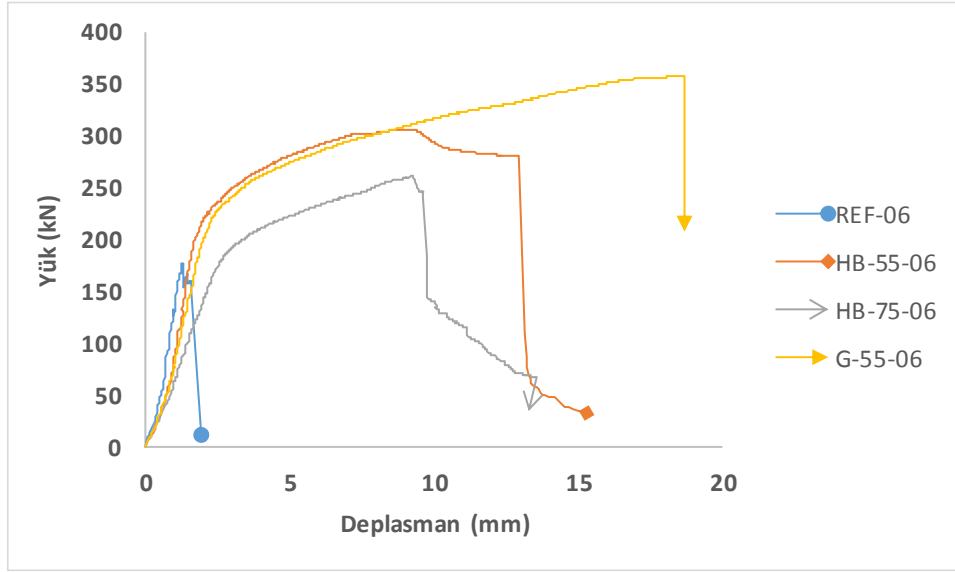
Basınç testi sonucunda su/ çimento oranı 0,5 olan numunelerden Ref-0,5 sonuç hasarına 181 kN’da ulaşmış ve 2,03 mm deplasman yapmıştır. HB-55-0,5 364 kN yük taşımış ve 6,63 mm deplasman yapmıştır. HB-75-0,5 numunesi sonuç hasarına 279 kN’da uğramış ve 13,34 mm deplasman yapmıştır. G-55-0,5 numunesi ise 403 kN yük taşımış 8,35 mm deplasman yapmıştır. Referans numuneye oranla kompozit numuneler %142 oranında yük taşıma kapasitesinde artış gerçekleşmiştir. Deplasmanda %557 artış olmuştur. Yük taşıma kapasitesinde en iyi sonucu yine cam elyaf takviyeli numune vermiştir. Deplasmanda en yüksek sonucu sarım açısından dolayı 75-55-45 hibrid numune vermiştir. Numunelerin deney sonrası hasar görüntüleri Şekil 5.47’de gösterilmiştir.



Şekil 5.47. Su/ çimento oranı 0,5 olan numunelerin deney sonrası görüntüleri

5.13.6. Su/ çimento oranı 0,6 olan numunelerin karşılaştırılması

Genleşen çimentolu beton kullanılarak üretilmiş 0,6 su/ çimento oranına sahip referans ve kompozit numunelerin aksenal basınç testi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş maksimum yük-maksimum deplasman sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 5.48’deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5.48. Su/ çimento oranı 0,6 olan numunelerin yük-deplasman grafiği

Basınç testi sonucunda su/ çimento oranı 0,6 olan numunelerden Ref-0,6 175 kN yük taşımış 1,77 mm de deplasman yapmıştır. HB-55-0,6 numunesi 305 kN da sonuç hasarına uğramış ve 13,12 mm deplasman yapmıştır. HB-75-0,6 numunesi 260 kN yük taşımış ve 9,74 mm deplasman yapmıştır. G-55-0,6 numunesi sonuç hasarına 357 kN'da ulaşmış ve 18,68 mm deplasman yapmıştır. Referans numuneye oranla kompozit numunenin sargı etkisi sayesinde yük taşıma kapasitesinde %104 artış gerçekleşmiş ve deplasman %955 oranında artmıştır. En yüksek yük taşıma kapasitesini ve en iyi deplasmanı cam elyaf takviyeli G-55-0,6 numunesi vermiştir. Numunelerin hasar sonrası görüntüleri Şekil 5.49'da gösterilmiştir.



Şekil 5.49. Su/ çimento oranı 0,6 olan numunelerin deney sonrası görüntüleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

1. Silindirik kompozit numunelerin aksenal yüklemeye sargı etkisinin, yük taşıma kapasitesi ve deplasmanda ciddi bir etkiye sahip olduğu gözlenmiş ve deney sonuçlarıyla tespit edilmiştir.
2. Deney değişkenlerinden olan su/ çimento oranı arttıkça kompozit numunelerde yük taşıma kapasitesi azalmış deplasman ise artmıştır. Bunun nedeni su/ çimento oranı arttıkça betonun daha çabuk hasar görmesi daha düşük yük taşıması, yükü kompozit numunenin homojen bir şekilde taşımaya devam etmesi ve kompozit numunenin boyunda kısalmalar ve çapta artışların olmasıdır.
3. Su/ çimento oranının betonun basınç dayanımı üzerinde büyük bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Su/çimento oranı azaldıkça betonun dayanımının arttığı görülmüştür. Su/ çimento oranı arttıkça betonun içinde oluşan gözeneklerden dolayı yük taşıma kapasitesi düşmektedir. Su/ çimento oranı azaldıkça, literatüre uygun olarak, betonun basınç dayanımı artmaktadır.
4. Su/ çimento oranı 0,6 olan numuneler 0,4 ve 0,5 olan numunelere oranla yükte bir miktar düşüş olurken deplasmanda yaklaşık iki kat artış gerçekleşmiştir.
5. Sarım açısı ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) olan hibrid numunelerde su/ çimento oranı değişmesine rağmen sarım açısındaki değişiklikten dolayı yük taşımaları ve deplasmanları yakın çıkmıştır.
6. Tüm deney numuneleri içinde en iyi yük taşıma kapasitesini 427 kN ile cam elyaf takviyeli G-55-0,4 numunesi vermiş ve yük taşınması istenen yapılarda ve tasarımlarda bu numunenin kullanılması avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.
7. Tüm deney numuneleri içerisinde en iyi deplasman değerini su/ çimento oranı 0,6 cam elyaf takviyeli G-55-0,6 numunesi vermiştir. G-55-0,6 numunesi 18,68 mm deplasman yapmıştır. Bu nedenle süneklik istenen uygulamalarda ve tasarımlarda bu numunenin kullanımının avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.

Özellikle deprem bölgelerinde hasar görmesi muhtemel yapılarda kullanılması kritik önem taşıyacaktır.

8. Kompozit numunelerin yük taşıma kapasitesine sarım açısının yüksek bir etkisinin olduğu görülmüş aynı su/ çimento oranına sahip ($\pm 55^\circ$)₃ hibrid ve ($\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$) hibrid numunelerin yük taşıma kapasitesinin farklı olduğu tespit edilmiştir. 45° kompozit tabakanın kullanılması yük taşıma kapasitesinin düşmesine neden olmuştur. Kolonlarda bir dezavantaj gibi görülse de darbelere maruz kalabilecek kolonlarda kolonun dış kısmında kullanılması bir avantaj sağlayabileceği düşünülmüştür.
9. Kompozit takviyesinin yapının yük ve deplasman kapasitesini artırması ile mekanik özelliklerindeki iyileştirmeler dışında korozyon direnç özelliği sayesinde uygulandığı yapıdaki beton ve donatıyı korozyona karşı koruyacaktır. Bu özelliği de yapının kullanım ömrünü uzatmakta ve maliyet ve güvenlik açısından kazanımlar sağlamaktadır.
10. Beton gevrek bir malzemedir bu nedenle betonun basınç dayanımı ve sünekliği aranan özelliklerdendir. Basınç testlerinde düşük dayanımlı Ref-0,6 numunesi 1,77 mm deplasman yaparken aynı beton özelliklerine sahip kompozitle güçlendirilmiş numuneler 18,68 mm maksimum deplasmanla %955 artış göstererek numuneler daha sünek bir kırılma göstermiştir.

KAYNAKLAR

- Becque, J., Patnaik, A. K., & Rizkalla, S. H. (2003). Analytical models for concrete confined with FRP tubes. *Journal of Composites for Construction*, 7(1), 31-38.
- Bisby, L. A., Dent, A. J., & Green, M. F. (2005). Comparison of Confinement Models for FRP Wrapped Concrete. *ACI Structural Journal*, 62-72.
- Bouchelaghem, H., Bezazi, A., & Scarpa, F. (2011). Compressive behaviour of concrete cylindrical FRP-confined columns subjected to a new sequential loading technique. *Composites Part B: Engineering*, 42(7), 1987-1993.
- Canadian Standards Association. (2002). *Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers* (No. 2). Canadian Standards Association.
- Cerit, M. E. (2011). *Şehirlerarası otobüslerde önden çarpışma enerjisini yutucu pasif güvenlik sisteminin geliştirilmesi* (Master's thesis, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü-Makine Mühendisliği Anabilim Dalı-Mekanik ve Mukavemet Bilim Dalı).
- Ciupala, M. A., Pilakoutas, K., & Mortazavi, A. A. (2007, July). Effectiveness of FRP composites in confined concrete. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-8, Patras, Greece, July* (pp. 252-253).
- Clarke, J. L. (2003). Strengthening concrete structures with fibre composites. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 156(1), 49-50.
- Code, T. E. (2007). Specification for structures to be built in disaster areas. *Ministry of Public Works and Settlement Government of Republic of Turkey*.
- Cui, C., & Sheikh, S. A. (2010). Experimental study of normal-and high-strength concrete confined with fiber-reinforced polymers. *Journal of Composites for Construction*, 14(5), 553-561.
- Emmons, P. H., Vaysburd, A. M., & Thomas, J. (1998). Strengthening concrete structures, Part II. *Concrete International*, 20(4), 56-60.
- Ertürkmen, D., Dündar, C., & Tokgöz, S. (2017). Karbon lifli polimer sargılı standart silindirik beton numunelerin eksenel yük altındaki davranışlarının incelenmesi. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(6).
- Fam, A. Z., & Rizkalla, S. H. (2001). Confinement model for axially loaded concrete confined by circular fiber-reinforced polymer tubes. *Structural Journal*, 98(4), 451-461.
- Fardis, M. N., & Khalili, H. H. (1982). FRP-encased concrete as a structural material. *Magazine of Concrete Research*, 34(121), 191-202.

- Gemi, L. (2004). Filaman sarım CTP boruların iç basınç etkisi altında yorulma davranışı, Yüksek Lisans Tezi. *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Gemi, L., Tarakçıoğlu, N., Akdemir, A., & Şahin, Ö. S. (2009). Progressive fatigue failure behavior of glass/epoxy (± 75) 2 filament-wound pipes under pure internal pressure. *Materials & Design*, 30(10), 4293-4298.
- Gemi, L. (2014). *Düşük hızlı darbe hasarlı filaman sarım hibrid boruların iç basınç altında yorulma davranışı* (Doctoral dissertation, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Gemi, L., Köroğlu, M. A., & Ashour, A. (2018). Experimental study on compressive behavior and failure analysis of composite concrete confined by glass/epoxy $\pm 55^\circ$ filament wound pipes. *Composite Structures*, 187, 157-168.
- Gök, G. (2010). Değişik geometrideki betonların basınç dayanımlarının çeşitli su/çimento oranlarına ve çimento miktarlarına göre incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Hadi, M. N. S. (2006). Behaviour of FRP wrapped normal strength concrete columns under eccentric loading. *Composite Structures*, 72(4), 503-511.
- Halliwell, S. M., & Reynolds, T. (2004). *Effective Use of Fibre Reinforced Polymer Materials in Construction*. BRE Bookshop.
- Hollaway, L. C. (2001). *Advanced polymer composites and polymers in the civil infrastructure*. Elsevier.
- Hong, W. K., Kim, H. C., & Yoon, S. H. (2002). Experiment of compressive strength enhancement of circular concrete column confined by carbon tubes. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14(4), 139-144.
- Hong, W. K., & Kim, H. C. (2004). Behavior of concrete columns confined by carbon composite tubes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(2), 178-188.
- Ilki, A., & Kumbasar, N. (2003). Compressive behaviour of carbon fibre composite jacketed concrete with circular and non-circular cross-sections. *Journal of Earthquake Engineering*, 7(03), 381-406.
- Ilki, A., Kumbasar, N., & Koc, V. (2004). Low strength concrete members externally confined with FRP sheets. *Structural Engineering and Mechanics*, 18(2), 167-194.
- Ilki, A., Peker, O., Karamuk, E., Demir, C., & Kumbasar, N. (2008). FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(2), 169-188.

- Jiang, C., Wu, Y. F., & Jiang, J. F. (2017). Effect of aggregate size on stress-strain behavior of concrete confined by fiber composites. *Composite Structures*, 168, 851-862.
- Kara, M. (2006). *Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerin dinamik cevabı* (Doctoral dissertation, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Kara, M. (2012). *Düşük hızlı darbe sonrası yama ile tamir edilmiş filaman sarım CTP boruların iç basınç altındaki hasar davranışı* (Doctoral dissertation, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Karbhari, V. M. (2004). Durability of advanced polymer composites in the civil infrastructure. In *Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction: ACIC 2004: Proceedings of the Second International Conference, Held at the University of Surrey, Guildford, UK on 20-22 April 2004* (p. 30). Woodhead Publishing.
- Kayalı, E. S. (1996). *Metalik malzemelerin mekanik deneyleri*. İTÜ.
- Koksal, H. O., Doran, B., & Turgay, T. (2009). A practical approach for modeling FRP wrapped concrete columns. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1429-1437.
- Lau, S. T., Said, M. A., & Yaakob, M. Y. (2012). On the effect of geometrical designs and failure modes in composite axial crushing: a literature review. *Composite structures*, 94(3), 803-812.
- Mahdi, E., Hamouda, A. S. M., Mokhtar, A. S., & Majid, D. L. (2005). Many aspects to improve damage tolerance of collapsible composite energy absorber devices. *Composite Structures*, 67(2), 175-187.
- Matthys, S., Toutanji, H., Audenaert, K., & Taerwe, L. (2005). Axial load behavior of large-scale columns confined with fiber-reinforced polymer composites. *ACI Structural Journal*, 102(2), 258.
- Mazumdar, S.K., 2002. Composites Manufacturing, Materials, Product, and Process Engineering. 4-5s New York
- Mirmiran, A., Shahawy, M., & Samaan, M. (1999). Strength and ductility of hybrid FRP-concrete beam-columns. *Journal of structural Engineering*, 125(10), 1085-1093.
- Miyauchi, K., Inoue, S., Kuroda, T., & Kobayashi, A. (1999). Strengthening effects with carbon fiber sheet for concrete column. *Proc Jpn Concr Inst*, 21(3), 1453-1458.
- Ozbakkaloglu, T., & Oehlers, D. J. (2008). Manufacture and testing of a novel FRP tube confinement system. *Engineering Structures*, 30(9), 2448-2459.

- Ozbakkaloglu, T. (2013). Compressive behavior of concrete-filled FRP tube columns: Assessment of critical column parameters. *Engineering Structures*, 51, 188-199.
- Öncü, M. E., & Karasin, A. (2010). CFRP ile Güçlendirilmiş Kesitlerin Eksenel Yük Altındaki Davranışı. *Engineering Sciences*, 5(3), 515-525.
- Park, J. H., Jo, B. W., Yoon, S. J., & Park, S. K. (2011). Experimental investigation on the structural behavior of concrete filled FRP tubes with/without steel rebar. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(2), 337-345.
- Parvin, A., & Jamwal, A. S. (2006). Performance of externally FRP reinforced columns for changes in angle and thickness of the wrap and concrete strength. *Composite structures*, 73(4), 451-457.
- Rafiee, R., & Mazhari, B. (2016). Simulation of the long-term hydrostatic tests on Glass Fiber Reinforced Plastic pipes. *Composite Structures*, 136, 56-63.
- Sarıbıyık, A. (2018). Betonların Güçlendirilmesinde FRP Kompozitlerin Hibrit Olarak Kullanımının etkisi. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 1-1.
- Schaumann, E. (2008). Hybrid FRP-lightweight concrete sandwich system for engineering structures.
- Shahawy, M., Mirmiran, A., & Beitelman, T. (2000). Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns. *Composites Part B: Engineering*, 31(6-7), 471-480.
- Silva, M. A., & Rodrigues, C. C. (2006). Size and relative stiffness effects on compressive failure of concrete columns wrapped with glass FRP. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(3), 334-342.
- Sinha, P. K. (2006). Composite materials and structures. *Composite Centre of Excellence, AR&DB, Department of Aerospace Engineering IIT Kharagpur*.
- Sönmez, M., 2009, Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi ve Geleceği: Türkiyeden Dört Örnek Firma Üzerine, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi , *Fen bilimleri enstitüsü*, İstanbul
- Şahin, Ö. S. (2004). Yüzey çatlaklı filaman sarım CTP kompozit boruların korozif ortamda yorulma davranışı, Doktora Tezi. *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., & Lam, L. FRP strengthened RC structures, 2002. *West Sussex, England: John Wiley & Sons Inc.*
- Touhari, M., & Mitiche-Kettab, R. (2016). Behaviour of FRP Confined Concrete Cylinders: Experimental Investigation and Strength Model. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 60(4), 647-660.

- Vintzileou, E., & Panagiotidou, E. (2008). An empirical model for predicting the mechanical properties of FRP-confined concrete. *Construction and Building Materials*, 22(5), 841-854.
- Yi, W. J., & Huang, H. M. (2001). Experimental study on the flexural behavior of RC beams strengthened with CFRP laminates. In *Proc., Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering* (pp. 399-406). Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands.
- Youssef, M. N., Feng, M. Q., & Mosallam, A. S. (2007). Stress–strain model for concrete confined by FRP composites. *Composites Part B: Engineering*, 38(5-6), 614-628.
- Yu, T., Wong, Y. L., Teng, J. G., Dong, S. L., & Lam, E. S. (2006). Flexural behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular members. *Journal of Composites for Construction*, 10(5), 443-452.
- Y.Yılmaz, A. (2018). PVC kaplı cam elyaf takviyeli kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Anonim, 2019a, <https://www.indiamart.com/proddetail/fiber-reinforcement-polymer-systems-9459413073.html>
- Anonim, 2019b, <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2014/10/frp-jackets-wrap-bridge-repairs/>
- Anonim, 2019c, <https://tr.pinterest.com/pin/466263367643145841/>

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Merve ÇALIŞKAN
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Başyayla/Karaman 04.04.1994
Telefon : 05376650542
e-mail : mervecaliskan7094@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Ermenek Lisesi, Ermenek, Karaman	2011
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi, Seydişehir, Konya	2015
Yüksek Lisans	: Necmettin Erbakan Üniversitesi, Meram, Konya	Devam

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2017	Tozoğlu Mühendislik	Makine Mühendisi
2018	Özdöken Tarım Makineleri A.Ş	Tasarım Mühendisi

UZMANLIK ALANI

Makine Mühendisi

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Gemi L., Köroğlu MA., Çalışkan M., " Compressive Behavior of Glass-Carbon/Epoxy $\pm 55^\circ$ Filament Wound Hybrid Pipes Confined Composite Concrete with Expansive Cement."International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'18), Konya/TURKEY 2018, p. 363-6. (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)