T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FRP DONATILARDA DURABİLİTE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şeymanur ARSLAN

Enstitü Anabilim Dalı	**:**	**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı	**:**	**Doç. Dr. Ferhat AYDIN**

Temmuz 2020

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FRP DONATILARDA DURABİLİTE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şeymanur ARSLAN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 27/07/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ	BAŞARILI
Üye: Prof. Dr. Metin İPEK	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. Ferhat AYDIN	BAŞARILI

BEYAN

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

Şeymanur ARSLAN

27/07/2020

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Ferhat AYDIN'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Metin İPEK'e ve bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi İnşaat Mühendisliği'ndeki tüm saygı değer hocalarıma teşekkür ederim.

Ayrıca her anımda yanımda olan ve beni hem maddi hem manevi anlamda destekleyen ailemin her bir ferdine ve katkılarından dolayı Tahsin Bey'e ve Ayşegül Hanım'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

BEYAN ..... **i**
TEŞEKKÜR ..... **iii**
İÇİNDEKİLER ..... **iiii**
KISALTMALAR ..... **vi**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **vii**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **ix**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvi**

BÖLÜM 1.
GİRİŞ **1**

BÖLÜM 2.
FRP MALZEMELER **4**
2.1. Lif Çeşitleri 5
2.1.1. Cam lif 5
2.1.2. Karbon lif 7
2.1.3. Aramid lif 8
2.1.4. Bazalt lif 9
2.1.5. Polipropilen lif 10
2.1.6. Çelik lif 10
2.1.7. Doğal lif 11
2.2.Matris Malzeme 11
2.2.1. Fenolik reçineler 12
2.2.2. Polyester reçineler 12
2.2.3. Vinilester reçineler 13
2.2.4. Epoksi reçineler 13
2.3.FRP Malzemelerin Kullanım Alanları 15
2.3.1. Onarım ve güçlendirme 15
2.3.1.1 Dolgu duvarların güçlendirilmesi 15
2.3.1.2 Kirişlerin güçlendirilmesi 17
2.3.1.3 Kolonların güçlendirilmesi 18
2.3.2. İnşaat Kalıpları 19

2.3.3. Hafif yapı tasarımı 19
2.4.FRP Malzeme Çeşitleri 20
2.4.1. FRP ankrajlar 20
2.4.2. FRP şeritler, kumaşlar ve levhalar 21
2.4.3. FRP profiller 22
2.4.4. FRP donatılar 23

BÖLÜM 3.
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 28

BÖLÜM 4.
MATERYAL VE METOD 45
4.1.Malzeme Özellikleri 45
4.1.1. Donatılar 45
4.1.2. Donatı başlığı 49
4.1.3. Nem 50
4.1.4. Deniz suyu 50
4.1.5. Alkali solüsyon 51
4.1.6. Diğer malzemeler 52
4.2.Deneyin Hazırlanması ve Şartlandırılması 53

BÖLÜM 5.
ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRME 58
5.1. Nem ile Koşullandırılmış Donatıların Sonuçları 58
5.1.1. Su emme sonuçları 58
5.1.2. Kütle kaybı sonuçları 61
5.1.3. Fiziksel hasarın belirlenmesi ve mikroskobik görüntüleri 63
5.1.3.1.Fiziksel hasar 63
5.1.3.2.Mikroskobik görüntü 65
5.1.4.Koşullandırılmış numunelerin çekme davranışları 67
5.2. Deniz Suyu ile Koşullandırılmış Donatıların Sonuçları 73
5.2.1. Su emme sonuçları 73
5.2.2. Kütle kaybı sonuçları 76
5.2.3. Fiziksel hasarın belirlenmesi ve mikroskobik görüntüleri 77
5.2.3.1.Fiziksel hasar 77
5.2.3.2.Mikroskobik görüntü 80
5.2.4.Koşullandırılmış numunelerin çekme davranışları 82
5.3. Sıcak Havayla Koşullandırılmış Donatıların Sonuçları 87
5.3.1. Kütle kaybı sonuçları 87
5.3.2. Fiziksel hasarın belirlenmesi ve mikroskobik görüntüleri 89
5.3.2.1.Fiziksel hasar 89
5.3.2.2.Mikroskobik görüntü 92
5.3.3.Koşullandırılmış numunelerin çekme davranışları 93
5.4. Soğuk Havayla Koşullandırılmış Donatıların Sonuçları 99
5.4.1. Kütle kaybı sonuçları 99

5.4.2. Fiziksel hasarın belirlenmesi ve mikroskobik görüntüleri 101
5.4.2.1.Fiziksel hasar 101
5.4.2.2.Mikroskobik görüntü 104
5.4.3.Koşullandırılmış numunelerin çekme davranışları 105
5.5. Alkali Çözelti ile Koşullandırılmış Donatıların Sonuçları 111
5.5.1. Su emme sonuçları 111
5.5.2. Kütle kaybı sonuçları 114
5.5.3. Fiziksel hasarın belirlenmesi ve mikroskobik görüntüleri 115
5.5.3.1.Fiziksel hasar 115
5.5.3.2.Mikroskobik görüntü 118
5.5.4.Koşullandırılmış numunelerin çekme davranışları 120
5.6. Donatıların Ortam Koşuluna Göre Karşılaştırılması 126
5.6.1. AFRP donatı 126
5.6.2. CFRP donatı 128
5.6.3. GFRP donatı 131

BÖLÜM 6.
SONUÇ VE ÖNERİLER 134

KAYNAKLAR 136

ÖZGEÇMİŞ 142

KISALTMALAR

AFRP : Aramid Fiber Reinforced Polymer

ASTM : American Society for Testing and Materials

CFRP : Carbon Fiber Reinforced Polymer

CSA : The Canadian Standards Association

CTP : Cam Takviyeli Plastik

FRP : Fiber Reinforced Polymer

GFRP : Glass Fiber Reinforced Polymer

UV **:** Ultraviyole

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 :	Farklı cam elyaf tiplerinin mekanik ve fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması…….	6
Tablo 2.2 :	PAN esaslı Karbon Liflerin özellikleri…….	8
Tablo 2.3 :	Karbon liflerinin mekaniksel özellikleri ……..	8
Tablo 2.4 :	Genelde kullanılan liflerin bazı özellikleri……...	9
Tablo 3.1 :	Olumsuz çevreye maruz kalan ve uygulanan sürekli gerilme ile FRP veri tabanı…….	31
Tablo 3.2 :	Beton gözenek suyuna benzetilmiş çözeltinin bileşimi……	34
Tablo 3.3 :	Donatıların çekme dayanım kayıpları……...	40
Tablo 4.1 :	Donatıların özgül ağırlığı……..	46
Tablo 4.2 :	Numunelerin fırınlanmadan önceki ve sonraki ağırlıkları……	47
Tablo 4.3 :	Aralık ayı musluk suyunun içeriği……	50
Tablo 4.4 :	Numunelerin deney süresince kontrolleri…….	54
Tablo 5.1 :	Nem koşullandırmasından önceki donatı kütleleri……...	58
Tablo 5.2 :	Numunelerin 60˚C'de 161 gün koşullandırma sonrası doymuş kütle…….....	59
Tablo 5.3 :	Nem koşullandırması sonucu numunelerin kütleleri……	60
Tablo 5.4 :	Nem koşullandırması yüzdece emme oranı……..	60
Tablo 5.5 :	Nem koşullandırması sonucu yüzdelik kütle kaybı……..	62
Tablo 5.6 :	Donatıların yüzdece dayanım kayıpları……	71
Tablo 5.7 :	Deniz suyu koşullandırılmasından önceki donatı kütleleri……...	73
Tablo 5.8 :	60˚C'de 161 gün deniz suyunda koşullandırmış numunelerin doymuş kütleleri…….....	74
Tablo 5.9 :	Deniz suyu koşullandırması sonucu numunelerin kütleleri……..	74
Tablo 5.10 :	Deniz suyu koşullandırması yüzdece (%) emme oranı……	75
Tablo 5.11 :	Deniz suyu koşullandırması sonucu yüzdece (%) kütle kaybı….	76
Tablo 5.12 :	Donatıların yüzdece dayanım kayıpları……	86
Tablo 5.13 :	Sıcak hava koşullandırmasından önceki kütleler……..	87
Tablo 5.14 :	Sıcak hava koşullandırması sonucu numunelerin kütleler……...	88
Tablo 5.15 :	Sıcak hava koşullandırması sonucu yüzdelik kütle kaybı……	88
Tablo 5.16 :	Donatıların yüzdece dayanım kayıpları……	98
Tablo 5.17 :	Soğuk hava şartlandırılmasından önceki kütleler…….....	99
Tablo 5.18 :	Soğuk hava koşullandırması sonucu numunelerin kütleleri…….	100
Tablo 5.19 :	Soğuk hava koşullandırması sonucu yüzdelik kütle kaybı……...	100
Tablo 5.20 :	Donatıların yüzdece dayanım kayıpları……	110

Tablo 5.21: Alkali çözeltisi ile koşullandırılmasından önceki donatı kütleleri…….. 111
Tablo 5.22: Alkali çözelti ile koşullandırmasından sonraki doygun kütleleri.. 112
Tablo 5.23: Alkali çözelti ile koşullandırılmasından sonraki kuru kütle…….. 112
Tablo 5.24: Alkali çözelti ile koşullandırılan numunelerin yüzdece su emme oranı (%)……... 113
Tablo 5.25: Alkali çözelti ile koşullandırması sonucu yüzdece (%) kütle kaybı…….. 114
Tablo 5.26: Donatıların yüzdece dayanım kayıpları……. 124
Tablo 5.27: AFRP donatılarda farklı ortam koşullarında dayanım gerçekleşme oranları……. 128
Tablo 5.28: CFRP donatılarda farklı ortam koşullarında dayanım gerçekleşme oranları……. 130
Tablo 5.29: GFRP donatılarda farklı ortam koşullarında dayanım gerçekleşme oranları……. 133

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 :	Korozyona uğrayan çelik donatının betona verdiği hasar……	2
Şekil 2.1 :	Cam Elyaflarda Si-O-Si Bağlarının Bozulması……	7
Şekil 2.2 :	Liflerin Çekme Dayanımı- Birim Uzama Grafiği……	10
Şekil 2.3 :	Dolgu Duvarlarının FRP ile Güçlendirilmesi……...	16
Şekil 2.4 :	Kirişlerde Meydana Gelen Hasarlar…….	17
Şekil 2.5 :	FRP'lerin Kirişlere Farklı Sarılma Biçimleri……...	18
Şekil 2.6 :	Kolonda FRP Sargılama şekli……..	19
Şekil 2.7 :	İsviçre'nin Basel şehrinde CTP profillerle yapılan gözlem evi…	20
Şekil 2.8 :	Ankraj sistem tipleri…….	21
Şekil 2.9 :	Tarihi yapılarda FRP uygulamaları…….....	21
Şekil 2.10:	İtalya'daki tarihi yığma binalara entegre edilmiş PFRP yapılarına örnekler……	22
Şekil 2.11:	SAKARYA Arifiye'de FRP profillerden yapılmış bina……...	22
Şekil 2.12:	SAKARYA Arifiye'de FRP profillerden yapılmış bina iç görüntüsü……...	23
Şekil 2.13:	3. Morristown Köprüsü'nün inşası: güverte döşemesi için FRP takviyesi ve beton dökümü…….....	24
Şekil 2.14:	3. Morristown köprüsünün tamamlanmış hali……..	24
Şekil 2.15:	Pearl Harbor Kuru İskele rehabilitasyonu…….....	25
Şekil 2.16:	Deniz Duvarları…….....	25
Şekil 2.17:	Honoapiilani Highway……..	25
Şekil 2.18:	Miami Metro Rayları……	26
Şekil 2.19:	Donatı Çeşitleri…….	26
Şekil 2.20:	Donatı çevresine göre sınıflandırma…….	27
Şekil 2.21:	Farklı lif türlerine göre donatı çeşitleri…….	27
Şekil 3.1 :	GFRP1 numunelerinin Solüsyon 1 çözeltisindeki sıcaklığa ve süreye bağlı çekme dayanım oranı değişimi…….	35
Şekil 3.2 :	GFRP2 numunelerinin Solüsyon 2 çözeltisindeki sıcaklığa ve süreye bağlı çekme dayanım oranı değişimi…….....	35
Şekil 3.3 :	AFRP'nin çekme dayanım-elastisite modülünün döngü sayısına göre değişimi …….....	37

Şekil 3.4:	CFRP'nin çekme dayanımı- elastisite modülünün döngü sayısına göre değişimi……..	37
Şekil 3.5:	BFRP'nin çekme dayanımı- elastisite modülünün döngü sayısına göre değişimi …….	37
Şekil 3.6:	Standartlaştırılmış çekme dayanımı ……	38
Şekil 3.7:	Standartlaştırılmış elastisite modülü ……...	39
Şekil 3.8:	Farklı kimyasallarda kaynayan Bazalt halatların kütle kayıpları…….....	41
Şekil 3.9:	BFRP donatı örneklerinde görünür kesme dayanımı……...	42
Şekil 3.10:	BFRP donatı örneklerinde görünür çekme dayanımı ……..	42
Şekil 4.1:	Özgül ağırlık deneyinde kullanılan donatıların boyutları…….	46
Şekil 4.2:	Arşimet Düzeneği…….	47
Şekil 4.3:	Numunelerin fırına girmeden önceki hali…….	48
Şekil 4.4:	Numunelerin fırına girdikten sonraki hali……	48
Şekil 4.5:	Deneyde kullanılan alüminyum boru……...	49
Şekil 4.6:	Başlığın boyutları ve iç yüzeyi…….	49
Şekil 4.7:	Deniz suyunun ilk hali ve pH'ı…….	51
Şekil 4.8:	Alkali Solüsyonun ilk hali ve pH Aralığı…….	52
Şekil 2.9:	Epoksi ve sertleştirici……	53
Şekil 4.10:	FRP donatı ankrajlama görseli…….	55
Şekil 4.11:	2.denemede kullanılan örnek numune……..	55
Şekil 4.12:	4.Denemede borularda açılan deliklerin 3D gösterimi…….	56
Şekil 4.13:	5.Denemede alüminyum başlık içerisindeki pürüzler……..	56
Şekil 4.14:	Çekme Deneyi Düzeneği……..	57
Şekil 5.1:	Nem koşullandırması sonucu kütlece su emme oranı grafiği…...	61
Şekil 5.2:	Nem koşullandırması sonucu kütle kaybı oranı (%). ……..	62
Şekil 5.3:	AFRP Donatının nem ile koşullandırılmasından önceki hali (A), sonraki hali (B)…….	63
Şekil 5.4:	CFRP Donatının nem ile koşullandırmasından önceki hali (A), sonraki hali (B)…….	64
Şekil 5.5:	GFRP Donatının nem ile koşullandırmasından önceki hali (A), sonraki hali (B)…….	64
Şekil 5.6:	Çelik Donatının nem ile koşullandırmasından önceki hali (A), sonraki hali (B)…….	65
Şekil 5.7:	Çelik Donatının nem ile koşullandırmasından sonraki mikroskobik görüntüsü…….	65
Şekil 5.8:	AFRP donatının koşullandırmadan önceki (sol) ve sonraki (sağ) mikroskobik görüntüsü…….	66
Şekil 5.9:	CFRP Donatının koşullandırmadan önceki mikroskobik görüntüsü (A), sonraki görüntüsü (B) ve (C)……..	66
Şekil 5.10:	GFRP Donatının koşullandırmadan önceki mikroskobik görüntüsü (A), sonraki görüntüsü (B) ve (C)……..	66
Şekil 5.11:	Referans AFRP donatıları ile nemli ortamda koşullandırılmış AFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı……...	67
Şekil 5.12:	Nem koşullanmasına maruz kalmış AFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali……	68
Şekil 5.13:	Referans CFRP donatıları ile nemli ortamda koşullandırılmış CFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı……...	68

Şekil 5.14: Nem koşullanmasına maruz kalmış CFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali…… 69
Şekil 5.15: Referans GFRP donatıları ile nemli ortamda koşullandırılmış GFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı……... 69
Şekil 5.16: Nem koşullanmasına maruz kalmış GFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali…… 70
Şekil 5.17: Referans çelik donatıları ile nemli ortamda koşullandırılmış çelik donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı…… 70
Şekil 5.18: Nem koşullanmasına maruz kalmış çelik donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali…… 71
Şekil 5.19: Donatıların yüzdece dayanım kayıplarının grafiksel gösterimi. 72
Şekil 5.20: Deniz suyu koşullandırması sonucu kütlece su emme oranı grafiği…… 75
Şekil 5.21: Nem koşullandırması sonucu kütle kaybı oranı (%.) …….. 77
Şekil 5.22: AFRP donatının deniz suyu ile koşullandırılmasından sonraki hali……. 78
Şekil 5.23: CFRP donatının deniz suyu ile koşullandırılmasından sonraki hali……. 78
Şekil 5.24: GFRP donatının deniz suyu ile koşullandırılmasından sonraki hali……. 79
Şekil 5.25: Çelik donatının deniz suyu ile koşullandırılmasından sonraki hali……. 79
Şekil 5.26: Deniz suyu ile koşullandırılan AFRP donatıların mikroskobik görüntüsü……... 80
Şekil 5.27: Deniz suyu ile koşullandırılan CFRP donatıların mikroskobik görüntüsü……... 80
Şekil 5.28: Deniz suyu ile koşullandırılan GFRP donatıların mikroskobik görüntüsü……... 81
Şekil 5.29: Deniz suyu ile koşullandırılan Çelik donatıların mikroskobik görüntüsü……... 81
Şekil 5.30: Referans AFRP donatıları ile deniz suyunda koşullandırılmış AFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı……... 82
Şekil 5.31: Deniz suyu ile koşullanmaya maruz kalmış AFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali…… 82
Şekil 5.32: Referans CFRP donatıları ile deniz suyunda koşullandırılmış CFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı……... 83
Şekil 5.33: Deniz suyu ile koşullanmaya maruz kalmış CFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali…… 83
Şekil 5.34: Referans GFRP donatıları ile deniz suyunda koşullandırılmış GFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı……... 84
Şekil 5.35: Deniz suyu ile koşullanmaya maruz kalmış GFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali…… 84
Şekil 5.36: Referans Çelik donatıları ile deniz suyunda koşullandırılmış Çelik donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı……. 85
Şekil 5.37: Deniz suyu ile koşullanmaya maruz kalmış GFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali…… 85
Şekil 5.38: Donatıların yüzdece dayanım kayıplarının grafiksel gösterimi. 86
Şekil 5.39: Sıcak hava koşullandırması sonucu kütle kaybı oranı (%)……... 89

Şekil 5.40: AFRP donatının sıcaklık ile koşullandırılmasından sonraki hali.. 90
Şekil 5.41: CFRP donatının sıcaklık ile koşullandırılmasından sonraki hali.. 90
Şekil 5.42: GFRP donatının sıcaklık ile koşullandırılmasından sonraki hali.. 91
Şekil 5.43: Çelik donatının sıcaklık ile koşullandırılmasından sonraki hali... 91
Şekil 5.44: Sıcak hava ile koşullandırılan AFRP donatıların mikroskobik görüntüsü……. 92
Şekil 5.45: Sıcak hava ile koşullandırılan CFRP donatıların mikroskobik görüntüsü…….. 92
Şekil 5.46: Sıcak hava ile koşullandırılan GFRP donatıların mikroskobik görüntüsü……... 93
Şekil 5.47: Sıcak hava ile koşullandırılan çelik donatıların mikroskobik görüntüsü…….. 93
Şekil 5.48: Referans AFRP donatıları ile sıcak hava ortamında koşullandırılmış AFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı…….. 94
Şekil 5.49: Sıcak hava ile koşullanmaya maruz kalmış AFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali…… 94
Şekil 5.50: Referans CFRP donatıları ile sıcak hava ortamında koşullandırılmış CFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı……... 95
Şekil 5.51: Sıcak hava ile koşullanmaya maruz kalmış CFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali……. 95
Şekil 5.52: Referans GFRP donatıları ile sıcak hava ortamında koşullandırılmış GFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı……... 96
Şekil 5.53: Sıcak hava ile koşullanmaya maruz kalmış GFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali……. 96
Şekil 5.54: Referans çelik donatılar ile sıcak hava ortamında koşullandırılmış çelik donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı……... 97
Şekil 5.55: Sıcak hava ile koşullanmaya maruz kalmış çelik donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali……. 97
Şekil 5.56: Donatıların yüzdece dayanım kayıplarının grafiksel gösterimi… 98
Şekil 5.57: Soğuk hava koşullandırması sonucu kütle kaybı oranı (%)…….. 101
Şekil 5.58: AFRP donatının soğuk hava ile koşullandırılmasından sonraki hali……. 102
Şekil 5.59: CFRP donatının soğuk hava ile koşullandırılmasından sonraki hali……..... 102
Şekil 5.60: GFRP donatının soğuk hava ile koşullandırılmasından sonraki hali……. 103
Şekil 5.61: Çelik donatının soğuk hava ile koşullandırılmasından sonraki hali ……..... 103
Şekil 5.62: Soğuk hava ile koşullandırılmış AFRP donatıların mikroskobik görüntüsü……... 104
Şekil 5.63: Soğuk hava ile koşullandırılmış CFRP donatıların mikroskobik görüntüsü…….. 104
Şekil 5.64: Soğuk hava ile koşullandırılmış GFRP donatıların mikroskobik görüntüsü……... 105

Şekil 5.65: Soğuk hava ile koşullandırılmış çelik donatıların mikroskobik görüntüsü……... 105
Şekil 5.66: Referans AFRP donatıları ile soğuk hava ortamında koşullandırılmış AFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı……... 106
Şekil 5.67: Soğuk hava ile koşullanmaya maruz kalmış AFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali……. 106
Şekil 5.68: Referans CFRP donatıları ile soğuk hava ortamında koşullandırılmış CFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı……... 107
Şekil 5.69: Soğuk hava ile koşullanmaya maruz kalmış CFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali……. 107
Şekil 5.70: Referans GFRP donatıları ile soğuk hava ortamında koşullandırılmış GFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı……... 108
Şekil 5.71: Soğuk hava ile koşullanmaya maruz kalmış GFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali……. 108
Şekil 5.72: Referans Çelik donatıları ile soğuk hava ortamında koşullandırılmış Çelik donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı……... 109
Şekil 5.73: Soğuk hava ile koşullanmaya maruz kalmış çelik donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali……. 109
Şekil 5.74: Donatıların yüzdece dayanım kayıplarının grafiksel gösterimi… 110
Şekil 5.75: Alkali çözelti ile koşullandırma sonucu kütlece su emme oranı grafiği…… 113
Şekil 5.76: Alkali çözelti ile koşullandırma sonucu yüzdece kütle kaybı (%) grafiği…… 115
Şekil 5.77: AFRP donatının alkali çözelti ile koşullandırılmasından sonraki hali……. 116
Şekil 5.78: CFRP donatının alkali çözelti ile koşullandırılmasından sonraki hali……. 116
Şekil 5.79: GFRP donatının alkali çözelti ile koşullandırılmasından sonraki hali……. 117
Şekil 5.80: Çelik donatının alkali çözelti ile koşullandırılmasından sonraki hali……. 117
Şekil 5.81: Alkali çözelti ile koşullandırılan AFRP donatıların mikroskobik görüntüsü……... 118
Şekil 5.82: Alkali çözelti ile koşullandırılan CFRP donatıların mikroskobik görüntüsü …….. 118
Şekil 5.83: Alkali çözelti ile koşullandırılan CFRP donatıların mikroskobik görüntüsü …….. 119
Şekil 5.84: Alkali çözelti ile koşullandırılan CFRP donatıların mikroskobik görüntüsü …….. 119
Şekil 5.85: Alkali çözelti ile koşullandırılan GFRP donatıların mikroskobik görüntüsü……... 119
Şekil 5.86: Alkali çözelti ile koşullandırılan çelik donatıların mikroskobik görüntüsü……... 120

Şekil 5.87: Referans AFRP donatıları ile alkali çözeltide koşullandırılmış AFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı…….. 120
Şekil 5.88: Alkali çözelti ile koşullanmaya maruz kalmış AFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali……. 121
Şekil 5.89: Referans CFRP donatıları ile alkali çözeltide koşullandırılmış CFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı…… 121
Şekil 5.90: Alkali çözelti ile koşullanmaya maruz kalmış CFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali……. 122
Şekil 5.91: Referans GFRP donatıları ile alkali çözeltide koşullandırılmış GFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı…….. 122
Şekil 5.92: Alkali çözelti ile koşullanmaya maruz kalmış GFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali……. 123
Şekil 5.93: Referans çelik donatıları ile alkali çözeltide koşullandırılmış çelik donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı…….. 123
Şekil 5.94: Alkali çözelti ile koşullanmaya maruz kalmış çelik donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali……. 124
Şekil 5.95: Donatıların yüzdece dayanım kayıplarının grafiksel gösterimi. 125
Şekil 5.96: AFRP donatıların ortam koşuluna göre yüzdece su emme oranlarının grafiği…….. 126
Şekil 5.97: AFRP donatıların ortam koşuluna göre yüzdece kütle kaybı oranlarının grafiği…….. 127
Şekil 5.98: AFRP donatıların farklı ortam koşullarındaki Gerilme- Uzama grafiği…… 127
Şekil 5.99: CFRP donatıların ortam koşuluna göre yüzdece su emme oranlarının grafiği…….. 129
Şekil 5.100: CFRP donatıların ortam koşuluna göre yüzdece kütle kaybı oranlarının grafiği…….. 129
Şekil 5.101: CFRP donatıların farklı ortam koşullarındaki Gerilme- Uzama grafiği…… 130
Şekil 5.102: GFRP donatıların ortam koşuluna göre yüzdece su emme oranlarının grafiği…….. 131
Şekil 5.103: GFRP donatıların ortam koşuluna göre yüzdece kütle kaybı oranlarının grafiği…….. 132
Şekil 5.104: GFRP donatıların farklı ortam koşullarındaki Gerilme- Uzama grafiği…… 132

FRP DONATILARDA DURABİLİTE

ÖZET

İnşaat endüstrisinde kullanılan yapı malzemelerinin durabilitesi büyük önem taşımakta ve akademik çalışmaların önemli konusu haline gelmiştir. İnşaat mühendisliğinde servis ömrünü etkileyen en önemli problemlerden biri çelik donatı korozyonudur. Özellikle kıyı yapıları ve nemli ortamlarda betonarme yapılar için bu sorun ileride büyük hasarlara sebebiyet vermektedir. Son yıllarda yeni yapı malzemelerinden biri olan Liflerle Güçlendirilmiş Polimer (FRP) donatılar betonarme yapı sisteminde beton içinde çelik donatı yerine kullanılabilmektedir. Yüksek çekme dayanımı ve hafiflik özelikleri ile tercih edilen bu malzemeler inşaat sektöründe kullanılmaya başlanmıştır. Farklı lifler kullanılarak istenilen çapta ve yüzey özeliklerinde üretilen FRP donatılar yeni nesil yapı mazlemeler olarak kabul edilmekte ve bu yeni malzemelerin maruz kalacağı çevresel koşullar karşısında göstereceği performansın bilinmesi önemlidir.

Bu çalışmada FRP donatıların durabilite performansının değerlendirilmesi amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Donatıların maruz kalabileceği nem, deniz suyu, sıcak hava, soğuk hava ve beton gözenek suyunu temsil eden 5 çevresel ortam koşulu oluşturularak aramid, cam, karbon lifli FRP donatılar ve çelik donatı bu ortamlarda bekletilmiştir. Koşullandırma sonrasında numunelerin su emmeleri, kütle kayıpları, mikroskobik görüntüleri ve çekme dayanımları belirlenmiştir.

Çalışmalar sonucunda cam lif takviyeli polimer (GFRP) donatıların sulu ortamlarda dayanım kayıplarının %25'e ulaşabileceğini ancak sıcak ve soğuk havada iyi dayanım gösterdikleri tespit edilmiştir. Aramid lif takviyeli polimer (AFRP) donatılar lif yapısı nedeniyle yüksek sıcaklıklardan en fazla etkilenen ve en fazla su emen donatı çeşididir. Karbon lif takviyeli polimer (CFRP) donatıların alkali ortam dışındaki maksimum dayanım kayıpları %8 ve alkali ortam koşullarında FRP donatı türleri arasında en iyi performansı gösteren FRP donatı çeşididir. Tüm ortam koşulları göz önüne alındığında çelik donatıya en uygun alternatif FRP donatı çeşidinin CFRP donatı olduğu görülmüştür. Ancak alkali ortam koşullarında CFRP, GFRP ve AFRP donatılarda görülen yüksek orandaki dayanım kayıpları, bu malzemelerin betonla kullanımında dikkate alınmalıdır.

Anahtar Kelimeler:, FRP donatı, durabilite, dayanım ve kütle kaybı, alkali çözelti, deniz suyu, sıcaklık, nem

DURABILITY ON FRP BARS

SUMMARY

The durability of construction material in construction industry has great importance and it has become an important issue of academic studies. The most important problem affecting service life in constructional engineering is steel reinforcement corrosion. This problem leads to substantial damages for coastal structures and reinforced concrete buildings in humid areas. Fibre Reinforced Polymer (FRP,) rebars, which has been one of the new construction material lately, are used with concrete of reinforced concrete building system instead of steel rebars. These preferred materials because of their high-tensile strength and light characteristic has started to be used in construction sector. FRP rebars, which are produced by using different fibres in required diameter and surface characteristics, has been considered as new generation construction materials and It is important to know their performances in exposure to environmental conditions.

Experimental studies have been carried out in this studies in order to evaluate the durability performance of FRP reinforcements. 5 environmental conditions have been created for representing the moisture, sea water, hot air, cold air and concrete pore water that the rebars can be exposed . After aramid, glass, carbon fibre rebars and steel rebars have been waited in these conditions. Water absorption of samples, mass loses, microscopic images and tensile strength have been determined after conditioning.

It has been found out that strength loss of Glass Fibre Polymer rebars (GFRP) in humid environments can reach to %25 percent but they show good durability in cold and hot air. Aramid fiber reinforced polymer (AFRP) rebar is the type of rebar that is most affected by high temperatures and absorbs the most water due to its fiber structure. Maximum strength loss of Carbon Fibre Polymer rebar (CFRP) in out of alkaline environment is % 8 percent and it gives the best performance among FRP rebars in alkaline environments. It has been found out that CFRP rebars are the most appropriate alternative to steel rebars when these environmental conditions are taken into consideration. But high durability loss seen at CFRP, GFRP and ARFP rebars in alkaline environmental conditions in the usage of these material with concrete should be taken into consideration.

Keywords: FRP Rebar, durability, mass loss, humid, cold air, sea water, concrete pore solution

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliği alanında, son yüzyılda yapılan araştırmalar sonucunda büyük oranda ilerlemeler kaydedilmiştir. Özellikle beton ve çelik donatının oluşturduğu betonarme kompozit yapı malzemesi için çeşitli araştırmalar yapılarak bu malzemenin dayanımı ve dayanıklılığının artırılması amaçlanmıştır. Dayanımın ve dayanıklılığın artırılması için hem beton hem de çelik donatının güçlendirilmesi gereklidir. Bu nedenle beton dayanımını arttırmak için; çeşitli agregalarla yeni kompozisyonlar oluşturulmuş, çeşitli puzolanlar kullanılarak çeşitli çevresel koşullara karşı çimentolar üretilmiş, yeni ve daha güçlü kimyasal katkılar kullanılmış ve son dönemlerde de beton içerisine çeşitli lifler takviye edilmiştir. Böylece dayanım artışı çok büyük oranlarda sağlanmıştır. Betonarme yapılarda çekme yüklerini karşılayan çelik donatının betonla aderansının artırılması için donatıda nervür sistemi oluşturulmuş, akma dayanımı 420 MPa olan donatılar üretilerek inşaatta kullanılması yönetmeliklerle zorunlu hale getirilmiştir. Böylece günümüzde güçlü betonarme yapılar inşa edilir hale gelse de hala bazı sorunlara yeterli çözüm üretilememiştir. Bu sorunların başında çelik donatının korozyona uğrayarak dayanımını kaybetmesi ve taşıyıcılık görevini yerine getiremeyip yapının yıkımına neden olabilmesi gelmektedir. Özellikle kıyı yapılarında diğer yapılara göre daha büyük sorun haline gelen bu durum için yeni öneriler oluşturulmaktadır. Şekil 1.1'de betonarme köprüde çelik donatı korozyonunun ortaya çıkardığı hasar gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Korozyona uğrayan çelik donatının betona verdiği hasar [1]

Polimerler kimyasallara karşı dayanıklı, korozyona uğramayan malzemelerdir. Bu malzemeler korozyona karşı iyi bir alternatif olarak görüldüğünden çekme dayanımı yüksek liflerle bir araya getirilerek Liflerle Güçlendirilmiş Polimerleri (FRP) oluşturmuş ve yapı malzemesi olarak önerilmeye ve kullanılmaya başlanılmıştır. Yapısal FRP kompozitler, geleneksel çelik, beton ve ahşap malzemelerle karşılaştırıldığında benzer veya üstün mekanik, termal ve kimyasal özellikler sağlar, böylece daha düşük yaşam döngüsü maliyetleri sağlanır. Bununla birlikte, FRP kompozitlerin termomekanik özellikleri, geleneksel yapısal malzemelere benzer şekilde (özellikle zorlu ortamlarda) servis ömrü boyunca azaldığı gözlemlenmiştir. FRP ile levhalar, kumaşlar, donatılar gibi birçok yapı malzemesi çeşidi üretilmiştir. Bu malzemeler son zamanlarda inşaat alanında onarımda, güçlendirmede, beton içerisinde, çelik donatıya alternatif olarak ve ihtiyaç duyulan birçok alanda kullanılmıştır.

Çelik donatılara alternatif olan FRP donatıların çelik donatıların yerine geçebilecek kadar dayanıklı olup olmadıkları bu tezin ana konusudur. Cam, aramid ve karbon elyaflardan oluşan FRP donatıların dayanıklılığının çelik donatıyla kıyaslaması bu tezde incelenmiştir. Bir malzemenin veya yapının dayanıklılığı, uygun yük koşulları ve belirtilen çevresel koşullar altında, belirli bir süre boyunca yabancı cisim hasarının belirli bir süre boyunca çatlamaya, oksidasyona, kimyasal bozulmaya, delaminasyona, aşınmaya ve/veya yabancı cisim hasarlarına karşı dayanım göstermesi olarak tanımlanabilir. Bu tanım dikkatte alınarak ve çevresel şartlar göz önünde

bulundurularak FRP ve çelik donatılara deneyler yapılıp, aralarında karşılaştırma yapılmıştır. Bu çevresel koşullar, donatının içinde bulunduğu betonun gözenek suyu, deniz suyu, nem, sıcak hava ve soğuk hava ortamlarına benzetilerek yapılmıştır.

Durabilite, malzemelerin çevreye karşı gösterdiği uzun süreli performanstır. Bu sebeple durabilite deneyleri uzun süreye ihtiyaç duymaktadır. Deney süresinin kısalması için araştırmalar yapılmış ve sıcaklığın arttıkça bozulmanın da hızlandığı görülmüştür. Ancak tercih edilen sıcaklığın cam geçiş sıcaklığını (polimerik malzemelerin temel ayırt edici özelliklerinden biridir) geçmemesine dikkat edilmelidir. Cam geçiş sıcaklığı, maddenin camsı özelliklerini kaybedip viskoz özellikler kazanmaya başladığı sıcaklık sınırıdır. Bu sınır geçilirse numune ortam koşullarından değil sıcaklıktan dolayı zarar göreceği için araştırma gerçeği yansıtmayacaktır. Sıcaklık arttıkça bozulmanın artacağı ancak sınırı geçmemenin de gerekli olduğu dikkate alınarak optimum sıcaklık seçilmelidir. ACI D7705' e göre ve CSA S806-2' ye göre alkali deneylerin 60˚C'de tutulmasının deneyi hızlandıracağı belirtilmektedir. Yüksek sıcaklıkta numunelerde oluşacak olan genleşmeler ile gözenekler açılacak ve solüsyonlar numunelere daha fazla nüfus edecek ve zarar verecektir. Deneylerin sonuçlarının karşılaştırılması için diğer deneylerinde 60˚C'de yapılmasına ve çözeltilerin difüzyonunu hızlandırmak için numuneler yalın halde çözeltilere daldırılmasına bu tez için karar verilmiştir.

BÖLÜM 2. FRP MALZEMELER

İki veya daha fazla malzemenin, iyi özelliklerini bir araya toplamak ya da ortaya yeni bir özellik çıkarmak için, mikro veya makro seviyede heterojen karışımıyla oluşan malzemeye Birleşik Malzeme veya Kompozit Malzeme denir. Kompozit malzemeler üç boyutludur ve atomlar birbiri içinde çözünmez. Alaşımlarda ise malzemeler birbirine atomlar vererek birleşir ve yeni bir bileşik ortaya çıkar. Elde edilen yeni malzeme onu meydana getiren bileşenlerin özelliklerini de içerir. Bir malzemenin kompozit olarak adlandırılabilmesi için belli başlı özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu özellikler şu şekilde sıralanabilir; kompozit malzemeler insan yapısı olmalıdır dolayısıyla doğal bir malzeme olmamalıdır, kimyasal bileşenleri birbirinden farklı ve belirli ara yüzleri ayrılmamalıdır, en az iki malzemenin bir araya getirilmiş olması gerekmektedir, farklı malzemeler üç boyutlu olarak bir araya getirilmelidir ve bileşenlerinin hiç birinin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşıması dolayısı ile bu amaçla üretilmiş olması gerekmektedir.

Kompozit malzemeler 2 bileşenden meydana gelmektedir. Bu bileşen matris eleman ve takviye elemandır. Matris elemanlar kendi aralarında üçe ayrılmaktadır bunlar; polimerler, metaller ve seramiklerdir. Takviye elemanlar da kendi aralarında üçe ayrılmaktadırlar bunlar; lifler, daneler ve tabakalardır. Bu bileşenlerin birleşmesine göre de kompozitler kendi aralarında dörde sınıfta incelenmektedir. Bunlar; taneciklerle güçlendirilmiş kompozit malzemeler, tanelerle donatılı kompozit malzemeler, tabakalı kompozit malzemeler ve liflerle donatılı kompozit malzemelerdir.

FRP malzemeler adından da anlaşıldığı üzere polimerlerin ve liflerin fiziksel birleşmesinden oluşurlar. Böylece Liflerle donatılı kompozit malzemeler sınıfına girmektedirler. Bu sınıftaki malzemeler genellikle yeterli basınç dayanımına oranla çekme, eğilme, çarpma dayanımları çok düşük düzeyde kalan veya zayıf yapılı, kırılgan malzemenin zayıf olan yönlerinin iyileştirilmesi, kırılganlığın giderilmesi ile

malzemenin sünekliliğinin arttırılması gibi amaçlarla matris malzemenin lifler ile donatılması ile üretilen kompozitlerdir. Bu gruptaki malzemeler endüstrinin çeşitli alanlarındaki üretiminin yanı sıra yapı alanında da kullanımı artmaktadır. Ancak bu malzemelerin yapıda taşıyıcı olarak kullanılabilmesi için üretim yönteminin pultruzyon (profil çekme) olmasına dikkat edilmelidir. Çünkü diğer yöntemlerle üretilen malzemeler, yapıda taşıyıcı olarak kullanılan elemanların karşılaması gereken çekme, basınç veya kesme kuvvetlerine karşı dayanım gösterememektedirler.

2.1. Lif Çeşitleri

Lifler kompozit malzemede takviye elemanı görevi görürler. Takviye elemanlarının görevleri malzemeye ait ana gövdeyi oluşturmak ve malzemeye gelen yükü taşımaktır. Betona takviye amacıyla da kullanılan ve değişik şekil ve büyüklüklerde olan lifler genel olarak cam, çelik, aramid, bazalt, karbon, polipropilen ve organik polimerlerden üretilmekledir. Lifin tanımı, lif boyunun eşdeğer lif çapına bölünmesiyle elde edilen "Boy/Çap" oranı (Narinlik Oranı) olarak kabul edilmektedir [2]. Ancak cam lifler gibi bazı lif türlerinin liflerinin demet şeklinde olması ve bazı lif türlerinin uzunluklarının ve çaplarının farklı değerler alması nedeniyle liflerin sadece narinlik oranına göre sınıflandırmak uygun değildir.

2.1.1. Cam lif

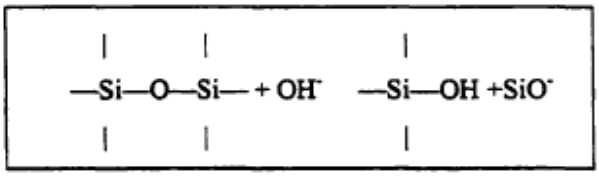
Cam elyaf, polimer kompozitlerde en yaygın kullanılan elyaflardır. Çeşitli cam elyaf türleri şu şekildedir: E-cam, %2 maksimum alkali içeriğine sahip kalsiyum alüminoborosilikat bileşimlidir, iyi bir kuvvete ve orta derecede elastik bir modüle sahiptir ve iyi bir elektriksel yalıtkandır. C-camı (A-camı olarak da bilinir) sodalime-borosilikat bileşimindedir ve kimyasal aşınmaya karşı E-camından daha iyi bir dirence sahiptir. S-camı, çok yüksek çekme dayanımı olan magnezyum alüminosilikat bileşime sahiptir ve daha yüksek sıcaklıklara dayanabilir. AR-cam veya alkali dirençli cam, beton gibi yüksek alkali ortamlarda davranışını biraz geliştiren daha yüksek bir zirkonya (ZrC>2) içeriğine sahiptir. Düşük maliyetli olması nedeniyle, E-cam elyafları, inşaat ve diğer uygulamalardaki polimer matrisli kompozitlerin üretiminde, toplam cam elyafı üretiminin% 90'ından fazlasını oluşturarak yaygın şekilde kullanılır.

Cam fiberler izotropiktir, yani üç boyutlu ağ yapıları nedeniyle lif ekseni boyunca aynı elastik modül ve dayanıma sahiptirler. Cam elyafların çekme dayanımı oldukça yüksektir (3500 MPa), fakat elastik modül karbon veya aramid elyaflarla karşılaştırıldığında çok yüksek değildir (yaklaşık 70 GPa). Sonuç olarak, dayanıklılık/ağırlık oranı yüksektir, fakat modül-ağırlık oranı orta derecededir. Bu durum, havacılık endüstrisinin cam yerine başka elyaf türleri kullanmasına neden olur. Cam lifi nispeten ucuzdur ve çoğunlukla inşaat, denizcilik, nakliye ve diğer endüstrilerde polyester, epoksi ve fenolik reçinelerde takviye olarak kullanılır. Sıradan çelik donatı, çekme dayanımı ve elastik modülü sırasıyla yaklaşık 520 MPa ve 200 MPa sahiptir.

Tablo 2.1: Farklı cam elyaf tiplerinin mekanik ve fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması.[3,4]

Cam Tipi	Yoğunluk g/cm^3	Çekme dayanımı GPa	Çekme modülü GPa	Başarısızlık oranı (%)
E-camı	2,62	3,4	81,3	4,9
S-camı	2,50	4,6	88,9	5,7
C-camı	2,56	3,3	-	4,8
R-camı	2,78	2,5	70,0	3,6

Lifler farklı ortamlara maruz kaldıklarında bozulmaya maruz kalabilirler; buna, çevrede ortamdaki lifler ve zararlı maddeler arasındaki etkileşim neden olur. Sıvılar tarafından cam elyafın zarar görmesi, ikisi arasındaki fiziksel veya kimyasal reaksiyonlarla başlar. Hasarın büyüklüğü sıvı türüne, sıvı konsantrasyonuna ve saldırı altındaki liflerin bileşimine bağlıdır. Cam liflerinin su, asidik ve alkali çözeltiler varlığında bozulduğu bilinmektedir. Yüksek oranda alkali ortamlara maruz kalmanın cam elyafları üzerinde ciddi etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Betona takviye olarak cam elyaf takviyeli polimerler kullanıldığında bu büyük bir endişe kaynağı olacaktır, çünkü betonun mikro boşluklarında bulunan gözenekli su çözeltisi 13,5 civarında tipik bir pH'a sahiptir. Betonun yüksek alkalinitesi, çimento matrisindeki yüksek sodyum ve potasyum çözünürlüğünün bir sonucudur. Alkali bir ortamdaki hidroksit iyonları camın birincil bileşenine (silika veya SiO_2) saldırır ve cam ağındaki Si-O-Si bağlarında bozulmaya neden olur (Şekil 2.1.), bu durum elyafın bozulması ve dayanım ve sertlik kaybıyla sonuçlanır.



Şekil 2.1: Cam elyaflarda Si-O-Si bağlarının bozulması.

2.1.2. Karbon lif

Karbon atom numarası 6 olan ve atom ağırlığı 12,01 olan, formülü C ile gösterilen elementtir. Karbon tabiatta elmas ve grafit gibi serbest halde ve kimyasal bağlı olarak minerallerde, bitkisel ve hayvansal organizmalarda bulunur. Karbon periyodik tabloda IV-A grubunun ilk elementidir.

Karbon liflerinin yoğunluğu kullanılan hammadde ve işlem sıcaklığına bağlı olarak 1,6-2,2 g/cm^3 arasında değişiklik göstermektedir. Karbon lif üretiminde kullanılan hammadde yoğunluğu 1,14-1,19 g/cm^3 arasında değişmektedir. Elde edilen lif modülündeki artış grafitizasyon sıcaklığının artışı ile artmaktadır.

Karbon liflerinden yapılmış kompozitler 1020 çelik konstrüksiyonlarda 5 kat daha dayanıklı ve 1/5 ağırlığındadır. Aynı şekilde 6061 aliminyum konstrüksiyonlarda 7 kat daha dayanıklı iken, 2 kat daha sert ve 1,5 kat daha hafiftir. Karbon liflerinin yorulma davranışı bilinen tüm metallerden daha iyidir. Kompozit uygun reçine ile kaplatıldığında korozyona karşı dayanımı iyi olmaktadır. Karbon liflerin katran esaslı olanları bakıra göre elektriksel iletkenliği 3 kat daha fazladır. Uçak frenlerinde ve roketlerde yüksek sıcaklıklar oluşur ve bu sebeple karbon lifler kolaylıkla erimediklerinden dolayı bu ürünlerde kullanılmaktadır. Karbon liflerinin en önemli özelliklerinden birisi de çok iyi yorulma direncine sahip olmasıdır ki, bu özellik aramid ve cam liflerinden karbon lifini ayırmaktadır. Karbon liflerinde 2200°C altındaki sıcaklıklarda büzülme davranışı gözlenmemektedir.

Karbon lifler iki şekilde oluşmaktadır; ZİFT ve PAN esaslı. Yapı malzemesi olarak üretilen ürünler PAN esaslıdır. Tablo 2.2'de PAN esaslı karbon liflerin özellikleri verilmiştir. Tablo 2.3'de karbon liflerinin mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.2: PAN esaslı karbon liflerin özellikleri. [5]

Özellik	Standart Modül	Orta Modül	Yüksek Modül
Germe Modülü (GPa)	220-241	290-297	345-448
Germe Dayanımı (MPa)	3450-4830	3450-6200	3450-5520
Kopma Uzaması (%)	1,5-2,2	1,3-2,0	0,7-1,0
Elektriksel Özdirenç (μΩ*cm)	1650	1450	900
Isıl İletkenlik (W/m.K)	20	20	50-80
Yoğunluk (g/cm^3)	1,8	1,8	1,9
Karbon İçeriği (%)	95	95	+99
Lif Çapı (μm)	6-8	5-6	5-8

Tablo 2.3: Karbon liflerinin mekaniksel özellikleri. [5]

Karbon Tipi	Modül (N/mm^2)	Kopma Dayanımı (N/mm^2)	Yoğunluk (g/cm^3)	Spesifik Modül (N*m/g)	Spesifik Kopma Dayanımı (N*m/g)
Standart Tip 3	200,000	2000	1,7	120,000	1200
Standart Tip 2	250,000	3000	1,8	140,000	1700
Standart Tip 1	400,000	2500	1,9	210,000	1300

2.1.3. Aramid lif

Aramid lifler üstün mekanik özellikleri nedeniyle diğerlerinden ayrılırlar. "Aramid", poliamid aromatik liflerin genel adıdır. En basit formu poli p-fenilentereftalamid'dir ve ticari adı ise Kevlar'dır. Kevlar kompozitleri yüksek dayanım ve sertlikleri, hasar ve yorulma dirençleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Aramid liflerin sahip olduğu düşük yoğunluğu, sertliği ve darbe direncindeki üstünlüğü çok iyi mekanik özellikler sağlamaktadır. Yüksek modülleri ve yüksek sıcaklığa dayanıklı olmaları nedeniyle balistik koruma amaçlı da kullanılmaktadırlar. Darbe enerjisinin %50'si kadarının dalga yayılması sayesinde absorbe edildiği ifade edilmektedir. Aramid lifler cam liflere göre daha yüksek dayanıma sahiptir ve elastisite modülünün camdan %50 daha fazla olduğu belirtilmiştir. Bu liflerin oluşturdukları kompozitlerin darbe direncini artırmakta ve daha yüksek çekme dayanımı sağlamaktadır. Aramid lifler, hem elektrik geçirgenliğini hem de ısıyı yalıtabilme özelliğine sahiptirler.

Kevlar lifler, kuru jet-yaş lif çekim yöntemine göre elde edilmektedir. Kevlar, yüksek sıcaklığa ve kimyasallara karşı yüksek dayanıma sahiptir. Bu malzeme sıcaklıkla büzülmesi azdır ve yüksek boyutsal stabilite göstermektedir. Bu liflerin nem emme özelliği olduğundan dolayı çevresel şartlara karşılık hassasiyet gösterdikleri

saptanmıştır. Kevlar Liflerin 3 türü bulunmaktadır. Bunlar; Kevlar 29, Kevlar 49 ve Kevlar 149'dur. En yüksek dayanıma sahip olan Kevlar 149'dur.

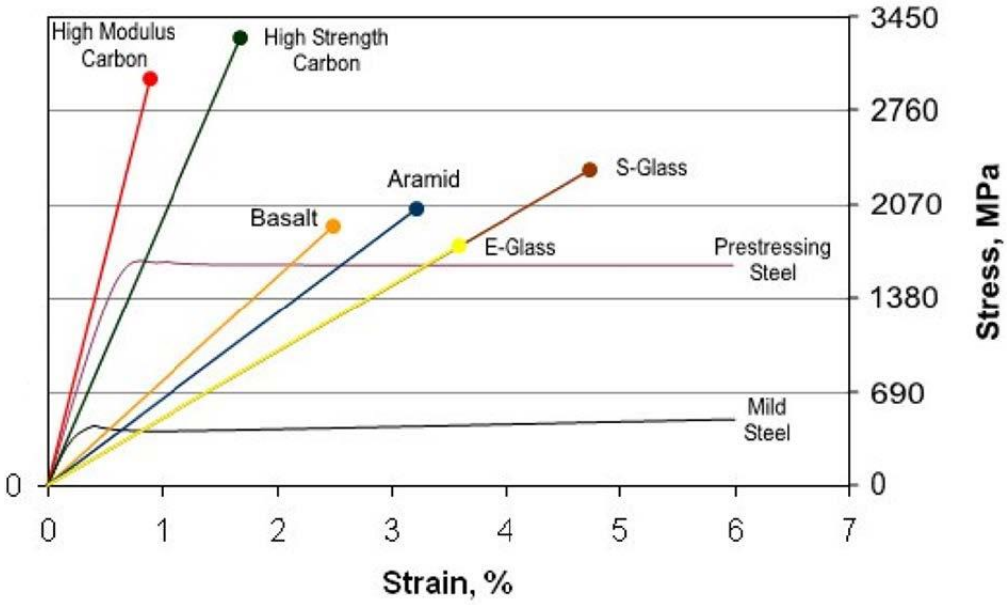
2.1.4. Bazalt lif

Bazalt; cam, karbon veya aramid elyaflarına alternatif olarak yapılarda ve inşaat uygulamalarında kullanımı artmakta olan yeni bir malzemedir. Bazalt, volkanik kayalarda bulunabilen doğal bir malzemedir. Asbest ve bazalt lifleri benzer bileşime sahip olsalar bile, bazalt, asbest tarafından sunulan kanserojen veya toksisite etkilerinden kaçınan farklı morfoloji ve yüzey özellikleri nedeniyle güvenli görünmektedir. Ayrıca, bazalt lifleri, E-cam liflerinden daha iyi çekme dayanımına sahiptirler ayrıca kimyasal saldırıya, darbe yüküne ve daha az zehirli duman ile yangına daha iyi direnç gösterirler. Bazalt lifleri hava koşullarına, alkalin ve asitlere maruz kalmaya karşı iyi bir dirence sahipse bile bazalt ürünleri aynı sağlamlığa sahip olamayabilir ve bu konuda literatürde çok az araştırma vardır ve BFRP kompozitler için bugüne kadar az sayıda uzun vadeli performans verileri mevcuttur. Tablo 2.4'e ve Şekil 2.2'ye bakılarak bazalt lifinin diğer liflerle karşılaştırılması teorik biçimde yapılabilmektedir.

Tablo 2.4: Genelde kullanılan liflerin bazı özellikleri.

Özellikler	Lifler				
	Selüloz	Bazalt Lif	Cam Lif	Karbon Lif	Aramid
Çekme Dayanımı	+++	++++	++++	++++	++++
Eğilme Dayanımı	+++	+++	++++	++++	++++
Elektriksel Özellikler	+++	+++	++++	+	+++
Isı direnci	+++	++++	++++	++++	++++
Su Direnci	++	++++	+++	+++	+++
Boyama	+++	+	++	+	++

Anahtar: + Zayıf, ++ Orta, +++ İyi, ++++ Mükemmel



Şekil 2.2: Liflerin Çekme Dayanımı- Birim Uzama Grafiği. [6]

2.1.5. Polipropilen lif

Alkali ortamlara karşı dayanıklı olan polipropilen lif, yüksek pH'lı beton gözenek suyuna karşı dayanıklılık göstereceğinden betonla sıkça kullanılmaktadır. Bu lifler izotaktik liflerden elde edilirler. Kalınlığı 50-100 mikron arasında değişen elyaf tabaka halinde kullanılmaktadır. Polipropilen lifin erime sıcaklığı 165 ˚C olup, 100 ˚C sıcaklığa kadar malzeme özelliklerini korumaktadır. Yapıları sebebiyle birçok kimyasala karşı direnç göstermektedirler.

Yüksek sıcaklıklara ulaştığında eriyen bu malzeme betonun içerişinde kullanıldığında boşluklar oluşturarak ısı geçişini yavaşlatır. Böylece yangına karşı önlem olarak polipropilen lifli betonlar üretimi yapılabilir.

2.1.6. Çelik lif

Çelik Lifler diğer liflere oranla daha sünektir. Beton içerisinde kullanıldığında betona tokluk ve yüksek kırılma enerjisi katmaktadır. TS 15013 çelik lifleri A,B,C şeklinde 3 kategoriye ayırmaktadır. A sınıfı lifler; düz, pürüzsüz ve yüzeyli liflerdir. B sınıfı lif, girinti ve çıkıntılara sahip, bütün uzunluğu boyunca çentiklenmiş liflerdir. C sınıfı lifler ise bir ucu veya iki ucu kıvrılmış liflerdir. Çelik lifler betonda kullanıldığında çatlak

kontrolü de sağlamaktadır. Yüzeyleri girintili çıkıntı olduklarında veya uçlarında kanca olduğunda betonla aderansı da artmaktadır.

2.1.7. Doğal lif

Doğal lifler; bitkisel, hayvansal ve doğal anorganik olabilmektedir. Bitkisel liflere pamuk, keten, kapok, kenevir, jüt, rami, sisal ve koko bitkileri; hayvansal liflere keratin, yün, kaşmir, keçi kılları; doğal anorganik liflere asbest örnek olarak verilmektedir.

2.2. Matris Malzemeler

Matris malzemeler polimer esaslı olabileceği gibi metal ve seramik türevli de olabilir. Tüm matrisler arasında ticari açıdan en uygun plastik matrisler termoset esaslı olan epoksi ve polyester reçineleridir. Matrislerin en önemli özelliği güçlü bir yapıştırıcı olmasıdır. Aynı zamanda malzemeleri çevresel şartlara karşı korumaktadır. Matris malzemelerin 3 önemli görevi vardır bunlar:

- Takviye elemanları birbirine bağlamak
- Elemanlar arasında yük aktarımını sağlamak
- Takviye elemanları çevresel zararlara karşı korumaktır.

Polimerlerin ısıl davranışlarına göre ayrıldığı iki temel gruptan (termoplastikler ve termosetler) oluşmaktadır. Termoset, ısıtıldığında sertleşen ve bu halini sonsuza dek koruyan plastiklerdir. Termoplastik ise, ısıtıldıklarında yumuşayan, soğutulduklarında tekrar sertleşen plastiklerdir.

Fenolik termosetler gibi termoset malzemeler oda sıcaklığında gevreklerdir ve genellikle zayıf mekanik özellikler göstermektedir. Ancak çapraz bağların bulunmasıyla termosetler yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir hale getirilmiştir. Çünkü termosetlerin termoplastiklerden daha yüksek yumuşama sıcaklığı ve sünme özellikleri mevcuttur. Ayrıca termosetler kimyasallara karşı daha dayanıklıdır. Güçlü mekanik özelliklerin ihtiyaç duyulduğu uygulamalarda termosetler takviye elemanlarla kombin oluşturarak bu özellikleri arttırırlar.

Termoset matrislere dayalı kompozitler bazı inşaat uygulamalarında çelik ve betonun yerine geçebilmektedir. Çünkü bu malzemeler genellikle oksidasyona çelikten daha

fazla direnç sergilemektedir ve betondan daha iyi donma-çözülme direnci gösterebilmektedir.

2.2.1. Fenolik reçineler

Organik materyallerin inşaatta kullanımının sakıncalarından biri de hızlı tutuşabilmeleri. Bu durum fenolik tipi reçine kullanarak düzeltilebilmektedir. Fenolik reçineler fiyatlarının yanı sıra birçok sebepten dolayı termoset kompozitlerin yapımında kullanımı tercih edilmiştir. Fenolikler, uçak, iç paneller, tünellerde kullanılan malzemeler ve yangın güvenliği bileşenleri gibi, yangın, duman ve toksisite özellikleri gerektiren uygulamalarda kullanılan elyaf takviyeli kompozitlerin teknik özelliklerini karşılar. Toplu taşıma, marine, kıyı ve inşaat malzemelerinin tümü yangına dayanıklı ve yüksek sıcaklığa dayanıklı bileşenler gerektirir. Fenolik esaslı kalıplar ve laminatlar, bu alanlarda yanmaya karşı oldukça dirençli olmaları ve yangında minimum duman ve toksik duman üretmeleri nedeniyle kullanılmıştır. Fenolik kompozitler karmaşık şekillerde üretilebilir ve dikkatli bir tasarımla, yüksek mukavemet ve sertlik ve mükemmel darbe dayanımına sahip malzemeler elde edilebilir. Böylece malzemeler demiryolu, açık deniz ve inşaat endüstrisindeki metallere alternatifler haline gelir.

2.2.2. Polyester reçineler

İlk polimer esaslı kompozit 1940 yılında radar teknolojisinde kullanılan cam liflerden ve polyester reçinelerden oluşan kompozittir. Termoset reçinelerden olan polyester polikondansasyon reaksiyonuyla sentezlenmektedir. En eski termoset reçineler içerisinde yer alan polyester, değerli termoset özelliklerinden dolayı FRP'lerde matris olarak geniş ölçüde kullanılmaktadır. 2000 – 2008 yılları arasında Avrupa'da polyester imalatı yıllık %4-5 kazanç sağlamasıyla birlikte hızlı şekilde artış gösterdi.

En iyi özelliklerin sunulması adına polyester reçinelerde sitirin oranı 0,5 alınmaktadır. Çapraz bağlama reaksiyonları sırasında, ürünün hacmi genellikle ölü büzülme olarak bilinen % 2-5'lik bir azalmaya maruz kalır. Sitirin; reçinenin viskozitesinin düşmesini sağlar, depolama sırasında jelleşmesine izin vermekle kalmaz aynı zamanda çapraz bağlanma reaksiyonunu hızlandırır.

Polyester reçineler için en büyük pazar; bina ve sıhhi tesisat piyasasıdır. Burada kompozit malzemelerde kullanılan polyester reçine, beton kaplı çeliğin değiştirilmesi gibi yapısal parçalarda, kaplama panellerinde, örneğin prefabrike binalar için kaplamalarda, çatı kaplama karolarında, borular ve ayrıca banyo mobilyalarında gibi uygulamalar için kullanım alanları bulunmaktadır. Hafif reçine kaynağı olarak birçok ev-yapı malzemesi polyester reçinesini içerir. Prefabrike duş tezgahları ve dolap parçaları genellikle polyester reçine ve akrilik karışımıdır ve dekoratif metal parçalar genellikle dekora uyacak şekilde polyester reçine esaslı bir renk verici ile jel kaplıdır. Kolon ve korkuluk gibi birçok dekoratif detaylar sert köpükten oyulduktan sonra cam elyaf ve polyester reçine ile kaplanarak güçlendirilmekte ve hava şartlarına dayanıklı hale getirilmektedir, ayrıca binaya uyacak şekilde boyanabilmektedir.

2.2.3. Vinilester reçineler

Vinilesterler doymamış epoksi reçine esterleridir. Bu nedenle, epoksi reçinelerin özelliklerine benzer mekanik ve hizmet özellikleri ve polyesterlerinkilere eşdeğer işleme teknikleri sunarlar. Gerçekten de, bunlar kür ve işleme benzerliği nedeniyle genellikle doymamış polyester sınıfı olarak tanımlanır. Daha az çapraz bağ olması nedeniyle, kürlenmiş bir vinilester reçinesi daha esnektir ve kürlenmiş bir polyesterden daha yüksek kırılma tokluğuna sahiptir. Genellikle vinilesterler iyi ıslatma özelliklerine sahiptir ve bir cam elyaf yüzeyinde benzer gruplarla hidrojen bağları oluşturabilen yüksek OH grubu nedeniyle cam elyaflarına iyi bağlanırlar. Güçlü asitlere ve güçlü alkalilere karşı direnç gösterirler ve hem oda hem de yüksek sıcaklıklarda işlenebilirler. Polyesterler ile karşılaştırıldığında, vinilesterler azaltılmış su emme ve büzülme yanı sıra gelişmiş kimyasal direnç sunar.

2.2.4. Epoksi reçineler

Termoset malzemelerin önemli ve çok yönlü bir alt kümesi olarak, düşük büzülme, mükemmel mekanik ve yapışma özellikleri ve iyi çözücü ve kimyasal direnç gibi üstün özellikleri nedeniyle epoksi reçinelerine (EP) son yıllarda artan ilgi gösterilmektedir. Sıvı halde bulunan bu malzemeler uygun kürlenme koşulları altında katı faza geçen yüksek yapışkanlık özelliği olan polimer yapıştırıcıdır. Neme ve ısıya karşı dayanıklıdır.

Ancak epoksi reçineler, yüksek çapraz bağlanma yoğunlukları ayrıca istenmeyen gevrek kırılma davranışı ve uygulamalarının büyümesini engelleyen zayıf çatlak yayılma direnci ile sonuçlanabilmektedir. Birçok kullanım yeri vardır bunlardan bir kaçı aşağıdaki gibidir;

- Yalıtma (kaplama)
- FRP'lerin yapımında
- Onarım işlerinde Güçlendirme işlerinde
- Laminasyon işlerinde
- Macunlama boşluk doldurma ve yüzey düzenlenme
- Yapıştırma işlemlerinde, kullanılabilmektedir.

Epoksi reçinelerin yüksek elektriksel özdirençleri vardır. Ayrıca polyester reçinelere kıyasla daha yüksek sıcaklıktaki iyi performans gösterir. Ayrıca alt katmanlarla ve FRP'lerle (aramid, karbon, cam vs.) optimal adezyon kuvveti oluştururlar. Epoksi reçinelerin bir başka pozitif yönü ise kür sırasında oluşabilecek düşük rötre ihtimalidir. Polyester ve vinilester reçineler hacimsel olarak % 12 büzülürler fakat reçinenin uzun süre devam eden kürlenmesi sebebiyle bu etki hemen görülmeyebilir. Epoksi reçineler ise %5'den bile daha az miktarda hacimsel büzülmeye uğrarlar ve uzun periyotlar boyunca vinilester ve polyestere göre daha stabildir.

Sitrenin bulunmayışından dolayı kür süresi boyunca epoksi reçineler vinilester ve polyester reçinelerden önemli derecede daha az toksik yararlar. Epoksi reçineleri ayrıca vakumlu torbalama ve infüzyon, otoklav kalıplama, basınçlı torba kalıplama, kompresyon kalıplama, filaman sarımı ve elle yerleştirme gibi birçok kompozit üretim prosesi ile de uyumludur.

Bu sistemleri mühendislik açısından çok ilginç kılan diğer bir özelliği de büyük çok yönlülükleridir. Reçine sisteminin karışımını değiştirerek veya madde ekleyerek çok sayıda fiziksel, mekanik ve işleme özelliğini uyarlamak mümkündür. Örneğin, belirli bir uygulamada düzenli reçinelerin önerdiğinden daha yüksek elektriksel iletkenlik gerektiğinde, karbon nanotüpler veya metal tozu gibi optimum elektriksel özelliklere sahip dolgu maddeleri ekleyerek modifiye edilebilirler.

2.3. FRP Malzemelerin Kullanım Alanları

FRP malzemeler ihtiyaca uygun istenilen mekaniksel özelliklerde, istenilen boyutsal özelliklerde üretilebildiğinden inşaatta, havacılık ve uzay endüstrisi gibi çeşitli alanlarda kullanıma uygundur. İnşaat mühendisliğinde kullanım yerleri ise; onarım ve güçlendirme, hafif yapı tasarımı, korkuluk, merdivenler, kapılar, ızgaralar, borular, tanklar ve depolar, inşaat kalıpları, çatı aksesuarları, levha ve ışıklıklar, dekoratif uygulamalar, köprüler, iskeleler, yapılarda taşıyıcı konstrüksiyon olarak ve cephe kaplamaları olarak kullanılabilmektedir.

2.3.1. Onarım ve güçlendirme

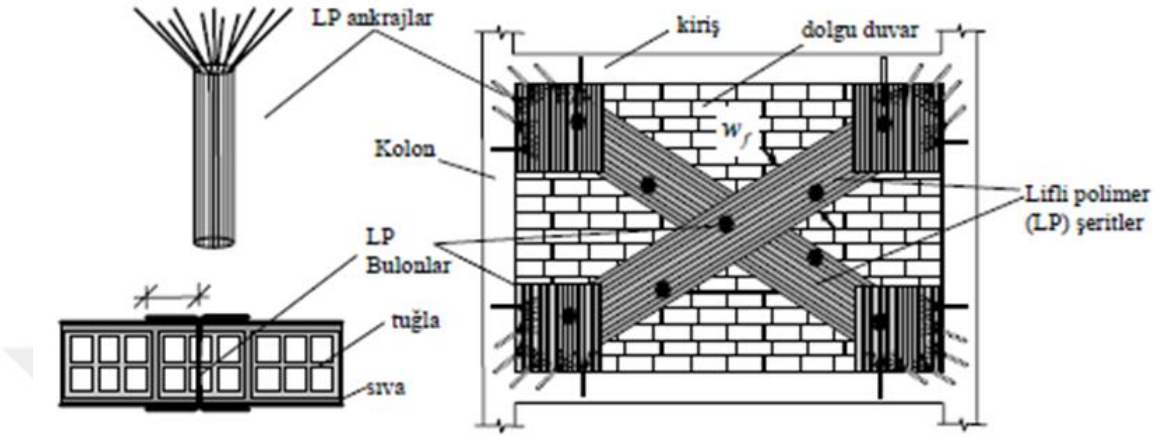
FRP malzemeler genellikle onarım ve güçlendirmede kullanılmaktadır. 2018 Deprem Yönetmeliği'nin içerisinde de bu durum uygulama yöntemleriyle açıklanmaktadır. FRP malzemeler özellikle yüzeysel taşıyıcı elemanlara epoksi ile yapıştırılarak güçlendirmede kullanılır. FRP'ler ile yapılan güçlendirmelerin faydaları aşağıdaki gibidir,

- FRP'ler ile yapılan güçlendirme, mantolama ile yapılan güçlendirmeye göre daha az yer kaplamaktadır. Böylece alanın kullanımındaki verimlilik düşmemektedir.
- Hafiftir
- Korozyona karşı dayanıklıdır
- Büyük boyutlarda kullanılabilmektedir
- Uygulanması daha pratiktir
- Yüksek dayanıma ve dayanıklılığa sahip olması
- Mimaride değişiklik gerektirmemesi
- Yapının yük dağılımına etki etmemesi

2.3.1.1. Dolgu duvarlarının güçlendirilmesi

L/H (uzunluk/ yükseklik) oranı 0.5 ile 2 arasında olan dolgu duvarlarının rijitliği ve kesme dayanımı, duvar yüzüne uygulanan lifli polimerler sayesinde arttırılabilir. Mevcut çerçeve içinde basınç çubuğu oluşturulmalı ve gerekli ankrajlar çerçeveye yük

aktarımı için düzenlenmelidir. Bunun için çerçeve elemanlarının dış yüzü ile uygulamanın yapılacağı duvar yüzü arasında en az 30 mm derinliğinde boşluk olmalıdır. Aksi durumda bu tür duvar güçlendirmesi uygulaması yapılamaz.

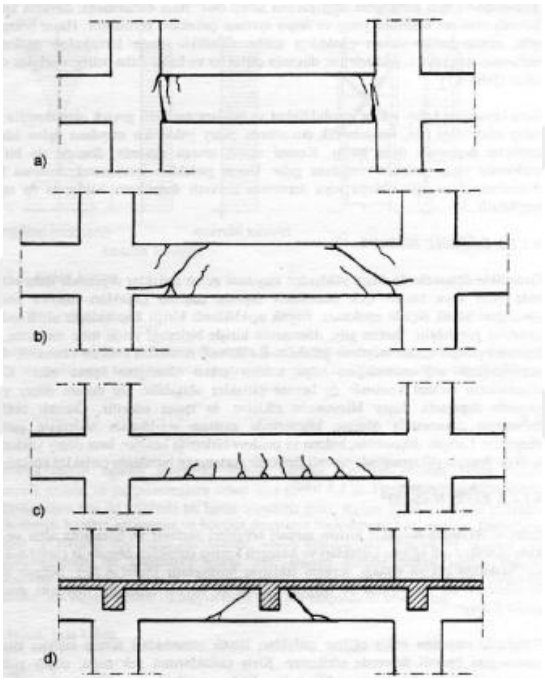


Şekil 2.3: Dolgu Duvarlarının FRP ile Güçlendirilmesi [7]

Köşe bölgelerde yük dağılımını sağlayabilmek ve betonarme çerçeve ile FRP şeritler arasında yeterli sayıda ankraj yerleştirebilmek için şerit genişliğinin 1,5 katından az olmayan genişlikte kare FRP levhalar kullanılacaktır (Şekil 2.3). FRP uygulaması duvarın iki tarafından yapılmalı ve FRP şeritler duvar kalınlığınca geçen Lifli Polimer bulonlarla duvara sabitlenecektir. Lifli Polimer bulonlar arasındaki mesafe 600 mm'den fazla olmamalıdır. Köşegen şerit kenarına bulonun uzaklığı 150 mm'den fazla olamaz. Yük aktarımı FRP ankrajlarla sağlanacaktır. FRP ankrajlar, FRP şeritlerin epoksi ile doyurulması ve bir silikon çubuk etrafına sarılması ile oluşturulacaktır. FRP ankrajlar en az 4 adet ankraj köşegen FRP şerit yönünde olacak şekilde beton içinde açılan deliğe epoksi enjekte edilerek yerleştirilecektir. Ankrajın uygulanmasında çubuk etrafına sarılan FRP'nin genişliği 100 mm'den az olmamalıdır. Ankraj derinliği 150 mm'den, deliğinin çapı ise 10 mm'den küçük olmamalıdır. Hazırlığı yapılan bir ankrajın çekme dayanımı, 20 kN veya silikon çubuk etrafına sarılan FRP'nin çekme kapasitesinin %30'undan küçük olanı alınmalıdır.

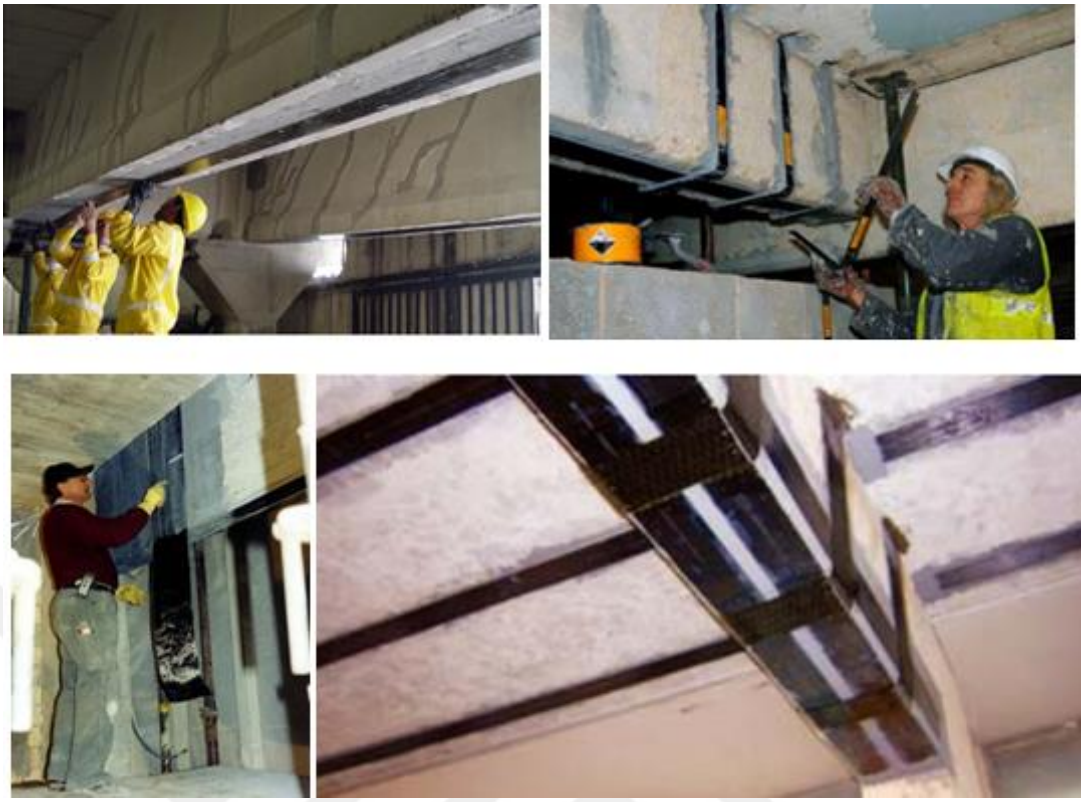
2.3.1.2. Kirişlerin güçlendirilmesi

Kirişlerde çekme gerilmeleri boyuna donatı tarafından karşılanırken, etriyeler kesme gerilmelerini almaktadır. Kesme dayanımını olumsuz yönde etkileyen birçok faktör vardır. Bu etkenler hesapta yapılan hatalar, kesme donatısının hatalı detaylandırılması, yapım hataları, zayıf işçilik, kesme donatısı çeliğinin alanının yüksek sıcaklık, yüksek nem, zemin tuzluluğu gibi kötü çevre şartları nedeniyle korozyona uğraması olarak sayılabilir. Şekil 2.4'te kirişlerde meydana gelen hasarlar gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Kirişlerde Meydana Gelen Hasarlar [8]

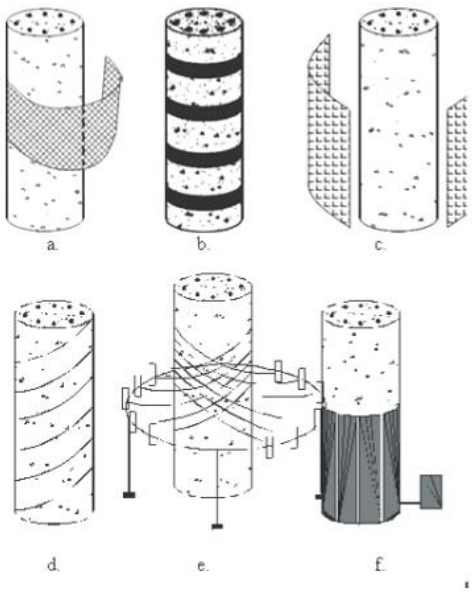
Bu hasarların güçlendirilmesinde FRP levhalar ve şeritler kullanılmaktadır. Tam sarım veya yarım sarım, sürekli veya süreksiz sarım, sadece alt kısımda uzunluk boyunca sarım gibi birçok alternatif sunmaktadır (Şekil 2.5). Çatlak düzlemini 90˚ kesecek şeklinde kullanılan FRP şeritlerle çatlak kontrolü sağlanabilir, etriyeden dolayı yaşanan problemlere karşı kiriş etrafında tam sarım veya yarım sarım yöntemi ile kesme etkilerine karşı önlem alınabilir veya çekme donatısından dolayı oluşan hasarlara karşı donatı boyunca kiriş alt kısmına levha veya şerit ilave edilerek destek sağlanabilmektedir. Ayrıca betonun çevresi sarmalandığı için doğrudan betonu ve donatıyı çevresel şartlara karşıda korumaktadır.



Şekil 2.5: FRP'lerin kirişlere farklı sarılma biçimleri [9].

2.3.1.3. Kolonların güçlendirilmesi

Lifli Polimer sarılarak yapılan güçlendirme ile kolonun kesme kuvveti, eğilme momenti ve normal kuvvet taşıma kapasitesi artırılmış olur. Kolon rijitliği değişmediğinden sistem içinde kuvvet değişimi de olmaz. Yapıya ek bir ağırlık getirmediğinden yapıya etkiyecek deprem kuvvetinde bir artış olmaz. Bu nedenle, ülkemizdeki sargı yetersizliğine sahip betonarme kolonların plastik mafsal bölgelerinin güçlendirilmesinde FRP sargılamanın diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında kullanılabilecek oldukça etkin bir yöntem olabileceği açıktır. Hasar görmüş betonarme elemanlara başlangıçtaki orijinal dayanımlarını kazandırmak veya güçlendirmek amacı ile karbon lifi – cam lifi takviyeli epoksi esaslı kompozit malzemeler çelik plakalarla yapılan geleneksel güçlendirme sistemlerine alternatif olarak geliştirilmişlerdir. Lifli polimer sarılacak kolonun çekirdek kısmına ulaşıp kolonu köşelerini oval hale getirilip uygulanması gerekmektedir (Şekil 2.6). Aksi halde lifli polimer bezi köşelerde oluşacak keskin uçlardan dolayı yırtılıp kolonda etkisini yitirebilmektedir.



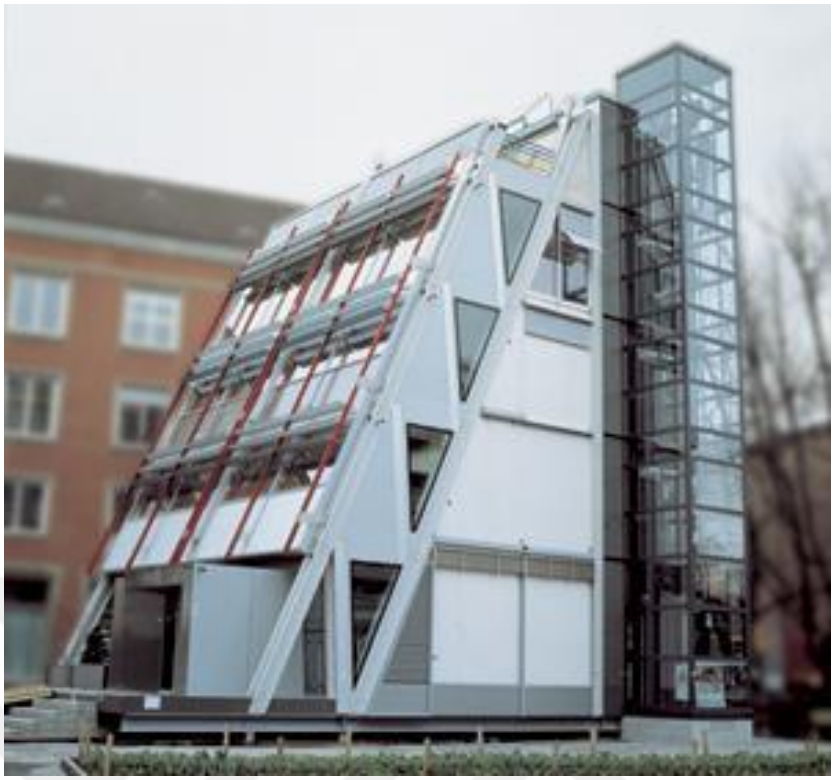
Şekil 2.6: Kolonda FRP Sargılama şekli. a. Fabrikasyon sarma, b. kısım şerit sarma,c. prefabrik ceketler; d - spiralhalkalar; e - otomatik sarma; f - reçine infüzyonu [10,11].

2.3.2. İnşaat kalıpları

GFRP katkılı beton kalıplarının inşaatlarda uygulanması ile çok sayıda kolaylık ve fayda elde edilmiştir. Kalıpların bakım yapılmadan 70 defa kullanılabilme özellikleri bulunmaktadır. Yapı maliyetinin ucuz olmasının yanı sıra kalıpların bakım masrafı da düşüktür. Cam liflerden üretilmeleri atmosfer şartlarından etkilenmemelerini sağlamaktadır. Her beton uygulamasından sonra tazyikli su ile yıkanarak uygulamaya tekrar sokulmaktadırlar.

2.3.3. Hafif yapı tasarımı

FRP malzemelerin özgül ağırlıklarının düşük olması yapının kendisinden dolayı oluşacak olan yükün azalmasını sağlayacaktır. Böylece depremde yapının hafif olmasından ötürü zarar azalacaktır. İstenilen profillerde üretilen FRP malzemelerin uygulanmasının kolay olması, FRP yapıların betonarme yapılara göre daha hızlı şekilde bitmesini sağlayacak ve bu durumda işçilik azalacaktır. Ancak bu malzemelerin fabrika üretimi ve termoset malzemeler olmasından dolayı, malzemede oluşacak kusurların geri dönüşü olmayacaktır. Şekil 2.7'de Cam Takviyeli Plastik (CTP) profiller kullanılarak yapılan bir bina örneği gösterilmektedir.



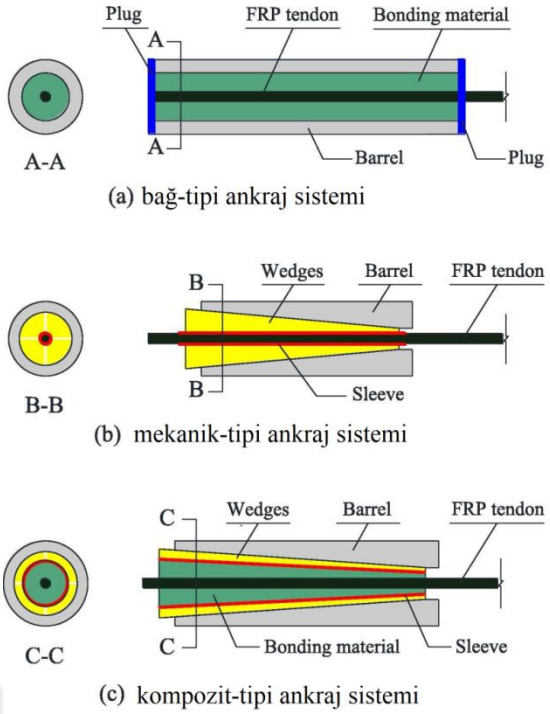
Şekil 2.7: İsviçre'nin Basel şehrinde CTP profillerle yapılan gözlem evi**.** [12]

2.4. FRP Malzeme Çeşitleri

FRP malzemelerden şeritler, kumaşlar, levhalar, bulonlar, ankrajlar, donatılar ve profiller üretilebilmektedir.

2.4.1. FRP ankrajlar

Köprü yapıları gibi korozyonun daha büyük risk taşıdığı yapılarda bağlantı elemanlarının zarar görmesi büyük bir tehlike arz etmektedir. Tehlikeyi minimalize etmek amacıyla korozyona karşı dirençli malzemelerden ankraj üretimleri yapılmaktadır. FRP malzemeler kullanılarak üretilen bu ankrajların dayanıklılıklarıyla ilgili çalışmalar halen devam etmektedir. Şekil 2.8' de farklı sistemlerde FRP'lerden oluşturulmuş ankraj sistemleri gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Ankraj sistem tipleri [13]

2.4.2. FRP şeritler, kumaşlar ve levhalar

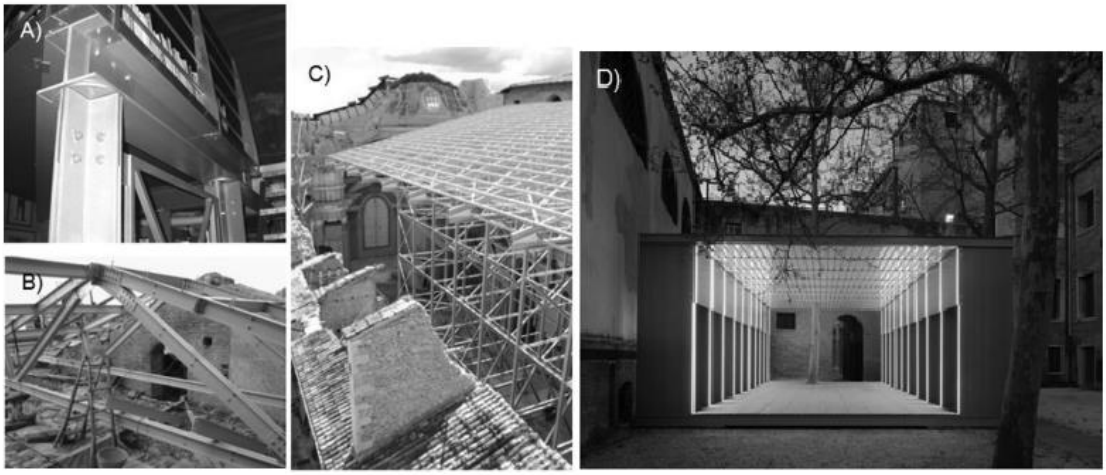
FRP şeritler, kumaşlar ve levhalar genellikle onarım ve güçlendirme işlemlerinde kullanılmaktadır. Kullanımlarının kolay, pratik olması ve yer kaplamaması gibi üstün özelliklere sahip olan bu malzemelerin tercihi gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesinde tercih edilen bu malzemeler çok etkili sonuçlar ortaya koymaktadır. Çünkü tarihi yapıların güçlendirilmesinde, tarihi yapıların mimarisinin bozulmaması önem arz etmektedir. Şekil 2.9'da tarihi yapıda FRP kullanılarak yapılan çalışma gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Tarihi yapılarda FRP uygulamaları [14]

2.4.3. FRP profiller

FRP profiller korozyona uğramamaları ve üstün mekaniksel özellikleri sebebiyle çelik profiller yerine yapılarda taşıyıcı malzeme olarak kullanılabilmektedir. Bunun yanı sıra merdivenlerde, korkuluklarda ve çatılarda da kullanılabilmektedir. Şekil 2.10, Şekil 2.11 ve Şekil 2.12'de pultruzyon metoduyla üretilmiş FRP profillerin yapıda kullanım örnekleri verilmektedir.



Şekil 2.10: İtalya'daki tarihi yığma binalara entegre edilmiş PFRP yapılarına örnekler. A) Casa Cogollo'da ('Casa del Palladio") İç Mekan Güvertesi, Vicenza, 2008, B) San Domenico kilisesinin kutsallığında çatı makasları, Siena, 2012, C) yer altı temelleri olan geçici barınak yapısı, Santa Maria Paganica Kilisesi, L'Aquila, (depremden sonra), 2010, ve D) IUAV Üniversitesi, Venedik 2018'deki eski binaların içindeki All-GFRP köşkü [15]



Şekil 2.11: SAKARYA Arifiye'de FRP profillerden yapılmış bina



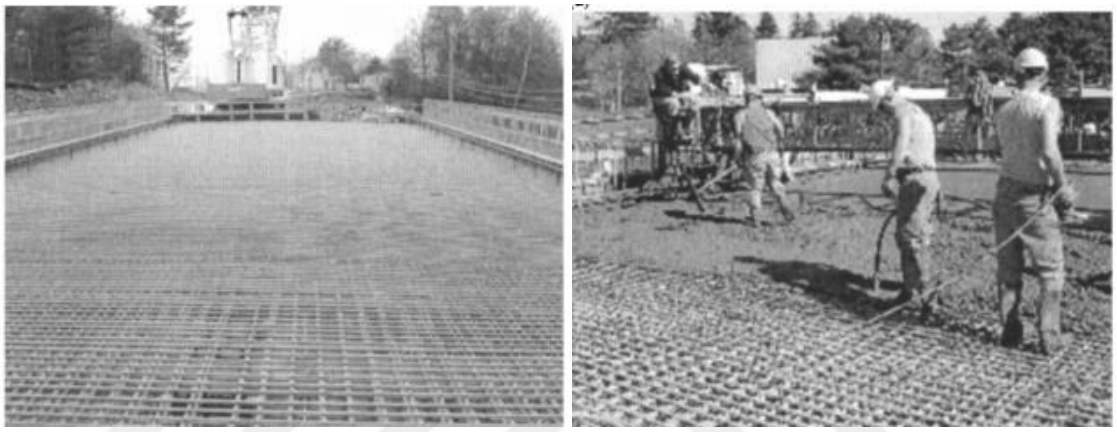
Şekil 2.12: SAKARYA Arifiye'de FRP profillerden yapılmış bina iç görüntüsü

2.4.4. FRP donatılar

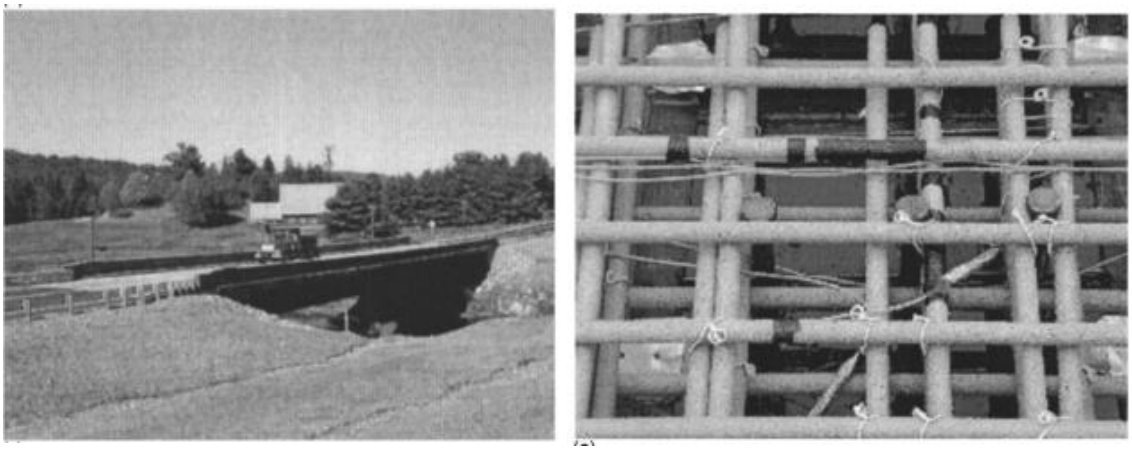
Çelik donatılara alternatif olarak üretilen FRP donatıların günümüzde kullanımı yavaş yavaş artmaktadır. Özellikle korozyona uğramamaları ve kimyasal dirençlerinin olması FRP donatıların tercih edilmesini sağlamaktadır. Betonun çekmeden dolayı oluşacak gerilmeleri karşılamasındaki yetersizliği bilinmektedir. Çekme dayanımları lif türüne göre değişiklik gösterse dahi çelik donatıya oranla daha yüksek gerilmeleri karşıladıkları bilinmektedir. Çeliğin elektrik iletkenliğinin yüksek olması, ısı iletkenliğinin yüksek olması ve manyetik alan oluşturması gibi olumsuz özellikleri çelik donatıya alternatif bir donatı üretilmesini gerekli kılmıştır. Özellikle su ile temas halinde olan yapılarda (kıyı yapıları, iskeleler, yol ve istinat duvarları vs.) beton içerisindeki donatı korozyona bağlı olarak hem kendisine hem de betona zarar vererek önemli problemlere sebep olmaktadır. FRP'lerin maliyeti yüksek olsa da betonarme yapılarda oluşacak hasarın onarılması ve güçlendirilmesi işlemi daha maliyetli olacağından uzun süreli maliyet hesabında avantaj sağlayacaktır.

FRP donatılar mükemmel malzemeler değillerdir bazı kusur ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin karbon fiber gibi liflerin maliyetlerinin yüksek olması başlangıç maliyetini artırmaktadır ancak bu durum uzun süreli maliyet açısından değerlendirildiğinde göze alınabilecek bir problemdir. Ancak FRP donatıların gevrek malzeme olmalarından ötürü süneklik düzeyi yüksek yapılarda taşıyıcı sistem olarak

kullanımından doğabilecek olumsuz sonuçlar henüz belirlenmemiştir. Bir diğer yandan malzemelerin özellikleri tamamen üretime bağlıdır ve bir standarda tabi değildir. Bu durum denetimin nasıl olacağının belirlenmemiş olmasına sebebiyet vermektedir. Ayrıca betonla aderans çalışmaları da devam etmektedir. FRP donatılarda saydığımız bu kusurlar yapılarda taşıyıcı sistem olarak kullanılmasıyla ilgili soru işaretleri oluşturmaya devam etmektedir. Ancak Şekil 2.13, Şekil 2.14, Şekil 2.15, Şekil 2.16, Şekil 2.17, Şekil 2.18 ve Şekil 2.22'de görüldüğü gibi günümüzde ve geçmişte yapıda kullanım örneklerine rastlamak mümkündür.



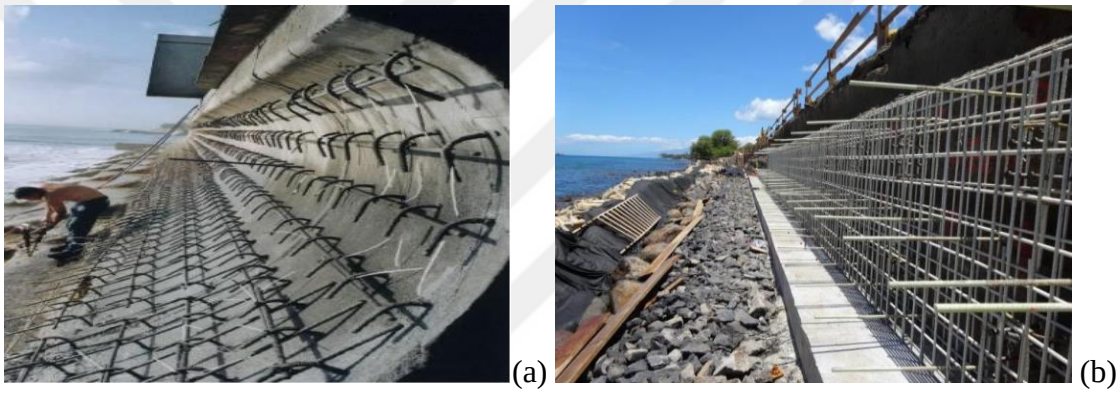
Şekil 2.13: 3. Morristown Köprüsü'nün inşası: güverte döşemesi için FRP takviyesi ve beton dökümü [16]



Şekil 2.14: 3. Morristown köprüsünün tamamlanmış hali [16]



Şekil 2.15: Pearl Harbor Kuru rıhtım rehabilitasyonu [15]



(a) (b)

Şekil 2.16: Deniz Duvarları: (a) – Estee Lauder estate Palm Beach, (b) – Maui, HI [15]

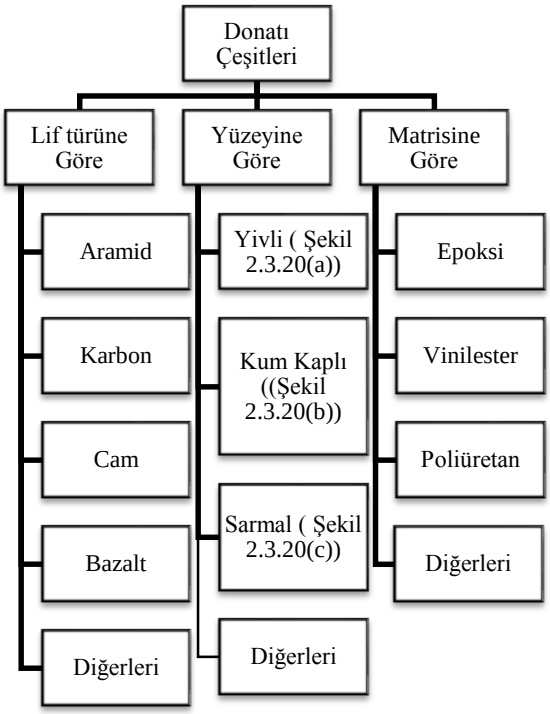


Şekil 2.17: Honoapiilani Highway (soldaki resim 2001 yılında çelik donatılı hali, sağdaki resim 2012 yılındaki FRP donatılı hali) [15]

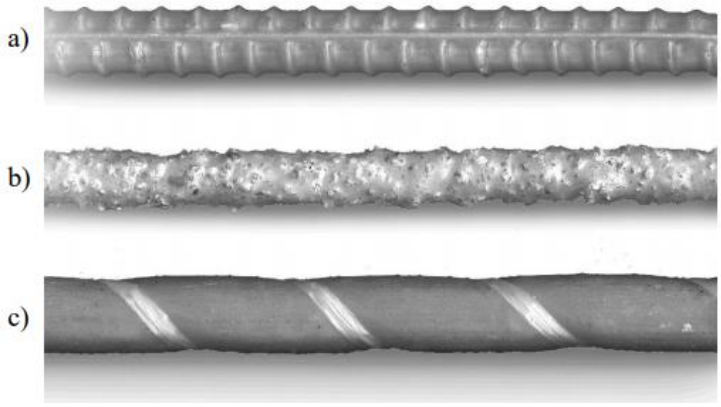


Şekil 2.18: Miami Metro Rayları [15]

FRP donatıların üretimleri çeşitli şekillerde yapılabilmektedir. Böylece FRP donatılardaki ürün yelpazesi çok geniştir. Aramid, karbon, cam, bazalt gibi liflerden; vinilester, epoksi, poliüretan gibi matris malzemelerden; yüzeyi yivli, sarmal veya kum kaplı olan ihtiyaca uygun şekilde çok çeşitli kombinasyon oluşturulabilmektedir. Kısaca FRP donatılar ile farklı ortam koşullarına uygun malzeme üretimi yapılarak yapının durabilite yeteneğine çok büyük katkı sağlanmaktadır. Şekil 2.19'de donatı çeşitlerinin grafiksel gösterimi verilmiştir. Şekil 2.20 ve Şekil 2.21'de sırayla yüzeyine göre lif türüne göre donatı çeşitleri verilmiştir.



Şekil 2.19: Donatı Çeşitleri



Şekil 2.20: Donatı çevresine göre sınıflandırma a.yivli donatı,b kum kaplı donatı, c.sarmal donatı [17]



Şekil 2.21: Farklı lif türlerine göre donatı çeşitleri [18]

BÖLÜM 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

FRP donatılarla ilgili durabilite çalışmalarının çoğu yabancı kaynaklara ve standartlara dayanmaktadır. Yapılan bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Jun Wang ve arkadaşları cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin, nemin ve sürekli yüklerin kombine etkileri altında dayanıklılığını incelenmiştir. Deneyde yükleme olmadan tuzlu suya daldırma işlemi, belirli yüzdelerde yüklemelerle tuzlu suya daldırma işlemi, yükleme olmadan musluk suyuna daldırma işlemi ve belirli yüzdelerde yüklemelerle musluk suyuna daldırma işlemi yapılarak sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Numuneler belirli günlerde çıkarılarak çekme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda; daldırma süresi artıkça numunelerin dayanımlarının azaldığı, tuzlu suyun musluk suyuna oranla numunelere daha fazla zarar verdiği ve yükleme artırıldıkça hasarın daha da arttığı sonucuna ulaşılmıştır [19].

Jun Wang ve ark. yaptığı başka bir çalışmada çeşitli çevresel koşullar altında fiber takviyeli polimer kompozitlerin dayanıklılık ve tahmin modellerinin incelemesi yapılmıştır. Yapılan deneylerde pH değişimleri dahil olmak üzere nem saldırılarının, FRP kompozit dayanımını rijitlikten daha fazla düşürdüğü sonucuna varılmıştır. Aşırı asit ortamı, yüksek pH altında (>10) (cam elyaf kompozitleri hariç) FRP kompozitlerine karşı alkali koşullardan daha agresif olma eğiliminde olduğu görülmüştür. Alkali şartlandırma ise GFRP kompozitlerin çekme dayanımı üzerinde musluk suyu ve tuzlu sudan daha fazla zararlı etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Ultraviyole (UV) radyasyonu, matrisin dominant enine özelliklerini, kompozitlerin fiber dominant boylamsal özelliklerinden daha fazla bozduğu gözlemlenmiş ve UV radyasyonunun yüksek sıcaklık döngüleri ve yüksek nem döngüleri ile eşleşmiş maruziyeti, FRP üzerinde, tek başına UV'nin maruziyetine göre daha zararlı etkilere sahip olduğu anlaşılmıştır [20].

A.H. Ali ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada kum kaplı bazalt FRP donatıların dayanıklılık performansı ve uzun vadeli tahmin modelleri incelenmiştir. Bu çalışmada yeni geliştirilen bazalt elyaf takviyeli polimer (BFRP) donatıların fiziksel, mekanik, mikroyapısal ve dayanıklılık özelliklerini araştıran deneysel bir çalışma sunulmaktadır. Fiziksel, mekanik özellikler ve mikroyapısal özellikler ilk önce şartlanmamış BFRP donatılarda değerlendirildi. Daha sonra BFRP donatılar belirli şartlandırılmalara tabi tutulup deneyleri yapıldı. BFRP donatıların dayanıklılık performansı, enine kesme testi, eğilme testi ve interlaminar kesme testi gibi mekanik testlerin, farklı maruziyet periyotları (1000; 3000; ve 5000 saat) sonrasında, 60 santigrat derecelerde gerçekleştirilmesiyle değerlendirildi. Şartlandırılmamış BFRP donatılar ile şartlandırılmış BFRP donatılardan elde edilen sonuçlar kıyaslandı. Test sonuçları, koşulandırılmamış BFRP donatıların en iyi fiziksel özelliklere sahip olduğunu ortaya çıkardı. Öte yandan, uzun süreli dayanıklılık performansı, enine kesme dayanımı, eğilme dayanımı ve interlaminar kesme dayanımı gerçekleşme oranının sırasıyla % 12, % 19 ve % 21 oranında azaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca yapılan deneyler sonucunda uzun vadeli tahminlere göre, alkali çözeltiye batırılmış BFRP donatıların enine kesme dayanımı, sırasıyla, 10°C ve 30°C'lik bir izoterm sıcaklıkta, 150 yıl sonra sırayla %19,8 ve %23,0 oranında azalacaktır. BFRP donatıların, sırasıyla %79,6 ve %76,1'den daha düşük bir çapraz kesme dayanımı ile hizmet ömrü süresinin sonsuz olması gerektiği gösterilmiştir. Ayrıca BFRP donatıların interlaminar kesme kuvveti, hızlandırılmış yaşlandırmada (60°C'de 5000 saat sonra %21 azalma görülmüştür) büyük ölçüde etkilenmiştir. Lif reçinesi arayüzü, şartlandırmaya bağlı bozulmayı kontrol etmede önemli bir rol oynadığı tespit edilmiştir [21].

T. D'Antino ve ark. tarafından sürekli gerilmenin cam FRP takviye donatılarının dayanıklılığı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Altı araştırma grubu oluşturularak test edilen kırk yedi GFRP donatısı, farklı sürekli gerilme oranlarına ve 720 ila 10,008 saat arasında değişen sürelerde alkali ortamlara maruz bırakıldı. On altı donatı, kürleme için kullanılan suda nemli tutulan beton prizmalar ve silindirler içine gömüldü. Çekme deneylerini yapmadan önce donatılar betondan çıkarıldı. Beton boşluk suyunun alkalinitesini benzeyen bir çözelti içine yedi donatı daldırıldı. Kırk bir donatı E-cam elyafından yapılırken, 6 donatı AR cam elyafı içermekteydi. Alkali bozulmasını hızlandırmak için çeşitli maruz kalma sıcaklıkları kullanıldığından, örnekler 22–23 ° C,

40-55 ° C ve 56-65 ° C olmak üzere üç sıcaklık aralığına bölünmüştür. Koşullandırma ortamının pH değeri 10.5<ph<13.1 aralığında değişim göstermektedir. Bu bölümde çözelti alkalinitesinin etkisi araştırılmamıştır. Kalıcı dayanım oranını etkileyen parametrelerin incelenmesi için, maruz kalma sıcaklığı, sürekli gerilme süresi ve sürekli gerilme oranı aynı zamanda dikkate alınmalıdır. Yapılan deney sonucunda elde edilenler ise şu şekilde sıralanabilir:

a) Sürekli gerilme oranının seviyesi, elde edilen artık dayanım oranı üzerinde sınırlı bir etkiye sahip gibi görünmektedir.

b) Yüksek sıcaklıklar, alkali ortamlara ve deiyonize suya maruz kalan donatıların artık dayanım oranı üzerinde güçlü bir etkiye sahipken, donma ve çözülme döngüleri tuz çözeltilerine batırılan donatıların davranışını etkilememiştir.

c) Sürekli gerilme uygulanarak ve uygulanmadan alkali ortamlara maruz kalan numunelerin sonuçları arasındaki karşılaştırma, gerilemeye uğramayan numunelerin 27°C'den yüksek sıcaklıklarda en düşük ortalama rezidüel dayanım oranına sahip olduğunu göstermiştir. Her ne kadar farklı gerilme testleri dikkate alınsa da, bu karşılaştırma a ve b şıklı sonuçları doğrulamaktadır.

d) GFRP donatılarının elastik modülü çelik donatınınkinin yaklaşık % 25'i olduğu için, çekme gerilmesi, yarı-kalıcı yük şokuna maruz kalan gerçek bir yapıda GFRP donatılarında, aynı sapmayla eşdeğer bir yapıya sahip çelik donatılarınkinden daha düşüktür. Sonuç olarak, deneysel testler için kabul edilen sürekli gerilme seviyesi, karşılık gelen koşulsuz (kontrol) numunesinin çekme dayanımını % 15'ini geçmemelidir.

e) Sürekli gerilme oranı, alkali ortamlara maruz kalan numuneler hariç, donatı artık dayanımında önemli bir rol oynamamaktadır [22]

Birçok araştırmada farklı matrisler ve lifler kullanılarak farklı koşullandırmalar altında çeşitli FRP'lerin durabiliteleri incelenmiştir. Tablo 3.1'de yapılan bazı çalışmaların ortak araştırma sonuçları bir araya getirilmiştir.

Tablo 3.1: Olumsuz çevreye maruz kalan ve uygulanan sürekli gerilme ile FRP veri tabanı.[22]

Lif türü	vf [%]	Matris Tipi	ϕ mm	σ_{fu} (MPa)	Yüzey	Çevresel koşul	pH	Sıc. (˚C)	saat	σ_s/σ_{fu} (%)	σ_f/σ_{fu} (%)
Referans : [23]											
E	57	VE	9,5	854	K	Hava		23	10,000	12,4	101,0
E	57	VE	9,5	854	K	Hava		23	10,000	12,4	101,3
E	57	VE	9,5	854	K	Hava		23	10,000	14,4	100,4
E	57	VE	9,5	854	K	Hava		23	10,000	12,6	101,3
E	57	VE	9,5	854	K	Hava		23	10,000	14,8	98,9
E	51	VE	9,5	828	S/K	Hava		23	10,000	11,0	99,9
E	51	VE	9,5	828	S/K	Hava		23	10,000	10,5	101,9
E	65	VE	12,7	774	K	Hava		23	10,000	16,2	102,3
E	65	VE	12,7	774	K	Hava		23	10,000	16,2	100,8
E	65	VE	12,7	774	K	Hava		23	10,000	14,8	100,4
E	65	VE	12,7	774	K	Hava		23	10,000	16,0	103,5
E	75	VE	12,0	1410	O	Hava		23	10,000	13,4	97,6
E	75	VE	12,0	1410	O	Hava		23	10,000	12,9	101,4
E	75	VE	12,0	1410	O	Hava		23	10,000	16,0	97,5
E	75	VE	12,0	1410	O	Hava		23	10,000	13,0	96,9
E	67	VE	15,9	748	K	Hava		23	10,000	14,1	95,6
E	67	VE	15,9	748	K	Hava		23	10,000	15,7	95,1
E	67	VE	15,9	748	K	Hava		23	10,000	15,4	93,9
E	67	VE	15,9	748	K	Hava		23	10,000	14,1	94,4
E	58	VE	15,9	783	S/K	Hava		23	10,000	14,8	102,0
E	58	VE	15,9	783	S/K	Hava		23	10,000	19,0	102,3
E	58	VE	15,9	783	S/K	Hava		23	10,000	17,1	97,3
E	57	VE	9,5	854	K	Hava		23	10,000	31,1	97,1
E	57	VE	9,5	854	K	Hava		23	10,000	28,6	101,0
E	57	VE	9,5	854	K	Hava		23	10,000	33,0	95,0
E	57	VE	9,5	854	K	Hava		23	10,000	28,8	95,5
E	51	VE	9,5	828	S/K	Hava		23	10,000	37,6	104,4
E	51	VE	9,5	828	S/K	Hava		23	10,000	29,1	97,4
E	51	VE	9,5	828	S/K	Hava		23	10,000	48,7	92,4
E	51	VE	9,5	828	S/K	Hava		23	10,000	30,3	94,1
E	65	VE	12,7	774	K	Hava		23	10,000	24,3	103,6
E	65	VE	12,7	774	K	Hava		23	10,000	25,9	99,1
E	65	VE	12,7	774	K	Hava		23	10,000	29,1	102,5
E	65	VE	12,7	774	K	Hava		23	10,000	26,5	97,0
E	65	VE	12,7	774	K	Hava		23	10,000	34,6	104,7
E	65	VE	12,7	774	K	Hava		23	10,000	25,6	98,3
E	75	VE	12,0	1410	O	Hava		23	10,000	20,3	97,0
E	75	VE	12,0	1410	O	Hava		23	10,000	20,0	96,9
E	75	VE	12,0	1410	O	Hava		23	10,000	17,2	96,6
E	75	VE	12,0	1410	O	Hava		23	10,000	18,8	98,9
E	67	VE	15,9	748	K	Hava		23	10,000	37,3	94,3
E	67	VE	15,9	748	K	Hava		23	10,000	30,9	97,9
E	67	VE	15,9	748	K	Hava		23	10,000	29,1	94,0
E	58	VE	15,9	783	S/K	Hava		23	10,000	32,8	104,9
E	58	VE	15,9	783	S/K	Hava		23	10,000	26,2	101,1
E	58	VE	15,9	783	S/K	Hava		23	10,000	30,1	99,2

Tablo 3.2: (devam) Olumsuz çevreye maruz kalan ve uygulanan sürekli gerilme ile FRP veri tabanı.

Referans: [24]											
E	66	VE	12,7	854	K	Hava		23	1440	80,0	103,0
E	66	VE	12,7	854	K	Hava		23	1440	80,0	97,2
E	66	VE	12,7	854	K	Hava		23	1440	80,0	99,8
E	66	VE	12,7	854	K	Hava		23	1440	80,0	97,8
E	66	VE	12,7	854	K	Hava		23	1440	80,0	100,7
Referans: [25]											
E	75	VE+PE	12,4	702	S	Göz.su	12,8	22	2160	30,0	84,8
E	75	VE+PE	12,4	634	S	Göz.su	12,8	22	2160	30,0	85,6
AR	75	VE+PE	9,3	617	S	Göz.su	12,8	22	3360	30,0	101,2
AR	75	VE+PE	9,3	617	S	Beton	10,5	22	3360	30,0	100,6
AR	75	PE	9,3	650	S	Göz.su	12,8	22	3360	30,0	95,1
AR	75	PE	9,3	650	S	Beton	10,5	22	3360	30,0	101,5
E	75	VE	12,4	612	S	Göz.su	12,8	22	2160	30,0	96,0
AR	75	VE	9,3	532	S	Göz.su	12,8	22	3360	30,0	101,0
E	75	VE	9,3	958	S	Göz.su	12,8	22	3360	30,0	83,3
AR	75	VE	9,3	532	S	Beton	10,5	22	3360	30,0	98,8
E	75	VE	9,3	958	S	Beton	10,5	22	3360	30,0	83,9
E	68	V-PET	12,0	693	N	Alkali	12,1	22	720	30,0	94,0
E	68	V-PET	12,0	693	N	Alkali	13,1	22	720	30,0	94,0
E	68	V-PET	12,0	693	N	Alkali	12,1	22	720	60,0	100,0
E	68	V-PET	12,0	693	N	Alkali	13,1	22	720	60,0	78,0
Referans: [26]											
E	73	VE	12.7	639		DI su	7.0	63	2496	29.0	73,0
E	73	VE	12.7	639		DI su	7.0	62	2496	21,0	89,0
E	73	VE	12.7	639		DI su	7.0	61	2496	20,0	76,0
E	73	VE	12.7	639		DI su	7.0	60	2496	20,0	82,0
E	73	VE	12.7	639		DI su	7.0	60	2496	20,0	85,0
E	73	VE	12.7	639		DI su	7.0	60	2496	27,0	79,0
E	73	VE	12.7	639		DI su	7.0	57	2496	23,0	93,0
E	73	VE	12.7	639		DI su	7.0	56	2496	20,0	98,0
E	73	VE	12.7	639		Alkali	12.9	62	2496	21.0	75,0
E	73	VE	12.7	639		Alkali	12.9	61	2496	18,0	81,0
E	73	VE	12.7	639		Alkali	12.9	61	2496	20,0	85,0
E	73	VE	12.7	639		Alkali	12.9	51	2496	24,0	84,0
E	73	VE	12.7	639		Alkali	12.9	49	2496	22,0	86,0
E	73	VE	12.7	639		Alkali	12.9	46	2496	20,0	87,0
E	73	VE	12.7	639		Alkali	12.9	45	2496	24,0	82,0
Referans: [27]											
E	75	VE	9,5	658	K	DI su	7,0	23	10.000	25,0	92,7
E	75	VE	9,5	658	K	DI su	7,0	23	10.000	38,0	96,2
E	75	VE	9,5	658	K	Alkali	12,8	23	10.000	29,0	84,4
E	75	VE	9,5	658	K	Alkali	12,8	23	10.000	38,0	65,1
Referans: [28]											
E	75	VE	16	580	K	DI su	7,0	58	720	25,0	96,0
E	75	VE	16	580	K	DI su	7,0	60	1440	25,0	90,0
E	75	VE	9,5	580	K	DI su	7,0	72	1440	25,0	96,0
E	75	VE	12,7	580	K	DI su	7,0	60	2880	25,0	85,0
E	75	VE	9,5	580	K	DI su	7,0	23	10.008	25,0	92,7
E	75	VE	16	580	K	Alkali	12,8	55	720	25,0	98,00
E	75	VE	16	580	K	Alkali	12,8	61	1140	25,0	84,00
E	75	VE	9,5	580	K	Alkali	12,8	64	1440	25,0	88,00
E	75	VE	12,7	580	K	Alkali	12,8	57	2880	25,0	83,00
E	75	VE	9,5	580	K	Alkali	12,8	23	10.008	25,0	84,40

Tablo 3.3: (devam) Olumsuz çevreye maruz kalan ve uygulanan sürekli gerilme ile FRP veri tabanı.

Referans: [29]											
E	65.5	VE	12.7	854	K	Beton		23	1440	80,0	99,1
E	65.5	VE	12.7	854	K	Beton		23	2880	80,0	99,4
E	65.5	VE	12.7	854	K	Beton		23	4320	80,0	97,9
E	65.5	VE	12.7	854	K	Beton		23	5760	80,0	94,8
E	65.5	VE	12.7	854	K	Beton		40	1440	80,0	99,2
E	65.5	VE	12.7	854	K	Beton		40	2880	80,0	97,4
E	65.5	VE	12.7	854	K	Beton		40	4320	80,0	96,4
E	65.5	VE	12.7	854	K	Beton		40	5760	80,0	91,8
E	65.5	VE	12.7	854	K	Beton		50	1440	80,0	98,1
E	65.5	VE	12.7	854	K	Beton		50	2880	80,0	98,0
E	65.5	VE	12.7	854	K	Beton		50	4320	80,0	94,6
E	65.5	VE	12.7	854	K	Beton		50	5760	80,0	89,9
Referans: [30]											
E	45	UM-VE	12,7	606	K	Tuz	7,0	25	2160	38,0	77,4
E	45	UM-VE	12,7	609	N	Tuz	7,0	25	2160	31,0	88,6
E	45	UM-VE	12,7	606	K	Tuz	7,0	25	5760	27,0	77,1
E	45	UM-VE	12,7	606	K	Tuz	7,0	25	8640	19,0	80,7
E	45	UM-VE	12,7	609	N	Tuz	7,0	25	4320	27,0	86,6
E	45	UM-VE	12,7	609	N	Tuz	7,0	25	7200	32,0	74,8
E	45	UM-VE	12,7	606	K	Tuz+Dç	7,0	- 18/21	2160	22,0	96,7
E	45	UM-VE	12,7	606	K	Tuz+Dç	7,0	- 18/21	4320	30,0	86,4
E	45	UM-VE	12,7	606	K	Tuz+Dç	7,0	- 18/21	8640	30,0	96,8
E	45	UM-VE	12,7	606	K	Tuz+Dç	7,0	- 18/21	8640	35,0	74,4
E	45	UM-VE	12,7	606	K	Alkali	13,0	23	4320	37,0	50,8
E	45	UM-VE	12,7	606	K	Alkali	13,0	23	5760	25,0	60,5
E	45	UM-VE	12,7	609	N	Alkali	13,0	23	4320	30,0	89,7
E	45	UM-VE	12,7	609	N	Alkali	13,0	23	5760	25,0	85,8
E	45	UM-VE	12,7	606	K	Alkali	13,0	23	8640	24,0	58,1
E	45	UM-VE	12,7	606	K	Alkali	13,0	23	8640	15,0	83,4
E	45	UM-VE	12,7	606	K	Alk+Dç	13,0	23	4320	33,0	53,3
E	45	UM-VE	12,7	606	K	Alk+Dç	13,0	23	5760	39,0	29,0
E	45	UM-VE	12,7	606	K	Alk+Dç	13,0	23	8640	30,0	40,7
E	45	UM-VE	12,7	606	K	Alk+Dç	13,0	23	8640	49,0	17,9

[nervürlü (N),kum kaplı (K), sarmal sarılı (S), oluklu (O) veya bunların bir kombinasyonu. Kullanılan matrisler vinilester (VE), polyester (PE), üretan modifiye vinilester (UM-VE), karışık vinilester ve polietilen tereftalat (V-PET) veya karışık vinilester ve polyester (VE + PE). 6 çubuk alkali dirençli (AR) cam elyaflardan yapılmış, geriye kalan çubuklar ise E-cam (E) elyaftan yapılmıştır. sürekli stres oranı σS/σfu,, lif hacim fraksiyonu vf, çap / ve koşulsuz çekme dayanımı σfu frekans dağılımı. Her bir örnek için Tablo .3.1'de eş zamanlı çevresel ve sürekli stres maruziyetinin süresi (süresi) ve koşullandırılmış rf değerinin dayanım ile karşılık gelen rfu değeri arasındaki oran olarak tanımlanan rezidüel kuvvet oranı, rf / rfu da bildirilmiştir.]

Chen Yi ve ark. tarafından beton yapılarda, cam elyaf takviyeli polimer GFRP donatılarının uzun süreli davranışlarını hızlandırılmış yaşlanma testlerinden elde edilen kısa vadeli verilere dayanarak tahmin etmek için Arrhenius ilişkisine dayanan bir prosedür ile sunulmaktadır. GFRP takviye donatıları 20, 40 ve 60°C'de beton boşluk suyuna benzer çözeltilere maruz bırakılmıştır. Maruziyet öncesi ve sonrasında belirlenen donatıların çekme dayanımları, numunelerin dayanıklılık performansının bir ölçütü olarak kabul edilmiştir.

Örneklerin çekme dayanımları, maruziyet öncesi ve sonrasında ölçülmüştür, çünkü çekme dayanım değerlerindeki değişiklikler, dayanıklılık performansının göstergeleri olarak güvenilir bir şekilde kullanılabilir. Çekme testi, bazı modifikasyonlarla ASTM D 3916-94'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Örneklerin toplam uzunluğu 1,02 metredir. Bu çalışmada kullanılan uç kavrama, iki yarısına uzunlamasına 200 mm uzunluğunda bir çelik boru kesimi olmuştur. İç yüzeyi epoksi ile kaplandıktan sonra, bölünmüş borular çubuğun her bir ucuna yapıştırılmıştır. Test numunelerinin uzunluk/çap oranı 64'dür. Testler bir Baldwin makinesinde gerçekleştirilmiştir ve yükleme süresi her bir örnek için 2 ila 4 dakika olmuştur.

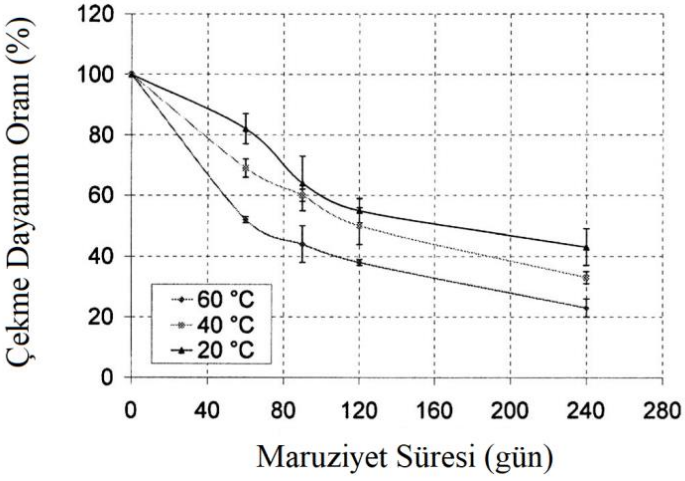
Beton gözenek suyunun pH aralığı değişmekte olduğundan normal beton ve yüksek performanslı beton gözenek sularına benzetilmek amaçlı 2 çeşit alkali çözelti kullanılmıştır. Bu çözeltilerin bileşimi Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.4: Beton gözenek suyuna benzetilmiş çözeltinin bileşimi [31]

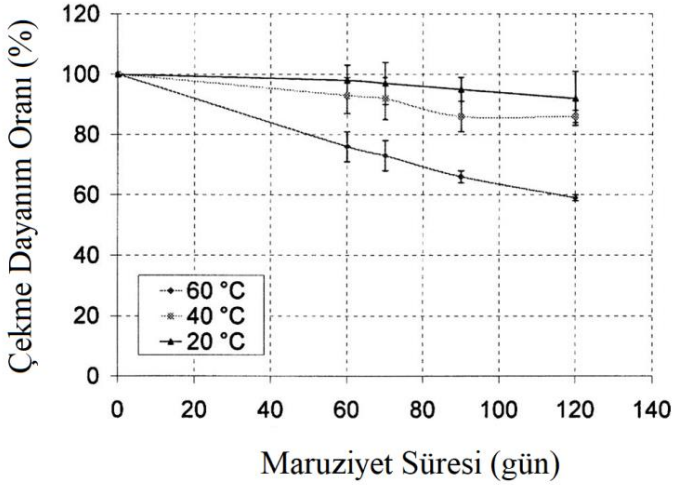
Solüsyon türü	NaOH (g/L)	KOH (g/L)	$Ca(OH)_2$ (g/L)
1	2,4	19,6	2,0
2	0,6	1,4	0,037

PH değeri yaklaşık 13.6 olan solüsyon 1, normal beton gözenek çözeltisini benzetilmeyi amaçlanmıştır. Solüsyon l'e kıyasla farklı oranlarda hidroksitler içeren ve pH değeri yaklaşık 12.7 olan Solüsyon 2, yüksek performanslı betonun gözenek çözeltisini benzetilmek için yapılmıştır. Örnekler üzerinde alkali çözeltilerin saldırısını hızlandırmak için 40 ve 60°C'lik yükseltilmiş sıcaklıklar benimsenmiştir. Bu sıcaklıklar seçilen GFRP donatılarının cam geçiş sıcaklığının çok altındaydı. Sıcaklık kontrollü tanklar, 40 ve 60°C sıcaklıklarda çözeltilere maruz kalan örnekler için özel olarak tasarlanmıştır. Örneklerin oda sıcaklığında solüsyonlara maruz kalması için (yaklaşık 20°C), polipropilen ağır duvar tankları kullanıldı. Önerilen öngörü prosedürünü geliştirmek ve doğrulamak için açıklayıcı amaç için GFRP1 donatıları, Solüsyon 1'e ve GFRP 2 donatıları Solüsyon 2'ye daldırılmıştır. Belirli bir tipteki GFRP donatılarının belirli bir çözelti tipine daldırılmasının gerekçesi, Chen ve arkadaşları tarafından GFRP donatılarının etkileşimleri ve çeşitli benzetilmiş çözümler üzerinde yapılan kapsamlı bir çalışmanın önceki bulgularına dayanmaktadır. Bu çalışmada, dayanıklılık açısından GFRP 2 donatılarının GFRP 1 donatılarından daha iyi performans gösterdiği ve GFRP

donatılarıyla reaktivitesi açısından solüsyon 2'nin, solüsyon 1'den daha az agresif olduğu gözlenmiştir. Mevcut çalışmanın amacı, GFRP donatılarının dayanıklılığını değerlendirmek için bir prosedür geliştirmek olduğundan, GFRP donatılarının ve solüsyonlarının bir fiber-reçine sistemi arasındaki reaktivite açısından en az iki farklı koşulla prosedürün geçerliliğini doğrulamak gerekir. Her bir maruziyetten sonra, genellikle üç ila altı GFRP donatıları çözeltilerden çıkarıldı ve temel örneklere kıyasla çekme dayanımlarını ölçmek için test yapıldı. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.1: GFRP1 numunelerinin Solüsyon 1 çözeltisindeki sıcaklığa ve süreye bağlı çekme dayanım oranı değişimi [31]



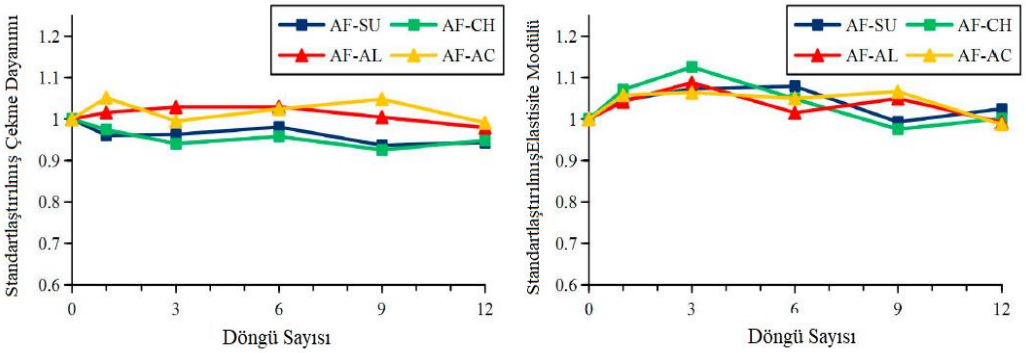
Şekil 3.2: GFRP2 numunelerinin Solüsyon 2 çözeltisindeki sıcaklığa ve süreye bağlı çekme dayanım oranı değişimi [31]

Alkali çözeltilerdeki sıcaklık veya zamanla değişmeyen GFRP donatıları için baskın bir bozulma mekanizması vardır. Yüksek sıcaklık, alkali çözeltilerdeki GFRP donatılarının bozulmasını hızlandırmak için kullanılabilir. Ayrıca, bozulma hızının sıcaklık bağımlılığı Arrhenius denklemiyle açıklanabilir. Bu çalışmada sunulan yöntem, FRP kompozitlerinin dayanıklılık performansını değerlendirmek için kullanılabilirken, bu prosedürdeki Arrhenius analizi, yüksek sıcaklıklar kullanılarak hızlandırılmış testin geçerliliğini belirlemek için kullanılabilir. Bu çalışmanın ana eğrilerinden GFRP1 donatıların çekme dayanımları, 20°C'de Çözelti 1'de sadece yarım yıllık bir maruziyetin ardından % 50'ye ve 20°C'de Çözelti 2'ye maruz kalan GFRP2 donatıları için çekme dayanımı yaklaşık 3 yıl sonra % 50'ye düşmektedir. Ancak yakın tarihli bir çalışmada, saha beton yapılarında GFRP donatıları için daha az bozulma bulunmuştur. Bu çalışmada, çıplak GFRP örneklerinin doğrudan alkali çözeltilere maruz kalması nedeniyle, rapor edilen kısa süreli sonuçlar ve beklenen çekme dayanımı ölçülü olarak kabul edilmelidir [31].

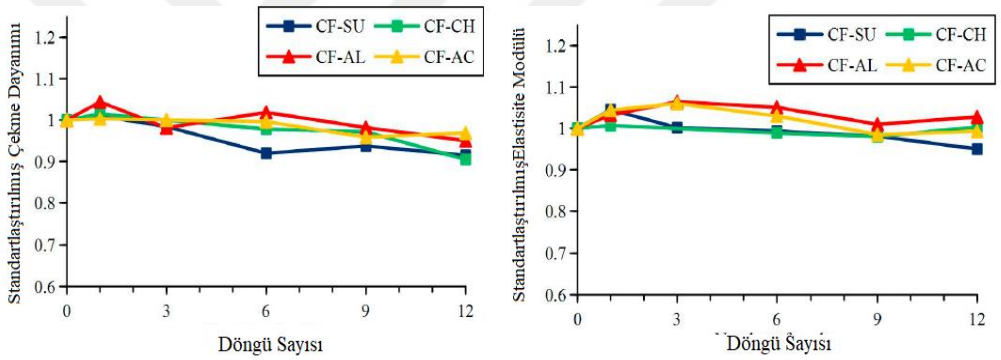
Fen-Tao Liu ve arkadaşları tarafından çeşitli çözeltilerdeki FRP tabakalarının ıslak-kuru döngüler altında dayanıklılığı üzerine deneysel çalışma yapılmıştır. Kıyı yapılarına dıştan bağlı FRP sistemleri muhtemelen, FRP kompozitleri üzerindeki genel hidrotermal etkilere katkıda bulunan sülfat ve klorür iyonlarıyla dolu deniz suyuna maruz kalmaktadır. FRP kompozitleri, birçok yolla alkali ortamla temas edebilir. Alkali ortamın lif içerisine girmesi, sadece lifin bütünlüğünü etkilemekle kalmaz, aynı zamanda elyafı daha fazla bozulmaya maruz bırakan yüzey çukuruna, hidrolize ve süzmeye neden olabilir. Asit kirliliğinin olduğu bölgelerde ise asidik ortam, dıştan bağlanmış FRP sistemlerine zarar verebilir. Çeşitli çözeltilere sürekli daldırılmasından farklı olarak, çeşitli çözeltilerdeki ıslak-kuru döngülere maruz kalan FRP kompozitleri süreksiz nem difüzyonu yaşayabilirler. Islak-kuru döngülerinin ve kimyasal saldırıların birleşmiş etkisi, FRP kompozitlerinin uzun vadeli performansını belirli bir dereceye kadar kaçınılmaz olarak etkiler. Bu deneyde, sülfat, klorür, alkali ve asit çözeltilerinde ıslak-kuru döngüler dahil olmak üzere dört çeşit ıslak-kuru çevrimini dikkate alınmıştır. Her ıslak-kuru devir, 15 gün sürekli çözelti içine daldırılmış vaziyette ve 15 gün sürekli hava (kuru) koşullarında laboratuvar sıcaklığı ve nemi altında test edilmiştir.

Deneyde ıslak kuru sülfat çözeltisine (SU), klorid çözeltisine(CH),alkali çözeltiye (AL) ve asit çözeltisine(AC) 15 gün daldırılıp 15 gün kurutularak döngü elde ediliyor.

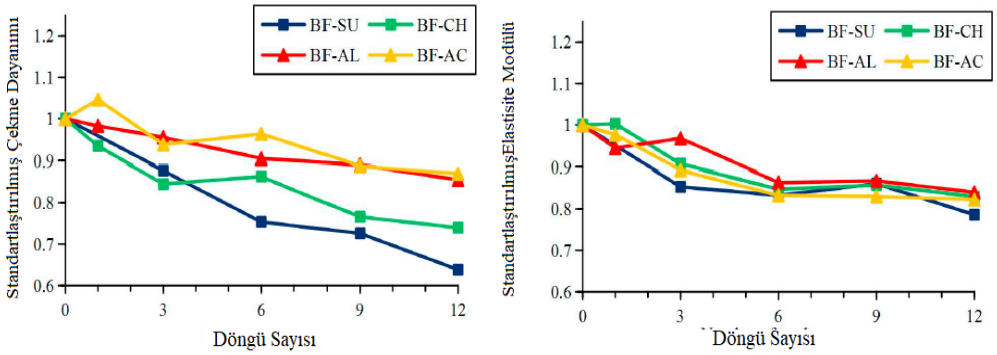
Deneyde 1,3,6,9,12 döngü esas alınmıştır ve deneyde AFRP(AF),CFRP(CF),BFRP(BF) kullanılmıştır [32]. Elde edilen sonuçlar kısaca Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de özetlenmiştir.



Şekil 3.3: AFRP'nin çekme dayanımı- elastisite modülünün döngü sayısına göre değişimi [32].



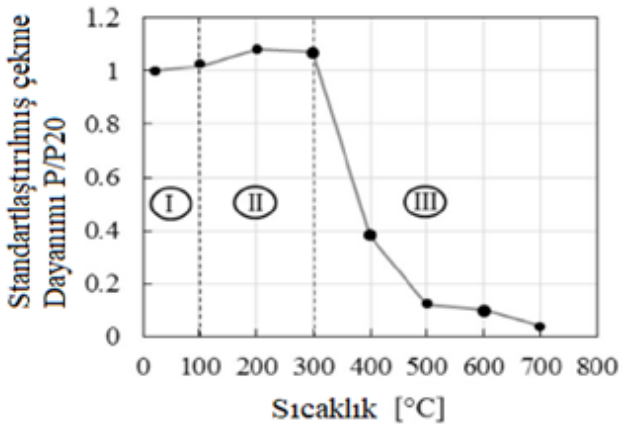
Şekil 3.4: CFRP'nin çekme dayanımı- elastisite modülünün döngü sayısına göre değişimi [32].



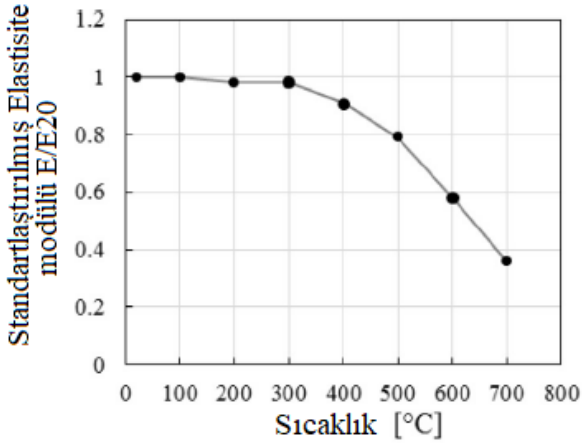
Şekil 3.5: BFRP'nin çekme dayanımı- elastisite modülünün döngü sayısına göre değişimi [32].

F. Micelli ve arkadaşları tarafından beton yapılar için FRP donatılarının durabiliteleriyle alakalı genel bir çalışma yapılmıştır. FRP numuneleri, beton gözenek suyuna benzetilmiş alkali çözeltiye ve donma-çözülme, yüksek bağıl nem, yüksek sıcaklık ve ultraviyole (UV) radyasyonları gibi olumsuz çevrelere maruz bırakıldı. Tutulan özellikleri ölçmek, hasar ve güç azaltma nedenlerini gözlemlemek için mekanik ve fiziksel testler yapıldı. Deneysel veriler, reçine özelliklerinin FRP takviyesinin dayanıklılığını güçlü bir şekilde etkileyebildiğini gösterdi. GFRP donatılarda reçineler liflere yeterli koruma sağlamadığında alkali saldırıya karşı hassas olduğu gözlemlenmiştir [33].

S. Spagnuolo ve arkadaşları tarafından yüksek sıcaklıklara maruz kalan cam FRP donatılarının kalıcı davranışı araştırılmıştır. Yapılan bu araştırmanın amacı, 100 ila 700°C arasında değişen farklı sıcaklıklara maruz kalan GFRP donatılarının kalıcılık davranışlarının deneysel olarak değerlendirilmesidir. Özellikle, 14 mm nominal çaplı E-CR Cam FRP çubukları üzerinde çekme deneyleri, yüksek sıcaklıkta maruz kaldıktan sonra malzeme kalıcılık özelliklerinin bozulmasını tanımlamak için termal işlemden sonra gerçekleştirilmiştir. Young'ın modülü ve çekme dayanımında azalma kaydedilmiştir. Deney sonuçları Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de ifade edilmiştir [34].



Şekil 3.6: Standartlaştırılmış çekme dayanımı 1.bölge referans oda sıcaklığı (20˚C) ve cam geçiş sıcaklığının arasını ,2.bölge reçinedeki kıvam artışının olduğu 100 ˚C ve 300 ˚C arasını, 3.bölge ise ani düşüşlerin olduğu 300˚C-700 ˚C arasını kapsamaktadır [34].



Şekil 3.7: Standartlaştırılmış elastisite modülü [34].

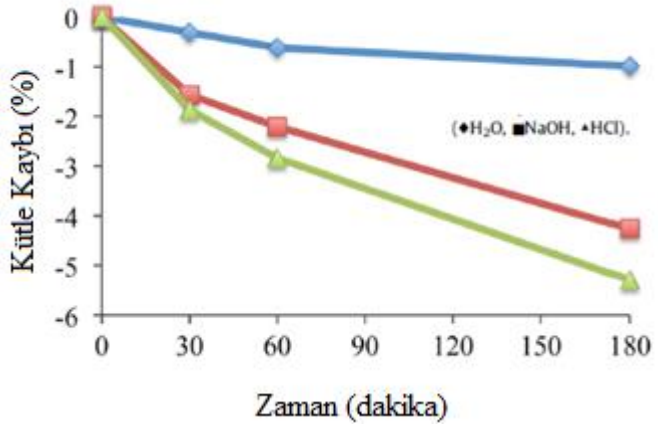
Saleh Alsayed ve arkadaşları tarafından cam elyaf takviyeli polimer donatıların yüksek sıcaklıklarda performansı araştırılmıştır. Cam elyafı ile güçlendirilmiş polimer (GFRP) çubukların, farklı süreler için yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra kalıcı çekme gerilmesi özelliklerini incelenmektedir. Bu çalışmada toplam 120 GFRP örneği test edilmiştir. Numunelerin yarısı betonla kaplanırken, diğer yarısı yalın halde bırakılmıştır. Örnekler üç farklı süre boyunca (1, 2 ve 3 saat) üç farklı kontrol sıcaklığında (100, 200 ve 300 C) teste tabi tutulmuştur. Yapılan çalışmada E-camı ve matris olarak vinilester kullanılmıştır. Beton ile çubuklar arasındaki bağ ve kuvvet transferini arttırmak için 12 mm çapında özel yüzey profiline (nervürlü yüzeye) sahip donatılar kullanılmıştır. Donatılar, %83'lük bir lif içeriğine sahiptir. Deney sonucunda çekme modülünde neredeyse değişiklik kaydedilmemiştir. Ancak çekme dayanımında sıcaklıkla orantılı olarak kayıplar oluşmuştur. Beton kaplamalı donatılar, kaplaması olmayan emsallerine göre daha yüksek kalıcı çekme dayanımı göstermiştir. Beton kaplama en düşük sıcaklık seviyesinde (100˚C) ve en kısa sürede (1 saat) daha etkiliydi. Yüksek sıcaklığın GFRP çubuklarının bozunma mekanizması üzerindeki etkisini araştırmak için Taramalı Elektronik Mikroskopi (SEM) tekniği de kullanılmıştır. Sonuçlar (Tablo 3.3), sıcaklık seviyesinin arttırılmasının, cam elyafları çevreleyen reçine matrisini etkilediğini ve dolayısıyla elyaflar ve matris arasındaki bağın etkilediğini göstermiştir [35].

Tablo 3.3: Donatıların çekme dayanım kayıpları [35].

Sıcaklık Seviyesi (˚C)	Maruziyet süresi (saat)	Çekme Dayanımı Kaybı (%)	
		Betonla Kaplanan Donatılar	Yalın Halde Bulunan donatılar
100	1	3,1	9,7
	2	7,9	16,0
	3	11,3	21,3
200	1	12,3	19,8
	2	16,8	23,3
	3	20,8	29,2
300	1	16,8	21,8
	2	25,2	30,2
	3	35,1	41,9

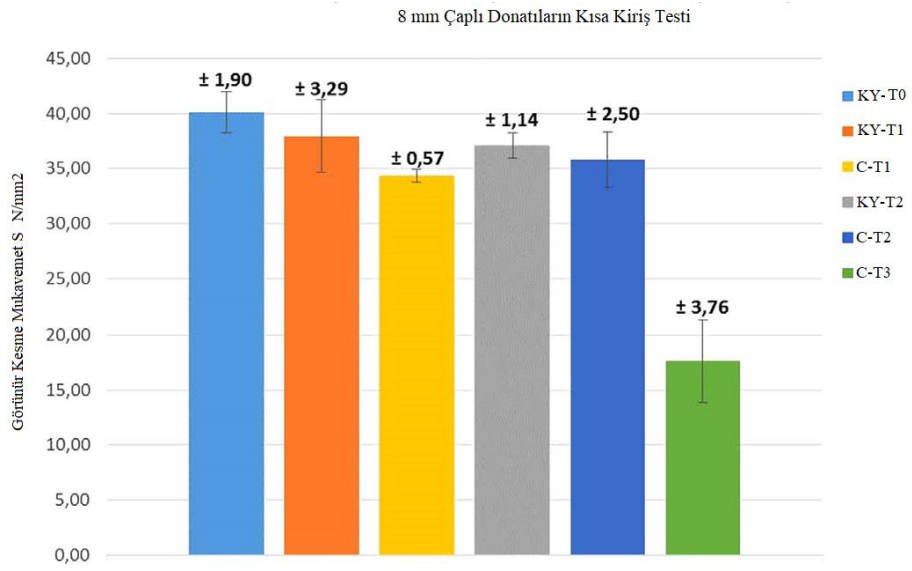
Bazalt lifleri E-cam elyaflara göre daha iyi bir çekme dayanımına, karbon liflerinden daha fazla bozulma suşuna ve kimyasal saldırıya, darbe yüküne ve daha az zehirli dumanla yangına karşı daha iyi bir dirence sahip gibi görünmektedir. Bu nedenle Enrico Quagliarini ve arkadaşları tarafından bazalt elyaf halatlar ve çubukların bina mühendisliğinde kullanımları için dayanıklılıkları test edilmiştir.

Bazalt halatların farklı kimyasal ortamlardaki kimyasal dayanıklılığını değerlendirmek için, bazalt halatlar, sırasıyla 3 saat boyunca distile su, 2M NaOH ve 2 M HCI içerisinde ayrı olarak kaynatılmıştır. Her deney üç örnek üzerinde gerçekleştirilmiştir. İşlemden önce tüm liflerin elyaf yüzeyinin temizlenmesi için lifler aseton kullanılarak yıkanmıştır. Muamele edilen numunelerin, Quagliarini ve arkadaşları tarafından önerilen bir çekme testi-test protokolü ile karakterize edilmeleri gerektiği dikkate alınarak toplam uzunluğu 700 mm olan preparatlar hazırlandı. İşlemden sonra, filamanlar 24 saat boyunca damıtılmış suya batırılmış, kalıntı kimyasallar yumuşak bir şekilde uzaklaştırılmıştır. İşlemden önce ve sonra, örnekler 12 saat süreyle 105°C'deki bir fırında sabit ağırlığa kadar kurutuldu. İşlemden sonra liflerin kütle kayıpları, 0.001 g hassasiyetle bir elektronik analitik terazi kullanılarak incelenmiştir. İlk durum elyaf kütlesini m_0 varsayarsak ve işlenmiş halindeki liflerin kütlesine m_1 denilirse, kütle kaybı oranı $(m_0-m_1)*100/m_0$ formülüyle hesaplandı. Testin sonuçları Şekil 3.8'de gösterilmiştir.

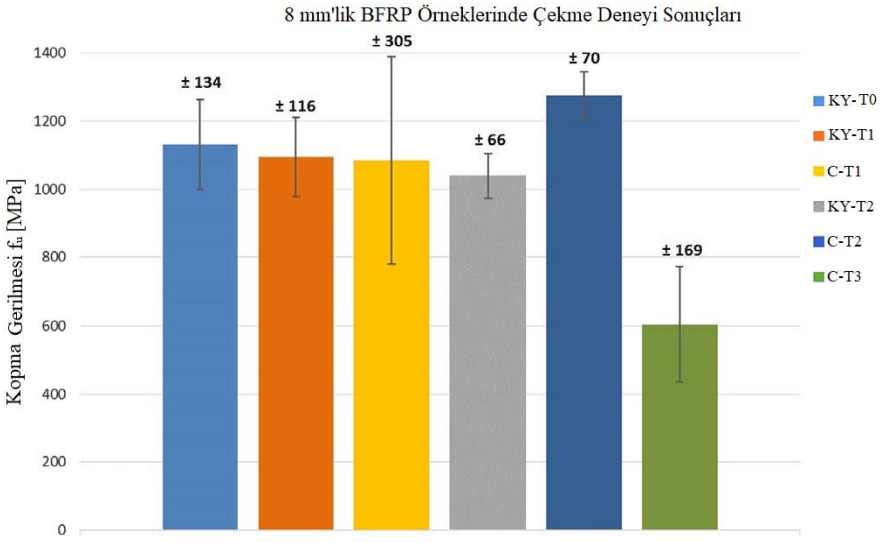


Şekil 3.8: Farklı kimyasallarda kaynayan bazalt halatların kütle kayıpları [36]

BFRP donatılarda nemi ve rutubeti benzetmek için musluk suyu kullanılmıştır. Deniz suyunu temsil etmek için %3 NaCl ile çözelti hazırlanmıştır. Beton gözenek suyuna benzetilmek için ağırlıkça %1.4 KOH, %1 NaOH, ve %0.16 $Ca(OH)_2$ 'den oluşan, yüksek pH'lı (pH=13) olan alkali solüsyonu hazırlandı. Maruz kalma etkilerini hızlandırmak için 21 gün boyunca 60°C'lik bir sıcaklık seçildi. Bu sıcaklıkta, alkali daldırma süresi ile alan maruziyeti arasındaki ilişki doğrusal olarak kabul edilir ve 21 günlük bir maruziyet gerçek bir beton yapı içinde 14 yıla karşılık geleceği kabul edilmiştir. Her deney üç örnek üzerinde gerçekleştirilmiştir. İşlemden önce donatılar asetonla yıkandılar ve işlemden sonra 24 saatliğine donatılar distil suya batırılarak kalıntı kimyasallardan yumuşak bir şekilde uzaklaştırılmıştır. İşlemden önce ve sonra, numuneler, 12 saat boyunca 105°C'de bir fırında kurutuldu. İşlemden sonra örneklerin kütle kayıpları incelenmiştir. Özellikle alkali şartlarda dayanıklılığı arttırmak için çaba harcayan BFRP donatılarına bir polimetil metakrilat (PMMA) kaplaması uygulanmış ve yaşlandırma testleri daha önce tarif edilen prosedür kullanılarak kaplanmış donatılar üzerinde tekrarlanmıştır. Kaplama için, tetrahidrofuran (THF) içinde ağırlıkça % 5'lik bir PMMA çözeltisi hazırlanmış ve kaplama, 20 μm'lik bir kalınlık elde etmek için bir daldırma kaplama tekniği kullanılarak uygulanmıştır. Yapılan deneyin sonuçları Şekil 3.9'da ve şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.9: BFRP donatı örneklerinde görünür kesme dayanımı. KY: kaplama yok, C: PMMA kaplama, T0: şartlama yok, T1: musluk suyu, T2 NaCl (%3) çözelti, T3 Alkali Çözelti [36]



Şekil 3.10: BFRP donatı örneklerinde görünür çekme dayanımı. KY: kaplama yok, C: PMA kaplama, T0: şartlama yok, T1: musluk suyu, T2 NaCl (%3) çözelti, T3 Alkali Çözelti [36]

Abdel-Hamid ve arkadaşları tarafından fiber takviyeli polimer (FRP) malzemelerinin deniz suyu ve sıcak ortamdaki dayanıklılığı üzerine bir çalışma sunulmaktadır. Çalışmanın temel amacı, deniz suyu ve sıcaklığının cam/epoksi ve cam/poliüretan kompozit malzemelerin yapısal özelliklerine etkisini değerlendirmektir. Bu etkiler deniz suyu emilimi, tuz ve kirletici maddelerin nüfuzu, ara yüzde kimyasal ve fiziksel bağlar, mekanik özelliklerde bozulma ve bozulma mekanizmaları açısından incelenmiştir. Test parametreleri, 3 ay ila 1 yıl arasında değişen daldırma süresi ve oda sıcaklığı ile 65°C

arasındaki sıcaklığı içerir. Daldırma süresi ve sıcaklık ile deniz suyu emiliminin arttığı gözlemlenmiştir. Her iki kompozitte matris, liflerin deniz suyundaki korozif elemanlardan korunmasında etkiliydi; bununla birlikte nem, stres, gevşeme, şişme, mekanik yapışma ve ara yüzdeki fiber ve matris arasındaki kimyasal bağların parçalanması gibi ikili bir mekanizma yaratır. Yüksek sıcaklığın cam/poliüretan kompozitdeki bozulma mekanizmasını hızlandırdığı gözlenmiştir. Cam/epoksi ve cam/poliüretan kompozitlerin modül dayanımında önemli değişiklikler gözlenmemiştir. Bununla birlikte, cam/poliüretan kompozitin çekme dayanımları oda sıcaklığında deniz suyuna 1 yıl maruz kaldıktan sonra % 19 ve 65°C'de 1 yıl maruz kaldıktan sonra %31 azalmıştır. Nem emilimine bağlı plastikleşme, matriste sünek bozulmaya yol açmıştır [37].

Kootsookos A. ve arkadaşları tarafından deniz suyuna daldırma işleminin cam ve karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin dayanıklılığı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. İncelenen materyaller, deniz yapılarında kullanılan cam/polyester, karbon/polyester, cam/vinilester ve karbon/vinilester kompozitleriydi. İki yıl boyunca 30°C sıcaklıkta deniz suyuna daldırıldığında, kompozitler önemli nem emilimine maruz kalmış ve reçine matrisinin ve fiber/matris interfaz bölgesinin kimyasal bozulmasına maruz kalmıştır. Bu, mod I interlaminar kırılma tokluğunun, sadece daldırma yoluyla sıra dışı olarak etkilenmesine rağmen, esneme modülü ve kompozitlerin kuvvetini bozmuştur [38].

Jikai Zhou ve arkadaşları tarafından beton içerisine gömülmüş GFRP donatıların ve çelik donatının asidik ortamdaki durabiliteleri araştırılmıştır. Örnekler farklı konsantrasyonlarda asit çözeltilerine batırılarak korozyona maruz bırakıldı. Farklı ortamın GFRP ve çelik çubukların betona aderans dayanımı üzerindeki etkisini incelemek için yüz yirmi örnek kullanıldı. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki GFRP numuneleri musluk suyunda ve pH'ı 2,3 ve 4 olan çevresel şartlarda maruziyet süresinin 75. günü sonunda maksimum aderans dayanımındaki kaybı sırasıyla %11, %22, %17.2, %14 olarak bulunmuştur. Çelik donatıda ise pH'ı 2 ve 3 olan çevresel şartlardaki maksimum aderans dayanımındaki kayıplar sırayla % 19,6 ve % 12,3'tür. Deney sonuçlarının böyle olmasının sebebinin çekme deney yapılırken oluşan kaymalardan olduğu düşünülmektedir [39].

FRP donatılarla yapılan durabilite deneylerinde ortam koşulu olarak deniz suyu, asit, alkali, nem, UV ve sıcaklık koşullarından bir ya da birkaçı kullanılmıştır. FRP olarak en çok tercih edilen maliyeti sebebiyle GFRP'dir. GFRP dışında deneylerde karbon ve bazalt FRP'ler kullanılmıştır. Deneylerde karşılaştırma yapmak için farklı süreler, farklı sıcaklıklar, ıslak kuru döngüler gibi yöntemler dikkate alınmış ya da malzemenin matrisini veya lif çeşidini değiştirerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Deneylerin çoğunda beton içerisine gömülmüş FRP donatılar kullanılmıştır. Bu deneysel çalışmada GFRP ve CFRP malzemenin dışında literatürde araştırması daha az olan AFRP donatılarda ortam koşullarına maruz bırakılmıştır. Ayrıca sıcaklıklar ve süreler sabit tutulup lif etkisini araştırılmıştır. Malzemeler ortam koşullarına yalın halde bırakılarak her yüzeyden ortam koşuluna maruz kalmıştır. Diğer deneylere oranla daha fazla ortam koşulu da bu çalışma için oluşturulmuştur (Sıcak hava, soğuk hava, alkali, nem, deniz suyu).

BÖLÜM 4. MATERYAL VE METOD

Çelik donatıya alternatif olarak görülen GFRP, AFRP ve CFRP donatıların birçok üstün özelliği olmasına rağmen çelik donatıya alternatif olabilmesi için gereken bazı özellikleri tartışmalıdır. Bu tezde durumun daha iyi anlaşılması için yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler tanıtılmış, deney düzenekleri, ekipmanlar ve test yöntemleri açıklanmıştır.

4.1. Malzeme Özellikleri

Tez çalışmasında kullanılan donatıların özellikleri, donatıların koşullandırılması için oluşturulan ortam koşulları ayrıca çekme deneyi için donatılara ankraj edilen başlıkların özellikleri bu bölümde verilmiştir.

4.1.1. Donatılar

Deneyde 4 çeşit donatı kullanılmıştır. Bunlar; AFRP donatı, CFRP donatı, GFRP donatı ve inşaat çeliğidir. Tüm donatıların çapı 10 mm ve uzunlukları 25 ± 1 cm'dir. FRP donatılar sarmal, inşaat çeliği ise nervürlüdür. FRP donatılar pultruzyon yöntemi ile üretilmiştir.

Donatılarda matris malzeme olarak epoksi, takviye malzeme olarak cam, aramid ve karbon kullanılmıştır. İlk olarak malzemelerin özgül ağırlıkları Arşimet Prensibine göre deneysel yöntem uygulanarak hesaplanmıştır (Şekil 4.2). Özgül ağırlık için her lif çeşidinden 3'er adet 10 cm uzunluğunda donatılar kesilerek tartılmıştır. Numunelerin içine konulduğu kap ayrıca tartılmıştır. Kap suyun içerisine atılarak tartılmıştır. Son olarak kabın içerisine numuneler atılarak suyun içerisindeki ağırlıklar tartılmıştır. Deneysel olarak hesaplanan özgül ağırlıklar Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1: Donatıların özgül ağırlığı

Donatı Çeşidi	Özgül Ağırlık
GFRP	2,08
AFRP	1,29
CFRP	1,68



Şekil 4.3: Özgül ağırlık deneyinde kullanılan donatıların boyutları



Şekil 4.2: Arşimet Düzeneği

Donatıdaki durabiliteyi etkileyecek en önemli unsurlardan biri de lif/matris oranıdır. Bu oranı belirleyebilmek için matris malzemenin buharlaşma derecesi göz önüne alınmıştır. 10 cm uzunluğunda çapı 10 mm olan cam, aramid, karbon donatı kesilmiştir (Şekil 4.1). Bu malzemeler tartılıp fırına konulmuştur. Sürekli artan sıcaklıkla 550˚C'ye kadar 1,5 saat boyunca malzemeler fırında bekletilmiştir. 1,5 saat sonra numuneler çıkartılmış ve tekrar tartılmıştır. Kütlede oluşan azalma uçan epoksiden kaynaklanmaktadır ve geriye kalan ise sadece lif ağırlığıdır. Tablo 4.2'de numunelerin fırınlanmadan önceki ve sonraki ağırlıkları verilmiştir.(A=aramid, G=cam, C=karbon)

Tablo 4.2: Numunelerin fırınlanmadan önceki ve sonraki ağırlıkları

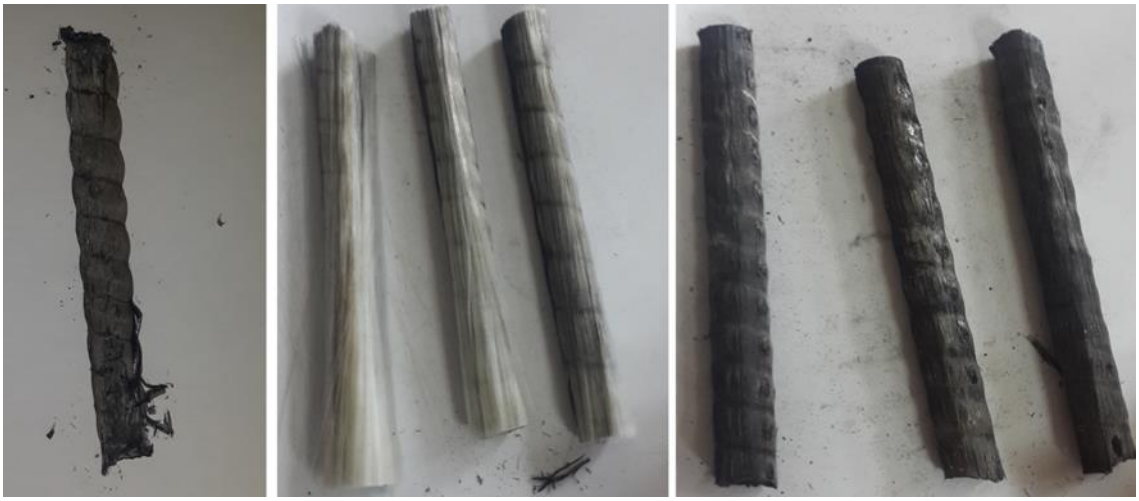
Malzeme	$m_{önce}$ (gr)	m_{son} (gr) (lif)	$m_{önce}$-m_{son} (gr) (matris)	Lif/matris oranı	Lif oranı (ort) %
A1	-	-	-	-	
A2	-	-	-	-	72.30
A3	-	-	-	-	
G1	14,86	10,70	4,16	2,57	
G2	14,54	10,80	3,74	2,89	72,60
G3	14,82	10,60	4,22	2,51	
C1	11,60	8,80	2,80	3,14	
C2	12,02	8,50	3,52	2,41	72,88
C3	12,07	8,70	3,23	2,69	

Lif oranı araştırılması yapılırken malzemelerin kısa süreli de olsa maruz bırakıldıkları yüksek sıcaklık ortamı, malzemelerin yüksek sıcaklık etkisindeki durumları hakkında da bize bilgi vermektedir.

Epoksi malzemesi belirli bir sıcaklıktan sonra uçmakta ve takviye malzemesi yalın halde kalmaktadır. Yapılarda meydana gelmesi muhtemel bir durum olan yangın veya yüksek sıcaklıklar sonucunda yalın halde bulunan malzemenin dayanımı önem arz etmektedir. Maruziyet sonunda görülmüştür ki aramid lifi yüksek sıcaklıklarda yanarak kül haline gelirken cam ve karbon lifleri dayanım göstermiştir (Şekil 4.3, Şekil 4.4). AFRP donatıların özgül ağırlıkları yapılan ayrı bir deney sonucunda bulunmuş olup Tablo 4.2'de ayrıca gösterilmemiştir.



Şekil 4.3: Numunelerin fırına girmeden önceki hali

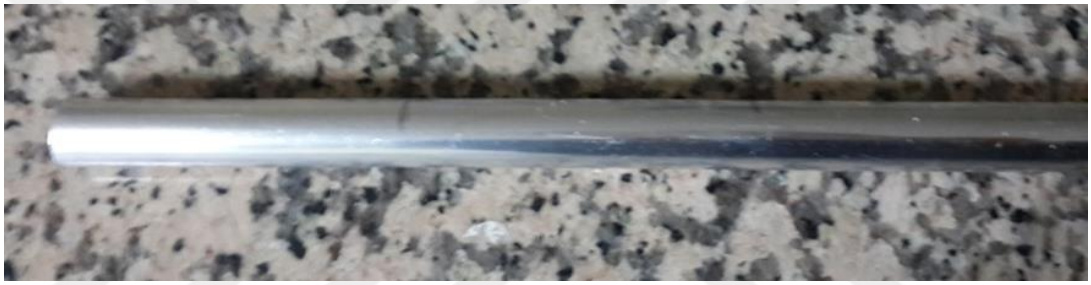


Şekil 4.4: Numunelerin fırına girdikten sonraki hali

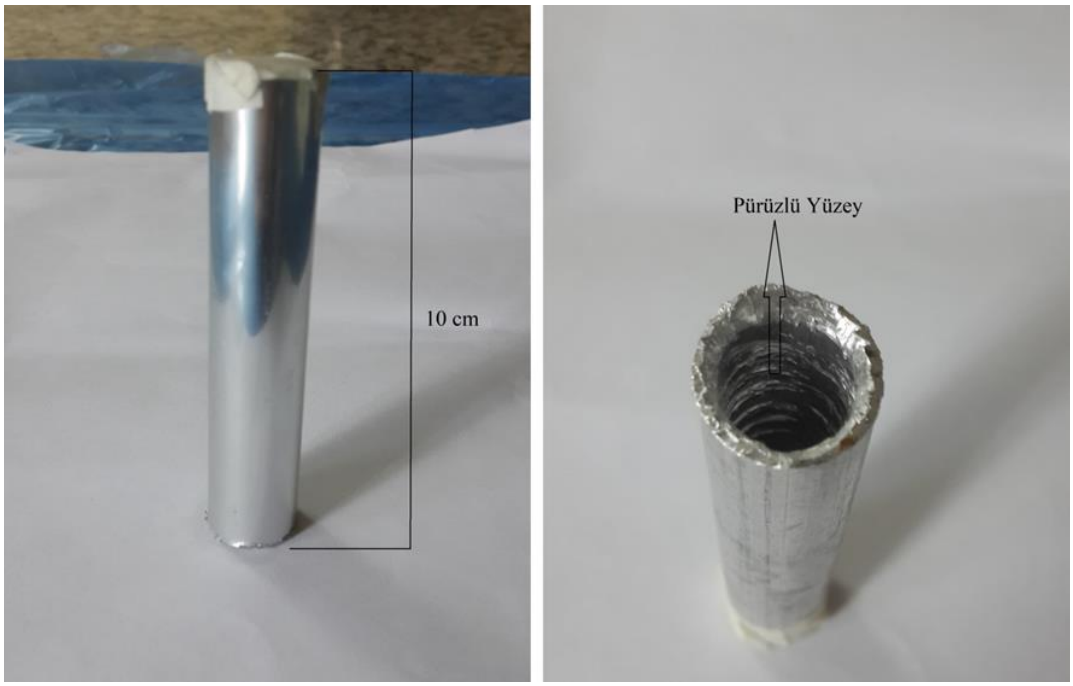
4.1.2. Donatı Başlığı

FRP donatılarda kullanılan lifler çekmeye karşı dayanıklıdır ancak basınca karşı dayanıklı değildir. Çekme deneyi yapılırken uçların kavranması basınca neden olduğu için FRP donatıların uçlarında ezilme meydana gelmektedir. Bu durumun önüne geçilmek amacıyla malzemenin uçlarına başlıklar yapılmaktadır.

Bu deneyde hem fiyatının uygun olması hem de istenilen özellikleri karşılamasından dolayı "Alüminyum" başlıklar kullanılmıştır (Şekil 4.5). Başlıklar alüminyum boruların 10'ar cm kesilmesi ile elde edilmiştir. Boruların et kalınlığı 1,09 mm dış çapı 13,20 mm olmaktadır. FRP donatılarla aderansını artırabilmek için boruların iç yüzeyleri pürüzlü hale getirmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.5: Deneyde kullanılan alüminyum boru



Şekil 4.6: Başlığın boyutları ve iç yüzeyi

4.1.3. Nem

Nem deneyi için kapalı bir kaba musluk suyu konularak deney gerçekleştirilmiştir. Sakarya'da musluk suyunun pH'ı Aralık 2018'e göre 7.5-8.5 arasındadır. Deneyin başlangıç tarihinde (13.12.2018) musluk suyundaki değerler Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Tablo 4.3: Aralık ayı musluk suyunun içeriği [40]

	TÜRK STANDARTLARI TS 266 2005 (mg/L)	Aralık Ayı Değerleri (mg/L)
Alüminyum	0,200	0,050
Demir	0,200	<0,001
Mangan	0,050	0,006
pH	6,5-9,5	8,33
T. Organik Karbon	-	2,92
Sülfat	250	16,46
Klorür	250	12,03
Amonyum	0,5	<0,50
Sodyum	200	9,14
Bulanıklık (NTU)	1	0,26
İletkenlik (µS/cm)	2500	251
Renk (birim)	20	<10
Koku		Normal
Tat		Normal

4.1.4. Deniz suyu

Kıyı yapılarının maruz kaldığı deniz suyunun FRP'lerde ve çelik donatılardaki etkilerinin incelenmesi için bir miktar deniz suyu Sakarya ilinin Karasu ilçesinden tedarik edilmiştir. Deniz suyunun içeriği ve pH'ı; hava olaylarına, çevre kirliliğine ve insani olaylar gibi etmenlere bağlı olarak değişim göstermektedir. Ancak Karadeniz'in tuzluluk oranının genel kabulü %18'dir.

Donatıları için bulundukların sıvılarının pH'ı önem arz etmektedir. Bu nedenle pH aralığını ölçmek için pH kağıtları kullanılmıştır. Ölçümler pH'ın 7-8 arasında olduğunu göstermiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7: Deniz suyunun ilk hali ve pH'ı

4.1.5. Alkali solüsyon

Donatılar genellikle beton içerisinde kullanılan malzemelerdir. Bu nedenle betonun içeriği önem arz etmektedir. Örnek verilirse beton içerisinde bulunan gözenek suyunun pH'ı 12-13,5 arasındadır. Bu bazik ortam çelik donatının korunmasını sağlar. FRP donatıların beton içerisinde kullanıldıklarında karşılaşacakları bu ortam karşısında oluşabilecek problemlerin gözlenmesi amacıyla beton gözenek suyuna benzetilmesi hedeflenmiştir. Bu hedef için Kanada Standardı olan CSA. S806-02 ve Amerika Standardı olan ASTM D7705/D7705M – 12 kullanılmıştır.

Standarda göre daldırma için kullanılan alkali solüsyon, betonda bulunan gözenek çözeltisi ile aynı bileşime sahip olacaktır. Bu bileşim 1 L su içinde tavsiye edilen alkalin çözeltisi bileşimi 118.5 g $Ca(OH)_2$, 0.9 g NaOH ve 4.2 g KOH'dir. Çözelti hazırlanır hazırlanmaz pH kağıdı ile pH'ı 12-13 pH arasında ölçülmüştür (Şekil 4.8). Alkalin çözeltinin havadaki CO_2 emilimi ve daldırma sırasında suyun buharlaşması engellenmiştir.



Şekil 4.8: Alkali Solüsyonun ilk hali ve pH Aralığı

4.1.6. Diğer malzemeler

GFRP İp : Çekme deneyi için FRP donatılarla yapılan başlıklar arasındaki aderansı artırmak ve donatılardaki sarmalların çıkmasını önlemek maksadıyla ihtiyaca göre kullanılmıştır.

Epoksi ve Sertleştirici: Epoksi numunelerin başlıklara yerleştirilmesi için ihtiyaç duyulan güçlü yapışkanlardır (Şekil 4.9). Eposis marka kullanılan epoksi ve sertleştirici için karışım oranı 2/2,5'dur.

PH Metre Kağıdı: Deney ortam koşullarını oluştururken önem arz eden pH seviyesinin aralık olarak ölçülmesine yardımcı olan özel kağıt (Şekil 4.7,Şekil 4.8). Özellikle alkali ortam ve deniz ortamı için kullanılmıştır.



Şekil 4.9: Epoksi ve sertleştirici

4.2. Deneyin Hazırlanması ve Şartlandırılması

Bu çalışmada farklı koşulları oluşturan 5 ayrı çevresel şart dikkate alınarak deneysel çalışma yapılmıştır. Her bir deney ve referans numuneler için her bir FRP donatıdan (AFRP, GFRP, CFRP) ve çelik donatıdan 3'er adet numune deney için kullanılmıştır. Numunelerin boyları 25 cm $\pm$1cm olarak kesilmiştir. GFRP, CFRP, AFRP ve çelik donatıların çapları ortalama 10 mm'dir. Numunelerin test edilmek istenen koşul dışında farklı koşullara maruz kalması engellenmiştir. Numunelerin kütleleri ölçülerek hazırlanan solüsyonlara daldırılmıştır. Daldırma işlemi yapılır yapılmaz çözeltilerin bulunduğu kapların ağzı kapatılmıştır. Numuneler kaplar içerisinde 60˚C'ye ayarlanmış etüvlerin içerisinde deney süresince bekletilmiştir. Bu sıcaklık solüsyonların numunelere olan difüzyonunu artırarak deneyin hızlandırılmasına olanak sağlamaktadır.

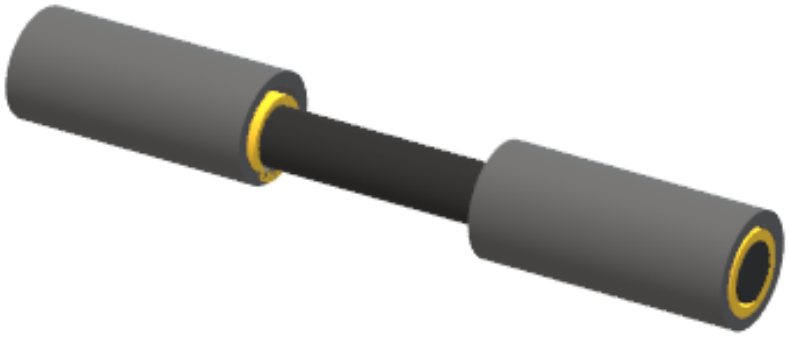
Sıcak hava şartlarına karşı durabilite deneyi yapılacak olan numuneler, Türkiye'de maksimum sıcaklık göz önüne alınarak yalın halde 60˚C'de etüvün içerisine bırakılmıştır.

Soğuk hava şartlarına karşı dayanıklılıklarını incelemek için numuneleri $\pm$3˚ C olmak üzere -37˚C'ye ayarlanmış dondurucuya yalın halde bırakılmıştır. Numuneleri beton içerisinde değil de çıplak bırakmaktaki amaç donatıları çevresel şarta açık bırakarak deneyin hızlanması katkı sağlamaktır. Şartlandırılma süresince numuneler ve çözeltiler kontrol edilmiştir. Kontroller Tablo 4.4'de gösterilmiştir.

Tablo 4.4: Numunelerin Deney süresince Kontrolleri

Tarih	Deney	Kontrol
13.12.2018	Nem	Deney başlangıcı
13.12.2018	Deniz suyu	Deney başlangıcı
13.12.2018	Sıcak	Deney başlangıcı
13.12.2018	Soğuk	Deney başlangıcı
26.12.2018	Alkali Ortam (FRP donatılar)	Deney başlangıcı
11.01.2019	Alkali Ortam (çelik donatı)	Deney başlangıcı
21.12.2018	Nem	pH değişikliği görülmemiştir.
21.12.2018	Deniz Suyu	pH değişikliği görülmemiştir.
21.12.2018	Soğuk	Numunelerin fiziksel görünüşlerinde herhangi bir değişim yoktur.
21.12.2018	Sıcak	Numunelerin fiziksel görünüşlerinde herhangi bir değişim yoktur.
31.12.2018	Tüm deneyler	21.12.2018 tarihindeki durumlar korunmuştur.
01.02.2019	Alkali Çözelti	Alkali çözeltilerin pH kontrolü yapılmıştır. Yapılan kontrolde pH aralığının halen istenilen aralıkta (12-13 arasında) belirlenmiştir. Çözelti renginde değişiklilik olmamakla birlikte numunelerde de görsel değişikliğe rastlanılmamıştır.
01.02.2019	Deniz Suyu	Deniz suyunun pH aralığı ölçülmüş ancak değişime rastlanılmamıştır.
01.02.2019	Nem	Nem için musluk suyu çözeltisinin pH'ında değişiklik kaydedilmemiştir.
01.02.2019	Sıcak	Numunelerde fiziksel değişim görülmemiştir.
01.02.2019	Soğuk	Numunelerde fiziksel değişim görülmemiştir.
21.02.2019	Diğer Deneyler	Numuneler stabil haldedir.
25.04.2019	Tüm deneyler	Tüm deneyler için durum stabilitesini korumuştur.

Numunelere çekme deneyi için 10'ar cm başlıklarla ankraj yapılacaktır. Sıyrılmaların deney numunelerinde olma ihtimalini azaltmak için hazırda bulunan FRP'ler üzerinde farklı şekillerde ankraj yapılmıştır. İlk denemede FRP donatılara epoksi ve sertleştiriciden oluşan harç yedirilip 7 cm uzunluğundaki alüminyum düz ankraj borularının içerisine yerleştirilerek yapılmış (Şekil 4.10) ancak çekme deneyinde sıyrılmalar gözlemlenmiştir.



Şekil 4.10: FRP donatı ankrajlama görseli

2. denemede sıyrılmaları engellemek için epoksiyle birlikte bir miktar kum ilave edilerek donatı ve başlık birbirine tutturulmuştur (Şekil 4.11). Yapılan çekme deneyinde 1. denemeden daha iyi sonuç alınmıştır.



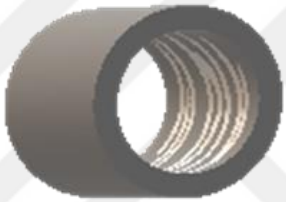
Şekil 4.11: 2.deneme kullanılan örnek numune.

3. denemede GFRP ipler FRP donatıların uç kısımları sarılmıştır. Sarılan iplerin üstüne epoksi sürülmüştür. Epoksinin üzerine kumlar ilave edilerek donatılar borunun içerisine yerleştirilmiştir. Daha iyi sonuçlar elde edilmiştir ancak yeterli olmamıştır. Diğer denemelerde başlıklarda değişiklik yapılma kararı alınmış ve 4. denemede başlıklara delikler açılmıştır (Şekil 4.12). Buradaki amaç epoksinin ulaşamadığı yer var ise bu durumun önüne geçmektir. Sonuçlarda olumlu bir değişiklik gözlenmemiştir.



Şekil 4.12: 4.Denemede borularda açılan deliklerin 3D gösterimi

Son olarak 5. denemede 10 cm uzunluğunda borular kullanılmıştır. Boruların içi iskarpela yardımıyla pürüzlendirilip, epoksi karışımı ile uygulandığında aderans güçlü bir şekilde sağlanmıştır (Şekil 4.6, Şekil 4.13). Çekme deneyinde 5.denemede kullanılan FRP donatılarda sıyrılma gözlenmemiştir.



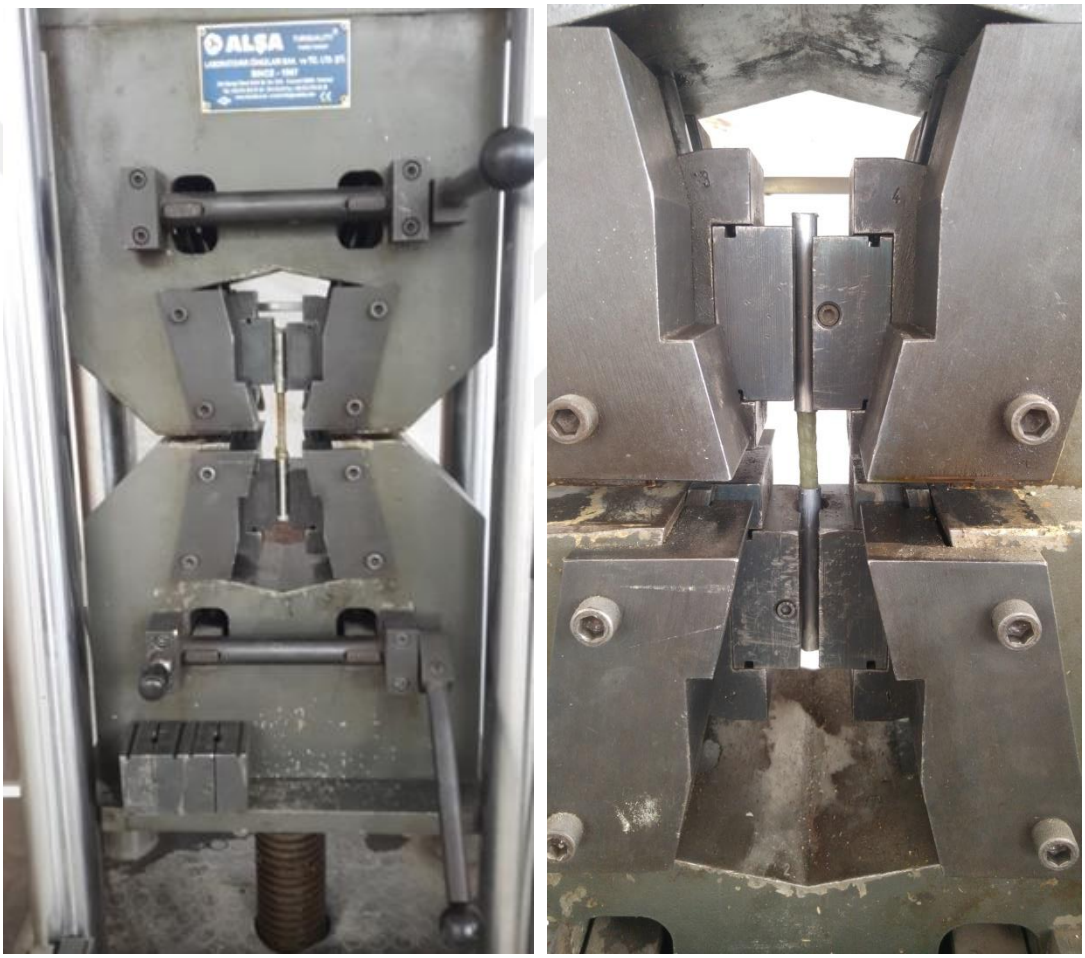
Şekil 4.13: 5.Denemede alüminyum başlık içerisindeki pürüzler

Numunelerdeki sıyrılma sorununa çözüm elde edildiğinden, referans numunelerde dahil 54 numunenin her iki ucu içinde (108 adet) alüminyum başlık kesilerek içleri pürüzlendirilmiştir.

Numuneler kontrollü şartlandırmanın ardından çözeltilerinden çıkarılmıştır. Çözeltilerdeki numunelerin çıkarılmasının hemen ardından, çözeltiye pH ölçer çubuklar batırılmış son durum kayıt edilmiştir. Bulundukları çözeltileri bünyelerine ne kadar emdiklerinin belirlenebilmesi için numunelerin kütleleri hassas terazi ile ölçülmüştür. Tabii tutuldukları çözeltilerden arındırılabilmeleri için numunelerin lifleri musluk suyu ile zarar verilmeden temizlenmiştir. Temizlenen numuneler etüv yardımıyla kısa sürede kurutulmuştur. Kurutulan numunelerin kütleleri ölçülerek kütle kayıplarının yüzdelik hesabı yapılmıştır.

Numunelerde oluşan fiziksel hasarların anlaşılması için numunelerin görselleri her adımda alınmıştır. Ancak gözle görülemeyen hasarlar için mikroskobik görseller şartlandırmadan önce ve sonra alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır.

FRP donatılardaki ve çelik donatıdaki en önemli özellik olan çekme dayanımının tayini dikkatle yapılmalıdır. Bu nedenle çekme düzeneğine çapı 12-24 olan numuneler için tasarlanmış içi silindir şeklindeki başlık aparatlar takılmıştır (Şekil 4.14). Çekme deneyi yapılarak ölçümler bilgisayar ortamında işlenip grafik haline getirilmiştir.



Şekil 4.14: Çekme Deneyi Düzeneği

BÖLÜM 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde deney sonuçları, önce bulunan ortama koşullandırmasına göre verilerek su emmeleri, kütle kayıpları fiziksel-mikroskobik görüntüleri ve çekme dayanımları ayrı ayrı incelenerek karşılaştırılmıştır. Daha sonra her bir donatı için tüm ortam koşullarının sonuçları verilerek kıyaslama yapılmıştır.

5.1. Nem ile Koşullandırılmış Donatıların Sonuçları

Nem koşullandırılmasına bırakılan numunelerin; su emmesi, kütle kaybı, mikroskop görüntüleri- fiziksel hasarı ve son olarak çekme deneyi sonuçları verilecektir.

5.1.1. Su emme sonuçları

Nem koşullandırılmasındaki numuneler için isimlendirmeler Aramid FRP donatılar için A1,A2,A3; Karbon FRP donatılar için C1,C2,C3; Cam FRP donatılar için G1,G2,G3 ve çelik donatılar için D1,D2,D3 şeklindedir. Numuneler koşullandırmaya girmeden önceki kütleleri Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1: Nem koşullandırmasından önceki donatı kütleleri.

Numunenin Adı	Kütle (gr)
A1	28,4
A2	28,5
A3	28,0
C1	31,9
C2	30,5
C3	31,3
G1	37,7
G2	38,4
G3	38,5

Tablo 5.1: (devam) Nem koşullandırmasından önceki donatı kütleleri.

Numunenin Adı	Kütle (gr)
D1	165,5
D2	161,8
D3	162,9

Numuneler 60˚C musluk suyunda 161 gün boyunca bekletilmiştir. Numuneler sudan çıkarılarak pH'ları ölçülmüş ve pH'da düşüş gözlemlenmiştir. Koşullandırmadan önceki pH 7,5-8,5 arasında iken koşullandırmadan sonraki pH 6-7 arasına düşmüştür. Koşullandırılarak çıkarılan numuneler hassas terazi ile tartılmıştır. Doymuş kütle Tablo 5.2'de gösterilmiştir (m_s).

Tablo 5.2: Numunelerin 60˚C'de 161 gün koşullandırma sonrası doymuş kütle.

Numunenin Adı	Kütle (gr)
A1	30,1
A2	30,7
A3	30,4
C1	34,1
C2	32,3
C3	32,8
G1	38,8
G2	39,8
G3	40,3
D1	164,2
D2	161,7
D3	162,7

Koşullandırılan numuneler dikkatlice kurutulmuştur. Kurutulan numuneler tekrar tartılmış ve kütleleri Tablo 5.3'te verilmiştir (m_k).

Tablo 5.3: Nem koşullandırması sonucu numunelerin kütleleri.

Numunenin Adı	Kütle (gr)
A1	27,2
A2	27,1
A3	27,4
C1	31,7
C2	30,3
C3	30,9
G1	37,5
G2	38,2
G3	38,4
D1	163,0
D2	159,9
D3	160,9

Bu çalışmada su emmeler ağırlıkça ve yüzdece denklem 5.1'deki gibi hesaplanarak karşılaştırmaları yapılacaktır. Tablo 5.4'te tüm numunelerin su emme oranları verilmiş olup grafiksel gösterimi Şekil 5.1'de verilmiştir.

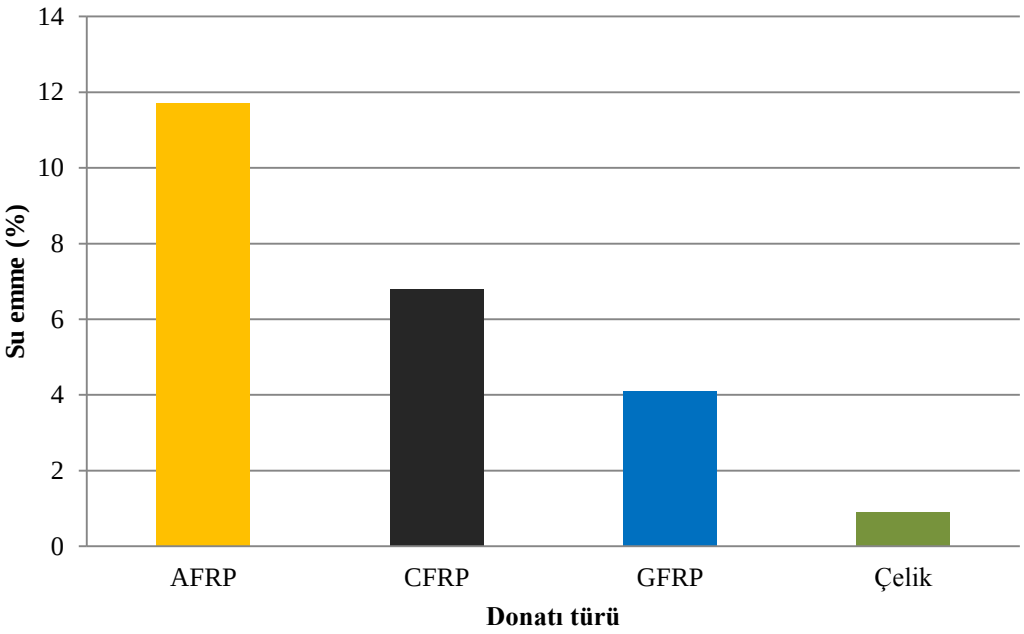
$$\text{Su emme oranı (\%)} = \frac{m_s - m_k}{m_k} \text{x}100 \tag{5.1}$$

A1 için su emme oranının hesabı: $\text{A1} = \frac{30,1-27,2}{27,2} * 100 = \%\ 10,7$

AFRP su emme oranı$_{ort}$ (%) $= \frac{A_1+A_2+A_3}{3} = (10,7+13,2+11,1)/3 = 11,7$

Tablo 5.4: Nem koşullandırması yüzdece emme oranı.

Numunenin Adı	M_k (gr)	M_s (gr)	Su emme oranı (%)	Ortalama (%)
A1	27,2	30,1	10,7	
A2	27,1	30,7	13,2	11,7
A3	27,4	30,4	11,1	
C1	31,7	34,1	7,7	
C2	30,3	32,3	6,7	6,8
C3	30,9	32,8	5,9	
G1	37,5	38,8	3,4	
G2	38,2	39,8	4,1	4,1
G3	38,4	40,3	4,9	
D1	163,0	164,2	0,7	
D2	159,9	161,7	1,1	0,9
D3	160,9	162,7	1,1	



Şekil 5.1: Nem koşullandırması sonucu kütlece su emme oranı grafiği.

Şekil 5.1'e bakıldığında aramid lifin su emme oranın diğer donatılara kıyasla çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum aramid lifinin su emici özelliğine bağlanabilir. Çelik donatının oranının sıfıra yakın çıkması olması gereken bir sonuçtur.

5.1.2. Kütle kaybı sonuçları

Numunelerde oluşan kütle kayıpları, numunelerin dayanıklılıklarıyla doğrudan ilişkilidir. Özellikle kütlesel kayıpların olumsuz koşullar altında heterojen dağılım göstermesi bazı bölgelerin daha narin olmasına sebep olabilmektedir. Bu nedenle kütle kaybı durabilite deneyleri için önem arz etmektedir.

Numunelerin şartlandırılmadan önceki ağırlıkları (m_1) Tablo 5.1'de ve etüvden çıkarıldıktan sonraki ağırlıkları (m_2) Tablo 5.3'te verilmiş olup kütle kaybı denklem 5.2'deki gibi hesaplanarak ve Tablo 5.5'te verilmiş ve grafiksel olarak Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

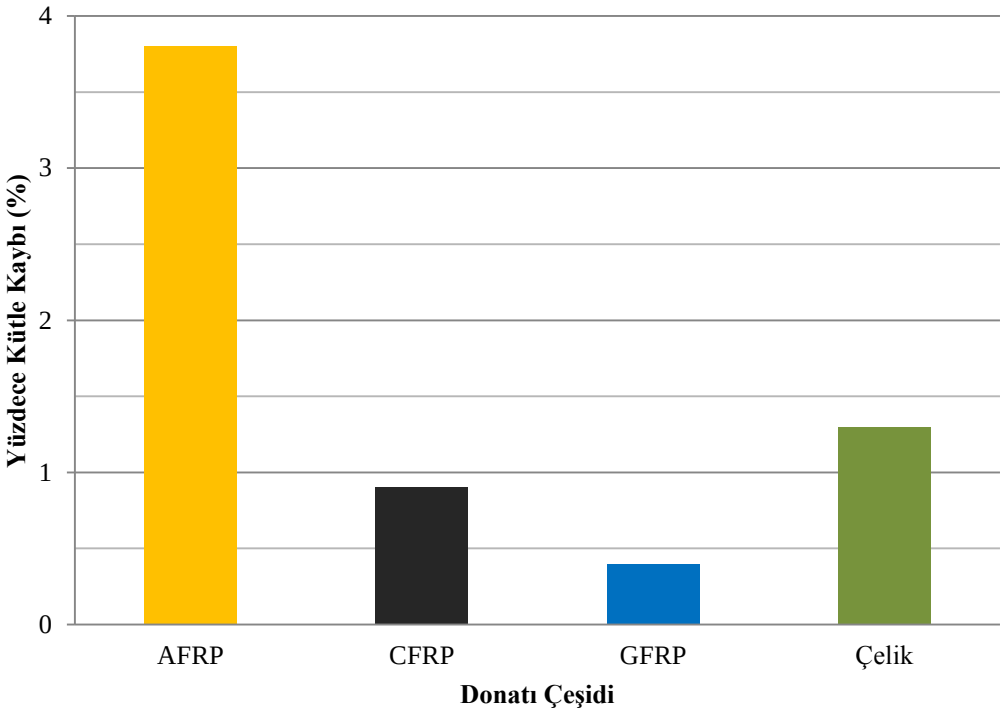
$$\text{Kütle Kaybı (KK) (\%)} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \text{x100} \qquad (5.2)$$

A1 için K.K(%) = (28,4-27,2)*100/28,4 = % 4,2

AFRP ortalama kütle kaybı (%) = (4,2+4,9+2,3)/3 = 3,8

Tablo 5.5: Nem koşullandırması sonucu yüzdelik kütle kaybı.

Numunenin Adı	M_1 (gr)	M_2 (gr)	Kütle kaybı (%)	Ortalama kütle kaybı (%)
A1	28,4	27,2	4,2	
A2	28,5	27,1	4,9	3,8
A3	28,0	27,4	2,3	
C1	31,9	31,7	0,6	
C2	30,5	30,3	0,9	0,9
C3	31,3	30,9	1,1	
G1	37,7	37,5	0,4	
G2	38,4	38,2	0,4	0,4
G3	38,5	38,4	0,3	
D1	165,6	163,0	1,6	
D2	161,8	159,9	1,2	1,3
D3	162,9	160,9	1,2	



Şekil 5.2: Nem koşullandırması sonucu kütle kaybı oranı (%).

5.1.3. Fiziksel hasarın belirlenmesi ve mikroskop görüntüleri

Nem koşullandırılmasından çıkan numunelerin mevcut durumlarının görselleri ve mikroskop altında daha detaylı analizleri bu bölüm kapsamında verilecektir.

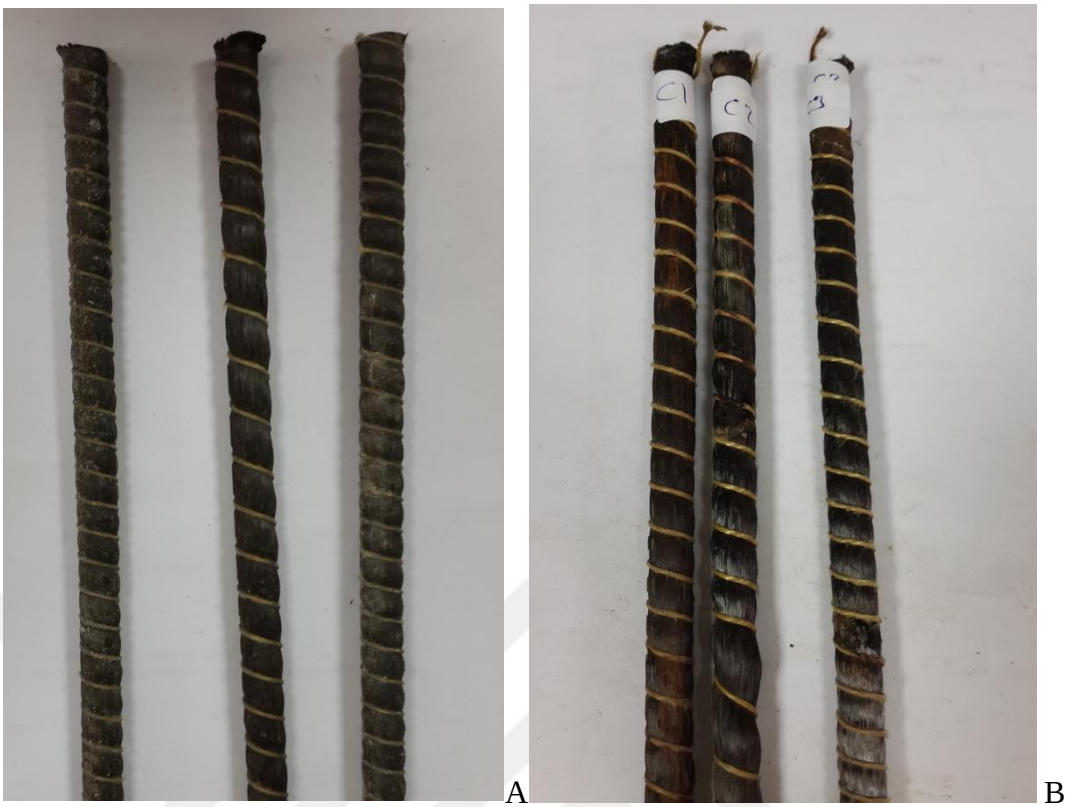
5.1.3.1. Fiziksel hasar

Numuneler nazikçe suyla temizlenip kurutulduktan sonra çekme testlerine tabi tutulmuştur. Yüzeysel bakıldığında AFRP donatılarda (Şekil 5.3) değişiklik gözlenmemiştir. CFRP donatıların yüzeyindeki liflerinde az miktarda saçaklanmalar görülmüştür (Şekil 5.4). GFRP donatıların yüzeyindeki koruyucu epoksi tabakasının tamamen uçtuğu görülmüştür (Şekil 5.5). Çelik donatının yüzeyinde Şekil 5.6'da da görüldüğü hafif topaklanmalar meydana gelmiştir.

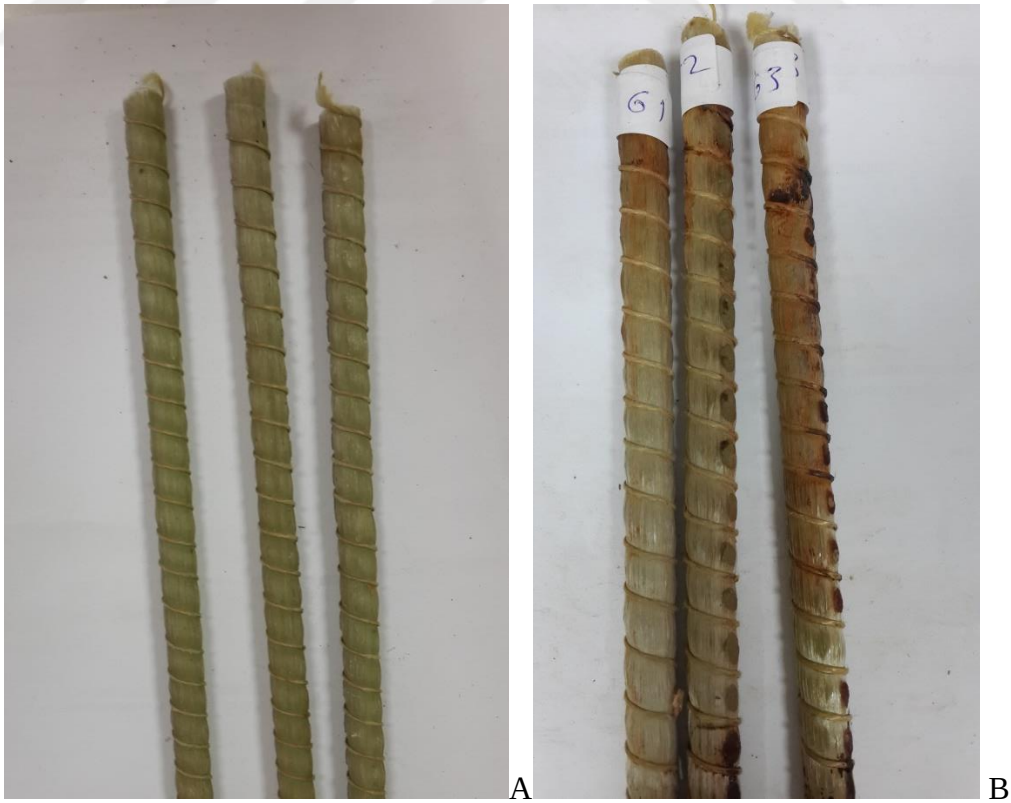


A B

Şekil 5.3: AFRP Donatının nem ile koşullandırılmasından önceki hali (A), sonraki hali (B).



Şekil 5.4: CFRP Donatının nem ile koşullandırmasından önceki hali (A), sonraki hali (B).



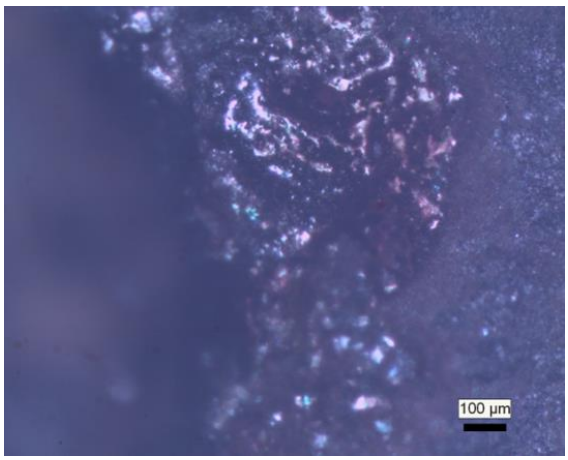
Şekil 5.5: GFRP Donatının nem ile koşullandırmasından önceki hali (A), sonraki hali (B).



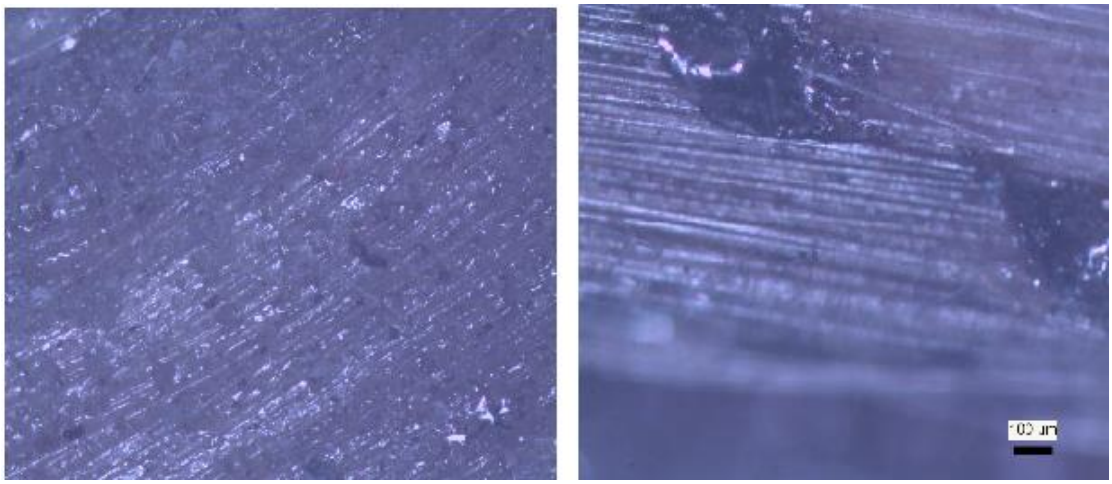
Şekil 5.6: Çelik Donatının nem ile koşullandırmasından önceki hali (A), sonraki hali (B).

5.1.3.2. Mikroskobik görüntüleri

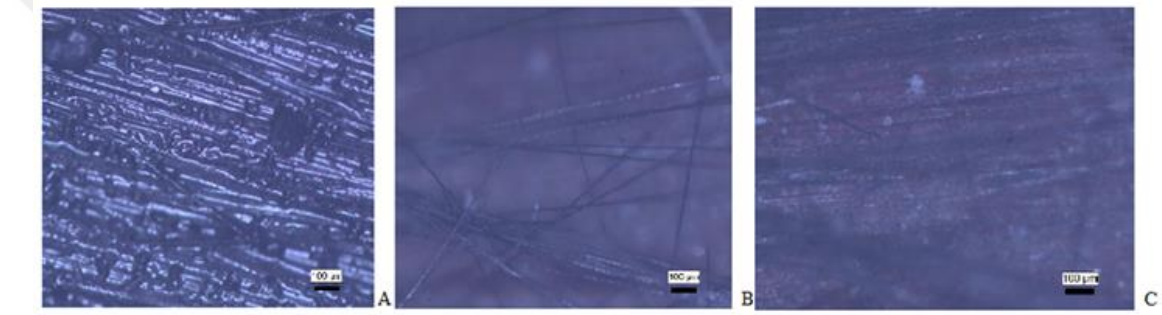
Koşullandırma sonrasında genellikle mikroskopta donatılarda az miktarda temizlenemeyen kalıntılar görülmüştür. CFRP donatılarda ise yüzeysel lif saçaklanmaları görülmüştür (Şekil 5.9). Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 'da numunelerin koşullandırmaya girmeden önceki ve sonraki mikroskobik görüntüleri verilmiştir.



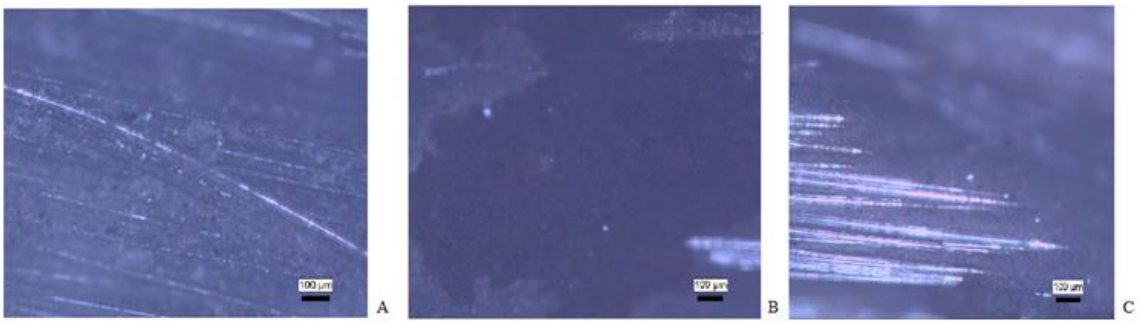
Şekil 5.7: Çelik Donatının nem ile koşullandırmasından sonraki mikroskobik görüntüsü.



Şekil 5.8: AFRP donatının koşullandırmadan önceki (sol) ve sonraki (sağ) mikroskobik görüntüsü.



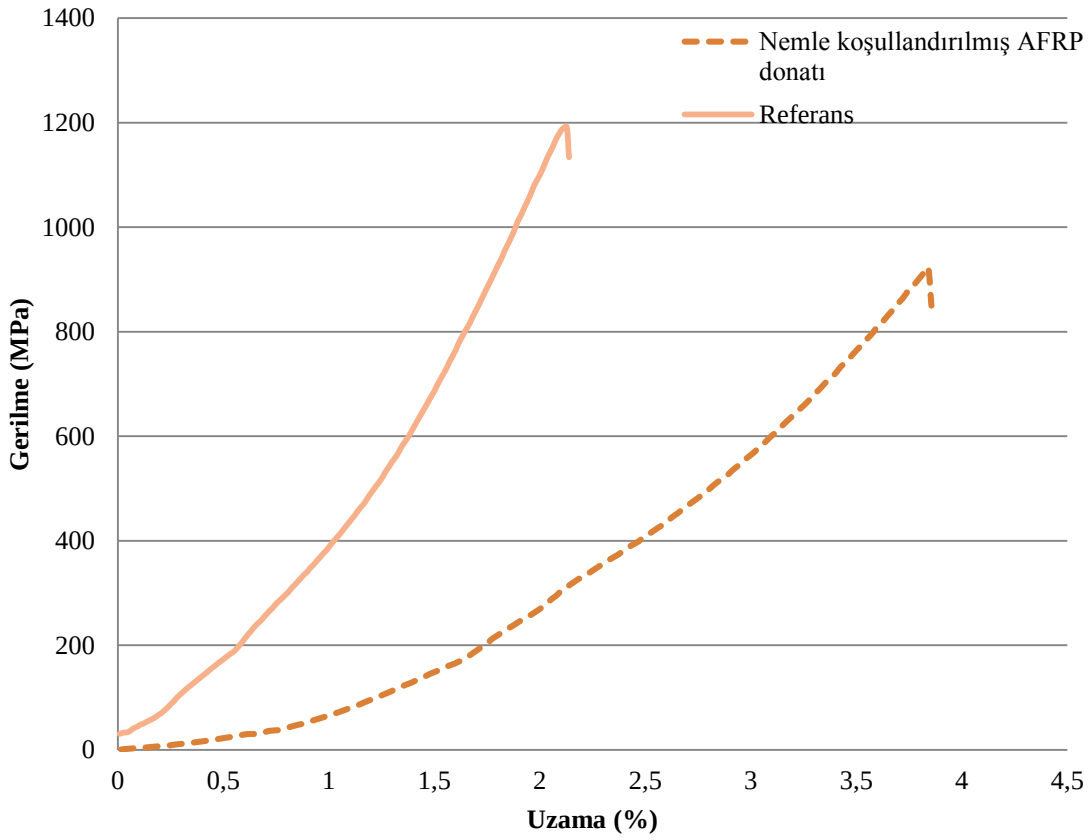
Şekil 5.9: CFRP Donatının koşullandırmadan önceki mikroskopik görüntüsü (A), sonraki görüntüsü (B) ve (C).



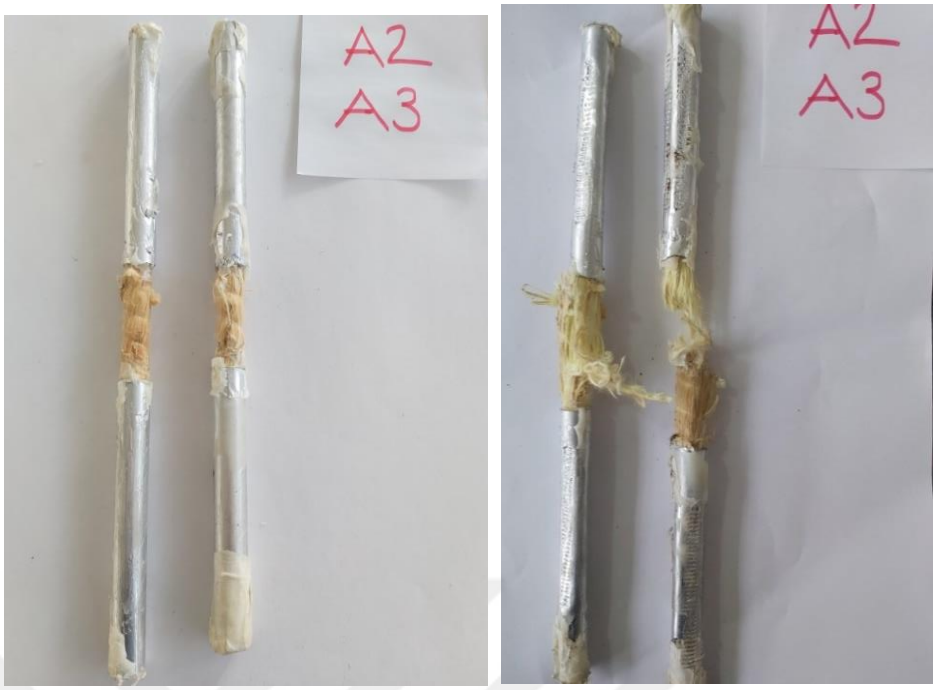
Şekil 5.10: GFRP Donatının koşullandırmadan önceki mikroskopik görüntüsü (A), sonraki görüntüsü (B) ve (C).

5.1.4. Koşullandırılmış numunelerin çekme davranışları

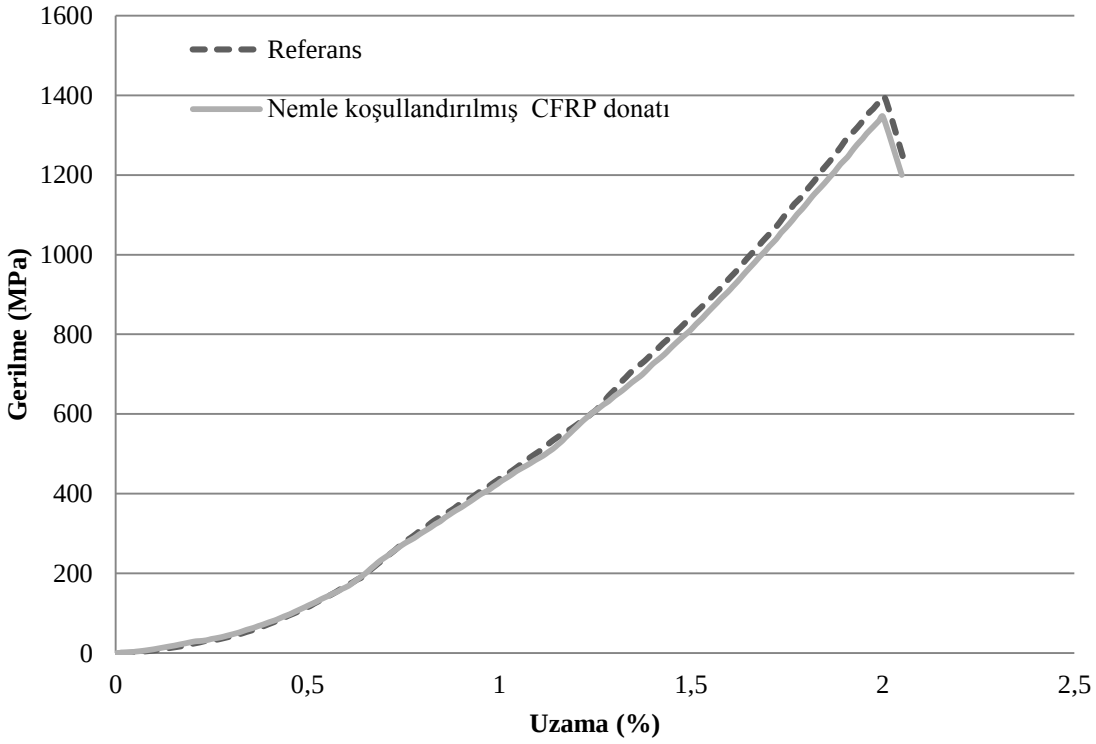
FRP donatılar gevrek malzemelerdir bu nedenle dikkate alınan değer malzemenin çekme dayanımıdır. Bu deney için FRP donatılarla çelik donatının karşılaştırılabilmesi için çelik donatınının da çekme dayanımı alınacaktır. Malzemelerin gerilme-sehim grafikleri Şekil 5.11, Şekil 5.13, Şekil 5.15 ve Şekil 5.17'de verilmiştir. Bazı numunelerin çekilmeden önceki ve çekildikten sonraki görselleri Şekil 5.12, Şekil 5.14, Şekil 5.16 ve Şekil 5.18'de verilmiştir.



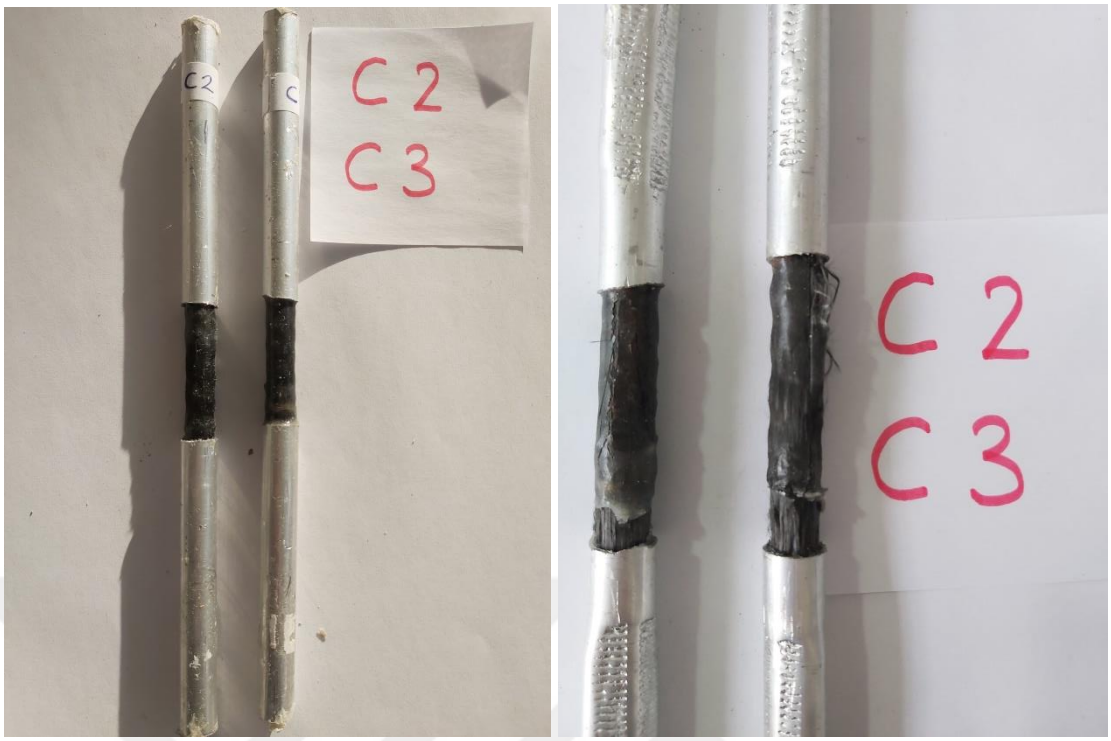
Şekil 5.11. Referans AFRP donatıları ile nemli ortamda koşullandırılmış AFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı



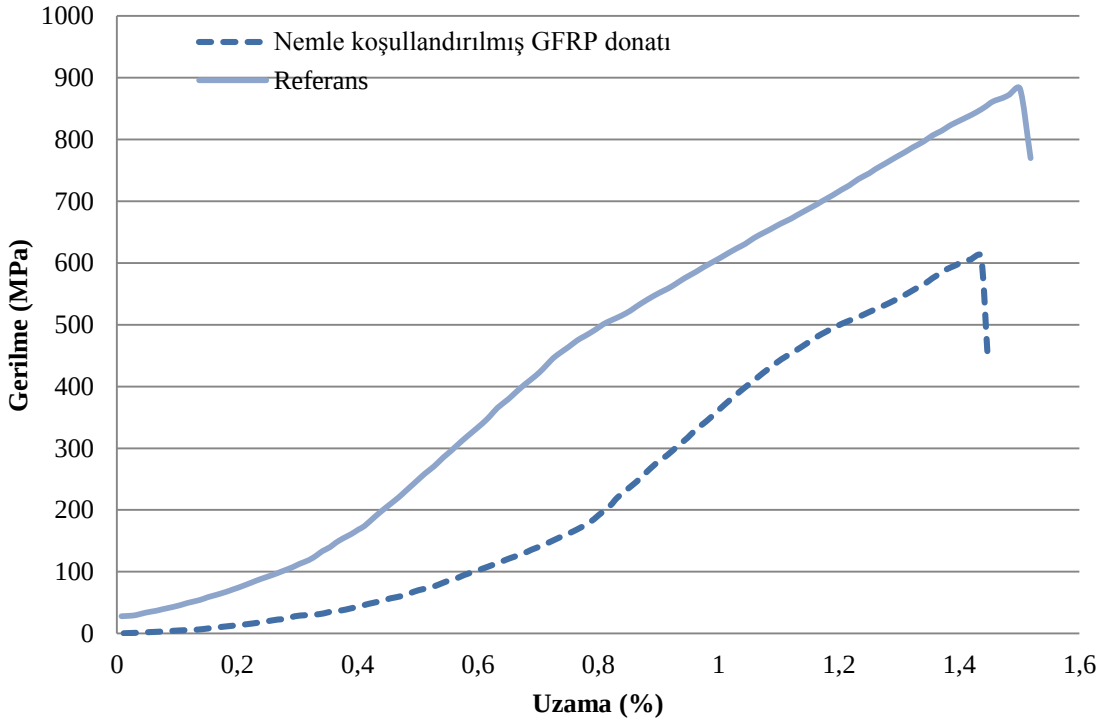
Şekil 5.12. Nem koşullanmasına maruz kalmış AFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali



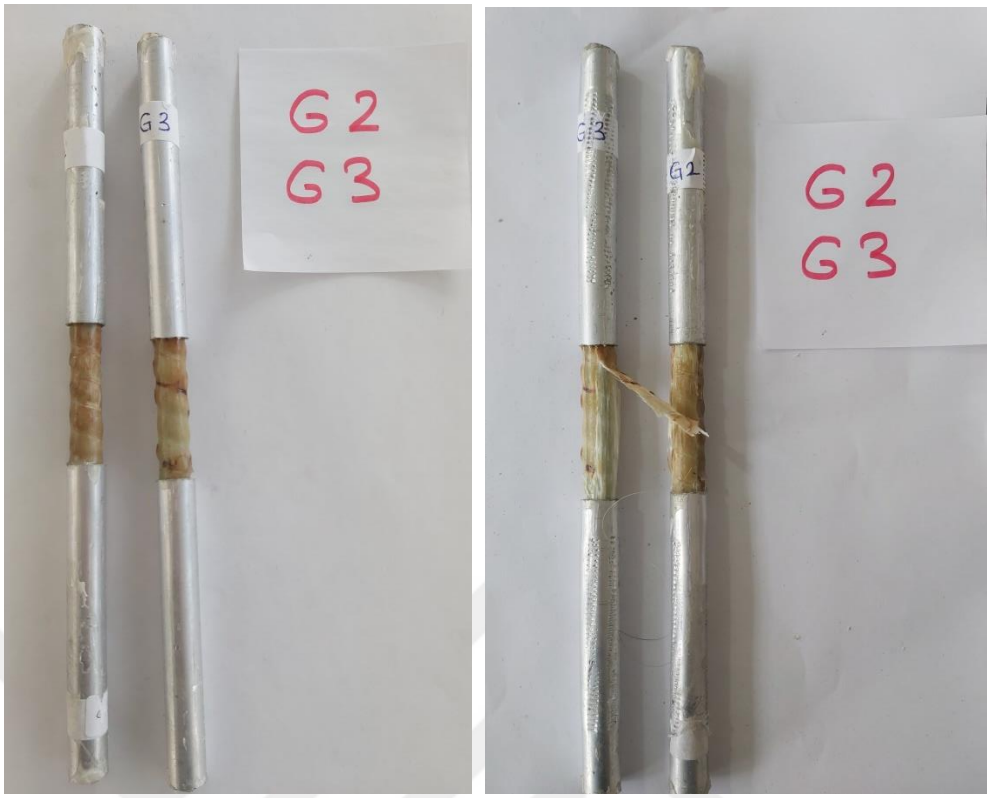
Şekil 5.13. Referans CFRP donatıları ile nemli ortamda koşullandırılmış CFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı



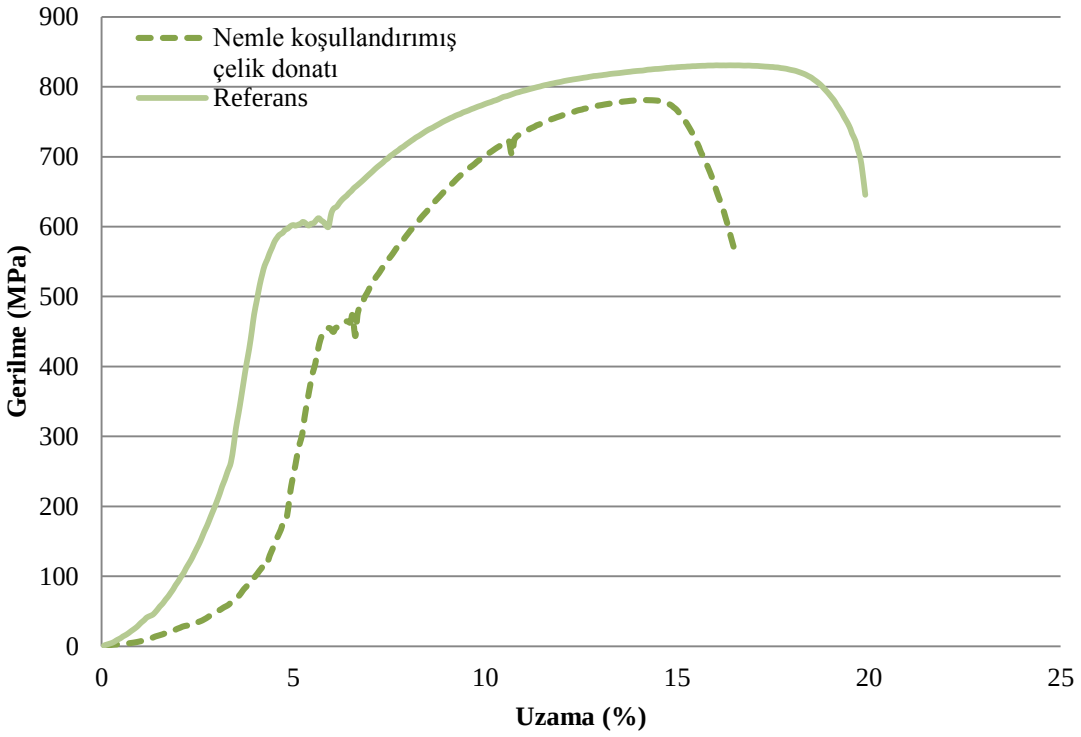
Şekil 5.14: Nem koşullanmasına maruz kalmış CFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali



Şekil 5.15: Referans GFRP donatıları ile nemli ortamda koşullandırılmış GFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı



Şekil 5.16: Nem koşullanmasına maruz kalmış GFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali



Şekil 5.17: Referans çelik donatıları ile nemli ortamda koşullandırılmış çelik donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı

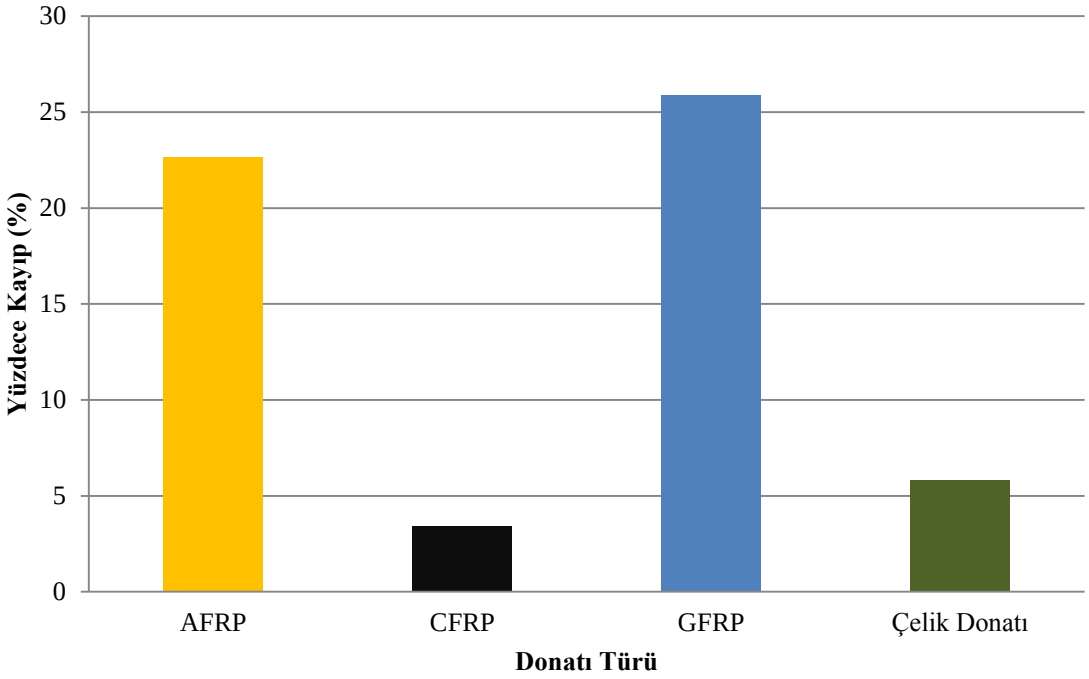


Şekil 5.18: Nem koşullanmasına maruz kalmış çelik donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali

Nem koşullandırması sonucunda donatı çeştitlerinde oluşmuş olan dayanım kayıpları Tablo 5.6'da verilmiş olup tablonun şekilsel gösterimi de Şekil 5.19'da verilmiştir.

Tablo 5.6: Donatıların yüzdece dayanım kayıpları

Donatı Cinsi	**Ortalama Referans Dayanımı (MPa)**	**Koşullandırma Sonucu Ortalama Dayanım (Mpa)**	**Yüzdece Dayanım Kaybı (%)**
AFRP	1191	921	22.67
CFRP	1394	1346	3.44
GFRP	881	653	25.87
Çelik	829	781	5.79



Şekil 5.19: Donatıların yüzdece dayanım kayıplarının grafiksel gösterimi.

FRP donatının dayanıklılığı, donatıyı oluşturan malzemenin dayanımıyla ilgilidir. Bu durumda lifin, matrisin ve ayrıca bu iki bileşen arasındaki arayüzün bütünlüğü çok önemlidir. Hizmet ömrü boyunca yapıların çoğu değişken oranlarda bağıl neme maruz kaldığı için bu konu kritik önem taşımaktadır. Bir polimer matrisi (ve hidrofilik lifler) tarafından emilen nem kendiliğinden özelliklerini değiştirir ve bu düzeyde bütünlük kaybına yol açan lif-matris bağına zararlı etkilere neden olur. Yapılan çalışmalarda göstermiştir ki nem FRP malzemelerde arayüze zarar vermektedir.

Bu çalışma için bakılacak olursa, lif yapısı sebebiyle en çok sıvıyı emen ve en fazla kütle kaybı olan AFRP donatılar aynı zamanda yüksek oranda dayanımda kaybetmişlerdir. Ancak en yüksek dayanım kaybı su emme miktarı ve kütle kaybı az olmasına rağmen GFRP donatılarda görülmüştür. En iyi performansı CFRP donatılar göstermiştir. Hatta çelik donatıdan daha iyi performans gösteren CFRP donatılar, nemli ortam koşulunda çelik donatıya karşı olabilecek en iyi alternatif malzemedir.

5.2. Deniz Suyu ile Koşullandırılmış Donatıların Sonuçları

Deniz suyu koşullandırılmasına bırakılan numunelerin; su emmesi, kütle kaybı, mikroskop görüntüleri-fiziksel hasarı ve son olarak çekme deneyi sonuçları verilecektir.

5.2.1. Su emme sonuçları

Deniz suyu koşullandırılmasındaki numuneler için isimlendirmeler Aramid FRP donatılar için A11,A12,A13; Karbon FRP donatılar için C11,C12,C13; Cam FRP donatılar için G11,G12,G13 ve çelik donatılar için D11,D12,D13 şeklindedir. Numuneler koşullandırmaya girmeden önceki kütleleri Tablo 5.7'de gösterilmiştir.

Tablo 5.7: Deniz suyu koşullandırılmasından önceki donatı kütleleri

Numunenin Adı	Kütle (gr)
A11	28,5
A12	27,9
A13	27,5
C11	29,8
C12	30,4
C13	31,1
G11	38,7
G12	38,2
G13	38,2
D11	163,8
D12	157,7
D13	156,7

Numuneler 60˚C'de 161 gün boyunca doğal deniz suyunda koşullandırılmıştır. Koşullandırmadan önceki pH 7-8 arasında iken koşullandırmadan sonra nemli hava koşullarına benzerlik gösterek pH 6-7 arasına düşüş göstermiştir. Koşullandırılan numuneler hassas terazi ile tartılmıştır. Doygun kütle Tabloda 5.8'de verilmiştir (m_s).

Tablo 5.8: 60˚C'de 161 gün deniz suyunda koşullandırmış numunelerin doymuş kütleler.

Numunenin Adı	Kütle (gr)
A11	31,5
A12	29,8
A13	30,0
C11	31,7
C12	33,1
C13	33,9
G11	40,2
G12	39,7
G13	40,4
D11	163,1
D12	157,7
D13	156,6

Deniz suyundan çıkarılan numunelerin yüzeyi musluk suyu ile nazikçe temizlenerek yavaşça kurutulmuştur. Kurutulan numuneler hassas terazi ile tartılarak kuru kütle ağırlığı elde edilmiştir (m_k). Tartılan numunelerin kütleleri Tablo 5.9'da verilmiştir.

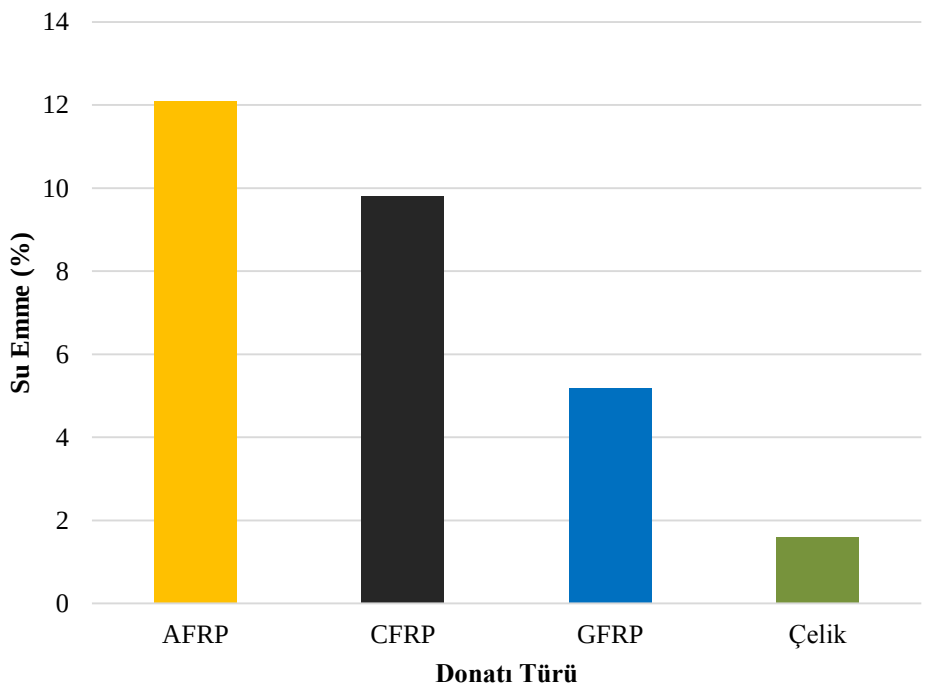
Tablo 5.9: Deniz suyu koşullandırması sonucu numunelerin kütleleri.

Numunenin Adı	Kütle (gr)
A11	27,5
A12	27,1
A13	26,8
C11	29,3
C12	30,0
C13	30,6
G11	37,9
G12	38,0
G13	38,5
D11	161,4
D12	154,7
D13	153,9

Deniz suyu için kütlece emme oranı (%) hesabı için denk 5.1'den yararlanılarak bulunmuş ve hesaplar Tablo 5.10'da verilmiş olup grafiksel gösterimi Şekil 5.20'de verilmiştir.

Tablo 5.10: Deniz suyu koşullandırması yüzdece (%) emme oranı.

Numunenin Adı	M_k (gr)	M_s (gr)	Su emme oranı (%)	Ortalama (%)
A11	27,5	31,5	14,3	
A12	27,1	29,8	10,0	12,1
A13	26,8	30,0	11,8	
C11	29,3	31,7	8,3	
C12	30,0	33,1	10,5	9,8
C13	30,6	33,9	10,6	
G11	37,9	40,2	6,0	
G12	38,0	39,7	4,5	5,2
G13	38,5	40,4	5,0	
D11	161,4	163,1	1,0	
D12	154,7	157,7	1,9	1,6
D13	153,9	156,6	1,8	



Şekil 5.20: Deniz suyu koşullandırması sonucu kütlece su emme oranı grafiği.

Su emme sonuçları, nemli ortam koşulunda elde edilen su emme sonuçlarına sıralama açısından benzerlik göstermektedir. Lif yapısı nedeniyle en fazla sıvıyı AFRP donatının emmesi beklenilen bir sonuçtur.

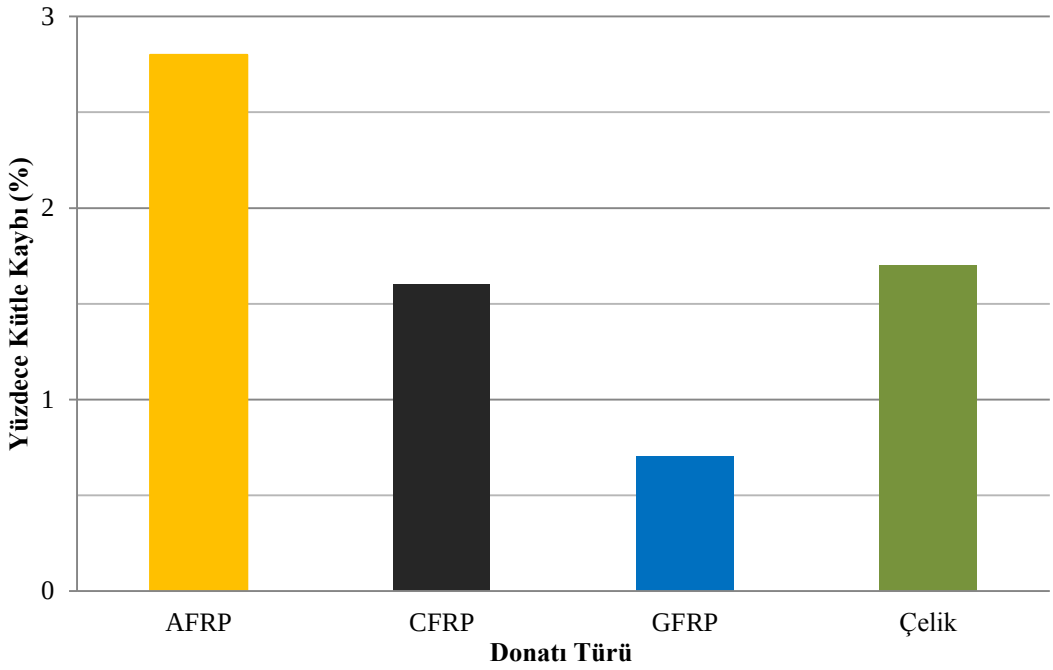
5.2.2. Kütle kaybı sonuçları

Çelik donatılar için en büyük problem korozyondur. Donatıların korozyona en çok uğradığı yapıların başında, kıyı ve deniz yapıları gelmektedir. Korozyona uğrayan donatılar kütlesel kayba uğrayarak gelen gerilmeleri karşılayamayacak duruma gelirler. Böylece yapılarda büyük riskler ortaya çıkmaktadır. Deniz suyu ile koşullandırılan numunelerin şartlandırılmadan önceki ağırlıkları m_1 (Tablo 5.7), kurutulduktan sonraki ağırlıkları m_2 (Tablo 5.9) olmak üzere yüzdece kütle kaybı denklem 5.2'deki gibi hesaplanmış olup Tablo 5.11'de verilmiştir.

Tablo 5.11: Deniz suyu koşullandırması sonucu yüzdece (%) kütle kaybı.

Numunenin Adı	M_1 (gr)	M_2 (gr)	Kütle Kaybı (%)	Ortalama (%)
A11	28,5	27,5	3,2	
A12	27,9	27,1	2,8	2,8
A13	27,5	26,8	2,5	
C11	29,8	29,3	1,6	
C12	30,4	30,0	1,4	1,6
C13	31,1	30,6	1,6	
G11	38,7	37,9	2,1	
G12	38,2	38,0	0,5	0,7
G13	38,2	38,5	-0,7	
D11	163,8	161,4	1,4	
D12	157,7	154,7	1,9	1,7
D13	156,7	153,9	1,8	

Şekil 5.21'e bakıldığında deniz suyu koşullandırması sonucu en az kütle kaybı GFRP donatılarda en büyük kütle kaybı ise AFRP donatılarda görülmüştür. Bu durum emme kapasitesiyle doğrudan ilgili olabilir. Lifler içlerine ne kadar deniz suyu emerse o kadar bozulmalarını arttırarak zarar görebilirler. Aldıkları hasar kütle kayıplarına neden olabilmektedir. G13 donatısında görülen kütle artımı deniz suyunun yeterince kurumamasından kaynaklanmış olabilir.



Şekil 5.21: Nem koşullandırması sonucu kütle kaybı oranı (%).

5.2.3. Fiziksel hasarın belirlenmesi ve mikroskop görüntüleri

Fiziksel hasar FRP donatıların deniz suyu koşullandırılmasından sonra sahip olduğu gözle görülebilen yüzeysel hasarları olarak bu bölümde yer alacaktır. Mikroskobik görüntü ile alınan derin görüntüler ise liflerin ve epoksinin iç hasarı hakkında bize bilgi verecektir.

5.2.3.1. Fiziksel hasar

AFRP donatılar Şekil 5.22'de görüldüğü gibi yüzeysel incelendiğinde liflerde bölge bazlı yüzeysel kopmalar görülmüştür. Şekil 5.23'te gösterilen CFRP donatılarda görülen beyaz kalıntılar etiketten kalmadır liflere zarar vermemek için sertçe temizlenmemiştir ve bir anlam ifade etmemektedir. Ancak CFRP donatıların liflerinde saçaklanmalar gözlemlenmiştir. Şekil 5.24'te gösterilen GFRP numunelerde koruyucu epoksi tabakasının çoğu kalkmıştır ve lifleri en çok hasar gören malzemedir. Şekil 5.25'te beklenildiği üzere çelik donatı korozyona uğramıştır.



Şekil 5.22: AFRP donatının deniz suyu ile koşullandırılmasından sonraki hali



Şekil 5.23: CFRP donatının deniz suyu ile koşullandırılmasından sonraki hali



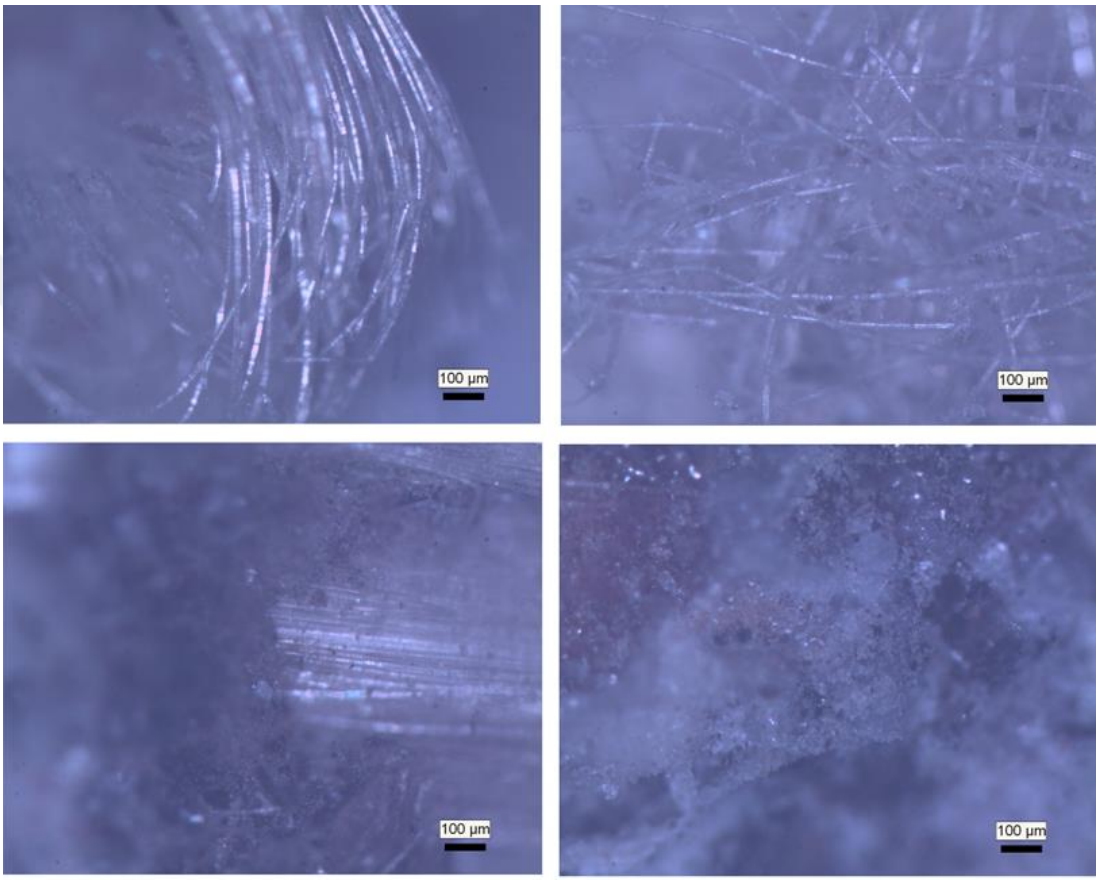
Şekil 5.24: GFRP donatının deniz suyu ile koşullandırılmasından sonraki hali



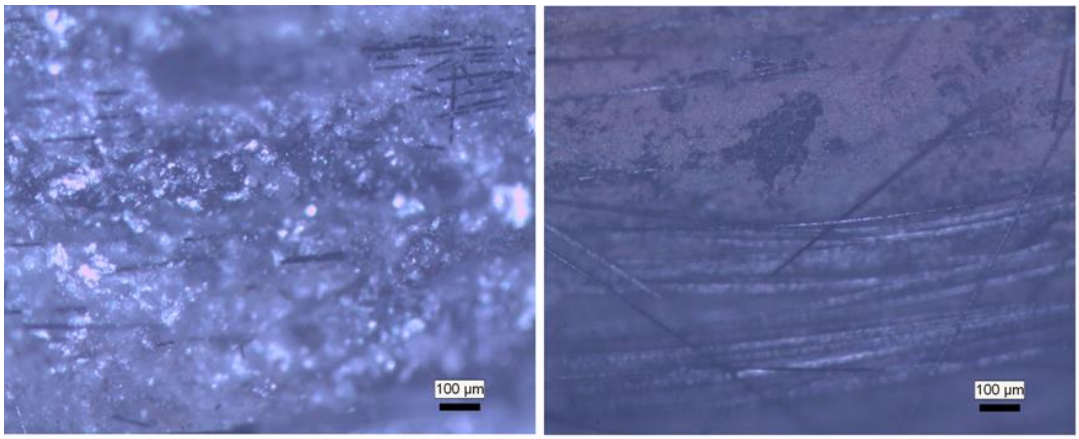
Şekil 5.25: Çelik donatının deniz suyu ile koşullandırılmasından sonraki hali

5.2.3.2. Mikroskobik görüntüleri

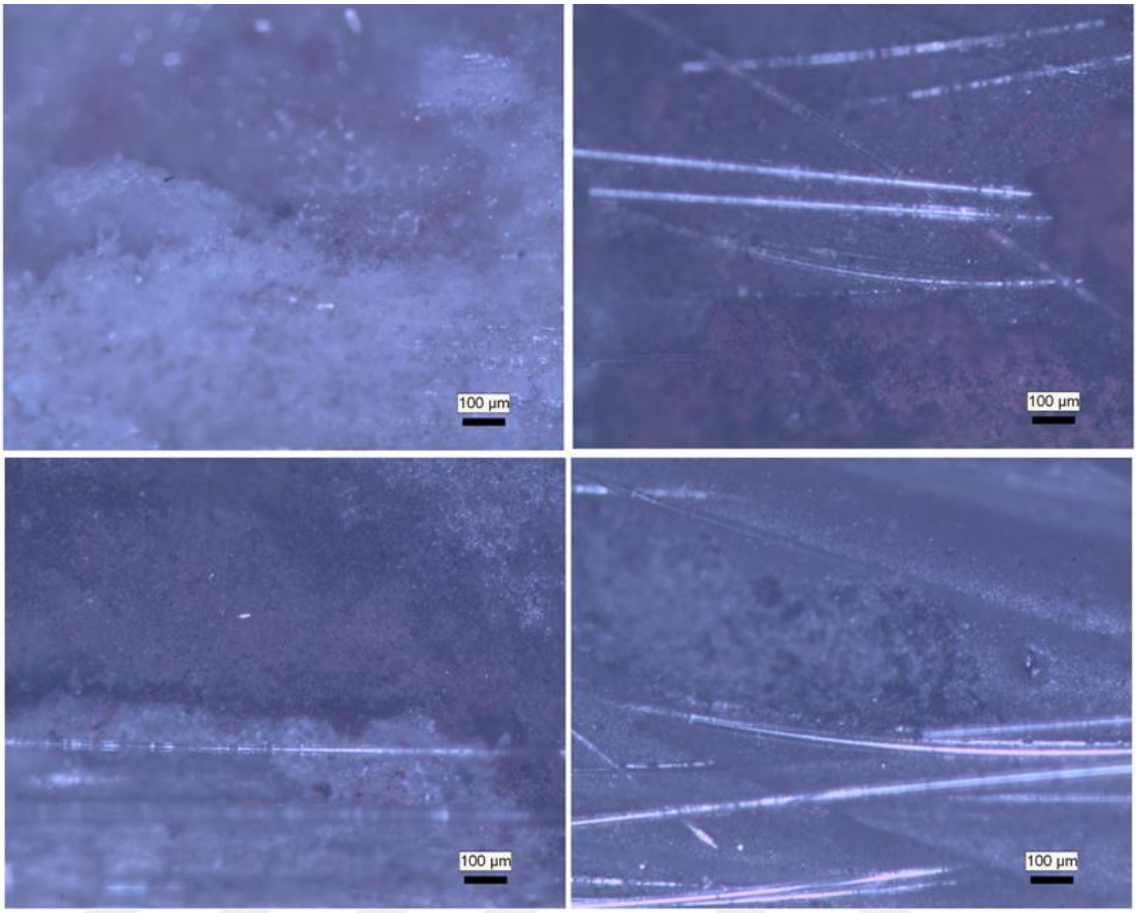
Bölüm 5.2.3.1'de görülen yüzeysel kusurların daha yakından gözlemlenmesi için donatıların mikroskobik görüntüleri Şekil 5.26, Şekil 5.27, Şekil 5.28 ve Şekil 5.29'da verilmiştir. Donatıların içerisinde temizlenemeyen artıklar ve saçaklanmalar görülmüştür.



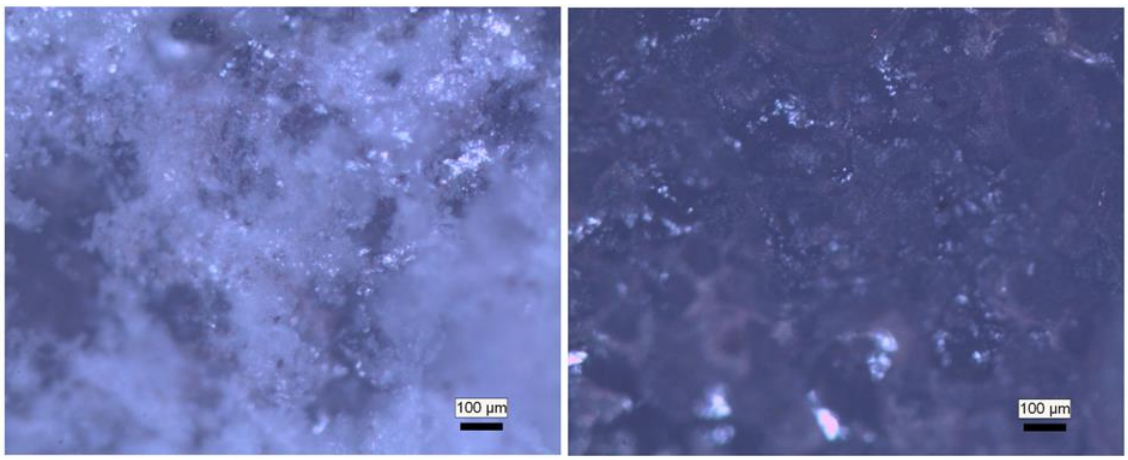
5.26: Deniz suyu ile koşullandırılan AFRP donatıların mikroskobik görüntüsü



5.27: Deniz suyu ile koşullandırılan CFRP donatıların mikroskobik görüntüsü



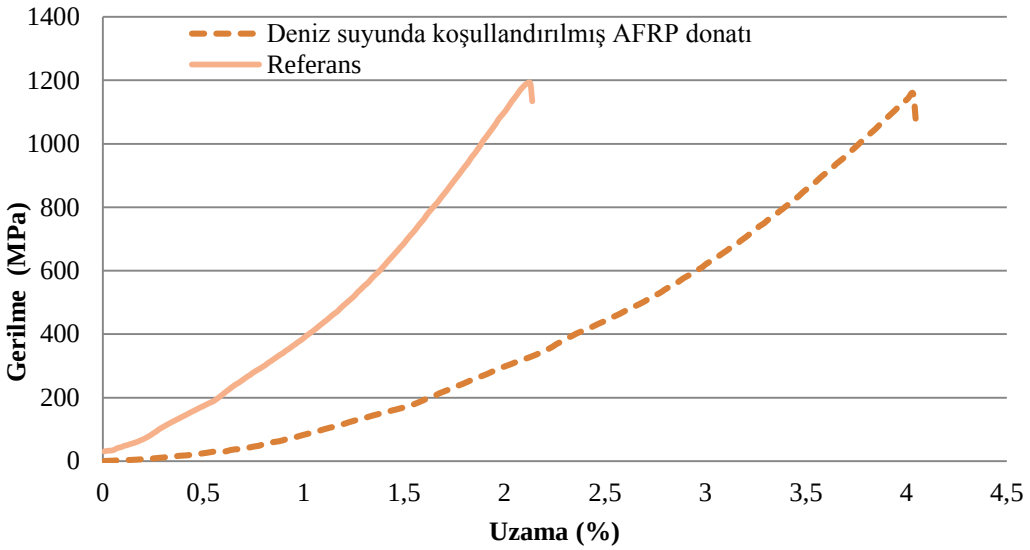
5.28: Deniz suyu ile koşullandırılan GFRP donatıların mikroskobik görüntüsü



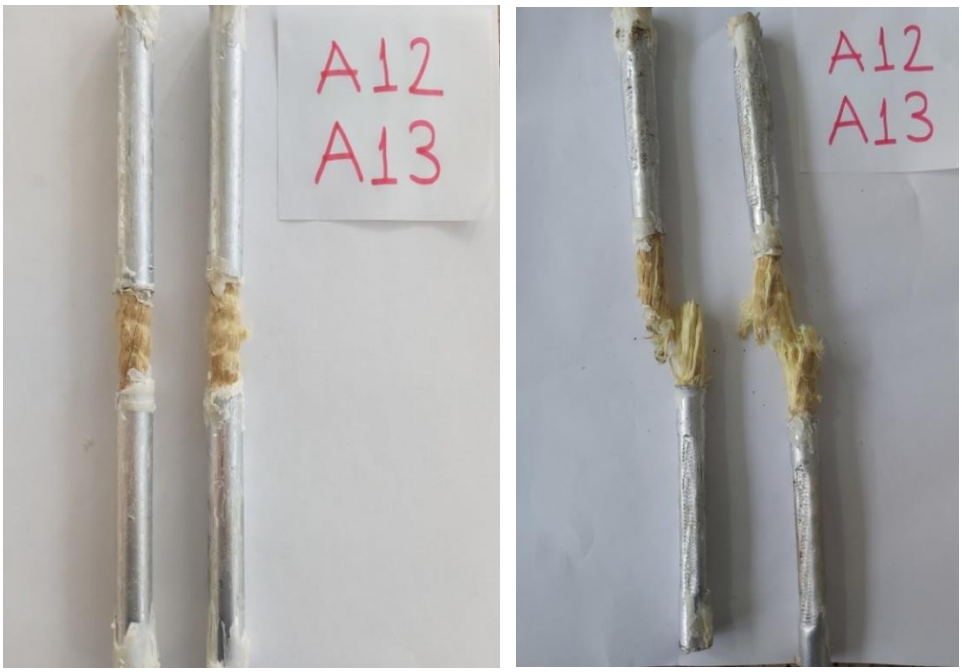
5.29: Deniz suyu ile koşullandırılan Çelik donatıların mikroskobik görüntüsü

5.2.4. Koşullandırılmış numunelerin çekme davranışları

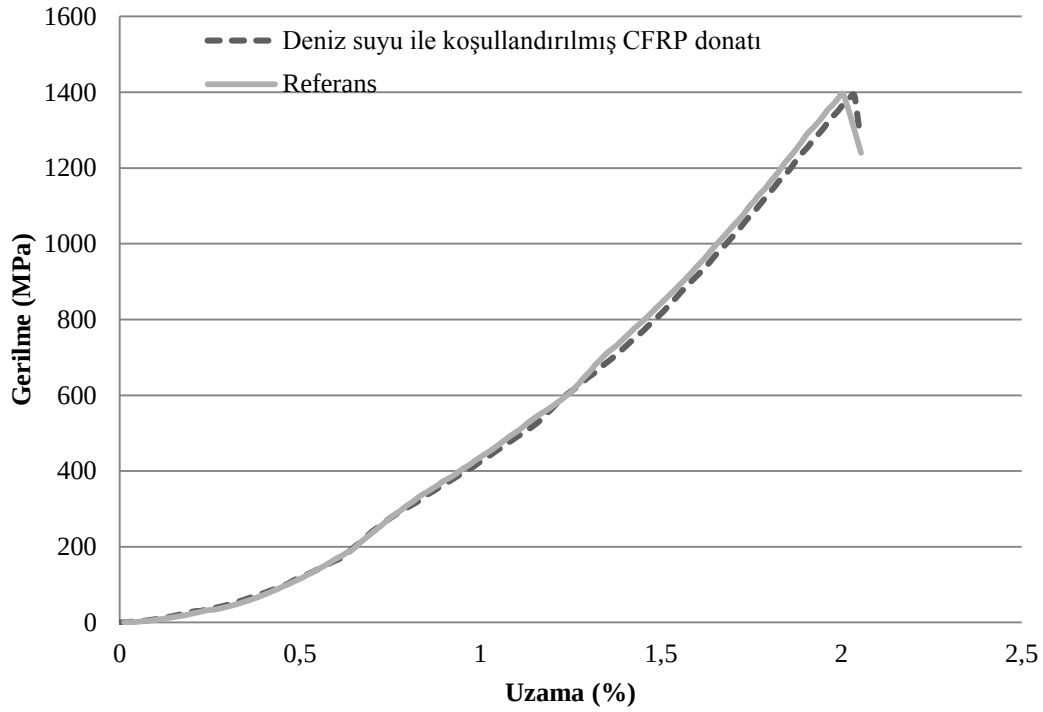
Deniz suyunda koşullandırılan malzemelerin gerilme-sehim grafikleri Şekil 5.30, Şekil 5.32, Şekil 5.34 ve Şekil 5.36'de verilmiştir. Bazı numunelerin çekilmeden önceki ve çekildikten sonraki görselleri Şekil 5.31, Şekil 5.33, Şekil 5.35 ve Şekil 5.37'de verilmiştir.



Şekil 5.30: Referans AFRP donatıları ile deniz suyunda koşullandırılmış AFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı



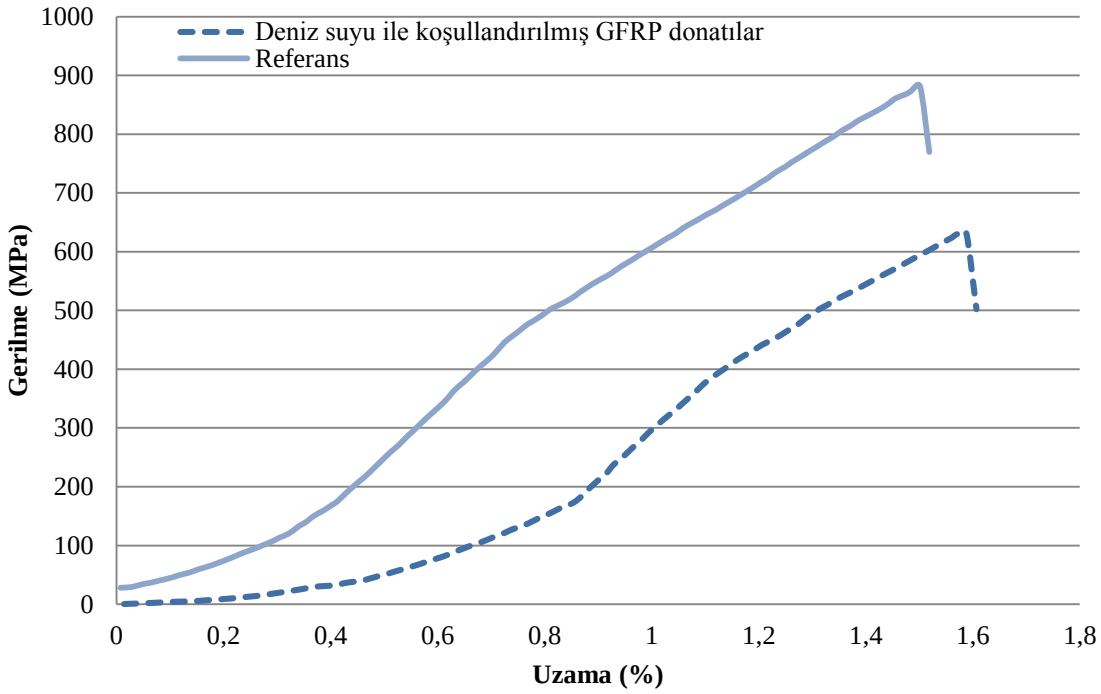
Şekil 5.31: Deniz suyu ile koşullanmaya maruz kalmış AFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali



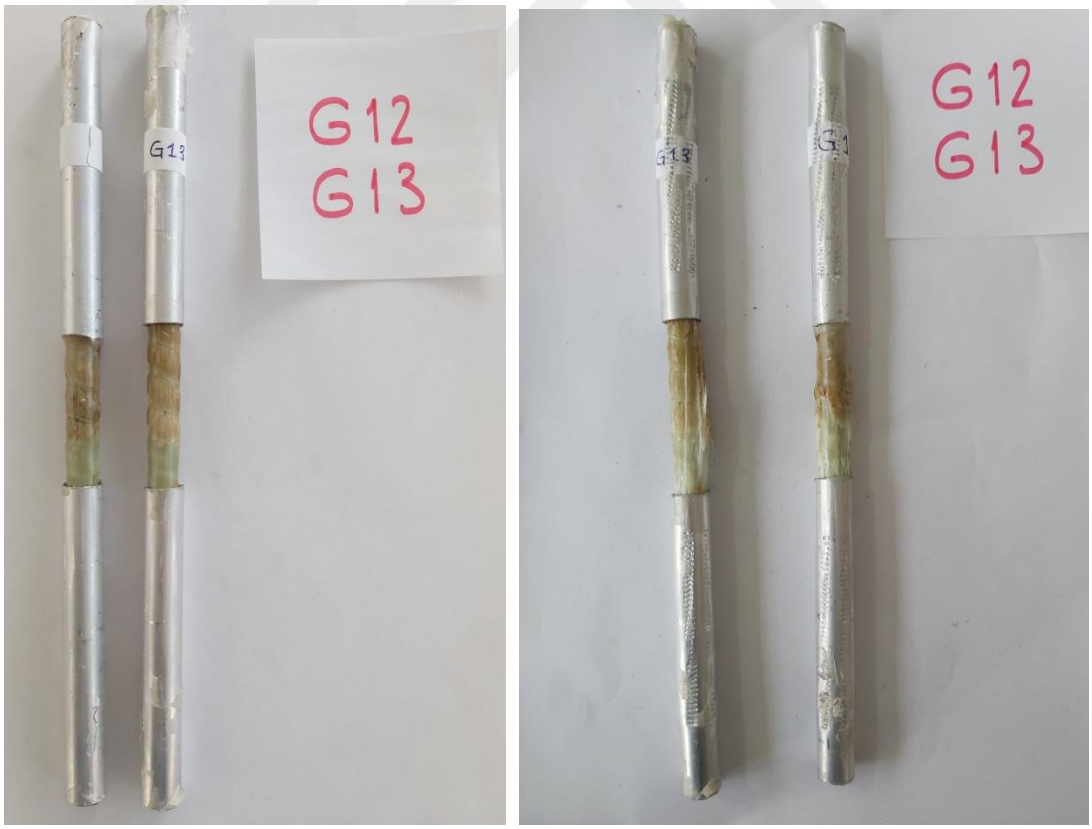
Şekil 5.32: Referans CFRP donatıları ile deniz suyunda koşullandırılmış CFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı



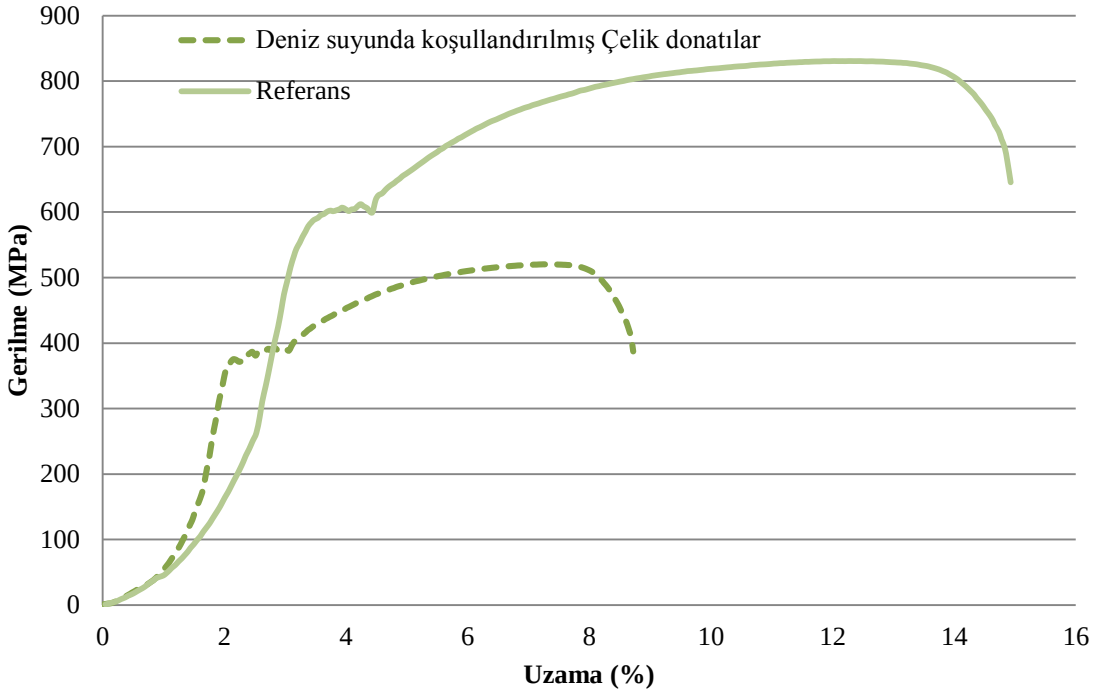
Şekil 5.33: Deniz suyu ile koşullanmaya maruz kalmış CFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali



Şekil 5.34: Referans GFRP donatıları ile deniz suyunda koşullandırılmış GFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı



Şekil 5.35: Deniz suyu ile koşullanmaya maruz kalmış GFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali



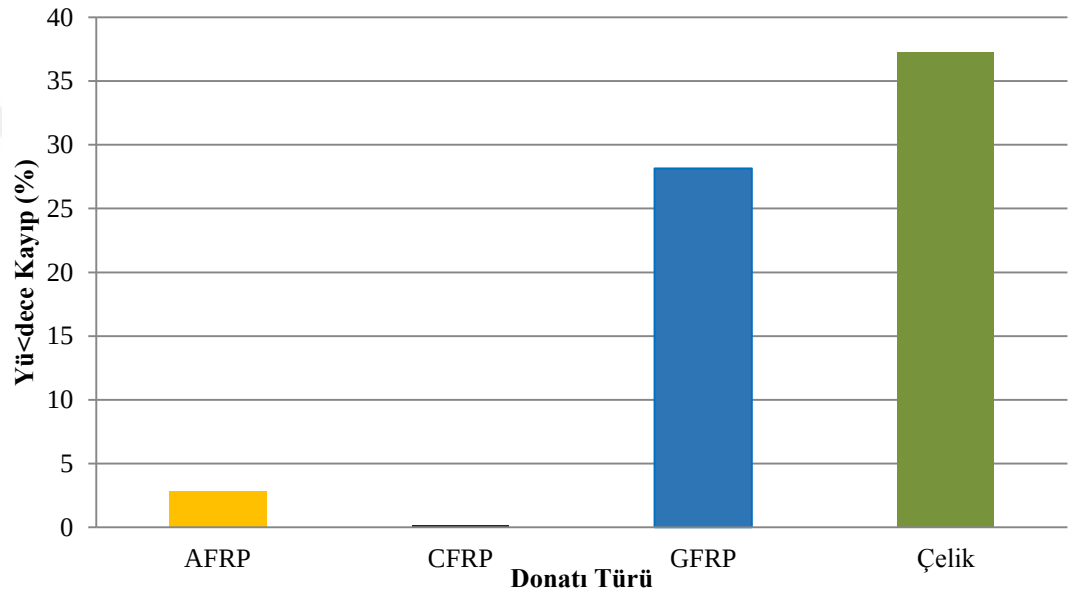
Şekil 5.36: Referans Çelik donatıları ile deniz suyunda koşullandırılmış Çelik donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı



Şekil 5.37: Deniz suyu ile koşullanmaya maruz kalmış GFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali

Tablo 5.12: Donatıların yüzdece dayanım kayıpları

Donatı Cinsi	Ortalama Referans Dayanım (MPa)	Koşullandırma Sonucu Ortalama Dayanım (Mpa)	Yüzdece Dayanım Kaybı (%)
AFRP	1191	1157	2.85
CFRP	1394	1392	0.14
GFRP	881	633	28.149
Çelik	829	520	37.27



Şekil 5.38: Donatıların yüzdece dayanım kayıplarının grafiksel gösterimi.

Deniz suyu ile koşullandırılmış donatı çeşitlerindeki dayanım kayıpları Tablo 5.12'de verilmiş olup tablonun şekilsel gösterimi de Şekil 5.38'de verilmiştir. Şekle ve tabloya bakıldığında korozyona uğrayan çelik donatıda görülen kayıp %35'i aşmıştır. Çelik donatıyı takip eden GFRP donatı %28 kayıp vermiştir ki bu kayıp çok büyüktür. AFRP donatı ise en fazla su emen ve kütle kaybına uğrayan donatı çeşidi olmasına rağmen çok az bir oranda dayanım kaybetmiştir. CFRP donatılar neredeyse hiç dayanım kaybetmemiştir ve deniz suyuna karşı iyi dayanıklılık göstermiştir. CFRP donatı, AFRP donatıdan sonra en fazla su emen ayrıca kütle kaybı da yaklaşık çelik donatı kadar olan malzemedir. Buna rağmen CFRP donatının performansını kaybetmemesi dikkat çekicidir. Bu çalışma sonuçlarına göre çelik donatını yerine kıyı ve deniz yapılarında kullanımı en uygun alternatif malzeme CFRP donatıdır denilebilir.

5.3. Sıcak Havayla Koşullandırılmış Donatıların Sonuçları

+60℃'de (±2) sıcak havayı temsil etmek için koşullandırılmaya bırakılan numunelerin; kütle kaybı, mikroskop görüntüleri- fiziksel hasarı ve son olarak çekme deneyi sonuçları verilecektir.

5.3.1. Kütle kaybı sonuçları

161 gün 60˚C'de bekletilerek maksimum sıcak hava koşullarını temsil eden numunelerin kütlesel olarak değişimi bu kısımda incelenecektir. Sıcak havada koşullandırılmış numuneler için isimlendirme AFRP Donatılar için A21,A22,A23; CFRP Donatılar için C21,C22,C23; GFRP Donatılar için G21,G22,G23 ve çelik Donatılar için D21,D22,D23 şeklinde yapılmıştır. Numuneler koşullandırmaya girmeden önceki kütleleri Tablo 5.13'te gösterilmiştir (m_1).

Tablo 5.13: Sıcak hava koşullandırmasından önceki kütleler

Numunenin Adı	Kütle (gr)
A21	28,6
A22	27,9
A23	27,2
C21	30,8
C22	30,3
C23	31,0
G21	37,9
G22	38,8
G23	37,8
D21	163,3
D22	166,1
D23	163,5

Numuneler +60℃'den çıkarıldıkları için kütleleri kurudur. Bu nedenle herhangi bir işlem uygulaması yapılmadan numuneler koşullandırılmadan çıkarıldıktan sonra dinlenmeye alınıp kütleleri hassas terazi yardımıyla ölçülmüştür. Ölçülen kütleler Tablo 5.14'de verilmiştir.

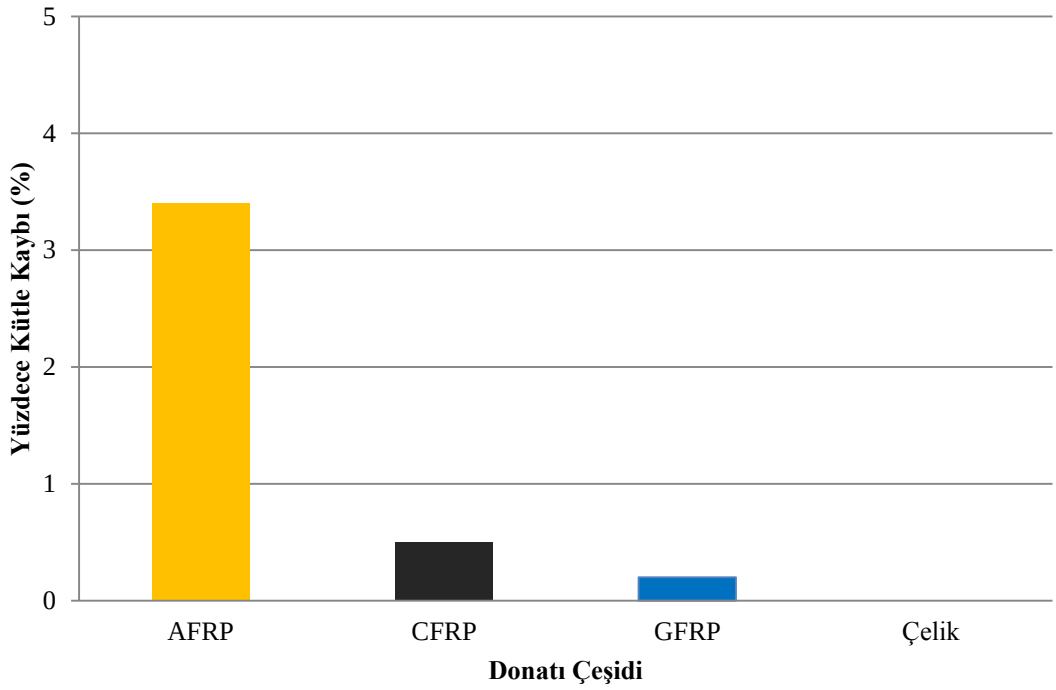
Tablo 5.14: Sıcak hava koşullandırması sonucu numunelerin kütleleri

Numunenin Adı	Kütle (gr)
A21	27,7
A22	27,1
A23	26,2
C21	30,8
C22	30,0
C23	31,0
G21	37,8
G22	38,7
G23	37,7
D21	163,4
D22	166,0
D23	163,2

Numunelerin şartlandırılmadan önceki ağırlıkları m_1 (Tablo 5.13), etüvden çıkarıldıktan sonraki ağırlıkları m_2 (Tablo 5.14) olmak üzere yüzdece kütle kaybı denklem 5.2'de verilen formülden hesaplanmış olup Tablo 5.15'de verilmiştir ve grafiksel gösterimi Şekil 5.39'da gösterilmiştir.

Tablo 5.15: Sıcak hava koşullandırması sonucu yüzdelik kütle kaybı.

Numunenin Adı	M_1 (gr)	M_2 (gr)	Kütle kaybı (%)	Ortalama kütle kaybı (%)
A21	28,6	27,7	3,0	
A22	27,9	27,1	3,1	3,4
A23	27,2	26,2	3,9	
C21	30,8	30,8	0,3	
C22	30,3	30,0	0,9	0,5
C23	31,0	31,0	0,2	
G21	37,9	37,8	0,3	
G22	38,8	38,7	0,2	0,2
G23	37,8	37,7	0,2	
D21	163,3	163,4	0,0	
D22	166,1	166,0	0,0	0,0
D23	163,5	163,2	0,1	



Şekil 5.39: Sıcak hava koşullandırması sonucu kütle kaybı oranı (%).

Bu çalışmada kullanılan AFRP donatının yüksek sıcaklıklara karşı hassas olduğu bölüm 4.1.1'de bahsedilmişti. Bu nedenle diğer lif takviyeli donatılara ve çelik donatıya oranla daha fazla kütle kaybetmiştir. Diğer donatılarda görülen kayıplar %1'in altındadır.

5.3.2. Fiziksel hasarın belirlenmesi ve mikroskop görüntüleri

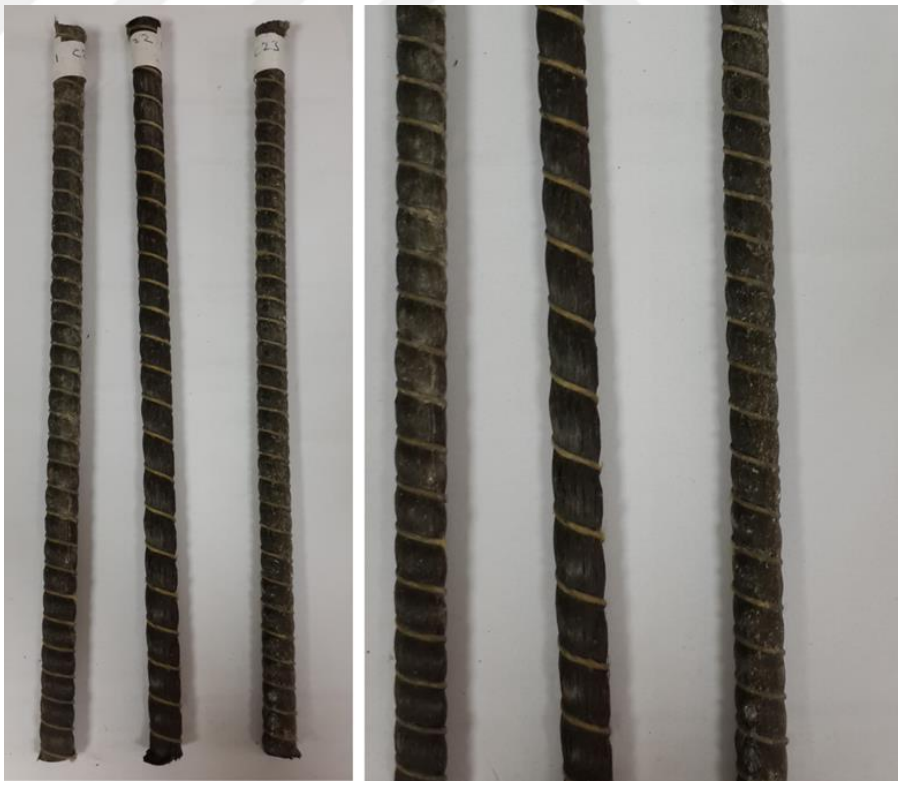
Yüksek sıcaklıkta koşullandırılan numunelerde oluşan yüzeysel kusurlar ve bu kusurların daha derin görüntüleri bu bölüm kapsamında yer almaktadır.

5.3.2.1. Fiziksel hasar

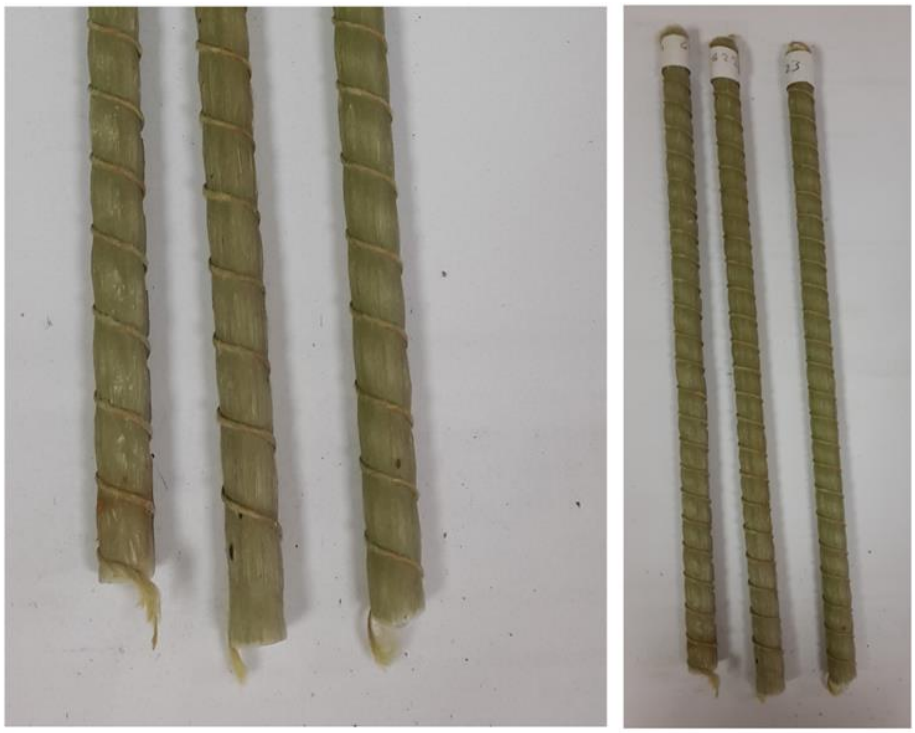
Çelik donatılar dışındaki tüm donatılarda koruyucu epoksi tabakasının bir miktar zarar gördüğü, liflerde ise herhangi bir zararın olmadığı gözlemlenmiştir. AFRP donatıların, CFRP donatıların, GFRP donatıların ve çelik donatıların koşullandırıldıktan sonraki görüntüsü sırayla Şekil 5.40'da Şekil 5.41, Şekil 5.42 ve Şekil 5.43'de verilmiştir.



Şekil 5.40: AFRP donatının sıcaklık ile koşullandırılmasından sonraki hali



Şekil 5.41: CFRP donatının sıcaklık ile koşullandırılmasından sonraki hali



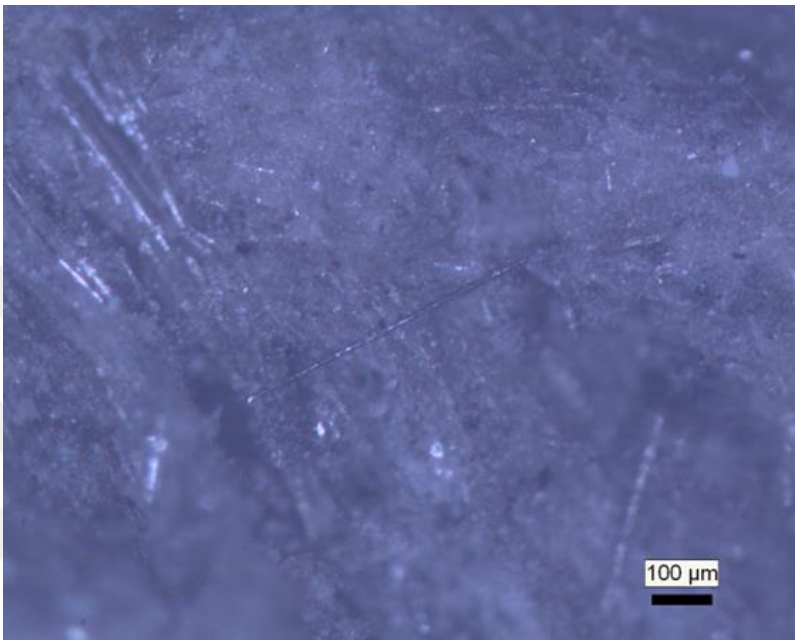
Şekil 5.42: GFRP donatının sıcaklık ile koşullandırılmasından sonraki hali



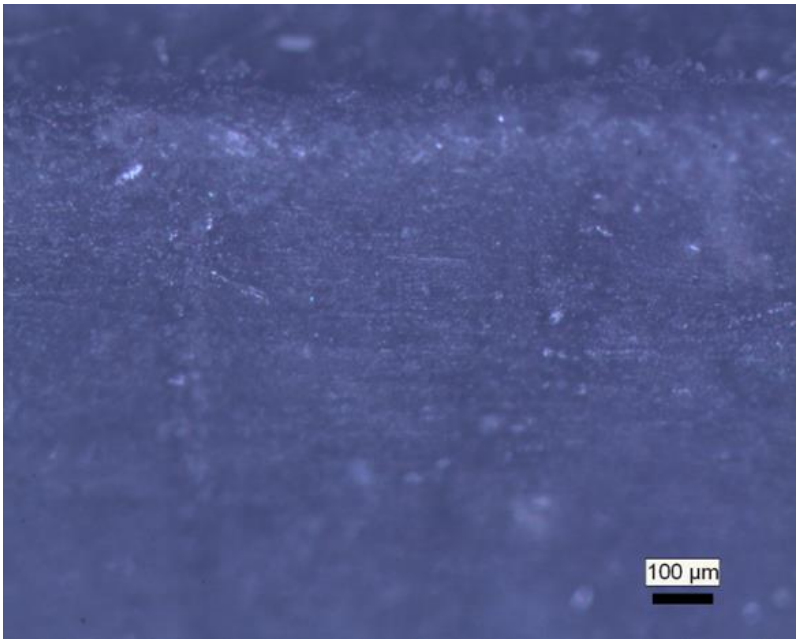
Şekil 5.43: Çelik donatının sıcaklık ile koşullandırılmasından sonraki hali

5.3.2.2. Mikroskobik görüntüleri

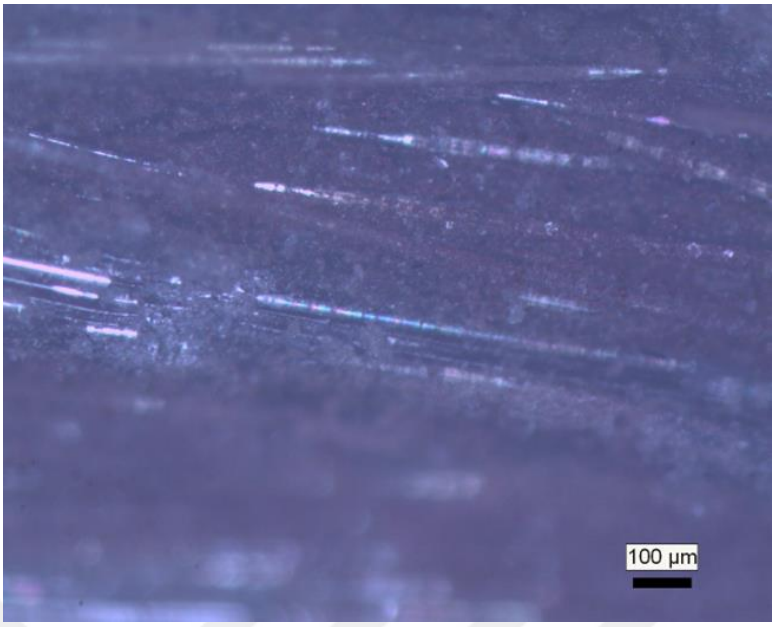
Bölüm 5.3.2.1'de verilen görüntülerde donatılarda görülen en zayıf bölgelerin mikroskobik görüntüleri lif türlerine ayrılarak Şekil 5.44, Şekil 5.45, Şekil 5.46 ve Şekil 5.47'de verilmiştir. Donatıların genelinde lifler sürekliliklerini sağlamıştır. Liflerde kopmalara rastlanılmamıştır.



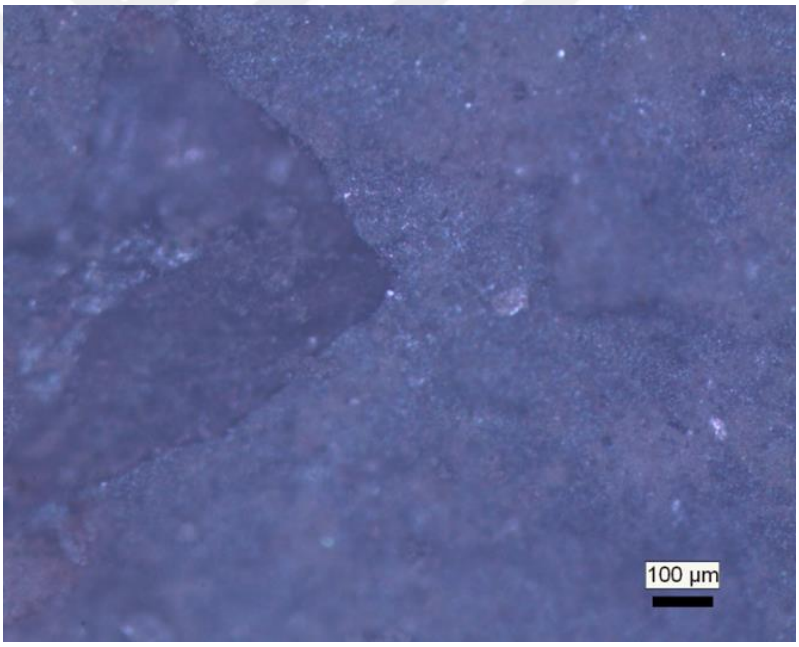
Şekil 5.44: Sıcak hava ile koşullandırılan AFRP donatıların mikroskobik görüntüsü



Şekil 5.45: Sıcak hava ile koşullandırılan CFRP donatıların mikroskobik görüntüsü



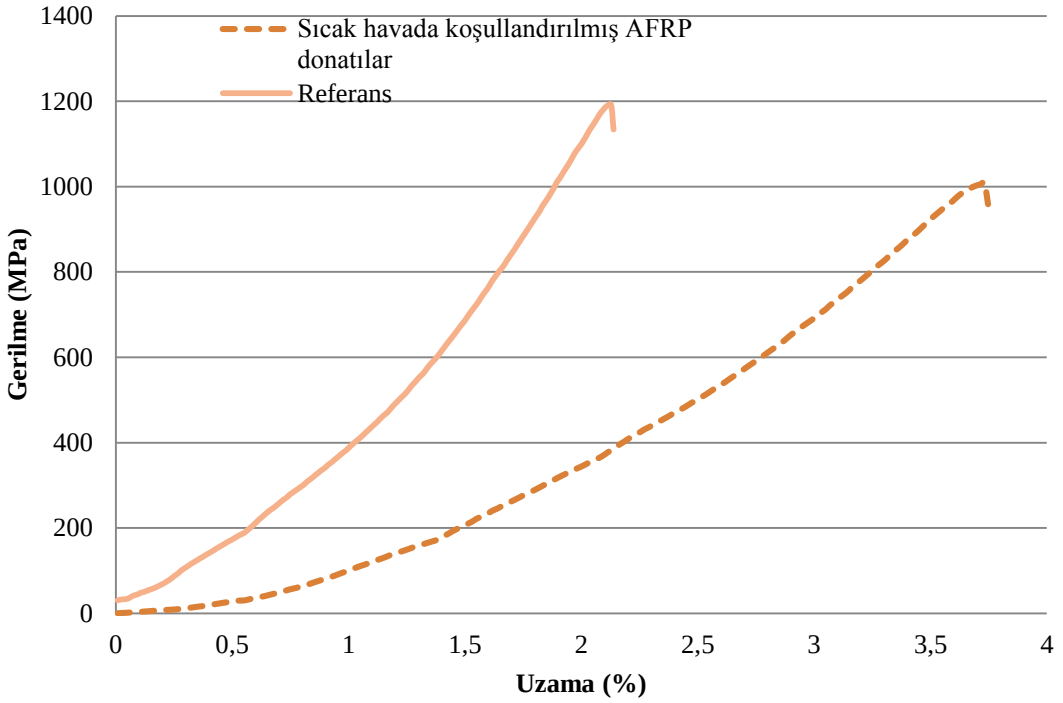
Şekil 5.46: Sıcak hava ile koşullandırılan GFRP donatıların mikroskobik görüntüsü



Şekil 5.47: Sıcak hava ile koşullandırılan Çelik donatıların mikroskobik görüntüsü

5.3.3. Koşullandırılmış numunelerin çekme davranışları

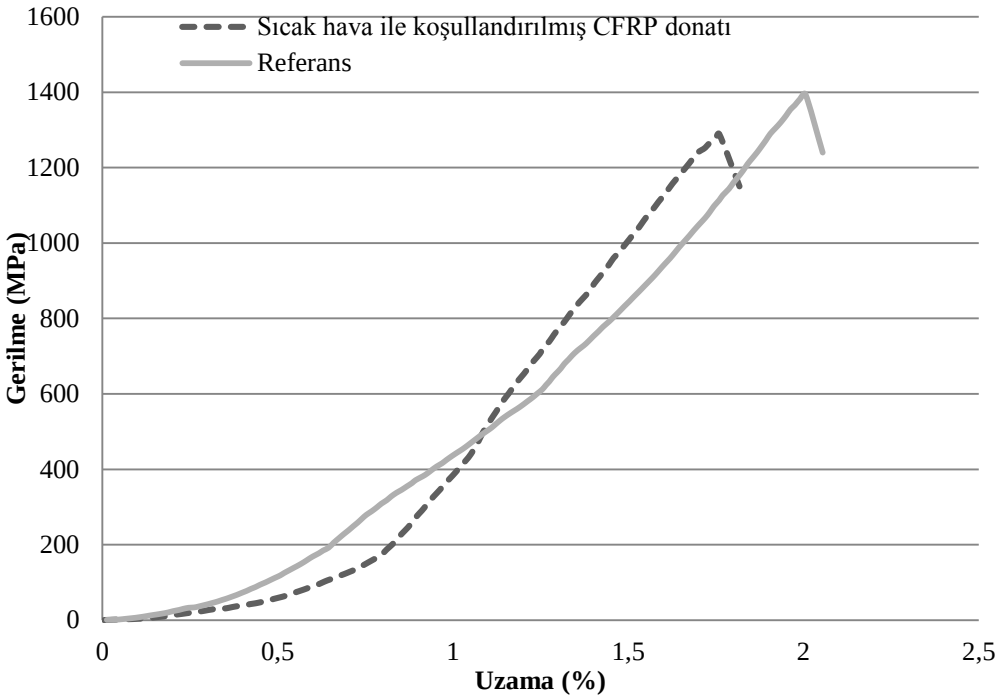
Yüksek sıcaklıkta koşullandırılan malzemelerin gerilme-sehim grafikleri Şekil 5.48, Şekil 5.50, Şekil 5.52 ve Şekil 5.54'de verilmiştir. Bazı numunelerin çekilmeden önceki ve çekildikten sonraki görselleri Şekil 5.49, Şekil 5.51, Şekil 5.53 ve Şekil 5.55'de verilmiştir.



Şekil 5.48: Referans AFRP donatıları ile sıcak hava ortamında koşullandırılmış AFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı



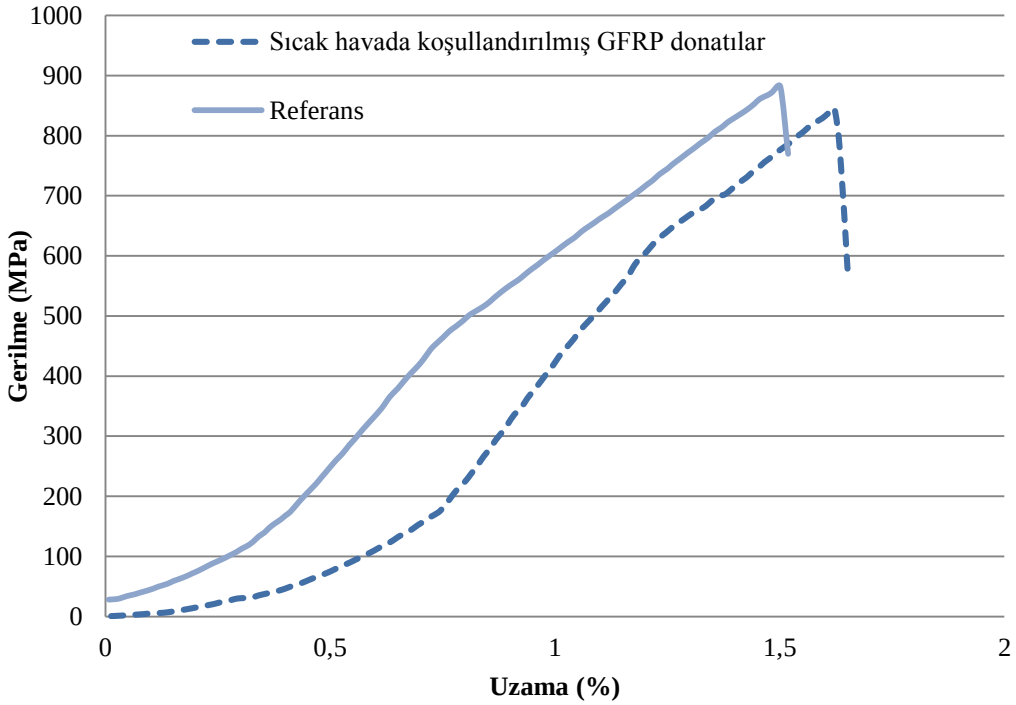
Şekil 5.49: Sıcak hava ile koşullanmaya maruz kalmış AFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali



Şekil 5.50: Referans CFRP donatıları ile sıcak hava ortamında koşullandırılmış CFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı



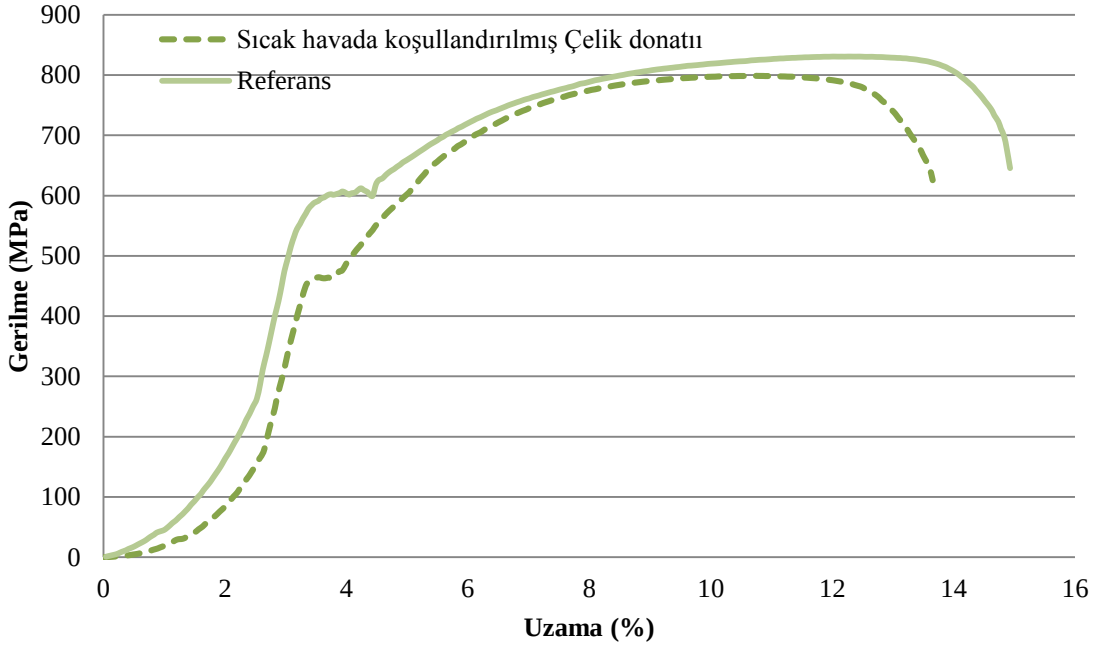
Şekil 5.51: Sıcak hava ile koşullanmaya maruz kalmış CFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali



Şekil 5.52: Referans GFRP donatıları ile sıcak hava ortamında koşullandırılmış GFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı



Şekil 5.53: Sıcak hava ile koşullanmaya maruz kalmış GFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali



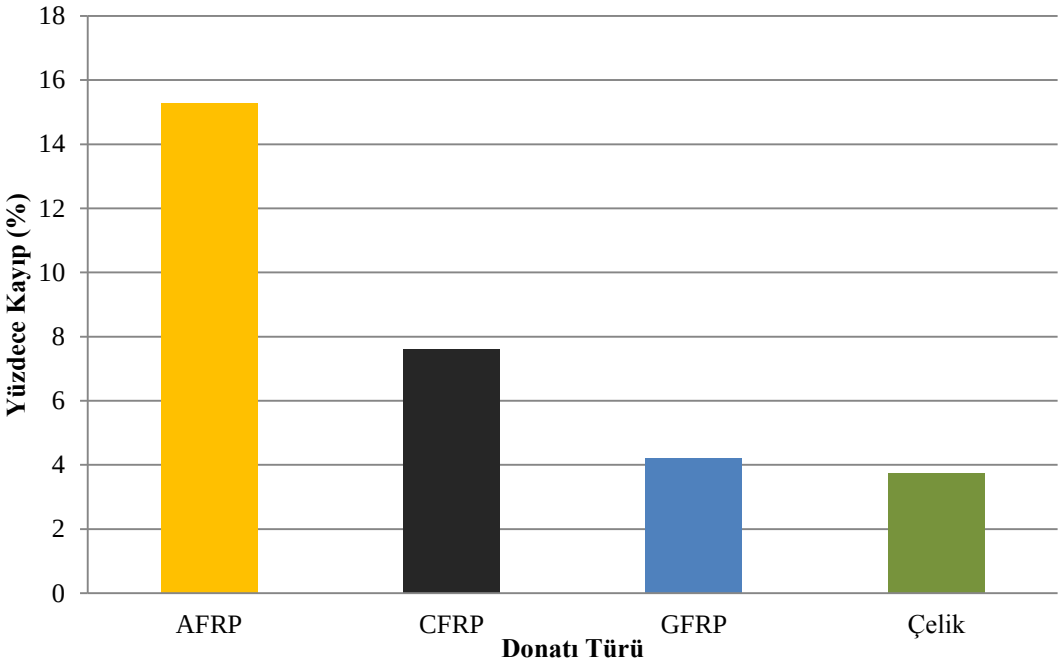
Şekil 5.54: Referans Çelik donatılar ile sıcak hava ortamında koşullandırılmış çelik donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı



Şekil 5.55: Sıcak hava ile koşullanmaya maruz kalmış Çelik donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali

Tablo 5.16: Donatıların yüzdece dayanım kayıpları

Donatı Cinsi	Ortalama Referans Dayanımı (MPa)	Koşullandırma Sonucu Ortalama Dayanım (Mpa)	Yüzdece Dayanım Kaybı (%)
AFRP	1191	1009	15.28
CFRP	1394	1288	7.60
GFRP	881	844	4.20
Çelik	829	798	3.74



Şekil 5.56: Donatıların yüzdece dayanım kayıplarının grafiksel gösterimi.

Sıcak hava ortamı ile koşullandırılmış donatı çeşitlerindeki dayanım kayıpları Tablo 5.16'de verilmiş olup tablonun şekilsel gösterimi de Şekil 5.56'da verilmiştir. Aramid lifin yüksek sıcaklıklara karşı dirençsiz olduğundan yukarıdaki bölümlerde bahsedilmiştir. Bu nedenle en yüksek dayanım kaybının AFRP donatılarda görülmesi beklenilen bir sonuçtur. Ancak karbon lifler sıcaklıkta kolayca erimedikleri için uçak frenlerinde hatta roketlerde kullanıldığı bilinmektedir. Buna rağmen CFRP donatıların, GFRP donatılardan fazla dayanım kaybetmeleri beklenmedik bir sonuçtur. Çelik donatı bu ortam koşulunda en iyi sonuç veren donatı türü olmuştur.

5.4. Soğuk Havayla Koşullandırılmış Donatıların Sonuçları

Bu bölümde -37℃'de (±2) soğuk havayı temsil etmek için koşullandırılmaya bırakılan numunelerin; kütle kaybı, mikroskop görüntüleri- fiziksel hasarı ve son olarak çekme deneyi sonuçları verilecektir.

5.4.1. Kütle kaybı sonuçları

161 gün -37˚C'de (±2) bekletilerek düşük derecelerdeki soğuk hava koşullarını temsil eden numunelerin kütlesel olarak değişimi bu kısımda incelenecektir. Bu deneyde numuneler AFRP donatılar için A31,A32,A33; CFRP donatılar için C31,C32,C33; GFRP donatılar için G31,G32,G33 ve çelik donatılar için D31,D32,D33 olarak adlandırılmıştır. Numuneler koşullandırmaya girmeden önceki kütleleri Tablo 5.17'de gösterilmiştir (m_1).

Tablo 5.17: Soğuk hava şartlandırılmasından önceki kütleler

Numunenin Adı	Kütle (gr)
A31	28,00
A32	27,79
A33	27,73
C31	30,15
C32	30,51
C33	31,47
G31	38,32
G32	37,82
G33	37,98
D31	163,67
D32	167,58
D33	157,43

Numuneler, soğuk hava koşullarını sağlaması için koyuldukları koşullandırma ortamından çıkarıldıklarında hemen tartılmamıştır. Yüzeylerinde bir miktar nem oluşacağı bilindiğinden numuneler kısa süre kurumaya bırakılmıştır. Kütle ölçümü kurutma işleminin sonunda yapılmıştır (m_2) ve sonuçlar Tablo 5.18'de verilmiştir.

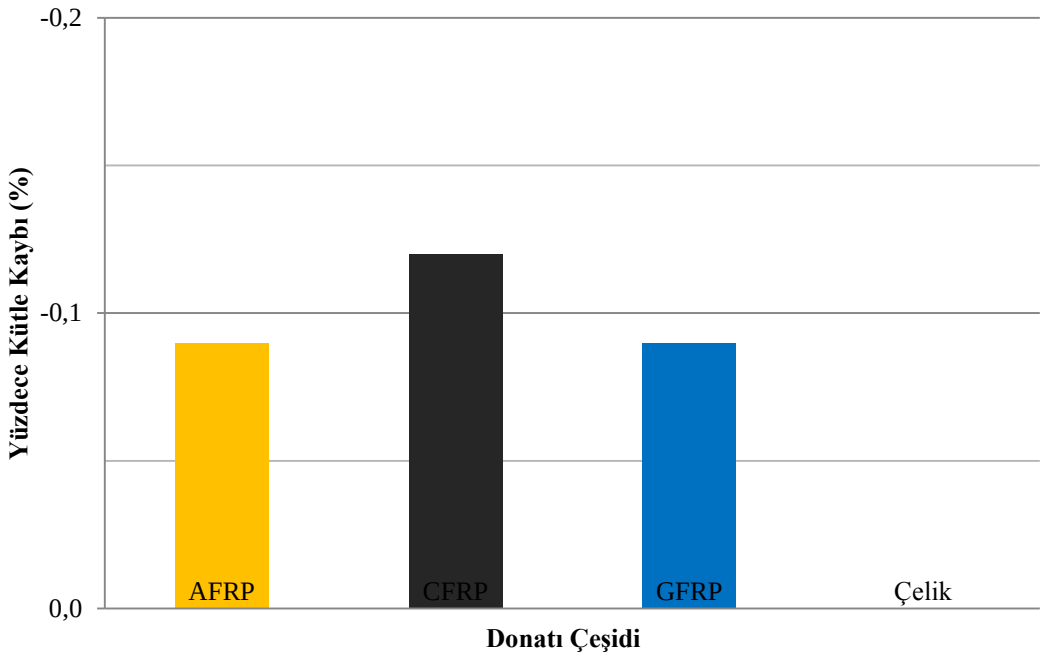
Tablo 5.18: Soğuk hava koşullandırması sonucu numunelerin kütleleri

Numunenin Adı	Kütle (gr)
A31	28,00
A32	27,82
A33	27,78
C31	30,19
C32	30,54
C33	31,51
G31	38,33
G32	37,87
G33	38,03
D31	163,59
D32	167,64
D33	157,48

Numunelerin şartlandırılmadan önceki ağırlıkları m_1 (Tablo 5.17), etüvden çıkarıldıktan sonraki ağırlıkları m_2 (Tablo 5.18) olmak üzere yüzdece kütle kaybı denklem 5.2'deki gibi hesaplanmış olup Tablo 5.19'da verilmiştir ve grafiksel gösterimi Şekil 5.57'de gösterilmiştir.

Tablo 5.19: Soğuk hava koşullandırması sonucu yüzdelik kütle kaybı.

Numunenin Adı	M_1 (gr)	M_2 (gr)	Kütle kaybı (%)	Ortalama kütle kaybı (%)
A31	28,00	28,00	0	
A32	27,79	27,82	-0,11	-0,09
A33	27,73	27,78	-0,18	
C31	30,15	30,19	-0,13	
C32	30,51	30,54	-0,09	-0,12
C33	31,47	31,51	-0,12	
G31	38,32	38,33	-0,02	
G32	37,82	37,87	-0,13	-0,09
G33	37,98	38,03	-0,13	
D31	163,67	163,59	0,05	
D32	167,58	167,64	-0,04	0
D33	157,43	157,48	-0,03	



Şekil 5.57: Soğuk hava koşullandırması sonucu kütle kaybı oranı (%).

Numunelerin koşullandırıldıktan sonraki kuruma işlemi, numuneler yüksek sıcakla temasını engellemek için etüvde gerçekleştirilmemiştir. Amaç deneyin salt soğuk havada şartlarını sağlayarak sonuçları almaktır. Deney numuneleri birkaç gün oda sıcaklığında dinlene dinlene kurumuştur. Bu nedenle numunelerin içerisinde bir miktar nem kalmıştır. Bu nedenle grafiksel olarak net sonuçlar verilirken kabul olarak numunelerde kütlesel değişim olmadığı kabul edilebilir.

5.4.2. Fiziksel hasarın belirlenmesi ve mikroskop görüntüleri

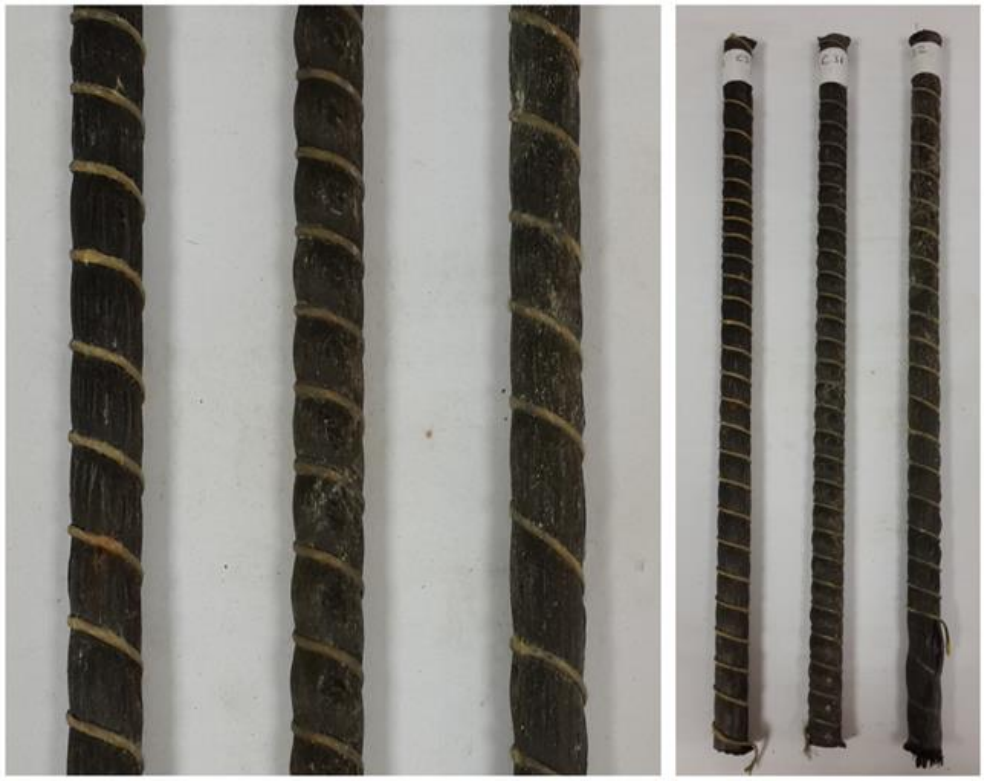
Düşük sıcaklıkta koşullandırılan numunelerde oluşan yüzeysel kusurlar ve bu kusurların daha derin görüntüleri bu bölüm kapsamında yer almaktadır.

5.4.2.1. Fiziksel hasar

Yüksek sıcaklıkta malzemelerde genelde genleşme davranışı görülürken düşük sıcaklıkta malzemelerde genel olarak büzülme davranışı görülmektedir. Büzülen malzemelerde doğal olarak boşluklar azalmaktadır. Şekil 5.58, Şekil 5.59, Şekil 5.60 ve Şekil 5.61'de görülen donatı numunelerinin hiç birinde epokside ve liflerde zarar görülmemiştir.



Şekil 5.58: AFRP donatının soğuk hava ile koşullandırılmasından sonraki hali



Şekil 5.59: CFRP donatının soğuk hava ile koşullandırılmasından sonraki hali



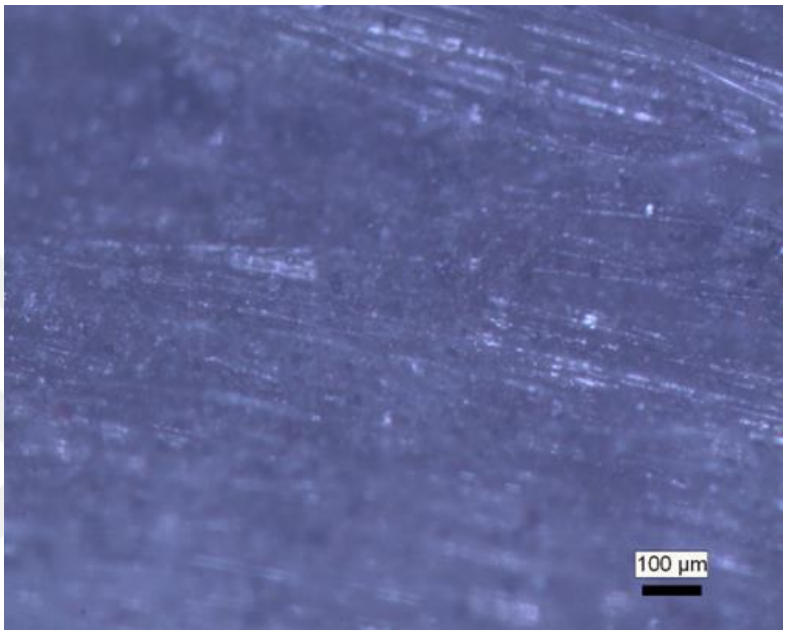
Şekil 5.60: GFRP donatının soğuk hava ile koşullandırılmasından sonraki hali



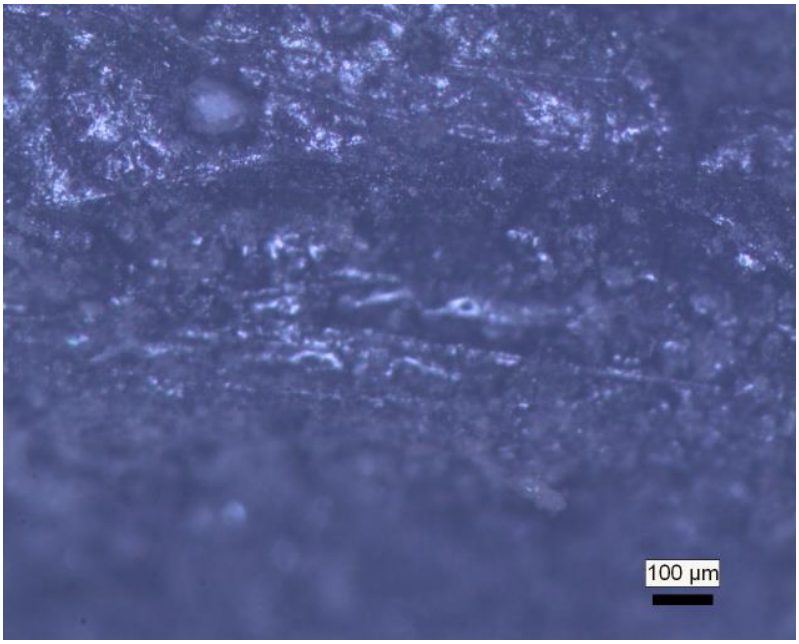
Şekil 5.61: Çelik donatının soğuk hava ile koşullandırılmasından sonraki hali

5.4.2.2. Mikroskobik görüntüleri

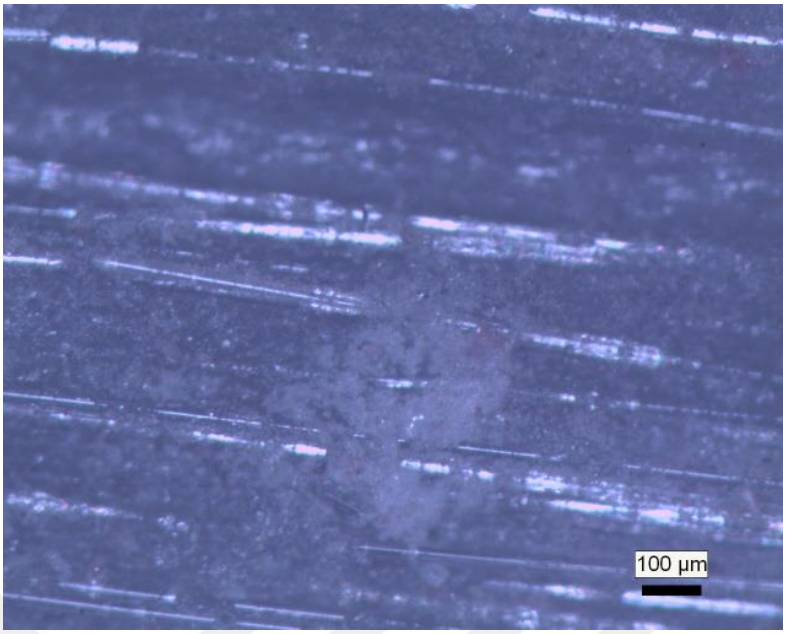
Bölüm 5.4.2.1'de verilen görüntülerde donatılarda görülen en zayıf bölgelerin mikroskobik görüntüleri lif türlerine ayrılarak Şekil 5.62, Şekil 5.63, Şekil 5.64 ve Şekil 5.65'de verilmiştir. Numunelerde herhangi bir bozulma görülmemiştir. Lifler ve dış tabaka koşullandırmaya girmeden önceki halini korumuştur.



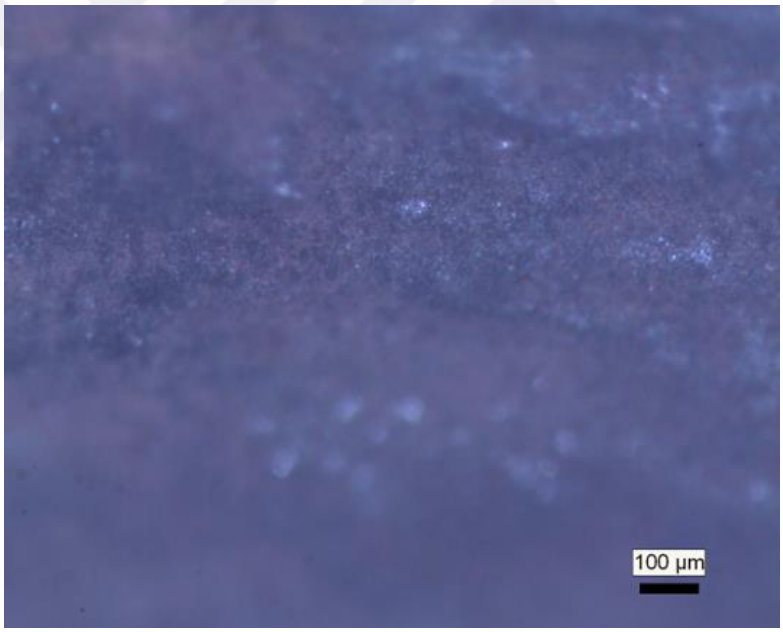
Şekil 5.62: Soğuk hava ile koşullandırılmış AFRP donatıların mikroskobik görüntüsü



Şekil 5.63: Soğuk hava ile koşullandırılmış CFRP donatıların mikroskobik görüntüsü



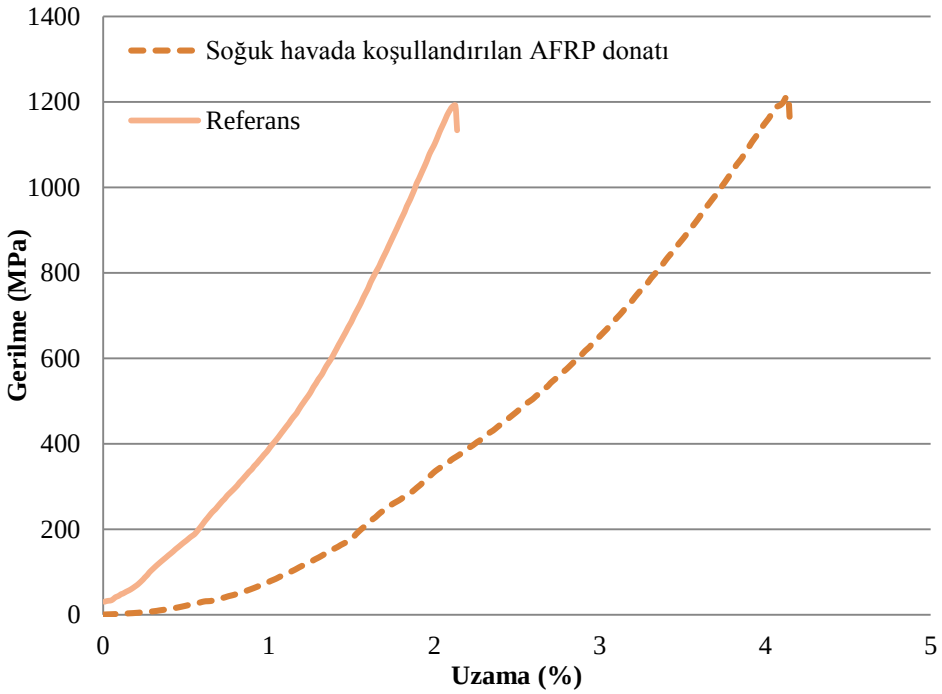
Şekil 5.64: Soğuk hava ile koşullandırılmış GFRP donatıların mikroskobik görüntüsü



Şekil 5.65: Soğuk hava ile koşullandırılan Çelik donatıların mikroskobik görüntüsü

5.4.3. Koşullandırılmış numunelerin çekme davranışları

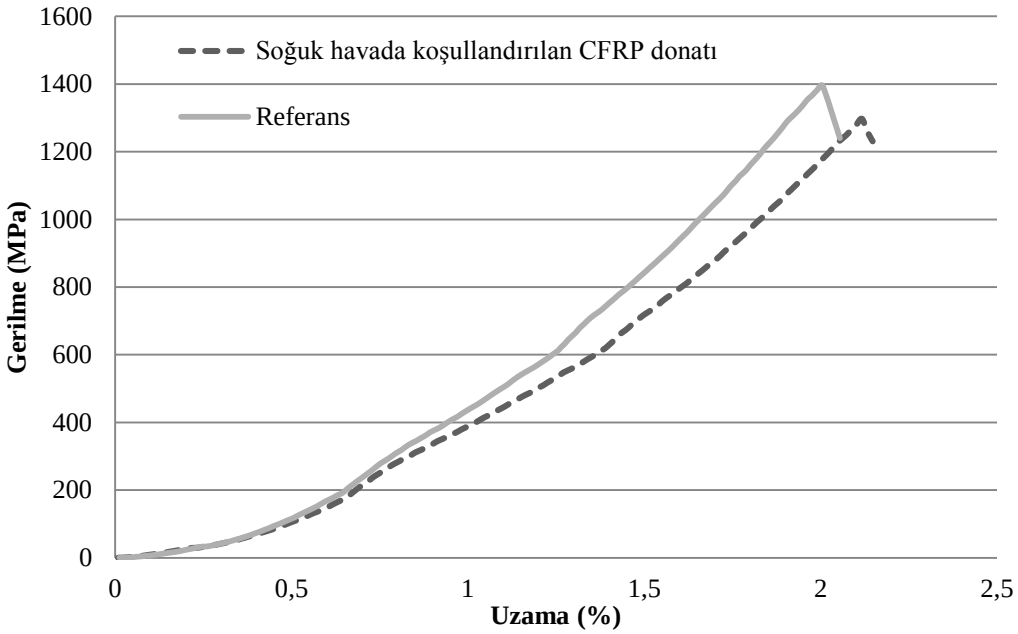
-37˚C havada koşullandırılan malzemelerin gerilme-sehim grafikleri Şekil 5.66, Şekil 5.68, Şekil 5.70 ve Şekil 5.72'de verilmiştir. Bazı numunelerin çekilmeden önceki ve çekildikten sonraki görselleri Şekil 5.67, Şekil 5.69, Şekil 5.71 ve Şekil 5.73'de verilmiştir.



Şekil 5.66: Referans AFRP donatıları ile soğuk hava ortamında koşullandırılmış AFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı



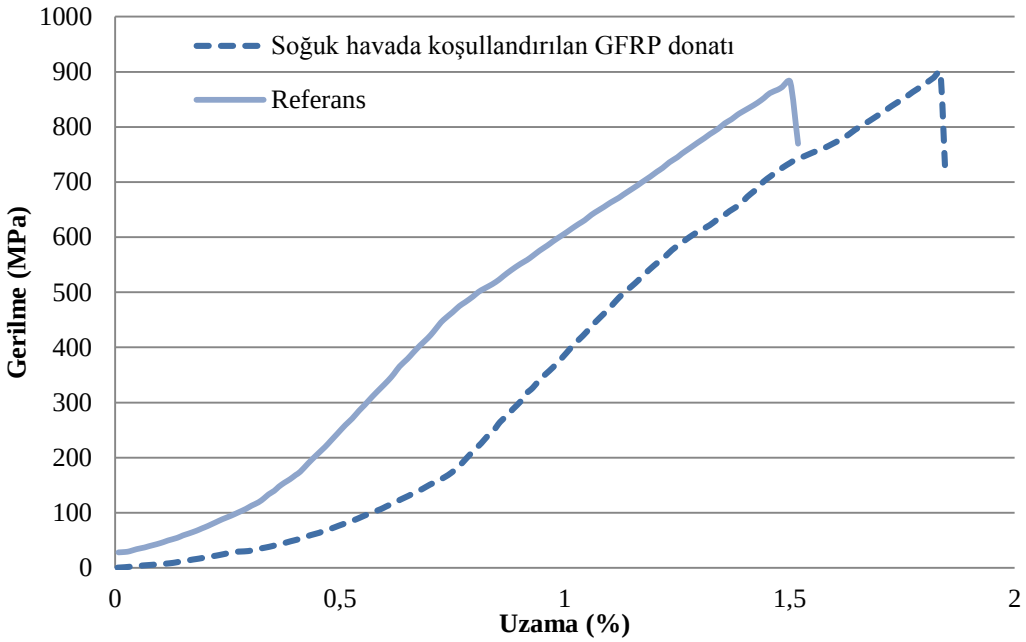
Şekil 5.67: Soğuk hava ile koşullanmaya maruz kalmış AFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali



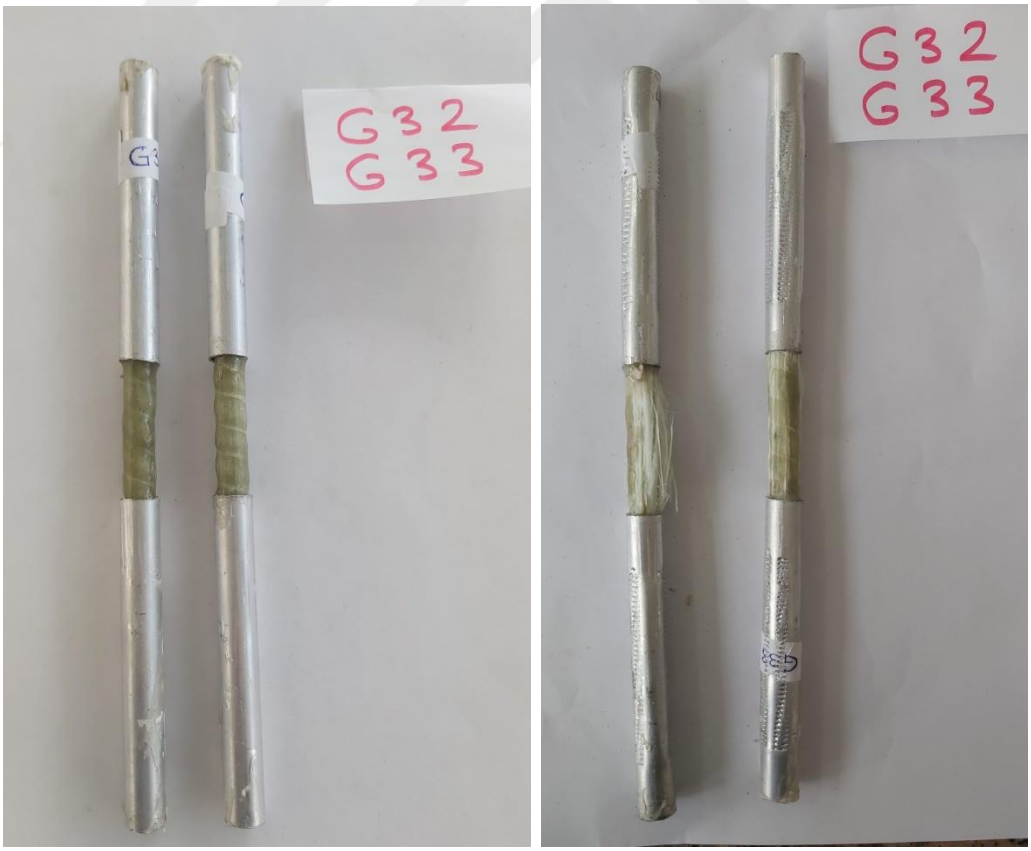
Şekil 5.68: Referans CFRP donatıları ile soğuk hava ortamında koşullandırılmış CFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı



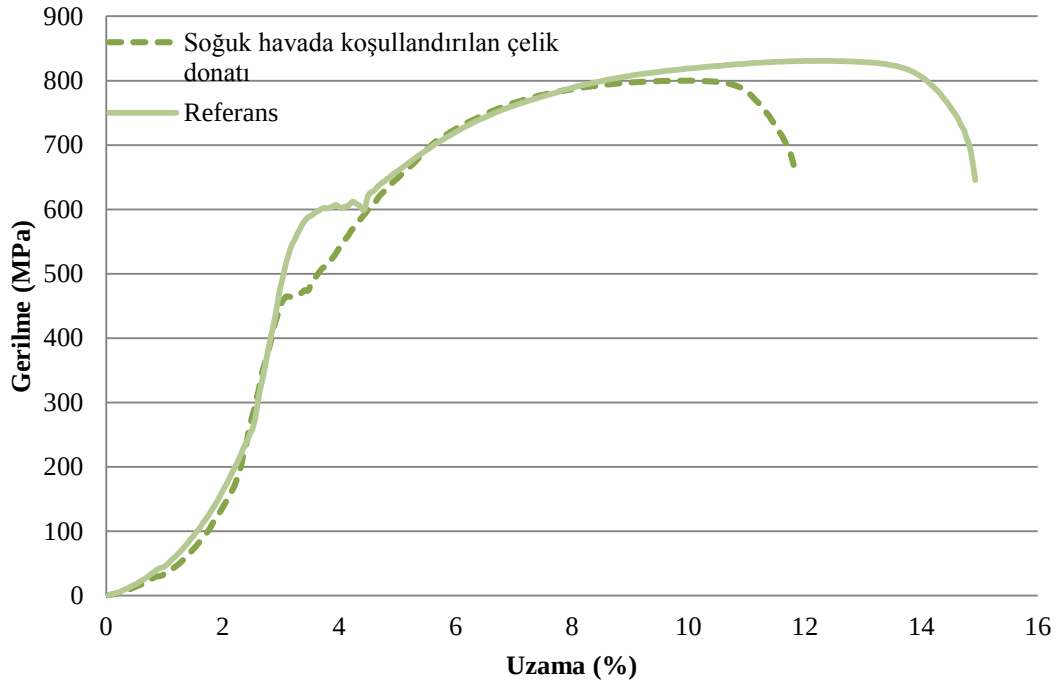
Şekil 5.69: Soğuk hava ile koşullanmaya maruz kalmış CFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali



Şekil 5.70: Referans GFRP donatıları ile soğuk hava ortamında koşullandırılmış GFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı



Şekil 5.71: Soğuk hava ile koşullanmaya maruz kalmış GFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali



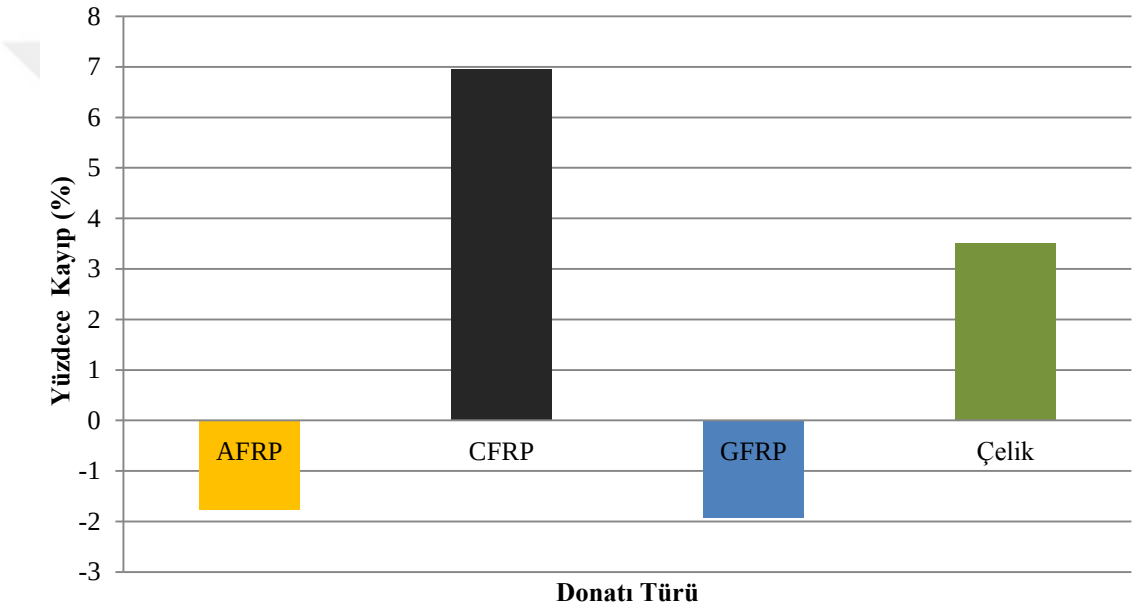
Şekil 5.72: Referans Çelik donatıları ile soğuk hava ortamında koşullandırılmış Çelik donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı



Şekil 5.73: Soğuk hava ile koşullanmaya maruz kalmış Çelik donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali

Tablo 5.20: Donatıların yüzdece **dayanım** kayıpları

Donatı Cinsi	Ortalama Referans Dayanımı (MPa)	Koşullandırma Sonucu Ortalama Dayanım (Mpa)	Yüzdece Dayanım Kaybı (%)
AFRP	1191	1212	-1,76
CFRP	1394	1297	6,96
GFRP	881	898	-1,93
Çelik	829	800	3,49



Şekil 5.74: Donatıların yüzdece dayanım kayıplarının grafiksel gösterimi.

Soğuk hava ortamı ile koşullandırılmış donatı çeşitlerindeki dayanım kayıpları Tablo 5.20'de verilmiş olup tablonun şekilsel gösterimi de Şekil 5.74'de verilmiştir. Tablo ve grafiğe bakıldığında AFRP ve GFRP donatılarda birbirlerine yakın derecede dayanım artışı olurken, CFRP donatıda ve çelik donatıda dayanım kaybı görülmüştür. Ancak genel tabloya bakıldığında en kötü senaryoya sahip CFRP donatılar bile %93 oranında dayanımını tutmayı başarmıştır. Bu durumda soğuk hava koşullarında FRP donatıların performansının ve durabilite yeteneklerinin yüksek olduğunu söylemek mümkündür.

5.5. Alkali Çözelti ile Koşullandırılmış Donatıların Sonuçları

Alkali çözeltiyle koşullandırılan durabilite deneyi Amerikan ve Kanada standartlarına geçmiştir. FRP donatıların betonun yüksek pH'lı gözenek suyuyla uyumu konusunda bu çalışma önem arz etmektedir. Deneyde çözeltinin pH aralığı sürekli kontrol edilerek sabit tutulmuştur. 156 gün boyunca alkali koşullandırmada AFRP, CFRP, GFRP donatılar ve 154 gün de çelik donatılar bekletilmiştir. Deney süresince çözeltide pH değişimi ve renk değişimi olmamıştır.

Alkali çözelti koşullandırılmasına bırakılan numunelerin; su emmesi, kütle kaybı, mikroskop görüntüleri- fiziksel hasarı ve son olarak çekme deneyi sonuçları verilecektir.

5.5.1. Su emme sonuçları

Alkali çözelti koşullandırılmasındaki numuneler için isimlendirmeler AFRP donatılar için A41,A42,A43; CFRP donatılar için C41,C42,C43; GFRP donatılar için G41,G42,G43 ve çelik donatılar için D41,D42,D43 şeklindedir. Numuneler koşullandırmaya girmeden önceki kütleleri Tablo 5.21'de gösterilmiştir.

Tablo 5.21: Alkali çözeltisi ile koşullandırılmasından önceki donatı kütleleri

Numunenin Adı	Kütle (kg)
A41	27,3
A42	27,7
A43	27,8
C41	29,8
C42	31,3
C43	31,4
G41	38,0
G42	38,4
G43	38,3
D41	171,4
D42	160,3
D43	162,6

Numuneler koşullandırıldıktan sonraki doygun kütleleri Tablo 5.22'de verilmiştir.

Tablo 5.22: Alkali çözelti ile koşullandırmasından sonraki doygun kütleleri.

Numunenin Adı	Kütle (kg)
A41	28,8
A42	29,5
A43	29,6
C41	31,1
C42	32,7
C43	32,1
G41	38,6
G42	39,3
G43	39,0
D41	171,6
D42	160,9
D43	163,2

Alkali çözeltiden çıkarılan numuneler bir miktar çökeltiden dolayı oluşan atık maddenin yüzeyinden temizlenmesi için musluk suyuyla yıkanmıştır. Numuneler kurumaya bırakılarak kuru ağırlık elde edilmiştir. Değerler Tablo 5.23'de verilmiştir.

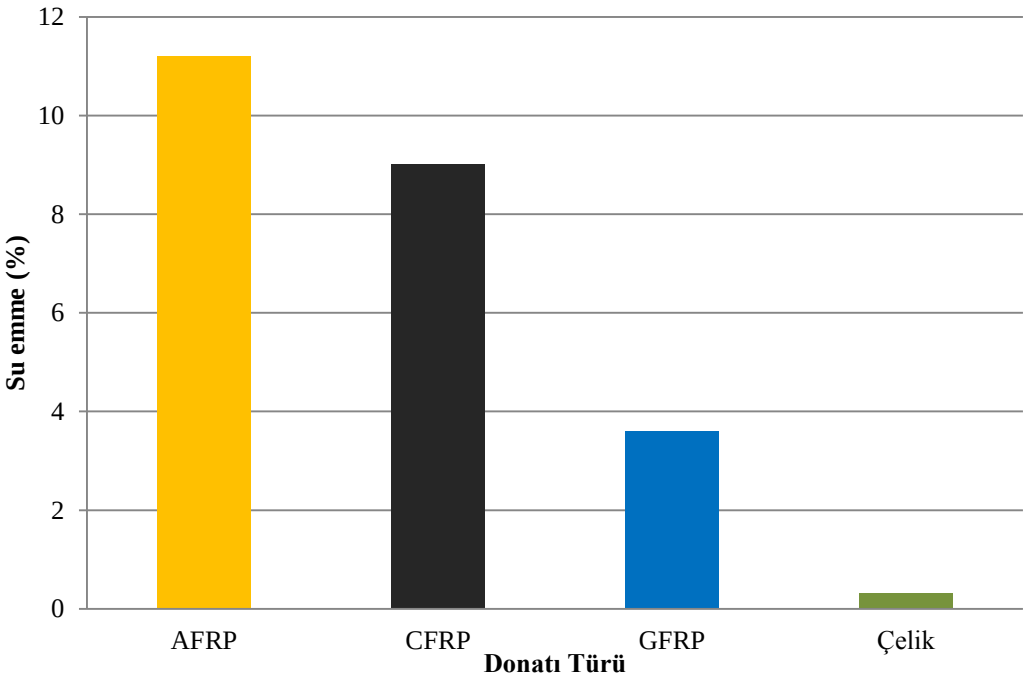
Tablo 5.23: Alkali çözelti ile koşullandırılmasından sonraki kuru kütle.

Numunenin Adı	Kütle (kg)
A41	26,1
A42	26,5
A43	26,5
C41	28,3
C42	29,8
C43	29,9
G41	37,5
G42	37,6
G43	37,8
D41	171,4
D42	160,4
D43	162,5

Alkali çözelti için kütlece emme oranı (%) hesabı denklem 5.1'den yararlanılarak bulunmuş ve hesaplar Tablo 5.24'de verilmiş olup grafiksel gösterimi Şekil 5.75'de verilmiştir.

Tablo 5.24: Alkali çözelti ile koşullandırılan numunelerin yüzdece su emme oranı (%)

Numunenin Adı	M_k (gr)	M_s (gr)	Çözeltiyi emme oranı (%)	Ortalama
A41	26,1	28,8	10,2	
A42	26,5	29,5	11,6	11,2
A43	26,5	29,6	11,7	
C41	28,3	31,1	9,8	
C42	29,8	32,7	9,7	9,0
C43	29,9	32,1	7,6	
G41	37,5	38,6	3,0	
G42	37,6	39,3	4,4	3,6
G43	37,8	39,0	3,2	
D41	171,4	171,6	0,1	
D42	160,4	160,9	0,3	0,3
D43	162,5	163,2	0,4	



Şekil 5.75: Alkali çözelti ile koşullandırma sonucu kütlece su emme oranı grafiği.

Su emme sonuçlarının geneline bakıldığında tüm deneylerde sıranın hiç bozulmadığı görülmüştür. AFRP donatı en fazla su emen donatı çeşidi olarak ilk sırayı alırken onu takip ederek ikinci sırayı alan donatı ise CFRP donatı olmuştur. GFRP donatı ise üç FRP donatı türünden en avantajlı olanıdır.

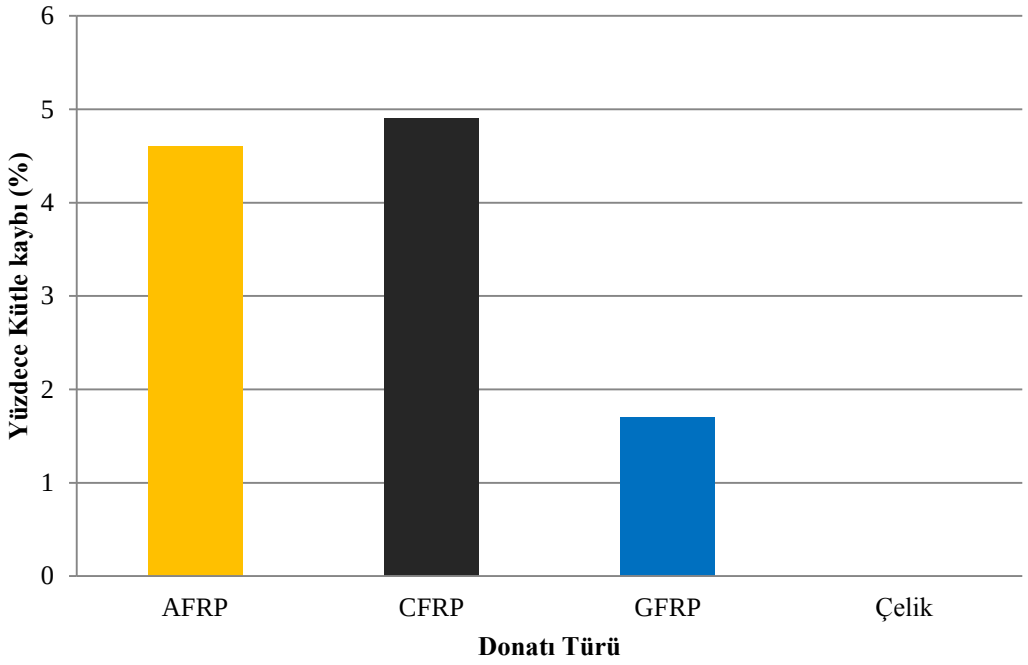
5.5.2. Kütle kaybı sonuçları

Numunelerin koşullandırılmadan önceki ağırlıkları m_1 (Tablo 5.21), kurutulduktan sonraki ağırlıkları m_2 (Tablo 5.23) olmak üzere yüzdece kütle kaybı denklem 5.2'deki gibi hesaplanmış olup Tablo 5.25'de verilmiştir ve grafiksel gösterimi Şekil 5.76'da gösterilmiştir.

Tablo 5.25: Alkali çözelti ile koşullandırması sonucu yüzdece (%) kütle kaybı

Numunenin Adı	M_1 (gr)	M_2 (gr)	Kütle kaybı (%)	Ortalama kütle kaybı (%)
A41	27,3	26,1	4,2	
A42	27,7	26,5	4,5	4,6
A43	27,8	26,5	4,9	
C41	29,8	28,3	5,2	
C42	31,3	29,8	4,8	4,9
C43	31,4	29,9	4,7	
G41	38,0	37,5	1,5	
G42	38,4	37,6	2,2	1,7
G43	38,3	37,8	1,5	
D41	171,4	171,4	0,0	
D42	160,3	160,4	-0,1	0,0
D43	162,6	162,5	0,1	

Deney sonuçlarına bakıldığında çelik donatıda kütle kaybı gerçekleşmemiştir. FRP donatılar arasında kütle kaybı en az olan donatı GFRP donatıdır. CFRP donatı ve AFRP donatılarda oluşan kütle kayıpları ise birbirine yakındır. Çalışma yapılan diğer ortamlarda en fazla kütle kayıpları AFRP donatılarda görülürken alkali ortam koşulunda en fazla kütle kaybı CFRP donatılarda meydana gelmiştir.



Şekil 5.76: Alkali çözelti ile koşullandırma sonucu yüzdece kütle kaybı (%) grafiği.

5.5.3. Fiziksel hasarın belirlenmesi ve mikroskop görüntüleri

Düşük sıcaklıkta koşullandırılan numunelerde oluşan yüzeysel kusurlar ve bu kusurların daha derin görüntüleri bu bölüm kapsamında yer almaktadır.

5.5.3.1. Fiziksel hasar

Alkali şartlandırılma ortamında en çok yüzeysel hasar gören donatı çeşidi CFRP donatılardır (Şekil 5.78). Donatılarda renk değişimi çok az miktarda olmasına rağmen dış kısımdaki liflerin çoğu zarar görmüş ve saçaklanmıştır. Ayrıca sarmal donatılarda kullanılan sarmallarda açılma fazlaca gözlemlenmiştir. AFRP donatılarda Şekil 5.77'de görüldüğü gibi koruyucu tabaka tamamen kalkmıştır. Liflerde hafif açılmalar gözlemlenmiştir. GFRP donatılarda Şekil 5.79'da görüldüğü gibi koruyucu yüzey kalkmıştır ve liflerde hafif açılmalar görülmüştür. Liflerdeki hasar AFRP donatılar ve CFRP donatılara oranla daha azdır. Çelik donatılar şekil 5.80'de görüldüğü gibi hasar görmemiş aksine daha temiz bir hale gelmiştir.



Şekil 5.77: AFRP donatının alkali çözelti ile koşullandırılmasından sonraki hali



Şekil 5.78: CFRP donatının alkali çözelti ile koşullandırılmasından sonraki hali



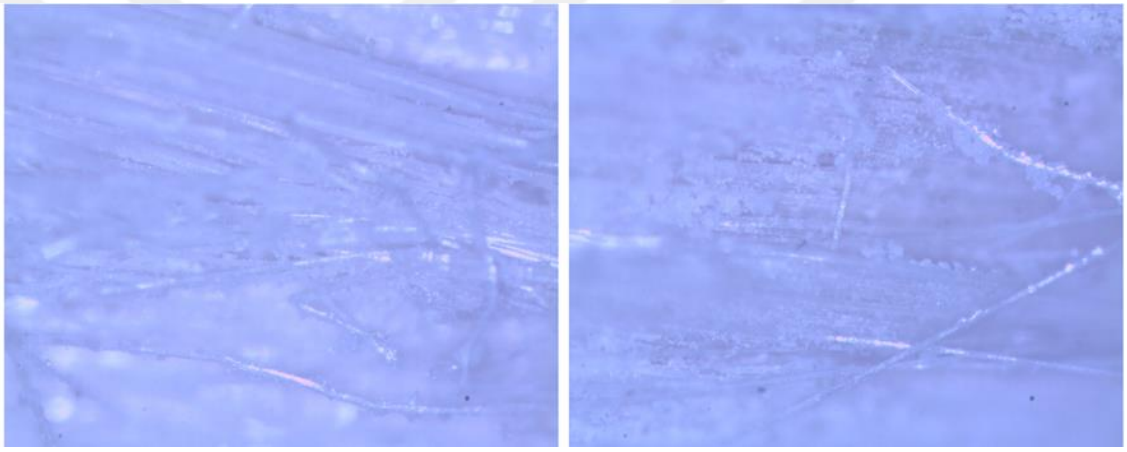
Şekil 5.79: GFRP donatının alkali çözelti ile koşullandırılmasından sonraki hali



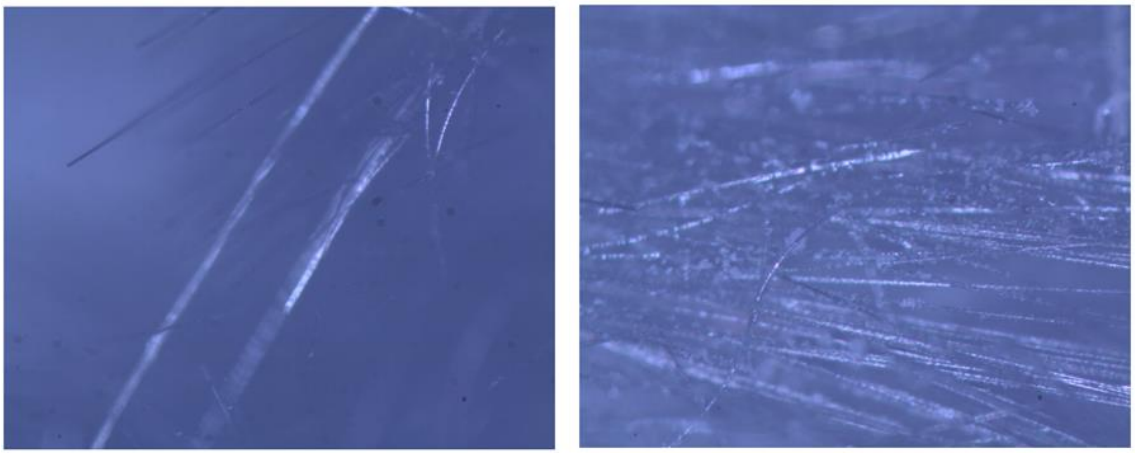
Şekil 5.80: Çelik donatının alkali çözelti ile koşullandırılmasından sonraki hali

5.5.3.2. Mikroskobik görüntüleri

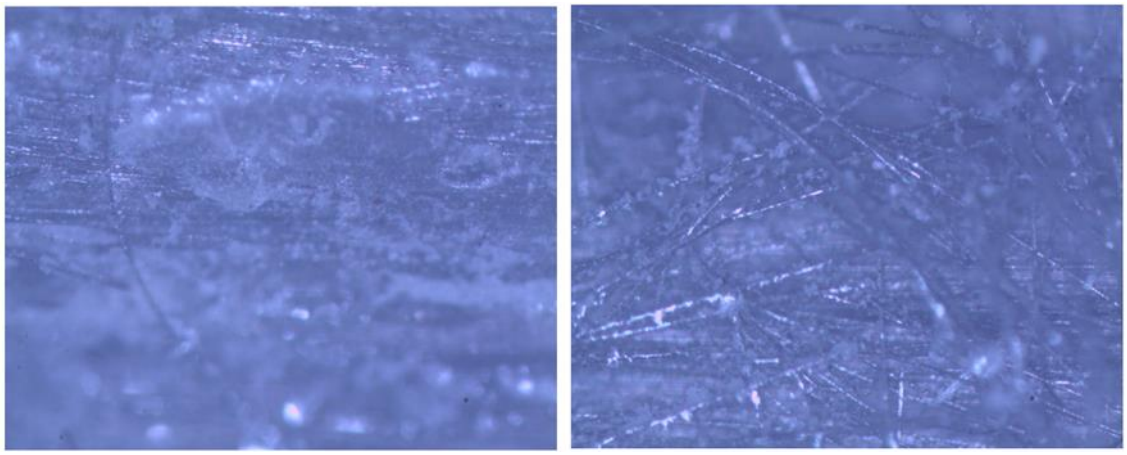
Donatılarda görülen en zayıf kesimlerin mikroskobik görüntüleri alınmıştır. Şekil 5.81'de AFRP donatıların liflerinde kopmalar meydana gediği ve sürekliliğin bozulduğu görülmüştür. Şekil 5.82, Şekil 5.83 ve Şekil 5.84'e bakıldığında lifler kalıntılardan nazikçe temizlenmiş olmasına rağmen temizlenemeyen kalıntıların diğer liflere oranla daha fazla olduğu görülmüştür. Çünkü diğer liflere oranla daha fazla kopmalar ve saçaklanmalar meydana gelmiştir. Temizleme işlemi narin yapıldığından derinlerde kalan tortular temizlenememiştir. Şekil 5.85'de GFRP liflerinin sürekliliğinde sorun olmadığı görülmüştür. Şekil 5.86'da çelik donatının alkali çözelti sayesinde daha pürüzsüz bir yüzeye sahip oluğu görülmüştür.



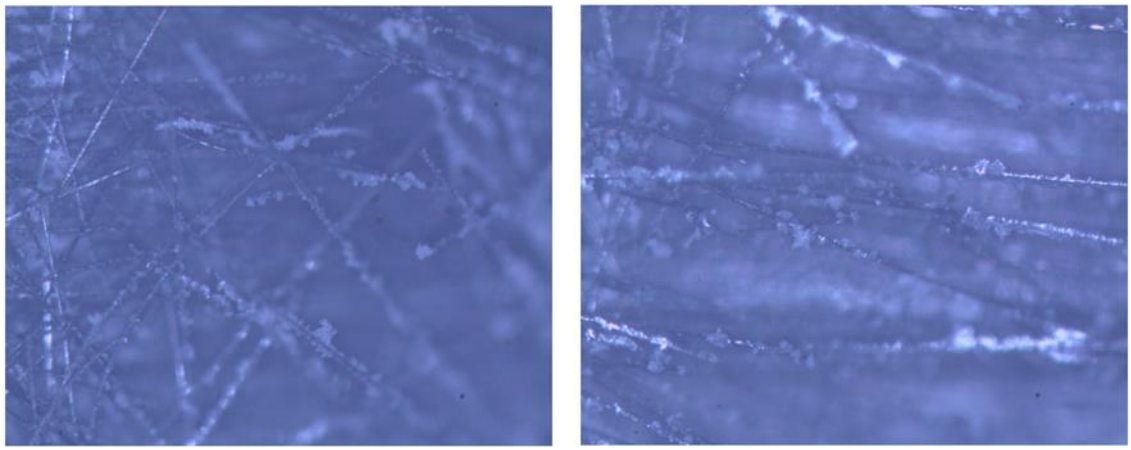
Şekil 5.81: Alkali çözelti ile koşullandırılan AFRP donatıların mikroskobik görüntüsü



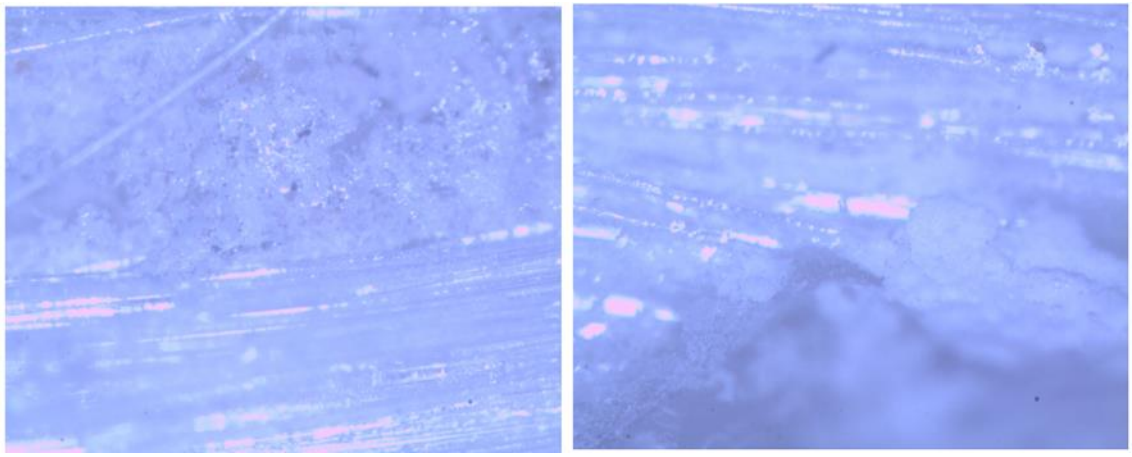
Şekil 5.82: Alkali çözelti ile koşullandırılan CFRP donatıların mikroskobik görüntüsü



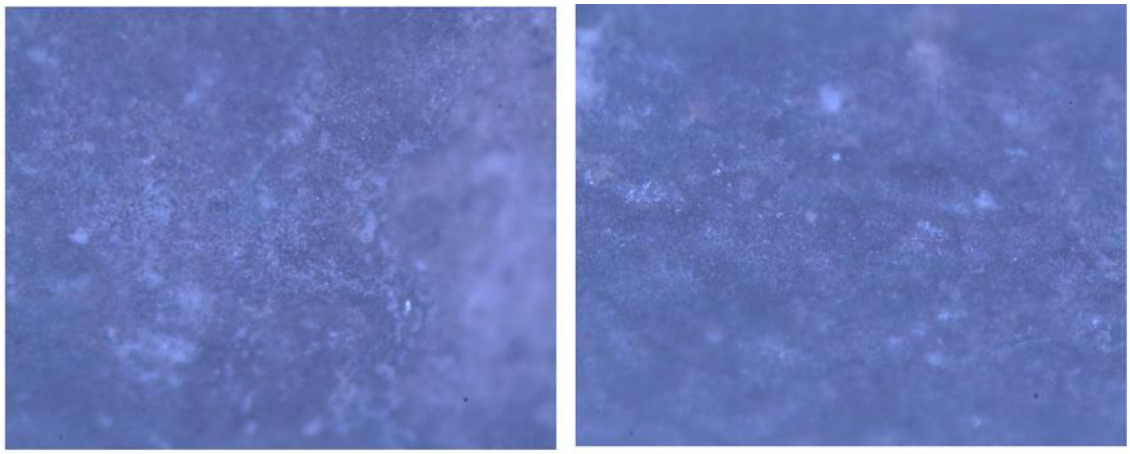
Şekil 5.83: Alkali çözelti ile koşullandırılan CFRP donatıların mikroskobik görüntüsü



Şekil 5.84: Alkali çözelti ile koşullandırılan CFRP donatıların mikroskobik görüntüsü



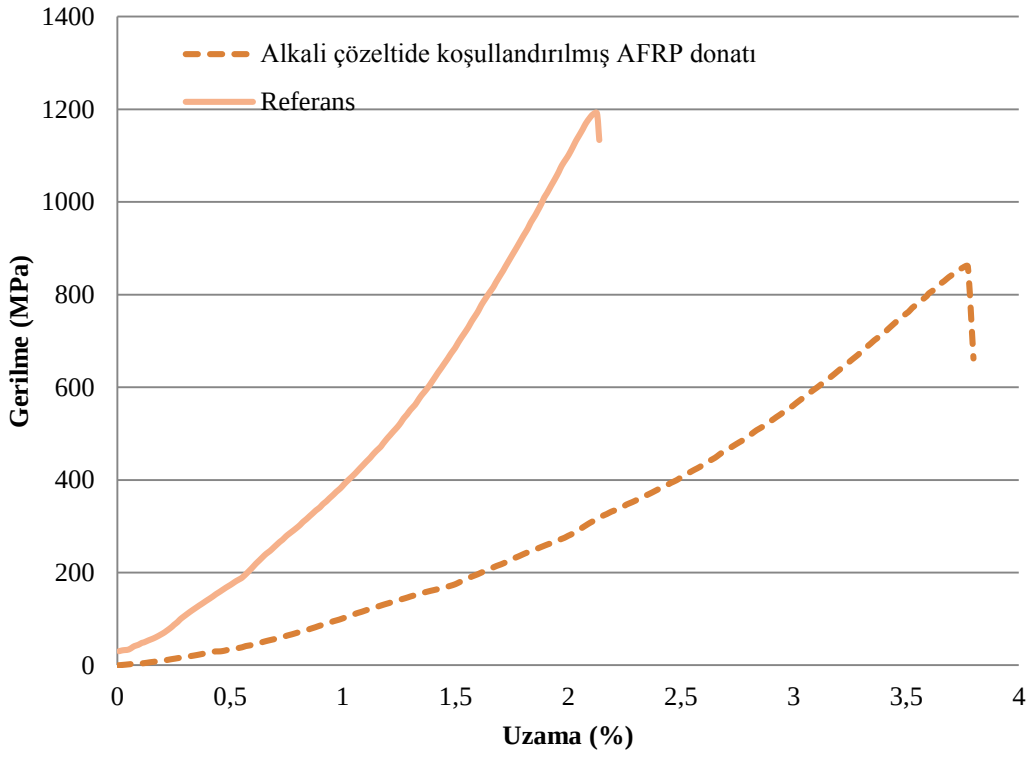
Şekil 5.85: Alkali çözelti ile koşullandırılan GFRP donatıların mikroskobik görüntüsü



Şekil 5.86: Alkali çözelti ile koşullandırılan çelik donatıların mikroskobik görüntüsü

5.5.4. Koşullandırılmış numunelerin çekme davranışları

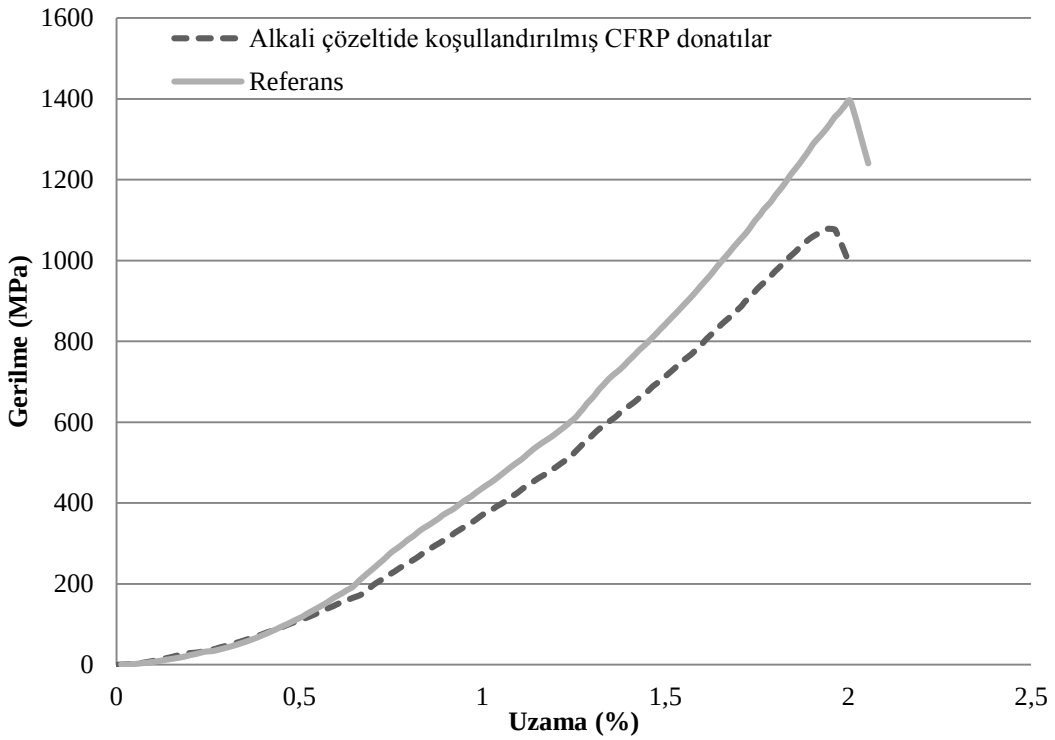
Alkali çözeltide koşullandırılan malzemelerin gerilme-sehim grafikleri Şekil 5.87, Şekil 5.89, Şekil 5.91 ve Şekil 5.93'de verilmiştir. Bazı numunelerin çekilmeden önceki ve çekildikten sonraki görselleri Şekil 5.88, Şekil 5.90, Şekil 5.92 ve Şekil 5.94'de verilmiştir.



Şekil 5.87: Referans AFRP donatıları ile alkali çözeltide koşullandırılmış AFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı



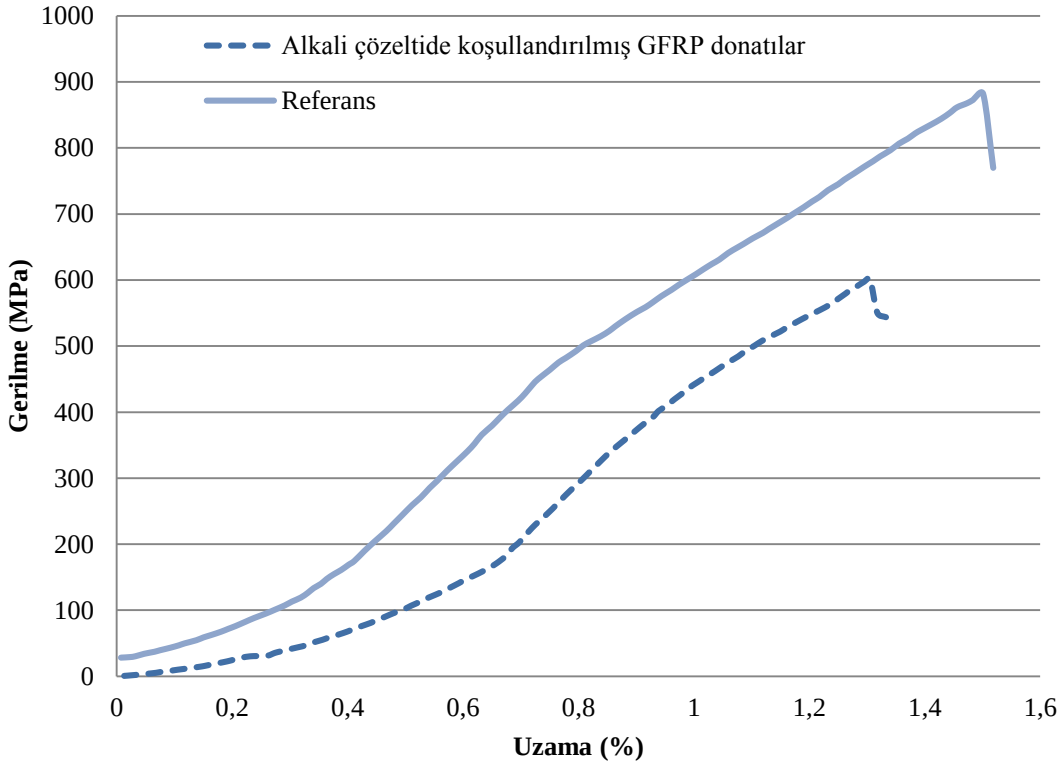
Şekil 5.88: Alkali çözelti ile koşullanmaya maruz kalmış AFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali



Şekil 5.89: Referans CFRP donatıları ile alkali çözeltide koşullandırılmış CFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı



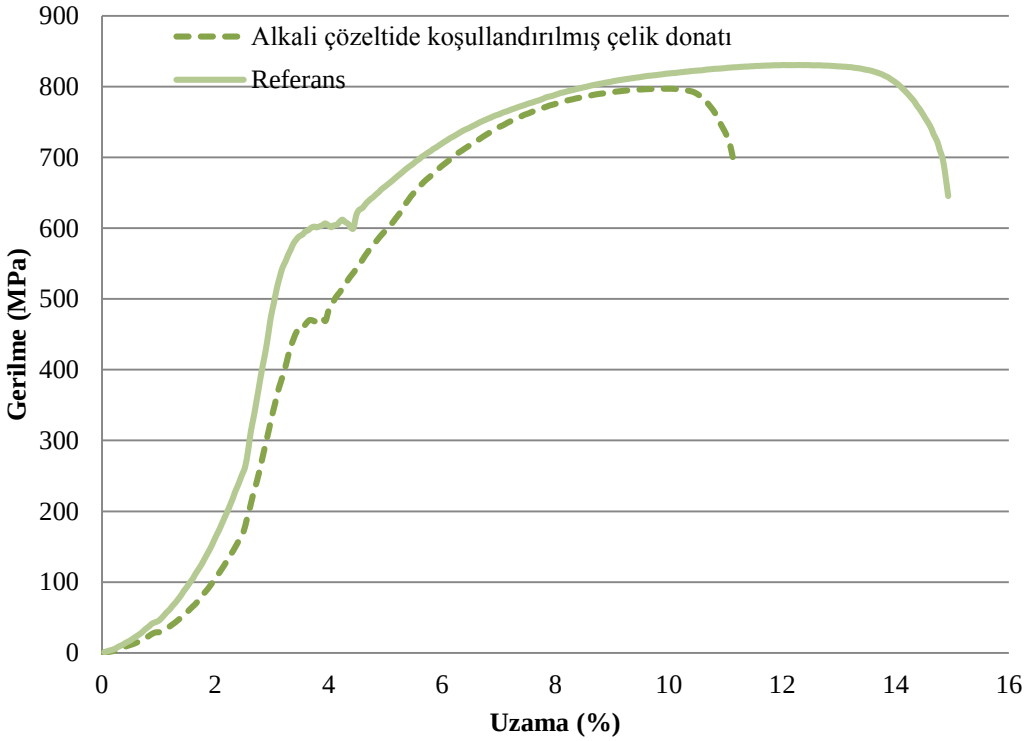
Şekil 5.90: Alkali çözelti ile koşullanmaya maruz kalmış CFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali



Şekil 5.91: Referans GFRP donatıları ile alkali çözeltide koşullandırılmış GFRP donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı



Şekil 5.92: Alkali çözelti ile koşullanmaya maruz kalmış GFRP donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali



Şekil 5.93: Referans çelik donatıları ile alkali çözeltide koşullandırılmış çelik donatıların ortalama Gerilme-Uzama diyagramı

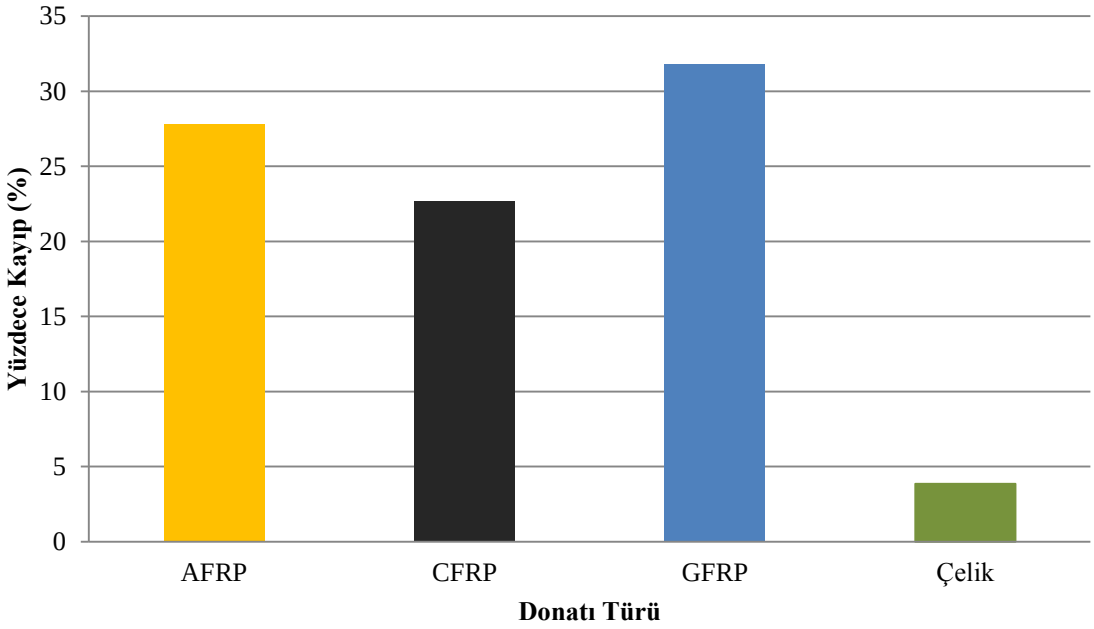


Şekil 5.94: Alkali çözelti ile koşullanmaya maruz kalmış çelik donatıların çekme deneyinden önceki ve sonraki hali

Alkali çözelti ile koşullandırılmış donatı çeşitlerindeki dayanım kayıpları Tablo 5.26'da verilmiş olup tablonun şekilsel gösterimi de Şekil 5.95'de verilmişti

Tablo 5.26: Donatıların yüzdece dayanım kayıpları

Donatı Cinsi	**Ortalama Referans Dayanımı (MPa)**	**Koşullandırma Sonucu Ortalama Dayanım (Mpa)**	**Yüzdece Dayanım Kaybı (%)**
AFRP	1191	860	27,79
CFRP	1394	1078	22,66
GFRP	881	601	31,78
Çelik	829	797	3,86



Şekil 5.95: Donatıların yüzdece dayanım kayıplarının grafiksel gösterimi.

Alkali çözeltide koşullandırılmış FRP donatılarda yüksek oranda dayanım kayıpları yaşanmıştır. Özellikle GFRP donatılar diğer donatılara oranla daha az su emmelerine ve daha az kütle kaybetmelerine rağmen en fazla dayanım kaybeden donatı türüdür. FRP donatılar arasında en iyi performansı ise CFRP donatılar göstermiştir. Literatür çalışmalarına bakıldığında alkali çözelti içerisinde GFRP donatılarda dayanım kaybı fazla olurken, CFRP donatılar güçlü performans özellikleri göstermiştir. Bu tez çalışmasının literatürde yapılan diğer çalışmalara benzerlik gösterdiği söylenebilir.

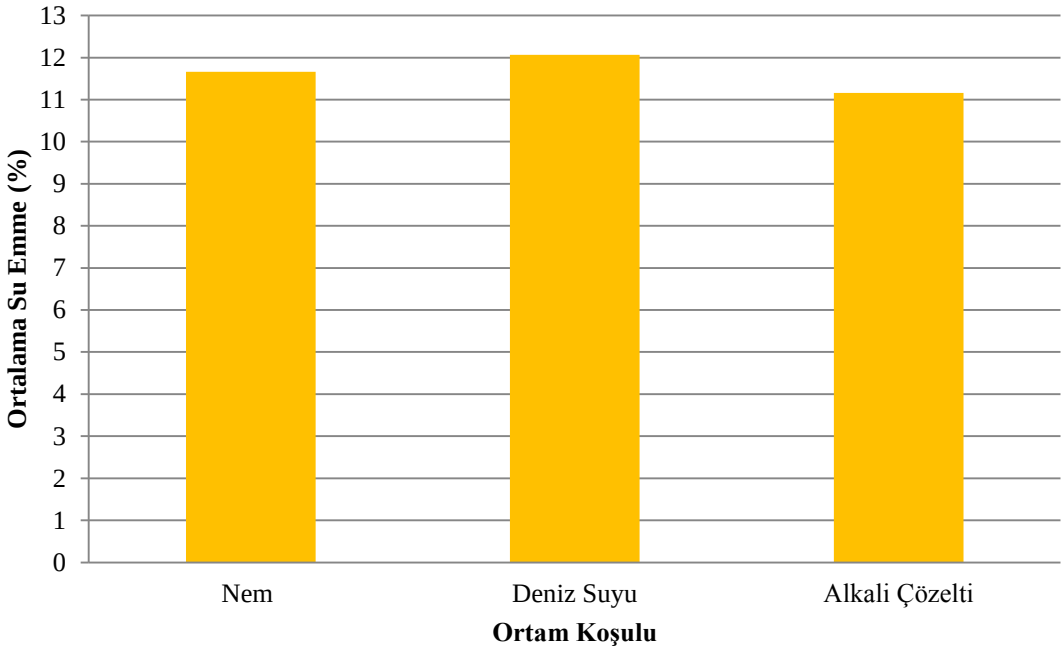
Alkali koşullarda çelik donatıya en iyi alternatif donatı CFRP donatı olsa dahi uzun vadede dayanımının %22'sini kaybedeceği görülmektedir. Bu dayanım kaybı düşünüldüğünde alternatif donatı türü olup olamayacağı şüphelidir.

5.6. Donatıların Ortam Koşuluna Göre Karşılaştırılması

Önceki bölümlerde ortam koşullarında donatılardan alınan sonuç verilerek bir ortam koşuluna göre tüm donatı çeşitlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu bölümde her bir donatının tüm ortam koşullarındaki sonuçları karşılaştırılacaktır.

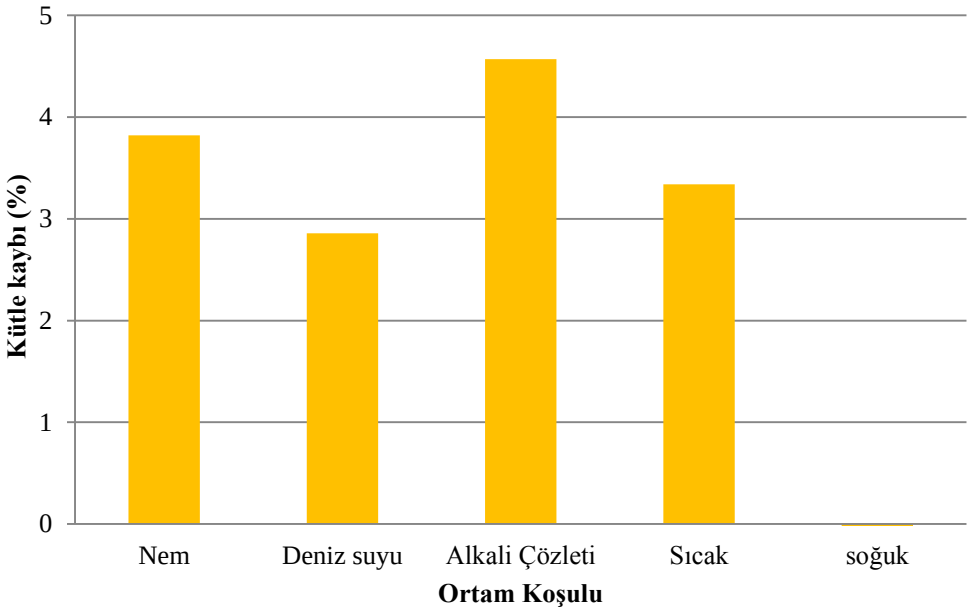
5.6.1. AFRP donatı

AFRP donatıların alkali çözelti, deniz suyu ve nem ortamlarında koşullandırıldıktan sonraki yüzdece kütlesel su emme oranları Şekil 5.96'da verilmiştir. Her 3 ortam koşulunda da donatının su emme oranı birbirine çok yakındır. Bu durumda aramid takviyeli donatılarda su emme oranı çok yüksektir ve sıvının içeriğinin fark etmediği düşünülebilir.

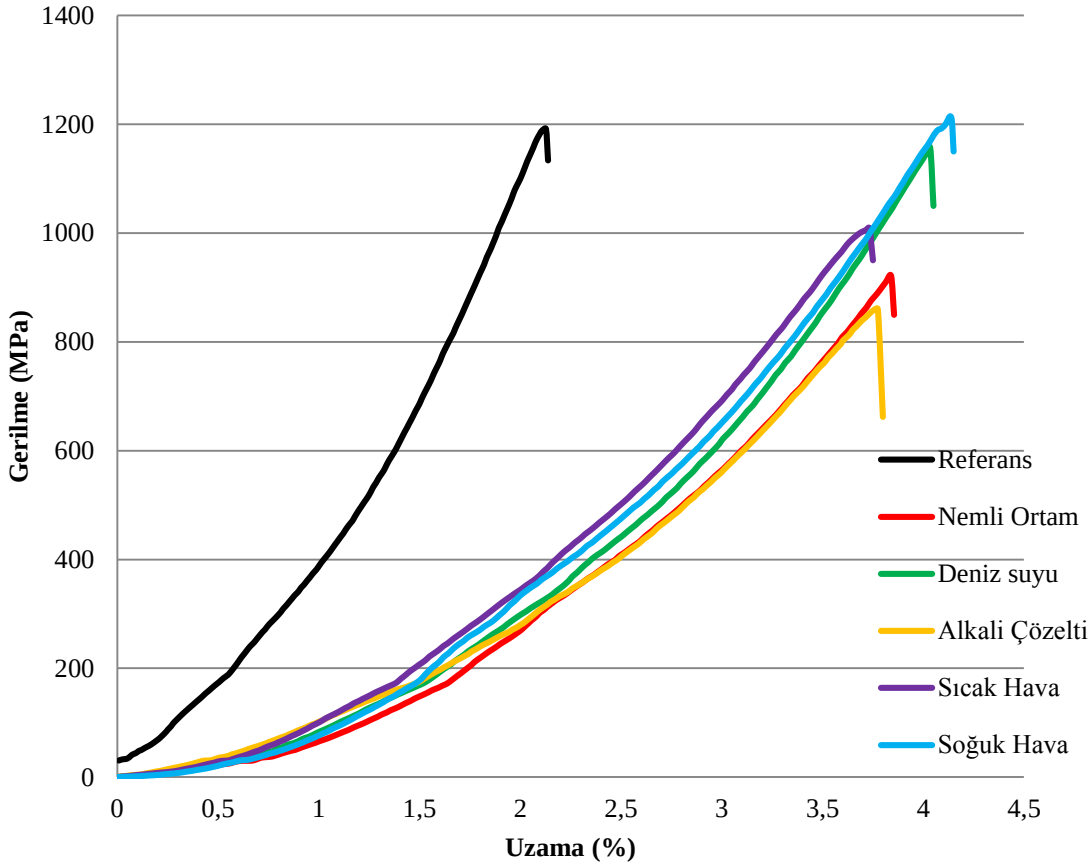


Şekil 5.96: AFRP donatıların ortam koşuluna göre yüzdece su emme oranlarının grafiği

Farklı ortam koşullarına maruz kalan AFRP donatıların yüzdece kütle kayıpları Şekil 5.97'de verilmiştir. Kütlece kaybın yaşanmadığı tek ortam -37℃ deki ortamdır. Kütlece en fazla kayıp ise alkali ortamda meydana gelmiştir.



Şekil 5.97: AFRP donatıların ortam koşuluna göre yüzdece kütle kaybı oranlarının grafiği



Şekil 5.98. AFRP donatıların farklı ortam koşullarındaki Gerilme- Uzama grafiği

Tablo 5.27: AFRP donatılarda farklı ortam koşullarında dayanım gerçekleşme oranları

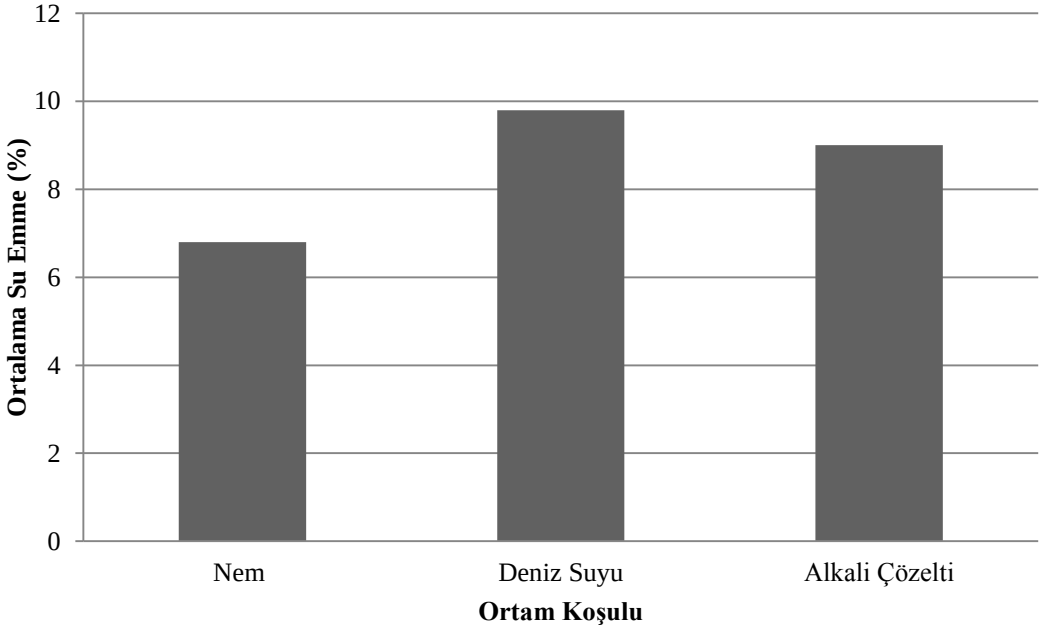
Ortam Koşulu	Ortalama Dayanım (MPa)	Dayanım Gerçekleşme Oranı (%)
Referans	1191	100
Nemli Ortam	921	77
Deniz Sulu Ortam	1157	97
Alkali Ortam	860	72
60℃ Ortam	1009	84
-37 ℃ Ortam	1212	101

AFRP donatıların farklı ortam koşullarına maruz kaldıklarında dayanımlarındaki değişim, referans numune %100 olarak kabul edildiğinde Tablo 5.27'deki gibi olmaktadır. Şekil 5.98'e ve Tablo 5.27'ye bakıldığında alkali ortamda kalan AFRP donatıda büyük oranda bir düşüş görülmüştür. Bu düşüş AFRP donatının betonla uyumu konusunda bir soru işareti oluşturmaktadır. Diğer yandan araştırılması yapılan AFRP donatını sıcak hava koşullarında karşı dayanıksız olduğu soğuk hava koşuluna karşı dirençli olduğunu sonuçlara bakarak söylenebilir. Ayrıca koşullanmış numunelerin rijitliklerinde düşüş gözlemlenmektedir.

Kısaca bu çalışmada AFRP donatı için sonuçların tamamına bakıldığında, donatının en çok alkali ortamlarda zarar gördüğü ancak soğuk hava koşullarına karşı direnç gösterdiği ve soğuk havalarda güçlü performans sergilediği sonucu çıkarılabilir. Ayrıca nemin AFRP ara yüzünde hafife alınmaması gereken bir etkisi olduğu da dikkate alınmalıdır.

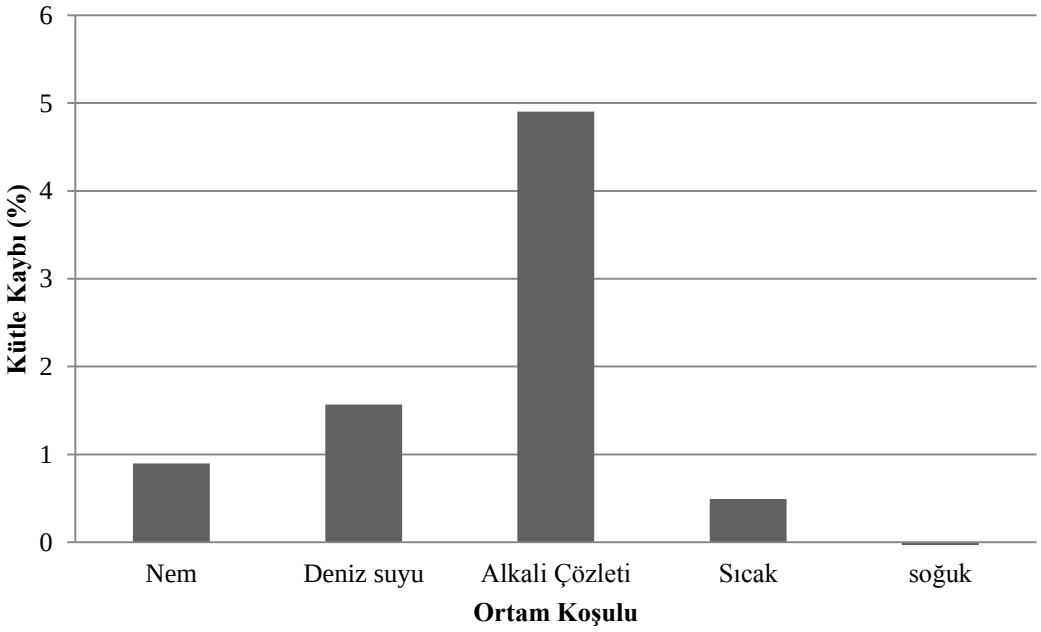
5.6.2. CFRP donatı

CFRP donatıların alkali çözelti, deniz suyu ve nem ortamlarında koşullandırıldıktan sonraki yüzdece kütlesel su emme oranları Şekil 5.99'da verilmiştir. Kütlece en fazla suyu deniz suyu ortamından bünyelerine alırken kütlece en az miktarda suyu ise nemli ortamdan bünyelerine almışlardır.

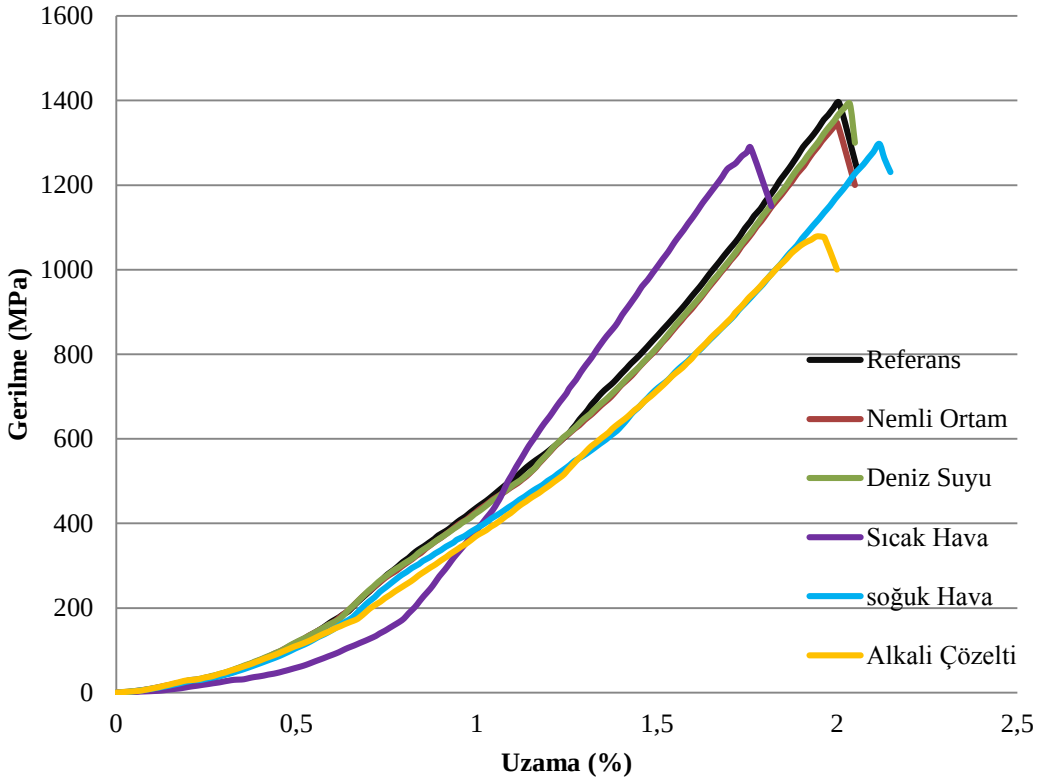


Şekil 5.99: CFRP donatıların ortam koşuluna göre yüzdece su emme oranlarının grafiği

Farklı ortam koşullarına maruz kalan CFRP donatıların yüzdece kütle kayıpları Şekil 5.100'de verilmiştir. Kütlece kaybın yaşanmadığı tek ortam AFRP donatılarda olduğu gibi soğuk hava koşullarını temsil eden -37℃ 'deki ortamdır. Kütlece en fazla kayıp ise alkali çözelti ortamında meydana gelmiştir.



Şekil 5.100: CFRP donatıların ortam koşuluna göre yüzdece kütle kaybı oranlarının grafiği



Şekil 5.101: CFRP donatıların farklı ortam koşullarındaki Gerilme- Uzama grafiği

CFRP donatıların tüm ortam koşullarındaki çekme gerilmeleri Şekil 5.101'de verilmiştir. Grafiğe bakıldığında CFRP donatılar koşullandırmalara tabi tutulsa dahi çekme dayanımları 1000 MPa'nın üzerinde kalmayı başarmıştır.

Tablo 5.28: CFRP donatılarda farklı ortam koşullarında dayanım gerçekleşme oranları

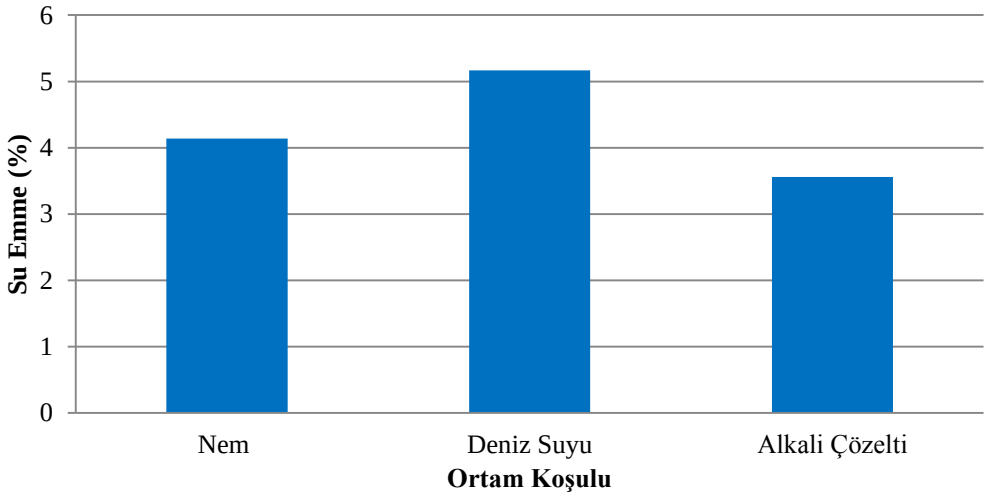
Ortam Koşulu	Ortalama Dayanım (MPa)	Dayanım Gerçekleşme Oranı(%)
Referans	1394	100
Nemli Ortam	1346	96
Deniz Sulu Ortam	1392	99
Alkali Ortam	1078	77
60℃ Ortam	1288	92
-37 ℃ Ortam	1297	93

CFRP donatıların farklı ortam koşullarına maruz kaldıklarında dayanımlarındaki değişim, referans numune %100 olarak kabul edildiğinde Tablo 5.28'deki gibi olmaktadır. Şekil 5.101'e ve Tablo 5.28'e bakıldığında alkali ortam dışındaki diğer ortamlarda CFRP donatılar dayanımlarının %90'nını tutabilmişlerdir. Özellikle nemli ortam ve deniz suyu ortam koşulundaki dayanımlar birbirine ve referans numunelere çok yakın olup Elastisite Modülleri ve şekil değişimleri birbirine önemli derecede benzerlik göstermektedir. Ayrıca donatıların farklı sıcaklıktaki hava koşullarına karşı da iyi performans gösterdiği bu çalışma için söylenebilir.

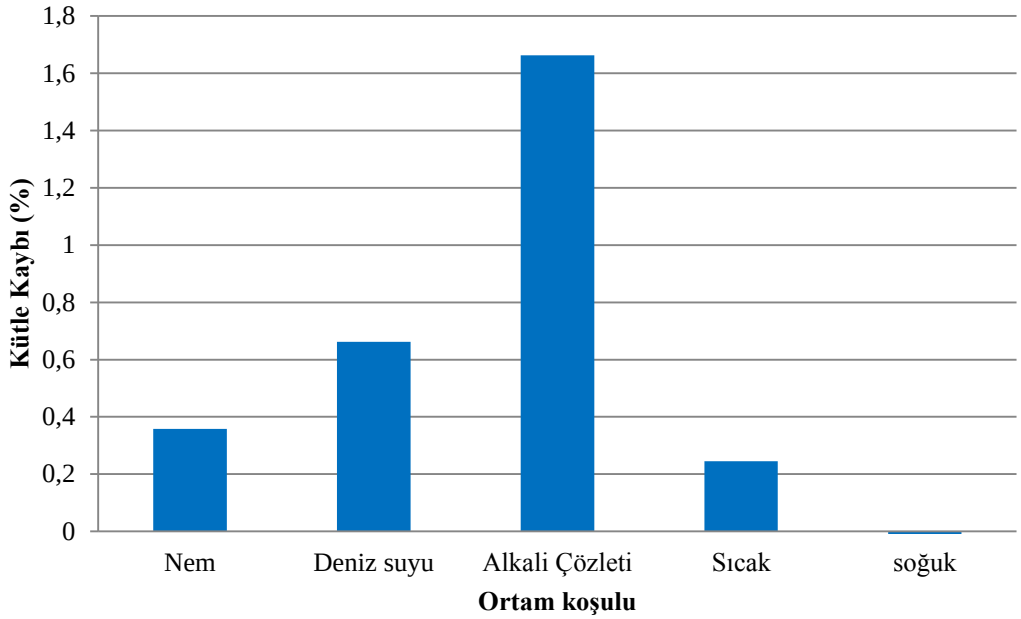
CFRP donatılar 4 ortam koşuluna karşı iyi direnç gösterirken alkali koşullandırmaya maruz kaldığında performansının %23'ünü kaybetmiştir. Donatılar alkali koşullandırmadan çıkarıldıklarında Şekil 5.82, Şekil 5.83 ve Şekil 5.84'te daha detaylı gösterildiği gibi lifler arasında bağlar zayıflamış ve kopmalar meydana gelmiştir. Performanstaki bu düşüşün sebebi olarak alkalinin karbon liflerine verdiği zarar olduğu kabul edilebilir.

5.6.3. GFRP donatı

GFRP donatıların alkali çözelti, deniz suyu ve nem ortamlarında koşullandırıldıktan sonraki yüzdece kütlesel su emme oranları Şekil 5.102'de verilmiştir. Kütlece en fazla suyu deniz suyu ortamından bünyelerine alırken kütlece en az miktarda suyu ise alkali çözeltiden bünyelerine almışlardır.

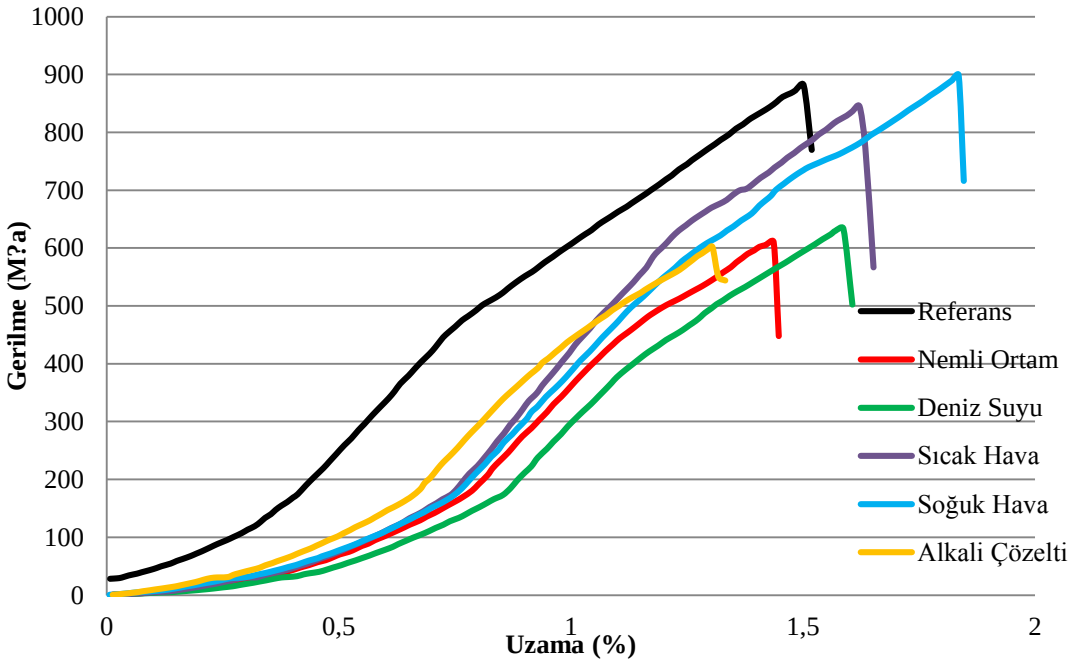


Şekil 5.102: GFRP donatıların ortam koşuluna göre yüzdece su emme oranlarının grafiği



Şekil 5.103: GFRP donatıların ortam koşuluna göre yüzdece kütle kaybı oranlarının grafiği

Farklı ortam koşullarına maruz kalan GFRP donatıların yüzdece kütle kayıpları Şekil 5.103'de verilmiştir. Diğer donatılarda olduğu gibi kütlece kayıp en fazla alkali çözeltide görülmüştür ve diğer donatılarda olduğu gibi soğuk hava koşullarında koşullanan numunelerde kütle kaybı görülmemiştir.



Şekil 5.104: GFRP donatıların farklı ortam koşullarındaki Gerilme- Uzama grafiği.

Tablo 5.29: GFRP donatılarda farklı ortam koşullarında dayanım gerçekleşme oranları

Ortam Koşulu	Ortalama Dayanım (MPa)	Dayanım Gerçekleşme Oranı (%)
Referans	881	100
Nemli Ortam	653	74
Deniz Sulu Ortam	633	71
Alkali Ortam	601	68
60℃ Ortam	844	95
-37 ℃ Ortam	898	101

GFRP donatıların farklı ortam koşullarına maruz kaldıklarında dayanımlarındaki değişim, referans numune %100 olarak kabul edildiğinde Tablo 5.29'daki gibi olmaktadır. Şekil 5.104'e ve Tablo 5.29'a bakıldığında GFRP donatılar soğuk hava koşullarına karşı performansının tamamını korumayı başarmış olup, yüksek sıcaklık etkisinde de performansının %95'ini korumuştur. Alkali, nemli ve deniz suyu ortamında performanslarda büyük ve birbirine yakın düşüşler gözlemlenmiştir. Alkali ortamdaki hidroksit iyonlarının SiO_2 saldırması, cam ağındaki Si-O-Si bağlarında bozulmaya neden olduğundan yukarıdaki bölümlerde bahsedilmiştir. Bu nedenle alkali çözeltiden dolayı oluşan dayanım kaybının yüksek olması beklenilen bir sonuçtur. Su/çimento oranı 0,55 olan betona gömülü GFRP donatılarını test eden Chen ve arkadaşları, 40°C'de 90 gün boyunca alkali çözeltiye (pH 12,7) maruz kalan numunelerin çekme dayanımındaki kaybı % 39 olarak bulmuştur [41]. Su/çimento oranı 0,45 olan beton bir ortamda, 60°C'de musluk suyuna daldırılarak incelenen GFRP donatılar çekme dayanımında, maksimum 210 gün boyunca yaklaşık %55 azalma olduğu da literatürde yapılan çalışmada görülmüştür [42]. Yapılan çalışmalar da bu tezdeki sonuçlar gibi nemli ve alkali ortamın GFRP donatılarda zarar meydana getirebileceğini göstermektedir. Ayrıca koşullanmış numunelerin rijitliklerinde de azalma meydana gelmiştir. Bu 3 ortama koşulu için suyun ortak özellik olduğu dikkate alınırsa GFRP donatıların neme karşı hassasiyeti olduğunu söylemek mümkündür.

BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneylerin sonuçları ve yapılışları önceki bölümlerde grafiklerle ve tablolarla ifade edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenerek önerilerle birlikte sırayla verilmiştir.

- Bu çalışmada kullanılan FRP donatılarda matris malzeme ortak olduğundan dayanım açısından nemin cam liflere daha fazla zarar verdiği karbon liflerin ise neme karşı dayanaklığının yüksek olduğu görülmüştür. Böylece GFRP donatılar nemden en çok etkilenen FRP donatı türü olmuştur.
- Deniz suyunda en iyi performans CFRP donatılara, en kötü performans ise çelik donatıya aittir. Deniz suyunun çelik donatılara verdiği zararın çalışmadaki kayıptan daha fazla olacağı bilinen bir gerçektir. Koşullandırma süresinin artmasıyla dayanım kayıpları arasındaki farkların değişebileceği dikkate alınmalıdır. Deniz suyunun çelik donatı üzerindeki etkisi hafife alınmamalıdır. Bu konuda daha uzun vadeli çalışmalar yapılmalıdır.
- Beton gözenek suyuna benzetmek amacıyla yapılan alkali çözeltide, FRP donatılar arasında en iyi performans gösteren CFRP donatı da bile dayanımdan yaklaşık %23 kayıp yaşanmıştır. Durabilite yeteneği en düşük GFRP donatılarda ise yaklaşık %32'lik dayanım kaybı söz konusudur. Literatür çalışmalarına bakıldığında farklı sonuçlar söz konusudur. Bu konuyla alakalı derin araştırmaları gidildiğinde, FRP donatıların dayanımlarının üretimlerine çok bağlı olmasından kaynaklı farklı markalardaki ürünlerin farklı sonuçlara sebep olduğu gözlemlenmiştir. Ancak alkali ortamlardaki hidroksit iyonlarının varlığının doğurabileceği sorunlar dikkate alınarak FRP donatıların betonla kullanımına dikkate edilmesi gerekmektedir.
- Bu çalışmada AFRP donatı, 60℃'de sıcak hava koşullarında performansı en düşük FRP donatı iken (%15), GFRP donatı en iyi performans gösteren (% 4,2)

donatıdır. Soğuk hava koşullarında GFRP ve AFRP donatılarda dayanım artışı yaşanırken, CFRP donatıda dayanım azalmıştır.

- Nem, deniz suyu ve alkali ortamda yani suyun var olduğu ortam koşullarında CFRP donatılar en iyi dayanım gösteren FRP donatı türü iken GFRP donatılar en kötü dayanım gösteren FRP donatı türüdür. Su emme ve kütle kaybı sonuçlarına bakıldığında CFRP donatılar daha fazla kütle kaybetmiştir ve daha fazla su emmiştir ancak performansları GFRP donatılara oranla daha iyidir. Burada ki asıl mesele üretimlerde kullanılan lifin dayanıklılığı olduğu düşünülebilir. Nem cam lifler arasına oranca daha az girse de hem ara yüzde hem de liflerde bozulma meydana getirirken, karbon liflerin yapısında daha az bozulma meydana getirdiği düşünülebilir.
- Sıcaklık değişimlerine bakıldığında ise GFRP donatıların, salt sıcaklık değişimlerinde en iyi sonuç veren FRP donatı türü olduğu görülmüştür.
- AFRP donatılar için en uygun ortam soğuk hava iken en kötü ortam alkali ortam koşullarıdır. CFRP donatılar için en uygun ortam deniz suyu iken en kötü ortam alkali ortam koşullarıdır. Ayrıca CFRP donatılar alkali ortam dışındaki tüm ortamlarda %10'un altında dayanım kaybı yaşamıştır. GFRP donatılar için en uygun ortam soğuk hava iken en kötü ortam alkali ortam koşullarıdır. Nemli ortamlarda, dayanımlarının %25'inden fazla kayıplar yaşamıştır.
- Soğuk hava koşulları tüm malzemeler için kaybın %10'un altında olduğu tek ortamdır. Alkali ortam koşulları FRP donatılarda %20'den fazla dayanım kaybına neden olmuştur.
- Su emme ile dayanım kaybı arasında bir bağıntı görülmemiştir. Ancak kütle kaybı ile dayanım arasında doğrusal bir bağlantı bulunmaktadır.
- Su emme tüm deneylerde çoktan aza sırayla; AFRP, CFRP ve GFRP donatı şeklinde gerçekleşmiştir.
- Koşullandırma süresinin uzamasıyla dayanım sonuçlarında oluşan farklar değişebilir. Çalışmalar daha uzun vadede tekrar edilebilir. Ayrıca çalışma da farlı markalardaki aynı ürünlerin kullanımı ile üretimin etkisi incelenebilir.
- Bu çalışmadaki tüm deneylerin sonuçları göze alındığında çelik donatıya en iyi alternatifin CFRP donatı olduğu görülmektedir.

.

KAYNAKLAR

[1] Elsafty, A. (2014). Benmokrane, B., Rizkalla, S., Mohamed, H., Hassan, M., (2014). *Degradation Assessment of Internal Continuous Fiber Reinforcement in Concrete Environment*, Report number: BDK82-977-05Affiliation: College of Computing, Engineering, and Construction, University of North Florida

[2] ACI Committee 544,1988, , "*Desing Considerations For Steel Fiber Feinforced Concrete*" ACI Structural Journal, p 18

[3] Lincoln, J., Liu, D., (Jan 2001). Introduction to Composite Materials, Materials Science and Mechanics Course Pack, Michigan State University

[4] Bentur, A., Mindess, S.,(1990). Fibre Reinforced Cementitious Composite, *Elsevier Applied Science Publishers Ltd*.

[5] Walsh P.J., Carbon Fibers, ASM Handbook, 2001, 21, 35-40

[6] Amran,Y.H.M., Alyousef, R., Rashid, R.S.M., Alabduljabbar, H., Hunge, C.C., (2018). Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: A review, *Structures* 16 208–238

[7] Türkiye Deprem Yönetmeliği ,(2018), Bölüm 15,Sayfa 336

[8] Özcan, Z., Hasar Belirleme, Onarım ve Güçlendirme Ders Notları Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

[9] Sika Solutions for Structural Strengthening,. Retrieved from <http://www.uct.ac.za/sites/default/files/image_tool/images/333/Events/Structural_strengthening_systems___Sika.pdf>

[10] Teng J.G., Lam L., (2004). Understanding and modeling the compressive behaviour of FRP confined concrete. In: *Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction (ACIC)*. Proceedings of the Second International Conference, held at the University of Surrey, 20-22 April 2004, Guildford, UK, 73-88

[11] Budescu M., Ciongradi I., Taranu N., Gavrilas I., Ciupala M.A., Lungu I.,(2001) Reabilitarea constructiilor. Ed. Vesper. Lasi.

[12] Url-1 <http: https://fiberline.com/cases/cases-doors-facades/glass-facades/the-eyecatcher-building/> erişim tarih 18.12.2019

[13] Zhao, J., Mei,K., Wu, J., (2020). Long-term mechanical properties of FRP tendon–anchor systems -A review, *Construction and Building Materials* 230 117017

[14] Peker, I.Y., (Mart 2005) "Yığma ve Tarihi Yapılarda FRP Malzemeler Kullanılarak Yapılan Güçlendirme Uygulamaları, Deprem Sempozyumu, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 979-981,

[15] G.Doug, GFRP Rebar for a Longer Lasting Infrastructure, FRP Rebars Manufacturer Council, Retrieved from http://ricomposites.com/wp-content/uploads/2016/07/Gremel-FRP-Rebar-for-Longer-Lasting-Infrastructure.pdf

[16] Benmokrane B, El-Ragaby,A., El-Salakawy, E.F., (2006). Designing and Testing of Concrete Bridge Decks Reinforced with Glass FRP Bars, *Article in Journal of Bridge Engineering* .

[17] ACI Committee 440 (2006). "Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars". Report No. ACI 440.1R-06, American Concrete Institute, Farmington Hill, Michigan, USA

[18] Url-2 <https://www.uniquegrpcomposites.com/product_grp_frp_rebar.php> erişim tarih 03.05.2020

[19] Wang, J., GangaRao, H., Liang, R., Zhou, D., Liu, W., and Fang, Y., (2015). Durability Of Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites Under The Combined Effects Of Moisture And Sustained Loads., *Journal of Reinforced Plastics and Composites*., Vol. 34(21) 1739–1754

[20] Wang, J., GangaRao, H., Liang, R., and Liu, W., (2016).Durability and prediction models of fiber-reinforced polymer composites under various environmental conditions: A critical review., *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 35(3) 179–211

[21] Ali,A.H., Mohamed, H.M., Benmokraneb, B., ElSafty, A., Chaallal, O., (2019). Durability performance and long-term prediction models of sand-coated basalt FRP bars., *Composites* Part B 157 248–258

[22] D'Antino, T., Pisani, M.A., (2018). Influence of sustained stress on the durability of glass FRP reinforcing bars., *Construction and Building Materials* 187 474–486

[23] Youssef, T., Benmokrane, B., (2011). Creep behaviour and tensile properties of GFRP bars under sustained service loads, in: ACI SP-275, 2011, pp. 39.1–39.20

[24] Robert, M., Benmokrane, B., (2010). Physical, mechanical, and durability characterization of preloaded GFRP reinforcing bars, *J. Compos. Constr*. 14 (4) (2010) 368–375.

[25] Benmokrane, B., Wang, P., Ton-That, T., Rahman, H., Robert, J., (2002). Durability of glass fiber-reinforced polymer reinforcing bar in concrete environment, ASCE J.Compos. Constr. 6 (3) 143–153.

[26] Masmoudi R., Nkurunziza, G., Benmokrane, B., Cousin, P., (2003). Durability of glass FRP composite bars for concrete structure reinforcement under tensile sustained load in wet and alkaline environments, in: Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering 2003 Moncton Nouveau-Brunswick, Canada.

[27] Nkurunziza M.G., Benmokrane, B., Debaiky, A.S., Masmoudi, R., (2005). Effect of sustained load and environment on long-term tensile properties of glass fiber reinforced polymer reinforcing bars, ACI Struct. J. 102 (4) (2005) 615–621.

[28] Debaiky, A., Nkurunziza, G., Benmokrane, B., Cousin, P., (2006). Residual tensile properties of GFRP reinforcing bars after loading in severe environments, *ASCE J. Compos. Constr*. 10 (5) 370–380.

[29] Robert, M., Cousin, P., Benmokrane, B., (2011). Study of the performance of frp reinforcing bars subjected to extreme conditions of application, *Revue Les Annales du Bâtiment et des Travaux Publics* 1 (2011) 9–27.

[30] Vijay,P., (1999). Aging and design of concrete members reinforced with GFRP bars (PhD Thesis), Department of Civil Engineering, West Virginia University, Morgantown, West Virginia, USA, p. 205.

[31] Chen, Y., Davalos, J.F., Ray I., (2006) Durability Prediction for GFRP Reinforcing Bars Using Short-Term Data of Accelerated Aging Tests., 10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:4(279)

[32] Liu, F., He, H., Xiong, J., (2017)Experimental Study On Durability Of FRP Sheets Under Wet-Dry Cycles İn Various Solutions., 6th International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading, PROTECT2017, 11-12 Guangzhou (Canton), China

[33] Micelli, F., Nanni., A., (2004). Durability Of FRP Rods For Concrete Structures., *Construction and Building Materials* 18 (2004) 491–503

[34] Spagnuolo, S., Meda, A., Rinaldi, Z., Nanni, A., (2018). Residual Behaviour Of Glass FRP Bars Subjected To High Temperatures., *Composite Structures* 203 886–893

[35] Alsayed, S., Al-Salloum, Y., Almusallam, T., El Gamal, S., Aqel, M., (2012) Performance Of Glass Fiber Reinforced Polymer Bars Under Elevated Temperatures., *Composites*: Part B 43 2265–2271

[36] Quagliarini, E., Monni, F., Bondioli, F., Lenci, S., (2016). Basalt Fiber Ropes And Rods: Durability Tests For Their Use İn Building Engineering., *Journal of Building Engineering* 5 142–150

[37] Abdel-Hamid I. Mourad & Beckry Mohamed Abdel-Magid & El-Maaddawy T. & Maryam E. Grami., (2010). Effect of Seawater and Warm Environment on Glass/Epoxy and Glass/Polyurethane Composites., Appl Compos Mater 17:557–573 DOI 10.1007/s10443-010-9143-1

[38] Kootsookos, A., Mouritz, A.P., (2004). Seawater Durability Of Glass- And Carbon-Polymer Composites., *Composites Science and Technology* 64 1503–1511

[39] Zhou, J., Chen, X., Chen, Shixue., (2011). Durability and Service Life Prediction of GFRP Bars Embedded in Concrete under Acid Environment., *Nuclear Engineering and Design* 241 4095–4102

[40] Url-3 <https://www.sakarya-saski.gov.tr/media/gallery/96e348d9-a3c8-4218-9c20-cd2cfd2fcd34.pdf > erişim tarihi 12.12.2018

[41] Y. Chen, J.F. Davalos, I. Ray, H.Y. Kim., (2007). Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures, *Compos Struct*, 78 , pp. 101-111

[42] J.F. Davalos, Y. Chen, I. Raym., (2012). Long-term durability prediction models for GFRP bars in concrete environment, *J Compos Mater*, 46 , pp. 1899-1914

[43] American Concrete Institute (ACI), ACI 440.1R-03: Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars, Detroit, Michigan

[44] American Concrete Institute (ACI), ACI 440.2R-02: Design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, Detroit, Michigan

[45] ASTM. Standard Test Method for Alkali Resistance of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Matrix Composite Bars used in Concrete Construction D7705/D7705M–12

[46] Bank, L. C., Puterman, M.., (1997). Microscopic Study of Surface Degradation of Glass Fiber-Reinforced Polymer Rods Embedded in Concrete Castings Subjected to Environmental Conditioning, High Temperature and Environmental Effects on Polymeric Coposites: 2nd vol., ASTM STP 1302, , pp. 191-205

[47] Burke P.J., (2008). Low and High Temperature Performance of Near Surface Mounted FRP Strengthened Concrete Slabs., The Degree of Master of Science Thesis., Queen's University Kingston, Ontario, Canada

[48] Busel, J.P., VP, (2016). Composites Growth Initiative American Composites Manufactureres Association, FRP Composites Rebar, 15 June 2016,

[49] Canadian Standards Association., Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers., S806-02

[50] El-Hassan, H., El-Maaddawy , Tamer., Al-Sallamin , A., Al-Saidy, A., (2018) Durability of glass fiber-reinforced polymer bars conditioned in moist seawater-contaminated concrete under sustained load., *Construction and Building Materials* 1751–13

[51] Evans K. E., Caddock, B.O., Aınsworth., K. L., (1988) Statistical Changes During The Corrosion Of Glass Fibre Bundles., *Journal of Materıals Scıence* 23 2926-2930

[52] Ghods, P., Isgor, O.B., McRae, G., Miller , T., (2009) .The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide films on black steel reinforcement, *Cement & Concrete Composites* 31 (2009) 2–11

[53] Günnur, Y., (2011), Lif takviyeli polimerlerin betonarme kirişlerde donatı olarak kullanımı, e-Journal of New World Sciences Academy, Volume: 6, Number: 4, Article Number: 1A0212

[54] Hadigheh, S.A., Gravina, R.J., Smith, S.T., (2017) Effect Of Acid Attack On FRP-To Concrete Bonded İnterfaces., *Construction and Building Materials* 152 285–303

[55] Jipping, B.,(2013). Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications, Woodhead Publishing Limited

[56] Jumaa, G.B., Yousif,A.R., (2019). Size effect on the shear failure of high-strength concrete beams reinforced with basalt FRP bars and stirrups, *Construction and Building Materials* 209 (2019) 77–94

[57] Loader, T.R., (1972) The Use of Frp In Sulphurıc and Hydrochloric Acıd Envıronments., Atlas Chemical Industries S.A.

[58] Özkal, F., , Polat M., Yağan, M., Öztürk, M.O., (2018). Mechanical Properties And Bond Strength Degradation Of GFRP And Steel Rebars At Elevated Temperatures., *Construction and Building Materials* 184 (2018) 45–57

[59] Prian, L., Barkatt, A.,(1999). Degradation Mechanism o f Fiber Reinforced Plastics and its Implications to Prediction of Long-Term Behavio, *Journal of Materials Science*, v. 34 n. 16, pp. 3977-3989.

[60] Ray. B.C., (2006). Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites., *Journal of Colloid and Interface Science* 298 (2006) 111–117

[61] Wang,Y., Chen, S., Chen, X., Lu, Y., Miao, M., Zhang, D., (2019). Controllability of epoxy equivalent weight and performance of hyperbranched epoxy resin, *Composites* Part B: Engineering Volume 160, 1 March 2019, Pages 615-625

[62] Starkova O, Aniskevich, K., Sevcenko, J., (2020) Long-term moisture absorption and durability of FRP pultruded rebars, Materials Today: Proceedings, 11 January 2020

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : ŞEYMANUR ARSLAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 09/07/1995 ERZURUM
E-posta : seyma-arsln@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2017, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM:

Eylül 2019'da Bartın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı Araştırma Görevliliğine başladım.