

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

**POLİMER MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN FARKLI ORTAM
ŞARTLARINDAKİ MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Ahmet SAYLIK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

KASIM 2022

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

**POLİMER MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN FARKLI ORTAM
ŞARTLARINDAKİ MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Ahmet SAYLIK
(23616180003)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

KASIM 2022

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aőamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemededen beni her konuda yönlendiren danışman hocam sayın Prof. Dr. şemsettin TEMİZ'e;

Tüm eğitim ve öğretim hayatım boyunca yanımda olan ve desteklerini benden esirgemeyen sevgili babam Yakup SAYLIK'a ve canım annem Telay SAYLIK'a;

Çalıőmalarımnda ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalıőmalarım süresince de desteklerini hissettiğim sevgili ablam iğdem SAYLIK ÜNLÜ'ye ve biricik kız kardeőim Cansu SAYLIK'a,

Bu tez alıőması İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından (FDK-2019-1822) numaralı proje kapsamında desteklenmiőtir. Proje kapsamında vermiőt oldukları finansal desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi BAP birimine teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum “Polimer Matrisli Hibrit Kompozitlerin Farklı Ortam Şartlarındaki Mekanik Ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu tez çalışmasının bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Ahmet SAYLIK



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	xii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Kapsamı	3
1.2 Hipotez	4
1.3 Tezin Amacı	4
1.4 Literatür Özeti	5
2. KOMPOZİT MALZEMELER	9
2.1 Matris Elamanı	10
2.1.1 Polimer matrisli kompozitler	11
2.1.1.1 Termoplastikler.....	11
2.1.1.2 Termosetler.....	14
2.1.2 Metal matrisli kompozitler (MMK).....	17
2.1.3 Seramik matrisli kompozitler (SMK)	18
2.1.4 Karbon-karbon kompozitler (KKK)	18
2.2 Takviye elaman.....	19
2.2.1 Elyaf takviyeli kompozitler	20
2.2.1.1 Süreksiz (kesik) elyaf takviyeli kompozitler	22
2.2.1.2 Sürekli elyaf takviyeli kompozitler	22
2.2.2 Parçacık (Partikül) takviyeli kompozitler	27
2.2.3 Tabakalı kompozitler	27
2.2.3.1 Karma (Hibrit) kompozitler.....	29
2.3 Fiber Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretilmesi	29
2.3.1 Vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi (VARTM)	30
2.3.2 Reçine transfer kalıplama yöntemi (RTM).....	31
2.3.3 El yatırma yöntemi	32
2.3.4 Püskürtme yöntemi	33
2.3.5 Filament sarma yöntemi	34
2.3.6 Basınç kalıplama yöntemi	35
2.3.7 Pultrüzyon yöntemi	36
3. MATERYAL VE METOD	37
3.1 Fiber Takviyeli Polimer Matrisli Kompozit Numunelerin Üretilmesi	37
3.1.1 Malzemeler	37
3.1.1 Takviye malzemesi	38
3.1.2 Matris malzemesi.....	38
3.2 Kompozit Üretimi.....	39
3.2.1 Fiber takviye malzemesinin hazırlanması	39
3.2.2 Matris elamanın hazırlanması.....	39
3.3 VARTM Yöntemiyle Kompozit Üretiminin Yapılması	40
3.4 Kompozit Malzemelerin Fiziksel Özelliklerinin Tespit Edilmesi	45

3.5 Mekanik Testler İçin Kompozit Numunelerin Hazırlanması	47
3.6 Kompozitlere Yaşlandırma İşleminin Uygulanması	49
3.7 Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	51
3.8 Yaşlandırılmış Kompozitlere Mekanik Testlerin Yapılması.....	59
3.8.1 Çekme testi	59
3.8.2 Eğilme testi	61
3.8.3 Düşük hızlı darbe testi	65
3.8.4 Basma testi.....	69
3.9 Tribolojik Testler.....	71
3.9.1 Aşınma test numunelerinin hazırlanması	71
3.9.2 Kuru kayma aşınma testi	72
3.10 Morfolojik Analiz	76
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	78
4.1 VARTM ile Üretilen Tabakalı Kompozit Malzemelerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	78
4.2 Yaşlandırılmış Kompozitlerin Sıvı Absorpsiyon Yüzde Değişimleri	79
4.3 Mekanik Test Sonuçları.....	83
4.3.1 Çekme test sonuçları.....	83
4.3.2 Eğilme test sonuçları	89
4.3.3 Düşük hızlı darbe testi sonuçları	98
4.3.4 Basma testi sonuçları	128
4.4 Tribolojik Sonuçlar	137
4.4.1 Aşınma test sonuçları	137
4.5 Morfolojik Analiz	146
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	151
KAYNAKLAR.....	154
ÖZGEÇMİŞ	161

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1: Bazı termoplastik ve termoset polimerlerin mekanik ve fiziksel özellikleri ..	16
Çizelge 2.2: Bazı sentetik elyafların mekanik özelliklerinin kıyaslanması	26
Çizelge 3.1: Matris malzeme olarak kullanılan epoksi ve sertleştiricinin oda sıcaklığındaki fiziksel özellikleri.	38
Çizelge 3.2: RIMR 135 laminasyon reçinesinin sertleştirici RIMH 137 ile kombinasyon edilmiş epoksi setinin mekanik özellikleri	38
Çizelge 3.3: VARTM yönteminde kullanılan elamanlar ve görevleri.	41
Çizelge 3.4: Mekanik test numunelerinin 3 boyutlu modelleri ve standartlarının gösterimi.	47
Çizelge 3.5: Kompozitlerin ortam şartları ve süresine göre belirlenmiş numune test sayısı.	49
Çizelge 3.6: Yaşlandırma ortamlarının fiziksel özellikleri	51
Çizelge 3.7: Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan ASTM standartları ve geometrileri	52
Çizelge 4.1: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin fiziksel özellikleri	78
Çizelge 4.2: GFRP , CFRP ve GCFRP kompozitlerin mekanik özellikleri.	79
Çizelge 4.3: Yaşlandırılmış GFRP,CFRP ve GCFRP kompozitlerin çekme testi davranışları.	84
Çizelge 4.4: Yaşlandırılmış GFRP,CFRP ve GCFRP kompozitlerin eğilme testi davranışları.	90
Çizelge 4.5: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin değişen darbe enerjisine göre mekanik özelliklerinin kıyaslanması.	99
Çizelge 4.6: GFRP, CFRP ve GCFRP yaşlandırılmış kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki mekanik özelliklerinin kıyaslanması.	112
Çizelge 4.7: Düşük hızlı darbe testi sonrası kompozitlerin yüzeylerinde oluşan hasarlar.	127
Çizelge 4.8: Yaşlandırılmış GFRP,CFRP ve GCFRP kompozitlerin basma testi davranışları.	129
Çizelge 4.9: GFRP ve CFRP kompozitlerin aşınma sonrası oluşan kütle kayıpları.	143
Çizelge 4.10: GFRP ve CFRP kompozit aşınma numunelerinin aşınma sonrası hesaplanan SAO değerleri.	145

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Boeing 787 yolcu uçak yapısındaki malzeme kombinasyonun yüzdesel dağılımı.....	2
Şekil 2.1: a) Cam fiber gövdeli tekne, b) Karbon fiber takviyeli Hyundai otomotiv araç gövdesi	10
Şekil 2.2: Termoplastik gofret tipi flanş kolu kelebek vana	12
Şekil 2.3: Fenolik reçineden yapılmış fren balatası	15
Şekil 2.4: İç tasarımı polyesterden yapılmış yarış otomobili.....	16
Şekil 2.5: a) Sürekli fiber, b) süreksiz fiber , c) partikül takviyeli metal matrisli kompozitler.....	17
Şekil 2.6: Seramik kompozit gövdeli piyade muharebe aracı (ICV)	18
Şekil 2.7: Karbon-karbon kompozit malzemeden üretilmiş (C-CAT CC) roket nozulunun ateşleme testinin yapılması.....	19
Şekil 2.8: Kompozit malzemelerin takviye elamanlarına göre sınıflandırılması.....	20
Şekil 2.9: Fiber çapı-fiber mukavemeti arasındaki ilişki	21
Şekil 2.10: Fiber uzunluk-gerilme ilişkisi.....	21
Şekil 2.11: Fiber takviyeli kompozitlerde oryantasyon açısının etkisi, a) Çekme mukavemeti üzerine elyaf oryantasyonunun etkisi b) Uzun, sürekli lifler için matris içinde çeşitli yönler.....	23
Şekil 2.12: Doğal liflere sahip organik bazlı fiber malzemeler	24
Şekil 2.13: Sentetik liflere sahip bazı inorganik fiber malzemeler.	24
Şekil 2.14: Tabakalı kompozitler a) Laminat kompozit, b) Sandviç kompozit.	28
Şekil 2.15: Vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemiyle (VARTM) kompozit üretim şeması	31
Şekil 2.16: Reçine transfer kalıplama yöntemi (RTM) şematik gösterimi	32
Şekil 2.17: El yatırma yöntemiyle kompozit üretimi	33
Şekil 2.18: Püskürtme ile kompozit üretimi.....	34
Şekil 2.19: Helisel sarma yöntemiyle kompozit üretimi.....	34
Şekil 2.20. Basınçla kalıplama yöntemi	35
Şekil 2.21: Pultrüzyon yöntemiyle kompozit üretim şeması	36
Şekil 3.1: Takviye malzemelerin hazırlanması.	39
Şekil 3.2: Matris malzemenin hazırlanma işlem basamakları.....	40
Şekil 3.3: VARTM tekniği kullanılarak kompozit plakaların üretilme işlem basamakları.....	43
Şekil 3.4: VARTM deney düzeneğiyle kompozit plaka üretimi.	44
Şekil 3.5: Takviye elamanın ağırlıkça kütleli tespiti için tartım işlemi.	44
Şekil 3.6: GFRP,CFRP ve GCFRP kompozitlerin yoğunluklarının belirlenmesi.	46
Şekil 3.7: Üretilen kompozit plakaların test numune geometrilerine göre kesilmesi.	48
Şekil 3.8: Kompozitlerin yaşlandırma ortamına bırakılması.	50
Şekil 3.9: Yaşlandırma işlemi uygulanmış kompozitlerin yaşlandırma ortamlarından alınması işlem aşamaları.....	51
Şekil 3.10: ASTM 3039 çekme test standardına göre hazırlanmış numune boyutları.....	53
Şekil 3.11: Kompozit malzemelerin Elastisite modülü ve poisson oranının deneysel olarak belirlenmesi.	54
Şekil 3.12: ASTM 7078 kayma test standardına göre hazırlanmış numune boyutları.....	56
Şekil 3.13: Kompozit numunelere kayma testinin yapılması.	57

Şekil 3.14: ASTM 3410-75 basma test standardına göre hazırlanmış numune boyutları.....	58
Şekil 3.15: Kompozitlere basma testlerinin uygulanması.....	59
Şekil 3.16: CFRP, GFRP ve GCFRP kompozitlerin çekme test numuneleri.....	60
Şekil 3.17: Yaşlandırılmış kompozit numunelere çekme testinin uygulanması.....	60
Şekil 3.18: ASTM D7264 standardına göre hazırlanmış üç nokta eğilme test düzeneği ve geometrisi.....	62
Şekil 3.19: CFRP, GFRP ve GCFRP kompozitlerin eğilme test numuneleri.....	62
Şekil 3.20: Eğilme test düzeneği: (a) Shimadzu AGS- X test cihazı, (b) Eğilme testinin yapılması.....	63
Şekil 3.21: CFRP, GFRP ve GCFRP kompozitlerin eğilme testi sonrası oluşan hasar geometrileri.....	63
Şekil 3.22: INSTRON 9350 ağırlık düşürme test cihazı : a) Düşük hızlı darbe sistemi, b) Kelepçeleme sistemi.....	65
Şekil 3.23: ASTM D7136/D7136 M standardına göre hazırlanmış düşük hızlı darbe test numune geometrisi.....	66
Şekil 3.24: CFRP, GFRP ve GCFRP kompozitlerin düşük hızlı darbe test numuneleri.....	67
Şekil 3.25: Dört farklı darbe enerjisine göre test edilmiş kompozitlerin delinme enerjisinin belirlenmesi.....	68
Şekil 3.26: Düşük hızlı darbe testi cihazında test edilmiş numunede oluşan delinme hasarı.....	68
Şekil 3.27: Basma test numune geometrisi.....	69
Şekil 3.28: Deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış basma test numuneleri.....	69
Şekil 3.29: CFRP, GCFRP ve GCFRP kompozit numunelerin basma testlerinin yapılması.....	70
Şekil 3.30: Kuru kayma aşınma test numune geometrisi.....	71
Şekil 3.31: Kuru kayma testi için numunelerin hazırlanması: a) Kompozit aşınma test numuneleri ve pimler, b) Aşınma test numunelerinin pimlere yapıştırılması.....	72
Şekil 3.32: Aşınma test düzeneği: a) Turkyus aşınma test cihazı b) Pim-disk aşınma cihazı ekipmanları.....	72
Şekil 3.33: AISI D2 takım çeliğinden yapılmış disk.....	73
Şekil 3.34: Aşınmış disk yüzeyinin ortalama pürüzlülük değerinin belirlenmesi.....	73
Şekil 3.35: Aşınma testi için belirlenen ve hesaplanan verilerin Turkyus cihazına girilmesi.....	75
Şekil 3.36: Aşınma test numunelerinin kütleli değişimlerinin tartılması.....	75
Şekil 3.37: Morfolojik analizlerin yapıldığı taramalı elektron mikroskop cihazı (SEM).....	76
Şekil 3.38: Morfolojik analiz: a) Analiz numunelerinin hazırlanması, b) Gümüş kontakt işlemi, c) Altın-Paladyum kaplanması, d) Numunelerin SEM cihazına yerleştirilmesi.....	77
Şekil 4.1: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin zamana bağlı absorpsiyon yüzdesi değişimi.....	80
Şekil 4.2: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin zamana bağlı absorpsiyon yüzdesi değişimi.....	81
Şekil 4.3: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin zamana bağlı absorpsiyon yüzdesi değişimi.....	82
Şekil 4.4: Yapay deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamlarında 90 gün boyunca yaşlandırılmış CFRP, GFRP ve GCFRP kompozit numunelerinin kütleli ortalama absorpsiyon yüzde değişimi.....	83

Şekil 4.5: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin deniz suyu ortamındaki gerilme-şekil değiştirme grafiği.	85
Şekil 4.6: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin motor yağı ortamındaki gerilme-şekil değiştirme grafiği.	86
Şekil 4.7: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin dizel yakıt ortamındaki gerilme-şekil değiştirme grafiği.	86
Şekil 4.8: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP , CFRP ve GCFRP kompozitlerin maksimum çekme gerilmesi elastisite modülünün kıyaslanması.	87
Şekil 4.9: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP , CFRP ve GCFRP kompozitlerin maksimum çekme gerilmesi elastisite modülünün kıyaslanması.	87
Şekil 4.10: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP , CFRP ve GCFRP kompozitlerin maksimum çekme gerilmesi elastisite modülünün kıyaslanması.	88
Şekil 4.11: Kompozitlerin çekme testi sonrası oluşan hasarlar : a) CFRP çekme hasarı, b) GFRP çekme hasarı, c) GCFRP çekme hasarı.....	89
Şekil 4.12: 90 gün boyunca yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin eğilme gerilme değerlerinin normal ortam koşullarıyla kıyaslanması.	91
Şekil 4.13: 90 gün boyunca yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin eğilme modülü değerlerinin normal ortam koşullarıyla kıyaslanması.	92
Şekil 4.14: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin eğilme gerilme-şekil değişimi.	92
Şekil 4.15: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin eğilme gerilmesi-şekil değişimi.....	93
Şekil 4.16: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin eğilme gerilmesi-şekil değişimi.....	93
Şekil 4.17: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin eğilme gerilme-şekil değişimi.	94
Şekil 4.18: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin eğilme gerilme-şekil değişimi.	94
Şekil 4.19: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin eğilme gerilme-şekil değişimi.	95
Şekil 4.20: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GCFRP kompozitlerin eğilme gerilme-şekil değişimi.	96
Şekil 4.21: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GCFRP kompozitlerin eğilme gerilme-şekil değişimi.	96
Şekil 4.22: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GCFRP kompozitlerin eğilme gerilme-şekil değişimi.	97
Şekil 4.23: Kompozitlerde üç nokta eğilme testi hasarının oluşması: a) Gerinim sınırına ulaşmış kompozit, b) Gerinim sınırını geçmiş kompozitin kırılması. .	98
Şekil 4.24: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin eş enerji profil diyagramı.	100
Şekil 4.25: GFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki kuvvet-deplasman grafiği.....	101
Şekil 4.26: GFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki absorbe edilen enerji-zaman grafiği.....	102
Şekil 4.27: GFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki çökme-zaman grafiği.	102
Şekil 4.28: GFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki darbe vurucu hızı-zaman grafiği.....	103

Şekil 4.29: CFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki kuvvet-deplasman grafiği.....	104
Şekil 4.30: CFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki absorbe edilen enerji-zaman grafiği.....	105
Şekil 4.31: CFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki çökme-zaman grafiği.	105
Şekil 4.32: GFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki darbe vurucu hızı-zaman grafiği.....	106
Şekil 4.33: GCFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki kuvvet-deplasman grafiği.....	107
Şekil 4.34: GCFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki absorbe edilen enerji-zaman grafiği.....	108
Şekil 4.35: GCFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki çökme-zaman grafiği.	108
Şekil 4.36: GCFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki darbe vurucu hızı-zaman grafiği.....	109
Şekil 4.37: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin farklı darbe enerji seviyelerindeki maksimum temas kuvveti değerleri.	110
Şekil 4.38: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin farklı darbe enerji seviyelerindeki maksimum çökme değerleri.....	110
Şekil 4.39: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin farklı darbe enerji seviyelerindeki absorbe edilen enerjileri.....	111
Şekil 4.40: 90 gün deniz suyunda ortamında yaşlandırılmış GFRP,CFRP ve GCFRP kompozitlerin temas kuvveti-çökme grafiği.	113
Şekil 4.41: 90 gün deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP,CFRP ve GCFRP kompozitlerin çökme-zaman grafiği.....	113
Şekil 4.42: 90 gün deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin absorbe edilen enerji -zaman grafiği.	114
Şekil 4.43: 90 gün motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP,CFRP ve GCFRP kompozitlerin temas kuvveti-çökme grafiği.....	115
Şekil 4.44: 90 gün motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP,CFRP ve GCFRP kompozitlerin çökme-zaman grafiği.....	115
Şekil 4.45: 90 gün motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin absorbe edilen enerji -zaman grafiği.	116
Şekil 4.46: 90 gün dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin temas kuvveti-çökme grafiği.....	117
Şekil 4.47: 90 gün dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP,CFRP ve GCFRP kompozitlerin çökme-zaman grafiği.....	117
Şekil 4.48: 90 gün dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin absorbe edilen enerji -zaman grafiği.....	118
Şekil 4.49: GFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki maksimum temas kuvvetlerinin ortam şartlarına göre kıyaslanması.....	119
Şekil 4.50: GFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki maksimum çökme değerlerinin ortam şartlarına göre kıyaslanması.....	120
Şekil 4.51: CFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki maksimum temas kuvvetlerinin ortam şartlarına göre kıyaslanması.....	121
Şekil 4.52: CFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki maksimum çökme değerlerinin ortam şartlarına göre kıyaslanması.....	122
Şekil 4.53: GCFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki maksimum temas kuvvetlerinin ortam şartlarına göre kıyaslanması.....	123
Şekil 4.54: GCFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki maksimum çökme değerlerinin ortam şartlarına göre kıyaslanması.....	124

Şekil 4.55: GFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki absorbe edilen enerjilerin ortam şartlarına göre kıyaslanması.	125
Şekil 4.56: CFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki absorbe edilen enerjilerin ortam şartlarına göre kıyaslanması.	125
Şekil 4.57: GCFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki absorbe edilen enerjilerin ortam şartlarına göre kıyaslanması.	126
Şekil 4.58: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi.	130
Şekil 4.59: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi.	130
Şekil 4.60: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi.	131
Şekil 4.61: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi.	131
Şekil 4.62: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi.	132
Şekil 4.63: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi.	132
Şekil 4.64: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GCFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi.	133
Şekil 4.65: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GCFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi.	133
Şekil 4.66: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GCFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi.	134
Şekil 4.67: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin basma dayanımlarının kıyaslanması.	134
Şekil 4.68: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin basma dayanımlarının kıyaslanması.	135
Şekil 4.69: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin basma dayanımlarının kıyaslanması.	135
Şekil 4.70: CFRP, GCFRP ve GCFRP kompozit numunelerin basma testi sonucu oluşturdukları hasarlar.	136
Şekil 4.71: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin 10 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayıları.	137
Şekil 4.72: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin 15 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayıları.	138
Şekil 4.73: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin 20 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayıları.	138
Şekil 4.74: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin 10 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayıları.	139
Şekil 4.75: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin 15 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayıları.	140
Şekil 4.76: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin 20 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayıları.	140
Şekil 4.77: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin 10 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayıları.	141
Şekil 4.78: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin 15 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayıları.	142
Şekil 4.79: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin 20 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayıları.	142

Şekil 4.80: GFRP kompozit numunenin SEM analizi.	147
Şekil 4.81: CFRP kompozit numunenin SEM analizi.....	147
Şekil 4.82: GCFRP hibrit kompozit numunenin SEM analizi.	148
Şekil 4.83: Deniz suyunda 90 gün boyunca yaşlandırılmış GFRP kompozitin SEM analizi.....	149
Şekil 4.84: Deniz suyunda 90 gün boyunca yaşlandırılmış CFRP kompozitin SEM analizi.....	149
Şekil 4.85: Deniz suyunda 90 gün boyunca yaşlandırılmış GCFRP kompozitin SEM analizi.....	150



SEMBOLLER VE KISALTMALAR

M.Ö	: Milattan önce
L	: Uzunluk
Δl	: Uzunluk değişimi
d	: ap
P	: Yük
F	: Kuvvet
t	: Zaman
A	: Alan
m	: Kütle
v	: Hacim
W	: Ağırlık
ρ	: Yoğunluk
mg	: Miligram
σ	: Normal gerilme
τ	: Kayma gerilmesi
γ	: Kayma açısı
ν	: Poisson oranı
ϵ	: Şekil değiştirme oranı
E	: Elastisite modülü
G_{12}	: Kayma modülü
S	: Kayma mukavemeti
\emptyset	: ap
μ	: Sürtünme katsayısı
g	: Yerçekimi ivmesi
n	: Devir sayısı
R_a	: Yüzey pürüzlülüğü
V	: Hız
S	: Kayma mesafesi
Δm	: Aşınan kütle
W	: Aşınma oranı
SAO	: Spesifik aşınma oranı
VARTM	: Vakum destekli reçine transfer metodu
FTPK	: Fiber takviyeli polimer kompozitler

GFRP	: Cam/epoksi kompozit
CFRP	: Karbon/epoksi kompozit
GCFRP	: Cam-karbon/epoksi kompozit
HNT_s	: Halloysit nanotüp
BF	: Bazalt fiber
SiC	: Silisyum karbür
B₄C	: Bor karbür
TiC	: Titanyum karbür
Al₂O₃	: Alüminyum oksit
SiO₂	: Silisyum dioksit
H₂SO₄	: Sülfürik asit
ASTM	: Uluslararası Amerikan test ve materyalleri topluluğu
pH	: Potansiyel Hidrojen
Au	: Altın
Pd	: Paladyum
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
FEP	: Flor etilen propilen

ÖZET

Doktora Tezi

POLİMER MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN FARKLI ORTAM ŞARTLARINDAKİ MEKANİK VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ahmet SAYLIK

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

161+XV sayfa

2022

Danışman: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

Bu çalışmada; vakum destekli reçine transfer kalıplama metodu ile üretilen sekiz katmanlı tabakalı cam/epoksi (GFRP), karbon/epoksi (CFRP) ve cam-karbon epoksi hibrit (GCFRP) kompozitlerin yapay deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamında 30,60 ve 90 gün boyunca yaşlandırılma etkisinin kompozit yapılarıdaki mekanik ve tribolojik davranışlarına etkisi incelenmiştir. Kompozitlerin mekanik dayanımlarını incelemek için çekme, üç nokta eğilme, düşük hızlı darbe testi ve basma testleri yapılmıştır. Tribolojik davranışları incelemek için ise kuru kayma aşınma testleri yapılmıştır. Farklı sıvı ortamlarında yaşlandırılan kompozitlerin kütlece absorpsiyon yüzdelerine bakıldığında en yüksek kütlece absorpsiyonuna sahip olan kompozitlerin CFRP kompozitler olduğu, en düşük kütlece absorpsiyonuna sahip kompozitlerin GFRP kompozitler olduğu hesaplanmıştır. Tüm ortam koşullarında Çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve basma dayanımının en yüksek olduğu kompozit tipi karbon/epoksi kompozitler olduğu tespit edilmiştir. Düşük hızlı darbe dayanımının en yüksek olduğu kompozit tipi ise cam/epoksi kompozitler olmuştur. Kompozitlerin tribolojik davranışları incelendiğinde cam elyafın spesifik aşınma oranının karbon elyaftan fazla olduğu sonucuna varılmıştır. Cam-karbon hibrit şekilde üretilmiş kompozitlerin çekme mukavemeti, basma mukavemeti ve düşük hızlı darbe mukavemetini artırırken, eğilme mukavemetini azalttığı sonucuna varılmıştır. Ortam yaşlandırma etkilerine bakıldığında, yaşlandırma süresi arttıkça kompozitlerin mekanik ve tribolojik mukavemetlerinin azaldığı etkilerini azaldığı görülmüştür. Tüm yaşlandırma ortamları koşullarına bakıldığında mekanik dayanıklılığı en çok etkileyen ve değiştiren ortamın deniz suyu yaşlandırma ortamı olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Vakum destekli reçine transfer metodu, Polimer matrisli kompozit, Hibrit kompozit, Cam fiber, Karbon fiber, Yaşlandırma ortamı.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF POLYMER MATRIX HYBRID COMPOSITES UNDER DIFFERENT ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Ahmet SAYLIK

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

161+XV sayfa

2022

Supervisor: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

In this study; eight-layer laminated glass/epoxy (GFRP), carbon/epoxy (CFRP) and glass-carbon epoxy hybrid (GCFRP) composites produced by vacuum assisted resin transfer molding method for 30, 60 and 90 days in artificial seawater, engine oil and diesel fuel environment. The effect of the aging effect on the mechanical and tribological behavior of composite structures was investigated. Tensile, three-point bending, low-speed impact test and compression tests were performed to examine the mechanical strength of the composites. Dry slip wear tests were carried out to examine the tribological behaviors. Considering the mass absorption percentages of the composites aged in different liquid environments, it was calculated that the composites with the highest mass absorption were CFRP composites, and the composites with the lowest mass percent absorption were GFRP composites. It has been determined that composite type carbon/epoxy composites have the highest tensile strength, bending strength and compressive strength in all ambient conditions. The composite type with the highest low-velocity impact strength was glass/epoxy composites. When the tribological behaviors of the composites were examined, it was concluded that the specific wear rate of glass fiber was higher than carbon fiber. It was concluded that while glass-carbon hybrid composites increase tensile strength, compressive strength and low velocity impact strength, they decrease flexural strength. Considering the effects of ambient aging, it was observed that the mechanical and tribological strengths of the composites decreased as the aging time increased. When the conditions of all aging environments are examined, it has been determined that the environment that affects and changes the mechanical strength the most is the seawater aging environment.

Keywords: Vacuum assisted resin transfer method, Polymer matrix composite, Hybrid composite, Glass fiber, Carbon fiber, Aging environment.

1. GİRİŞ

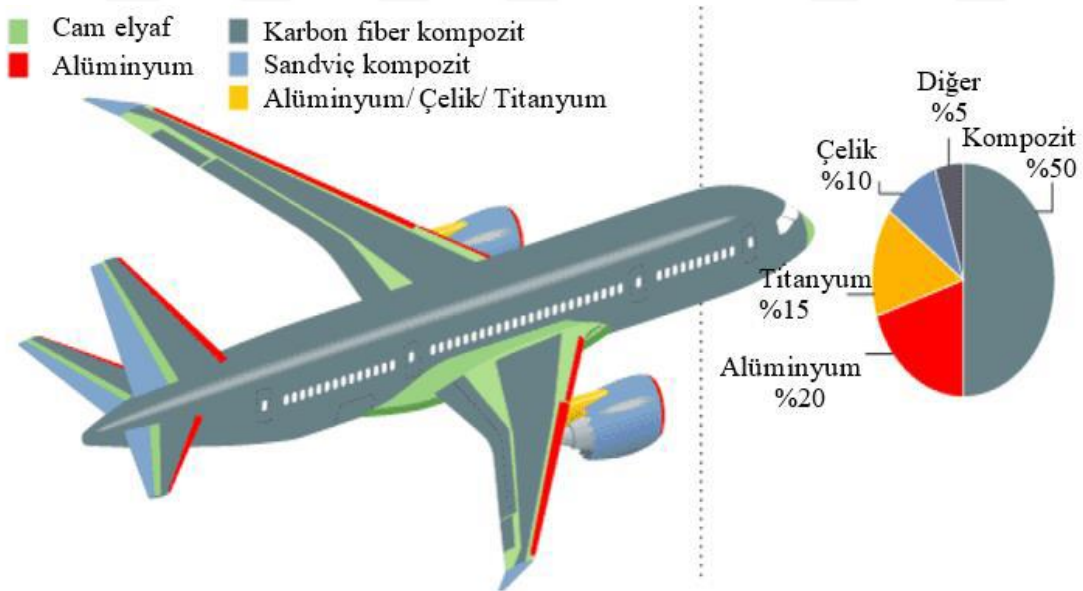
Tarih boyunca insanlık kendi ihtiyaçları gereksinimlerine göre yeni bir malzeme arayışı içinde olmuştur. Eski zaman insanları birden fazla malzemeyi karıştırarak, birbirine içinde çözerek veya ergiterek yeni bir malzeme elde etmişlerdir. Kompozit malzemeler insanoğlunun yeni bir malzeme arayışında zamanla keşfettikleri bir malzeme grubu olmuştur. Tarihte; milattan önce (M.Ö) 1500’lü yıllarda Mısır ve Mezopotamya uygarlıklarının yaş çamur ile samanı birlikte kullanarak kerpiç denilen malzemeyle ev yapmaları, yine M.Ö. 300’lü yıllarda Eski Makedonya hükümdarı Büyük İskender’in kullandığı göğüs zırhı keten ve doğal yollarla elde edilen yapıştırıcının günümüzdeki adıyla ele yatırma yönteminin kullanılması ile yapılan *linotorax* göğüs zırhı bilinen en eski kompozit malzeme örneklerindedir. Kompozit malzeme; en genel tabirle birbirini içinde çözünmeyen iki veya daha fazla bileşenden oluşmuş yapıların makro düzeyde birleşmesi olarak tanımlanır.

Günümüz malzeme teknolojisinin gelişmesine paralel olarak kompozit malzeme teknolojisi de her geçen gün gelişmeye devam etmektedir. Kompozit malzemelerin tasarım kolaylığına, üstün mekanik özelliklere, kolay işlenebilir ve çok fonksiyonlu özelliklere sahip olması günümüz teknolojisinde konveksiyonel malzemelerin yerine tercih edilmesinin sebeplerindedir. Özellikle yüksek mukavemet, darbe direnci, korozyon direnci ve hafiflik gibi özelliklerin çok önemli olduğu uzay, havacılık, denizcilik ve otomotiv endüstrisindeki ana yapı malzemelerinin büyük kısmını kompozit malzemeler oluşturur.

Endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen kompozit tiplerinden birisi fiber takviyeli polimer matrisli tabakalı kompozitlerdir. Tabakalı kompozitler; farklı tabaka dizilimi, fiber oryantasyonu ve farklı matrislerle oluşturulabilmesi gibi avantajlara sahip olması kompozit yapı tasarımcılarına büyük kolaylıklar sağlar. Polimer bazlı matrislerden en çok kullanılan matris tipi termoset matrislerdir. Termoset matrisler sıcaklığa karşı yüksek mukavemet gösteren ve çabuk şekillendirilebilir plastiklerdir. Kompozit malzemelerin yaklaşık %90’ına yakın oranı polimer bazlı matrislerden üretildiklerinden ötürü kompozit malzemelere takviye edilmiş plastikler de denilir. Termoset matrislerin en çok tercih edileni ise epoksi reçinelerdir.

Epoksi reçinelerin özellikle karbon, cam ve bor fiberle takviye edilmesi ile yüksek mukavemete sahip kompozitler oluştururlar. Fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler (FTPK), kompozit uygulamalarında fabrikasyon prosesleri kolay olduğundan dolayı en çok kullanılan kompozit türüdür.

FTPK'lerin gerilme dayanımı, kırılma veya çatlama dayanıklılıkları yüksektir. Aşınmaya, delinmeye ve korozyona karşı dirençli malzeme grubudur. FTPK'lerin kullanıldığı uygulamaların artmasıyla birlikte sahip olduğu bu özellikleri geliştirilerek uygulama sahası her geçen gün genişletilmektedir. Örnek olarak, fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler (FTPK) yeni nesil deniz taşıtlarında korozif ortama direnç sağlamasından dolayı sıklıkla tercih edilmektedir. Yine içme sularını, atık suları, asit, petrol, yağ ve çeşitli kimyasalları depolamak için kullanılan depolama tankları FTPK malzemelerden yapılmaktadır. Bu depolama tankları uzun ömürlü olup herhangi bir bakıma ihtiyacı olmadan, polietilen kaplaması sayesinde depolanan maddenin uzun süre muhafaza edilmesini sağlar. Fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin en çok tercih edildiği alanların başında havacılık sektörü örnek verilebilir. Şekil 1.1'de uçak yapısında tercih edilen kompozitlerin uygulandığı kısımlar gösterilmektedir.



Şekil 1.1: Boeing 787 yolcu uçak yapısındaki malzeme kombinasyonunun yüzdesel dağılımı[1].

1.1 Tezin Kapsamı

Bu çalışmanın motivasyonunu; fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin farklı bozuma ortam şartlarındaki mekanik ve tribolojik dayanımlarının ne düzeyde olduğu konusuna cevap bulmak istenmesi oluşturmuştur. Bozulma ortam şartlarının etkisiyle mekanik dayanıklılıklarının ciddi oranda azalma gösterdiği geleneksel metalik yapı malzemelerinin yerine fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin denenmesi fikrini doğurmuştur.

Korozif etki ve bozuma ortamı oluşturacak ortam şartlarında kullanılan yapının mekanik dayanıklılığını artırmak için kompozit malzeme teknolojisinde en çok tercih edilen cam ve karbon fiberler epoksi polimer matrisle takviye edilerek üretilmiştir. Cam ve karbon fiberlerin farklı mekanik dayanıklılık gösterdiği uygulama alanlarında cam-karbon elyafların beraber dizilimleriyle oluşturulan tabakalı kompozitlerin hibritleşmesiyle mekanik dayanıklılığı iyileştirme etkisi denenmiştir. Fiberlerin matris malzemeyle takviye edilmesi ile oluşturulan kompozitlerde fiber boşluk hacim oranının minimum düzeyde olması için vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) metodu ile kompozitler üretilerek denenmiştir. Bu kompozit üretimi sayesinde bozuma ortam koşullarındaki sıvı absorpsiyon geçişinin azaltıcı özelliği denenmek istenmiştir. Üretilen kompozitlerin farklı bozuma ortamı oluşturacak sıvı ortam koşullarındaki mekanik ve tribolojik davranışları incelenmiştir. Bu durumda çalışma literatürde incelendiği kadarıyla birçok noktada ilkleri içerir duruma gelmiştir:

- Dokuma tipi (twill) cam fiberlerin üst ve alt katmanda, dokuma tipi (plain) karbon fiberlerin ise merkezde konumlandırılacak şekilde dizilmesiyle oluşturulan cam-karbon hibrit tabakalı kompozitler üretilmiştir.
- Üretilen cam/epoksi, karbon/epoksi ve cam-karbon/epoksi tabakalı üç farklı kompozitler yapay deniz suyu, motor yağı ve motorin yakıt ortamında farklı süre şartlarında yaşlandırılma işlemi yapılmıştır.
- Farklı yaşlandırma ortam ve süresi şartlarında yaşlandırma işlemi yapılan kompozitlerin mekanik davranışlarını incelemek için çekme, basma, üç nokta eğilme, düşük hızlı darbe deneyine ait testler yapılmıştır.
- Yaşlandırılmış kompozitlerin tribolojik davranışlarını incelemek için adeziv aşınma testleri yapılarak incelenmiştir.

1.2 Hipotez

Doktora tez çalışmasına ait hipotez aşağıdaki belirtilen maddelerle açıklanabilir;

- Elyaf takviyeli kompozitlerde termosetler sınıfından olan epoksi malzemeler matris olarak kullanılabilir.
- Dokuma örgülü cam ve karbon elyafların epoksi matrisli kompozitlerle takviye edilerek üretilebilir.
- Çalışmada test edilecek olan kompozitler vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) metodu ile üretilebilir ve bu sayede sentetik takviyeli fiberlerin polimer matris ile birleştirilmesiyle büyük boyutlu kompozit parçaların üretimi sağlanabilir.
- Farklı bozunma ortam koşullarında yaşlandırılan cam/epoksi ve karbon/epoksi kompozitlerin mekanik ve tribolojik dayanıklılıklarını geliştirmek için cam-karbon/epoksi hibrit kompozitler üretilebilir.
- Bu maddelerin genel toplamına bakıldığında hibritleşme etkisiyle bozuma ortamlarındaki kompozitlerin dayanıklılıkları geliştirebilir.

1.3 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında; cam/epoksi kompozit (GFRP), karbon/epoksi kompozit (CFRP) ve cam-karbon epoksi hibrit kompozitlerin (GCFRP) yapay deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamlarında farklı sürelerde yaşlandırılmasından sonra mekanik ve tribolojik davranışları kıyaslanarak incelenmiştir. Kompozit numunelerin üretiminde; fiber takviyesi olarak cam ve fiber dokuma tipi elyaflar, matris olarak epoksi matris seçilerek 8 tabakalı olacak şekilde VARTM tekniği kullanılarak üretilmiştir. Farklı ortamlarda yaşlandırılmış kompozitlerin yaşlandırma ortamının etkisinin kompozitlerin çekme, üç nokta eğilme, basma, düşük hızlı darbe ve aşınma deney testleri yapılarak mekanik performansları yorumlanmıştır. Cam, karbon ve cam-karbon elyafların birlikte istiflenerek hazırlandığı kompozitlerde elyaf hibritleşme etkisinin kompozit yapının mekanik özelliklerine katkısının ne olduğu sorusuna cevap bulmak istenmiştir. Kompozit teknolojisinin uygulandığı korozif etki ve bozuma ortamında tercih edilen kompozit yapıların farklı süre ve yaşlandırma ortamlarında mekanik dayanıklılıkları tespit edilerek uygulanma sahasına katkı verilmek amaçlanmıştır.

1.4 Literatür Özeti

Mayandi ve diğ., hibrit polimer kompozitlerin çeşitli çevresel koşulları altında dayanıklılık ve yaşlanma performansına genel bir bakış kazandırmak için literatürde yapılan çalışmalardan sonuçlar çıkarmışlardır[2]. Cheng ve diğ., karbon/keten elyaf hibrit kompozitlere yüksek sıcaklıkta suya daldırma işlemi uygulanarak yaşlandırma işlemi yapıldığında karbon elyaf katmanların yüzeyde bulunduğu kompozitlerin keten elyafın yüzeylerde bulunduğu kompozit malzemelere göre daha yüksek eğilme gerilmesi ve eğilme modülüne sahip olduğu tespit edilmiştir [3]. Humeau ve diğ., karbon/epoksi kompozitlerde su difüzyonunun statik çekme gerilme altındaki davranışlarına bakılarak kompozitlerin su ve mekanik yükleme arasındaki bağlantı etkilerinin hasar gelişimini nasıl etkilediği incelemiştir[4]. Ghabezi ve diğ., Farklı dizilimlerle oluşturulmuş CFRP kompozitlerin nem absorpsiyonunun sönümlenme ve dinamik rijitlik üzerindeki etkisi incelendiğinde tek yönlü fiber takviyeli kompozit tabakaların, çapraz katlı laminatlardan daha fazla suyu emerek absorbe ettiği sonucuna varmışlardır[5]. Tanks ve diğ., C-cam örgülü fiber kompozitler ağırlıkça %10'luk sulu H₂SO₄ (1.89 mol/L) bir konsantrasyon ortamında farklı sıcaklık dereceleri ve sürelerde bekletilerek test edilmiştir, C-cam fiberlerin E-cam ve karbon fiberlere göre asidik ortamlarda daha dayanıklılık sağladığını belirtmişlerdir [6]. Li ve diğ., 19 mm çapında tek yönlü karbon/cam (çekirdek/kabuk) pultrüzyon teknolojisiyle üretilen hibrit çubuklar üretilerek farklı sıcaklıklardaki suya daldırılarak [7], petrol kuyusuna daldırılarak kesme dayanımı ve arayüz kesme dayanımının çubukların bozuma sürelerindeki ilişkiler incelenmiştir [6-7]. Rathore ve diğ., cam-karbon/epoksi ile 7 kat lamina tabakalı kompozitlerin farklı termal eğilme yükü altında 3 nokta eğilme gerilme davranışları incelenmiş; karbon ve epoksi arasındaki CTE uyumsuzluğunun büyüklüğünün cam ve epoksiye göre daha yüksek olup daha fazla CE katlı kompozitlerde test sıcaklığının artmasıyla dayanım ve modül bozulma oranının daha yüksek olduğu hesaplanmıştır[10]. Guo ve diğ., pultrüzyon teknolojisiyle ürettikleri karbon, cam ve karbon/cam hibrit elyaf takviyeli polimer (CFRP, GFRP, C/GFRP) kompozit plakaların 40 °C, 60 °C ve 80 °C'de deiyonize suya daldırılarak hidrotermal özellikleri deneysel olarak incelenmiştir[11]. Ghabezi ve diğ., GFRP ve CFRP epoksi kompozitlere yapay deniz suyu altında 45 gün boyunca yaşlandırma yapılmış; cam/epoksi laminaların eğilme mukavemeti yaklaşık %3.1 azalırken, karbon/epoksi laminaların eğilme mukavemeti %7.7 oranında azaldığı hesaplanmıştır[12].

Chen ve diğ., karbon/cam hibrit FRP kompozit laminaların eğilme performansı incelenmiş; $G_2C_4G_2$ gerilme ve basınç taraflarına simetrik olarak yerleştirilmiş bu tür iki cam katmanla, $G_2C_4G_2$ dizilimine sahip kompozitlerin $C_2G_4C_2$ dizilimine sahip kompozitlerden yaklaşık %18.3 daha yüksek eğilme gerilmesine sahip olduğu sonucuna varılmıştır[13]. Li ve diğ., karbon fiber takviyeli polimer matrisli (CFRP) kompozitlerin basma davranışını araştırdıklarında, eksenel bir sıkıştırma yükünün etkisi altında başlangıçtaki fiber yanlış hizalanmasının varlığının plastik akma ile sonuçlanacak önemli bir kesme gerilmesi konsantrasyonuna yol açtığı sonucuna varılmıştır[14]. Ali ve diğ., tasarladıkları fiber takviyeli kompozit süspansiyon sistemi için fiber-matris hacim oranı ve fiber oryantasyonunun sıkıştırma yükü altındaki mekanik etkilerini deneysel ve sayısal olarak karşılaştırmışlardır[15]. Örcen ve diğ., cam/epoksi kompozitlerin farklı sıcaklık şartlarındaki eksenel bası davranışlarını incelemiş, sıcaklığın derecesinin ve süresinin artmasıyla birlikte basma dayanımlarının azaldığını tespit etmişlerdir[16]. Fiber çekirdek-kabuk hibrit (CH) modu ve fiber rastgele hibrit (RH) modunda iki farklı karbon/cam epoksi hibrit kompozit çubuklar sürekli eğilme yüklemesi altında suya daldırılarak mekanik etkiler incelenmiş, suda yaşlandırma süresiyle eğilme mukavemeti azalmış ve eğilme yükleme seviyesinin artması sonucu RH levha için ekstra bir bozulma oranını beraberinde getirmiştir. Eğilme yükleme seviyesinin CH levhaların eğilme mukavemeti üzerindeki etkisi hafif olmuştur[17]. Barjasteh ve diğ., oksidasyon kinetiğini ve bozuma mekanizmalarını belirlemek için tek yönlü bir karbon fiber/cam fiber hibrit kompozitin termal oksidasyonu araştırmışlardır. Epoksi kompozit çubuklar, bir karbon fiber çekirdek ve bir cam fiber kabuktan oluşturulmuştur. Oksijen konsantrasyonu profilini ve kompozit çubuklar içindeki oksitlenmiş tabakanın (TOL) kalınlığını elde etmek için iki hibrit bölümün her biri için bir reaksiyon-difüzyon modeli geliştirilmiştir. TOL, 180°C ve 200°C'de 8736 saate kadar maruz kalan numuneler için deneysel olarak ölçülmüş ve ölçülen değerlerin modelleme tahminlerine benzediği gözlemlenmiştir[18]. Kumar ve diğ., sırasıyla %5, %10 ve %15 grafit dolgu oranlarına sahip olan üç farklı numune tipine sahip cam/karbon epoksi hibrit kompozitler sırasıyla 40 °C, 60 °C ve 80 °C sıcaklıklarda üç saat kaynatılarak hızlandırılmış yaşlandırmaya tabi tutulmuştur. Yaşlandırma sonucunda; numunelerin mukavemetinin kaynama sıcaklığının artmasıyla kademeli olarak azaldığı sonucuna varmışlardır[19]. Hawileh ve diğ., karbon, cam ve karbon-cam hibrit kombinasyonlu fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin değişen sıcaklık şartlarına göre çekme mukavemetine etkisini incelemiştir. Çekme testi sonuçlarına göre, kompozit C ve G levhaların mekanik özelliklerindeki azalma, kompozit hibrit CG levhalarından

daha fazla olduğu tespit edilmiştir. C, G ve CG'nin 250 °C'deki elastik modülü sırasıyla yaklaşık %28, %26 ve %9 oranında azaltıldı ve aynı sıcaklıktaki çekme mukavemetleri yaklaşık %42, %31 ve %35 oranında azaldığı hesaplanmıştır [20]. Takviyeli polimer matrisli kompozitlerle tasarlanmış deniz araçlarının deniz suyu, tuzlu su vb. nemli sıvı ortamlarındaki dayanıklılığın belirlenmesi önemli bir çalışma alanıdır. Açık deniz endüstrilerinde kullanım için kompozitler geliştirmek ve optimize edilmeye çalışılmıştır [21–28]. Enfedaque ve diğ., cam fiberlerin karbon fiberlerle hibritleşmesinin darbe altındaki davranışına etkilerini incelemiştir, cam fiberlerin karbon fiberle hibridizasyonu sonucu darbe altındaki maksimum yükünü yaklaşık %10 ve harcanan enerjiyi yaklaşık %25 artırdığını hesaplamışlardır[29]. Imielinska ve diğ., dokuma tip aramid-cam elyaf/epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışına suya daldırma yaşlandırmasının etkisini incelemiştir[30]. Sayer ve diğ., -20 °C ile 60 °C sıcaklığı aralığında ve artan darbe enerjisine karbon/cam hibrit kompozitlerin darbe davranışları incelenmiştir. İnceleme sonucunda, [0/0/90/90]_s karbon/cam laminalar için perforasyon eşiklerinin -20 °C için birbirine eşit 40 °C ve 60 °C için [0/90/±45]_s ile muadillerine göre daha yüksek olduğu bulunmuştur[31]. Suvarna ve diğ., ultrasonik C-tarama ve mikro-odak bilgisayarlı tomografi kullanılarak değerlendirilen sıcaklığın CFRP' nin düşük hızda darbe hasarı ve darbe sonrası eğilme mukavemeti üzerindeki etkisini incelemiştir [32]. Kumar ve diğ., kenevir-bazalt/epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışı üzerinde sıcaklık ve hibridizasyonun etkisini incelediklerinde, yüksek sıcaklıklarda çarpmadan sonra darbe mukavemetinde ve artık eğilme mukavemetinde bir azalma olduğunu vurgulamışlardır[33]. Hoffman ve diğ., bazı kullanım durumlarına göre şiddetli olabilen termal yaşlanmaya maruz kalan polimer çekirdekli kompozit iletkenler (PÇKİ) 'nin bir türü olan Alüminyum çekirdekli kompozit iletkenlerde (AÇKİ) kullanılan hibrit bir cam/karbon epoksi kompozit çubuğun yaşlanmasını azaltmak için tescilli bir florlu etilen propilen (FEP) bazlı yüzey kaplaması uygulanmıştır[34]. Komorek ve diğ., deniz suyu yaşlandırılmasına maruz kalan cam/karbon epoksi hibrit kompozitlerin deniz suyu etkisinin önceki darbe yüklemesi ile etkileşimi cam kompozitlerde %33 ve cam-karbon kompozitlerde %50'nin üzerinde toplam mukavemet kaybına neden olduğunu hesaplamışlardır[35]. Jesthi ve diğ., deniz suyu ortamında 90 gün boyunca yaşlandırılmış [GCG₂C]_s tipi hibrit kompozitlerin darbe dayanımının GFRPC' ye kıyasla %44.5 oranında azaldığını hesaplamıştır[36]. Hibrit dizilimini [G₂C₂G]_s yaptıkları bir diğer çalışmada ise deniz suyu ortamında yaşlandırılmış hibrit kompozitlerin çekme, eğilme ve darbe mukavemetinin kuru durumuna göre sırasıyla %6.4, %11.2 ve %11.1 oranında azaldığını tespit etmişlerdir[37].

Akderya yaptığı doktora tez çalışmasında; termal yaşlandırma altındaki şartlardaki termal yorulmanın cam fiber/epoksi (GFRP) kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. -18 °C'de termo-oksidatif yaşlandırılmış numunelerin yük taşıma kapasitelerinin arttığı, numunelere uygulanan düşük hızlı darbenin enerjisi arttıkça yük taşıma kapasitelerinin azaldığını gözlemlenmiştir [38].

Kaybal; yaptığı doktora tez çalışmasında tuzlu su ortam yaşlandırmasının civata bağlantılı halloysit nanotüp- epoksi/bazalt fiber nanokompozitlerin düşük hızlı darbe davranışlarına etkisini incelemiştir. Halloysit nanotüp (HNT) takviyesi ile HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin tuzlu su ortamında yaşlandırma sonrasındaki çekme testi ve düşük hızlı darbe testi altındaki dayanımlarının bazalt fiber (epoksi/BF) kompozit malzemeye göre daha iyi performans gösterdiği sonucuna varmıştır[39]. Kaya; yaptığı doktora tez çalışmasında dokuma tipi aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin yaşlandırma ortam koşullarına bağlı olarak dinamik özelliklerindeki değişimler incelenerek kıyaslanmıştır. Çalışmasının sonucunda; nemli ortamda yaşlandırma yapılan aramid elyaf takviyeli kompozitlerin frekans ve sönüm özelliklerinin karbon elyaf takviyeli kompozitlere göre sırasıyla daha düşük ve büyük aşınma/bozuma oranı gösterdiği sonucuna varmıştır[40]. Ak; yüksek lisans tez çalışmasında, karbon nanotüp ve bor nitrür nano partikülleri ilaveli karbon/epoksi kompozit borularının mekanik özelliklerine hidrotermal yaşlandırmanın etkisini incelemiştir. Termal yaşlandırma etkisiyle tüm numunelerde mukavemet kaybına neden olduğu nanopartikül katkılı kompozitlerin termal yaşlandırma sonucunda saf numunelere göre daha fazla mukavemet kaybına uğradığı sonucuna varmıştır [41]. Oğuz; doktora tez çalışmasında cam-aramid/epoksi hibrid kompozitlerin saf su ve deniz suyunda 1000 saat boyunca 25°C ve 70°C sıcaklıkta yaşlandırıldıktan sonra mekanik özellikleri üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmasının sonucunda; su tipi, sıcaklık ve kumaşların sıralanışı kompozitlerin su emiliminde doğrudan etkili olduğunu tespit etmiştir.

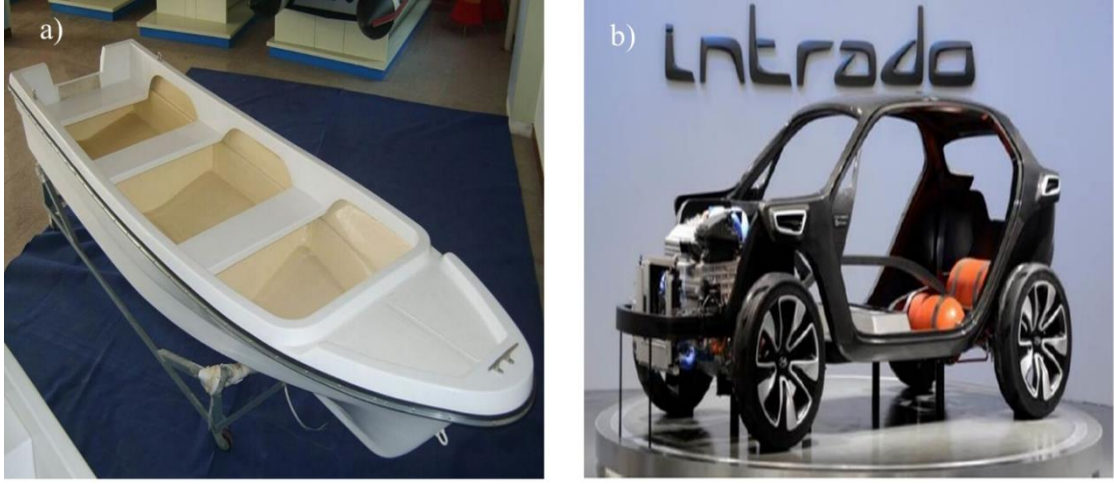
Literatürde gösterildiği gibi fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler farklı çevre ortamlarındaki dayanıklılıkları incelemek için birçok araştırmacının güncel çalışma alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Kompozit malzeme teknolojisinin gelişimine paralel olarak kullanıldığı ortamlar her geçen gün genişlemekle birlikte, kompozit yapıların tercih edildiği korozif sıvı, kimyasal sıvı ortamları ve sıcaklık ortamı gibi bozuma ortamlarındaki dayanıklılığını incelemek büyük bir önem arz etmektedir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeleri en genel tabiriyle birbiri içinde çözünmeyen en az iki malzemenin makro düzeyde homojen biçimde birleşmesiyle oluşmuş malzemeler olarak tanımlarız. Kompozit malzemelerin geçmişi çok eski dönemlere insanoğlunun kurduğu ilk medeniyetler olan Mısırlılar ve Mezopotamya uygarlıklarına kadar uzanır.

Mısırlıların M.Ö. 1500'li yıllarda kullandığı kerpiç yapılar için çamur yapılarla takviye edilmiş bambu çubukları takviye elamanı olarak kullanmaları ve gemilerinin inşasında kullandıkları tabakalı ahşaplar örnek verilebilir. 20. yüzyılın başlarında havacılık, uzay, denizcilik, otomotiv ve savunma sanayisi alanlarında kullanılan malzemelerin geleneksel malzemelere göre daha yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip ihtiyaç olduğu kanaatine varılmıştır. Bu ihtiyaç neticesinde cam ve karbon fiberlerin keşfedilmesi, polimer malzeme teknolojisi üzerindeki gelişmeler takip ederek günümüzdeki modern kompozit malzemelerin ortaya çıkmasının temelini oluşturmuştur. Kompozit teknolojisinin gelişmesiyle paralel olarak günümüz uzay ve hava araçları teknolojisinde kullanılan ana yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadırlar.

Günümüz teknolojisindeki örnek olarak Şekil 2.1'de gösterilen cam fiber takviyeli polimer matris (GFRP) malzemedan yapılmış tekne ve dış yüzeyi karbon fiber takviyeli polimer matristen (CFRP) yapılmış otomobil gösterilebilir. Kompozit malzemeler takviye elamanı ve matris elamanı olmak üzere iki ana fazdan oluşur. Kompozit malzeme içerisinde bağlayıcı ve destekleyici yapı matris elamandır. Matris elamanın görevi; takviye elemanlarını rijit biçimde bir arada tutmak ve malzeme üzerinde oluşacak gerilmeleri takviye elamanına homojen şekilde aktarmaktır. Takviye elamanın görevi ise, kompozit malzemeye dışarıdan bir yük uygulandığında üzerine uygulanan yükü taşıması beklenen yapı takviye elemanıdır. Takviye elemanlarının yüzeylerine yapışan matris yapı sayesinde bir bütün halinde bulunarak rijit yapıdaki kompozit malzemeyi oluşturmaktadırlar [42].



Şekil 2.1: a) Cam fiber gövdeli tekne[43], b) Karbon fiber takviyeli Hyundai otomotiv araç gövdesi [44].

2.1 Matris Elamanı

Kompozit malzemelerin ana elemanlarından birisi matris fazıdır. Matris fazı kompozit malzeme tanımında takviye elemanını bir bütün içinde bir arada tutmaya yarayan eleman olarak tanımlanır. Matris elemanı, fiber (elyaf) takviyeli kompozitlerde fiberlerin uygun dizilimde bir arada durmasını sağlayarak, yapıya uygulanan yükü homojen bir şekilde elyaf liflere iletilmesini sağlar. Takviyeli kompozit malzemelerde üzerine etkiyen yükün büyük bir kısmı fiberler tarafından yükün çok küçük bir kısmı ise matris faz üzerinden taşınırlar. Kompozit malzeme yapısının rijitliğini sağlayan eleman matris genel olarak homojen ve sünek bir yapıya sahiptir. Matris eleman birlikte kullanıldığı fiberlerden daha düşük elastisite modülü değerine sahiptir [45].

Matris elemanlarının tercih edilmesinde kullanım yeri ve ortam şartları dikkate alınarak malzeme seçimi yapılmaktadır. Matris malzemesine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması aşağıdaki gibi yapılmaktadır;

1. Polimer matrisli kompozitler (PMK)
2. Metal matrisli kompozitler (MMK)
3. Seramik matrisli kompozitler (SMK)
4. Karbon-Karbon kompozitler (KKK)

2.1.1 Polimer matrisli kompozitler

Polimerler, en genel tanımıyla çok sayıda aynı veya farklı atomik grupların kimyasal bağlarla az veya çok düzenli bir biçimde bağlanarak oluşturduğu uzun zincirli yüksek molekül ağırlıklı bileşikler olarak tanımlanır. Polimer malzemeler birden fazla monomer adı verilen küçük moleküllerin bir araya gelmesiyle elde edilen zincirlerin oluşturduğu sentetik malzemelerdir. Polimer matrisli kompozitlerin çoğu amorf bir yapıya yani kararlı bir kristal yapıya sahiptirler. Polimer matrisli kompozitler, çoğunlukla petrokimya esaslı ürünlerdir ve günümüzde yaygın kullanım alanı olan malzeme gruplarındandır. Düşük maliyetli oluşu ve kolay işlenebilir bir malzeme grubu olmasından dolayı kompozitlerin matris seçiminde en çok tercih edilen matris grubu polimer matrisli kompozitler oluşturmaktadır. Polimer malzeme endüstrisi, sağlık (ilaç) sektörü olmak üzere deniz taşıtları, otomotiv, havacılık, uzay ve inşaat sektörü gibi birçok sektörde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Polimer yapı malzemelerin dezavantajları düşük elastik modül, düşük çalışma sıcaklığı ve yük altında visko-elastik malzeme özelliği göstermesinden dolayı kullanım alanları sınırlıdır [46]. Polimerik kompozitler uygulandıkları yapıya, korozyona karşı dirençli, uzun süreli kullanıma uygun, işlenmesi kolay, şekillendirilebilen, birim kütle başına yük kapasitesi gibi yüksek malzeme özelliği gibi avantajlar sağlar [47]. Polimer matrisli kompozitler, termoset ve termoplastik matrisli kompozitler olmak üzere ikiye ayrılır.

2.1.1.1 Termoplastikler

Oda sıcaklığı koşullarında katı halde bulunan plastik malzemeler bilinen termoplastik malzemelerdir. Termoplastik malzemelerde, moleküller ayrı ayrı özel olarak birleştirilmezler. Bu bağlar zayıf ikincil bağlar veya Van Der Waals bağları ve hidrojen bağları gibi moleküler arası kuvvetler tarafından bir arada tutulur. Termoplastik polimerler yüksek ısıyla esnetilerek yumuşatılabilir, eritilebilir ve arzu edildiği kadar yeniden şekillendirilebilirler. Termoplastik malzemelerden yapılan ürünler, tüketici ve endüstriyel kullanımda özellikle orijinal ekipman üreticileri ve diğer üreticiler tarafından kullanılan parçaların imalatında yaygındır. Bu malzemelerin çoğu, imal edilmiş bir montaj için ihtiyaç duyulan ısı ve elektrik yalıtımını sağlayabilir. Termoplastik malzemedan üretilmiş ürünlere; polietilen, polipropilen ve polistireni malzemedan yapılmış ürünler verilebilir. Şekil 2.2'de termoplastik malzemedan yapılmış gofret tipi flanş kolu kelebek vana gösterilmektedir.

Mühendislik uygulamalarında en yaygın biçimde matris malzemesi olarak kullanılan termoplastikler; poliamid, polikarbonat, polieter eter keton, polietilen, polipropilen ve polistiren olarak bilinmektedir.



Şekil 2.2: Termoplastik gofret tipi flanş kolu kelebek vana [48].

Naylon -Poliamid (PA)

Naylon'un; Naylon 6, Naylon 66, Naylon 610 , Naylon 612 ve Naylon 11 gibi çeşitleri vardır. Tüm naylon türleri elyaflar ile takviye edilebilirler. Naylon termoplastikler kristal yapıya sahiptir. Naylon 6, dökümle üretilebilir yapıdadır. Diğer naylon çeşitlerinin akmaya karşı göstermiş dirençleri yani vizkoziteleri yüksek olduğundan yüksek basınç gerektiren enjeksiyon ve ekstrüzyon yöntemleri kullanılarak üretilirler. Yüksek mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olan naylon termoplastikler kam, kaymalı yatak ve dişli çark malzemesi olarak kullanılırlar.-

Polikarbonat (PC)

Polikarbonat normal şartlarda şekilsiz ve saydam termoplastikler olarak bilinir. Polikarbonatlar işlenmesi sonucunda kullanıldıkları endüstride çeşitli renklerde saydam ve yarı saydam üretilerek cam malzemeye alternatif malzeme grubunu oluştururlar. Şeffaf (saydam) ve darbeye dayanıklı polikarbonat levhalar, gözlük camından kurşun darbe sönmülmesi mükemmel derecede olan kurşun geçirmez cama, medikal cihazlardan otomotiv akşamlarına, seralardan dijital disketlere ve dış ortam aydınlatma armatürlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Polikarbonat malzemeler yüksek düzeyde ısı direncine sahiptirler, bu özellikleri sayesinde alev geciktiriciler ile birlikte bu direnci daha üst seviyeye taşıyabilirler.

Polieter eter keton (PEEK)

Polieter eter keton (PEEK) lifleri; kimyasallara, ısıya ve aleve karşı gösterdikleri dayanıklılıkla bilinirler.

Aşınma ve sürtünme dayanımı, zararlı maddeler içermeyen yapısı sayesinde medikal tekstili, taşımacılık tekstili ve farklı endüstriyel tekstillerde geniş bir kullanım alanına sahiptir[49]. PEEK malzemeler kısmi kristalli, tel kaplama ve kompozit malzemeler için uygun bir reçine olarak karşımıza çıkar. Oda sıcaklığında tok bir yapıdadır ve aşınmaya karşı çok dayanıklı bir plastik türüdür. Uygulandıkları yapı sayesinde sulu ortama ve diğer çözücülere karşı dayanıklıdır. Bu plastik türü yüksek dayanım isteyen havacılık, uzay, askeri ve nükleer santral endüstrisinde tel ve kablo için yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Polietilen (PE)

Polietilen plastiklerin düşük yoğunluklu ve yüksek yoğunluklu türleri vardır. Bu plastikler kimyasallara ve korozyon aşınmaya karşı dirençlidir. Darbe çentik mukavemeti yüksek, nem absorbe etme özelliği neredeyse hiç olmayan bir malzemedir. Polietilen dünya genelinde polipropilen ve polivinil klorürle birlikte en çok üretilen üç sentetik plastik türünden biridir.

Polivinil klörür (PVC)

PVC plastik endüstrisinde en çok kullanılan malzemelerden biridir. Rijit ve yumuşak iki tip PVC vardır. Hücreli PVC cinsleri köpük malzeme olarak kullanılır. Ateşe ve aleve karşı dayanıklıdır, bu özellikleri kendi kendini söndürebilme özelliği sağlar. Elektrik yalıtkanlığı yüksek düzeydedir. Dezavantajları ise kimyasallara dayanıklılığı az olan bir plastik türü olmasıdır. Yapı endüstrisinde su boruları, cam çerçeveler, tel ve kablo izolasyonu olarak tercih edilen plastik türüdür.

Polipropilen (PP)

Polipropilen, otomobil sanayisinde kullanılan parçalardan, yiyecek ve tekstil paketlemesine kadar kullanım alanı çok geniş olan bir termoplastik polimer türüdür. Monomer propilenin polimer hale getirilmesi ile elde edilen polipropilen kimyasal solventlere yani asit ve bazlara karşı yüksek derecede direnç gösterirler.

Polistiren (PS)

Polistiren; monomer haldeki stirenden polimerizasyon ile üretilen bir plastiktir türüdür. Petrol ve türevlerinden üretilirler. Oda sıcaklığı şartlarında polistiren katı halde bulunan bir termoplastiktir. Enjeksiyon veya ekstrüzyon yolu ile işlenerek yüksek sıcaklıklarda eriyik hale getirilirler. Daha sonra soğutulan bu plastikler tekrar katılaşması sağlanır.

PS plastikler amorf yani kararlı bir kristal yapıdaki plastiklerdir. Parlak ve berrak bir görünüme sahiptirler. Genişleyen polistiren adı verilen türü enerji sönümlene kabiliyeti oldukça yüksek bir termoplastiktir. Piyasada en fazla kullanılan plastiklerden biridir, yılda birkaç milyon ton üretilir[50]. Polistiren (PS) plastikler, ısı yalıtımı malzemesi olarak ince cidarlı kaplarda, soğutma kulelerinde, boru köpük, kauçuk, çeşitli aletler, otomobil aksanındaki parçalarda, güneş enerji panellerinde sıklıkla tercih edilmektedir.

2.1.1.2 Termosetler

Termosetler; yüksek sıcaklıklarda ısıtıldıklarında sertleşerek bu halini sonsuza dek koruyan plastik malzemeler olarak tanımlanırlar. Zincir molekülleri arasında bulundukları çapraz bağlar (kovalent ve zincirler arası) vasıtasıyla üç boyutlu bir katman oluşturarak mekaniksel etki ve yüklemelere karşı rijitleşerek yüksek dayanıklılık gösterirler. Bu rijitleşme termosetlerin elastik modülü ve mukavemet özelliklerinin diğer polimer çeşitlerine (termoplastik ve elastomerler) malzemelere göre daha yüksek olmasını sağlar. Termosetlerde, termoplastiklerde olduğu gibi yüksek sıcaklıklarda ikincil bağların (Van der Waals bağları) zayıflaması veya kopması sonucu zincirlerin kayma-dönme hareketlerinden ötürü oluşan elastik-plastik deformasyonlar görülmez. Dolayısıyla geleneksel termosetlerin plastik şekil değiştirme kabiliyetleri diğer polimerlere göre yok denecek kadar azdır, yani gevrektirler. Yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini korurlar, ısıyı muhafaza etme özellikleri yüksektir. Bu plastikler kesinlikle geri dönüştürülemezler ve yapısal deformasyona uğradıklarında düzeltilemezler olması termosetlerin dezavantajlarıdır. Günümüz polimer malzeme teknolojisinde en çok tercih edilen plastik matriksler epoksi ve polyeşter termosetler karşımıza çıkmaktadır.

Elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde termoset polimerler daha çok tercih edilmektedir [51]. Termosetlerin en çok bilinenleri epoksi reçine, fenolik reçine ve polyeşterdir.

Epoksi

Epoksi, epoksi reçinelerinin temel bileşenlerinden veya kürlenmiş son ürünlerinden herhangi biri ve ayrıca epoksit fonksiyonel grubun adıdır [52]. Poliepoşitler olarak da bilinen epoksi reçineler, epoksi grupları içeren bir reaktif prepolimer ve polimer sınıfıdır. Genellikle iki birleşimden oluşan epoksiler, belli bir süre sonra sıvı halden katı hale geçerler. Epoksiler; suya, asitlere, yağa ve tahribat yüzeyi yüksek kimyasallara karşı dirençleri yüksektir. Epoksi malzemeler yüksek mekanik dayanıklılık gösteren termoplastiklerdir.

Epoksiler ıslak durumdayken 140 °C, kuru durumdayken 220 °C'ye kadar termal dayanıma sahiptir. Epoksi termosetler; rüzgâr, dalga, termal değişimler, donma-çözünme, asit baz etkileşimi gibi fiziksel ve kimyasal ortam koşullarına karşı dayanıklılık istenen endüstrileri için geliştirilen bir yapı malzemesidir[52-53].

Fenolik reçineler

Fenolik reçineler, formaldehit ile birlikte fenol ve türevleri arasında gerçekleşen reaksiyon ürünlerinin oluşturduğu yapıları kapsayan termoset polimerlerin büyük bir ailesidir [54]. Fenolik reçineler, yüksek ısı ve alev direnci geliştirilmiş hibrit kompozit teknolojisine de bilinmektedir. Fenolik reçinelerin ısı direncinin yüksek olmasından dolayı termal yalıtım malzemesi olarak birçok ev aleti ve iş ekipmanında sıklıkla kullanılmaktadırlar. Metal matris yerine kullanımları da fenolik reçinelerin önemine dikkat çeken durumdur. Düşük ağırlık ve maliyetli olmalarından dolayı, elektronik, enstrüman muhafazaları, pompa ve motor aksamları gibi malzemelerdeki kullanım oranları her geçen yıl artmaktadır.

Şekil 2.3'de gösterilen fenolik reçineden yapılmış fren balatası disk balataları ve debriyaj gibi sürtünmenin olduğu otomobil parçalarında kullanımı oldukça yaygındır [55].



Şekil 2.3: Fenolik reçineden yapılmış fren balatası[56].

Polyesterler

Polyester, esas zincirlerinin her döngüsel tekrar eden biriminde ester işlevsel grup içeren polimer malzemelerin bir kategorisidir. Özel bir malzeme olarak, en çok polietilen tereftalat (PET) adı verilen bir türle ilgilidir [57]. Denizcilik sektöründe gemi iskeletinin yapımında ve inşaat sektöründeki yapı panellerinin oluşturulmasındaki kullanımları oldukça yaygındır. Öte yandan tank, otomotiv gövdesi ve boru gibi elemanların üretiminde elyaf takviyeli polyesterler yaygın bir şekilde kullanılırlar. Kimyasal yapısına bağlı olarak, polyester termoplastik veya termoset olabilir. Sertleştiricilerle kürlenmiş polyester reçineler de vardır; ancak en yaygın polyesterler termoplastiklerdir[58].

Polyester reçinenin yapışkan özelliği, otomobiller, uçaklar ve tekneler için gövde panellerinin yapımında cam elyafi tabakalarını yapıştırmak için kullanılır. Raylı araba, demiryolu taşıtları ve nakliye konteyneri de doymamış polyesterler (UP) reçineli kompozitler kullanılarak üretilmektedir. Deniz pazarında, esas olarak lüks tekne gövdelerinin üretimi için, UP reçinelerine bağımlıdır. Hafifliği yarış otomobilleri ve hafif uçaklar için idealdir. Çelik gövde panelleri bile bazen dekoratif amaçlı olarak polyester reçine esaslı bir renklendirici ile kaplanır. Şekil 2.4'te yarış otomobilinin iç yapısının polyesterle oluşturulmuştur. Günümüzde polimer yapıli termoset ve termoplastik malzemelerden en çok tercih edilen matris mekanik özelliklerinin kıyaslanması Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4: İç tasarımı polyesterden yapılmış yarış otomobili [59].

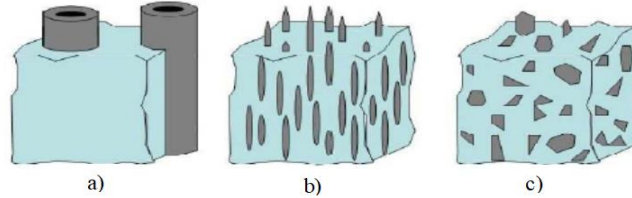
Çizelge 2.1: Bazı termoplastik ve termoset polimerlerin mekanik ve fiziksel özellikleri[47].

Polimer	Yoğunluk (g/cm ³)	Kopma dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)
Epoksi	1.2-1.4	50-150	2.5-5
Fenolik	1.2-1.4	35-60	2.7-4.1
Polyester	1.04-1.46	35-95	1.6-4.1
Nylon	1.1	55-90	1.3-3.5
PEEK	1.3-1.35	100	3.5-4.4
Polikarbonat	1.2	55-70	2.1-3.5
Polietilen	0.9-1	20-35	0.7-1.4

2.1.2 Metal matrisli kompozitler (MMK)

Metal matris kompozitler; esneyebilir bir metal matris ile takviye malzemelerden oluşan kompozitler olarak tanımlanır. Metal matris elamanı daima bir metal malzeme olarak tanımlansa da metaller ve hafif metal alaşımlarıdır. Metal matris kompozitlerin çalışma sıcaklık aralıkları 200-800 °C sıcaklığı aralığındadır; bu özellikleri sayesinde yüksek sıcaklık uygulamaları gerektiren ortamlar için çok uygundur. Metal matrisli kompozitler polimer matrisli kompozitlere göre metal matris kompozitlerin mekanik özellikleri, transvers kuvveti ve stiffnesi, kayma ve sıkıştırma kuvveti daha yüksektir.

Ayrıca, yüksek sıcaklığa uyumu PMK'lerden daha iyi düzeydedir. MMK'ler sıvı absorbe etmezler, alevlenmezler, elektrik ve ısı iletkenlikleri yüksektir. MMK'larda alüminyum, magnezyum, bakır ve alaşımları gibi hafif metaller matris malzemesi olarak yaygın kullanım alanına sahiptirler. MMK'larda sürekli elyaf veya sürekli olmayan elyaf/partikül biçiminde alümina, silisyum karbür, bor nitrid gibi seramikler takviye elemanı olarak kullanılmaktadır [60,61]. Metal matrisli kompozitler takviye elemanlarına göre Şekil 2.5'de görüldüğü gibi sürekli, süreksiz ve partikül takviyeli metal matrisli kompozitler kullanılmaktadır.



Şekil 2.5: a) Sürekli fiber, b) süreksiz fiber, c) partikül takviyeli metal matrisli kompozitler [62].

Sürekli fiber takviyeli kompozitlerden; bor, grafit, karbon, silisyum karbür (SiC) ve alümina (Al_2O_3) en çok kullanılan sürekli takviye elemanlarıdır. Partikül takviyeli ve süreksiz fiber takviyeli yapılarda ise silisyum karbür (SiC), bor karbür (B_4C), titanyum karbür (TiC) ve alümina (Al_2O_3) en çok tercih edilen takviye elemanlarıdır. Metal matrisli kompozitlerin dezavantajları; takviye elemanına göre kimyasal ve mekanik uyumluluğunun zayıf olması ve polimer yapıdaki reçine matrislere göre işleme koşullarının daha zor olması gösterilebilir [63].

2.1.3 Seramik matrisli kompozitler (SMK)

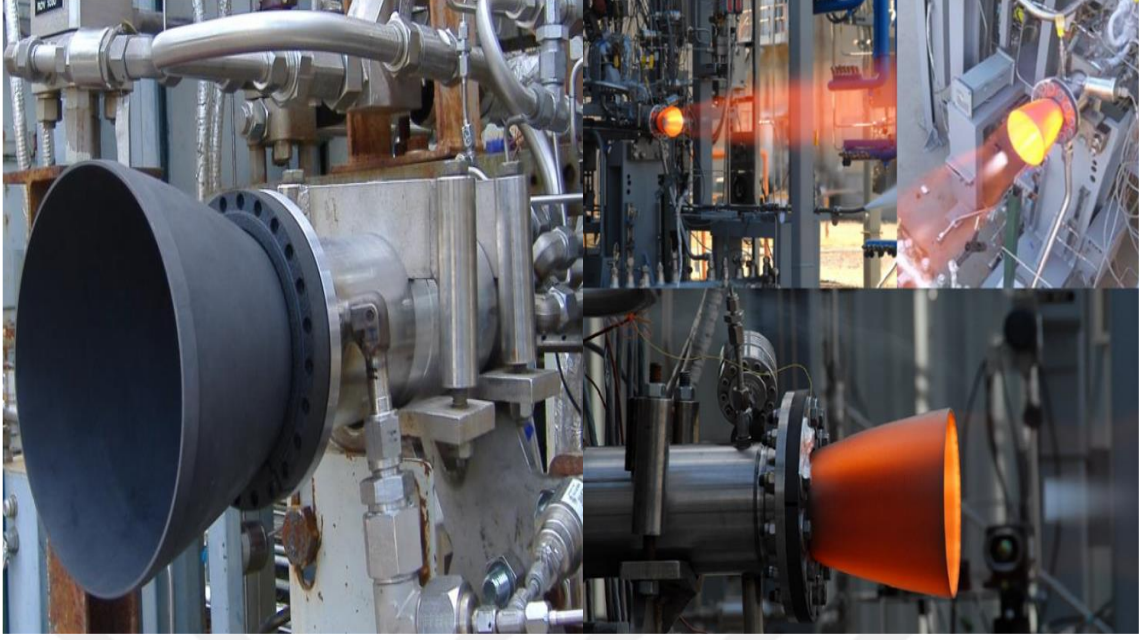
Seramik matrisli kompozitler, özellikle zırh uygulamalarında kullanılmaktadır. Bunun nedeni bu malzemelerin darbe dayanımı, hafiflik, tokluk gibi mükemmel özellikler sunmasıdır. Fakat seramik malzemelerin imalatı maliyetlidir ve bu da uygulama alanlarını sınırlı olmasına neden olur. Seramik malzemelerin doğal yüksek sertliği, yani bor karbür, alümina ve silisyum karbür, onları ordu personeli ve zırhlı araçlar için birçok kurşun geçirmez koruma sisteminde önemli bir bileşen olarak tercih edilmektedir. Seramik kompozitlerde, takviye veya matris malzemesi olarak veya her iki faz da seramik malzemeler kullanılabilir. Takviye olarak kullanılan seramik malzemeler, iyi termal stabilite ve çevresel saldırılara karşı yüksek koruma ile yüksek mekanik mukavemet sunar. Amerikan ordusunun Şekil 2.6'de gösterilen piyade muharebe aracı (ICV) gösterilmiştir. LAV III şasisine ve gövdesine dayanan ICV paneller seramik kompozitlerle oluşturulmuştur



Şekil 2.6: Seramik kompozit gövdeli piyade muharebe aracı (ICV) [64].

2.1.4 Karbon-karbon kompozitler (KKK)

Karbon bir fiberle karbonlu bir matrise gömülü karbon liflerinden oluşmuş kompozitler olarak tanımlanır. 2000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara dayanıklı bir kompozit malzeme olanağı sağlar. Başlangıçta havacılık uygulamaları için geliştirilmiştir, günümüzde düşük yoğunluğu, yüksek termal iletkenliği ve yüksek sıcaklıklarda mükemmel mekanik özellikleri onu uçak frenleri, roket nozulları ve yeniden giriş burun uçları için ideal bir malzeme yapmaktadır. Karbon-karbon kompozitler seri üretim için kullanılan üretim yöntemleriyle üretilirler. Geliştirilmiş oksidasyon direnci ve sürekli azalan üretim maliyetleri bu malzeme ailesini genel mühendislik tasarımının yanı sıra yüksek performanslı uygulamalar için giderek daha ilgi çekici kılmaktadır[65]. Şekil 2.7'da karbon-karbon kompozitlerden yapılmış roket nozul örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 2.7: Karbon-karbon kompozit malzemedan üretilmiş (C-CAT CC) roket nozulunun ateşleme testinin yapılması [66].

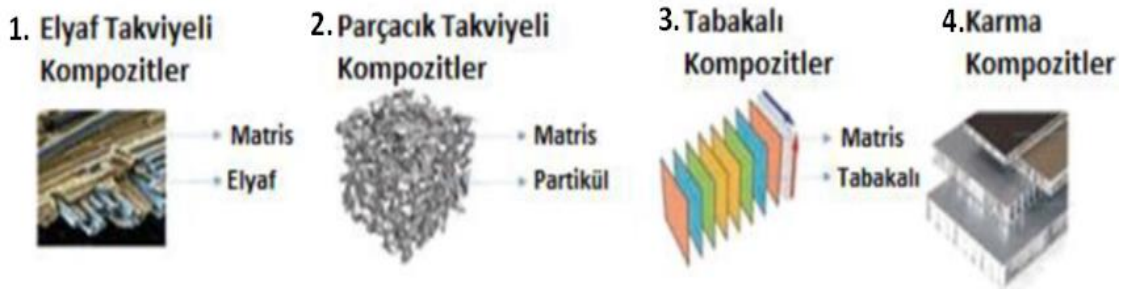
2.2 Takviye elaman

Kompozit malzemelerin matris ile birlikte iki ana unsurundan biri olan takviye elemanları, matris içerisinde yer almakta ve kompozit malzemeye istenilen özelliklerin kazandırılmasını sağlamaktadır. Takviye elamanın esas görevi kompozit malzeme içerisindeki yapının mukavemetini arttırmaktır. Kompozit malzemeye uygulanan yükün yaklaşık olarak %90'ı takviye elemanları tarafından taşınmaktadır. Takviye elemanları içinde yer aldığı kompozit malzemeye sertlik, rijitlik, yüksek sıcaklık dayanıklılığı, yüksek elastik modül, darbe dayanımı, yorulma ömrü, elektriksel iletkenlik ve yalıtkanlık gibi mekanik özellikler kazandırır. Bu mekanik özelliklerin yapıya kazandırılması takviye elamanın ile matris elaman arasındaki bağ kuvvetinin iyi olması ve matris elaman ile fiziksel ve kimyasal olarak uyum sağlaması gerekmektedir.

Takviye elemanları matris elamanın içerisinde farklı şekilde yönlendirilerek anizotropik malzeme özelliği değiştirilebilir. Bu sayede kompozit yapının değişken yönlerde gerilmelere karşı mukavemet özelliklerini iyileştirmek ve değiştirmek mümkündür. Şekil 2.8'de gibi kompozit malzemeleri, takviye elamanının geometrisi ve yerleştirme biçimine göre sınıflandırma yapılabilir.

Takviye elemanına göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması aşağıda gösterildiği gibi sınıflandırılabilir [46].

1. Elyaf takviyeli kompozitler
2. Parçacık (Partikül) takviyeli kompozitler
3. Tabakalı kompozitler
4. Karma (Hibrit) kompozitler



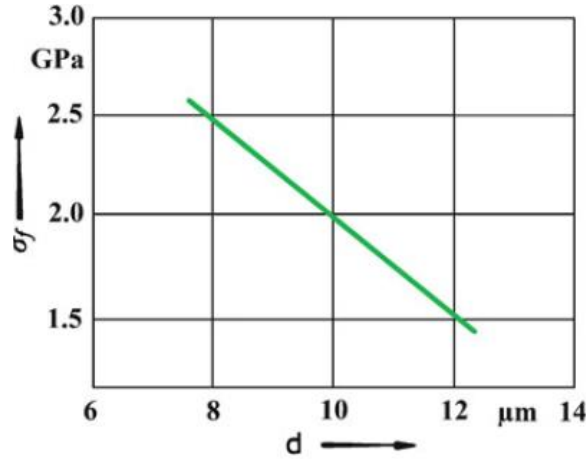
Şekil 2.8: Kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre sınıflandırılması[67].

2.2.1 Elyaf takviyeli kompozitler

Çekme, eğilme ve darbe dayanımları az olan matris malzemelerinin zayıf teknolojik özelliklerinin iyileştirilmesi, tokluk ve sünekliğinin artırılması gibi amaçlarla elyaflarla takviye edilmesiyle üretilen kompozitlerdir. Elyaf kesitinin elyaf boyuna oranı en az 1:100 olan ve katı olmasına rağmen kalıplanabilecek kadar esnek malzemeler olarak tanımlanır[68]. Matris malzeme tarafından istenilen biçim ve yapıda tutulur. Polimer matrisli kompozitlerde elyaf takviye elemanı sıklıkla tercih edilmektedir.

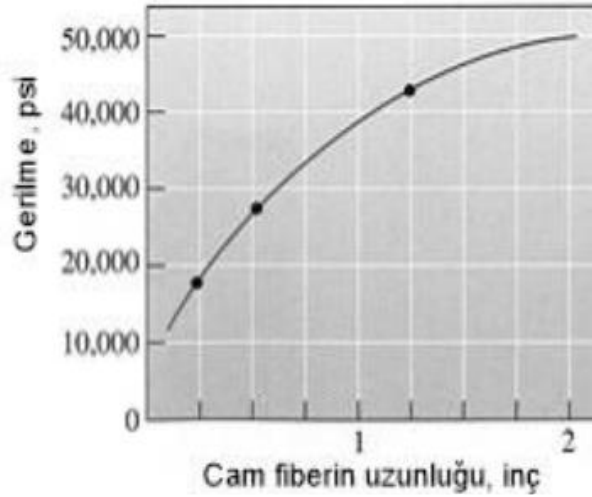
Takviye elemanı bir kompozit malzemenin ana karakterini belirler. Elyafın mekanik özellikleri, elyafın matris malzemeye miktar olarak oranı, elyafın kalınlığı, elyafın uygulanan yük ve kuvvetlere göre yönelme biçimi gibi unsurlara bağlıdır. Fiber takviyeli kompozit malzemelerde kullanılan elyafların çapı 10-150µm değeri arasında değişmektedir. Şekil 2.9'de karbon bir fiberin çapının değişiminin kompozit yapının mukavemetine etkisi gösterilmiştir [45].

Kompozit yapının içerisinde konumlandırılan fiber elemanın çapı azaldıkça kompozit yapının mukavemeti artmasına neden olur. Bunun nedeni fiber çapının azalması kompozit malzemenin yüzey alanını azaltır. Bunun neticesinde elyafta bulunan yüzey kusurları en aza iner ve fiberlerin mukavemeti artırır.



Şekil 2.9: Fiber çapı-fiber mukavemeti arasındaki ilişki [69].

Fiber takviyeli kompozitlerde kompozit malzeme yapısının mekanik özelliklerin etkileyen diğer bir parametre fiber uzunluğudur. Fiber uzunluk/çap oranının artması kompozit malzeme dayanımını arttırmaktadır. Fiber takviyeli kompozitlerde yükü taşıma misyonu olan elyafların en zayıf bölgesinin elyafların en uç kısımlarıdır. Elyaf (fiber) uzunluğunun artması uç kısımların taşıdığı yükü minimize ederek kompozit malzemenin mukavemetini artırmaktadır [46,69]. Bu durumu Şekil 2.10'da cam elyaf takviyeli kompozit bir yapıda elyaf uzunluğunun değişiminin fiber mukavemeti üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.10: Fiber uzunluk-gerilme ilişkisi [70].

Fiber takviyeli kompozit malzemelerinin tasarımında uygun fiber uzunluğunun bulunması büyük bir önem arz eder [70]. Fiber uzunluğu (L)'nin büyüklüğü, kritik fiber uzunluğu (L_c) değerinin hesaplanması ile belirlenmektedir. L_c değeri aşağıda gösterilen denklem (2.1) kullanılarak hesaplanmaktadır;

$$L_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_c} \quad (2.1)$$

Bu denklemde;

σ_f : Fiberdeki normal gerilme (GPa)

d : Fiber çapı (μm)

τ_c : Fiber-matris ara yüzey kayma gerilmesi (GPa)

Elyaf (fiber) takviyeli kompozit malzemeler, takviye elemanlarının şekillerine göre aşağıdaki gibi tasnif edilirler.

1.Süreksiz (kesik) elyaf takviyeli kompozit malzemeler

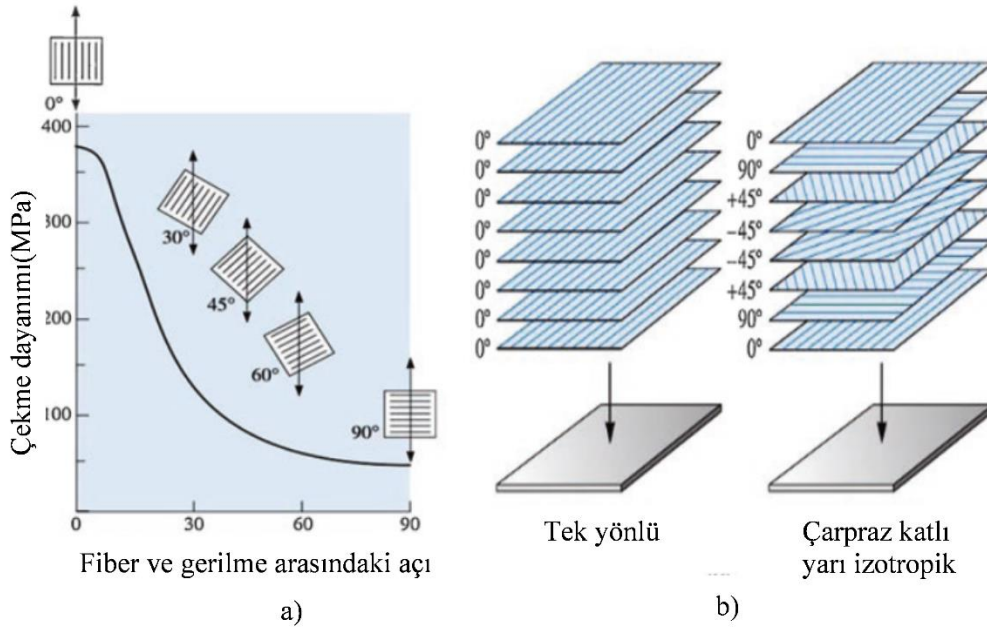
2.Sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemeler

2.2.1.1 Süreksiz (kesik) elyaf takviyeli kompozitler

Bu elyaflara süreksiz denilmesinin nedeni elyafların kısa ve süreksiz biçimde matris eleman içinde dağılmasıdır. Liflerin uzunluğu kritik uzunluktan daha kısadır. Bu nedenle, süreksiz lifler malzemeyi güçlendirmede daha az etkilidir, ancak bunların kompozit modülü ve çekme mukavemetleri, sürekli ve hizalı muadillerinin %50-90'ına yaklaşabilir. Sürekli elyaflara göre daha ucuz, daha hızlı ve karmaşık şekillerde imal edilmeleri daha kolaydır.

2.2.1.2 Sürekli elyaf takviyeli kompozitler

Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik davranışları; matris ve elyafın gerilme- şekil değişimi davranışı, matris-fiber fazların hacimsel oranları, gerilme veya yükün uygulandığı yön gibi bazı faktörlere bağlıdır. Bu faktörlerin yanı sıra, yönlendirilmiş kompozitler anizotropik davranış göstermesinden dolayı ölçülen özellikler bu yönleneceye de bağlıdır. Fiber takviyeli kompozitlerin bileşik yükleme koşullarında kullanılabilmesi için çok eksenli (multiaxial) yönlendirmeler kullanılmaktadır. Bu çok eksenli yönlendirme açılarıyla dizilen fiberler kompozit yapıların dayanımlarını artırabilmektedir. Şekil 2.11'de E-cam elyaf takviyeli polimer matrisli (GFRP) bir kompozitin fiber oryantasyon açısının gerilme doğrultusuyla arasındaki açı değişiminin çekme dayanımına etkisi gösterilmiştir.



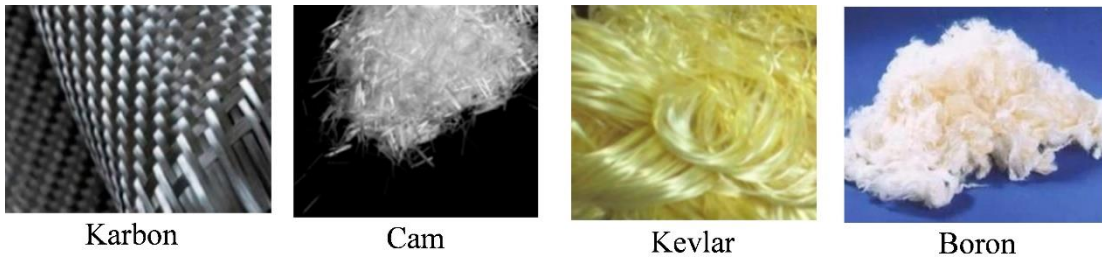
Şekil 2.11: Fiber takviyeli kompozitlerde oryantasyon açısının etkisi, a) Çekme mukavemeti üzerine elyaf oryantasyonunun etkisi b) Uzun, sürekli lifler için matris içinde çeşitli yönler[71].

Fiber takviye lifleri organik ve inorganik malzemeler olarak ayırabiliriz. Organik elyaf takviyeli fiberlere; lif kabağı, pamuk, keten, jüt, kenaf, pirinç kabuğu, kenevir, sisal, hindistan cevizi, palmye, abaka, muz ve rami lifli yapılar örnek verilebilir. Hayvansal kaynaklı fiberlere tavuk tüyü, deve yünü, koyun yününün kullanıldığı fiberler örnek verilebilir [70,72]. Şekil 2.12’de organik kaynaklardan üretilen fiber malzeme türleri gösterilmiştir. Hindistan cevizi gibi doğal liflerin çeşitli üstün özellikler nedeni ile özellikle otomotiv sektöründe cam lifleri yerine dikkat çekmektedir. Hemen hemen tüm organik fiberler; düşük yoğunluklu, esneklik kabiliyeti, iyi termal ve ses izolasyon gibi önemli mekaniksel özelliklere sahiptirler. Ancak doğal liflerin hidrofobik özellikteki polimer matris ile uyumsuzluğuna neden olan hidrofil karakteri ve bozuma olasılığı nedeni ile işlem sıcaklığının düşük derecelerde olması gerekliliği doğal liflerin kompozit üretimindeki sınırlayıcı özellikleri olmaktadır [51]. Organik doğal elyafların kimyasal yapı bileşenleri elyaf türlerine göre farklılık gösterir. Doğal yapılu elyaflar selüloz, hemiselüloz, pektin ve lignin gibi bileşenler içerir. Bu her bir bileşenin özelliği, elyafların genel özelliğini belirlemesini sağlar. Hemiselüloz bileşeni; elyafların nem almasından, biyolojik olarak bozulmasından, nem almasından ve ısıl bozulmasından sorumludur. Lignin bileşeni ise termal olarak karardır fakat ultraviyole (UV) bozulmasından sorumludur. Her bir bileşenin yüzde bileşimi elyaf türüne göre farklılık gösterir. Genel olarak elyaflar %60-80 selüloz, %5-20 lignin ve %20'ye kadar da nem içerirler[51,73].



Şekil 2.12: Doğal liflere sahip organik bazlı fiber malzemeler [72].

İnorganik sentetik elyafların modülleri ve termal stabiliteyi yüksektir, organik fiberlerden daha serttir ve çeşitli üstün avantajlara sahiptir. Özellikle polimer matrisli fiber takviyeli kompozitlerde sıklıkla sentetik fiberler tercih edilir. Şekil 2.13’de fiber takviyeli kompozit yapılarında takviye elamanı olarak yüksek mekanik özelliklerin dolayı en çok tercih edilen elyaflar; cam, karbon, aramid, kevlar ve boron elyaflardır.



Şekil 2.13: Sentetik liflere sahip bazı inorganik fiber malzemeler.

Karbon elyaf

Yapısının ana bileşenlerinde orlon, naylon, katran ile bazı başka yan maddelere türlü fiziksel ve kimyasal uygulamalar ile karbon fiber (elyaf) adı verilen elyaflar üretilir. Karbon elyaf, günümüz yapı teknolojisinin ürünü olan ipliksi sentetik olarak üretilen çok önemli bir elyaftır. Karbon elyafın ana bileşimleri, karbonlaşmış akrilik elyaf (orlon), katran ve naylondur. Karbon fiber malzeme yapısı çelik bir malzemeden 4,5 kat daha hafif olmasına rağmen 3 kat daha dayanıklılık sağlar. Karbon fiber yapısını oluşturan naylon gibi esnek ve orlon gibi de orta derecede dayanıklı değildir, bu bileşenlere göre daha sert ve dayanıklıdır. Karbon fiberler (elyaflar); yüksek sertlik, çekme mukavemeti, kimyasal direnç ve sıcaklık toleransı gibi üstün mekanik özelliklere sahip ama pahalı sentetik elyaflardır. Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitler, havacılık, otomobil, spor ve diğer birçok endüstri sahasında kullanılmaktadır. Hücresel yapıdaki mikro hücreli enjeksiyon kalıplama ile hazırlanan kompozit köpükleri iyileştirme yapmak için karbon fiber/polipropilen (CF/PP) kullanıldığında, köpüğün elastik modülünün %35 oranında iyileşme sağlamıştır[72].

Cam elyaf

Cam elyafı çok ince cam telciklerinden üretilen bir elyaf türüdür. Yaygın olarak kullanılan cam elyaflarının ana bileşeni silika bazlıdır ($\sim\%50-60 \text{ SiO}_2$) ve bir dizi başka kalsiyum, bor, sodyum, alüminyum, demir vb. oksitleri içerir. Bu belirtilen bileşenlerin farklı oranlarda dağılmasıyla üretilen E-cam, C-cam ve S-cam gibi elyaf tipleri üretilmektedir. Cam fiberlerin önündeki bu harflerden E işareti, elektrik anlamına gelir çünkü E-cam iyi bir mukavemete ve makul bir elastisite modülüne sahip olmasının yanı sıra iyi bir elektrik yalıtkanıdır. C-cam kimyasal korozyona karşı daha iyi bir dirence sahip olduğundan C korozyon anlamına gelir. S, yüksek silika içeriği anlamına gelir ve S-cam diğerlerinden daha yüksek sıcaklıklara dayanabilir. Fiber takviyesi olarak en çok kullanılan cam elyaf E-cam elyaflardır [74].

Kevlar elyaf

Kevlar (aramid) bir çeşit naylon olan aromatik poliamid olarak bilinir. Günümüz kompozit malzemesi teknolojisinde en çok kullanılan kevlar elyaflar; Kevlar 29 ve Kevlar 49 elyaf türleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Kevlar elyafların üstün olduğu özellikleri olduğu gibi bazı dezavantajlı özellikleri de mevcuttur. Bazı kevlar türlerinin; asitlere, tuzlara ve ultraviyole ışına karşı hassas olması, malzemenin kumaş ya da lif halinde iken kesme ve

katlama gibi işlenmesinin zor olması, matris malzemesi ile iyi birleşme olmaması durumunda ise oluşan mikro çatlakların malzemenin su emmesine neden olması gibi dezavantajları vardır. Kevlar elyaflar; havacılık, uzay, denizcilik, otomotiv ve tekstil gibi sektörler de çok farklı kullanım alanlarına sahiptirler. Özellikle balistik amaçlı darbe absorbe etme ve delinmeme özelliği sebebiyle savunma sanayisindeki kask, koruyucu (yanmayan) giysi üretiminde, kurşun geçirmeyen yelek ve zırh üretiminde ekipmanlarının üretiminde kullanılırlar. Fiberoptik kablolarda, endüstride debriyaj balataları, basınçlı kap, yüksek basınç ve ısıya dayanan conta imalatı gibi alanlarda kullanılırlar [47,69,75].

Boron elyaf

Bor fiberler sürekli bir ince filament veya tel üzerine borun deposisyonu ile elde edilen sentetik fiberlerdir. Bor lifi, temel borun başlıca endüstriyel kullanımını temsil eden kararlı bir kristal yapı gösteren amorf katı bir bor ürünüdür. Bor elyaflar; yüksek mukavemet, yüksek elastik modülü ve yüksek korozyon direnci gibi üstün mekaniksel özellikler gösterir. Bor elyafı genellikle takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Boron elyafların basma mukavemeti bakımından karbon elyafına göre yaklaşık iki kat daha fazla dayanıklıdır. Bor kırılğan bir malzemedir bu yüzden bükme, dokuma gibi işlemlerle elyaf ve kumaş haline getirilmelerinde ki zorluğun nedeni bor elyafının cam elyafın dan 5 kat daha sert olmasıdır. Maliyeti diğer elyaf türlerinden daha yüksektir [70,75].

Fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerde fiber elaman olarak kullanılan elyaf çeşitlerinden karbon, cam, kevlar ve boron elyafın mekanik özelliklerinin kıyaslanması Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2: Bazı sentetik elyafların mekanik özelliklerinin kıyaslanması[69].

Fiber Metaryal Türü	Yoğunluk (gr/cm³)	Elastisite Modülü (GPa)	Maksimum Çekme Mukavemeti (MPa)	Termal Genleşme Katsayısı (10⁻⁶ K⁻¹)
E-cam	2.55	70	1500~2500	4.7
Karbon	1.95	390	2200	-0.5~1
Kevlar 49	1.45	125	2800~3500	-2~5
Boron	2.6	385	3800	8.3

2.2.2 Parçacık (Partikül) takviyeli kompozitler

Parçacık (partikül) takviyeli kompozit malzemeler, birbirinden kimyasal olarak farklı bir matris elamandan ve matristen daha sert bir takviye elaman fazının fiziksel olarak bir araya getirilmesiyle elde edilen kompozitlerdir. Seramik, metal veya polimer bir matris elamanın içerisinde; kırılmış elyaf, sakalcık elyaf (whisker) ya da seramik elyaf gibi takviye fazlarının bulunduğu kompozit grubudur. Partikül takviyeli kompozitlere, çimento matris içerisine takviye edilmiş agregaların oluşturduğu beton örnek verilebilir. Partikül takviyesinin asıl amacı; birleşeceği matrise mukavemet dayanımı, elektriksel, termal ve tribolojik gibi özelliklerde iyileştirme sağlamasıdır. Partikül takviyeli kompozitlerde takviye edilen partikülün matris içerisinde homojen şekilde dağılmama durumundan dolayı bu tür kompozitlerin uygulama alanlarını sınırlı tutmaktadır[46,76].

2.2.3 Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozitler, aynı veya farklı doğrultularda fiber yönelimleri barındıran en az iki tabakanın üst üste dizilerek bir araya getirilmesiyle oluşturulan kompozitlerdir. Bir tabakadan oluşmuş kompozit levha bazı kullanım alanlarında yeterince mukavemet sağlamayabilir. Bu sebeple kompozit yapının mekanik ve kimyasal özelliklerini iyileştirilmek için tek olan levha farklı dizilimlerle yönlendirilmiş veya farklı tür kompozit levhalarla birleştirilirler. Tabakalı kompozitlerin esas amacı, bu kompozitin maruz kalacağı yüklere karşı dayanım ve rijitlik göstermesidir.

Tabakalı kompozitlerin özellikleri sadece içerdiği yapısal tabakaların (laminatların) mekanik özelliklerine bağlı olarak değişmez, laminaların geometrik dizaynlarına da bağlıdır. Tabakalı kompozitlerde simetrik dizilime oluşumu büyük bir önem arz eder. Üzerine eğilme yükü uygulanan tabakalı bir kompozitte, orta yüzeydeki tabaka simetrik olarak istiflenmemiş ise eğilme ve uzama arasında birleşmeden kaynaklanan rijitlik deformasyonları meydana gelerek laminatlarda kayma gerilmeleri oluşabilir.

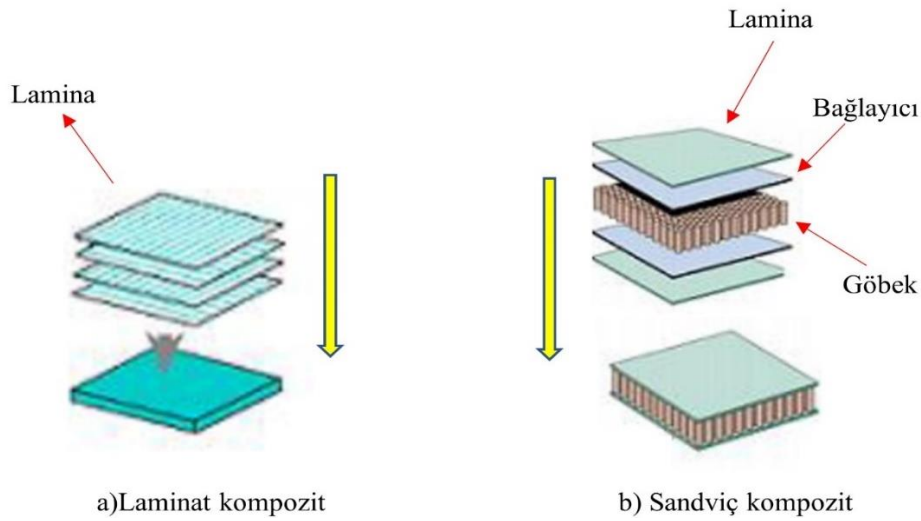
Tabakalı kompozitler iki kısımda değerlendirilebilir, laminat kompozitler ve sandviç kompozitler [45,70]. Tabakalı kompozit levhalar metal levhalara göre daha hafif ve daha dayanıklı olmaları sebebiyle tercih edilen malzemelerdir. Elyaf takviyeli tabakalı kompozitler; özellikle uçak yapılarındaki kanat ve kuyruk kısmının yüzey kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadırlar.

Laminat kompozitler

Laminat bir kompozit, iki-boyutlu tabakalar veya panellerin yüksek-kuvvet yaratacak şekilde bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Tabakalar her birinin yüksek kuvvet yönü, bir diğerinkinden farklı olacak bir açı diziliminde (oryantasyonunda) üst üste dizilirler. Farklı geometri dizaynıyla oluşturulmuş tabakalı kompozitlerin fiber doğrultusunu belirten $0_0/90_0$ veya $0_0/45_0/90_0$ açılarda istiflenmiş limanalar örnek gösterilebilir. Örneğin, kontrplak malzemedeki peş peşe tahta levhalar birbiriyle dik açı yapacak şekilde yerleştirilirler. Kağıt, pamuk veya dokuma tipi örgü cam fiberler gibi malzemeler içeren plastik matrisli malzemelerle de laminasyonlar yapılabilir[70].

Sandviç kompozitler

Sandviç kompozit panellerde yüzey levhaları bir göbek veya bal peteği ile birbirlerinden ayrılırlar. Sandviç panellerde malzeme düşük yoğunluklu bir göbekte kalınlaştırarak laminanın sertliği ve tokluğu artırılır. Yapısal olarak göbek elaman iki önemli işlev görür. Birinci işlevi, alt ve üst tabakaları birbirinden ayırır ve tabakalara dik yönde etkiyen deformasyonlara direnç gösterir. İkinci işlevi, tabakalara dik yöndeki düzlemlerde kompozite kayma gerilimi ve sertlik kazandırır. Göbek olarak kullanılabilen çeşitli malzemeler vardır; köpük polimerler, sentetik kauçuklar, inorganik dolgular, balsa ağacı gibi popüler göbek bal peteği yapıdadırlar. Sık kullanımın görüldüğü alanlar uçak yapılarıdır. Sivil havacılık alanından kullanılan Boing 777 yolcu uçağının silindirik gövde yüzeyi, zeminler, yan paneller, tavan bölmeleri ve dikey kumanda yüzeylerinde Nomex aramid takviyeli bal peteği sandviç paneller örnek gösterilebilir[46,70]. Laminat ve sandviç yapıları kompozitlerin oluşumu Şekil 2.14'te gösterilmiştir.



Şekil 2.14: Tabakalı kompozitler a) Laminat kompozit, b) Sandviç kompozit.

2.2.3.1 Karma (Hibrit) kompozitler

Karma kompozitler, yapısında en az iki elyaf çeşidinin birlikte kullanılması ile üretilmiş kompozitlerdir. Karma kompozitlerin bir diğer adı farklı kompozit yapısını vurgulamak için hibrit kompozit olarak adlandırılırlar. Hibrit kompozitler oluşturulurken farklı türdeki elyafların farklı katmanlarda istenilen takviyeli kompozitin dizilim modeline göre hazırlanarak üretilir. Karma kompozitlerin üretimindeki ana amaç herhangi bir fiberin sahip olduğu fiziksel, mekaniksel ve kimyasal özellikleri bir başka türdeki fiberlerin sahip olduğu üstün özelliklerle iyileştirerek tekbir fiberden elde edilemeyecek özelliklerin üretilecek olan yeni kompozit malzeme dilmesini sağlamaktır. Farklı türden elyafların hibritleşmesi, yapılar mekaniksel direnç, korozyon direnci ve aşınmaya karşı direnç gibi önemli katkılar katabilir. Günümüzde tabakalı hibrit kompozitler ile yeni nesil ekonomik kompozitler üretilmektedir[75].

2.3 Fiber Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretilmesi

Elyaf takviyeli polimer kompozitlerin üretiminde birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Üretim yöntemlerinin farklı olmasına, fiberle takviye edilecek olan polimer matrisin türü, fiberin türü ve FTPMK yapının uygulama alanı gibi faktörler neden olur. Bu üretim yöntemlerinin seçiminde, kullanılacak malzemelerin özellikleri, üretilecek son ürünün özellikleri, üretim kapasitesi, oluşturulacak yapının maliyeti gibi faktörler belirleyicidir[73]. Polimer kompozitlerin üretiminde en yaygın biçimde kullanılan üretim yöntemleri şöyle sıralanabilir:

1. Vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi (VARTM)
2. Reçine transfer kalıplama yöntemi (RTM)
3. El yatırma yöntemi
4. Püskürtme yöntemi
5. Filament sarma yöntemi
6. Pres kalıplama yöntemi
7. Pultrüzyon yöntemi

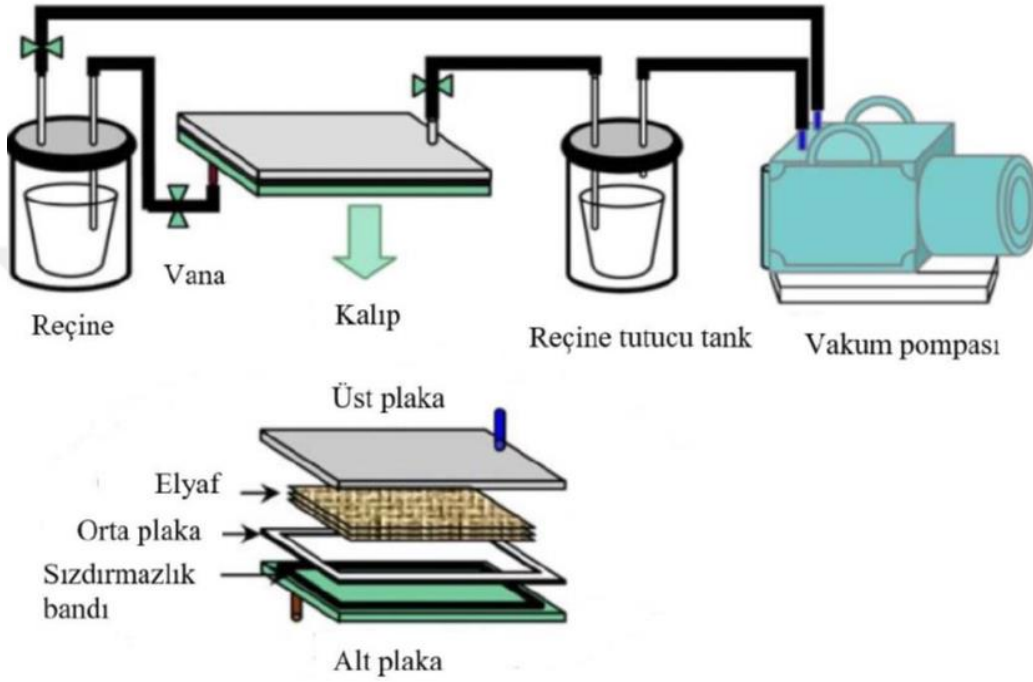
2.3.1 Vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi (VARTM)

Vakum destekli reçine transfer kalıplama yönteminin ortaya çıkış süreci, otoklavlamaya daha düşük maliyetli bir alternatif olarak kalıplama yapılması 1989 yılına kadar uzanmaktadır. Seeman kompozit reçine infüzyon kalıplama prosesi (SCRIMP) olarak adlandırılan Seeman Composites firması tarafından VARTM'in bir versiyonu olarak patentlendiğinden beri, kompozit imalat endüstrisi VARTM prosesinin bu versiyonunu çeşitli kompozitlerin üretimini yapmaktadır. VARTM öncelikli olarak denizcilik endüstrisine yönelik düşük maliyetli bir süreç olarak başlamıştır. VARTM yıllar içinde verimli bir kompozit yapı üretim süreci olarak kabul edildi. Havacılık endüstrisi, parça üretme maliyetini artıran, işlemek için daha yüksek sıcaklık ve basınç gerektiren daha yüksek kaliteli parçalar gerektirir. Son yıllarda yüksek kaliteli uçak yapılarındaki ürünlerin üretimi için kullanılan maliyeti artıran reçine sistemleri yerine VARTM teknolojisi ile havacılık yapı teknolojisi birleşim içindedir. Bu birleşmenin bir sonucu olarak, VARTM havacılık endüstrisinde giderek daha fazla kullanılıyor[77].

VARTM yöntemini basit biçimde tanımlarsak, vakum basıncı altında fiberlere reçine emdirilmesi şeklinde üretim olarak tanımlayabiliriz. Bu yöntem kullanılarak üretilen FRP kompozitlerde, takviye elemanı olarak genellikle cam, kevlar ve karbon gibi elyaflar kullanılabilir. Matris elemanı olarak ise genellikle termoset matrisli polyester, epoksi ve vinilseter reçineler kullanılmaktadır. VARTM yönteminde fiberlerle birleştirilecek matris (reçine) malzemesinin viskozite özelliklerinin bilinmesi büyük bir önem arz eder. Çünkü seçilen reçinenin vakum basıncı altında fiber malzemelerin tamamen ıslanmasını sağlayacak kadar sürede akışkan formunu koruyarak fiberleri ıslatabilmesi gerekmektedir. Takviye elemanlarının tamamen ıslanmaması durumunda üretilen kompozit yapının dayanımı ve rijitliği bozulmaktadır[78].

VARTM yöntemi üç temel elemandan oluşmaktadır. Bu temel elemanlar; vakum kalıbı, vakum tankı ve vakum pompasıdır. Vakum infüzyon pompası, reçinenin fiberlere emdirilmesini sağlayan hava basıncını sağlamaktadır. Vakum tankı, kalıptan gelen fazla reçinenin toplandığı bölgedir. Bu sayede vakumlama yapılan reçinenin pompaya geçmesi önlenir. Vakum tankının üzerinde hava basıncını gösteren bir adet manometre bulunmaktadır. Bu manometre sayesinde tank içindeki vakum basıncı ölçülür ve kompozit üretim öncesi kaçak kontrolünün olup olmadığı tespit edilir. Kalıp, kompozit malzemenin üretimin gerçekleştirildiği bölümdür.

Kalıp üzerine dizilme (istiflenme) sırasına göre sarf malzemeler ve takviye elemanları yerleştirilir. Sarf malzemeler; kalıp ayırıcı film, soyma kumaşı, sızdırmazlık bandı, vakum infüzyon akış filesi, vakum torbası, spiral hortum, şeffaf hortum ve vanalar kullanılmaktadır. Vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemiyle (VARTM) kompozit üretim şeması Şekil 2.15'te gösterilmiştir.

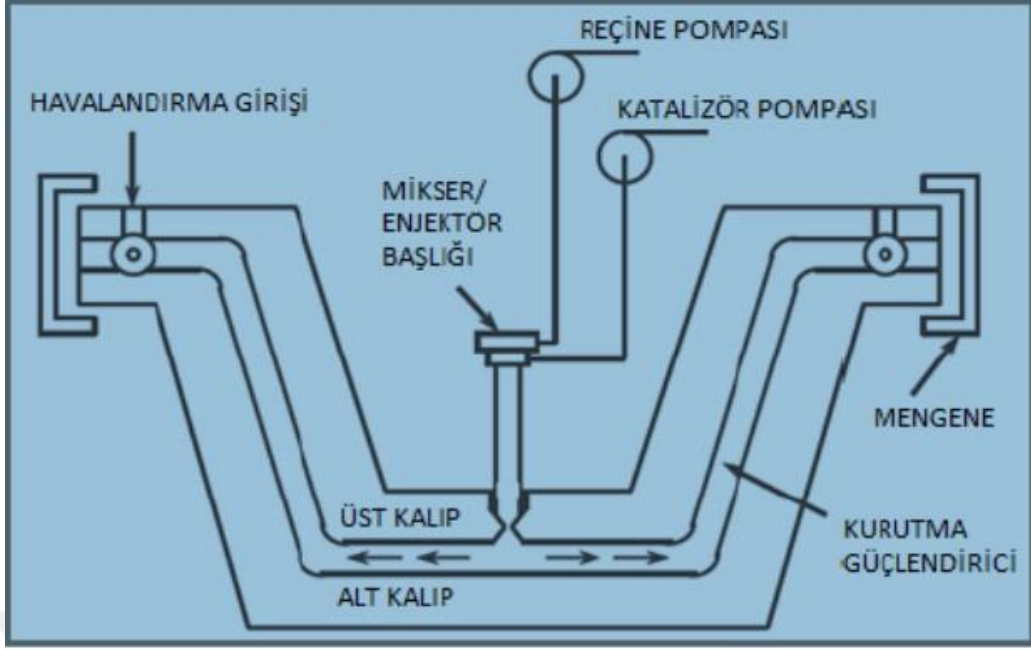


Şekil 2.15: Vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemiyle (VARTM) kompozit üretim şeması [73,79].

2.3.2 Reçine transfer kalıplama yöntemi (RTM)

Reçine transfer kalıplama yöntemi (RTM), reçinenin kuru ulyaf içeren bir laminata verildiği bir işlem olarak tanımlanır. RTM yöntemi Şekil 2.16'da gösterildiği gibi üst ve alt kalıp olmak üzere iki kalıptan oluşan kapalı bir kalıplama yöntemidir.

RTM'de kullanılan takviye malzemeleri ulyaf kumaş veya keçe olabilir. RTM yöntemiyle üretim yapılan tasarımlar için kullanılan reçinenin viskozitesi kritik bir tasarım faktörüdür. Alt kalıba serilen takviye elamanın üzerine reçine ve sertleştirici malzemesi uygun oranlarda karıştırılarak pompa vasıtasıyla transfer edilir. Transfer yoluyla enjekte edilen reçinenin ve sertleştirici karışımı kalıbı doldurduktan sonra oda sıcaklığında ya da kalıplara belli miktarda ısı verilerek kürleşmesi sağlanır. Kürleşmesi tamamlanan kompozit malzeme kalıptan sökülerek çıkartılır[75].

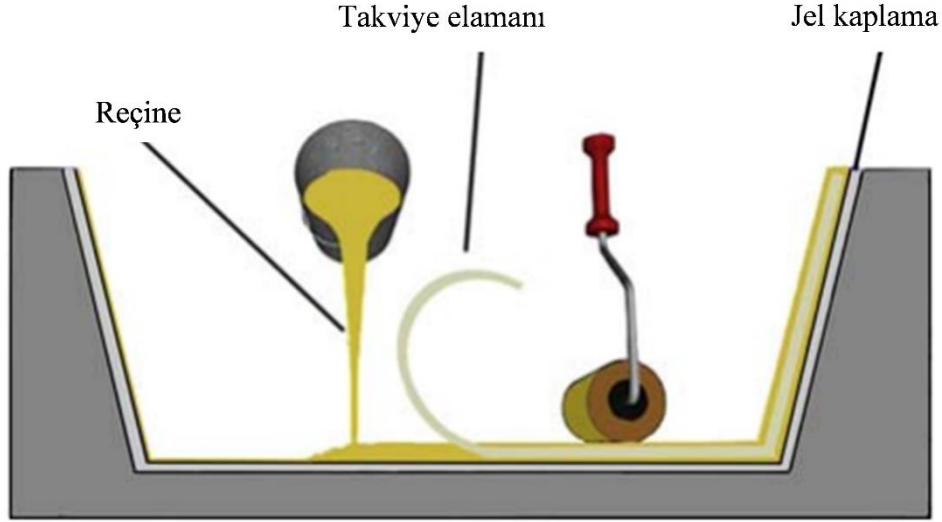


Şekil 2.16: Reçine transfer kalıplama yöntemi (RTM) şematik gösterimi[75,80].

2.3.3 El yatırma yöntemi

El yatırma tekniği, dokuma kompozit imalatının en eski yöntemlerinden biridir. Kompozit numunelerin üretimi bazı aşamalara uyularak hazırlanır. İlk olarak polimerin (reçinenin) yüzeye yapışmasını önlemek için kalıp yüzeyine kalıp ayırıcı madde ile işlenir. Daha sonra, ürünün pürüzsüz bir yüzeyini elde etmek için kalıp plakasının üstüne ve altına ince bir plastik levha uygulanır. Fiber takviye katmanları kalıp geometrisine uygun şekilde kesilir ve kalıbın yüzeyine yerleştirilir. Matris elaman olarak kullanılacak diğer bileşenlerle karıştırıldıktan sonra kalıba yerleştirilmiş olan takviye yüzeyine yaymak için yardım fırçası kullanılarak infüze edilir.

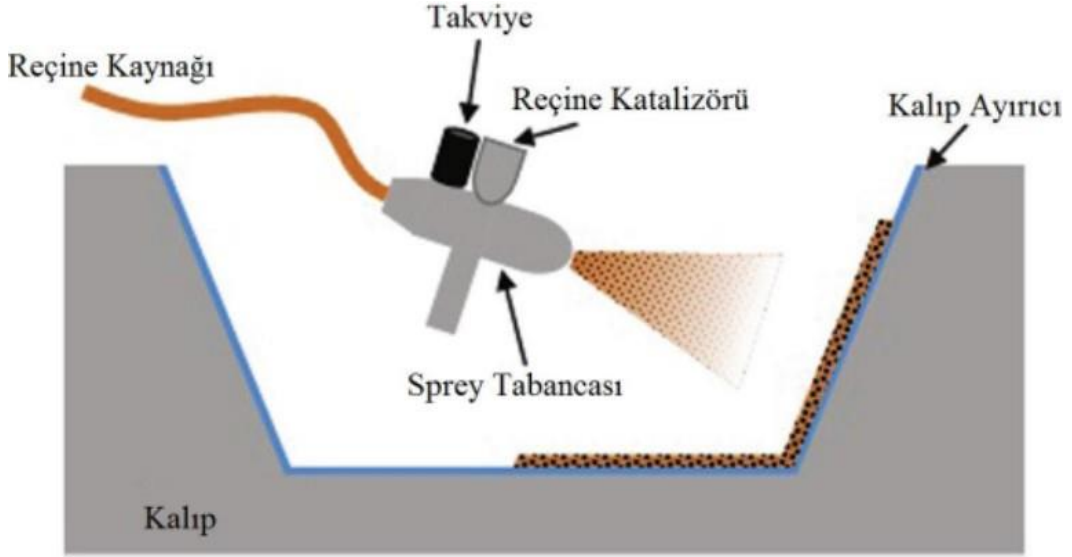
Daha sonra diğer takviye elamanları önceki polimer tabakasının üzerine yerleştirilir, sıkışmış hava kabarcıklarını ve fazla polimeri çıkarmak için bir silindir kullanılarak basınç uygulanır. Ardından kalıp kapatılır ve tek bir mat elde etmek için üzerine atmosferik basınç ve oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılır. Son olarak kürlenme işleminin ardından kalıp açılır ve kompozit levha kalıp yüzeyinden çıkarılır. El yatırmasının şeması Şekil 2.17'de gösterilmiştir[81,82].



Şekil 2.17: El yatırma yöntemiyle kompozit üretimi[82].

2.3.4 Püskürtme yöntemi

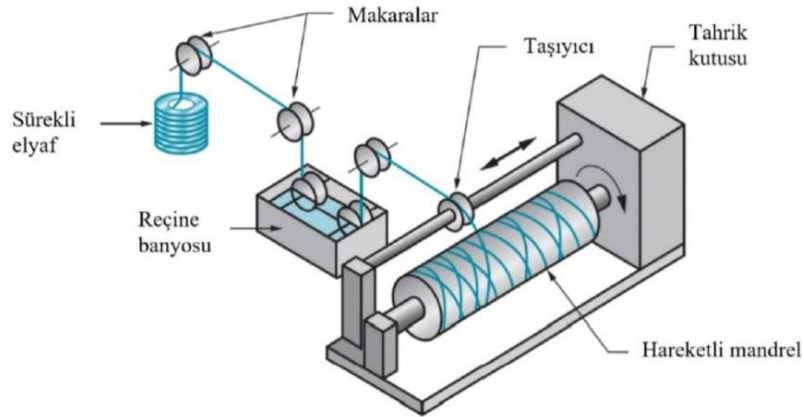
Püskürtme yöntemiyle kompozit üretme metodunun işlem aşamaları, el yatırmasıyla kompozit üretime aşamalara çok benzerdir. Püskürtme yöntemini, el yatırma yönteminden ayıran en önemli unsur takviye elamanını (elyafı) kırılmış hale getirip reçine ile karıştırarak püskürten bir tabancaya sahip olması ve daha karmaşık yapıların üretiminin yapılabilmesidir. Şekil 2.18’de püskürtme yöntemiyle kompozit üretimini gösterilmiştir. Bu işlemde kalıp üzerine önce kalıp ayırıcı uygulanır ve ardından bir kat jel kaplama (jel coat) uygulanır. Jel kaplayıcı sertleşene kadar iki saat kadar bekletilir. Jel kaplayıcı sertleştiğinde, fiber reçine karışımını kalıbın yüzeyine yerleştirmek için bir püskürtme tabancası kullanılır. Püskürtme tabancası, gelen sürekli fitili (bir veya daha fazla fitili) önceden belirlenmiş bir uzunluğa keser ve reçine/katalizör karışımından geçirir. Tabanca karıştırıcı, tabanca içinde reçine ve katalizörün iyice karışmasını sağlar ve operatörün sağlık açısından tehlike endişelerini en aza indirmek için tercih edilir. Malzeme kalıba püskürtüldükten sonra, sıkışan havayı çıkarmak ve lifin iyi bir şekilde ıslanmasını sağlamak için fırçalar veya rulolar kullanılır. Performans gereksinimlerine bağlı olarak, lamina kumaş katmanları veya sürekli iplikli paspaslar eklenir. Reçinenin kürlenmesi oda sıcaklığında yapılır. Reçinenin kürlenmesi, reçine formülasyonuna bağlı olarak iki ila dört saat sürebilir. Sertleştikten sonra parça kalıptan çıkarılır ve son işlem ve yapısal gereksinimler için test edilir[47,83].



Şekil 2.18: Püskürtme ile kompozit üretimi [84].

2.3.5 Filament sarma yöntemi

Filament sarma yöntemiyle kompozit üretimi, sürekli takviyeli fiberlerin (elyafların) reçine ile ıslatılıp emdirildikten sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılarak kompozit malzemenin üretilmesi olarak tanımlanır. Şekil 2.19’da gösterilen sürekli elyafın reçine banyosu denilen kısımdan geçirildikten sonra belirlenen sarma tipine göre ayarlanarak sarılır. Bu yöntemde farklı sarım tipleri uygulanabilir ve liflerin farklı açılarla kalıba sarılması sonucu oluşturulan kompozit malzemelerden farklı mekanik özelliklerde yapılar üretilebilir.

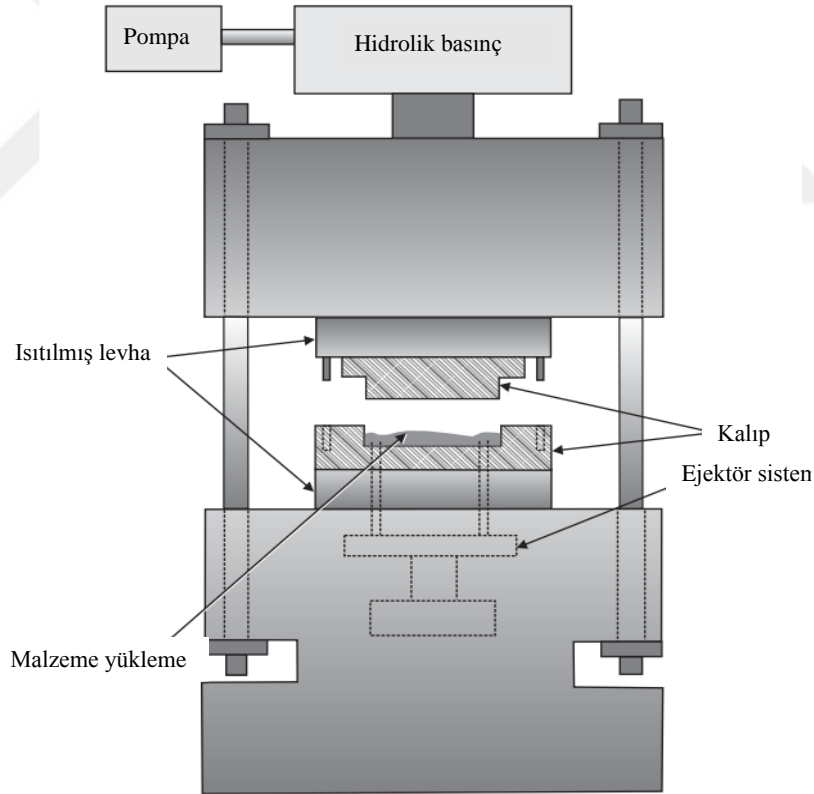


Şekil 2.19: Helisel sarma yöntemiyle kompozit üretimi[73].

2.3.6 Basınç kalıplama yöntemi

Basıncılı kalıplama yöntemi, genellikle önceden ısıtılmış olan kalıplama malzemesinin önce açık ısıtılmış bir kalıp boşluğuna yerleştirilerek basınç altında yapılan bir kalıplama yöntemidir. Şekil 2.20’de gösterildiği gibi üst kalıp presin koçuna alt kalıp ise presin alt tablasına bağlanır.

Erkek kalıbın üstünde ısıtma plakası, dişi kalıbın altında ısıtma plakaları mevcuttur. Kalıbın üst kısmı yukarı doğru hareket ederek kalıp açılır. Dişi kalıbın içerisine tablet konur. Kalıbın üst kısmı hareketli olduğu için aşağı doğru iner ve kalıp kapanır. Kalıp bir üst kuvvet veya tıkaç elemanı ile kapatılır, malzemeyi tüm kalıp alanları ile temasa zorlamak için basınç uygulanırken, kalıplama malzemesi sertleşene kadar ısı ve basınç korunur; bu işlem sıkıştırılmalı kalıplama yöntemi olarak bilinir ve kauçuk durumunda 'vulkanizasyon' olarak da bilinir. İşlem, kısmen kürlenmiş bir aşamada, ya granüller, macun benzeri kütleler ya da preformlar biçiminde ısıyla sertleşen reçineler kullanır.



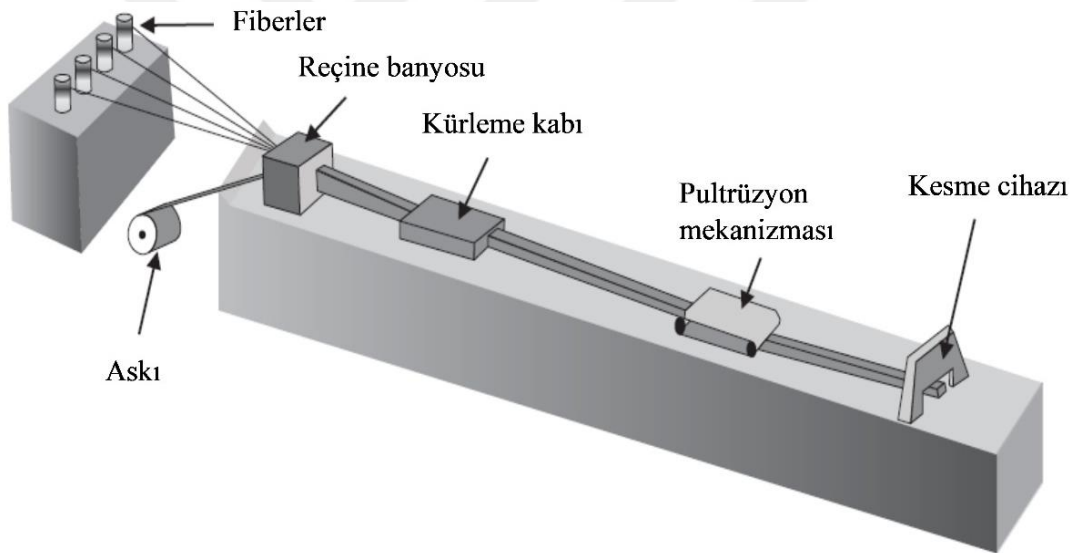
Şekil 2.20. Basınçla kalıplama yöntemi [85].

2.3.7 Pultrüzyon yöntemi

Pultrüzyon, sabit kesitli parçalar yapmak için kullanılan sürekli, yüksek hacimli bir üretim sürecidir. Pultrüzyonda, malzemeler, metal ve plastiği şekillendirmek için kullanılan ekstrüzyon işlemlerine benzer şekilde bir kalıp tarafından oluşturulacakları makineden çekilerek üretilirler.

Ekstrüzyona benzer olmasına rağmen pultrüzyon takviye liflerinin makineden çekilmesine bağlı olduğu için kompozitlere özgü bir üretim yöntemidir. Şekil 2.21’de gösterildiği gibi pultrüzyon işlemi, makaralardan çekilen ve reçine banyosuna düzenli bir şekilde hareket etmeyi sağlayan genel bir şekle dönüştürülen sürekli liflerle başlar.

Lifler reçine tarafından ıslanır ve daha sonra kalıba yaklaştıkça şekillenir. İstenirse, ek takviyeler, genellikle keçeler veya kumaşlar, sadece makine yönünden farklı bir yönde bazı elyafları dahil etmek için takviye ön kalıbına yönlendirilebilir[85].



Şekil 2.21: Pultrüzyon yöntemiyle kompozit üretim şeması[85].

3. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, farklı bozunma ortamlarında ve sürelerinde yaşlandırma yapılmış fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik davranışları incelenmiştir. Çalışmada deneysel olarak test edilen kompozitler, cam/epoksi (GFRP), karbon/epoksi (CFRP) ve cam-karbon/epoksi hibrit (GCFRP) kompozitlerdir. Bu kompozitler, dokuma tipi çapraz örgülü dokuma tipi cam ve karbon elyaflardan 8 tabaka olacak şekilde vakum destekli reçine transfer yöntemiyle (VARTM) üretilmiştir. GFRP kompoziti 8 tabaka cam elyaftan, CFRP kompozit 8 tabaka karbon elyaftan, GCFRP hibrit kompoziti en üst ve en alt iki tabakasında cam elyaf ve orta katmanında ise 4 tabaka karbon elyaf tabakadan oluşturulmuştur. GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitler; deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamında sırasıyla 30,60 ve 90 gün sürelerinde yaşlandırıldıktan sonra çekme, üç nokta eğilme, düşük hızlı darbe, basma ve aşınma testi davranışları deneysel olarak incelenerek kıyaslanmıştır. Tez çalışması üç ana bölümden oluşturulmuştur.

İlk aşamada; cam/epoksi (GFRP), karbon/epoksi (CFRP) ve cam-karbon/epoksi (GCFRP) fiber takviyeli polimer matrisli kompozit numuneler belirlenen deney test sayısına göre üretilmiştir. Standartlara uygun olarak kesim işlemi yapılmış ve boyutlandırılmıştır.

İkinci aşamada; GFRP, CFRP ve GCFRP kompozit malzemeler deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamında sırasıyla 30,60 ve 90 gün boyunca yaşlandırma yapılmıştır.

Üçüncü aşamada; yaşlandırma yapılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlere çekme, üç nokta eğilme, basma, düşük hızlı darbe ve aşınma testleri uygulanmıştır. Testlerin sonuçları yaşlandırma ortam şartları, yaşlandırma süreleri, kompozit numune tipine göre deneysel olarak mukayese edilmiş ve yorumlanmıştır.

3.1 Fiber Takviyeli Polimer Matrisli Kompozit Numunelerin Üretilmesi

3.1.1 Malzemeler

Kompozit malzeme üretiminde takviye elamanı ve matris elamanı iki ana malzeme grubu kullanılmıştır. Fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin üretim aşamalarında

kullanılan tüm malzemeler Dost Kimya Endüstriyel Hammaddeler San. Tic. Ltd. Şti. firmasından temin edilmiştir.

3.1.1 Takviye malzemesi

Çalışma için iki farklı tipte takviye elamanı kullanılmıştır. Fiber takviye elamanı olarak; alansal yoğunluğu 300 gr/m² E-cam fiber dokuma (twill) elyaf kumaş ve alansal yoğunluğu 200 gr/m² karbon (plain) elyaf kumaş kullanılmıştır.

3.1.2 Matris malzemesi

Matris malzeme olarak EPIKOTE MGS RIMR 135 epoksi ve EPIKURE RIMH 137 epoksi sertleştirici seti seçilmiştir. Reçine olarak seçilen RIMR 135 epoksi ve RIMH 137 epoksi sertleştirici setinin karışım oranı 100:30'dur. RIMR 135 reçine ve RIMH 134 epoksi sertleştiricinin oda sıcaklığındaki fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Matris malzeme olarak kullanılan epoksi ve sertleştiricinin oda sıcaklığındaki fiziksel özellikleri.

	Yoğunluk (g/cm ³)	Vizkozite (MPas)
RIM 135 epoksi	1.13-1.17	700-1100
RIMH 134 sertleştirici	0.93-1.00	10-80

Epoksi (RIMR 135) ve sertleştirici (RIMH 137) karışımının 24 saat oda sıcaklığında ve 15 saat 60 °C'deki kütleme işleme sonucu elde edilen mekanik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

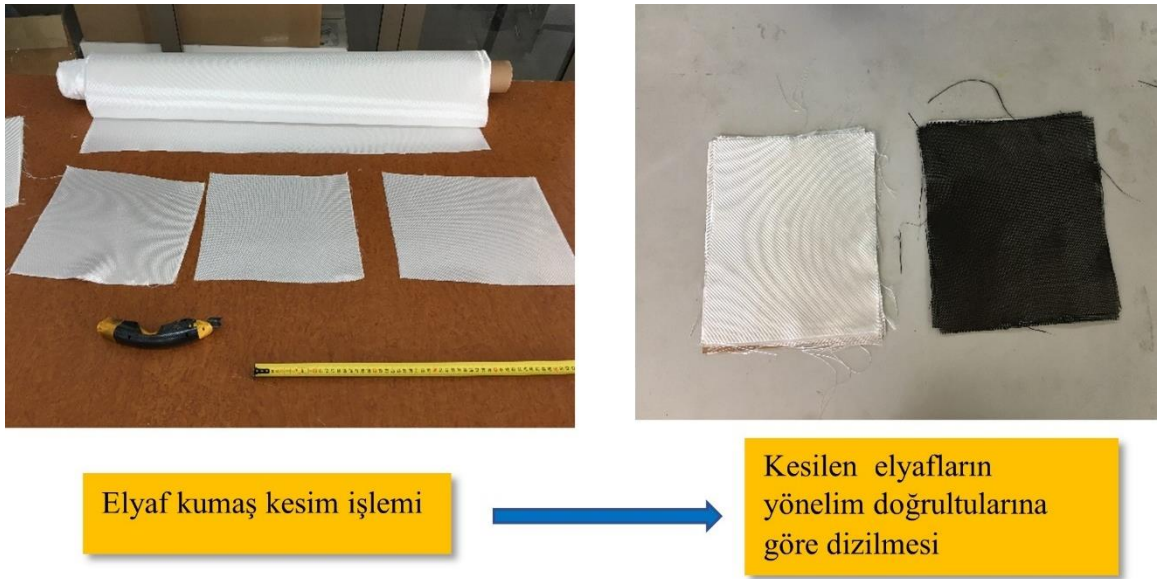
Çizelge 3.2: RIMR 135 laminasyon reçinesinin sertleştirici RIMH 137 ile kombinasyon edilmiş epoksi setinin mekanik özellikleri [86].

Mekanik Özellikler	Değer
Eğilme mukavemeti (MPa)	90-120
Elastisite modülü (MPa)	2700-3200
Çekme mukavemeti (MPa)	60-75
Basma mukavemeti (MPa)	80-90
Kopma uzaması (%)	8-16
Darbe dayanımı (KJ/m ²)	40-50
Yoğunluk (g/cm ³)	1.18-1.20

3.2 Kompozit Üretimi

3.2.1 Fiber takviye malzemesinin hazırlanması

Kompozit malzemelerin üretiminde cam ve karbon olmak üzere iki farklı elyaf kumaş kullanılmıştır. Rulo halinde bulunan cam ve karbon elyaf kumaşlardan şarjlı elyaf kesme makası ile 330×290 mm boyutlarında kumaş tabakaları kesilmiştir. Elyaf örgülü dokuma tipi kumaş yapısına sahip olduğu için çözgü ve atkı doğrultularının üretilecek kompozitin mekanik özelliklerini etkilediği bilindiğinden kumaş tabakaların aynı doğrultuda kesilmesine dikkat edilmiştir. Şekil 3.1’de takviye malzemesinin hazırlanma işlemleri gösterilmiştir.

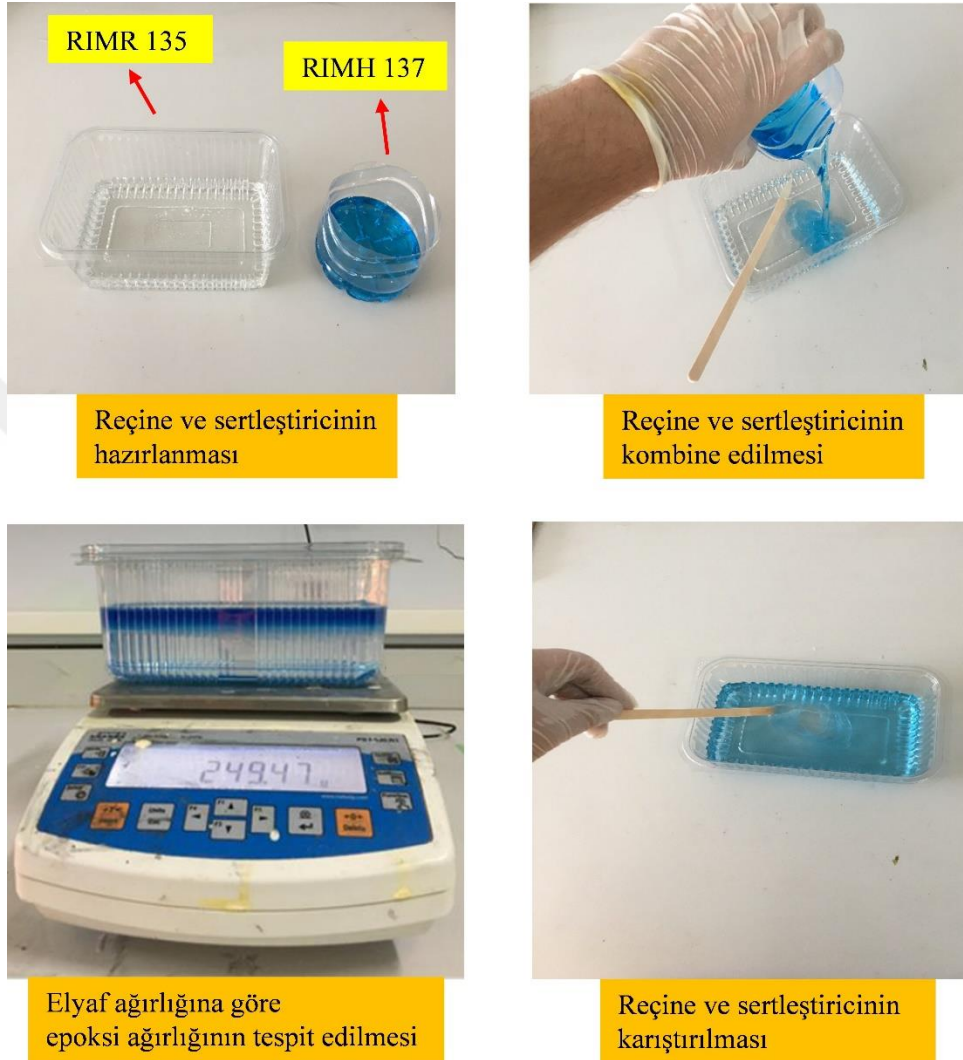


Şekil 3.1: Takviye malzemelerin hazırlanması.

3.2.2 Matris elamanın hazırlanması

Matris malzeme olarak RIMR 135 reçine ve RIMH 135 sertleştirici epoksi seti kombinasyonu kullanılmıştır. Öncelikle vakum infüzyon işleminde takviye elamanını yani elyaf yüzeyleri tamamen ıslatacak epoksi miktarının tespit edilmesi işlemi yapılmıştır. Yapılan ön çalışmalar sonucunda; vakum infüzyon ile kompozit üretim esnasında emdirilecek epoksinin, elyaf kumaş ağırlığının yaklaşık olarak %65-70'i kadar hazırlanmasının üretim sonunda kumaş yüzeyinin tamamının ıslanmasında yeterli olduğu tespit edilmiştir. Epoksi setinin toplam ağırlığı hesaplanarak RIMR/RIMH 100:30 ağırlık oranına göre ayrı kaplarda hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan reçinenin üzerine sertleştirici dökülerek kombine edilmiştir.

Son işlem olarak kombine edilen reçine ve sertleştirici iyice homojen bir görünüm elde edilene kadar beş dakika süresince özenle karıştırılarak epoksi seti hazırlanmıştır. Oluşturulan epoksi seti vakum infüzyon için hazır hale getirilmiştir. Matris elamanın hazırlanmasına ait işlem basamakları Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Matris malzemenin hazırlanma işlem basamakları.

3.3 VARTM Yöntemiyle Kompozit Üretiminin Yapılması

Tez çalışmasında test edilen tüm kompozit numuneler vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi (VARTM) ile üretilmiştir. Deney test sayılarına göre belirlenen GFRP, CFRP ve GCFRP kompozit numunelerin tamamı VARTM yöntemi ile üretilmiştir. Kompozitler İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Mekanik Anabilim Dalı laboratuvarlarında üretilmiştir. VARTM yönteminde kullanılan ekipmanlar ve görevleri Çizelge 3.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3: VARTM yönteminde kullanılan elamanlar ve görevleri.

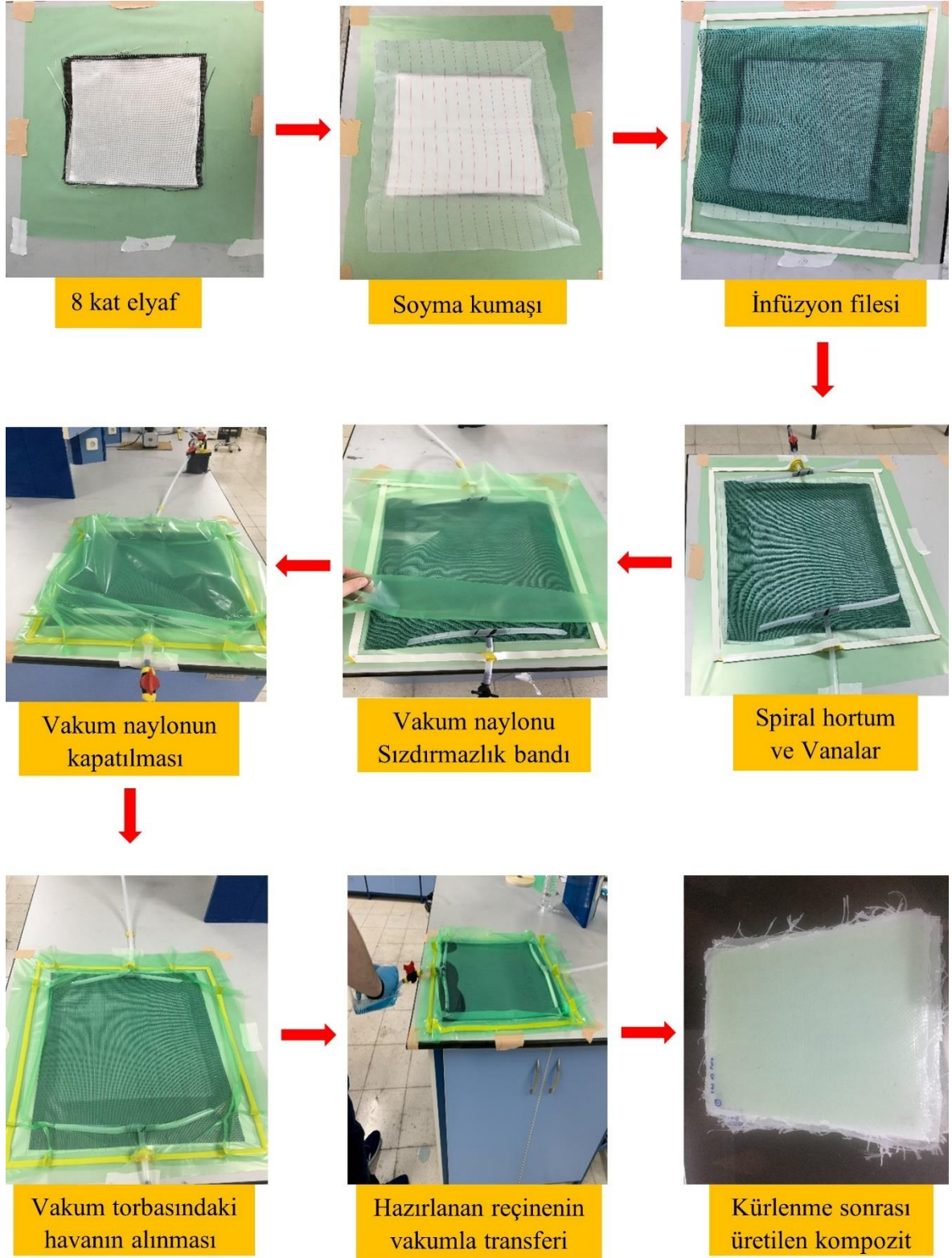
VARTM elamanı	Görevi
Vakum naylonu	Üretilecek kompozit yapıya ait kalıbın dış kabuğunu oluşturur ve vakum ortamında tutulmasını sağlar.
Soyma kumaşı	Sık dokunmuş ve kaygan yüzeyli bir yapısı sayesinde kürlenme işlemi sonunda kompozit plakanın diğer bileşenlerden kolayca ayrılmasını sağlar.
İnfüzyon filesi	Emdirilen reçinenin tüm kompozit kalıp yüzeyine dağılmasını sağlar.
Sızdırmazlık bandı	Kompozit kalıbın sınırlarına göre hazırlanmış vakum torbasına yapışarak belirlenen alanın sızdırmaz şekilde vakum ortamında kalmasını sağlar.
Spiral hortum	Emdirilen reçinenin homojen biçimde dağılımını sağlar.
İnfüzyon hortumu	Reçinenin tüm sistemde akmasını sağlar.
T bağlantı	Spiral hortuma verilen ve spiral hortumdan alınan reçinenin toplanmasını sağlar.
Vana	Reçinenin akışını kontrol etmeyi sağlar.
Vakum pompası	Reçinenin emdirilmesi için gereken vakumlama gücünü sağlayan ana elamandır.
Reçine akış tankı	Vakum sisteminden gelen havanın alınması sırasında köpüklü şekilde gelen reçineyi içine hapseder ve vakum pompasına reçinenin geçmesine mâni olur.
Vakum manometresi	Vakum ortamındaki havanın basıncını gösteren elamandır.

Yukarıda tanıtılan VARTM ekipmanları kullanılarak üretilen GFRP, CFRP ve GCFRP fiber takviyeli kompozit malzemelerin üretimi işlem basamakları maddeler halinde sıralanmıştır;

- VARTM işleminde kalıp yani (taban) olarak kullanılacak yüzey üzerine kalıp ayırıcı kimyasallar sürmek yerine bu çalışmada bunun yerine taban yüzeyi vakum naylonuyla kaplanmıştır.
- Çalışmada üretilen tüm kompozitler 8 kat kumaş elyaftan oluşacak şekilde üretilmiştir. Tabanın yüzeyine vakum naylonu çekildikten sonra önceden hazırlanmış 8 kat olacak elyaf kumaşlar tartılarak bu katmanın üzerine dizilmiştir.
- Dizilen elyaf tabakaların üzerine sırasıyla önce soyma kumaşı (peel ply), soyma kumaşının üzerine de infüzyon filesi serilmiştir.

- İnfüzyon akış filesi serildikten sonra naylon tabanı sınırlarına sızdırmazlık bandı çekilerek dikdörtgen bir çerçeve oluşturulmuştur. İnfüzyon akış filesinin karşılıklı iki kenarına dağıtıcı spiral hortumlar eklenmiştir. Spiral hortumların ortasına T bağlantı kolektörleri konumlandırılmış ve çıkışlarına şeffaf hortumlar takılmıştır. Şeffaf hortumlara da vanalar bağlanarak reçinenin (epoksi setinin) giriş ve çıkış hatları hazırlanmıştır.
- Vakum altında soyma kumaş, akış filesi ve spiral hortumları sabitlemek için şeffaf bantlar kullanılmıştır. Reçine giriş ve çıkışlarında hava kaçaklarını önlemek amacıyla T bağlantı kolektörlerinin çıkışları sızdırmazlık bandı ile sarılarak sabitlenmiştir.
- T bağlantı kolektörü, dağıtıcı spiral hortum ve vanalar sabitlendikten sonra vakum ortamı oluşması için sınırlandırılmış bölgenin üstü vakum naylonu ile kaplanmıştır. Vakum naylonu sızdırmazlık bandı ile yapıştırılarak vakum torbası hazırlanmıştır.
- Tamamen kapatılan vakum torbasına sızdırmazlık testi yapılmıştır. Bu işlemde reçine giriş vanası kapatıldıktan sonra vakum manometresi ibresi sabit değere gelene kadar vakum pompasıyla çalıştırılmıştır. Manometredeki değer sabitlenince vakum pompasına yakın vana kapatılarak kapalı bir vakum sistemi oluşturulmuştur. Yaklaşık 20 dakika sürecinde vakum torbasında hava kaçağı olup olmadığı tespit edilmiştir.
- Daha sonra vakumlanan kalıp içerisine reçine transferi gerçekleştirilir. Reçine emilimiyle elyafların tamamının ıslanması sağlanır. Reçine tüm kalıbı doldurduktan sonra giriş ve çıkış vanaları kapatılarak kompozit plakanın rijit hali alması için 24 saat boyunca oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılmıştır.
- 24 saat sonra tamamen kürlenmiş kompozit plaka soyma kumaşı yardımıyla üretilen vakum torbasından ayrılarak kompozit malzemeler elde edilmiştir (Şekil 3.2).

Cam/epoksi kompozit (GFRP), karbon/epoksi kompozit (CFRP) ve cam-karbon/epoksi hibrit kompozit (GCFRP) kompozit plakaların vakum destekli reçine transfer metoduyla üretimi için uygulanan işlem basamakları Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3: VARTM tekniği kullanılarak kompozit plakaların üretilme işlem basamakları.

Kompozit üretimi için kullanılan vakum destekli reçine transfer yöntemine ait test düzeneği Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4: VARTM deney düzeneğiyle kompozit plaka üretimi.

Kompozit plakalar soyma kumaşından çıkarıldıktan sonra tartılmıştır. VARTM işlemine başlamadan önce de kumaşlar tartıldığı için son ağırlıktan bu değerler çıkarılarak takviye ve matrisin ağırlıkça yüzdeleri hesaplanmıştır (Şekil 3.5).



Elyaf kumaş
ağırlığının tartılması



Kompozit plakanın
ağırlığının tartılması

Şekil 3.5: Takviye elamanın ağırlıkça kütleli tespiti için tartım işlemi.

3.4 Kompozit Malzemelerin Fiziksel Özelliklerinin Tespit Edilmesi

VARTM tekniğiyle üretilen kompozit malzemelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde aşağıda verilen denklemlere ait formüller kullanılmıştır. Üretilen kompozit numunelerin fiber hacim oranları hesabı bu formüller kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklemlerde;

$v_{c,f,m}$ = Sırasıyla kompozit, fiber ve matris hacmini,

$w_{c,f,m}$ = Sırasıyla kompozit, fiber ve matris kütlesini,

$\rho_{c,f,m}$ = Sırasıyla kompozit, fiber ve matris yoğunluğunu ifade etmektedir.

Hacim oranının hesaplanması:

$$v_c = \frac{w_c}{\rho_c} \quad (3.1)$$

Kompozit numunedeki fiber hacim oranı (V_f) ve matrisin hacim oranı (V_m)[42] ;

$$V_f = \frac{v_f}{v_c}$$
$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (3.2)$$

$$V_f + V_m = 1$$

$$v_f + v_m = 1$$

Kütle oranının hesaplanması:

Kompozit numunedeki fiber kütle oranı (W_f) ve matrisin kütle oranı (W_m)[42] ;

$$W_f = \frac{w_f}{w_c}$$
$$W_m = \frac{w_m}{w_c} \quad (3.3)$$

$$W_f + W_m = 1$$

$$w_f + w_m = 1$$

Kompozitin yoğunluğunun hesaplanması:

Kompozit yoğunluğunun hacim oranları cinsinden ifadesi aşağıdaki denklemde gösterildiği gibidir [42];

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (3.4)$$

Kompozit malzemenin yoğunluğunun kütleleri cinsinden ifadesi ise;

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m} \quad (3.5)$$

VARTM yöntemi kullanılarak üretilen cam/epoksi kompozit (GFRP), karbon/epoksi (CFRP) kompozitlerin deneysel olarak yoğunluklarının tespit edilmesi işlemi Arşimet Prensibi olarak bilinen sıvıların kaldırma kuvvetine göre gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6). Üretilen kompozit plakalardan yoğunluk deneyi için 20×20 mm boyutlarında numuneler kesilerek hazırlanmıştır. Kompozitlerin yoğunlukları ölçülürken, ilk olarak her kompozit tipi için numuneler 1 mg hassasiyetine sahip AND GF 600 hassas terazi yardımıyla tartılmıştır. Daha sonra tartılan bu numuneler içinde saf su bulunan 0.1 ml hassasiyetinde dereceli mezura atılarak saf suyun yükseldiği miktar gözlemlenerek hacimleri ölçülmüştür. Saf su, başlangıçta tam sayı (5ml) hizasına kadar doldurulmuş ve yine tam sayı hizasına yükselene kadar içine kompozit numune atılmaya devam edilmiştir. Daha sonra denklem (3.6) kullanılarak numunelerin yoğunlukları hesaplanmıştır.

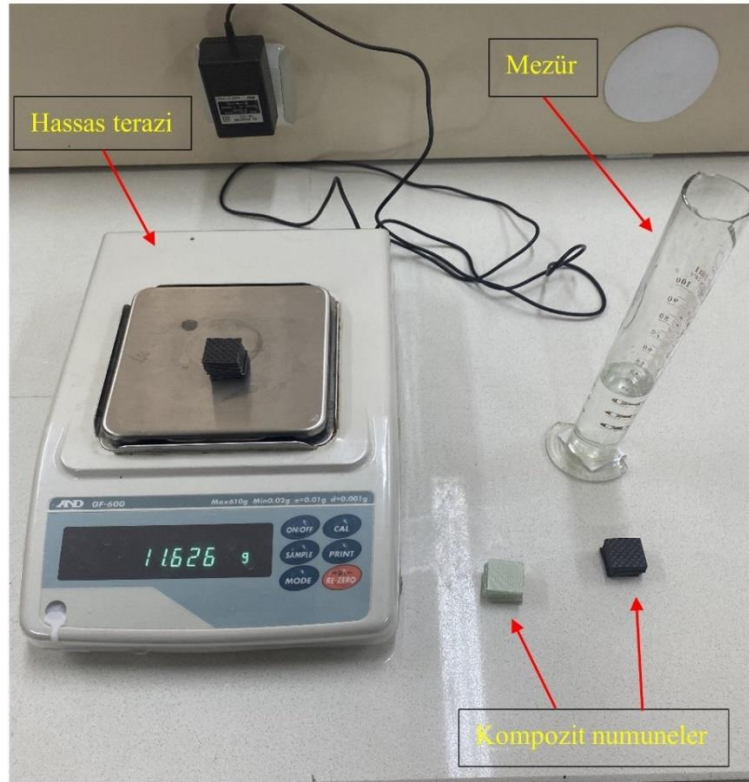
$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3.6)$$

3.6 denkleminde gösterilen;

ρ : Yoğunluk (gr/cm³),

m : Kütle (gr),

v : Hacim (cm³) olarak ifade edilmektedir.

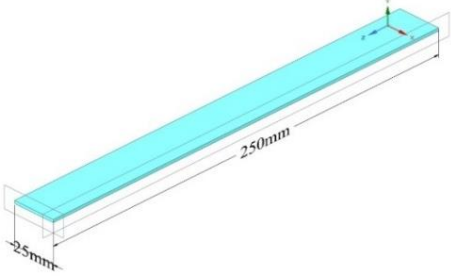
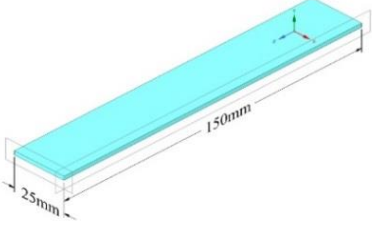
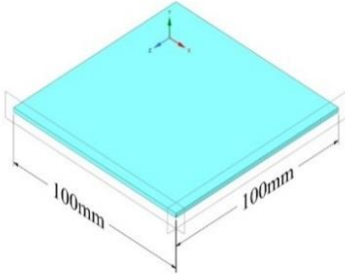
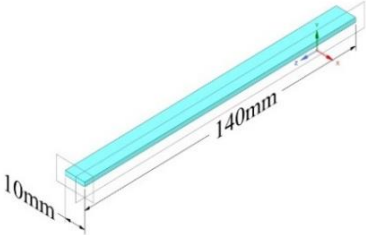
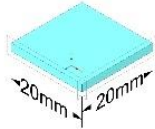


Şekil 3.6: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin yoğunluklarının belirlenmesi.

3.5 Mekanik Testler İçin Kompozit Numunelerin Hazırlanması

Mekanik testler için kompozit numuneler hazırlanırken test standartlarına göre numune boyutları belirlenmiş ve Space Claim çizim modülü kullanılarak 3 boyutlu modeller hazırlanmıştır (Çizelge 3.4). Üç farklı tipte üretilen plakaların yapısında fiber tipi farklılarından dolayı üretilen kompozit tabaka kalınlıkları belirtilmemiştir.

Çizelge 3.4: Mekanik test numunelerinin 3 boyutlu modelleri ve standartlarının gösterimi.

Mekanik Test	Test Standartı	3 Boyutlu Geometri
Çekme Testi	ASTM D3039 [87]	
Eğilme Testi	ASTM D7264 [88]	
Düşük Hızlı Darbe Testi	ASTM D7136 [89]	
Basma Testi	ASTM D3410-75 [90]	
Aşınma Testi	ASTM G99-17 [91]	

Çalışmada belirlenen testlerin numune boyutlarına göre kompozit plakalara kesim işlemi uygulanmıştır. Bu kapsamda tez çalışması için; VARTM yöntemiyle cam/epoksi kompozit (GFRP) plakadan 35 adet, karbon/epoksi (CFRP) kompozit plakadan 35 adet ve cam-karbon/epoksi (GCFRP) kompozit plakadan 35 adet olmak üzere toplamda 105 adet kompozit plaka üretilmiştir. Üretilen kompozit plakalara; çekme, eğilme, basma, düşük hızlı darbe ve aşınma deney testleri numuneleri için kesim işlemi uygulanmıştır. Kompozit plakaların kesim işlemi Altendorf markalı çizicili yatar daire makinesi tarafından deney test numunelerinin geometrilerine göre ölçülü ve hassas olacak şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7: Üretilen kompozit plakaların test numune geometrilerine göre kesilmesi.

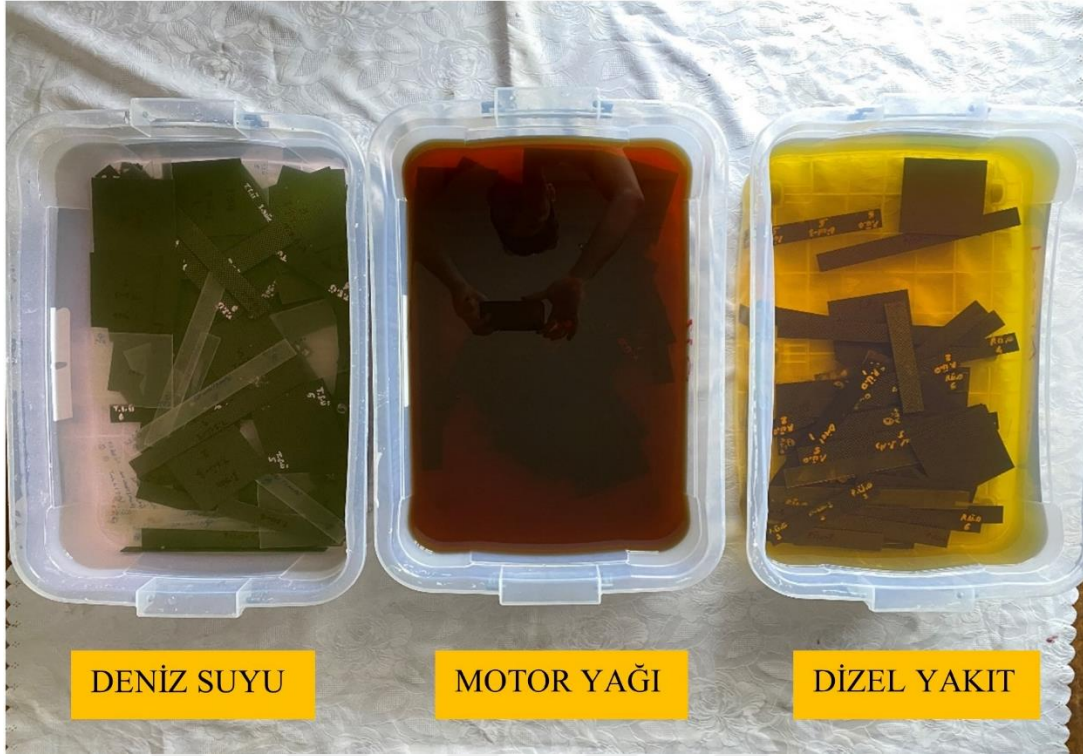
3.6 Kompozitlere Yaşlandırma İşleminin Uygulanması

VARTM ile üretilen GFRP, CFRP ve GCFRP kompozit numuneler belirlenen test standartlarına ait geometrilere göre kesildikten sonra üç farklı sıvı ortamında ve üç farklı sürede yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Çizelge 3.5'te GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin yaşlandırma ortamına, süresine ve deney tipine göre test edilen numune sayısı adeti gösterilmiştir. Çizelge 3.5'te gösterilen parametrelere göre kompozit numuneler yapay deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamlarında 30, 60 ve 90 gün süresi boyunca yaşlandırılmıştır. Yapay deniz suyu ortamı için; laboratuvarında bir behere 35 gram tuz eklendi ve ardından toplam kütle 1000 gr olana kadar musluk suyu ilave edildi, ardından tuz suda tamamen eriyinceye kadar karıştırılarak yapay deniz suyu ortamı hazırlanmıştır. Motor yağı ortamı için; Shell Helix HX7 10W-40 motor yağı kullanılmıştır. Dizel yakıt ortamı için; Shell V Power dizel yakıt kullanılmıştır.

Çizelge 3.5: Kompozitlerin ortam şartları ve süresine göre belirlenmiş numune test sayısı.

Kompozit tipi	Ortam Koşulları	Bekleme Süresi (Gün)			Çekme Testi (adet)	Eğilme Testi (adet)	Darbe Testi (adet)	Basma Testi (adet)	Aşınma Testi (adet)
		-	30	60					
GFRP	Oda Şartları	-	-	-	5	5	20	5	3
	Deniz Suyu	30	60	90	15	15	15	15	9
	Motor Yağı	30	60	90	15	15	15	15	9
	Dizel Yakıt	30	60	90	15	15	15	15	9
CFRP	Oda Şartları	-	-	-	5	5	20	5	3
	Deniz Suyu	30	60	90	15	15	15	20	9
	Motor Yağı	30	60	90	15	15	15	15	9
	Dizel Yakıt	30	60	90	15	15	15	15	9
GCFRP	Oda Şartları	-	-	-	5	5	20	5	-
	Deniz Suyu	30	60	90	15	15	15	15	-
	Motor Yağı	30	60	90	15	15	15	15	-
	Dizel Yakıt	30	60	90	15	15	15	15	-

Kompozitlerin yaşlandırma ortamları Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Her yaşlandırma süresi, yaşlandırma ortamı, kompozit tipi ve deney testi için beşer adet numune koyulmuştur. Her yaşlandırma süresi sonunda belirlenen test tiplerine göre deneyler yapılmıştır.



Şekil 3.8: Kompozitlerin yaşlandırma ortamına bırakılması.

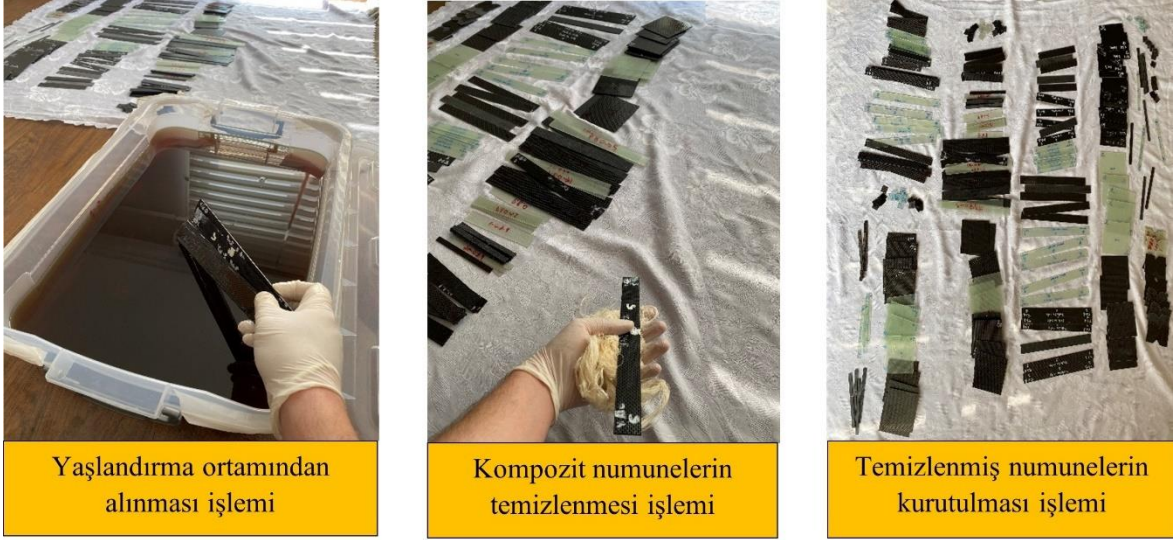
Yaşlandırma ortamlarına bırakılan numunelerin sıvı absorpsiyonu, ASTM D570-98(2018) uyarınca kuru ve yaşlandırılmış numunedeki ağırlık farkı ile belirlendi. Her numune yaşlandırılma yapılan süreden sonra yaşlandırma ortamından alınıp temiz bezle silinip kurumaya bırakılmıştır (Şekil 3.9). Daha sonra oluşan kütle absorpsiyon oranlarını hesaplamak için Şekil 3.6’da gösterilen 0.1 mg hassasiyetine sahip Necklife FA hassas terazi ile tartılmıştır. Farklı yaşlandırma ortamlarına bırakılan kompozit numunelerin sıvı absorpsiyon yüzdeleri her numune grubundaki beş adet deney numunesinin kuru ve yaş ağırlıkları tartılarak tespit edilmiştir. Absorpsiyon ağırlık yüzdesi M_t (%) aşağıdaki denklem (3.7) göre hesaplandı:

$$M_t(\%) = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (3.7)$$

(3.7) denkleminde gösterilen;

m_t : t anındaki numune ağırlığı (gr),

m_0 : numunenin başlangıç ağırlığı (gr) ifade etmektedir.



Yaşlandırma ortamından alınması işlemi

Kompozit numunelerin temizlenmesi işlemi

Temizlenmiş numunelerin kurutulması işlemi

Şekil 3.9: Yaşlandırma işlemi uygulanmış kompozitlerin yaşlandırma ortamlarından alınması işlem aşamaları.

Her yaşlandırma süresi sonunda kompozit malzemeler Şekil 3.9'daki işlem aşamalarından geçirilerek testler yapılmıştır. Yapay deniz suyu ortamı için her gün karıştırılarak tuzlu su çözelti dengesine dikkat edilmiştir. Yaşlandırma ortamları 90 gün süresince oda sıcaklığı şartlarında bekletilerek yapılmıştır. Yaşlandırma ortamlarına ait fiziksel özellikler Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6: Yaşlandırma ortamlarının fiziksel özellikleri [92,93].






Yaşlandırma ortamları	Yoğunluk (g/cm ³)	Vizkozite (MPas)
Deniz suyu	1.023	0.959
Shell Helix HX7 10W-40	0.860	96.310
Shell V Power	0.832	3.168

3.7 Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu tez çalışmasında üç farklı tipte tabakalı cam/epoksi (GFRP), karbon/epoksi (CFRP) ve cam-karbon/epoksi hibrit (GCFRP) kompozit malzeme üretilmiştir. Bu üç farklı kompozit malzemeye ait genel mekanik özellikler belirlenmiştir. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi için çekme testi, kayma testi ve basma testleri yapılmıştır. Yapılan bu testlere ait ASTM standartları Çizelge 3.7'de gösterilmiştir.

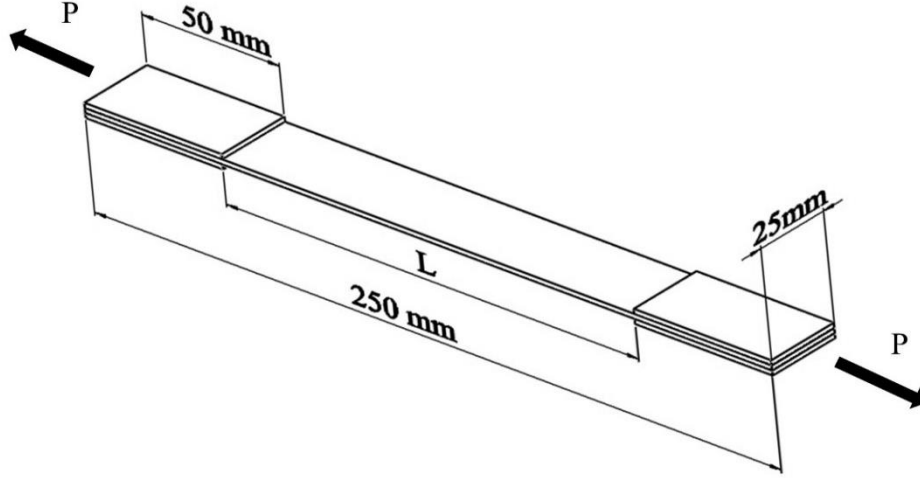
Üretilen kompozit yapılarda kullanılan fiberler; cam fiber dokuma örgülü (twill), karbon fiber dokuma örgülü (plain) yapılıdır. Dokuma örgülü elyaf yapılarından dolayı bu elyafların oluşturulan kompozit numunelerin fiber yönünde ve fibere dik doğrultulardaki çekme gerilmeleri, elastisite modülleri, poisson oranları ve basma gerilmeleri aynı olduğu teorik olarak bilinmektedir.

Çizelge 3.7: Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan ASTM standartları ve geometrileri [94-95].

Hesaplanan malzeme özellikleri	Sembol ve birimler	ASTM test metodu	Numune Geometrisi
Elyaf doğrultusundaki elastisite modülü	E_1 (MPa)	ASTM 3039-76	
Poisson oranı	ν_{12}		
Çekme mukavemeti	X_c (MPa)		
Elyafa dik doğrultudaki elastisite modülü	E_2 (MPa)	ASTM 3039-76	
Poisson oranı	ν_{12}		
Çekme mukavemeti	Y_c (MPa)		
Kayma modülü	G_{12} (MPa)	ASTM D7078	
Kayma mukavemeti	S (MPa)		
Elyaf doğrultusundaki basma mukavemeti	X_B (MPa)	ASTM 3410-75	
Elyafa dik doğrultudaki basma mukavemeti	Y_B (MPa)	ASTM 3410-75	

Elastisite Modülü ve Poisson oranının belirlenmesi

VARTM ile üretilen GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin elastisite modülü ve poisson oranının belirlenme işlemi için kompozit çekme numuneleri hazırlanmıştır. Çekme numunelerinin geometrisi ASTM 3039-76 standardına göre hazırlanmıştır (Şekil 3.10).

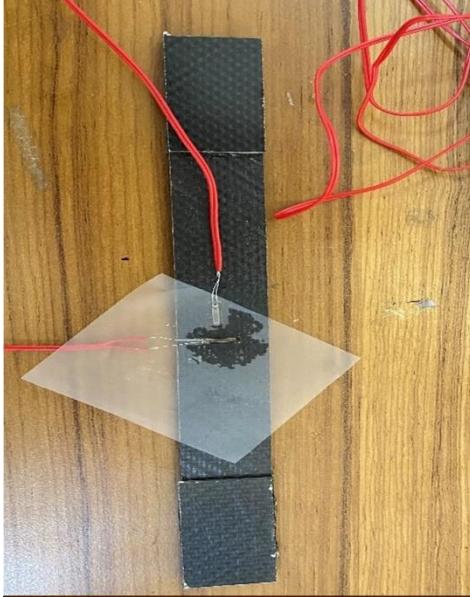


Şekil 3.10: ASTM 3039 çekme test standardına göre hazırlanmış numune boyutları.

Testler Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarlarında 250 kN kapasiteli Shimadzu marka test cihazında gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemenin elastisite modülü belirlenirken numune üzerlerine iki adet tek yönlü Strain gauge rozetleri yapıştırılmıştır. Rozetle kompozit numuneye genişlik ve uzunluk doğrultusunda yapıştırılarak P3 Strain Indicator and Recorder cihazına bağlanmıştır.

Çekme testi sonucunda numune üzerindeki enine ve boyuna uzama gerinim değerleri bilgisayara aktarılarak poisson oranı (ν_{12}) tespit edilmiştir. Test edilen kompozitler dokuma tipi elyaf takviyeli olduklarından dolayı elyaf doğrultusundaki elastisite modülü (E_1) ve elyafa dik doğrultudaki elastisite modülü (E_2) değerleri eşittirler. Çekme testleri, 25 mm genişliğinde, 250 mm uzunluğunda kompozitler ile yapılmıştır. Numunelerin kalınlık değeri GFRP için $1.90 \pm 0,05$ mm, CFRP için $1.80 \pm 0,05$ mm, GCFRP için 1.85 ± 0.05 mm değerindedir.

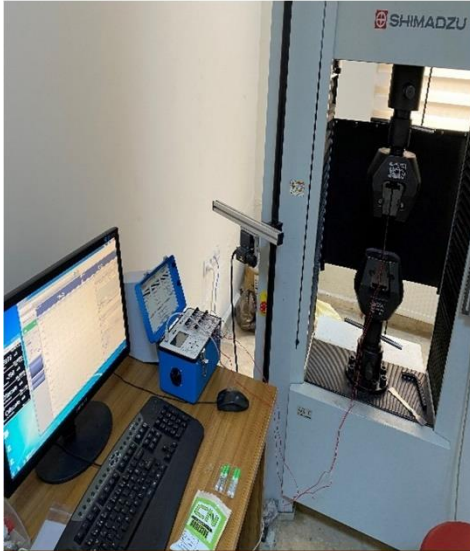
Şekil 3.11’de üretilen kompozit malzemelerin mekanik özellikleri olan elastisite modülü, poisson oranı ve çekme gerilmesi değeri hesaplamak için numunelerin çekme testine hazırlanış aşamaları detaylı şekilde gösterilmiştir. Strain gauge rozetlerinin numune yüzeyine yapıştırılması, rozetlerin gerinim ölçere (rocorder) bağlanması ve numunenin çekme testi cihazına bağlanması gösterilmiştir. Testler çekme testi numunelerinin kopmasıyla son bulmuştur.



Kompozitlere strain gauge rozetlerinin yapıştırılması



Strain gauge rozetlerinin gerinim ölçere bağlanması



Rozet bağlanmış numunenin çekme testinin yapılması



Strain gauge bağlanmış numunenin test sonrası hasarı

Şekil 3.11: Kompozit malzemelerin Elastisite modülü ve poisson oranın deneysel olarak belirlenmesi.

Fiber yönündeki elastisite modülü, poisson oranı ve çekme gerilmesi hesabı [95];

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} , X_{\zeta} = \frac{P_{max}}{A} \quad (3.8)$$

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} , \nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (3.9)$$

(3.8) ve (3.9) denklemlerinde gösterilen;

P_{max} : Maksimum çekme yükü (N)

A : Çekme kesiti orta yüzey alanı (mm^2)

X_{ζ} : Fiber doğrultusundaki çekme gerilmesi (MPa)

E_1 : Fibere doğrultusundaki elastisite modülü (MPa)

ν_{12} : Poisson oranını ifade etmektedir.

Fibere dik doğrultudaki elastisite modülü, poisson oranı ve çekme gerilmesi hesabı [96];

$$\sigma_2 = \frac{P}{A} , \quad Y_{\zeta} = \frac{P_{max}}{A} \quad (3.10)$$

$$E_2 = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} , \quad \nu_{21} = \nu_{12} \frac{E_2}{E_1} \quad (3.11)$$

(3.10) ve (3.11) denklemlerinde gösterilen;

P_{max} : Maksimum çekme yükü (N)

A : Çekme kesiti orta yüzey alanı (mm^2)

Y_{ζ} : Fibere dik doğrultusundaki çekme gerilmesi (MPa)

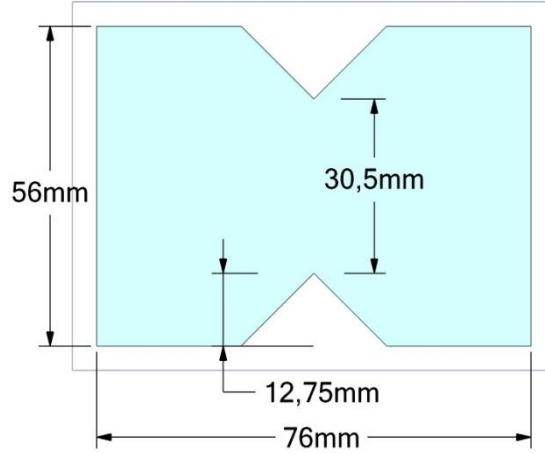
E_2 : Fibere dik doğrultudaki elastisite modülü (MPa)

ν_{21} : Poisson oranını ifade etmektedir.

Kayma modülü ve kayma mukavemetinin hesaplanması [84];

VARTM ile üretilen GFRP, CFRP ve GCFRP kompozit malzemelerin kayma modülü (G_{12}) ve maksimum kayma mukavemeti (S) ve değerlerinin belirlenmesi için ASTM 7078 standartlarına uygun olarak V çentikli kayma test numuneleri hazırlanmıştır. Standarttaki boyutlara göre hazırlanan numunenin geometrisi Şekil 3.12' de gösterilmiştir. Numuneye ait boyut toleransları; uzunluk ve genişlik boyutlarında ± 0.3 mm ve V çentik açısında $\pm 0,5^\circ$ olacak şekilde kesilmiştir.

Kayma modülü ve mukavemetinin belirlenmesi işlemine ait kompozitlerin kayma testine hazırlanması, test edilmesi işlemine ait gerçekleştirilen aşamalar Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12: ASTM 7078 kayma test standardına göre hazırlanmış numune boyutları.

Kompozitlerin kayma modülü (G_{12}) değerinin belirlenmesi için strain gauge (gerinim ölçer) rozetler kullanılmıştır. Bu rozetler Şekil 3.13’de gösterildiği gibi 45° ’lik açı yapacak şekilde yapıştırılmıştır. P3 Strain Indicator and Recorder cihazına aktarılan şekil deriştirme (gerinim) verileri ile çekme testi cihazından elde edilen kuvvet verileri eşleştirilmiştir. Bu değerler, (3.12) ve (3.13) denklemindeki eşitliklerde kullanılarak kompozitlerin kayma modülü ve maksimum kayma mukavemeti değerleri hesaplanmıştır.

$$\tau = \frac{P}{A}, \quad S = \frac{P_{max}}{A} \quad (3.12)$$

$$\gamma_{12} = 2\varepsilon, \quad G_{12} = \frac{P}{A\gamma_{12}} \quad (3.13)$$

(3.12) ve (3.13) denklemlerinde gösterilen;

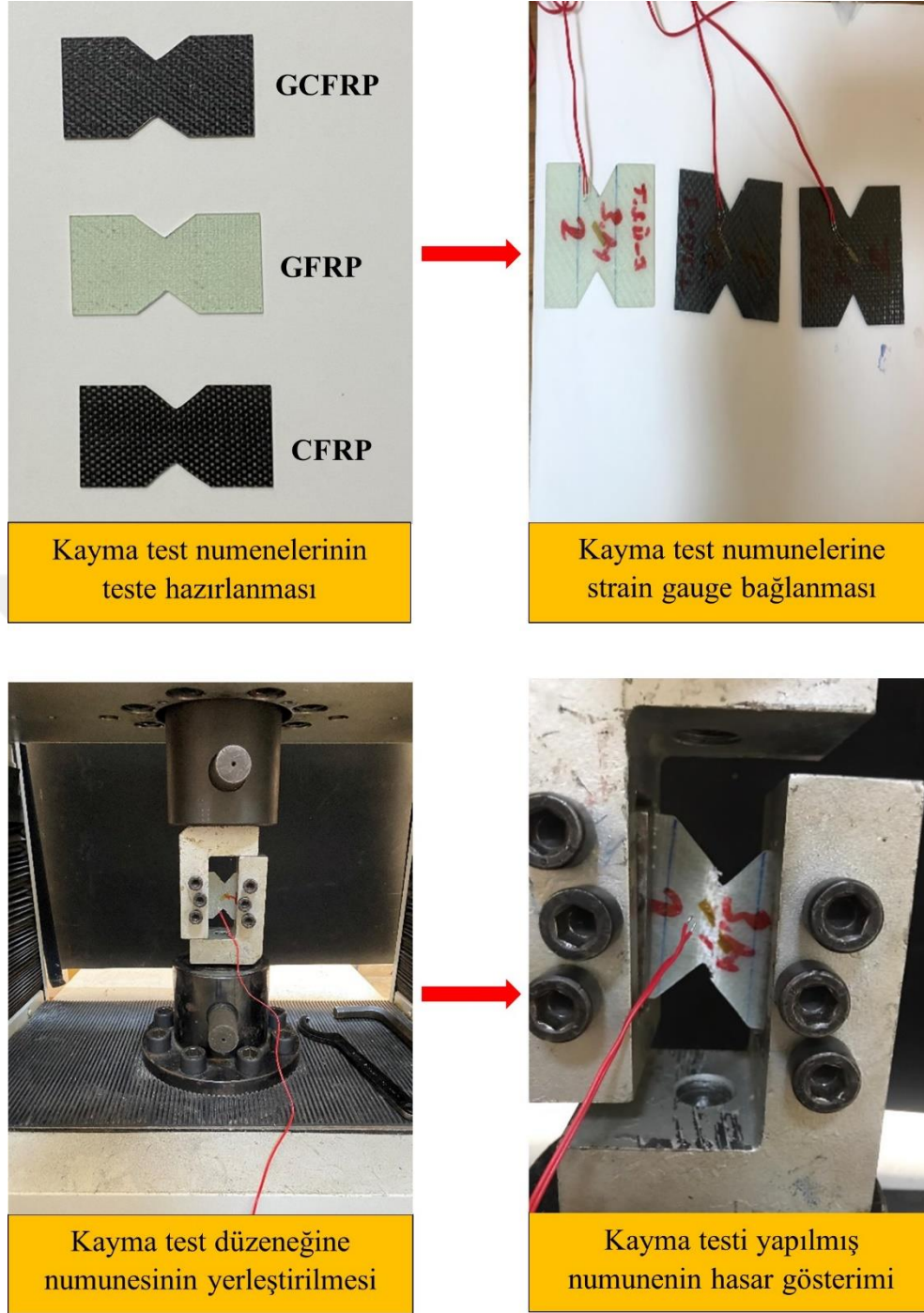
A : Çentikler arasındaki kesit alanını (mm^2)

ε : Şekil değiştirme (gerinim değeri)

γ_{12} : Kayma açısı ($^\circ$)

τ : Kayma gerilmesi (MPa)

Şekil 3.13’de gösterildiği gibi hazırlanan çentikli kayma numunelerinden cam/epoksi $[G]_8$, karbon/epoksi $[C]_8$, cam-karbon/epoksi hibrit $[G_2C_2]_8$ dizilimine sahip 8 tabaka dokuma tipi elyaftan oluşmuş kompozitlerin kayma modülü ve maksimum kayma mukavemeti değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.13: Kompozit numnelere kayma testinin yapılması.

Basma gerilmesinin hesaplanması

VARTM ile üretilen GFRP, CFRP ve GCFRP kompozit malzemelerin basma gerilme değerlerini hesaplamak için ASTM 3410-75 test standartlarına göre hazırlanan numunelere basma testleri uygulanmıştır. Basma testleri Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan 250 kN kapasiteli Shimadzu marka test cihazında gerçekleştirilmiştir. Cihaza basma testi aparatı takılarak test düzeneği hazırlanmıştır.

Basma test standardına göre hazırlanan basma test numunelerinin geometrisi Şekil 3.14’de gösterilmiştir. Boyuna doğrultuda yapılan basma testleri sonucunda cihazdan alınan kuvvet, zaman ve yer değiştirme verileri bilgisayara aktarılmıştır. Aktarılan verilerle basma gerilme değerleri hesaplanmıştır. Cam/epoksi [G]₈, karbon/epoksi [C]₈, cam-karbon/epoksi hibrit [G₂C₂]₈ dizilimine sahip 8 tabaka dokuma tipi elyaftan oluşmuş kompozitlerin lif doğrultusundaki ve liflere dik doğrultudaki basma mukavemetleri denklem (3.14) ve (3.15) kullanılarak hesaplanmıştır [96]. Dokuma tipi kumaş olduğu için fiber yönünde ve fibere dik doğrultudaki basma gerilme değerleri eşittirler.

$$X_B = \frac{P_{max}}{A} \quad (3.14)$$

$$Y_B = \frac{P_{max}}{A} \quad (3.15)$$

(3.14) ve (3.15) denklemlerinde gösterilen;

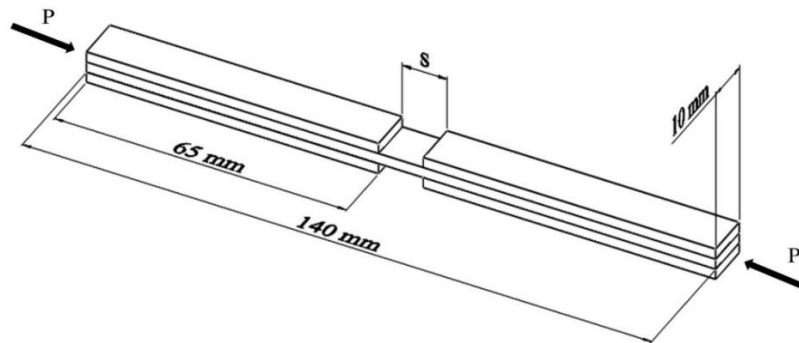
P_{max} : Maksimum basma yükü (N),

A : Basma kesiti yüzey alanı (mm²),

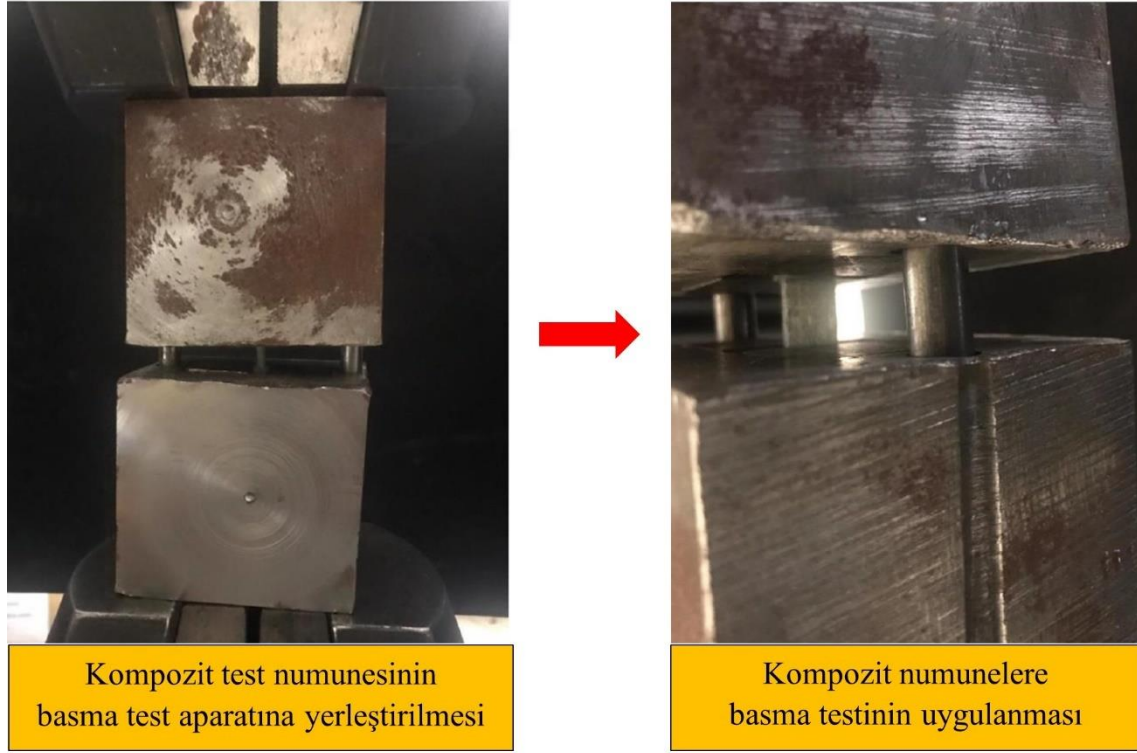
X_B : Fiber doğrultusundaki basma gerilmesi (MPa),

Y_B : Fiber dik doğrultudaki basma gerilmesi (MPa) değerini ifade etmektedir.

Çizicili yatar daire makinesi cihazında kesilerek boyutlandırılan basma test numunelerinin boyu (L) 140 mm ve yükleme altında bası çeneleri tarafından temas yüzeylerinin hasar görmemesi için dış yüzeylere yapıştırılan tablaların uzunluğu 65 mm, numune genişliği (W) 10 mm’dir. İki tab arası mesafe yani (S) 10 mm dir. Kalınlık değerleri sırasıyla GFRP için 1.90±0.05 mm, CFRP için 1.80 ± 0.05 mm, GCFRP için 1.85±0.05 tolerans değerlerinde ölçülmüştür. Şekil 3.15’de kompozit malzemelerin basma gerilmesi değerinin hesaplanması için uygulanan basma deney aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3.14: ASTM 3410-75 basma test standardına göre hazırlanmış numune boyutları.



Şekil 3.15: Kompozitlere basma testlerinin uygulanması.

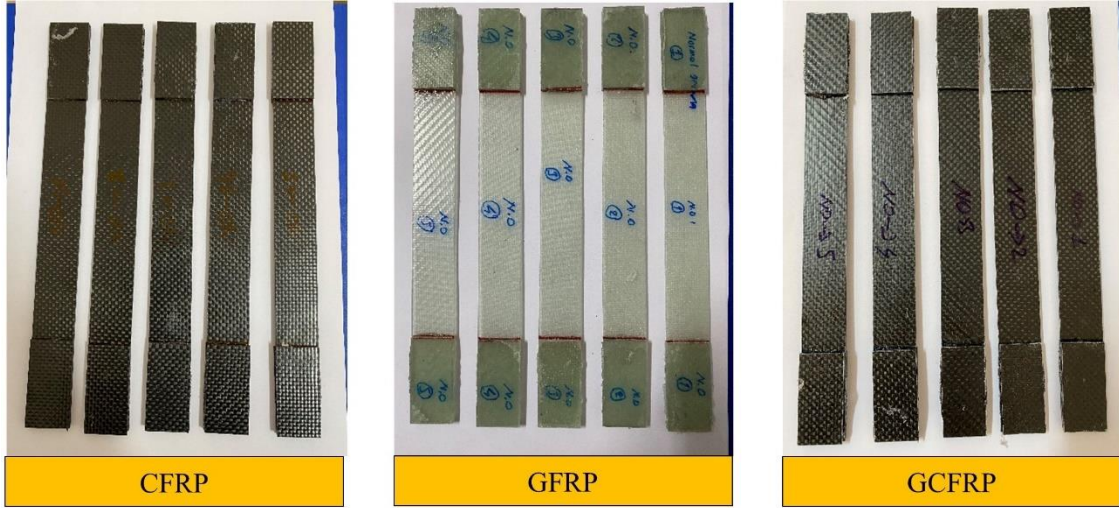
3.8 Yaşlandırılmış Kompozitlere Mekanik Testlerin Yapılması

Deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamında belirlenen sürelerde yaşlandırma yapılmış kompozit numunelere yaşlandırma ortamlarından alınarak çekme, eğilme, düşük hızlı darbe ve basma testleri yapılmış ve mekanik davranışlarını incelenmek istenmiştir.

3.8.1 Çekme testi

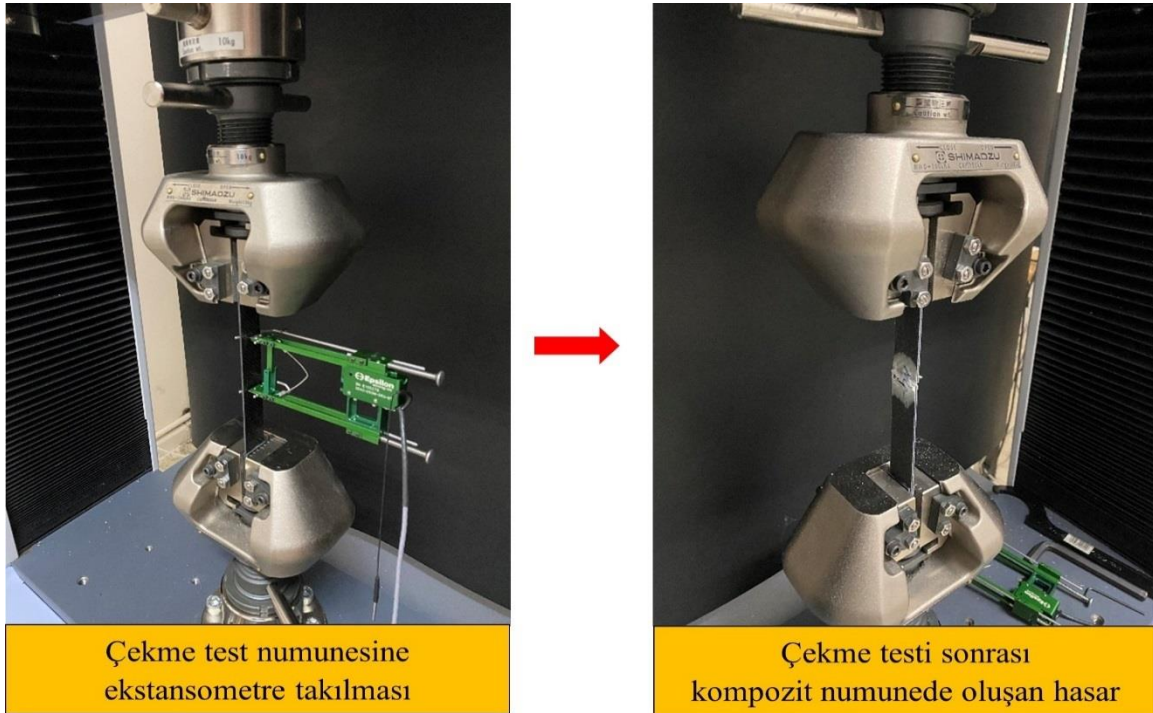
Yaşlandırma yapılmış kompozitlerin çekme test davranışları İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuvarında yapılmıştır. Bu laboratuvarında Shimadzu AGS-X çekme cihazı kullanılarak çekme testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.16).

Yaşlandırma yapılmış kompozit numunelerin çekme test numunelerinin, genişliği 25 mm, uzunluğu 250 mm uzunluğunda olacak şekilde ASTM 3039 standartlarına göre hazırlanmıştır. Çekme testleri esansında çene hasarının oluşmaması için 25 mm genişlik ve 50 mm uzunluğa sahip tablalar hızlı yapıştırıcı ile kompozitlerin üst ve alt yüzeylerine yapıştırılmıştır. (Şekil 3.16). Kalınlık değişimleri absorpsiyon nedeniyle değiştiği için GFRP için kalınlık 1.90 ± 0.05 mm, CFRP için 1.80 ± 0.05 mm ve GCFRP için 1.85 ± 0.05 olmaktadır.



Şekil 3.16: CFRP, GFRP ve GCFRP kompozitlerin çekme test numuneleri.

Çekme testleri 1 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3.6'da Çizelge 3.5'de gösterilen tüm ortam şartları ve deney parametreleri için 5'er deney tekrarı yapılmıştır. Şekil 3.17'de çekme testleri yapılırken çekme testi cihazına boyuna uzamayı hassas ölçebilmek için maksimum ölçüm limiti 50 mm olan Epsilon 3542-050M-050-ST marka aksenal kontak ekstansometre kullanılması gösterilmiştir. Bu çalışmadaki tüm ortam koşulları ve parametrelerine göre belirlenmiş çekme testi deneyi yapılan kompozit numune sayısı 150 adettir.



Şekil 3.17: Yaşlandırılmış kompozit numunelere çekme testinin uygulanması.

Çekme testleri sonunda test cihazından alınan maksimum kuvvet, maksimum gerilme, maksimum uzama ve anlık kuvvet uzama verileri Trapezium X (1.5.1) programı aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır. Elde edilen bu veriler aşağıda gösterilen (3.16), (3.17) ve (3.18) denklemlerinde kullanılarak kompozit numunelerin gerinim (ε), çekme gerilmesi (σ_{ζ}), ve elastisite modülü (E_{ζ}) değerleri hesaplanmıştır.

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.16)$$

(3.16) denkleminde gösterilen;

ε : Gerinim (şekil değişimi),

l_0 : Numunenin ilk boyu (mm),

l : Numunenin uzamadan sonraki boyu (mm),

Δl : numunedeki uzama miktarı (mm) değerini ifade etmektedir.

$$\sigma_{\zeta} = \frac{P}{A_0} \quad (3.17)$$

(3.17) denkleminde gösterilen;

σ_{ζ} : Çekme gerilmesi (MPa),

P : Çekme kuvveti (N),

A_0 : Numune orta bölgesi ilk kesit alanı (mm²)

$$E_{\zeta} = \frac{\sigma_{\zeta}}{\varepsilon} \quad (3.18)$$

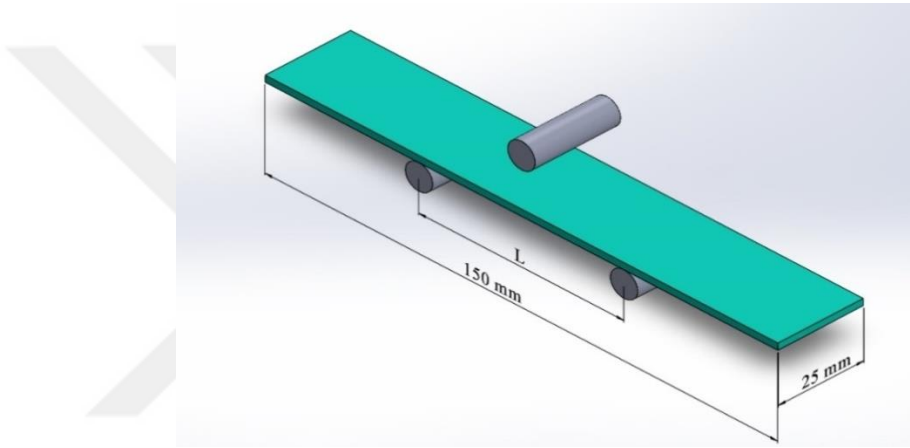
(3.18) denkleminde gösterilen;

E_{ζ} : Elastisite (young) modülü (MPa) olarak ifade edilmektedir.

3.8.2 Eğilme testi

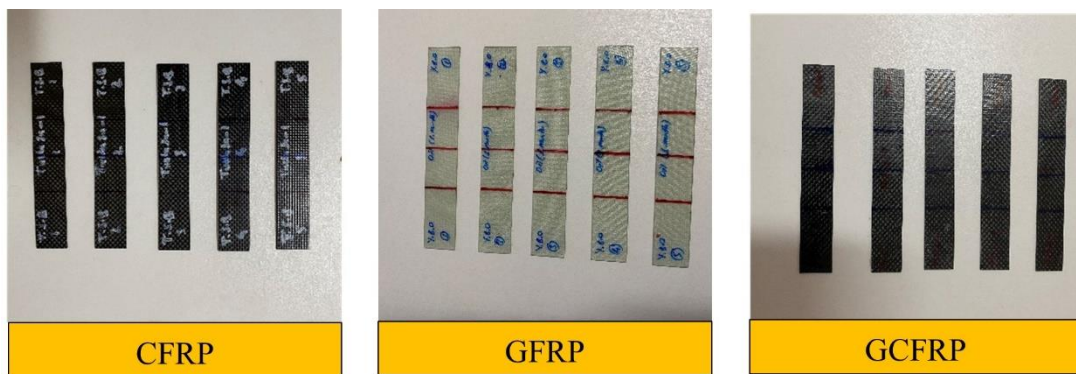
Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) yöntemi ile üretimi gerçekleştirilen GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin üç nokta eğilme testleri İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan 10 kN kapasiteli Shimadzu AGS- X test cihazı marka test cihazında gerçekleştirilmiştir. Kompozit numunelerin boyutları çizicili yatar daire makinesi tarafından kesilerek ASTM D7264 [88] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.18’de gösterilen üç nokta eğilme testi uygulanan kompozit numunelerin geometrisi numunenin genişliği 25 mm, uzunluğu 150 mm olacak şekilde kesilerek hazırlanmıştır. ASTM D7264 standardına göre üç nokta eğme düzeneğindeki destekler arası yani spanlar arası mesafe (L) kompozit numunenin kalınlığına (d)’ye göre hesaplanır. Destek mesafesinin (L)’nin kompozitin kalınlığına (d) oranı 32:1 olarak alınmıştır. Kompozitlerin kalınlık değerleri absorpsiyon nedeniyle değiştiği için GFRP için 1.90 ± 0.05 mm, CFRP için 1.80 ± 0.05 mm, GCFRP için 1.85 ± 0.05 mm olmaktadır. Spanlar arası mesafe her kompozit tipi için ayrı ayrı hesaplanıp üç nokta eğilme testleri yapılmıştır. Bu çalışmadaki tüm ortam koşulları ve parametrelerine göre belirlenmiş üç nokta eğilme deneyi için test edilen kompozit numune sayısı 150 adettir (Çizelge 3.5).



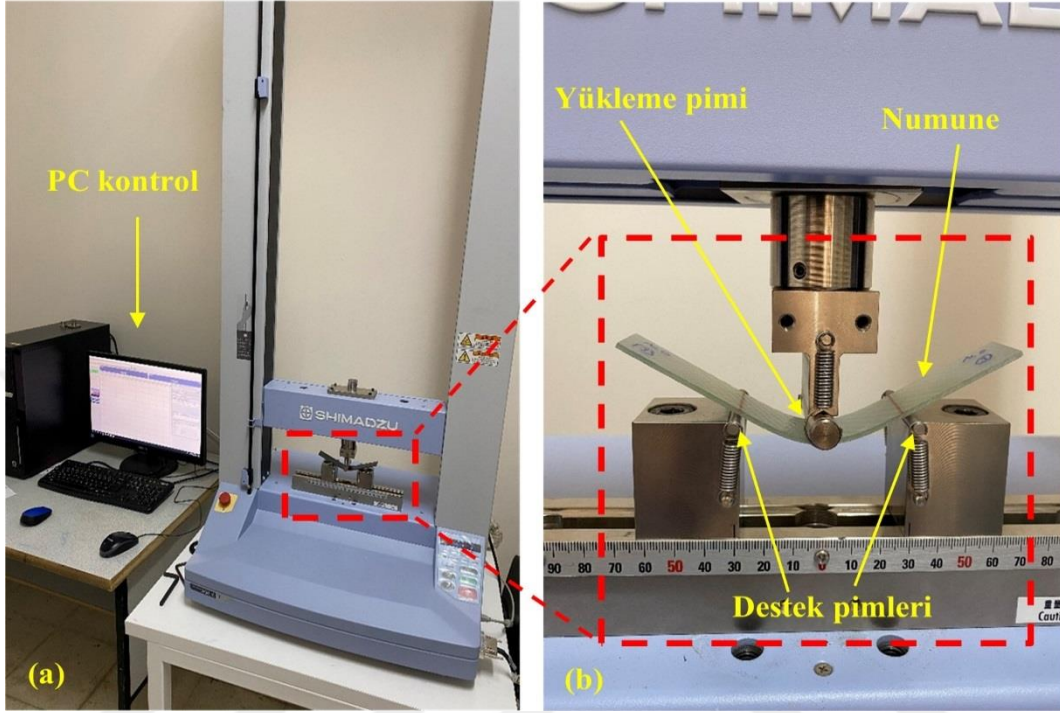
Şekil 3.18: ASTM D7264 standardına göre hazırlanmış üç nokta eğilme test düzeneği ve geometrisi.

Yaşlandırma süresi sonunda yaşlandırma ortamlarından alınan kompozitlerin eğilme davranışlarını incelenmiştir. Belirlenen tüm ortam şartları ve deney parametresi için 5’er adet tekrar deneyi yapılmıştır (Şekil 3.19). Eğilme testleri 1 mm/dk eğilme hızında gerçekleştirilmiştir.

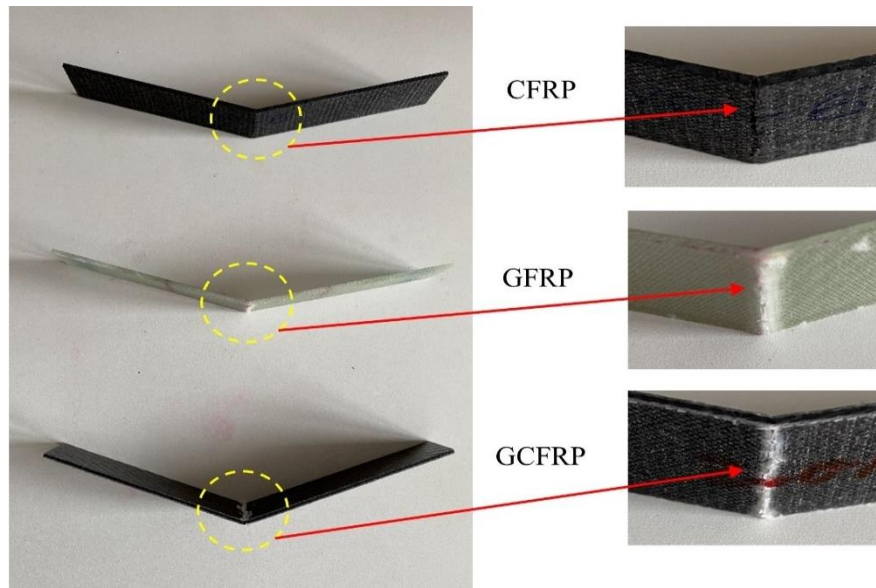


Şekil 3.19: CFRP, GFRP ve GCFRP kompozitlerin eğilme test numuneleri.

Yaşlandırılmış kompozit numuneler eğilme testi cihazı üzerinde kurulu olan üç nokta eğilme test düzeneğine yerleştirilerek kompozitlerin eğme mukavemeti davranışları incelenmiştir. (Şekil 3.20). GFRP, CFRP ve GCFRP kompozit malzemelerin testler sonucu oluşan hasarlar Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.20: Eğilme test düzeneği: (a) Shimadzu AGS- X test cihazı, (b) Eğilme testinin yapılması.



Şekil 3.21: CFRP, GFRP ve GCFRP kompozitlerin eğilme testi sonrası oluşan hasar geometrileri.

Eğilme testleri sonunda test cihazından alınan maksimum kuvvet, maksimum gerilme, maksimum uzama ve anlık kuvvet uzama verileri Trapezium X (1.5.1) programı aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır. Elde edilen bu veriler aşağıda sırasıyla gösterilen (3.19), (3.20) ve (3.21) denklemleri kullanılarak kompozit numunelerin maksimum eğilme gerilmesi ($\sigma_{eğ}$), maksimum şekil değiştirme (ε) ve eğilme modülü ($E_{eğ}$) değerleri hesaplanmıştır [88].

$$\sigma_{eğ} = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.19)$$

(3.19) denkleminde gösterilen;

P : Yük-sehim eğrisinin herhangi bir noktasındaki kuvvet (N),

L : Destekler (spanlar) arası mesafe (mm),

b : Kompozit numunenin genişliği (mm),

d : Kompozit numunenin kalınlığını (mm) ifade etmektedir.

$$\varepsilon = \frac{6Dd}{L^2} \quad (3.20)$$

(3.20) denkleminde gösterilen;

ε : Maximum şekil değiştirme (mm/mm),

D : Kompozit maksimum sehim (mm),

d : Kompozit numunenin kalınlığını (mm) ifade etmektedir.

$$E_{eğ} = \frac{L^3m}{4bd^3} \quad (3.21)$$

(3.21) denkleminde gösterilen;

$E_{eğ}$: Eğilme modülü (MPa),

L : Destekler (spanlar) arası mesafe (mm),

D : Kompozit numunenin maksimum sehim (mm),

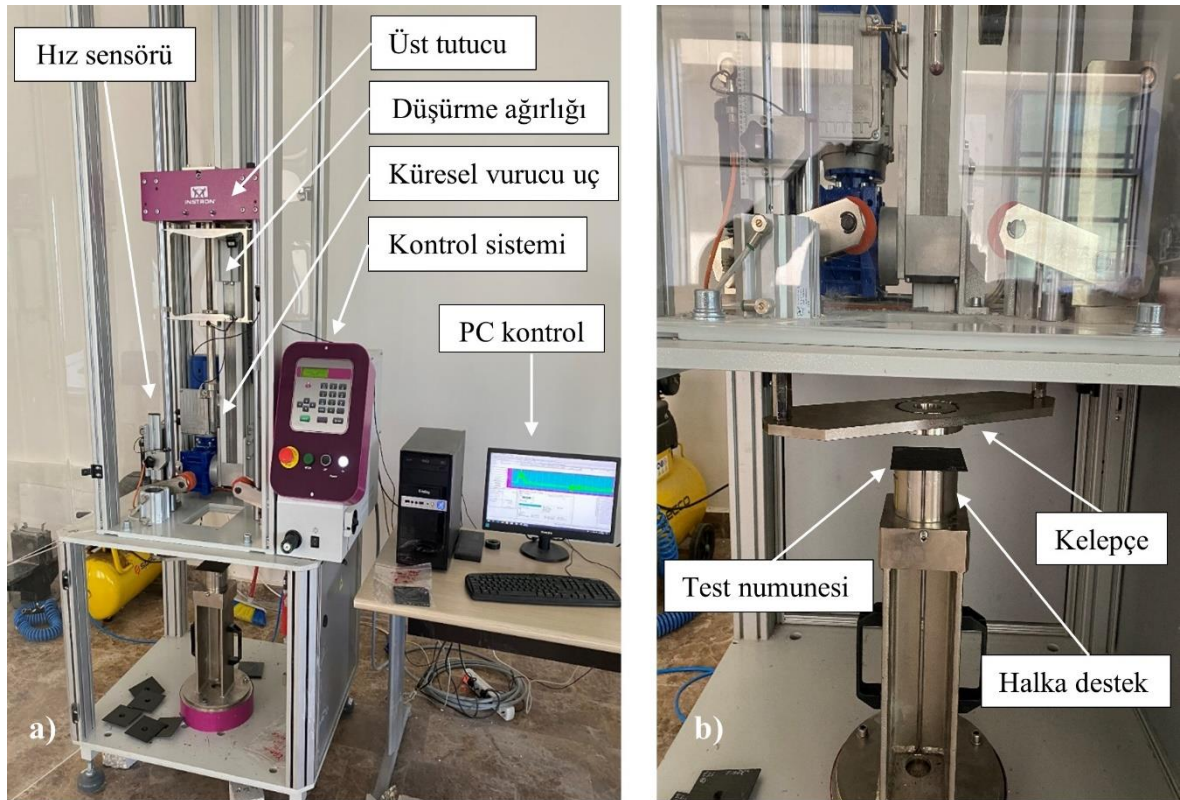
b : Kompozit numunenin genişliği (mm)

d : Kompozit numunenin kalınlığı (mm)

m : Yük-sehim eğrisine düzgün doğrudan itibaren çizilen teğetin eğimini (N/mm) ifade etmektedir.

3.8.3 Düşük hızlı darbe testi

Düşük hızlı darbe testi; ağırlık düşürme prensibine göre çalışan ve 10m/sn'nin altındaki darbe hızlarında yapılan test yöntemi olarak tanımlanır. Bu testin yapıldığı cihazdaki ağırlık ve darbe vurucu hızının belirlenmesiyle farklı darbe enerjilerinde testler yapılarak temas kuvveti, deplasman (çökme) ve absorbe edilen enerji değerleri elde edilir. Düşük hızlı darbe testleri, Adıyaman Üniversitesi Makine Mühendisliği Mekanik laboratuvarlarında INSTRON 9350 ağırlık düşürme test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.22).

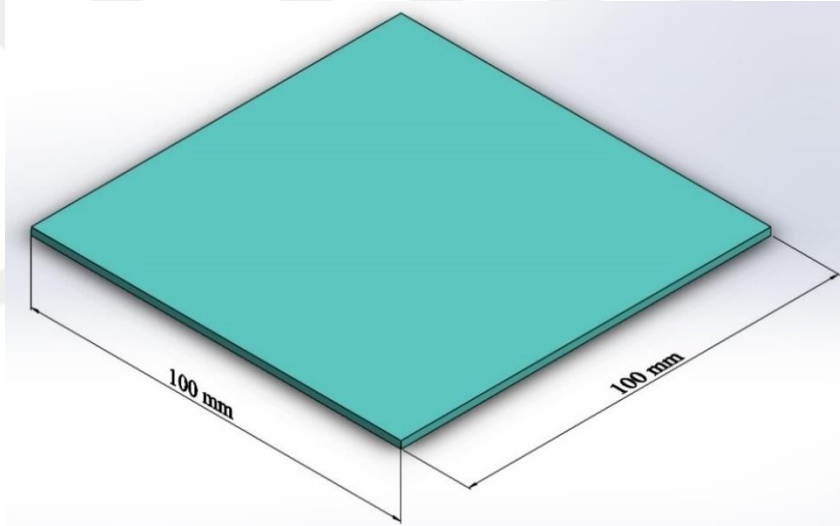


Şekil 3.22: INSTRON 9350 ağırlık düşürme test cihazı : a) Düşük hızlı darbe sistemi , b) Kelepçeleme sistemi.

GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin yaşlandırma ortamlarından alındıktan sonra düşük hızlı darbe testleri yapılmıştır. Testler için 20 mm çapında ve $m=1.2$ kg kütleyle sahip olan yarı küresel çarpma tertibatı seçilmiştir. Vurucu kısmı tutan taşıyıcının ağırlığı ise 4.3 kg değerindedir. Böylelikle numunelere vurulan kütle için toplam kombine yük değeri 5.5 kg değerindedir. Bu cihazda çarpma tertibatının ilk yüksekliğini değiştirilerek farklı darbe enerjileri üretilmiştir. Numunelerin sabitlendiği alt destek kısmının çapı 76 mm'dir. Numuneler bu destek noktası üzerine konularak üzerine gelen kelepçe ile sıkıştırılarak

darbe testleri yapılmıştır (Şekil 3.22). Cihazdaki veriler, darbe kuvveti/hızı ve zaman ilişkileri yük hücresi tarafından kaydedilir.

Yük hücresi tarafından alınan verilerden zaman ve yer değiştirme arasındaki ilişkiler veri toplama sistemi ile elde edilmiş olur. Elde edilen tüm veriler bilgisayara Trapezium aktararak programı aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır. Düşük hızlı darbe testi uygulanan cam epoksi kompozit (GFRP) numunenin kalınlığı 1.90 ± 0.05 mm, karbon epoksi kompozitin (CFRP) kalınlığı 1.80 ± 0.05 mm, cam-karbon/epoksi GCFRP hibrit epoksi kompozitlerin kalınlığı 1.85 ± 0.05 mm değerlerindedir. Kompozit numuneler ASTM D7136/D7136 M standardına göre 100 x100 mm numune boyutlarında kesilerek düşük hızlı darbe deneyleri için hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.23). Bu çalışmadaki tüm ortam koşulları ve parametrelerine göre belirlenmiş düşük hızlı darbe testi deneyi için test edilen kompozit numune sayısı 195 adettir.



Şekil 3.23: ASTM D7136/D7136 M standardına göre hazırlanmış düşük hızlı darbe test numune geometrisi.

Kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe testi sırasında verdiği tepkiler bileşenlerinin farklı davranışlar göstermesi nedeniyle çok karmaşıktır. Düşük hızlı darbe testi esnasında; geri tepme, penetrasyon ve perforasyon olmak üzere üç tür tepki meydana gelebilir. Bu tepkileri tahmin etmek için enerji profil diyagramı kullanılır.

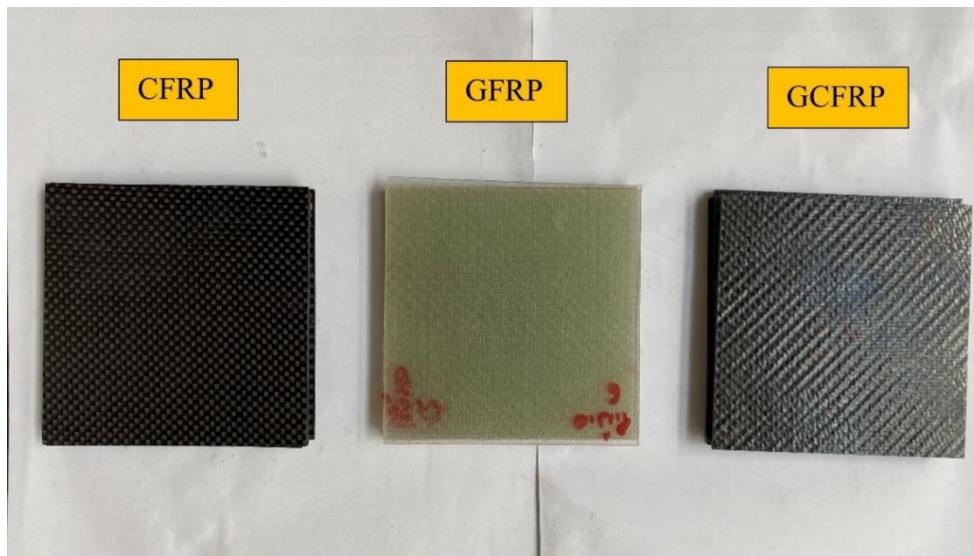
Geri tepme tepkisi; çarpma tertibatı enerjisinin test numunesine nüfuz etmek için yeterli darbe enerjisi olmadığında geri tepme meydana gelir. Bu durumda, vurucu (impactor) yüzey teması esnasında darbe enerjisinin bir kısmını numuneye vererek test numunesine zarar verir. Geri tepme olayı gerçekleştiğinde çarpma tertibatının hızı sıfır olur ve hareket yönü değişir.

Penetrasyon tepkisi; çarpma tertibat enerjisinin artırılmasına bağlı olarak vurucu kısım test numunesine temas ettikten sonra numunenin içine nüfuz ederek saplanıp kalabilir. Bu durum penetrasyon tepkisi olarak tanımlanır. Penetrasyon esnasında vurucu uç tertibatı kompozit numunenin yüzeyine temas ettikten sonra sahip olduğu toplam enerjiyi test edilen numuneye verir, ardından vurucu ucun hızı yavaşlayarak sıfırlanır ve numuneye saplanıp takılı kalır.

Perforasyon; delinme enerjisinden daha yüksek enerji seviyesine sahip vurucunun numuneye temas etmesiyle numunenin tamamen delinmesi olayı olarak tanımlanır. Perforasyon esnasında darbe enerjisinin artırılması meydana gelen hasar miktarını çok fazla değiştirmedikinden yutulan enerji miktarı hemen hemen sabit kalmaktadır.

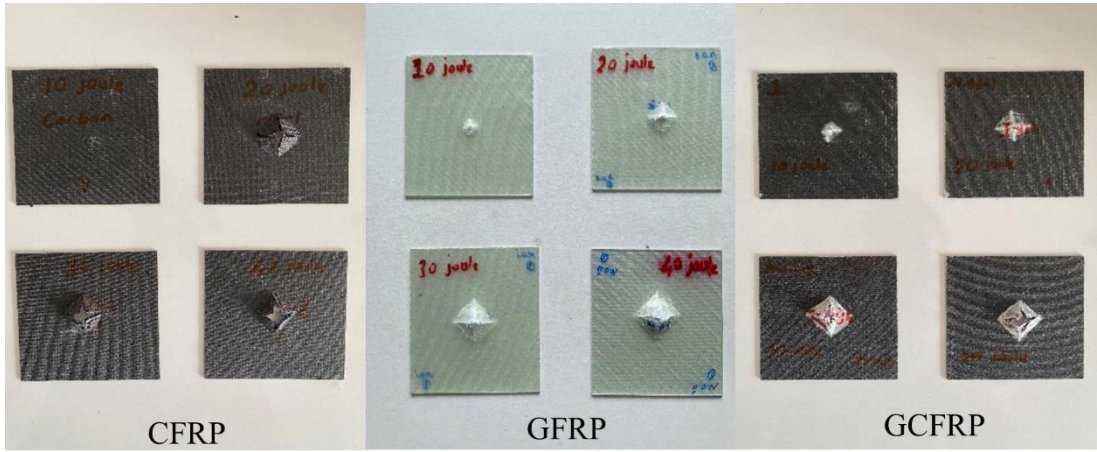
Çalışmada test edilen GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin penetrasyon ve perforasyon enerji değerlerini tahmin etmek için 10 J, 20 J, 30 J ve 40 J'lük 4 farklı darbe enerjisi uygulanmıştır. Uygulanan darbe enerjileri sayesinde elde edilen verilere göre eş enerji diyagramları sayesinde kompozit yapıya uygulanan darbe enerjisinin malzemeyle nüfuziyet enerji aralığı tespit edilmiştir.

Her bir darbe enerji seviyesinde uygulanan test için beş adet deney tekrarı yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Darbe hızları sırasıyla 1.907 m/sn, 2.697 m/sn, 3.303 m/sn, 3.814 m/sn ve düşme yükseklikleri 185 mm, 371 mm, 556 mm, 742 mm'dir. Tüm deney ortamı ve deney parametresine ait deney için 5'er numune tekrar deneyleri yapılarak sonuçlar yorumlanmıştır. Şekil 3.24'de düşük hızlı darbe testi için hazırlanmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin darbe test numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 3.24: CFRP, GFRP ve GCFRP kompozitlerin düşük hızlı darbe test numuneleri.

Şekil 3.25’de GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin penetrasyon ve perforasyon enerji değerlerini tahmin etmek için 10 J, 20J, 30 J ve 40 J’lük 4 farklı darbe enerjisi uygulanarak kompozitlerin delinme enerjisi tespit edilmiştir. Daha sonra belirlenen delinme enerjisine göre deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamında yaşlandırma yapılmış CFRP, GFRP ve GCFRP kompozitlere düşük hızlı darbe testleri yapılarak sonuçlar yorumlanmıştır. Şekil 3.26’de düşük hızlı darbe testi sonrası oluşan hasar tiplerinden olan perforasyon yani delinme enerjisini geçtikten sonra oluşan hasar gösterilmektedir. Kompozit numunelere uygulanan darbe enerji değerleri; numune yüzeylerinde çöküntü, fiber çatlağı, tek şekil çatlağı, çapraz şekilli çatlak, yarıma, artık deformasyon ve delaminasyon gibi oluşan hasar tipleri oluşturur.



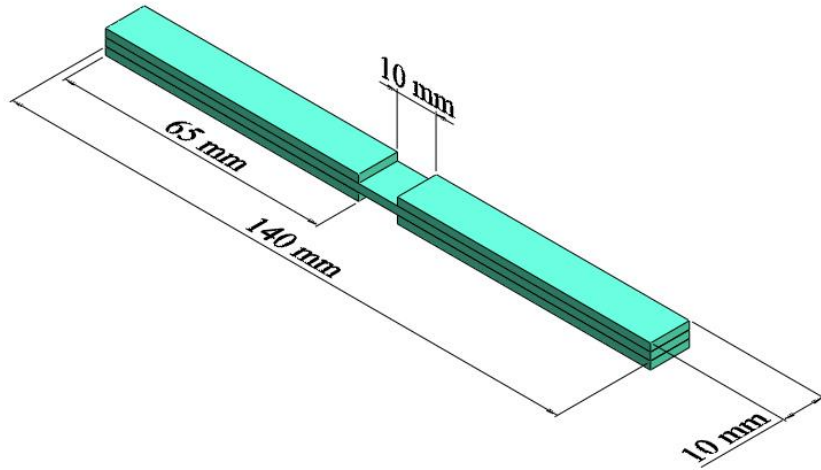
Şekil 3.25: Dört farklı darbe enerjisine göre test edilmiş kompozitlerin delinme enerjisinin belirlenmesi.



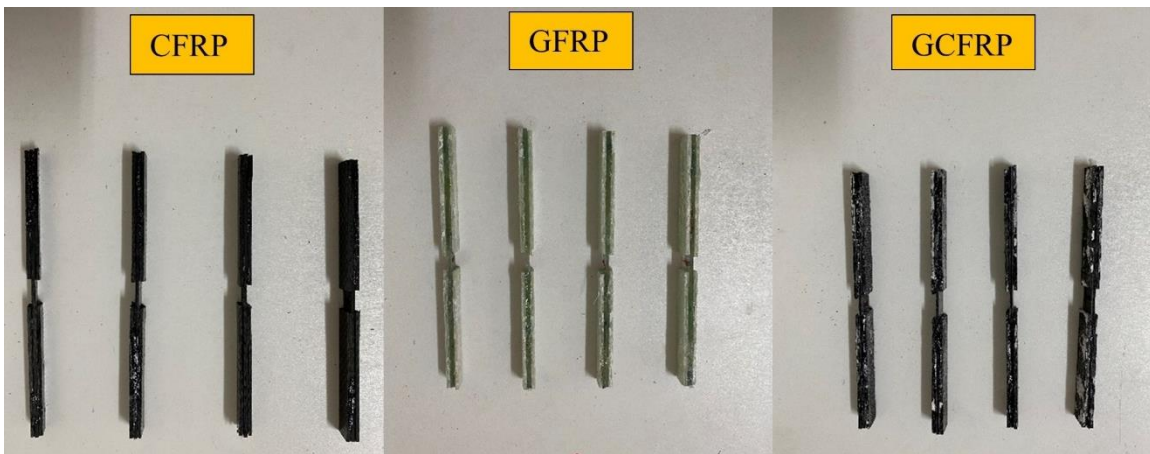
Şekil 3.26: Düşük hızlı darbe testi cihazında test edilmiş numunede oluşan delinme hasarı.

3.8.4 Basma testi

VARTM ile üretilen GFRP, CFRP ve GCFRP kompozit malzemeler deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamında yaşlandırıldıktan sonra aksel basma davranışlarını incelemek için basma testleri yapılmıştır. Yaşlandırma yapılmış kompozitlerin basma testleri davranışları İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuvarında yapılmıştır. Bu laboratuvarında Shimadzu AGS-X cihazı kullanılarak basma testleri gerçekleştirilmiştir. ASTM 3410-75 test standartlarına göre hazırlanan numunelere basma testleri uygulanmıştır. (Şekil 3.27). Çizicili yatar daire makinesi cihazında kesilerek boyutlandırılan basma test numunelerin boyu (L) 140 mm ve yükleme altında bası çeneleri tarafından temas yüzeylerinin hasar görmemesi için dış yüzeylere yapıştırılan tablaların uzunluğu 65 mm, numune genişliği (W) 10 mm'dir. Basma testi yapılan CFRP, GFRP ve GCFRP numuneler Şekil 3.28'de gösterilmiştir.



Şekil 3.27: Basma test numune geometrisi.



Şekil 3.28: Deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış basma test numuneleri.

Bu çalışmadaki tüm ortam koşulları ve parametrelerine göre belirlenmiş basma testi deneyi için test edilen kompozit numune sayısı 150 adettir (Çizelge 3.5). Deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamında yaşlandırma yapılmış kompozitlerin basma dayanımlarını değerlendirmek için yük altındaki basma gerilmeleri hesaplanmıştır. Test edilen kompozitlerden oluşturulan tabakalar dokuma tipi kumaş olduğu için fiber yönündeki gerilme X_B ve fibere dik doğrultudaki basma gerilme değeri Y_B değeri eşittir. Testler sonucu cihazdan alınan yük-deplasman verileriyle basma gerilme değerleri (3.22) denkleminde göre hesaplanarak yorumlanmıştır.

$$\sigma_B = \frac{P_{max}}{A} \quad (3.22)$$

(3.22) denkleminde gösterilen;

P_{max} : Maksimum basma yükü (N),

A : Basma kesiti yüzey alanı (mm^2),

σ_B : Fiber doğrultusundaki basma gerilmesi (MPa) değerini ifade etmektedir.

CFRP, GCFRP ve GCFRP kompozit numuneler üzerinde basma testi yapıldığında elde edilen sonuçların, düzgün deformasyona sahip liflerin elastik bölge sınırından sonra bir bükülme bandı oluşturarak kayma hasarına neden olduğu gözlemlenmiştir. Basma testi esnasında kompozit malzeme bir bükülme bandı oluşturur ve kompozitler kesme hasarı sonucu kırılarak kopmuşlardır. Basma çenesi altındaki aparatın aksenal basma yükü altında kırılarak kopmuşlardır. Çalışmadaki hasar görüntülerine bakıldığında literatürü destekleyen benzer bir hasar durumunun meydana geldiği, kompozit numunelerin kesme hasarı sonucu bükülerek kırıldığı tespit edilmiştir (Şekil 3.29).



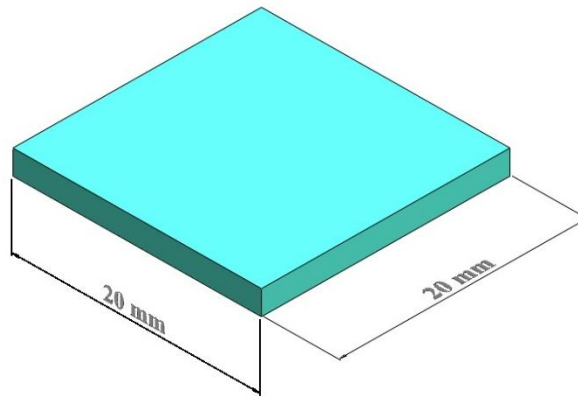
Şekil 3.29: CFRP, GCFRP ve GCFRP kompozit numunelerin basma testlerinin yapılması.

3.9 Tribolojik Testler

Tüm ortam koşulları ve bekletilme sürelerine göre yaşlandırma yapılmış CFRP ve GFRP kompozitlerin tribolojik davranışlarını incelemek için kuru kayma aşınma (adhesive) testleri yapılmıştır. GCFRP hibrit kompozitlerin tribolojik testleri incelenmemiştir. Bunun sebebi GFRP kompozit ile GCFRP kompozit yüzeylerinin üst ve alt yüzeylerinin aynı yani cam elyaf katmanlarından oluşmuş olmasıdır.

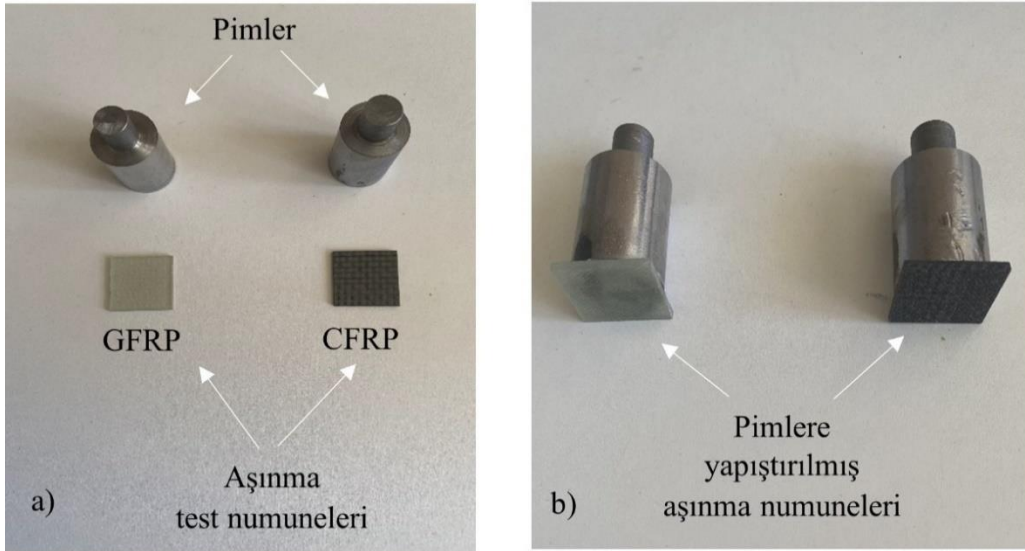
3.9.1 Aşınma test numunelerinin hazırlanması

VARTM ile üretilen CFRP ve GFRP kompozitlerin Bölüm 3.5'teki Çizelge 3.5'de gösterilen test parametrelerine göre kuru kayma sürtünme (aşınma) testlerinin yapılması için aşınma test numuneleri hazırlanmıştır. Şekil 3.30'da gösterilen aşınma test geometrisi ASTM G99-17 test standardına göre hazırlanmıştır. Aşınma test numuneleri çizicili yatar daire makinesi tarafından kesilerek hazırlanmıştır. Hazırlanan aşınma test numuneleri Şekil 3.31'de gösterilmiştir.



Şekil 3.30: Kuru kayma aşınma test numune geometrisi.

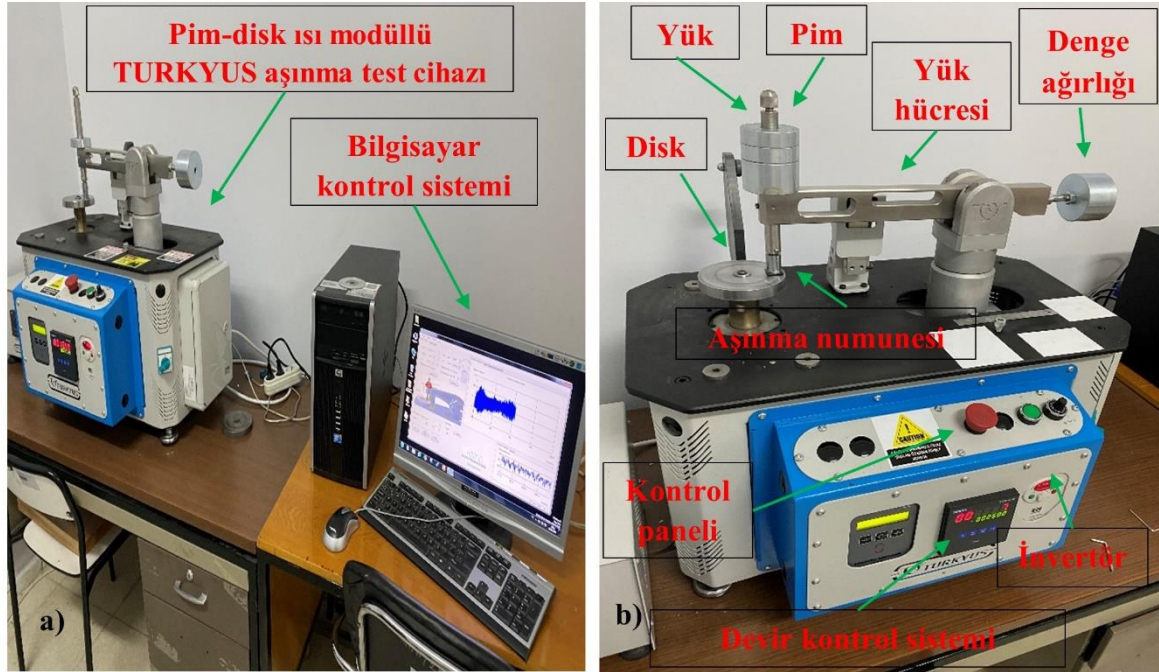
Kuru kayma aşınma testi için 20×20 mm kare şeklinde kesilen GFRP ve CFRP kompozit numuneleri, aşınma test cihazına bağlayabilmek için Ø 15 çaplı düşük karbonlu çelik çubuktan torna tezgahında 12 mm boylarında pimler kesilmiş ve kompozit aşınma test numuneleri bu pimlere BETA Kimya tarafından üretilen Mitre Apel hızlı yapıştırıcı seti ile yapıştırılmıştır. Aşınma test numuneleri pimlere yapıştırılmadan önce pimlerin yüzeyleri asetonla temizlenmiştir. Bu sayede aşınma numunesinin pim yüzeyine hassas ve sağlam şekilde yapışması sağlanmıştır. Şekil 3.31'de aşınma testi numunesinin pimle yapıştırılarak aşınma testine hazırlanması işlemi gösterilmektedir.



Şekil 3.31: Kuru kayma testi için numunelerin hazırlanması: a) Kompozit aşınma test numuneleri ve pimler, b) Aşınma test numunelerinin pimlere yapıştırılması.

3.9.2 Kuru kayma aşınma testi

Normal oda koşulları ve deniz suyu, motor yağı, dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış cam/epoksi (GFRP) ve karbon/epoksi (CFRP) kompozitlerin kuru kayma aşınma (sürtünme) test davranışları yapılmıştır. Kompozitlerin kuru kayma aşınma testleri İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuvarında Şekil 3.32’de gösterilen pim-disk ısı modüllü Turkyus POD&HT&WT marka test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.32: Aşınma test düzeneği: a) Turkyus aşınma test cihazı b) Pim-disk aşınma cihazı ekipmanları.

Aşınma test numunelerini aşındıran karşı yüzey olarak $\varnothing 110 \times 16$ mm boyutlarında ve 59 HRC yüzey sertliğine sahip AISI D2 takım çeliği malzemesinde yapılmış disk kullanılmıştır (Şekil 3.33). Kompozitlerin tribolojik davranışlarının belirlenmesi için yapılan aşınma testleri ortam sıcaklığı 23 °C laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.33: AISI D2 takım çeliğinden yapılmış disk.

Testlere başlamadan önce karşı yüzey olarak kullanılan AISI D2 takım çelik diskin yüzey pürüzlülüğü Time TR 3200 pürüzlülük ölçer ile numune uzunluğu 0.8 mm, pürüzlülük değerlendirme uzunluğu 3 mm olacak şekilde ortalama yüzey pürüzlülük değeri ölçülmüştür. Tüm aşınma testleri tamamlandıktan sonra disk yüzeyindeki ortalama yüzey pürüzlülük değeri de ölçülerek kıyaslanmıştır. Disk yüzey pürüzlülük ölçüm işlemi Şekil 3.34’de gösterilmiştir. Aşınma öncesi disk yüzeyinin ortalama pürüzlülük değeri 0.183 hesaplanmış, aşınma sonrası disk yüzeyinin ortalama pürüzlülük değeri 0.753 ölçülmüştür.



Şekil 3.34: Aşınmış disk yüzeyinin ortalama pürüzlülük değerinin belirlenmesi.

Kuru kayma aşınma testlerine başlamadan önce deney parametreleri belirlendikten sonra bilgisayardaki Turkeyus cihaz programına girilerek değerler hesaplanmıştır. İlk olarak kuru kayma deney parametrelerinden kayma hızının 2 m/s olmasına karar verilmiştir. Daha sonrasında iz çapının 80 mm olması karar verilip cihazın denge kolu bu mesafeye göre ayarlanmış ve kalibrasyonu yapılmıştır. Aşınma test cihazının 80 mm iz çapında 2 m/s kayma hızına ulaşılması için aşındırıcı diskin kaç d/dk hızla dönmesi gerektiğinin hesabı denklem (3.23) ile bulunmuştur.

$$n = \frac{6000 V_c}{d \pi} \quad (3.23)$$

(3.23) denkleminde gösterilen;

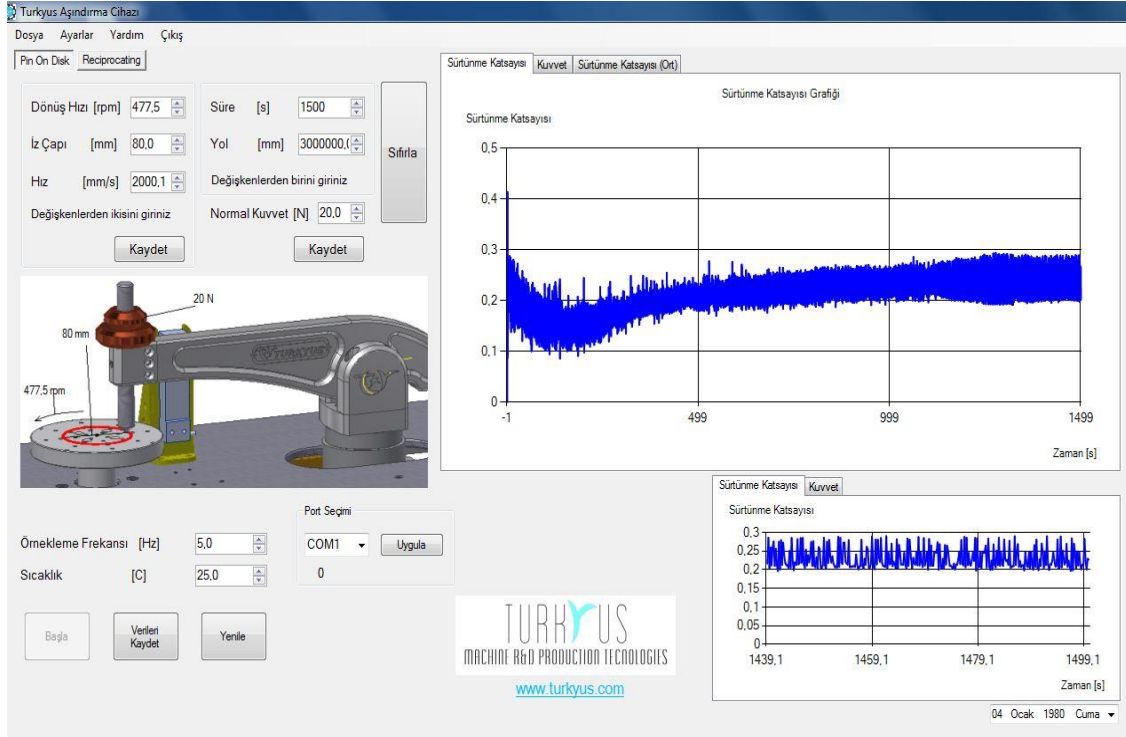
n: 1 dk'daki devir sayısı (d/dk),

V_c : Dönme hızı (m/s),

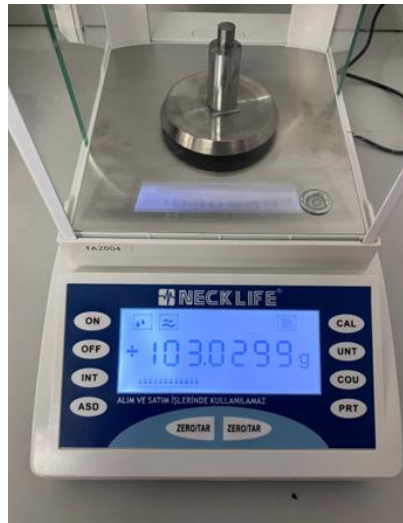
d: İz çapı (mm) olarak ifade edilmektedir.

(3.23) denklemine göre yapılan hesaplamalar sonucunda diskin $n=477,5$ d/dk olarak dönmesi hesaplanmıştır. Turkeyus cihazında diskin kenarına reflektör bant yapıştırılarak bu değeri invertörün hangi frekansta verdiğinin bulunması için DT-2236C lazer takometre kullanılarak diskin devir hızı ölçülmüş ve invertörün frekansı 34.3 Hz olarak tespit edilmiştir. Aşınma testleri öncesi yapılan ön değerlendirmeye göre aşınma testindeki kayma mesafesinin 3 km yapılmasına karar verilmiştir. 3 km seçilen kayma mesafesinde hesaplanan devir hesabına göre testler 25 dk boyunca sürdürülmüştür. Daha sonra kompozit numune Turkeyus aşınma testi cihazına yerleştirilmiş ve su terazisi yardımıyla kuvvet kolu yatayda dengeli hale getirilmiştir. Şekil 3.35'de hesaplanarak belirlenen değerler Turkeyus programına girildikten sonra aşınma testlerine başlanmıştır. Örnekleme frekansı 5 Hz olarak ayarlanmış ve saniyede 5 veri alınması sağlanmıştır. Çalışmada belirlenen her bir deney parametresine ait aşınma testi için hızın ve kuru kayma mesafesinin sabit tutulup, uygulanan yük değerinin sırasıyla 10 (N),15(N) ve 20 (N) yük değerleri uygulanarak testler yapılmıştır. Turkeyus cihazında aşınmakta olan kompozit numuneler ile disk yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısı verileri alınarak bilgisayara aktarılmıştır.

Deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamında sırasıyla 30,60 ve 90 gün boyunca yaşlandırma yapılmış GFRP ve CFRP aşınma test numunelerinin tribolojik davranışları bu test düzeneğine göre yapılarak sonuçlar yorumlanmıştır. Bölüm 3.4'deki Çizelge 3.5'de gösterilen parametrelere göre yapılan kuru kayma aşınma test sayısı 60 adettir.



Şekil 3.35: Aşınma testi için belirlenen ve hesaplanan verilerin Turkeyus cihazına girilmesi. GFRP ve CFRP kompozitlerin ortam tipi ve yaşlandırma süresine göre Çizelge 3.5’de gösterilen toplamda 8 parametreye göre, her parametre için tek kayma hızı değerinde (2m/s), tek kayma mesafesi değerinde (3 km), 3 yük değeri (10 N, 15 N ve 20 N) yük değeri altında ASTM G 99-17 [98] standardına göre aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Her aşınma testinin başlangıcında ve testin bitiminde numuneler 0.1 mg hassasiyetine sahip Necklife FA 2004 hassas terazi yardımıyla kompozit aşınma numuneleri tartılmış ve farkları alınarak aşınan kütle hesabı yapılmıştır (Şekil 3.36).



Şekil 3.36: Aşınma test numunelerinin kütleli değişimlerinin tartılması.

Kompozit numunelerin aşınma dirençlerini kıyaslamak için güvenilir bir parametre olan spesifik aşınma oranları denklem (3.23) ile hesaplanmıştır.

$$W = \frac{\Delta_m}{\rho F_N S} \quad (3.24)$$

(3.23) denkleminde gösterilen;

W : Spesifik aşınma oranı (cm³/Nm),

Δ_m : Aşınan kütle (gr),

ρ : Yoğunluk (g/cm³),

F_N : Yük (N),

S : Kayma mesafesi (m) olarak ifade edilmektedir.

3.10 Morfolojik Analiz

VARTM ile üretilen cam/epoksi, karbon/epoksi ve cam-karbon/epoksi hibrit kompozitlerin çekme testi numunelerinden sonra kopan kompozit parçalarının malzeme içerisindeki morfolojik yapısındaki değişimler incelenmek istenmiştir. Bu kapsamda GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin normal ortam kompozitleri ve yapay deniz suyu ortamında 90 gün yaşlandırılmış kompozitlerin çekme testleri sonrası çekme hasarına uğrayan kesitlerinin iç yapısındaki değişimleri incelemek morfolojik analiz işlemi yapılmıştır. Kompozit numunelerin morfolojik analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi Laboratuvarında 20 kV kapasiteli Leo Evo 40 taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazında yapılmıştır (Şekil 3.37).



Şekil 3.37: Morfolojik analizlerin yapıldığı taramalı elektron mikroskop cihazı (SEM).

Morfolojik analizler için kompozit numuneler morfolojik analizler yapılmadan önce numunelerin ışık yansımalarını önlemek için gümüş kontakt işlemi uygulanmıştır. Ardından numunelerini iletkenliğini artırmak amacıyla kompozitlerin kesit yüzeylerine altın-paladyum (Au-Pd) tozları sürülerek analize hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan kompozit numuneler SEM cihazına yerleştirildikten sonra morfolojik analizleri yapılmıştır. Kompozit malzemelerin morfolojik analiz işlem aşamaları Şekil 3.38’de gösterilmiştir.



Şekil 3.38: Morfolojik analiz: a) Analiz numunelerinin hazırlanması, b) Gümüş kontakt işlemi, c) Altın-Paladyum kaplanması, d) Numunelerin SEM cihazına yerleştirilmesi.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1 VARTM ile Üretilen Tabakalı Kompozit Malzemelerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Tez çalışması için üç farklı fiber takviyeli polimer matrisli tabakalı kompozit malzeme üretilmiştir. 8 tabaka cam ve karbon elyafların epoksi matrisle takviye edilip VARTM metoduyla GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin; numune boyutları ve tabaka sayısı referans alınarak fiber hacim oranı, fiber kütle oranı, matris hacim oranı, matris kütle oranı ve yoğunluk değerleri hesaplanmıştır.

Cam/epoksi kompozit $[G]_8$, karbon/epoksi kompozit $[C]_8$, cam-karbon/epoksi hibrit $[G_2C_2]_8$ kompozitlerin fiziksel özelliklerini belirlemek için Bölüm 3.1’de gösterilmiş olan (3.1), (3.2), (3.3), (3.4), (3.5), (3.6) ve (3.7) denklemleri kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin fiziksel özellikleri.

	GFRP	CFRP	GCFRP
Fiber kütle oranı (W_f)	69.22	66.01	68.66
(Matris kütle oranı (W_m))	30.78	33.99	31.34
Fiber hacim oranı (V_f)	51.10	56.40	53.62
Matris hacim oranı (V_m)	48.90	43.6	46.38
Yoğunluk (gr/cm^3)	1.79	1.45	1.59

Vakum destekli transfer reçine transfer metoduyla üretilen cam/epoksi kompozit [G]₈, karbon/epoksi kompozit [C]₈, cam-karbon/epoksi hibrit kompozitlerin [G₂C₂]_s mekanik özellikleri Bölüm 3.7’de anlatılan çekme, basma ve kayma testleri yapıldıktan sonra tespit edilmiştir. GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin mekanik özellikleri; elastisite modülü, poisson oranı, kayma modülü, çekme mukavemeti, basma mukavemeti ve kayma mukavemeti (3.7), (3.8), (3.11), (3.12), (3.13) ve (3.14) denklemleri kullanılarak hesaplanmış olup Çizelge 4.2’de verilmiştir.

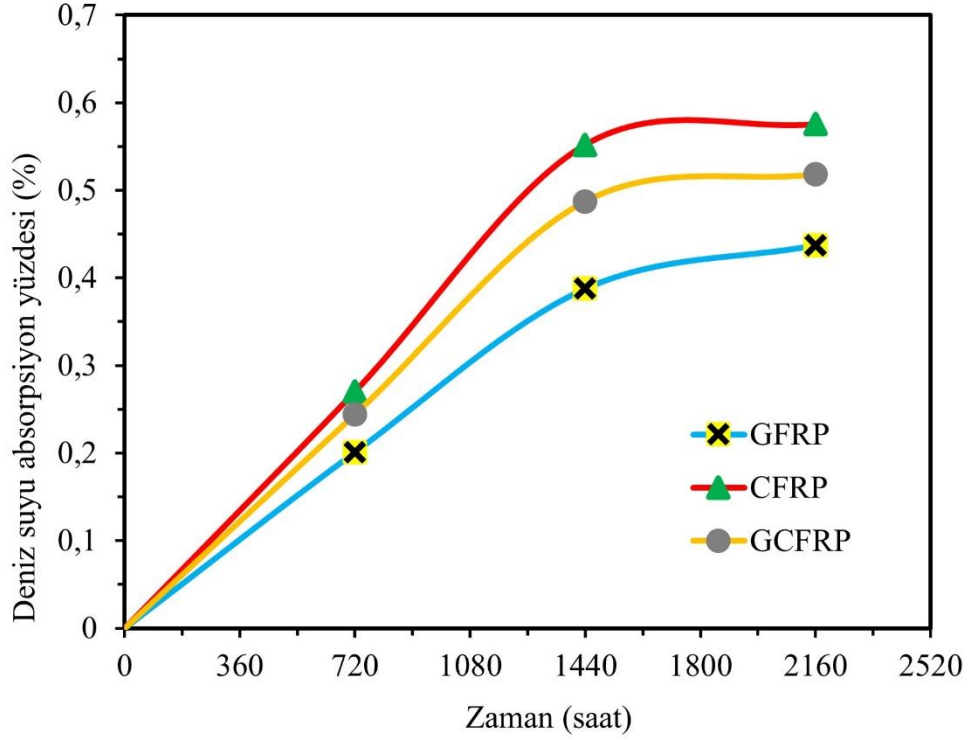
Çizelge 4.2: GFRP , CFRP ve GCFRP kompozitlerin mekanik özellikleri.

	E₁ (GPa)	E₂ (GPa)	ν_{12}	G₁₂ (GPa)	X_C, Y_C (MPa)	X_B, Y_B (MPa)	S (MPa)
GFRP	27.100	27.100	0.160	3.780	503.208	267.530	38.42
CFRP	61.630	61.630	0.083	4.480	804.308	288.010	50.56
GCFRP	40.280	40.280	0.038	4.080	624.795	278.870	42.55

4.2 Yaşlandırılmış Kompozitlerin Sıvı Absorpsiyon Yüzde Değişimleri

VARTM yöntemiyle üretilen GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitler üç farklı yaşlandırma ortamında üç farklı sürede yaşlandırılmıştır. Deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamında sırasıyla 30, 60 ve 90 gün sürelerinde yaşlandırma yapılmış kompozitlerin sıvı absorbe etme yüzdeleri incelenmiştir.

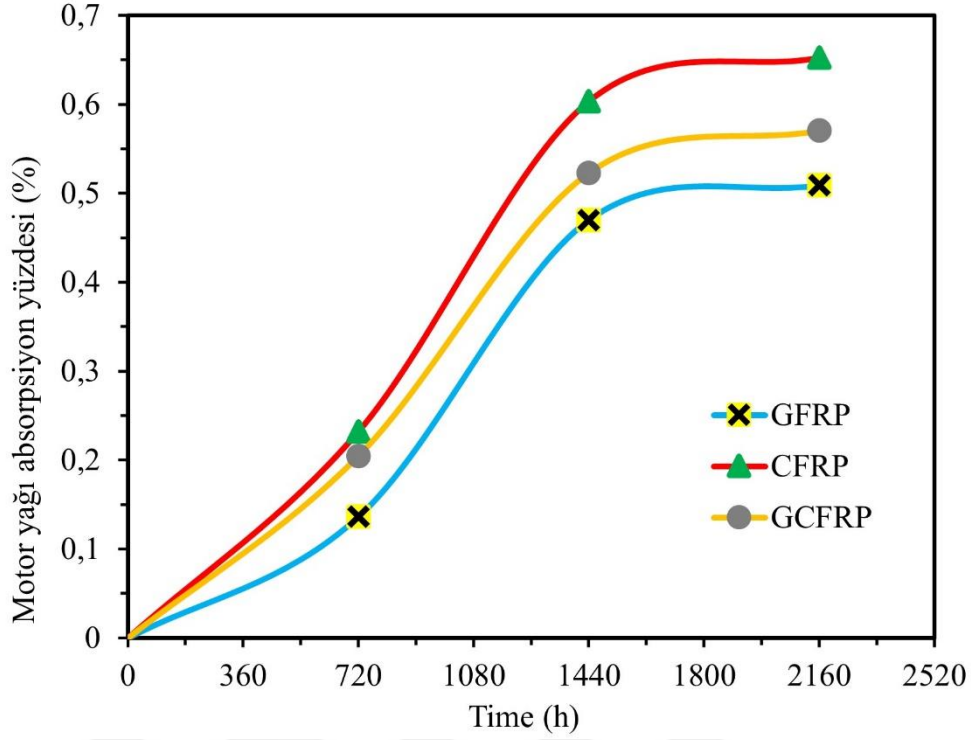
Ortamlardan alınan ağırlık değişim verileri Bölüm 3.7’de anlatılan ASTM D570-98 standardına göre denklem (3.7) kullanılarak absorpsiyon yüzdesel değişimleri hesaplanmıştır. Deniz suyu ortamında yaşlandırma yapılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin yaşlandırma süresine bağlı olarak değişen kütleli absorpsiyon yüzdesi-zaman grafiği Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin zamana bağlı absorpsiyon yüzdesi değişimi.

Şekil 4.1’de gösterildiği üzere; 30 gün (720 saat) boyunca yapay deniz suyunda yaşlandırılmış kompozit numunelerin absorpsiyon yüzdeleri sırasıyla; GFRP kompozitlerin %0.201, CFRP kompozitler için %0.270, GCFRP hibrit kompozitlerin %0.244 olarak hesaplanmıştır. 60 gün (1440 saat) boyunca deniz suyunda yaşlandırılmış kompozit numunelerin kütleli absorpsiyon yüzdeleri sırasıyla; GFRP kompozitler için %0.387, CFRP kompozitlerin %0.551 ve GCFRP hibrit kompozitler için %0.487 olarak hesaplanmıştır. 90 gün (2160 saat) boyunca deniz suyunda yaşlandırılmış kompozit numunelerin kütleli absorpsiyon yüzdeleri sırasıyla; GFRP kompozitler için %0.437, CFRP kompozitlerin %0.575 ve GCFRP hibrit kompozitler için %0.518 olarak hesaplanmıştır.

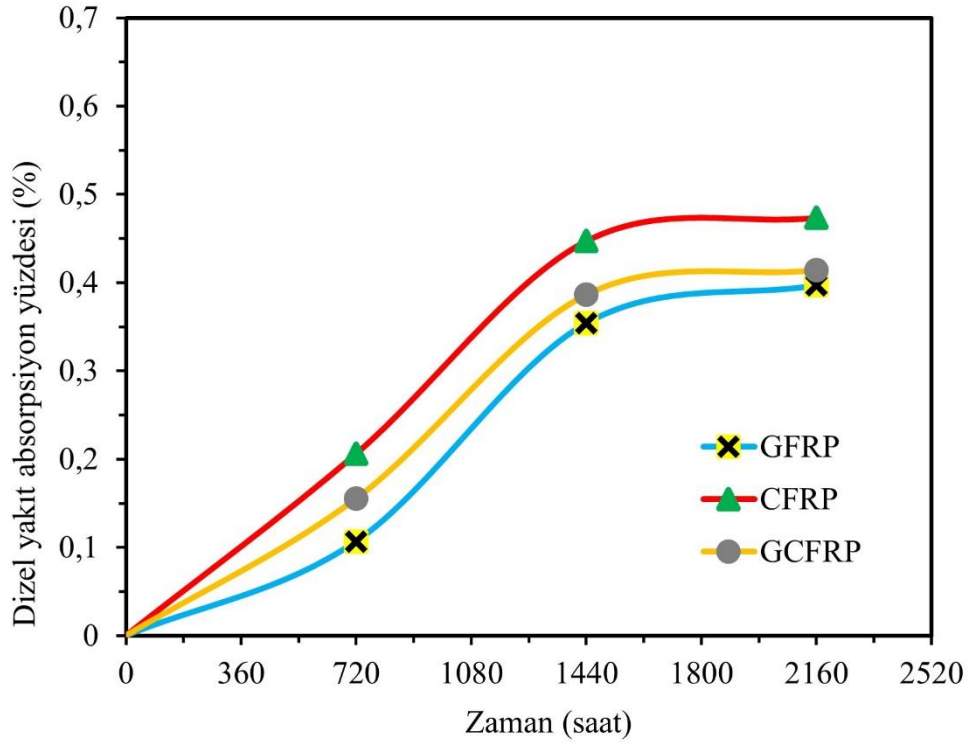
Motor yağı ortamında yaşlandırma yapılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin yaşlandırma süresine bağlı olarak değişen kütleli absorpsiyon yüzdesi-zaman grafiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin zamana bağlı absorpsiyon yüzdesi değişimi.

Şekil 4.2’de gösterildiği üzere, 720 saat boyunca motor yağı ortamında yaşlandırılmış kompozit numunelerin absorpsiyon yüzdeleri sırasıyla; GFRP kompozitler için %0.136, CFRP kompozitler için %0.232, GCFRP hibrit kompozitlerin %0.204 olarak hesaplanmıştır. 1440 saat boyunca motor yağında yaşlandırılmış kompozit numunelerin absorpsiyon yüzdeleri sırasıyla; GFRP kompozitler için %0.470, CFRP kompozitler için %0.603, GCFRP hibrit kompozitler için % 0.522 olarak hesaplanmıştır. 90 gün (2160 saat) boyunca motor yağı ortamında yaşlandırılmış kompozit numunelerin kütleli absorpsiyon yüzdeleri sırasıyla; GFRP kompozitler için %0.509, CFRP kompozitlerin %0.652 ve GCFRP hibrit kompozitler için %0.570 olarak hesaplanmıştır.

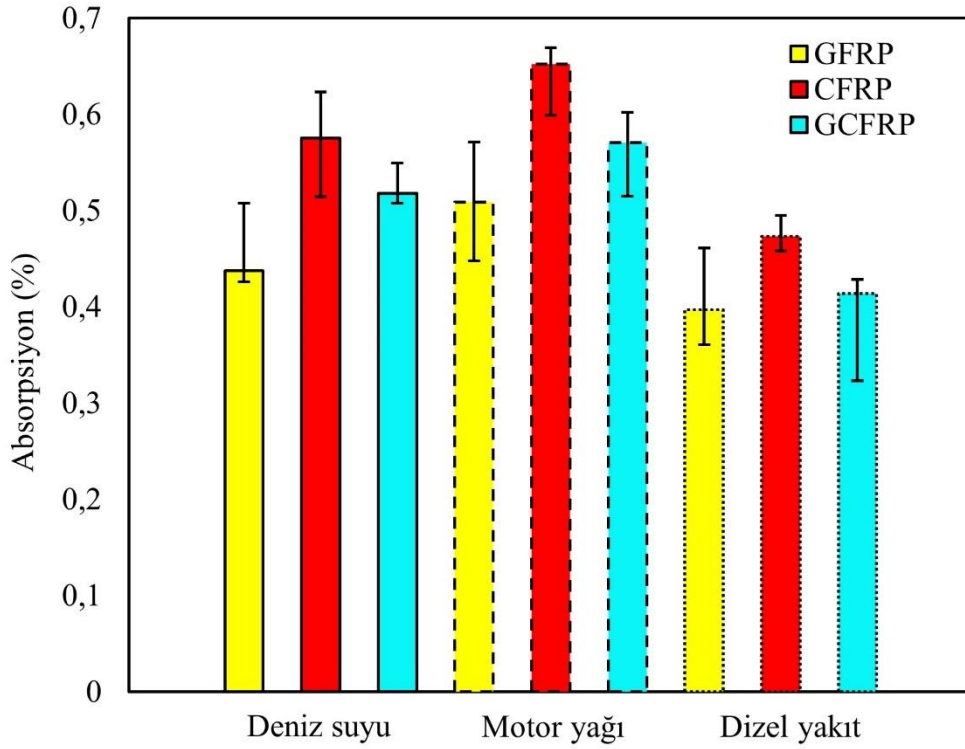
Dizel yakıt ortamında yaşlandırma yapılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin yaşlandırma süresine bağlı olarak değişen kütleli absorpsiyon yüzdesi-zaman grafiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin zamana bağlı absorpsiyon yüzdesi değişimi.

Şekil 4.3’de gösterildiği üzere, 720 saat boyunca dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış kompozit numunelerin absorpsiyon yüzdeleri sırasıyla; GFRP kompozitler için %0.106, CFRP kompozitler için %0.206, GCFRP hibrit kompozitler için %0.155 olarak hesaplanmıştır. 1440 saat boyunca motor yağı ortamında yaşlandırılmış kompozit numunelerin absorpsiyon yüzdeleri sırasıyla; GFRP kompozitler için %0.354, CFRP kompozitler için %0.446, GCFRP hibrit kompozitler için %0.386 olarak hesaplanmıştır. 90 gün (2160 saat) boyunca dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış kompozit numunelerin kütleli absorpsiyon yüzdeleri sırasıyla; GFRP kompozitler için %0.397, CFRP kompozitlerin %0.473 ve GCFRP hibrit kompozitler için %0.414 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.4’de 90 gün (2160 saat) sonunda deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamında yaşlandırılma işlemi uygulanan kompozit numunelerin ortalama kütleli absorpsiyon yüzdeleri hesaplanmıştır. GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamında 90 günlük (2160 saat) yaşlandırma süresi sonunda ortalama kütleli absorpsiyon yüzde değerleri hesaplanarak yaşlandırma ortamının etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Yapay deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamlarında 90 gün boyunca yaşlandırılmış CFRP, GFRP ve GCFRP kompozit numunelerinin kütleli ortalama absorpsiyon yüzde değışimi.

Tüm yaşlandırma ortamlarında; GCFRP kompozitlerin ortalama absorpsiyon yüzdesi değerinin GFRP kompozitlerden yüksek, CFRP kompozitlerin absorpsiyon yüzdesel değerininden daha az değere sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Kompozit numunelerin tümünde kütleli absorpsiyon yüzde değeri arasındaki farkın 720 saat ile 1440 saat arasındaki değışimlerde olduğu hesaplanmıştır. Ortamların absorpsiyon değeri etkisi incelendiğinde; en yüksek değeri makine yağı ortamında en düşük absorpsiyon değeri dizel yakıt ortamında olduğu sonucuna varılmıştır.

4.3 Mekanik Test Sonuçları

4.3.1 Çekme test sonuçları

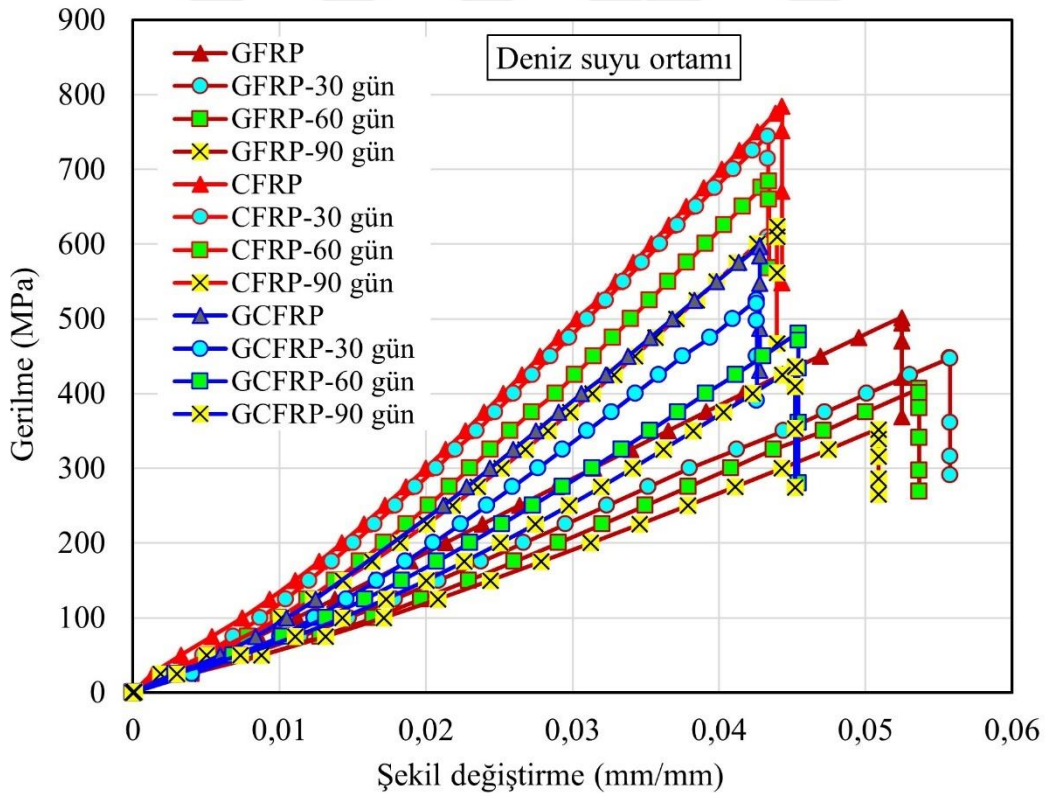
Bölüm 3.5'te anlatılan ve Çizelge 3.5'de gösterilen deney parametrelerine göre VARTM ile üretilen GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin çekme testi altındaki davranışları incelenmiştir. Deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamında yaşlandırma yapılmış numunelerin yaşlandırma süresine göre elde edilen çekme test sonuçları Çizelge 4.3'de sunulmuştur.

Çizelge 4.3: Yaşlandırılmış GFRP,CFRP ve GCFRP kompozitlerin çekme testi davranışları.

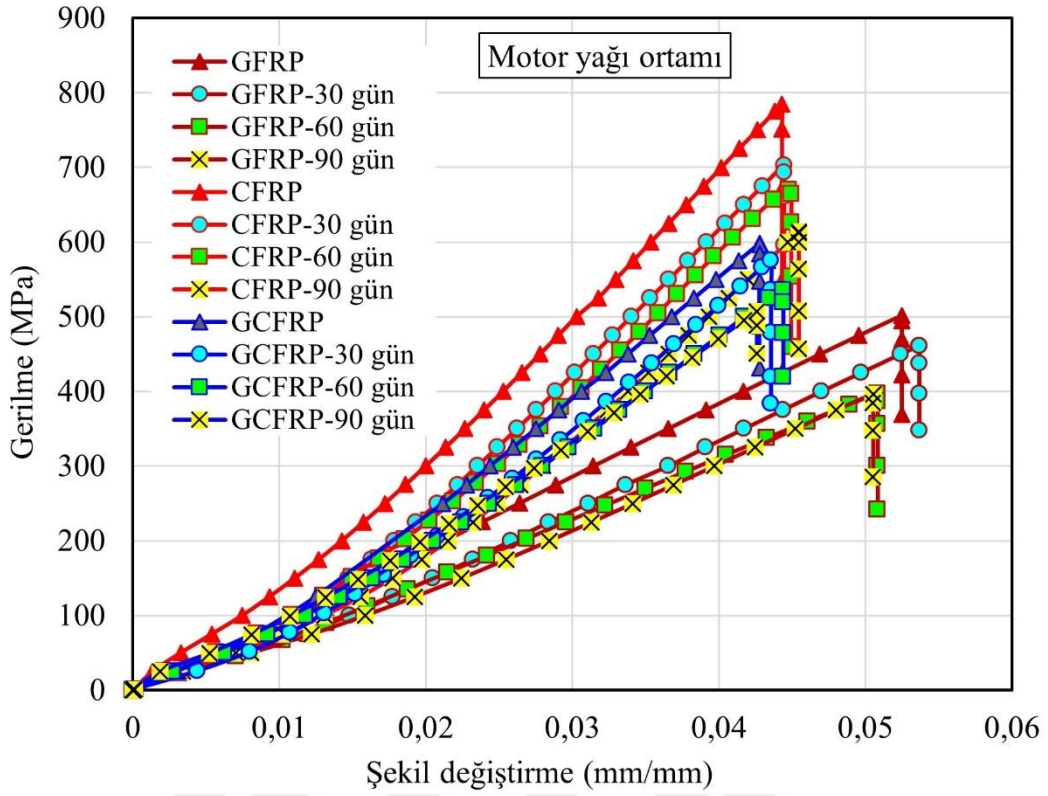
Ortam ve Numune tipi		Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Gerilme (MPa)	Maksimum Uzama (mm)	Elastisite Modülü (GPa)
Oda sıcaklığı	GFRP	23202	503.208	7.98	27.10
	CFRP	36027	804.306	7.03	61,62
	GCFRP	27567	603.814	6.55	40,28
Deniz Suyu (30 gün)	GFRP	22736	475.157	8.90	25.04
	CFRP	34523	743.867	7.32	57.30
	GCFRP	25983	550.870	6.76	38.14
Deniz Suyu (60 gün)	GFRP	20659	422.659	8.25	23.52
	CFRP	31218	683.867	6.39	51.68
	GCFRP	23477	498.363	7.05	36.57
Deniz Suyu (90 gün)	GFRP	17655	359.985	7.85	22.49
	CFRP	30322	654.267	6.60	51.53
	GCFRP	23086	488.154	7.56	36.08
Motor Yağı (30 gün)	GFRP	22743	474.074	8.76	23.58
	CFRP	31387	715.143	6.67	55.04
	GCFRP	27324	583.903	7.21	38.84
Motor Yağı (60 gün)	GFRP	23157	468.852	8.05	23.07
	CFRP	31350	675.742	7.81	53.35
	GCFRP	25462	564.425	7.70	38.66
Motor Yağı (90 gün)	GFRP	21768	458.444	8.48	22.77
	CFRP	30291	664.545	7.30	52.82
	GCFRP	23884	520.667	6.53	37.92
Dizel Yakıt (30 gün)	GFRP	23622	497.339	8.54	23.95
	CFRP	33522	728.377	6.73	57.66
	GCFRP	28009	589.667	6.84	39.19
Dizel Yakıt (60 gün)	GFRP	23697	472.470	9.82	23.47
	CFRP	32811	690.497	7.67	54.05
	GCFRP	26477	580.173	6.83	38.90
Dizel Yakıt (90 gün)	GFRP	21792	435.306	8.12	22.49
	CFRP	29389	628.855	6.87	53.03
	GCFRP	26396	550.296	7.86	38.33

Çizelge 4.3’de GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin; yaşlandırma ortamı ve süresine göre çekme testi altındaki mekanik dayanımlarına ait değerler verilmiştir. GFRP kompozitlerin normal ortam ile 90 gün boyunca yaşlandırılmış numunelerin maksimum çekme yükü değerleri kıyaslandığında; deniz suyu ortamında %23.58, motor yağı ortamında %5.77, dizel yakıt ortamında % 5.67 oranında maksimum çekme yükünün azaldığı tespit edilmiştir. CFRP kompozitlerin normal ortam ile 90 gün boyunca yaşlandırılmış numunelerin maksimum çekme yükü değerleri kıyaslandığında; deniz suyu ortamında %15.84, motor yağı ortamında %15.92, dizel yakıt ortamında % 18.42 oranında maksimum çekme yükünün azaldığı tespit edilmiştir. GCFRP kompozitlerin normal ortam ile 90 gün boyunca yaşlandırılmış numunelerin maksimum çekme yükü değerleri kıyaslandığında; deniz suyu ortamında %16.25, motor yağı ortamında %13.36, dizel yakıt ortamında % 4.25 oranında maksimum çekme yükünün azaldığı tespit edilmiştir.

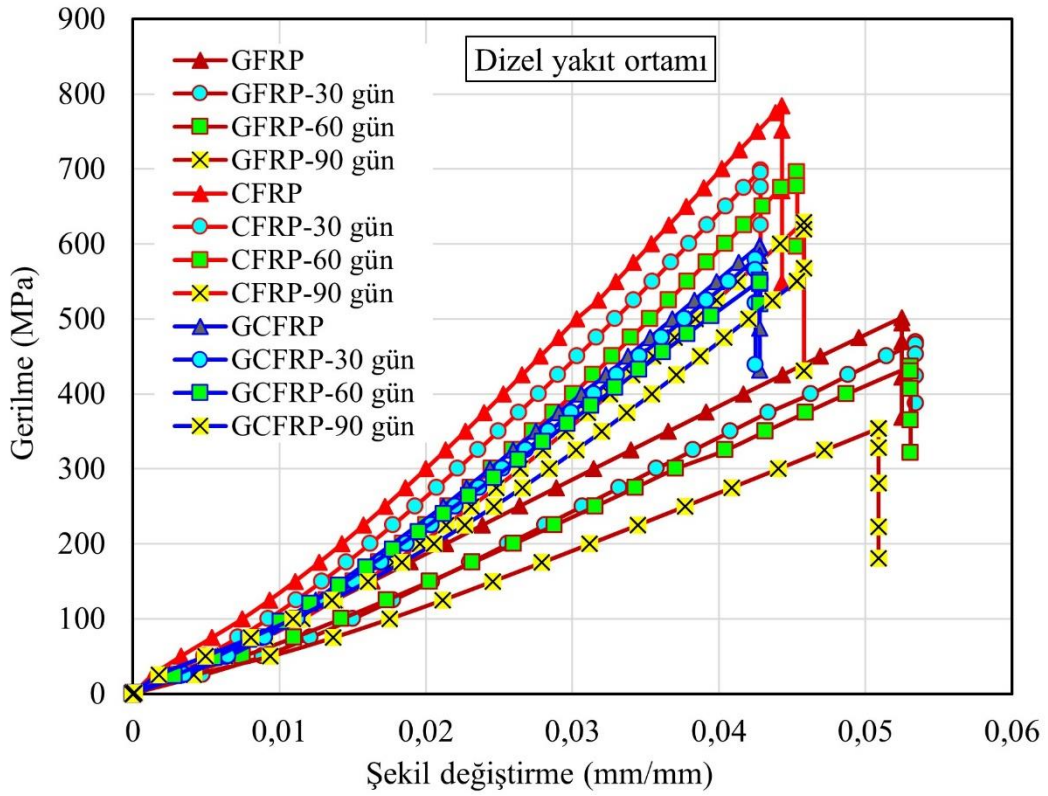
GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin; deniz suyu ortamındaki gerilme-şekil değişimi grafiği Şekil 4.5’de, motor yağı ortamındaki gerilme-şekil değişimi grafiği Şekil 4.6’da, dizel yakıt ortamındaki gerilme-şekil değişimi grafiği Şekil 4.7 ’de, gösterilmiştir.



Şekil 4.5: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin deniz suyu ortamındaki gerilme-şekil değişimi grafiği.

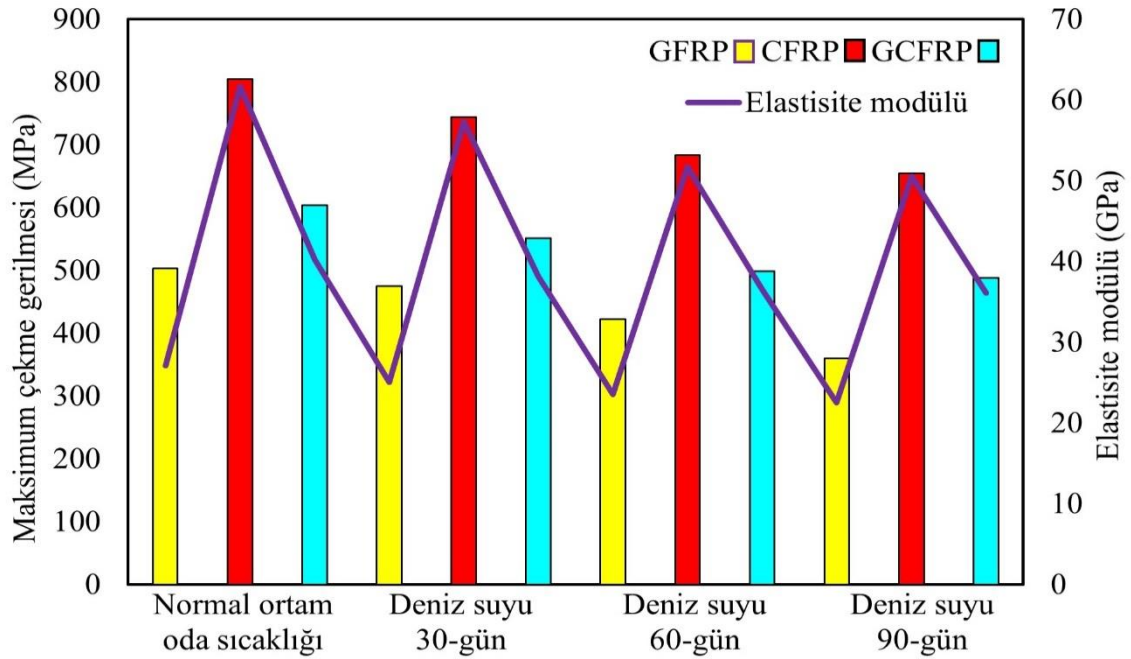


Şekil 4.6: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin motor yağı ortamındaki gerilme-şekil değiştirme grafiği.

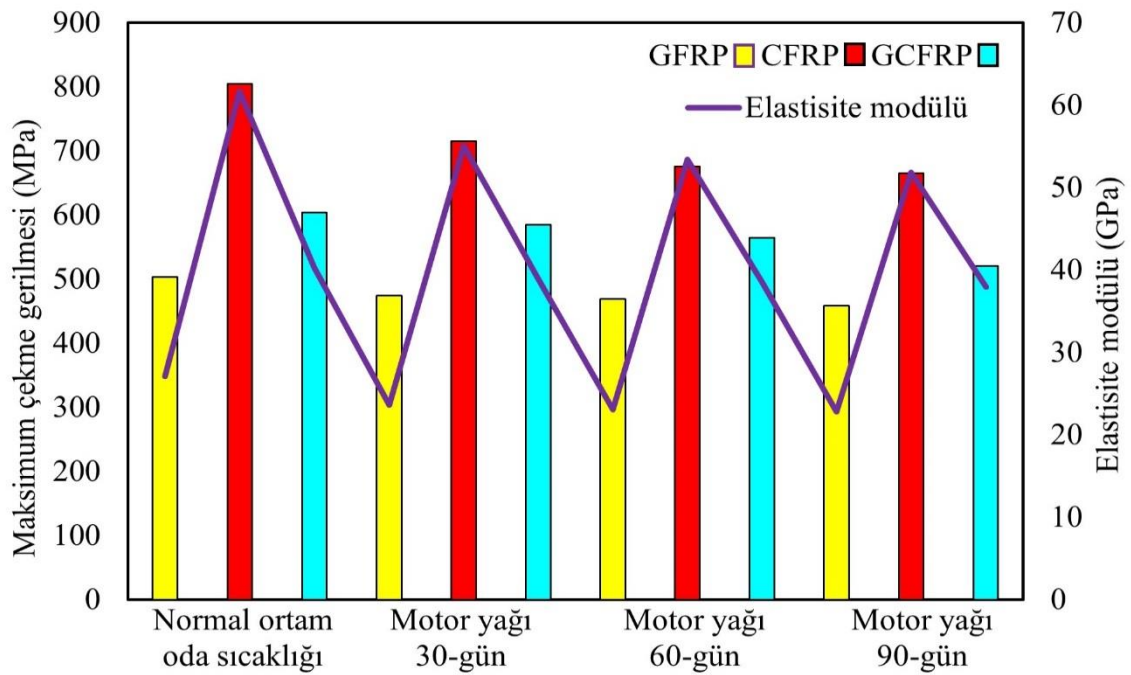


Şekil 4.7: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin dizel yakıt ortamındaki gerilme-şekil değiştirme grafiği.

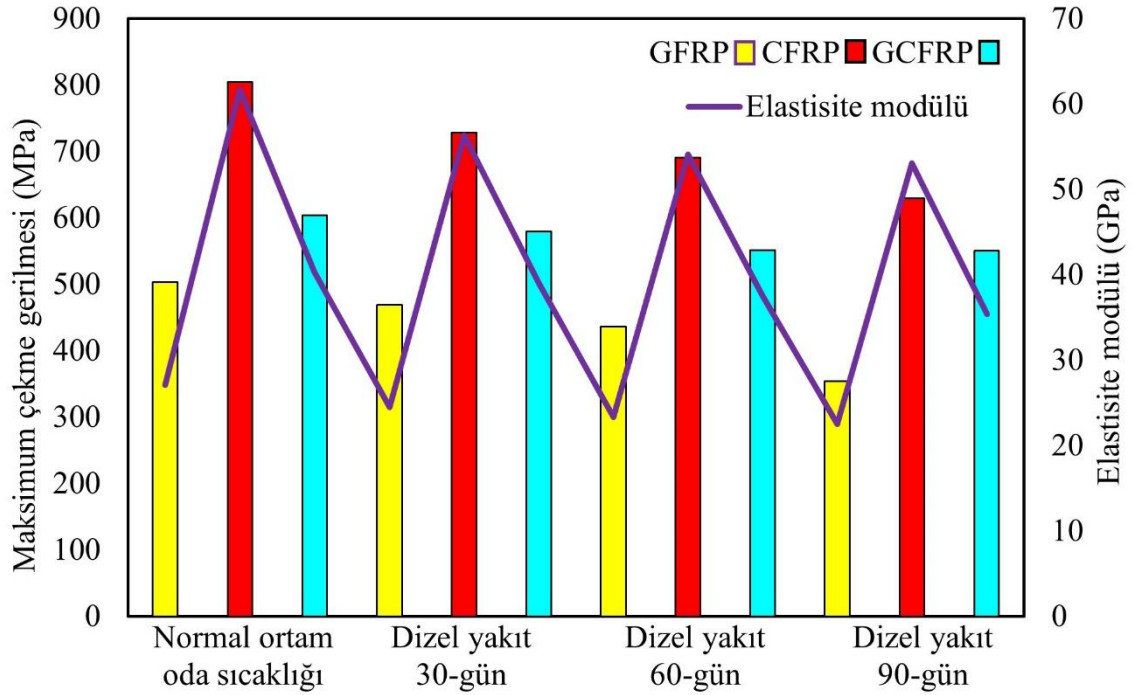
CFRP, GFRP ve GCFRP kompozitlerin maksimum çekme gerilmesi ve elastisite modüllerinin kıyaslanması; deniz suyu ortamında Şekil 4.8’de, motor yağı ortamında Şekil 4.9’da, dizel yakıt ortamında Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



Şekil 4.8: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP , CFRP ve GCFRP kompozitlerin maksimum çekme gerilmesi elastisite modülünün kıyaslanması.



Şekil 4.9: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP , CFRP ve GCFRP kompozitlerin maksimum çekme gerilmesi elastisite modülünün kıyaslanması.



Şekil 4.10: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP , CFRP ve GCFRP kompozitlerin maksimum çekme gerilmesi elastisite modülünün kıyaslanması.

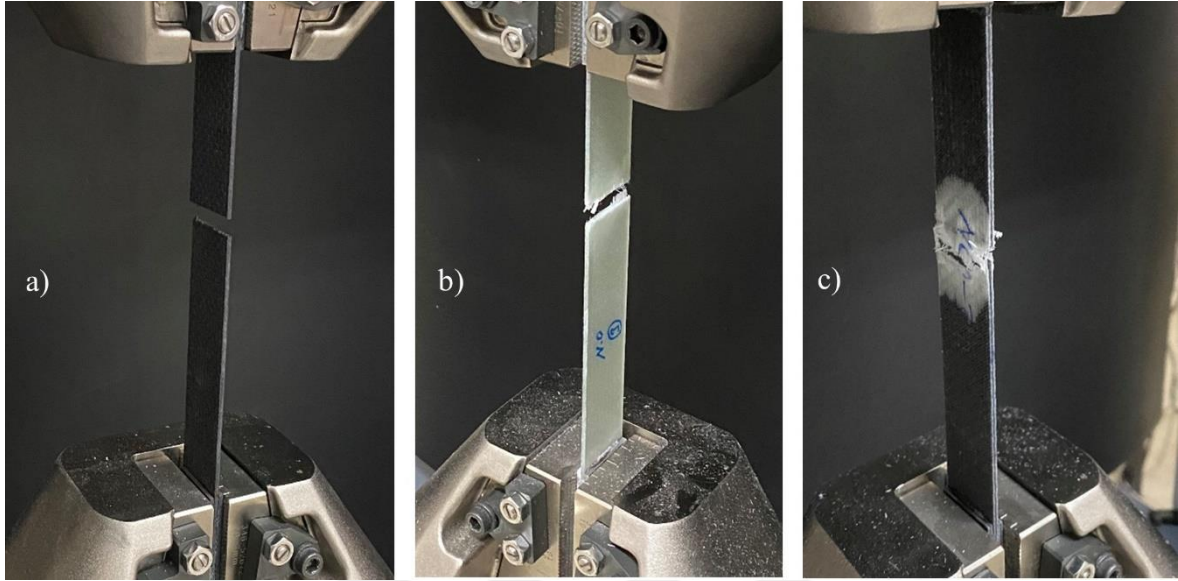
Normal oda koşulları ortamında bulunan GFRP kompozitin elastisite modülü 27.10 GPa ve maksimum çekme gerilmesi 503.208 MPa, CFRP kompozitin elastisite modülü 61.62 GPa maksimum çekme gerilmesi 804.306, GCFRP hibrit kompozitin maksimum çekme gerilmesi 603.814 MPa ve elastisite modülü 40.28 GPa değerindedir.

Normal ortamda oda koşullarındaki GFRP kompozitlerin 90 gün boyunca deniz suyu ortamında yaşlandırıldıktan sonraki elastisite modülü %17.01, CFRP kompozitlerin elastisite modülü %16.37 ve GCFRP kompozitlerin elastisite modülü %10.42 oranında azaldığı sonucu varılmıştır (Şekil 4.8).

Normal ortamda oda koşullarındaki GFRP kompozitlerin 90 gün boyunca motor yağı ortamında yaşlandırıldıktan sonraki elastisite modülü %15.97, CFRP kompozitlerin elastisite modülü %14.28 ve GCFRP kompozitlerin elastisite modülünün %5.85 oranında azaldığı sonucu varılmıştır (Şekil 4.9).

Normal ortamda oda koşullarındaki GFRP kompozitlerin 90 gün boyunca dizel yakıt ortamında yaşlandırıldıktan sonraki elastisite modülü %17.01, CFRP kompozitlerin elastisite modülü %13.94 ve GCFRP kompozitlerin elastisite modülünün %4.84 oranında azaldığı sonucu varılmıştır (Şekil 4.10).

Çekme testi yapılan kompozit numuneler çekme test cihazına bağlandıkları iki çene arasındaki mesafeye yakın bir yerden kopmaya başlayarak ayrılmışlardır. GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin yüzeylerinde oluşan hasarlar Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11: Kompozitlerin çekme testi sonrası oluşan hasarlar: a) CFRP çekme hasarı, b) GFRP çekme hasarı, c) GCFRP çekme hasarı.

4.3.2 Eğilme test sonuçları

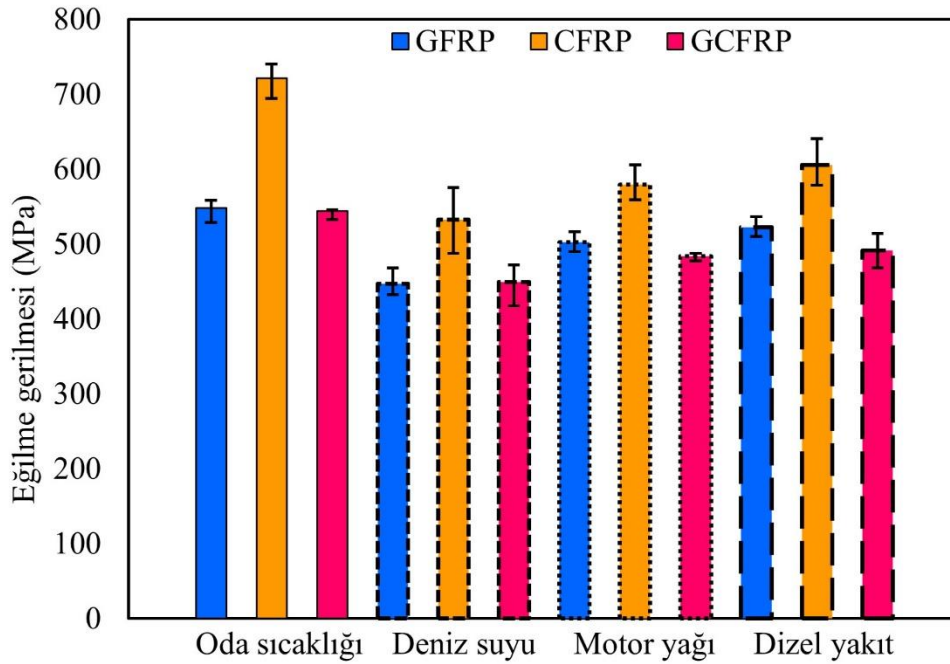
Bölüm 3.5’te anlatılan Çizelge 3.5’de gösterilmiş olan deney parametrelerine göre VARTM ile üretilen GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin üç nokta eğilme testi deneyi için yapılacak test numunesi sayıları gösterilmiştir. Bölüm 3.8.2’de üç nokta eğilme testinin yapılışı anlatılmıştır. Üç nokta eğilme testleri ASTM D7264 standartlarına göre yapılmış, denklem (3.19), (3.20) ve (3.21) kullanılarak eğilme gerilmesi, eğilme modülü ve maksimum şekil değişimi değerleri hesaplanmıştır.

Üç nokta eğilme deneyleri normal ortam oda sıcaklığı şartları ile deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt yaşlandırma ortamlarındaki sürelerden sonra deneyler yapılmıştır. Deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamlarında 30, 60 ve 90 gün boyunca yaşlandırılmış kompozitler ortamlardan alındıktan sonra üç nokta eğilme deneyleri yapılarak eğilme gerilmesi, eğilme modülü ve maksimum şekil değişimi değerleri hesaplanarak Çizelge 4.4’de sunulmuştur. Hesaplanan eğilme dayanımları ve elastisite modülleri kıyaslanarak hesaplanan değerlere göre yaşlandırma ortamının, yaşlandırma süresinin ve kompozit tipinin eğilme dayanımına etkisi hesaplanarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.4: Yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin eğilme testi davranışları.

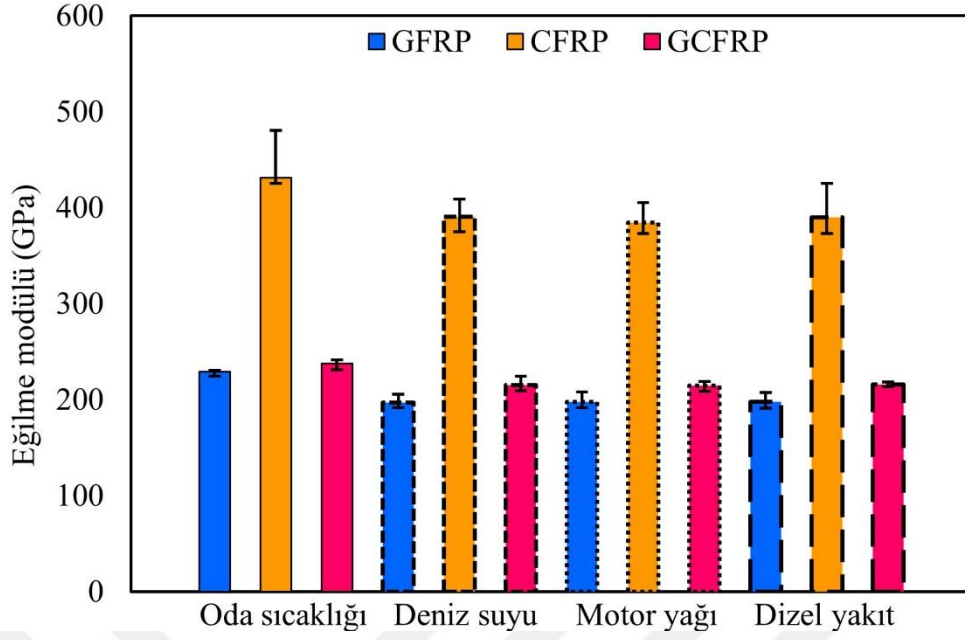
Ortam ve Numune tipi		Eğilme Kuvveti (N)	Deplasman (Uzama) (mm)	Eğilme Gerilmesi (MPa)	Şekil değişimi (mm/mm)	Eğilme Modülü (GPa)
Normal ortam (N.Ş.A)	GFRP	552.039	11.269	547.964	0.03512	229.191
	CFRP	625.974	5.136	721.410	0.01667	431.570
	GCFRP	550.522	9.419	544.388	0.03007	237.760
Deniz Suyu (30 gün)	GFRP	477.209	10.040	483.167	0.03146	210.779
	CFRP	598.734	4.613	620.343	0.01505	424.505
	GCFRP	469.529	8.234	504.309	0.02643	230.842
Deniz Suyu (60 gün)	GFRP	456.003	9.373	457.734	0.02952	198.847
	CFRP	545.930	4.233	579.908	0.01389	404.822
	GCFRP	458.441	8.079	490.076	0.02579	217.723
Deniz Suyu (90 gün)	GFRP	452.156	8.797	447.538	0.02785	196.821
	CFRP	521.668	4.282	532.504	0.01375	390.924
	GCFRP	430.581	7.627	449.312	0.02476	215.121
Motor Yağı (30 gün)	GFRP	518.538	10.989	537.366	0.03388	207.969
	CFRP	615.745	4.751	626.090	0.01610	426.300
	GCFRP	484.276	8.86	518.076	0.02852	229.922
Motor Yağı (60 gün)	GFRP	513.838	10.234	525.832	0.03240	201.403
	CFRP	540.612	4.889	593.779	0.01552	405.986
	GCFRP	482.856	8.757	499.299	0.02795	219.798
Motor Yağı (90 gün)	GFRP	513.601	10.580	502.135	0.03209	197.902
	CFRP	536.077	5.032	579.526	0,01552	384.398
	GCFRP	472.847	8.097	483.620	0.02642	214.945
Dizel Yakıt (30 gün)	GFRP	536.103	10.515	544.587	0.03497	213.897
	CFRP	625.223	5.428	668.366	0.01645	425.240
	GCFRP	498.045	8.921	536.638	0.02848	221.057
Dizel Yakıt (60 gün)	GFRP	541.048	11.065	535.425	0.03430	199.962
	CFRP	588.708	4.661	626.056	0.01504	406.604
	GCFRP	490.985	8.558	514.342	0.02747	219.781
Dizel Yakıt (90 gün)	GFRP	518.183	10.813	522.575	0.03388	197.593
	CFRP	577.301	4.588	605.960	0.01481	390.165
	GCFRP	475.070	8.391	491.250	0.02723	216.215

GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin normal ortam şartlarında sahip olduğu gerilme değerlerinin, 90 gün boyunca yaşlandırılmış kompozit numunelerin ortalama eğilme gerilmesi dayanımlarıyla kıyaslandığı grafik Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Normal oda koşullarındaki maksimum gerilme değeri; GFRP kompozitler için 547.964 MPa, CFRP kompozitler için 721.410 MPa ve GCFRP kompozitler için 544.388 MPa değerindedir. GFRP kompozitlerin oda koşullarındaki eğilme gerilme dayanımlarının; deniz suyu ortamı yaşlandırmasıyla %18.37, motor yağı ortamı yaşlandırmasıyla %8.36 ve dizel yakıt ortamlarıyla yaşlandırmasıyla %4.63 oranında azaldığı hesaplanmıştır. CFRP kompozitlerin oda koşullarındaki eğilme gerilme dayanımlarının; yapay deniz suyu ortamı yaşlandırmasıyla %26.18, motor yağında yaşlandırmasıyla %19.66, dizel yakıt ortamlarıyla yaşlandırmasıyla %16.03 oranında eğilme gerilme dayanımların azaldığı hesaplanmıştır. GCFRP hibrit kompozitlerin oda koşullarındaki eğilme gerilme dayanımlarının; yapay deniz suyu ortamı yaşlandırmasıyla %17.46, motor yağı ortamı yaşlandırmasıyla %11.16, dizel yakıt ortamı yaşlandırmasıyla %9.76 oranında azaldığı hesaplanmıştır.



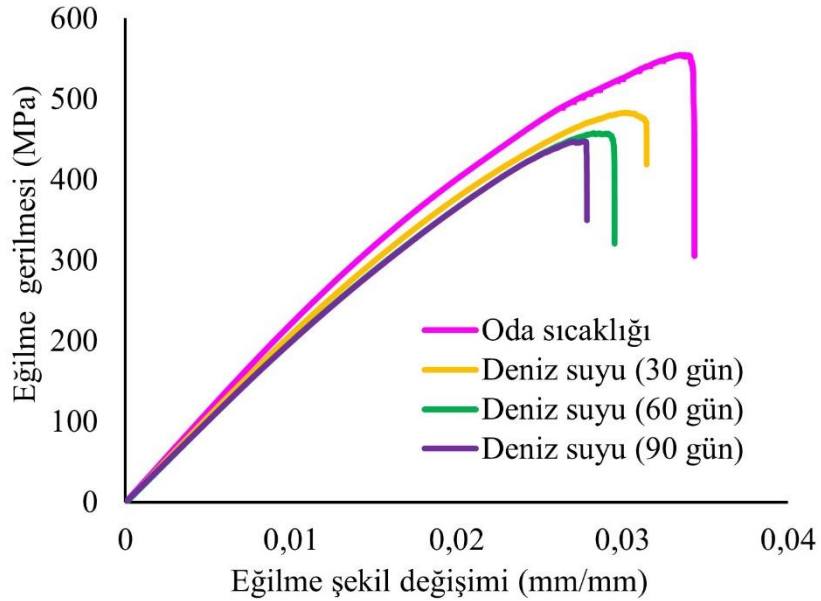
Şekil 4.12: 90 gün boyunca yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin eğilme gerilme değerlerinin normal ortam koşullarıyla kıyaslanması.

GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin normal ortam şartlarında sahip olduğu eğilme modülü değerlerinin, 90 gün boyunca yaşlandırılmış kompozit numunelerin sahip olduğu ortalama eğilme gerilmesi dayanımlarıyla kıyaslandığı grafik Şekil 4.13’de gösterilmiştir.

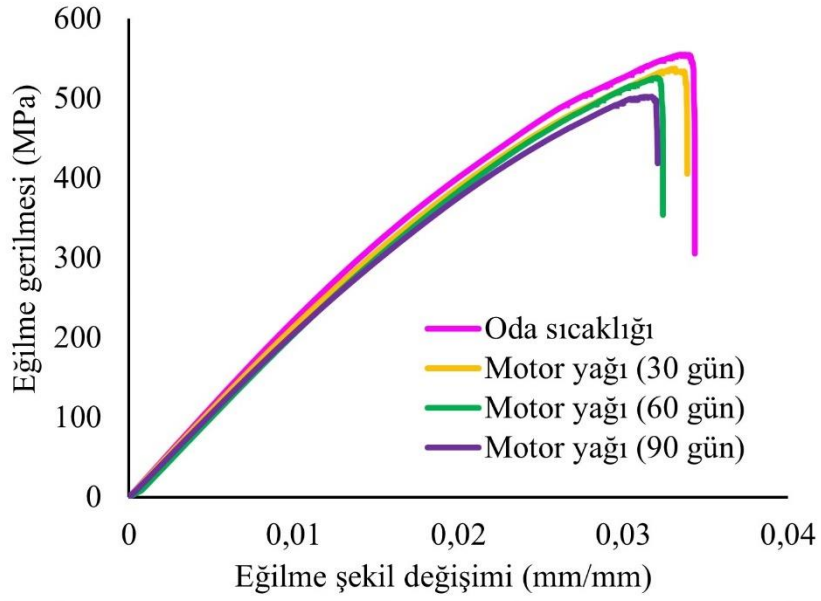


Şekil 4.13: 90 gün boyunca yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin eğilme modülü değerlerinin normal ortam koşullarıyla kıyaslanması.

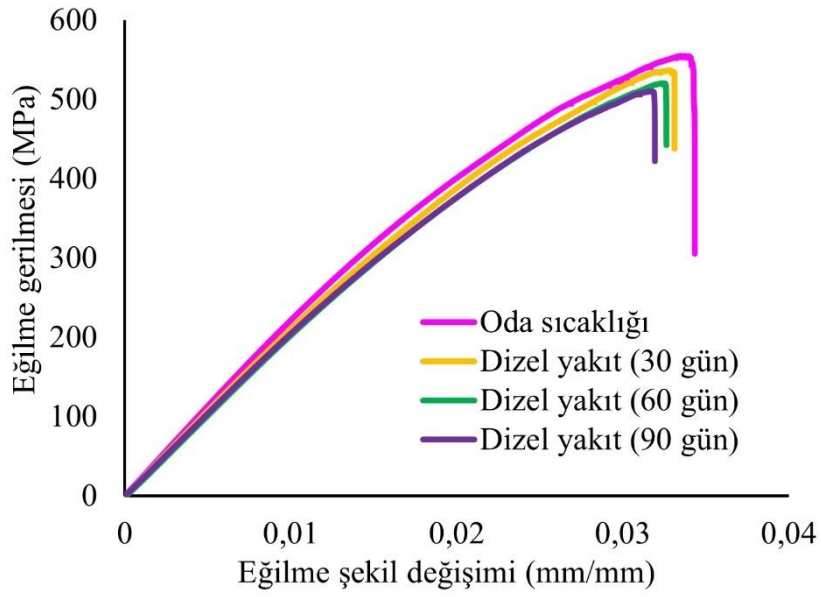
Cam/epoksi (GFRP) kompozitlerin normal ortam koşullarındaki eğilme gerilmesi-şekil değişimi değerlerinin, deniz suyu yaşlandırma ortamıyla kıyaslanması Şekil 4.14’de, motor yağı yaşlandırma ortamıyla kıyaslanması Şekil 4.15’de ve dizel yakıt yaşlandırma ortamıyla kıyaslanması Şekil 4.16’daki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.14: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin eğilme gerilme-şekil değişimi.



Şekil 4.15: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin eğilme gerilmesi-şekil değişimi.

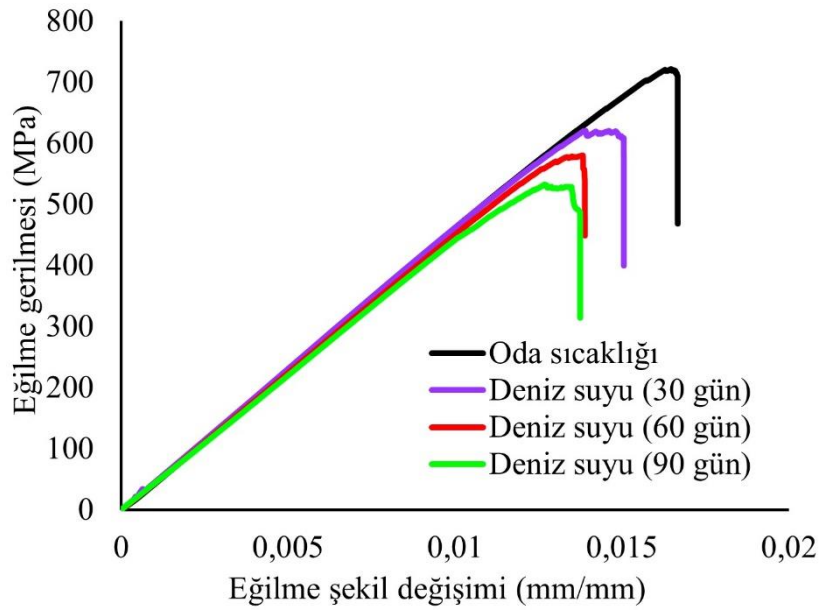


Şekil 4.16: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin eğilme gerilmesi-şekil değişimi.

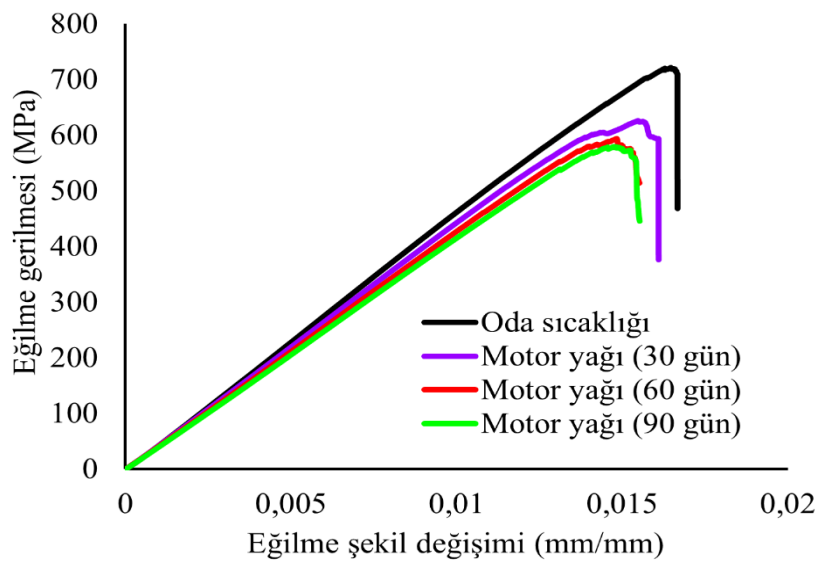
Yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin gerilme-şekil değişimi grafiklerine bakıldığında; gerilme dayanımını en çok etkileyen ortamın deniz suyu yaşlandırma ortamı olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 4.14). GFRP kompozitlerin tüm yaşlandırma ortamları baz alındığında; 30, 60 ve 90 günlük periyotlardaki her 30 gün sonrasında eğilme modülü değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Eğilme gerilmesi-şekil değişimi grafiğinden elde edilen oda sıcaklığındaki eğilme modülü değeri 229.191 GPa değerindedir. GFRP kompozitlerin normal ortamdaki eğilme modülü 90 günlük yaşlandırma sonrasında; deniz

suyu yaşlandırma etkisiyle %14.27 oranında azalarak 196.821 GPa değerine, motor yağı yaşlandırma etkisiyle %13.651 oranında azalarak 197.902 GPa değerine, dizel yakıt ortamında yaşlandırma etkisiyle % 13.786 azalarak 197.593 GPa eğilme modülü değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

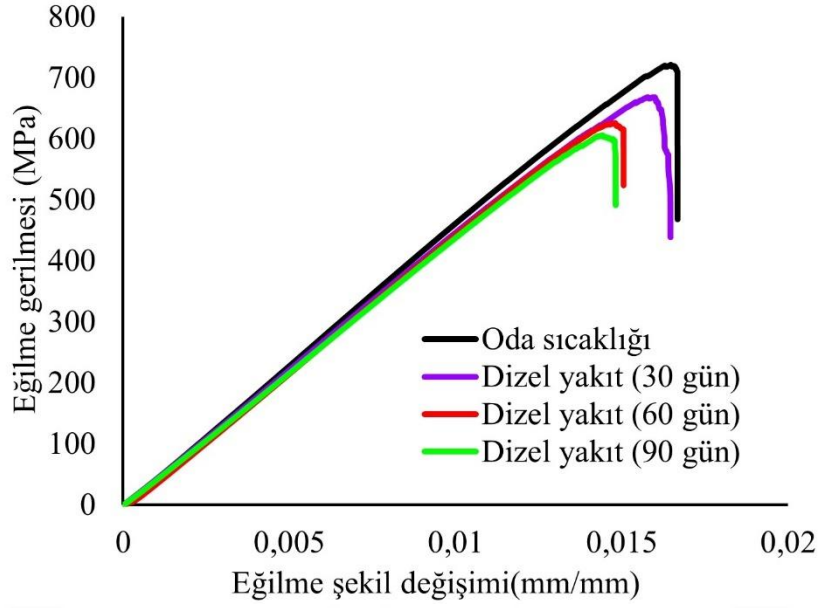
Karbon/epoksi (CFRP) kompozitlerin normal ortam koşullarındaki eğilme gerilmesi-şekil değişimi değerlerinin, deniz suyu yaşlandırma ortamıyla Şekil 4.17’de, motor yağı yaşlandırma ortamıyla Şekil 4.18’de ve dizel yakıt yaşlandırma ortamıyla kıyaslanması Şekil 4.19’daki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.17: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin eğilme gerilme-şekil değişimi.



Şekil 4.18: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin eğilme gerilme-şekil değişimi.



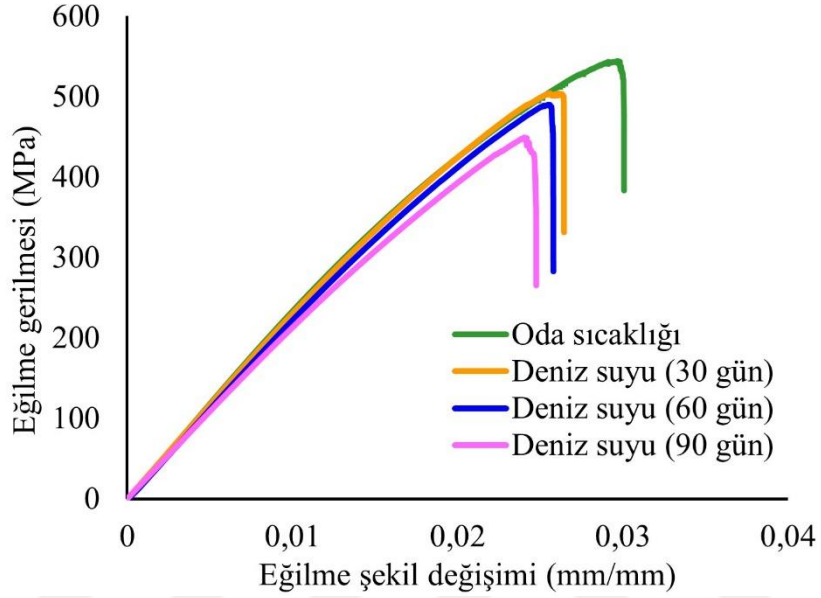
Şekil 4.19: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin eğilme gerilme-şekil değişimi.

Çizelge 4.4 incelendiğinde eğilme dayanımının en yüksek olduğu kompozit tipi cam/epoksi (CFRP) kompozitler olduğu görülmektedir. CFRP kompozitlerin normal ortam şartlarında eğilme dayanımı 721.410 MPa değerinde iken, cam/epoksi (GFRP) kompozitlerde 547.964 MPa, cam-karbon/epoksi (GCFRP) kompozitlerde 550.522 MPa değerinde olduğu tespit edilmiştir.

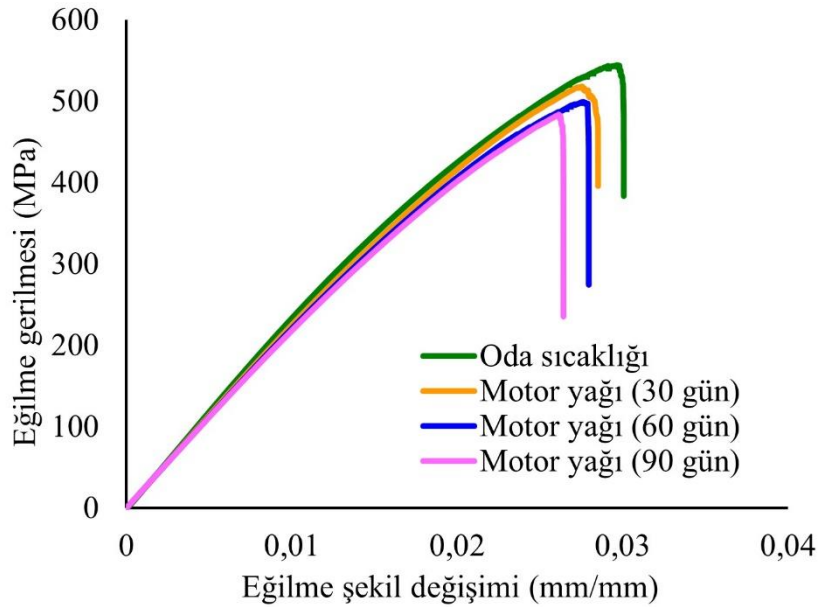
Yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin eğilme gerilmesi-şekil değişimi grafiklerine bakıldığında; gerilme dayanımını en çok etkileyen yaşlandırma ortamının motor yağı yaşlandırma ortamı olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 4.18). GFRP kompozitlerin tüm yaşlandırma ortamları baz alındığında; 30, 60 ve 90 günlük periyotlardaki her 30 gün sonrasında eğilme kuvveti, maksimum eğilme gerilmesi ve eğilme modülü değerinin azaldığı tespit edilmiştir.

Eğilme gerilmesi-şekil değişimi grafiğinden elde edilen eğilme modülü değeri oda sıcaklığındaki eğilme modülü değeri 431.570 GPa değerindedir. CFRP normal ortamdaki eğilme modülleri 90 günlük yaşlandırma sonrasında; motor yağı yaşlandırma etkisiyle %10.930 oranında azalarak 384.398 GPa değerine, 90 günlük deniz suyu yaşlandırma etkisiyle %9.603 oranında azalarak 390.924 GPa değerine, 90 günlük dizel yakıt ortamında yaşlandırma etkisiyle %9.594 azalarak 390.165 GPa eğilme modülü değerinde olduğu hesaplanmıştır.

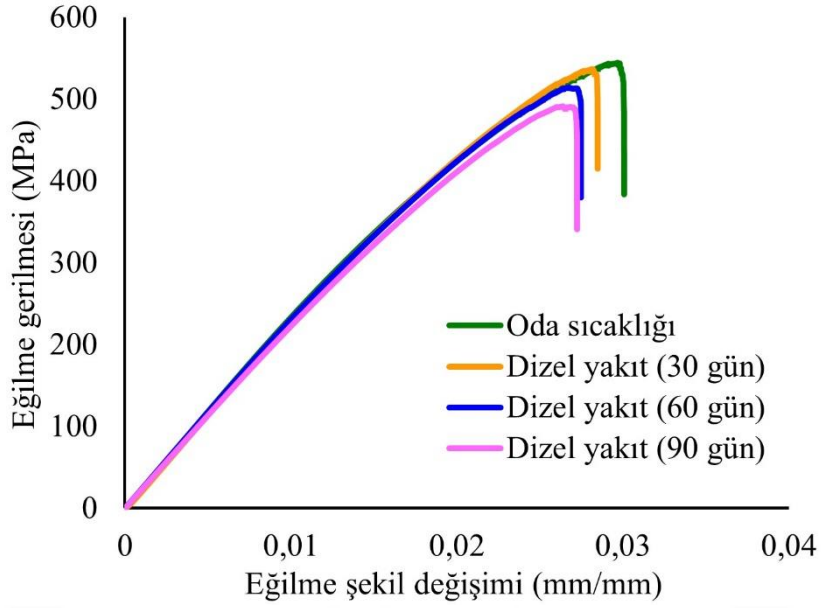
Cam-karbon/epoksi (GCFRP) hibrit kompozitlerin normal ortam koşullarındaki eğilme gerilmesi-şekil değişimi değerlerinin; deniz suyu yaşlandırma ortamıyla kıyaslanması Şekil 4.20’de, motor yağı yaşlandırma ortamıyla kıyaslanması Şekil 4.21’de ve dizel yakıt yaşlandırma ortamıyla kıyaslanmasına ait eğilme gerilme-şekil değişimi grafiği Şekil 4.22’de gösterilmektedir.



Şekil 4.20: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GCFRP kompozitlerin eğilme gerilme-şekil değişimi.



Şekil 4.21: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GCFRP kompozitlerin eğilme gerilme-şekil değişimi.



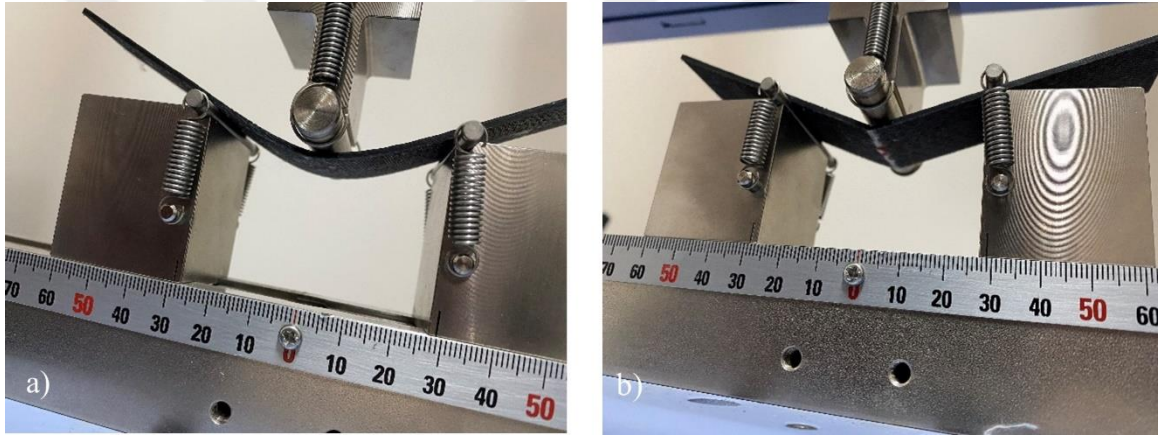
Şekil 4.22: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GCFRP kompozitlerin eğilme gerilme-şekil değişimi.

Yaşlandırılmış cam-karbon/epoksi GCFRP kompozitlerin eğilme gerilmesi-şekil değişimi grafiklerine bakıldığında; gerilme dayanımını en çok etkileyen yaşlandırma ortamının motor yağı yaşlandırma ortamı olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 4.21). GFRP kompozitlerin tüm yaşlandırma ortamları baz alındığında; 30, 60 ve 90 günlük periyotlardaki her 30 gün sonrasında eğilme kuvveti, maksimum eğilme gerilmesi ve eğilme modülü değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Eğilme gerilmesi-şekil değişimi grafiğinden elde edilen eğilme modülü değeri oda sıcaklığındaki eğilme modülü değeri 237.760 GPa değerindedir. GCFRP kompozitlerin normal ortamdaki eğilme modülleri 90 günlük yaşlandırma sonrasında; motor yağı yaşlandırma etkisiyle %9.595 oranında azalarak 214.945 GPa değerine, 90 günlük deniz suyu yaşlandırma etkisiyle %9.521 oranında azalarak 215.121 GPa değerine, 90 günlük dizel yakıt ortamında yaşlandırma etkisiyle %9.061 azalarak 216.215 GPa eğilme modülü değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Tüm ortam koşullarına bakıldığında; cam/epoksi (GFRP) kompozitlerin üç nokta eğilme davranışlarının cam-karbon/epoksi (GCFRP) kompozitlere çok yakın değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Karbon/epoksi (CFRP) kompozitlerin eğilme performansını en çok etkileyen ortamın deniz suyu yaşlandırma ortamı olduğu sonucuna varılmıştır. Hibritleşme etkisini incelemek için üretilen GCFRP hibrit kompozitler iyi derecede eğilme dayanımları göstermemişlerdir.

Bunun sebebi 8 tabakadan oluşan kompozitlerin ön ve alt tabaka katmanlarının cam elyaflarla dizili olmasıdır. Eğilmeye maruz kalarak hasara uğrayan ilk tabakanın cam elyaflar olmasıdır.

GCFRP kompozitlerin merkezinde konumlandırılmış 4 kat karbon elyafa gelmeden hasar başladığından bu kompozitlerin eğilme dayanımları GFRP kompozitlere çok yakın değerlerde olduğu sonucuna varılmıştır. GFRP, CFRP ve GCFRP kompozit malzemelerin testler sonucu oluşan hasarlar Şekil 4.23'de gösterilmiştir. Kompozit malzemeler gerinim (şekil değişimi) sınırlarını aştıktan sonra eğilme yükünün uygulandığı kısımdan hasara uğrayarak kırılmışlardır. GFRP kompozitler %7 ile %7.5 arası gerinim oranında, CFRP kompozitler %3 ile %3.5 arası gerinim oranında, GCFRP kompozitler %5.5-%6.5 gerinim oranında hasara başlayarak kırılmaya başladığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.23: Kompozitlerde üç nokta eğilme testi hasarının oluşması: a) Gerinim sınırına ulaşmış kompozit, b) Gerinim sınırını geçmiş kompozitin kırılması.

4.3.3 Düşük hızlı darbe testi sonuçları

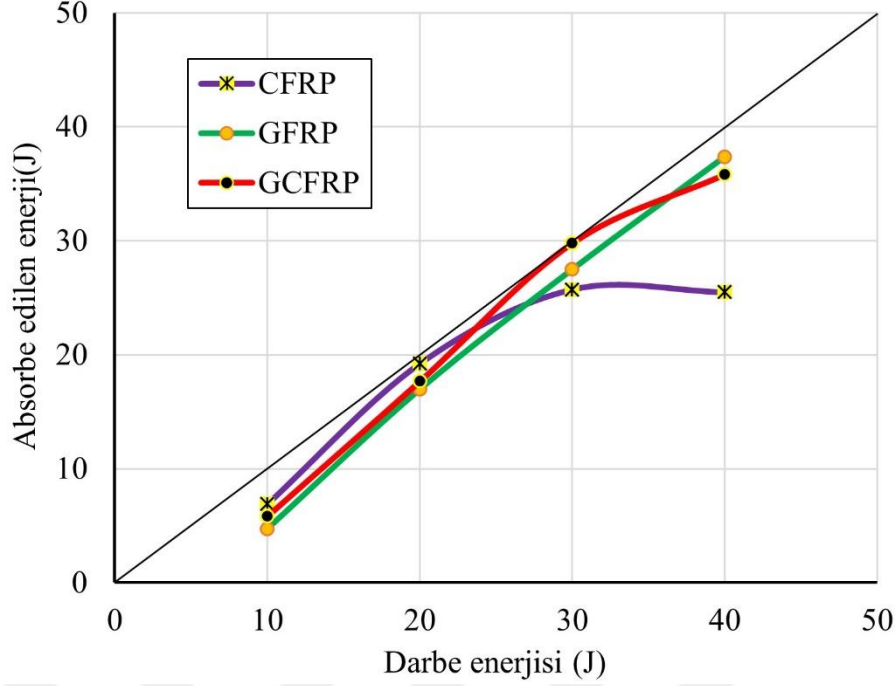
Bölüm 3.5'te anlatılan ve Çizelge 3.5'de gösterilmiş olan deney parametrelerine göre VARTM ile üretilen GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin üç nokta eğilme testi deneyi için yapılacak test numunesi sayıları gösterilmiştir. Bölüm 3.8.3'de çalışmada düşük hızlı darbe testlerinin yapılışı anlatılmıştır. Düşük hızlı darbe testleri ASTM D7136 M standartlarına göre yapılmıştır. Farklı darbe enerjilerinde gerçekleştirilen testler sonucunda tepki kuvveti, deplasman (çökme) ve absorbe edilen enerji değerleri elde edilerek sonuçlar yorumlanmıştır. Düşük hızlı darbe test deneyleri normal ortam oda sıcaklığı şartları ile deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt yaşlandırma ortamlarındaki mekanik değişimlerinin tespiti yapılmıştır.

Normal ortamdaki (oda sıcaklığındaki) düşük hızlı darbe testleri 4 farklı darbe enerjisinde ağırlık düşürme testi yapılarak GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin penetrasyon ve perforasyon enerji değerlerini tahmin etmek için 10 J, 20 J, 30 J ve 40 J'lük 4 farklı darbe enerjisi uygulanmıştır. 4 farklı enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testi yapılan kompozitlerin temas kuvveti, deplasman (çökme) ve absorbe edilen enerji değerleri Çizelge 4.5'de gösterilmiştir.

Kompozit malzemelere farklı darbe enerjilerinde uygulanan ağırlık düşürme testlerinden sonra absorbe edilen enerji verileri hesaplanmış ve belirlenen bu enerji verilerine göre eş enerji profil diyagramı oluşturulmuştur (Şekil 4.24).

Çizelge 4.5: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin değişen darbe enerjisine göre mekanik özelliklerinin kıyaslanması.

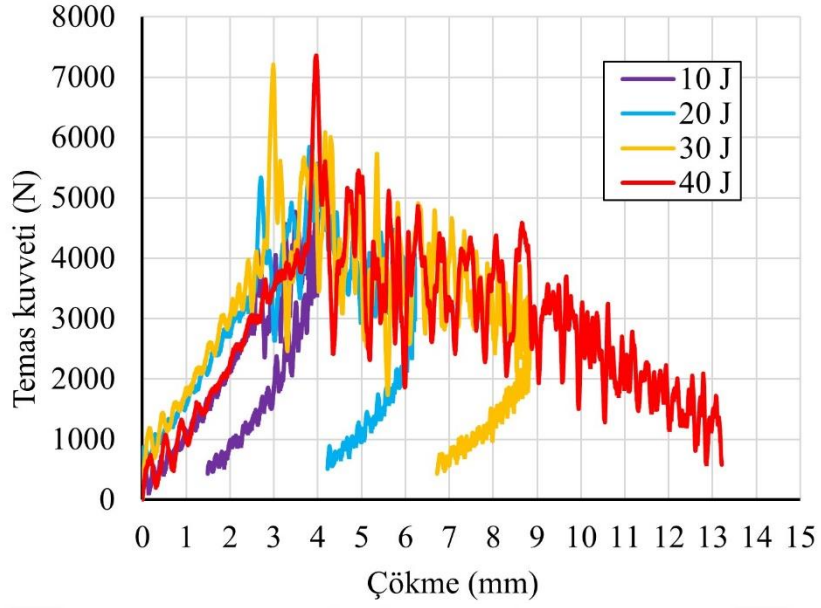
Numune tipi Darbe enerjisi	Temas Kuvveti (N)	Deplasman (Çökme) (mm)	Absorbe edilen enerji (J)	Darbe vurucu hızı (m/sn)	
GFRP	10 J	4795.705	3.995	4.726	1.907
	20 J	5847.293	6.219	16.973	2.967
	30 J	7210,891	8.829	27.479	3.303
	40 J	7361.118	13.210	37.386	3.814
CFRP	10 J	3674.781	4.344	6.901	1.907
	20 J	4137.018	8.893	19.233	2.967
	30 J	4888.152	12.328	25.737	3.303
	40 J	4737.925	12.244	25.496	3.814
GCFRP	10 J	4402.804	3.954	5.834	1.907
	20 J	5292.609	7.735	17.672	2.967
	30 J	5939.741	11.772	29.794	3.303
	40 J	6332.642	14.811	35.814	3.814



Şekil 4.24: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin eş enerji profil diyagramı.

GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin eş enerji profil diyagramı Şekil 4.28’de gösterilmiştir. GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin penetrasyon ve perforasyon enerji değerlerini tahmin etmek ve kompozit malzemelerin darbe enerjisiyle nüfuziyetini incelemek için 4 farklı enerji uygulanarak tespit edilmiştir. GFRP kompozitler farklı darbe enerjileri ile test edildiğinde; <20 J enerjilerde geri tepme, <30 J enerji değerinde penetrasyon, >30 J enerji değerine geldiğinde ise perforasyon olayı oluşmuştur. CFRP kompozitler farklı darbe enerjileri ile test edildiğinde; 10 J değerinde geri tepme, 20 J enerji değerinde penetrasyon, 30 J ve 40 J enerji değerlerinde perforasyon olayı gerçekleşmiştir. GCFRP kompozitler farklı darbe enerjileri ile test edildiğinde; <20 J enerjilerde geri tepme, <30 J enerji değerinde penetrasyon, >30 J enerji değerine geldiğinde ise perforasyon olayı oluşmuştur. GCFRP kompozitlerin farklı enerji seviyelerinde uygulandığı düşük hızlı test davranışları GFRP kompozitlerin verdiği darbe davranış tepkileri benzerdir.

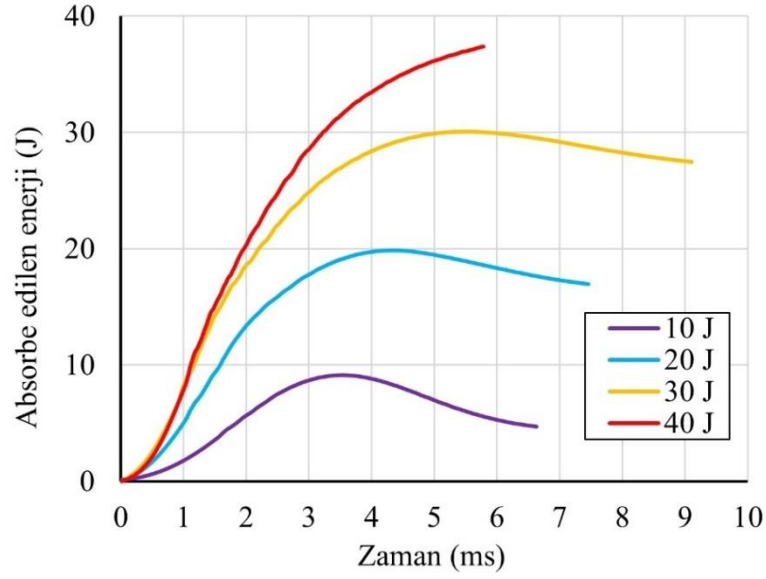
Cam/epoksi (GFRP) kompozitlere farklı enerji seviyelerinde uygulanan darbe testlerinde elde edilen verilere göre temas kuvveti – çökme grafiği Şekil 4.25’de, absorbe edilen enerji - zaman grafiği Şekil 4.26’da, çökme-zaman grafiği Şekil 4.27’de, darbe hızı-zaman grafiği Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



Şekil 4.25: GFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki kuvvet-deplasman grafiği.

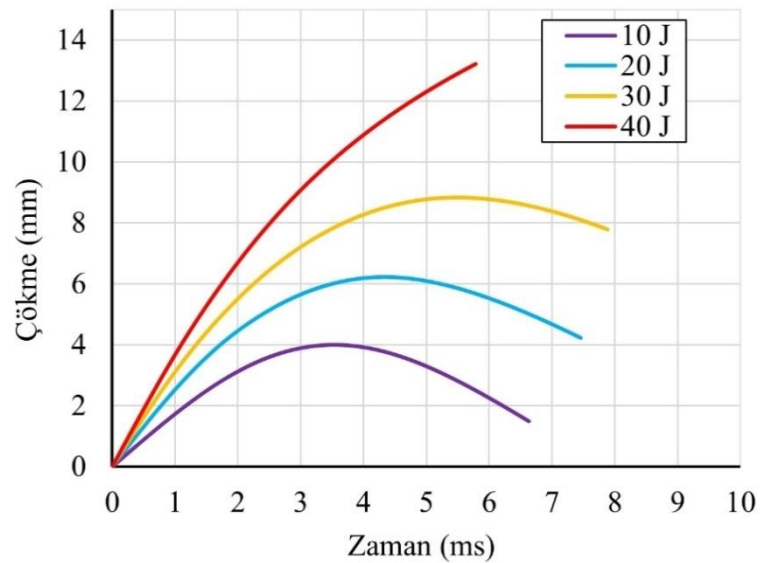
Kuvvet-çökme eğrileri düşük hızlı darbe testlerinde kompozit malzemede hasarın oluştuğu enerji seviyeleri belirlemede çok önemli bir yere sahiptir. Geri tepme olayının meydana geldiği düşük hızlı darbe deneylerinde kuvvet-çökme eğrileri birbirine yakın parabolik kapalı bir eğri oluşturur. Bu eğrinin meydana geldiği durumlarda test edilen numune üzerinde hasar azdır. Kapalı olan bu eğriler kompozit numunenin darbeye karşı elastik tepkisini temsil eder. Darbe enerjisinin penetrasyona yaklaşmasıyla birlikte eğri arası uzaklık artarak açık bir eğri oluşturur. Delinme eşiğini geçen darbe enerjilerinde ise bu eğri arasındaki açıklık artarak bir eğri oluşturur. Açık eğri oluşturmuş kuvvet-çökme grafiklerinde delinme olayı gerçekleştiği için hasar tam anlamıyla fark edilir ve derin seviyededir. Şekil 4.25'deki GFRP kompozitlerin kuvvet-çökme eğrileri incelendiğinde; 10 J ve 20 J değerlerinde geri tepme meydana gelerek açık bir eğri oluşmuştur. 30 J enerji seviyesine geçildikten sonra penetrasyon olayı meydana gelmiştir, eğri açık bir duruma geçmeye başlamıştır. Enerjinin 40 J değerine çıkmasıyla birlikte perforasyon olayı gerçekleşmiş eğri tamamen açık hale gelerek sonlanmıştır.

Uygulanan darbe enerji değişimine göre GFRP kompozitlerde oluşturduğu maksimum temas kuvveti değerlerine bakıldığında; 10 J enerji seviyesinde 4795.705 N, 20 J enerji seviyesinde 5847.293 N, 30 J enerji seviyesinde 7210.891 N ve 40 J enerji seviyesinde 7361.118 N maksimum temas kuvveti değeri oluşturduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.25).



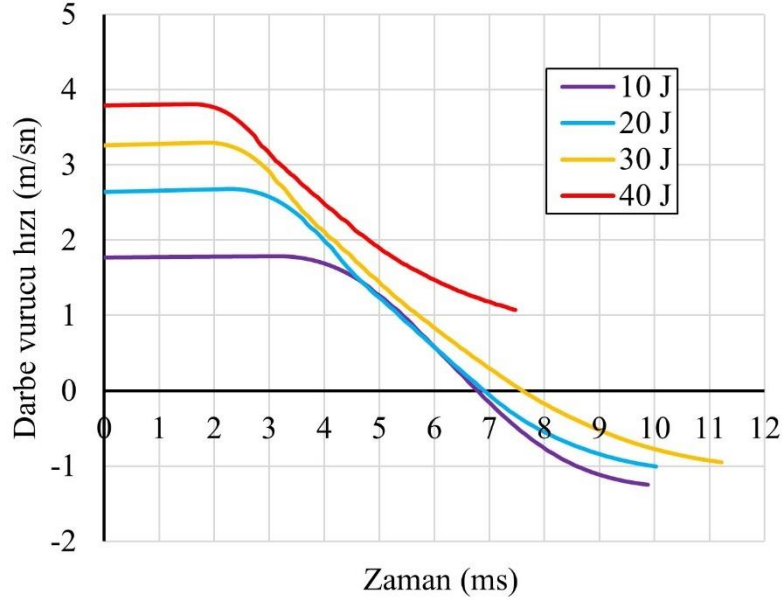
Şekil 4.26: GFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki absorbe edilen enerji-zaman grafiği.

Absorbe edilen enerji diyagramında malzemenin hasar durumuna hangi enerji seviyesinde başladığı tespiti yapılır. GFRP kompozitlerin absorbe edilen enerji-zaman grafiğine bakıldığında; 10 J, 20 J ve 30 J değerlerinde delinmenin olmadığı grafikten anlaşılmaktadır. Fakat 40 J değerinde uygulanan darbe testi esnasında tamamen delinme olayı gerçekleştiği açıkça gösterilmiştir (Şekil 4.26). GFRP kompozitlere; 10 J darbe enerjisiyle vurulduğunda 4.726 J, 20 J darbe enerjisiyle vurulduğunda 16.973 J, 30 J darbe enerjisiyle vurulduğunda 27.479 J, 40 J darbe enerjisiyle vurulduğunda 37.786 J enerji absorbe ettiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.27: GFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki çökme-zaman grafiği.

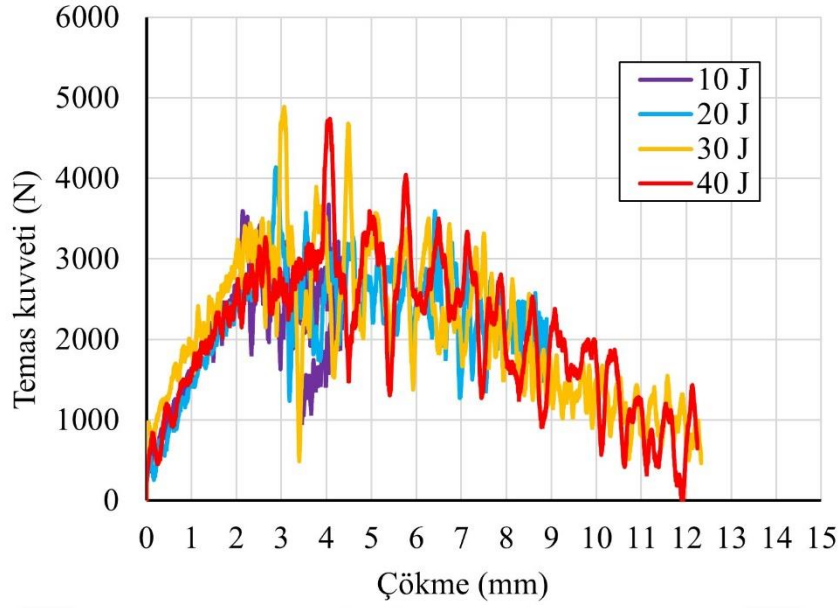
Uygulanan darbe enerji değişimine göre GFRP kompozitlerde oluşturduğu çökme değerlerine bakıldığında; 10 J enerji seviyesinde 3.995 mm, 20 J enerji seviyesinde 6.219 mm, 30 J enerji seviyesinde 8.829 mm ve 40 J enerji seviyesinde 13.210 mm çökme değeri oluşturduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.27).



Şekil 4.28: GFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki darbe vurucu hızı-zaman grafiği.

GFRP kompozitlerin düşük hızlı darbe testlerinin malzemeye uygulandığı darbe vurucu hızının malzemeye temasından alınan hız-zaman grafiğine bakıldığında; 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyesinde kompozit malzemede delinme olayı gerçekteşmediği için vurucu hızının tamamını alarak test tamamlanırken, 40 J enerji seviyesinde test hızı yüksek değerde delinme olayı gerçekteştiğinden vurucu hızı sıfırlanmadan test tamamlanmıştır (Şekil 4.28).

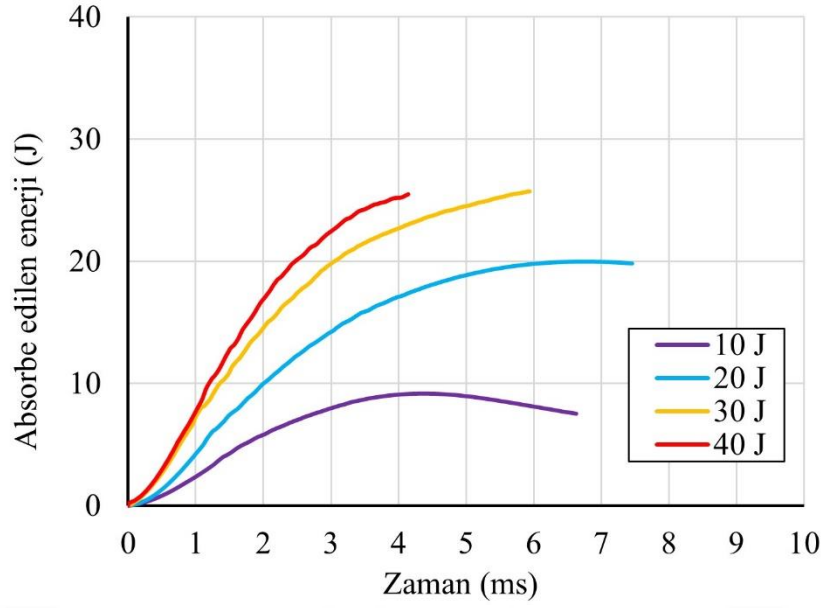
Karbon/epoksi (CFRP) kompozitlere 10J, 20 J, 30 J ve 40 J enerji seviyelerinde uygulanan darbe testlerinden elde edilen verilere göre temas kuvveti – çökme grafiği Şekil 4.29'da, absorbe edilen enerji - zaman grafiği Şekil 4.30'da , çökme-zaman grafiği Şekil 4.31'de , darbe hızı-zaman grafiği Şekil 4.32'de gösterilmiştir.



Şekil 4.29: CFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki kuvvet-deplasman grafiği.

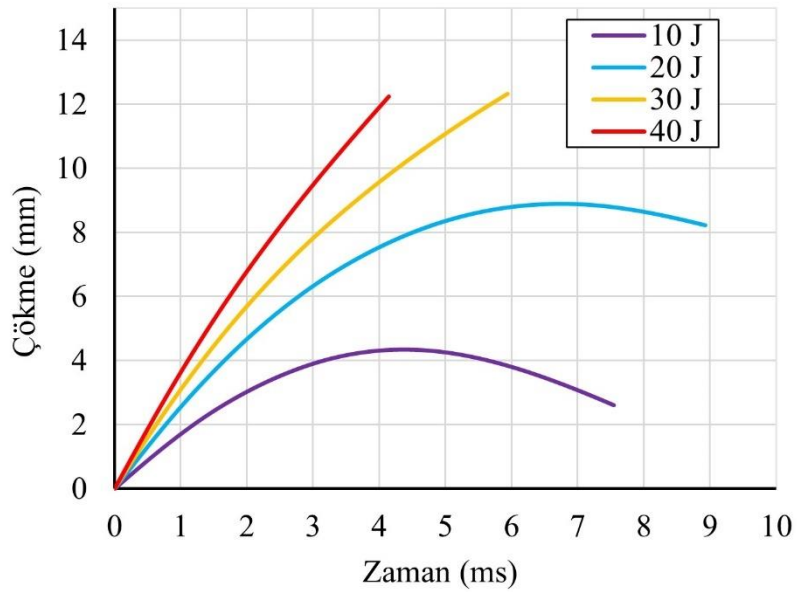
Şekil 4.29’da CFRP kompozitlerin kuvvet-çökme eğrileri incelendiğinde; 10 J enerji seviyesinde geri tepme meydana gelmiş, 20 J enerji seviyesinde penetrasyon olayı başlamıştır. Enerjinin 30 J enerji seviyesine çıkarılmasıyla perforasyon meydana gelerek eğri açık bir eğri durumuna geçmiştir. 30 J ve 40 j enerji değerinde ise perforasyon olayı yani tam delinme hasarı meydana gelmiştir. Sonuç olarak darbe enerjisinin artmasıyla numune üzerindeki hasar artmış ve oluşan eğri açık bir eğri oluşturmuştur. Bu grafiğe bakıldığında CFRP kompozitin 30 J darbe enerji seviyesi değerini aştıktan sonra delinme olayının gerçekleştiği grafikten açık bir şekilde anlaşılabilir.

Uygulanan darbe enerji değişimine göre CFRP kompozitlerde oluşturduğu maksimum temas kuvveti değerlerine bakıldığında; 10 J enerji seviyesinde 3674.781 N, 20 J enerji seviyesinde 4137.018 N, 30 J enerji seviyesinde 4888.152 N ve 40 J enerji seviyesinde 4737.925 N maksimum temas kuvveti değeri oluşturduğu tespit edilmiştir. 30 J enerji seviyesinden sonra tam delinme gerçekleştiği için temas kuvveti azalmıştır.



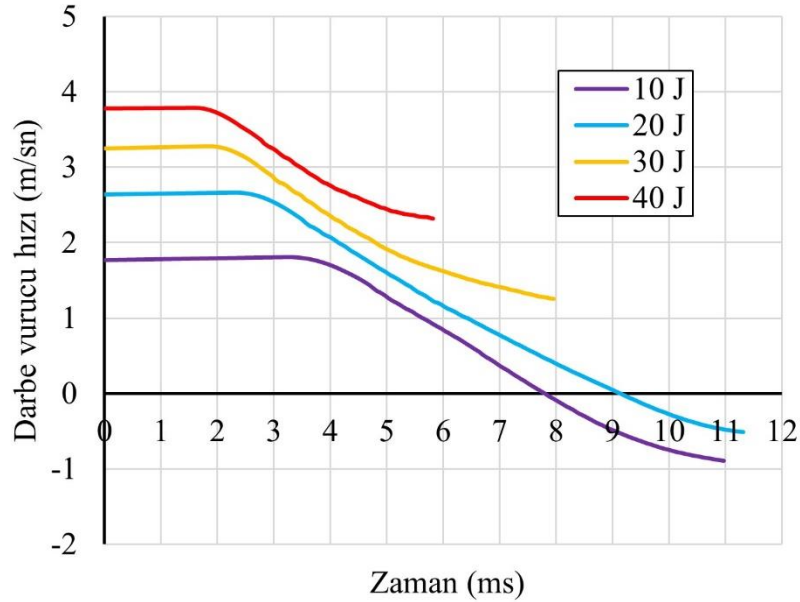
Şekil 4.30: CFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki absorbe edilen enerji-zaman grafiği.

CFRP kompozitlerin absorbe edilen enerji-zaman grafiğine bakıldığında; 10 J ve 20 J enerji seviyelerinde delinmenin olmadığı grafikteki eğrilerinden anlaşılmaktadır. Fakat 30 J ve 40 J enerji seviyelerinde uygulanan darbe testi esnasında tamamen delinme olayının olduğunu ifade etmektedir (Şekil 4.30). CFRP kompozitlere; 10 J darbe enerjisiyle vurulduğunda 6.901 J, 20 J darbe enerjisiyle vurulduğunda 19.233 J, 30 J darbe enerjisiyle vurulduğunda 25.737 J, 40 J darbe enerjisiyle vurulduğunda 25.496 J enerji değerini absorbe ettiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.31: CFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki çökme-zaman grafiği.

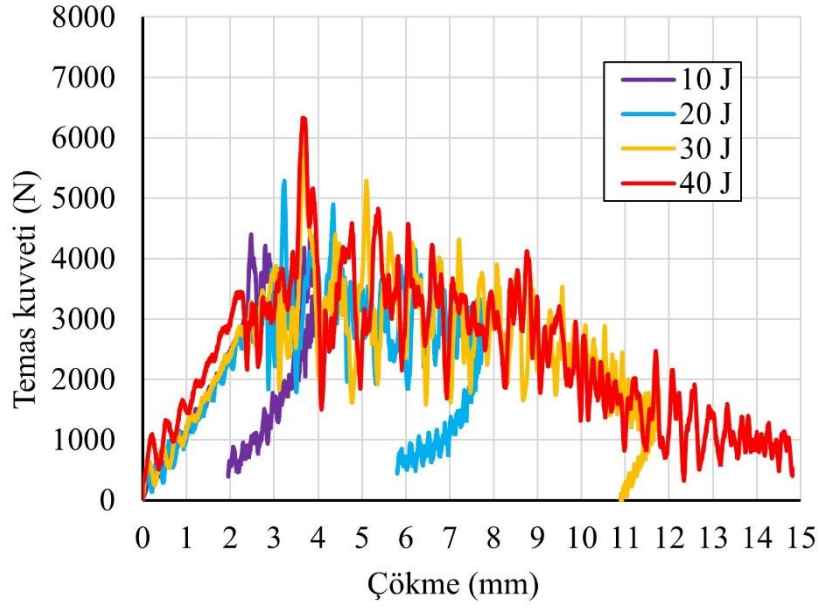
Uygulanan darbe enerji değişimine göre GFRP kompozitlerde oluşturduğu çökme değerlerine bakıldığında; 10 J enerji seviyesinde 4.344 mm, 20 J enerji seviyesinde 8.893 mm, 30 J enerji seviyesinde 12.328 mm ve 40 J enerji seviyesinde 12.244 mm çökme değeri oluşturduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.31).



Şekil 4.32: GFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki darbe vurucu hızı-zaman grafiği.

CFRP kompozitlerin düşük hızlı darbe testlerinin malzemeye uygulandığı darbe vurucu hızının malzemeye temasından alınan hız-zaman grafiğine bakıldığında; 10 J ve 20 J enerji seviyesinde kompozit malzemedeki delinme olayı gerçekleşmediği için vurucu hızının tamamını alarak testi tamamlarken, 30 J ve 40 J enerji seviyesi değerinde tam delinme olayı gerçekleştiğinden vurucu hızı sıfırlanmadan test tamamlanmıştır (Şekil 4.32).

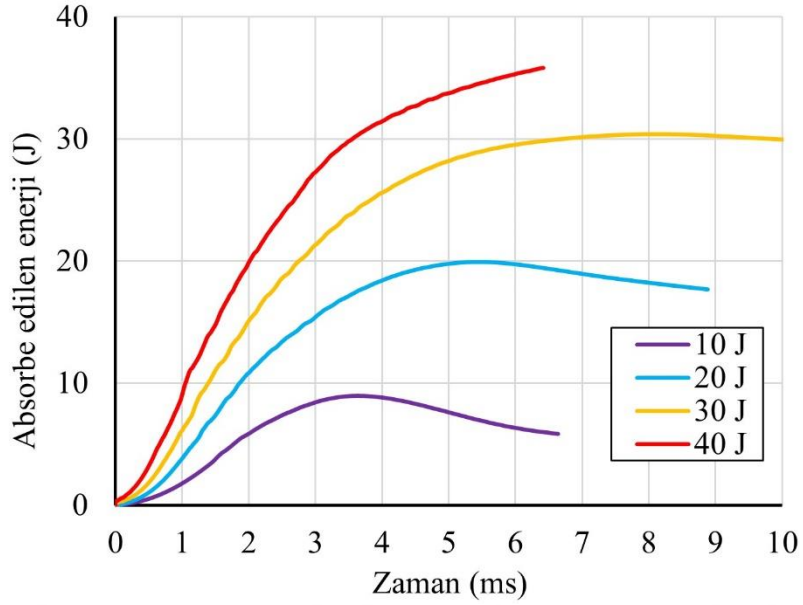
Cam ve karbon elyaf katmanların birlikte dizilimiyle oluşturulmuş cam-karbon/epoksi (GCFRP) hibrit kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışlarını incelemek çalışmanın önemli kısımlarından biridir. Çünkü cam/epoksi kompozitlerin darbe dayanıklılığının karbon/epoksi kompozitlerin darbe dayanıklılığından daha iyi olmasıdır. GCFRP tabakalı hibrit kompozitlerin alt ve üst katmanların 2 tabaka cam elyaf kumaştan merkezlerinde ise 4 kat karbon elyaf kumaş bulunmaktadır. Bu cam-karbon hibritleşme etkisiyle darbe dayanımının artırılması hedeflenmiştir. Cam-karbon/epoksi (GCFRP) hibrit kompozitlere 10J, 20 J, 30 J ve 40 J enerji seviyelerinde uygulanan darbe testlerinden elde edilen verilere göre; temas kuvveti – çökme grafiği Şekil 4.33'de, absorbe edilen enerji- zaman grafiği Şekil 4.34'de, çökme-zaman grafiği Şekil 4.35'de ve darbe hızı-zaman grafiği Şekil 4.36'da gösterilmiştir.



Şekil 4.33: GCFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki kuvvet-deplasman grafiği.

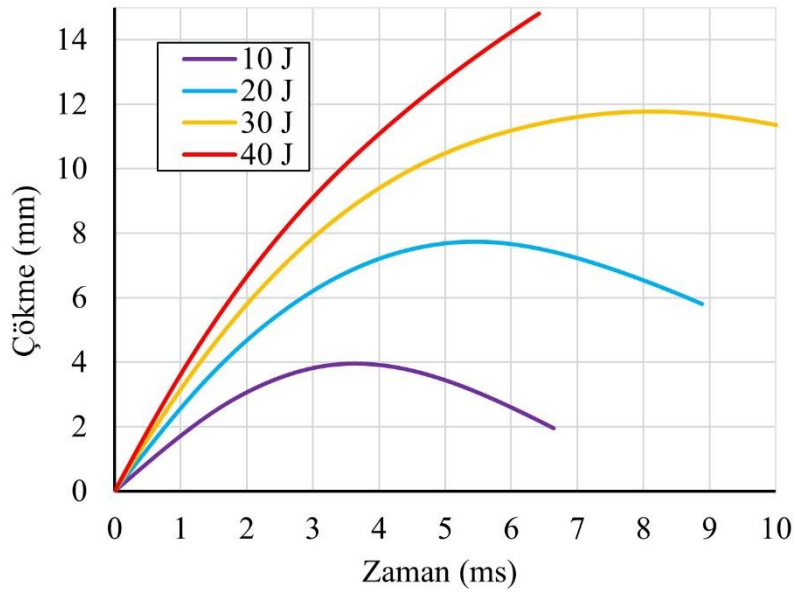
Şekil 4.33’de GCFRP kompozitlerin kuvvet-çökme eğrileri incelendiğinde; 10 J, 20 J değerinde geri tepme meydana gelerek açık bir eğri oluşmuştur. 30 J enerji seviyesine geçildikten sonra penetrasyon olayı meydana gelmiştir, eğri açık bir duruma geçmeye başlamıştır. Enerjinin 40 J değerine çıkmasıyla birlikte perforasyon olayı gerçekleşmiş eğri tamamen açık hale gelerek sonlanmıştır. Şekil 4.33’deki GCFRP hibrit kompozitlerde kuvvet-çökme eğrileri incelendiğinde, Şekil 4.25’deki GFRP kompozitlerin kuvvet-çökme davranışlarının benzer olduğu sonuca varılmıştır. GCFRP hibrit kompozitlerin tabaka diziliminde en üst ve en alt tabakanın cam fiber elyaf olmasından dolayı GFRP kompozitlerin darbe testlerine verdiği tepkiler benzer olmuştur. CFRP kompozitlerin diğer iki kompozit tipine göre erken hasar başladığı ve hasara başladığı temas kuvvetinin daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Uygulanan darbe enerji değişimine göre düşük hızlı darbe testi yapılan cam-karbon/epoksi (GCFRP) hibrit kompozitlerin maksimum temas kuvveti değerlerine bakıldığında; 10 J enerji seviyesinde 4402.804 N, 20 J enerji seviyesinde 5292.609 N, 30 J enerji seviyesinde 5939.741 N ve 40 J enerji seviyesinde 6332.642 N maksimum temas kuvveti değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. 40 J enerji seviyesine gelmeden tam delinme olayı (perforasyon) gerçekleştiği artırılan maksimum temas kuvveti değeri 10 J-40 J enerji seviyesi arasında artmış olduğu sonucuna varılmıştır.



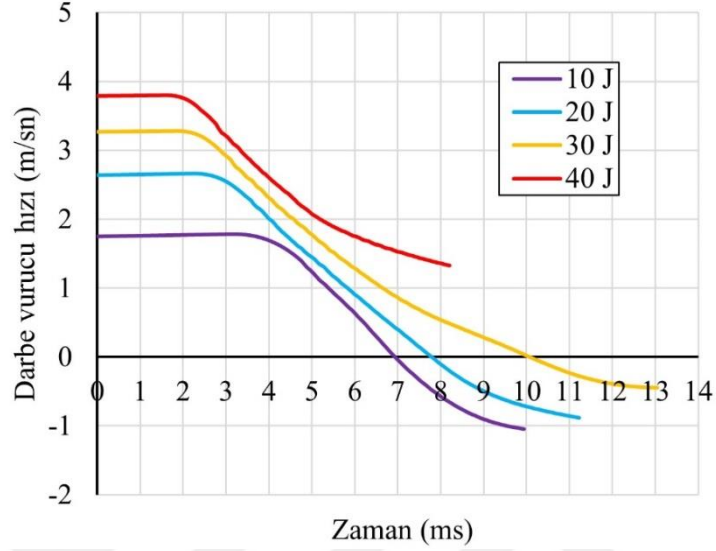
Şekil 4.34: GCFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki absorbe edilen enerji-zaman grafiği.

GCFRP kompozitlerin absorbe edilen enerji-zaman grafiğine bakıldığında; 10 J, 20 J ve 30 J değerlerinde delinmenin olmadığı grafik eğrilerinden anlaşılmaktadır. Fakat 40 J değerinde uygulanan darbe testi esnasında tamamen delinme olayı gerçekleştiği için eğri yarım kalarak sonlanmıştır (Şekil 4.34). GCFRP kompozitlere; 10 J darbe enerjisiyle vurulduğunda 5.834 J, 20 J darbe enerjisiyle vurulduğunda 17.672 J, 30 J darbe enerjisiyle vurulduğunda 29.794 J, 40 J darbe enerjisiyle vurulduğunda 35.814 J enerji absorbe ettiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.35: GCFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki çökme-zaman grafiği.

Uygulanan darbe enerji değişimine göre GCFRP kompozitlerde oluşturduğu çökme değerlerine bakıldığında; 10 J enerji seviyesinde 3.954 mm, 20 J enerji seviyesinde 7.735 mm, 30 J enerji seviyesinde 11.772 mm ve 40 J enerji seviyesinde 14.811 mm çökme değeri oluşturduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.35).

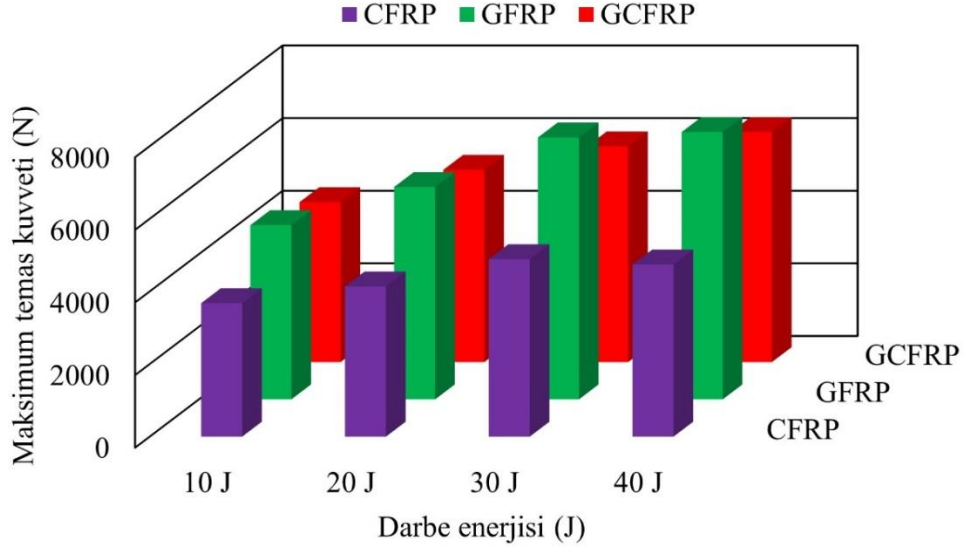


Şekil 4.36: GCFRP kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki darbe vurucu hızı-zaman grafiği.

GCFRP kompozitlerin darbe vurucu hızının malzemeye temasından alınan hız-zaman grafiğindeki eğrilere bakıldığında; 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyesinde kompozit malzemede delinme olayı gerçekleşmediği için vurucu hızının tamamını alarak test tamamlanırken, 40 J enerji seviyesi değerinde malzemede tam delinme olayı gerçekleştiğinden test hızı sıfırlanmadan test sonlanmıştır (Şekil 4.36).

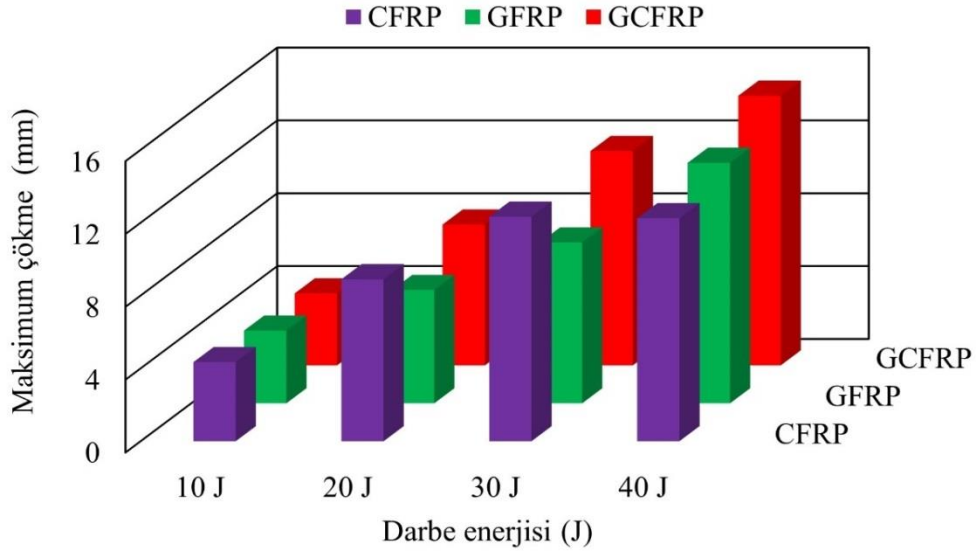
Cam/epoksi kompozitlerin $[G]_8$, karbon/epoksi kompozitlerin $[C]_8$ ve cam-karbon/epoksi kompozitlerin $[G_2C_2]_8$ normal ortam koşullarında düşük hızlı darbe test davranışlarının genel değerlendirilmesi yapılmıştır. Yaşlandırma ortamlarına konulmadan önce delinme enerjisini belirlemek için 10 J, 20 J, 30 J ve 40 J olmak üzere dört farklı enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır.

Düşük hızlı darbe testi yapılan GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin maksimum temas kuvveti değerlerinin kıyaslanması Şekil 4.37'de gösterilmiştir. Darbe testlerinden alınan temas kuvvetine bağlı olarak kompozit numunelerin üzerinde oluşturduğu maksimum çökme değerlerinin kıyaslanması Şekil 4.38'de gösterilmiştir. Kompozit malzemelere farklı enerji seviyelerinde uygulanan darbe enerjilerinin kompozit malzemelere nüfuziyet enerjisini belirleyen absorbe edilen enerjilerinin kıyaslanması Şekil 4.39'da gösterilmiştir.



Şekil 4.37: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin farklı darbe enerji seviyelerindeki maksimum temas kuvveti değerleri.

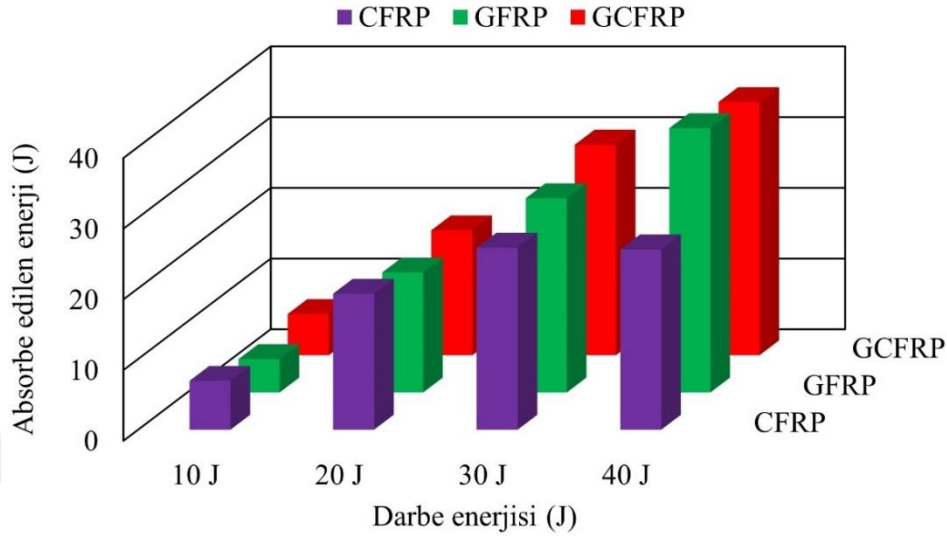
Uygulanan tüm darbe enerji seviyelerinde maksimum temas kuvveti değerinin en fazla GFRP kompozitlerde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Maksimum temas kuvvetleri; CFRP kompozitlerde 4888 N, GFRP kompozitlerde 7361 N, GCFRP kompozitlerde 6332 N değerlerinde olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 4.37).



Şekil 4.38: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin farklı darbe enerji seviyelerindeki maksimum çökme değerleri.

Uygulanan tüm darbe enerji seviyelerinde maksimum çökme değerinin en fazla olduğu kompozit tipinin GCFRP hibrit kompozitlerde olduğu sonucuna varılmıştır.

Maksimum çökme değerleri; CFRP kompozitlerde 12,32 mm , GFRP kompozitlerde 13,21 mm ve GCFRP kompozitlerde ise 14,81 mm değerinde çökme olduğu görülmüştür (Şekil 4.38).



Şekil 4.39: GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin farklı darbe enerji seviyelerindeki absorbe edilen enerjileri.

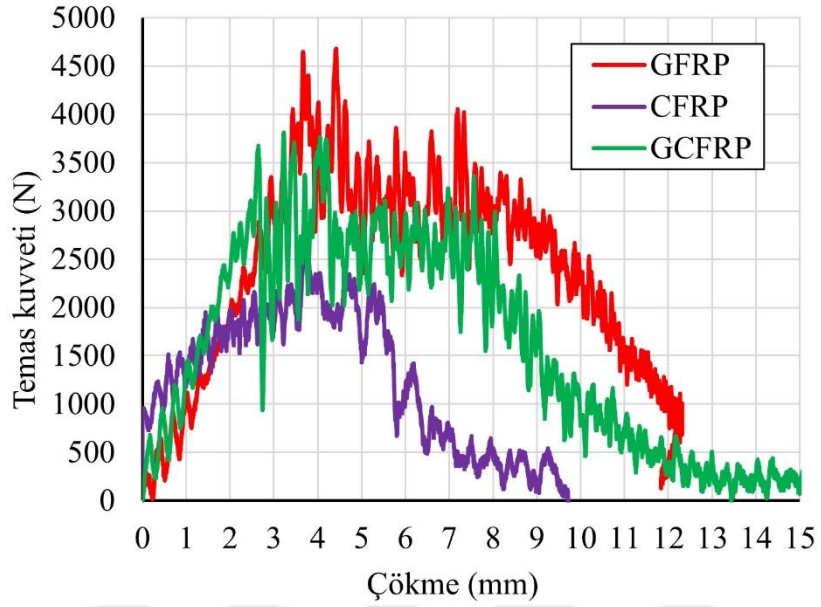
Cam/epoksi (GFRP) kompozitlerin, karbon/epoksi (CFRP) kompozitlerden daha dayanıklı olmasının sebebi cam elyafların darbe yüküne karşı daha sünek yapıda olmasıdır. Karbon elyaflar ise cam elyaflara göre daha kırılğan bir özelliğe sahiptirler. Karbon elyafların merkezde bulunduğu üst ve alt katmanların cam elyafların dizilimiyle oluşturulan GCFRP hibrit kompozitlerin darbe dayanımının arttığı sonucuna varılmıştır. GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin Şekil 4.39'daki absorbe edilen enerji-darbe enerjisi grafiğine bakıldığında GFRP ve GCFRP kompozitlerin absorbe edilen enerji değerinin 40 J değerine kadar arttığı CFRP kompozitin ise 30 J değerinden sonra azaldığı tespit edilmiştir. Bu veriler eşliğinde üç kompozit türü yaşlandırma ortamlarına koyulduğunda darbe dayanıklılığın azalacağı ön görülerek yaşlandırma ortamlarından alınan tüm kompozitlere 30 J darbe enerjisinde düşük hızlı darbe testlerinin uygulanmasına karar verilmiştir.

Deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamlarında 30, 60 ve 90 gün boyunca yaşlandırılmış kompozitler yaşlandırıldıkları ortamlardan alındıktan sonra 30 J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testleri yapılmış; temas kuvveti, deplasman (çökme) ve absorbe edilen enerji değerleri hesaplanarak Çizelge 4.6'da sunulmuştur. Yaşlandırma ortamının, yaşlandırma süresinin ve kompozit numune tipinin etkisinin düşük hızlı darbe test davranışı için testler sonucu elde edilen temas kuvveti, çökme ve absorbe edilen enerji değerleri kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

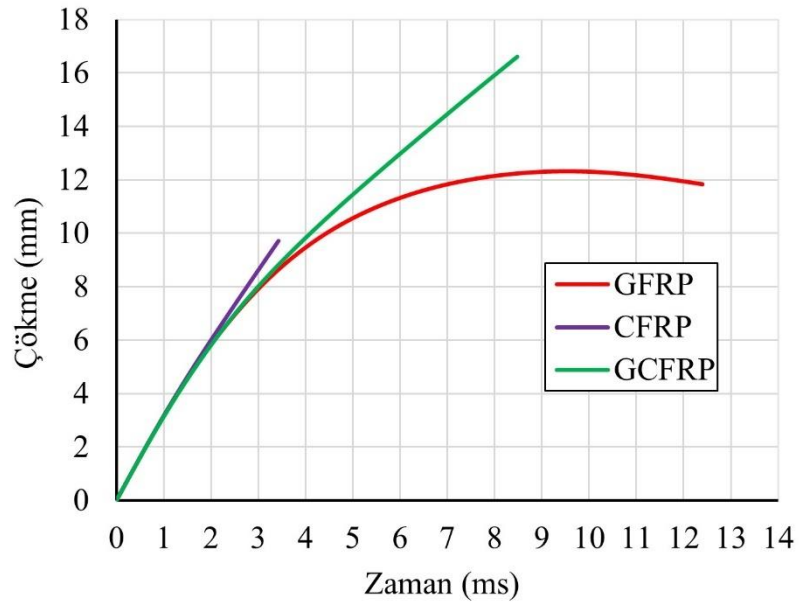
Çizelge 4.6: GFRP, CFRP ve GCFRP yaşlandırılmış kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki mekanik özelliklerinin kıyaslanması.

Ortam ve Numune tipi		Temas kuvveti (N)	Çökme (mm)	Absorbe edilen enerji (J)
Normal ortam (N.Ş.A)	GFRP	7210.891	8.829	27.479
	CFRP	4888.152	12.328	25.737
	GCFRP	5939.741	11.772	29.794
Deniz Suyu (30 gün)	GFRP	6864.651	9.1239	27.238
	CFRP	3189.432	12.300	14.219
	GCFRP	5465.948	11.858	26.804
Deniz Suyu (60 gün)	GFRP	4807.261	10.498	28.137
	CFRP	3131.653	10.659	13.794
	GCFRP	3975.235	15.390	24.432
Deniz Suyu (90 gün)	GFRP	4680.146	12.317	29.595
	CFRP	2634.748	9.713	12.279
	GCFRP	3813.452	16.608	24.239
Motor Yağı (30 gün)	GFRP	6829.549	9.272	26.078
	CFRP	3351.215	12.304	23.025
	GCFRP	5789.514	11.805	28.630
Motor Yağı (60 gün)	GFRP	5119.270	12.441	26.309
	CFRP	3154.765	12.038	22.145
	GCFRP	5026.823	12.417	28.062
Motor Yağı (90 gün)	GFRP	4807.261	10.506	26.998
	CFRP	3027.650	11.506	17.290
	GCFRP	4495.251	13.223	27.720
Dizel Yakıt (30 gün)	GFRP	6933.549	9.642	27.772
	CFRP	3674.781	12.866	23.459
	GCFRP	5708.622	10.607	29.510
Dizel Yakıt (60 gün)	GFRP	5639.287	9.592	27.594
	CFRP	3143.209	12.723	23.203
	GCFRP	4957.488	11.814	29.823
Dizel Yakıt (90 gün)	GFRP	5142.382	9.606	27.510
	CFRP	3085.429	12.674	22.602
	GCFRP	3963.679	13.389	26.736

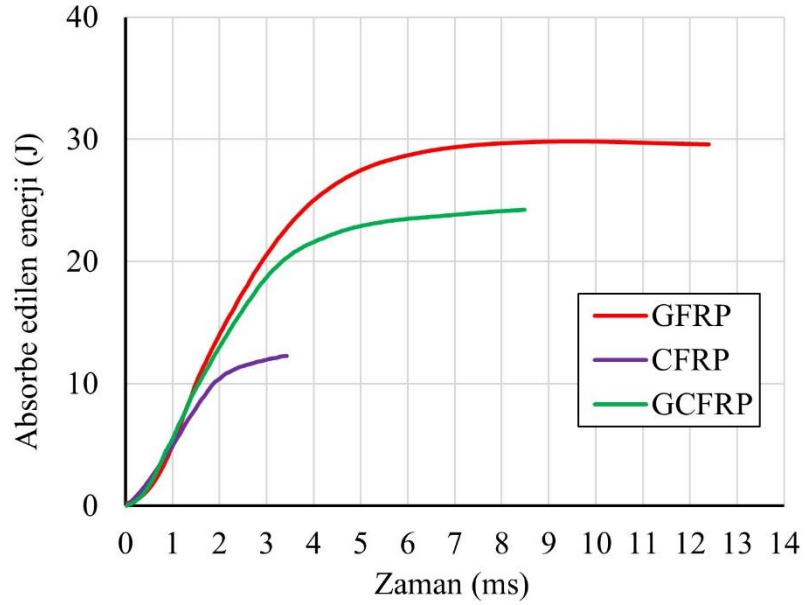
30 J darbe enerjisinde darbe testi yapılan, 90 gün boyunca deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin; kuvvet-çökme grafikleri Şekil 4.40, çökme-zaman grafiği Şekil 4.41’de, absorbe edilen enerji-zaman grafiği Şekil 4.42’de gösterilmiştir.



Şekil 4.40: 90 gün deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin temas kuvveti-çökme grafiği.



Şekil 4.41: 90 gün deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin çökme-zaman grafiği.



Şekil 4.42: 90 gün deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin absorbe edilen enerji -zaman grafiği.

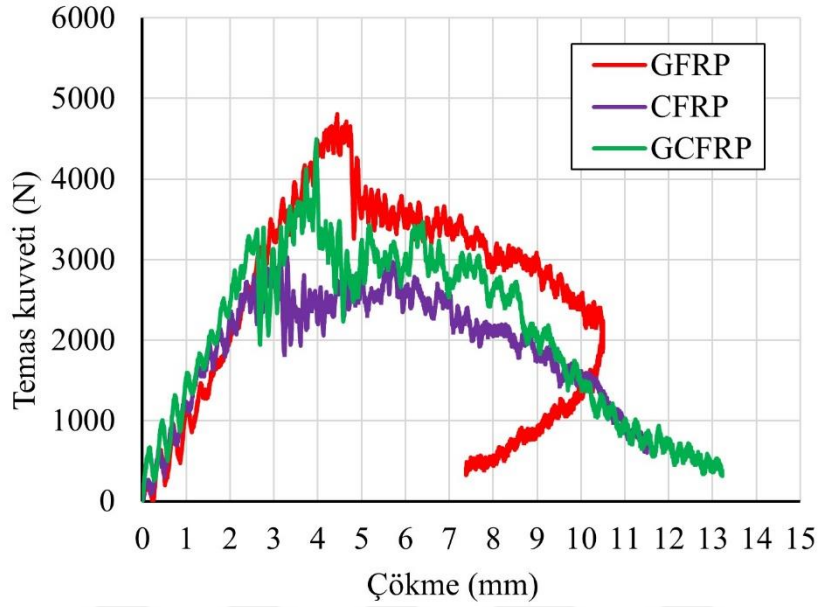
Deniz suyu ortamında 90 gün boyunca yaşlandırma yapılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisi altındaki düşük hızlı darbe davranışları incelenmiştir. Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış kompozitleri darbe dayanıklılığının oda sıcaklığı ortamına göre ciddi oranda azaldığı tespit edilmiştir. GFRP kompozitlerin maksimum temas kuvveti % 35.096, CFRP kompozitlerin maksimum temas kuvveti %46.100, GCFRP kompozitlerin maksimum temas kuvvetinin %35.797 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır.

90 gün boyunca deniz suyunda yaşlandırılmış kompozitlerin 30 J darbe enerjili darbe testlerinden elde edilen temas kuvveti değerlerine bakıldığında; GFRP kompozitin 4680.146 N, CFRP kompozitin 2634,748 N, GCFRP hibrit kompozitin 3813.492 N olduğu hesaplanmıştır (Şekil 4.40).

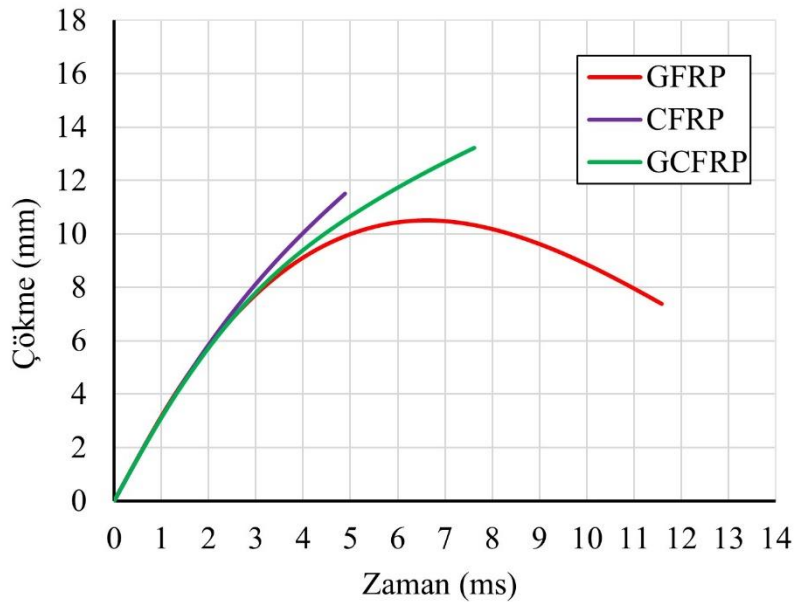
90 gün boyunca deniz suyunda yaşlandırılmış kompozitlerin 30 J darbe enerjili darbe testlerinden elde edilen çökme değerlerine bakıldığında; GFRP kompozitin 12.317 mm, CFRP kompozitin 9.713 mm ve GCFRP hibrit kompozitin 16.608 mm çökme değeri oluşturduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.41).

90 gün boyunca deniz suyunda yaşlandırılmış kompozitlerin 30 J darbe enerjili darbe testlerinden elde edilen absorbe edilen darbe enerjilerine bakıldığında; GFRP kompozitin 29.595 J, CFRP kompozitin 12.279 J ve GCFRP hibrit kompozitin 24.239 J enerjiyi absorbe ettiği sonucuna varılmıştır (Şekil 4.42).

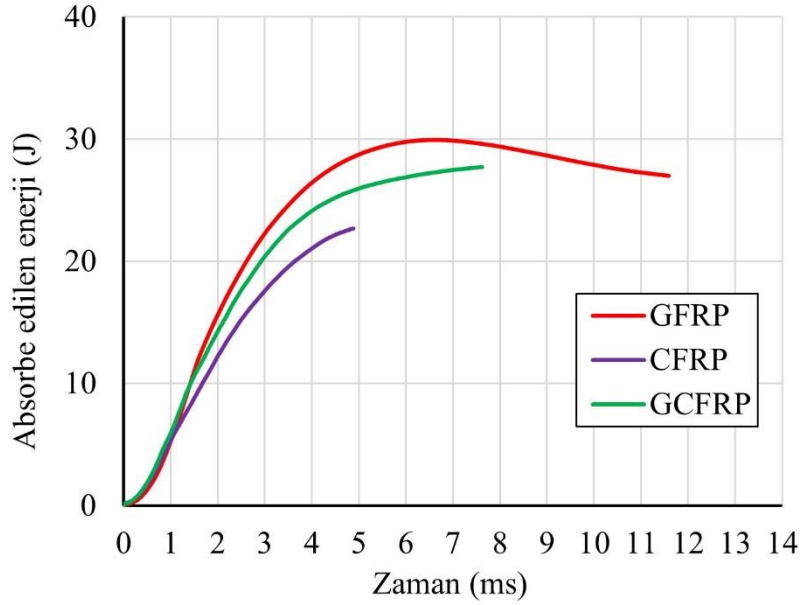
30 J darbe enerjisinde darbe testi yapılan, 90 gün boyunca motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin; kuvvet-çökme grafikleri Şekil 4.43'de, çökme-zaman grafiği Şekil 4.44'de, absorbe edilen enerji-zaman grafiği Şekil 4.45'de gösterilmiştir.



Şekil 4.43: 90 gün motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP,CFRP ve GCFRP kompozitlerin temas kuvveti-çökme grafiği.



Şekil 4.44: 90 gün motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP,CFRP ve GCFRP kompozitlerin çökme-zaman grafiği.



Şekil 4.45: 90 gün motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin absorbe edilen enerji -zaman grafiği.

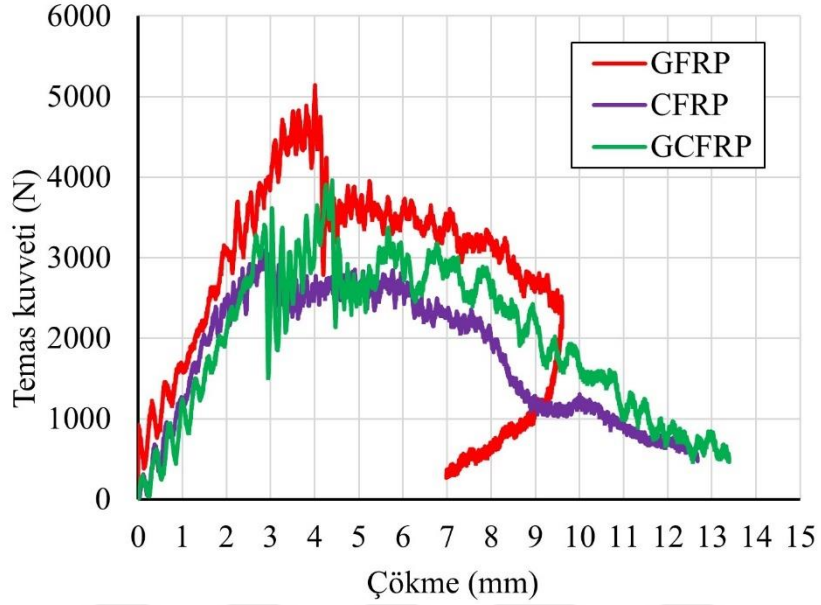
Motor yağı ortamında 90 gün boyunca yaşlandırma yapılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisi altındaki düşük hızlı darbe davranışları incelenmiştir. Motor yağı ortamında yaşlandırılmış kompozitleri darbe dayanıklılığının oda sıcaklığı ortamına göre ciddi oranda azaldığı tespit edilmiştir. GFRP kompozitlerin maksimum temas kuvveti % 33.333, CFRP kompozitlerin maksimum temas kuvveti % 38.061, GCFRP kompozitlerin maksimum temas kuvvetinin %24.319 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır (Şekil 4.43).

90 gün boyunca motor yağı ortamında yaşlandırılmış kompozitlerin 30 J darbe enerjili darbe testlerinden elde edilen temas kuvveti değerlerine bakıldığında; GFRP kompozitin 4807.261 N, CFRP kompozitin 3027.650 N, GCFRP hibrit kompozitin 4495.251 N olduğu hesaplanmıştır (Şekil 4.43).

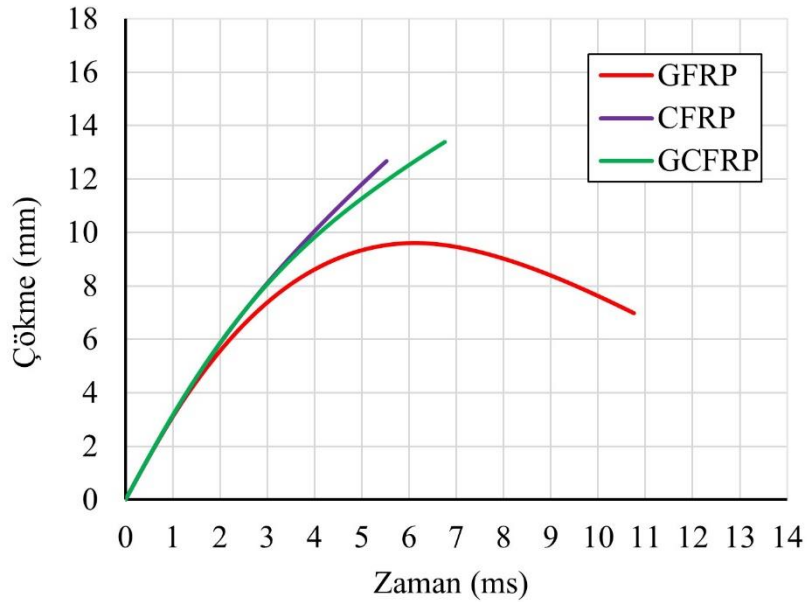
90 gün boyunca motor yağı ortamında yaşlandırılmış kompozitlerin 30 J darbe enerjili darbe testlerinden elde edilen çökme değerlerine bakıldığında; GFRP kompozitin 10.506 mm, CFRP kompozitin 11.506 mm, GCFRP hibrit kompozitin 13.223 mm çökme değeri oluşturduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.44).

90 gün boyunca motor yağı ortamında yaşlandırılmış kompozitlerin 30 J darbe enerjili darbe testlerinden elde edilen absorbe edilen darbe enerjilerine bakıldığında; GFRP kompozitin 26.998 J, CFRP kompozitin 17.290 J, GCFRP hibrit kompozitin 27.720 J enerjii absorbe ettiği sonucuna varılmıştır (Şekil 4.45).

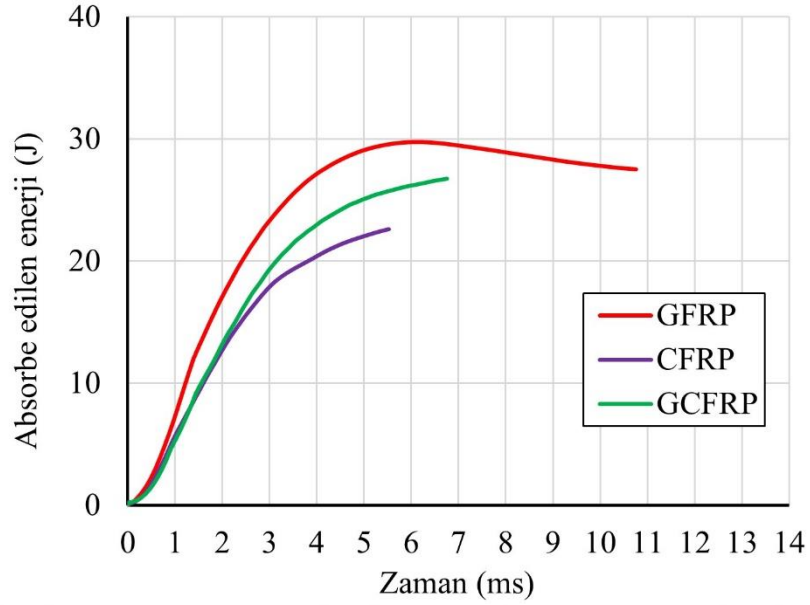
30 J darbe enerjisinde darbe testi yapılan, 90 gün boyunca dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin; kuvvet-çökme grafikleri Şekil 4.46'da, çökme-zaman grafiği Şekil 4.47'de, absorbe edilen enerji-zaman grafiği Şekil 4.48'de gösterilmiştir.



Şekil 4.46: 90 gün dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin temas kuvveti-çökme grafiği.



Şekil 4.47: 90 gün dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin çökme-zaman grafiği.



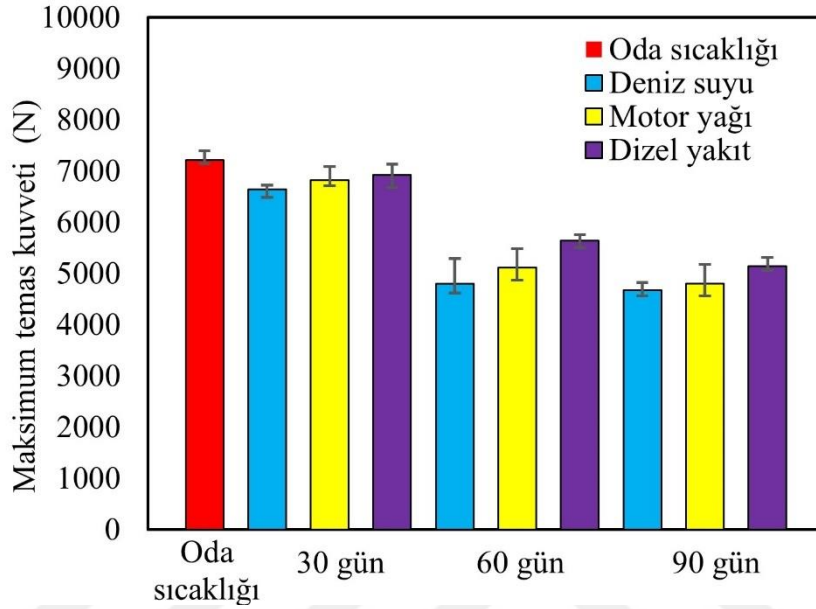
Şekil 4.48: 90 gün dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin absorbe edilen enerji -zaman grafiği.

Dizel yakıt ortamında 90 gün boyunca yaşlandırma yapılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisi altındaki düşük hızlı darbe davranışları incelenmiştir. Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış kompozitlerin darbe dayanıklılığının oda sıcaklığı ortamına göre ciddi oranda azaldığı tespit edilmiştir. GFRP kompozitlerin maksimum temas kuvveti %28.685, CFRP kompozitlerin maksimum temas kuvveti % 36.879, GCFRP kompozitlerin maksimum temas kuvvetinin %33.268 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır. 90 gün boyunca dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış kompozitlerin 30 J darbe enerjili darbe testlerinden elde edilen temas kuvveti değerlerine bakıldığında; GFRP kompozitin 5142.382 N, CFRP kompozitin 3085.429 N ve GCFRP hibrit kompozitin de 3963.679 N olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 4.46).

90 gün boyunca dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış kompozitlerin 30 J darbe enerjili darbe testlerinden elde edilen çökme değerlerine bakıldığında; GFRP kompozitin 9.606 mm, CFRP kompozitin 12.674 mm, GCFRP hibrit kompozitin 13.389 mm çökme değeri oluşturduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 4.47).

90 gün boyunca dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış kompozitlerin 30 J darbe enerjili darbe testlerinden elde edilen absorbe edilen darbe enerjilerine bakıldığında; GFRP kompozitin 27.510 J, CFRP kompozitin 22.602 J ve GCFRP hibrit kompozitin 26.736 J enerjiyi absorbe ettiği sonucuna varılmıştır (Şekil 4.48).

90 gün boyunca deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamında yaşlandırma yapılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisi altındaki düşük hızlı darbe davranışları elde edilmiştir. GFRP kompozitlerin 30, 60 ve 90 gün periyotları boyunca yaşlandırma yapılmış kompozitlerin darbe davranışlarından elde edilen maksimum temas kuvvetleri Şekil 4.49 ve maksimum çökme değerleri 4.50'de gösterilmiştir.



Şekil 4.49: GFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki maksimum temas kuvvetlerinin ortam şartlarına göre kıyaslanması.

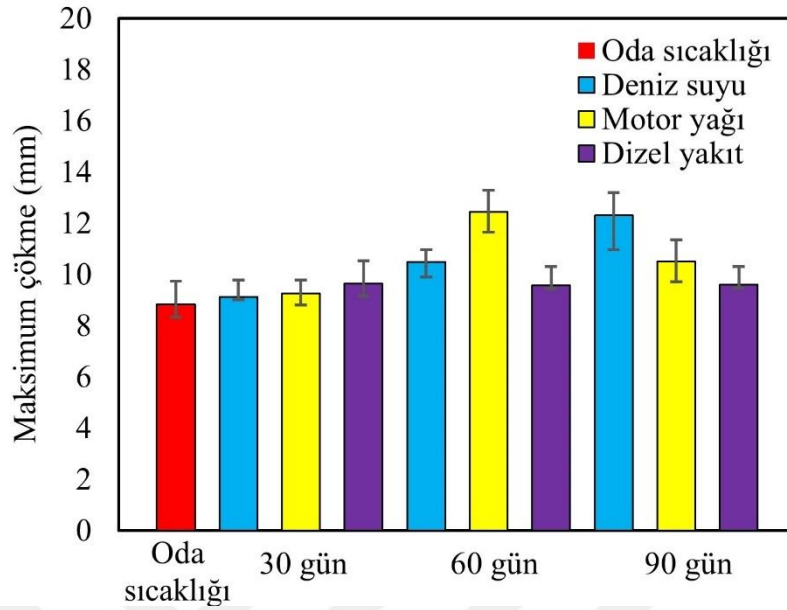
Cam/epoksi GFRP kompozitlerin maksimum temas kuvvetleri tüm ortam şartlarına bakılarak kıyaslandığında düşük hızlı darbe dayanımını en çok azaltan ortamın deniz suyu ortamı olduğu sonucuna varılmıştır.

GFRP kompozitin oda sıcaklığındaki maksimum temas kuvveti 30 günlük deniz suyu ortamında yaşlandırılmasının etkisiyle %7.852 oranında azaldığı, 60 günlük yaşlandırma etkisiyle %33.333 oranında azaldığı ve 90 günlük yaşlandırma etkisiyle %35.096 oranında azaldığı gözlemlenmiştir.

GFRP kompozitin oda sıcaklığındaki maksimum temas kuvveti değerini 30 günlük motor yağı ortamında yaşlandırılmasının etkisiyle %5.288 oranında azaldığı, 60 günlük yaşlandırma etkisiyle %29.006 oranında azaldığı ve 90 günlük yaşlandırma etkisiyle %33.333 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

GFRP kompozitin oda sıcaklığındaki maksimum temas kuvveti değerini 30 günlük dizel yakıt ortamında yaşlandırılmasının etkisiyle %3.846 oranında azaldığı, 60 günlük

yaşlandırma etkisiyle %21.794 oranında azaldığı ve 90 günlük yaşlandırma etkisiyle %28.685 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır. (Şekil 4.49).



Şekil 4.50: GFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki maksimum çökme değerlerinin ortam şartlarına göre kıyaslanması.

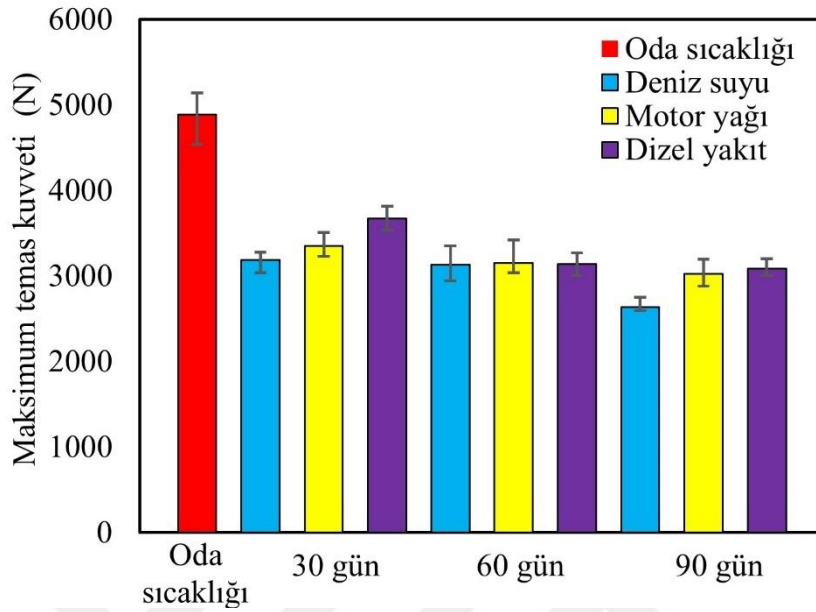
Cam/epoksi GFRP kompozitlerin maksimum çökme değerlerinin tüm ortam şartlarına bakılarak kıyaslandığında düşük hızlı darbe testlerinde çökme değerini en çok artıran ortamın deniz suyu ortamı olduğu sonucuna varılmıştır. Cam kompozit numuneler 30 J darbe enerjisi altında tamamen delinme gerçekleşmediği için çökme değerleri değişkenlik göstermiştir. Yaşlandırma ortamlarının etkisiyle 30 gün, 60 gün ve 90 gün sonunda yapılan darbe testlerinde farklı davranışlar göstermişlerdir. Yaşlandırmanın etkisiyle GFRP kompozitlerin darbe dayanımı azalarak penetrasyondan perforasyona geçiş başlamıştır.

GFRP kompozitin oda sıcaklığındaki maksimum çökme değeri 30 günlük deniz suyu ortamında yaşlandırılmasının etkisiyle %3.34, 60 günlük yaşlandırma etkisiyle %18.903 ve 90 günlük yaşlandırma etkisiyle %39.506 oranında çökme değerinin arttığı tespit edilmiştir.

GFRP kompozitin oda sıcaklığındaki maksimum çökme değerini 30 günlük motor yağı ortamında yaşlandırılmasının etkisiyle %5.017, 60 günlük yaşlandırma etkisiyle %40.917, 90 günlük yaşlandırma etkisiyle %19.033 oranında çökme değerinin arttığı hesaplanmıştır..

GFRP kompozitin oda sıcaklığındaki maksimum çökme değerini 30 günlük dizel yakıt ortamında yaşlandırılmasının etkisiyle %9.208, 60 günlük yaşlandırma etkisiyle %8.641 ve 90 günlük yaşlandırma etkisiyle %8.800 oranında çökme değerinin arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.50).

GFRP kompozitlerin 30, 60 ve 90 gün periyotları boyunca yaşlandırma yapılmış kompozitlerin darbe davranışlarında elde edilen maksimum temas kuvvetleri Şekil 4.51, maksimum çökme değerleri 4.52’de gösterilmiştir.

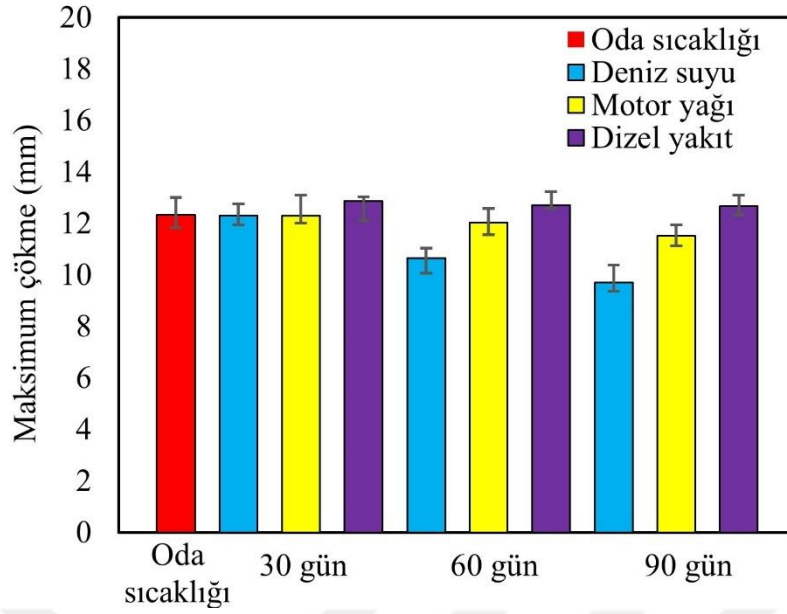


Şekil 4.51: CFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki maksimum temas kuvvetlerinin ortam şartlarına göre kıyaslanması.

Karbon/epoksi CFRP kompozitlerin maksimum temas kuvvetleri tüm ortam şartlarına bakılarak kıyaslandığında düşük hızlı darbe dayanımını en çok azaltan ortamın deniz suyu ortamı olduğu sonucuna varılmıştır. CFRP kompozitin oda sıcaklığındaki maksimum temas kuvveti 30 günlük deniz suyu ortamında yaşlandırılmasının etkisiyle %34.751 oranında azalttığı, 60 günlük yaşlandırma etkisiyle %35.933 oranında azaldığı, 90 günlük yaşlandırma etkisiyle %46.099 oranında azalttığı sonucuna varılmıştır.

CFRP kompozitin oda sıcaklığındaki maksimum temas kuvveti değerini 30 günlük motor yağı ortamında yaşlandırılmasının etkisiyle %31.442 oranında azaldığı, 60 günlük yaşlandırma etkisiyle %35.461 oranında azalttığı, 90 günlük yaşlandırma etkisiyle %38.061 oranında azalttığı gözlenmiştir.

CFRP kompozitin oda sıcaklığındaki maksimum temas kuvveti değerini 30 günlük dizel yakıt ortamında yaşlandırılmasının etkisiyle %24.822 oranında azaldığı, 60 günlük yaşlandırma etkisiyle %35.697 oranında azaldığı ve 90 günlük yaşlandırma etkisiyle %36.879 oranında azalttığı tespit edilmiştir (Şekil 4.51).



Şekil 4.52: CFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki maksimum çökme değerlerinin ortam şartlarına göre kıyaslanması.

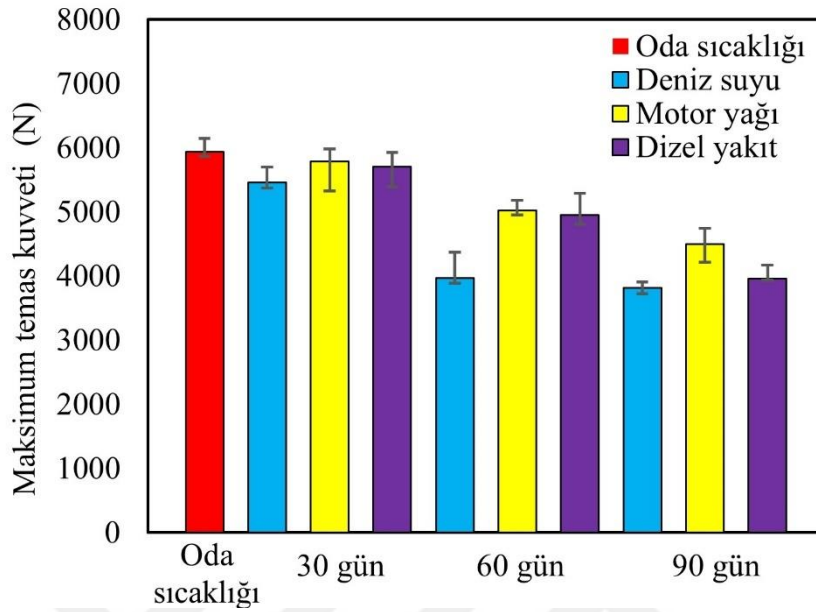
Karbon/epoksi (CFRP) kompozitlerin 30 gün, 60 gün ve 90 gün boyunca yaşlandırılarak düşük hızlı darbe testlerinden alınan maksimum çökme değerlerine bakıldığında çökme değeri ortam türü ve süresine göre değişkenlik göstermiştir. En yüksek çökme değerinin deniz suyu yaşlandırma ortamında olduğu tespit edilmiştir. Karbon kompozit numunelerin 30 J darbe enerjisi altında tamamen delinmesi gerçekleşmiştir.

CFRP kompozitin oda sıcaklığındaki maksimum çökme değerinin 30 günlük deniz suyu ortamında yaşlandırılmasının etkisiyle %0.227 oranında azaldığı, 60 günlük yaşlandırma etkisiyle %13.538 oranında azaldığı ve 90 günlük yaşlandırma etkisiyle ise %21.211 oranında çökme değerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

CFRP kompozitin oda sıcaklığındaki maksimum çökme değerini 30 günlük motor yağı ortamında yaşlandırılmasının etkisiyle %0.196 oranında azaldığı, 60 günlük yaşlandırma etkisiyle %2.352 oranında azalttığını ve 90 günlük yaşlandırma etkisiyle %6.667 oranında azalttığı hesaplanmıştır.

CFRP kompozitin oda sıcaklığındaki maksimum çökme değerini 30 günlük dizel yakıt ortamında yaşlandırılmasının etkisiyle %4.364 oranında arttığı, 60 günlük yaşlandırma etkisiyle %3.204 oranında azaldığı ve 90 günlük yaşlandırma etkisiyle %2.806 oranında artırdığı tespit edilmiştir (Şekil 4.52).

GCFRP kompozitlerin 30, 60 ve 90 gün periyotları boyunca yaşlandırma yapılmış kompozitlerin darbe davranışlarında elde edilen maksimum temas kuvvetleri Şekil 4.53, maksimum çökme değerleri 4.54’de gösterilmiştir.

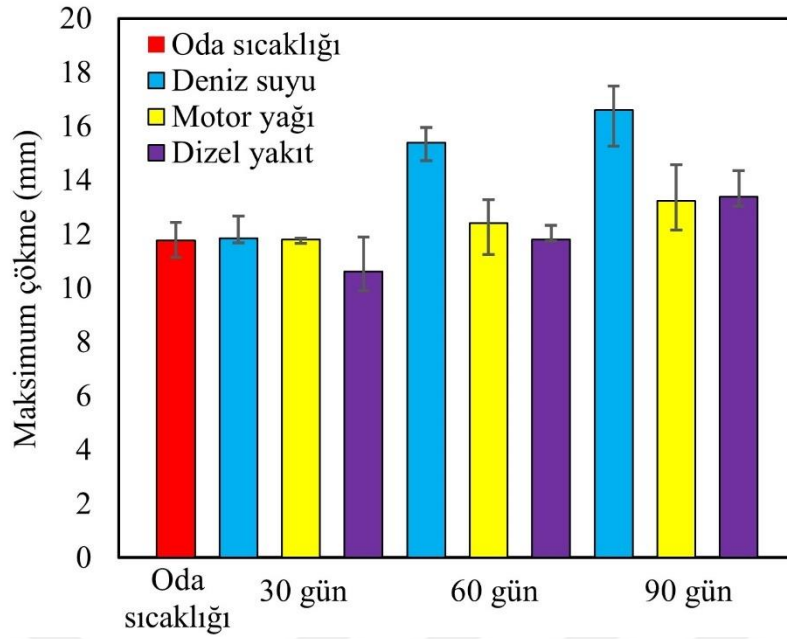


Şekil 4.53: GCFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki maksimum temas kuvvetlerinin ortam şartlarına göre kıyaslanması.

Cam-karbon/epoksi (GCFRP) hibrit kompozitlerin maksimum temas kuvvetleri tüm ortam şartlarına bakılarak kıyaslandığında düşük hızlı darbe dayanımını en çok azaltan ortamın deniz suyu ortamı olduğu sonucuna varılmıştır. GCFRP kompozitin oda sıcaklığındaki maksimum temas kuvveti 30 günlük deniz suyu ortamında yaşlandırılmasının etkisiyle %7.976 oranında azalttığı, 60 günlük yaşlandırma etkisiyle %33.073 oranında azaldığı, 90 günlük yaşlandırma etkisiyle %35.797 oranında azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.53).

GCFRP kompozitin oda sıcaklığındaki maksimum temas kuvveti değerini 30 günlük motor yağı ortamında yaşlandırılmasının etkisiyle %2.529 oranında azaldığı, 60 günlük yaşlandırma etkisiyle %15.369 oranında azalttığı, 90 günlük yaşlandırma etkisiyle %24.319 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

GCFRP kompozitin oda sıcaklığındaki maksimum temas kuvveti değerini 30 günlük dizel yakıt ortamında yaşlandırılmasının etkisiyle %3.891 oranında azaldığı, 60 günlük yaşlandırma etkisiyle %16.536 oranında azalttığı, 90 günlük yaşlandırma etkisiyle %33.268 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır (Şekil 4.53).



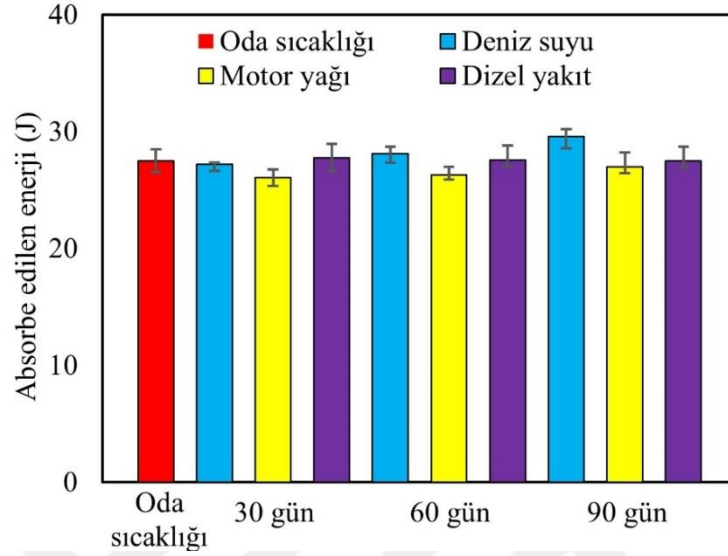
Şekil 4.54: GCFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki maksimum çökme değerlerinin ortam şartlarına göre kıyaslanması.

Cam-karbon/epoksi (GCFRP) hibrit kompozitlerin maksimum çökme değerlerinin tüm ortam şartlarına bakılarak kıyaslandığında düşük hızlı darbe testlerinde çökme değerini en çok artıran ortamın deniz suyu ortamı olduğu sonucuna varılmıştır. Normal ortam şartlarında 30 J enerjide penetrasyon davranış gösteren hibrit kompozit yaşlandırmanın etkisiyle GCFRP kompozitlerin darbe dayanımı azalarak perforasyon davranış göstermeye başlamıştır. GCFRP kompozitin oda sıcaklığındaki maksimum çökme değeri 30 günlük deniz suyu ortamında yaşlandırılmasının etkisiyle %0.730 oranında arttığı, 60 günlük yaşlandırma etkisiyle %30.730 oranında arttığı ve 90 günlük yaşlandırma etkisiyle %41.08 oranında çökme değerinin arttığı sonucuna varılmıştır.

GCFRP kompozitin oda sıcaklığındaki maksimum çökme değerini 30 günlük motor yağı ortamında yaşlandırılmasının etkisiyle %0.280 oranında arttığı, 60 günlük yaşlandırma etkisiyle %5.479 oranında arttığı ve 90 günlük yaşlandırma etkisiyle %12.325 oranında çökme değerinin arttığı gözlenmiştir.

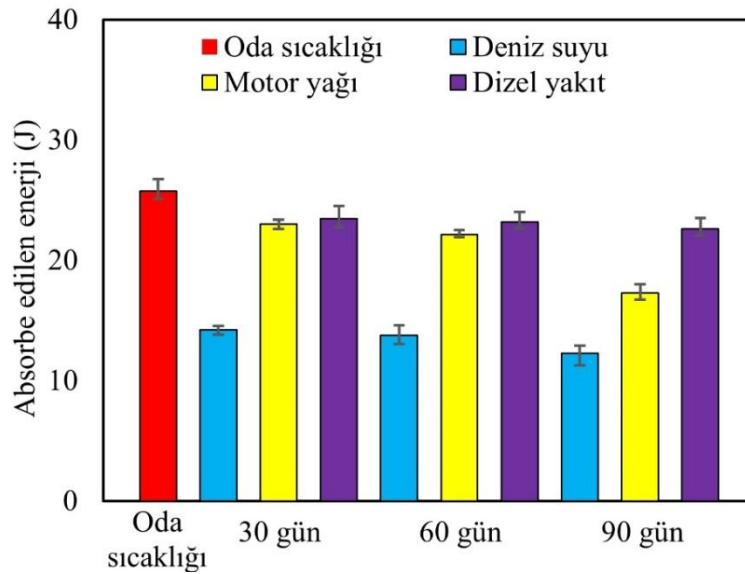
GCFRP kompozitin oda sıcaklığındaki maksimum çökme değerini 30 günlük dizel yakıt ortamında yaşlandırılmasının etkisiyle %9.208 oranında azaldığı, 60 günlük yaşlandırma etkisiyle %0.351 oranında arttığı ve 90 günlük yaşlandırma etkisiyle %13.736 oranında çökme değerinin arttığı tespit edilmiştir (Şekil 4.54).

30, 60 ve 90 gün periyotları boyunca deniz suyu, motor yağı, dizel yakıt ortamından yaşlandırma yapılmış kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki absorbe edilene enerjilerin oda sıcaklığındaki değerlerle kıyaslanması; GFRP kompozitler için Şekil 4.55’de, CFRP kompozitler için Şekil 4.56’da ve GCFRP kompozitler için Şekil 4.57’de gösterilmiştir.

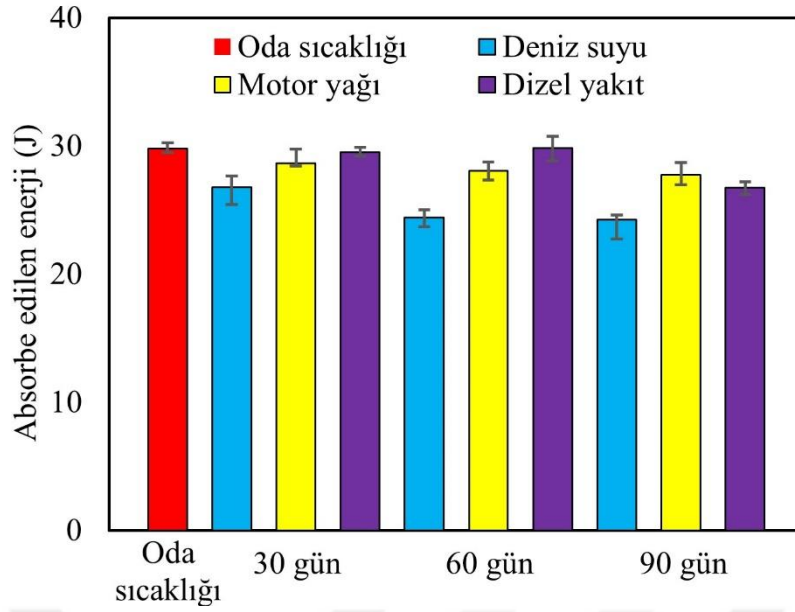


Şekil 4.55: GFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki absorbe edilen enerjilerin ortam şartlarına göre kıyaslanması.

GFRP kompozitler 30 J darbe enerjisiyle oda sıcaklığındaki penetrasyon davranış gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 4.31). Yaşlandırma ortam etkileriyle penetrasyondaki absorbe edilen enerjiyi artırarak perforasyon davranışa yaklaştırdığını gözlemlenmiştir (Şekil 4.55).



Şekil 4.56: CFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki absorbe edilen enerjilerin ortam şartlarına göre kıyaslanması.



Şekil 4.57: GCFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisindeki absorbe edilen enerjilerin ortam şartlarına göre kıyaslanması.

GFRP kompozitler 30 J darbe enerjisiyle oda sıcaklığındaki ortamda penetrasyon davranış gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 4.24). Yaşlandırma ortamı etkisiyle penetrasyondaki absorbe edilen enerjiyi artırarak perforasyon davranışa yaklaştırdığı tespit edilmiştir (Şekil 4.55). CFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisiyle oda sıcaklığındaki ortamda perforasyon (tamamen delinme) davranışı gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 4.30). CFRP kompozitlerin tüm yaşlandırma etkisiyle absorbe ettiği enerji değerleri azalmıştır. CFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisinin oda sıcaklığındaki absorbe edilen enerji değerini 90 gün deniz suyu yaşlandırma ortamı etkisiyle absorbe edilen enerji değerini % 52.29 oranında ve 90 gün motor yağı yaşlandırma ortamı etkisiyle %32.82 oranında, 90 gün dizel yakıt ortamı etkisiyle %12.80 oranında azaldığı gözlenmiştir (Şekil 4.56).

GCFRP kompozitlerin oda sıcaklığındaki absorbe edilen darbe enerjisi davranışı perforasyon davranış arasında olduğu bilinmektedir (Şekil 4.34). GCFRP kompozitler tüm yaşlandırma etkisiyle absorbe ettiği enerji değerleri azalmıştır. GCFRP kompozitlerin 30 J darbe enerjisinin oda sıcaklığındaki absorbe edilen enerji değerini 90 gün deniz suyu yaşlandırma ortamı etkisiyle absorbe edilen enerji değerini % 18.64, 90 gün motor yağı ortamı etkisiyle % 6.96, dizel yakıt ortamı etkisiyle %12.80 oranında absorbe edilen enerji değerinin azaldığı sonucuna varılmıştır (Şekil 4.57).

Çalışmada farklı enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testleri yapılan GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin alt ve üst yüzey hasarları Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7: Düşük hızlı darbe testi sonrası kompozitlerin yüzeylerinde oluşan hasarlar.

Numune	10 J	20 J	30 J	40 J	
CFRP kompozitler	Ön yüzey	Cöküntü	Artık deformasyon Fiber kırılması	Delaminasyon Yarılma Artık deformasyon	Artık deformasyon Yarılma Fiber kırılması
	Arka yüzey	Nokta çatlağı	Fiber kırılması Yarılma	Yarılma Delaminasyon Fiber kırılması	Fiber kırılması Yarılma Delaminasyon
GFRP kompozitler	Ön yüzey	Artık deformasyon Cöküntü	Artık deformasyon Cöküntü	Cöküntü Delaminasyon Artık deformasyon	Yarılma Fiber kırılması Artık deformasyon
	Arka yüzey	Cöküntü	Çarpaz şekilli çatlak Fiber kırılması	Fiber kırılması Delaminasyon Artık deformasyon Yarılma	Artık deformasyon Fiber kırılması Delaminasyon
GCFRP kompozitler	Ön yüzey	Artık deformasyon Cöküntü	Cöküntü Fiber kırılması Artık deformasyon	Yarılma Artık deformasyon Delaminasyon	Yarılma Delaminasyon Artık deformasyon
	Arka yüzey	Cöküntü	Delaminasyon Çarpaz şekilli çatlak	Yarılma Fiber kırılması	Yarılma Delaminasyon

GFRP, CFRP ve GCFRP kompozit numunelere farklı seviyelere sahip düşük hızlı darbe testi uygulandığında, uygulanan darbe enerji seviyesine göre numune yüzeylerinde çöküntü, fiber çatlağı, tek şekil çatlağı, çapraz şekilli çatlak, yarıma, artık deformasyon ve delaminasyon gibi oluşan hasar tipleri Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

Cam/epoksi kompozitlerde (GFRP)’de 10 J darbe enerjisinde ufak çöküntüler ve artık deformasyonlar, 20 J darbe enerjisinde çapraz şekilli çatlak ve fiber kırılmasına, 30 J darbe enerjisinde delaminasyon ve yarıma, 40 J darbe enerjisinde yarıma ve delinme hasarı görülmüştür.

Karbon/epoksi kompozitlerde (GFRP)’de 10 J darbe enerjisinde çöküntü ve artık deformasyonlar, 20 J darbe enerjisinde yarıma, çapraz şekilli çatlak ve fiber kırılmasına, 30 J darbe enerjisinde tam delinme, delaminasyon ve yarıma, 40 J darbe enerjisinde yarıma ve delinme hasarı görülmüştür.

Cam-karbon epoksi kompozitlerde (GCFRP)’de 10 J darbe enerjisinde tek şekilli çatlak, çöküntü ve artık deformasyonlar, 20 J darbe enerjisinde delaminasyon, çapraz şekilli çatlak ve fiber kırılmasına, 30 J darbe enerjisinde delinme, delaminasyon ve yarıma, 40 J darbe enerjisinde yarıma ve delinme hasarı görülmüştür.

4.3.4 Basma testi sonuçları

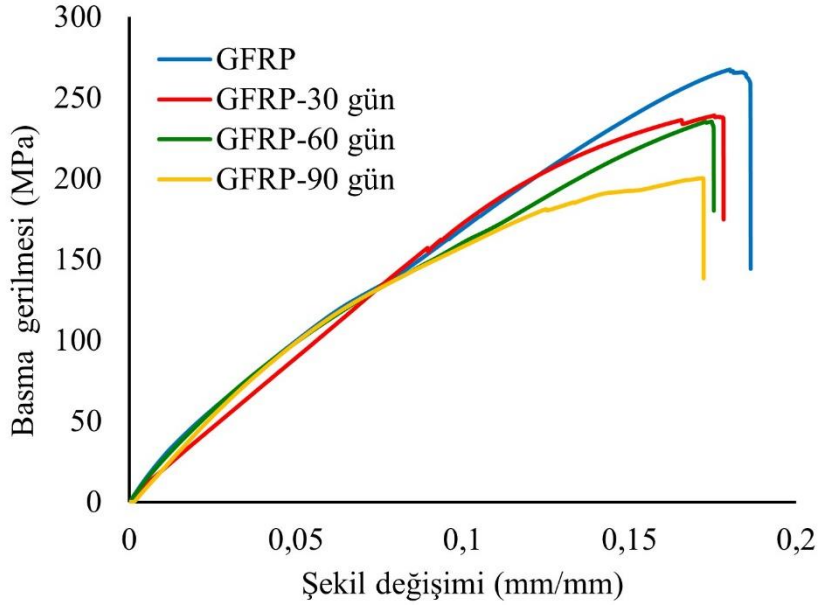
Bölüm 3.5’te anlatılan ve Çizelge 3.5’de gösterilmiş olan deney parametrelerine göre VARTM ile üretilen GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin eksenel basma testi deneyi için yapılacak test numunesi sayıları gösterilmiştir. Bölüm 3.8.3’de basma testinin yapılışı anlatılmıştır. Eksenel basma testleri ASTM D7264 standartlarına göre yapılmış, denklem (3.19), (3.20) ve (3.21) kullanılarak eğilme gerilmesi, eğilme modülü ve maksimum şekil değişimi değerleri hesaplanmıştır.

Basma deneyleri normal ortam oda sıcaklığı şartları ile deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt yaşlandırma ortamlarındaki sürelerde yaşlandırıldıktan sonra basma deneyleri yapılmıştır. Deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamlarında 30, 60 ve 90 gün boyunca yaşlandırılmış kompozitler ortamlardan alındıktan sonra basma deneyleri yapılarak maksimum basma yükü, gerilmesi, uzaması ve şekil değişimi değerleri hesaplanarak Çizelge 4.8’de sunulmuştur. Hesaplanan basma dayanımları kıyaslanarak hesaplanan değerlere göre yaşlandırma ortamının, yaşlandırma süresinin ve kompozit tipinin basma dayanımına etkisi hesaplanarak gösterilmiştir.

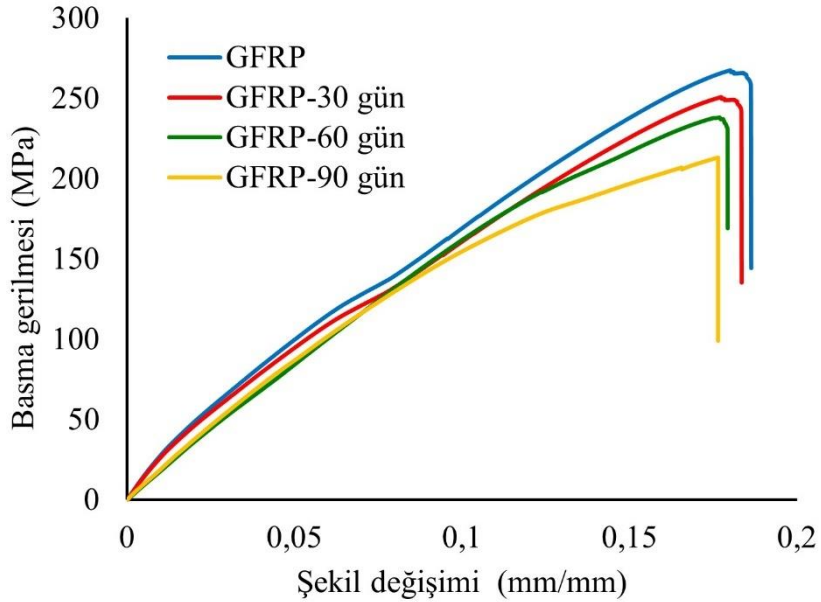
Çizelge 4.8: Yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin basma testi davranışları.

Ortam ve Numune tipi		Basma kuvveti (N)	Deplasman (Uzama) (mm)	Basma gerilmesi (MPa)	Şekil değişimi (mm/mm)
Normal ortam (N.Ş.A)	GFRP	4012.930	1.903	267.528	0.186
	CFRP	5410.091	1.498	288.001	0.160
	GCFRP	3995.785	1.555	278.879	0.163
Deniz Suyu (30 gün)	GFRP	3524.085	1.845	239.004	0.178
	CFRP	4819.967	1.396	270.631	0.156
	GCFRP	3601.124	1.483	261.820	0.161
Deniz Suyu (60 gün)	GFRP	3329.832	1.778	235.320	0.175
	CFRP	4407.853	1.392	254.652	0.156
	GCFRP	3036.542	1.456	248.566	0.157
Deniz Suyu (90 gün)	GFRP	2870.896	1.685	200.289	0.172
	CFRP	4084.316	1.396	239.959	0.150
	GCFRP	2943.543	1.402	232.824	0.156
Motor Yağı (30 gün)	GFRP	3919.785	1.897	250.808	0.183
	CFRP	4876.345	1.413	274.861	0.157
	GCFRP	3798.478	1.498	270.143	0.158
Motor Yağı (60 gün)	GFRP	3605.256	1.813	238.161	0.179
	CFRP	4456.144	1.383	262.127	0.155
	GCFRP	3438.553	1.478	258.287	0.156
Motor Yağı (90 gün)	GFRP	3080.357	1.724	213.201	0,176
	CFRP	4197.231	1.354	246.306	0.149
	GCFRP	3165.533	1.412	241.925	0.152
Dizel Yakıt (30 gün)	GFRP	3967.251	1.901	257.941	0.183
	CFRP	4943.543	1.423	272.366	0.157
	GCFRP	3805.64	1.504	270.574	0.158
Dizel Yakıt (60 gün)	GFRP	3754.764	1.832	238,161	0.179
	CFRP	4603.780	1.398	251.079	0.152
	GCFRP	3643.981	1.481	253.447	0.154
Dizel Yakıt (90 gün)	GFRP	3180.654	1.778	229.761	0,174
	CFRP	4400.134	1.386	247.461	0.150
	GCFRP	3354.641	1.443	233.761	0.151

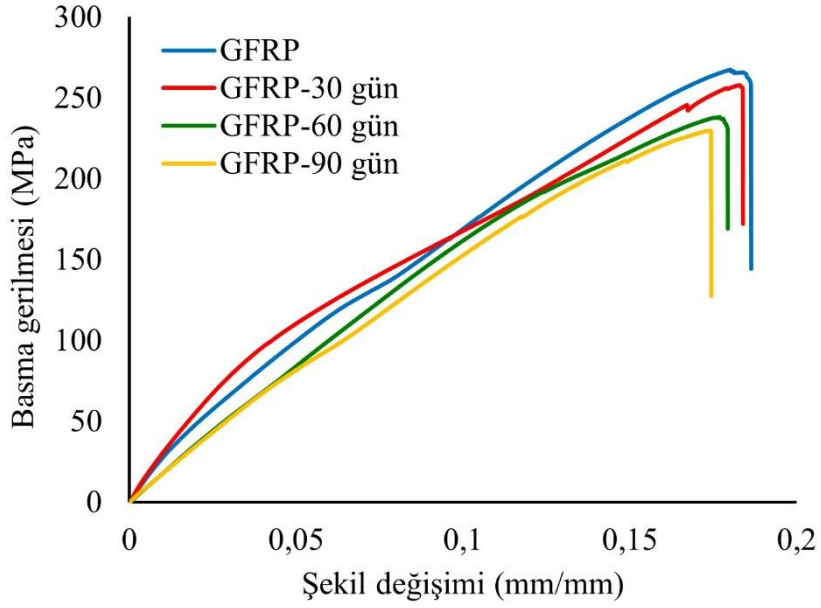
GFRP kompozitlerin 30, 60 ve 90 gün süresinde deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamında yaşlandırıldığı numunelerin basma testi davranışları incelenmiştir. GFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi grafiği; deniz suyu yaşlandırma ortamı için Şekil 4.58’de, motor yağı yaşlandırma ortamı için Şekil 4.59’de ve dizel yakıt yaşlandırma ortamı için Şekil 4.60’da gösterilmiştir.



Şekil 4.58: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi.



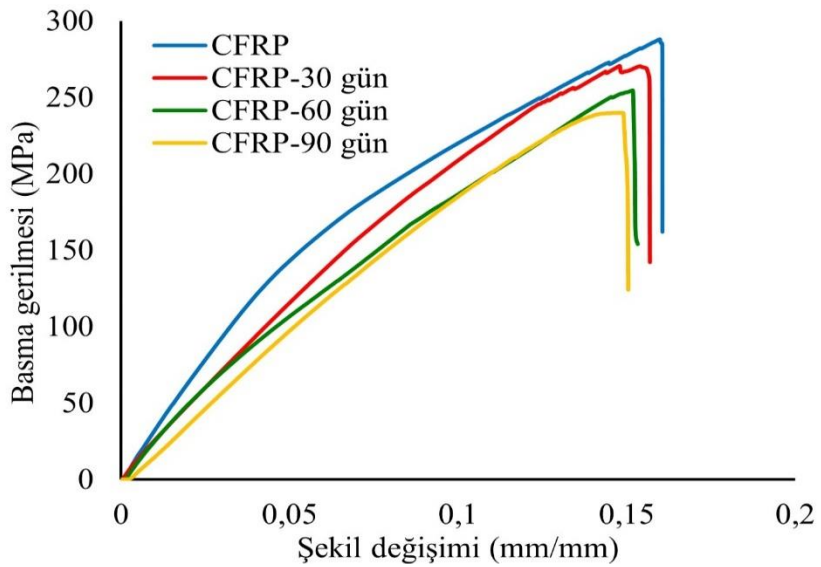
Şekil 4.59: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi.



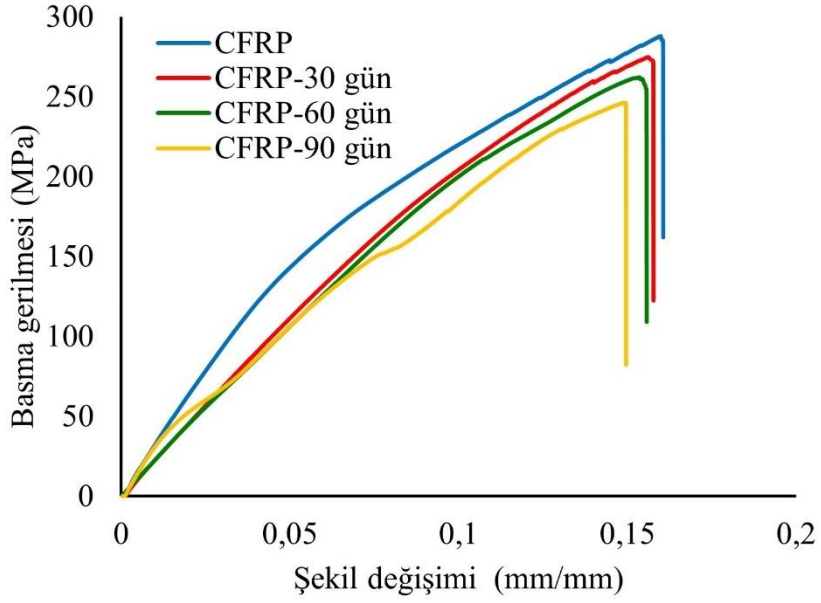
Şekil 4.60: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi.

GFRP kompozitlerin basma gerilmesi dayanımını en çok düşüren ortamın deniz suyu ortamı olduğu Şekil 4.58'deki grafikten anlaşılmaktadır.

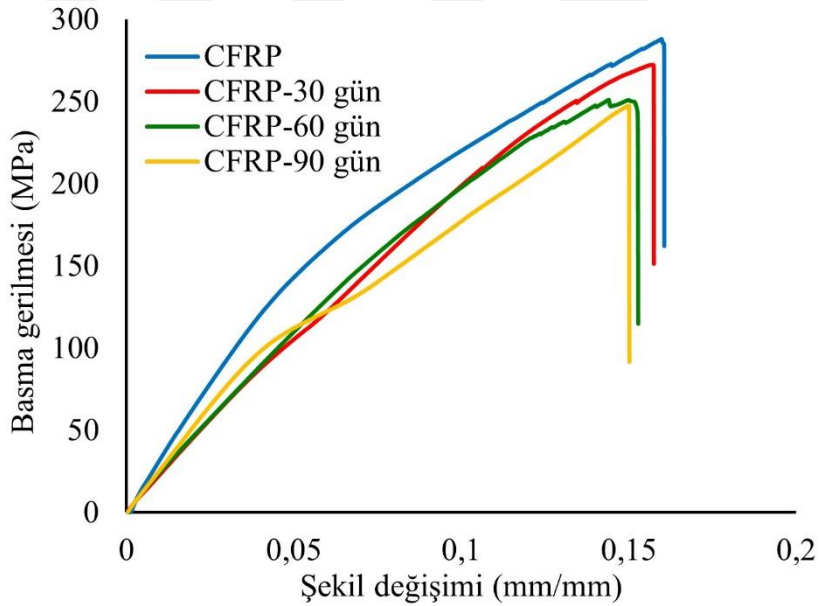
CFRP kompozitlerin 30, 60 ve 90 gün süresinde deniz suyu, motor yağında ve dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış numunelerin basma testi davranışları incelenmiştir. GFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi grafiği; deniz suyu yaşlandırma ortamı için Şekil 4.61'de, motor yağı yaşlandırma ortamı için Şekil 4.62'de ve dizel yakıt yaşlandırma ortamı için Şekil 4.63'de gösterilmiştir.



Şekil 4.61: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi.



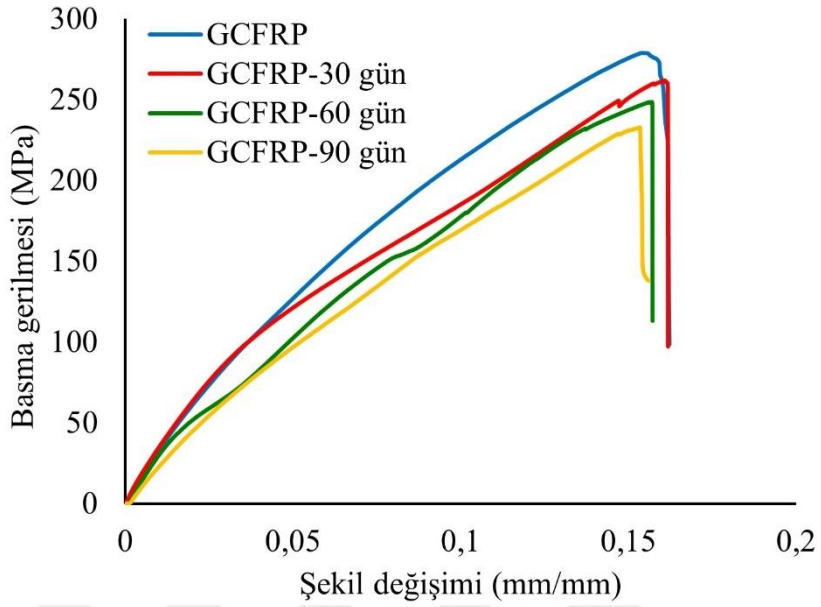
Şekil 4.62: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi.



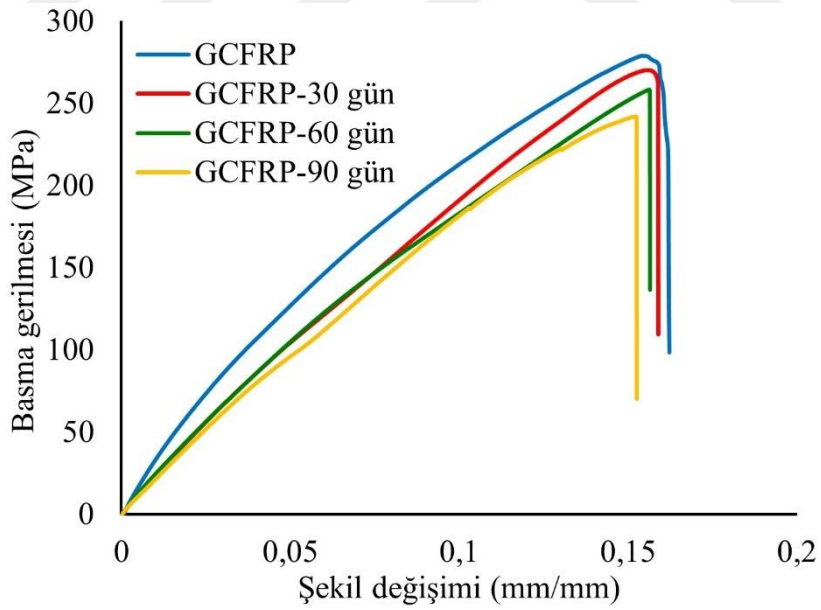
Şekil 4.63: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi.

CFRP kompozitlerin basma gerilmesi dayanımını en çok düşüren ortamın deniz suyu ortamı olduğu Şekil 4.61'deki grafikten anlaşılmaktadır. Şekil 4.62'de motor yağı ortamındaki basma gerilme eğrileri ile Şekil 4.63'de gösterilen dizel yakıt ortamındaki gerilme eğrileri birbirine yakın eğri değerleri göstermişlerdir. CFRP kompozitlerin 30 ,60 ve 90 gün süresinde deniz suyunda, motor yağında ve dizel yakıt ortamında yaşlandırıldığı numunelerin basma testi davranışları incelenmiştir.

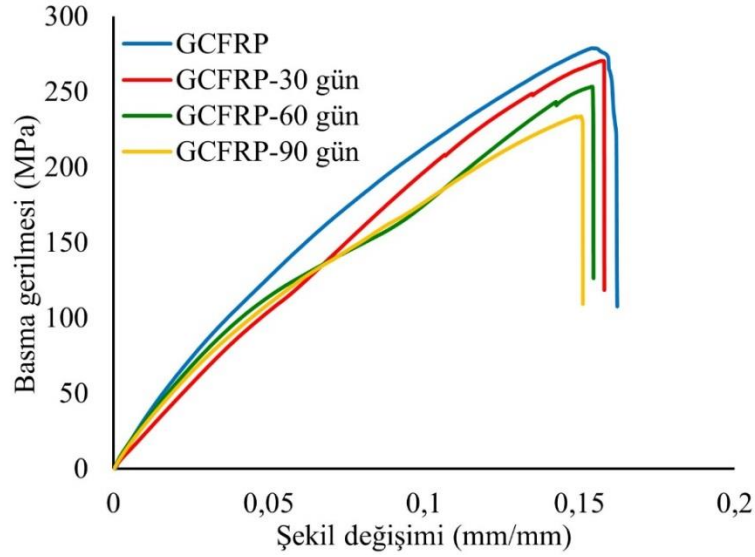
GFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi grafiği; deniz suyu yaşlandırma ortamı için Şekil 4.64’de, motor yağı yaşlandırma ortamı için Şekil 4.65’de ve dizel yakıt yaşlandırma ortamı için Şekil 4.66’da gösterilmiştir.



Şekil 4.64: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GCFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi.



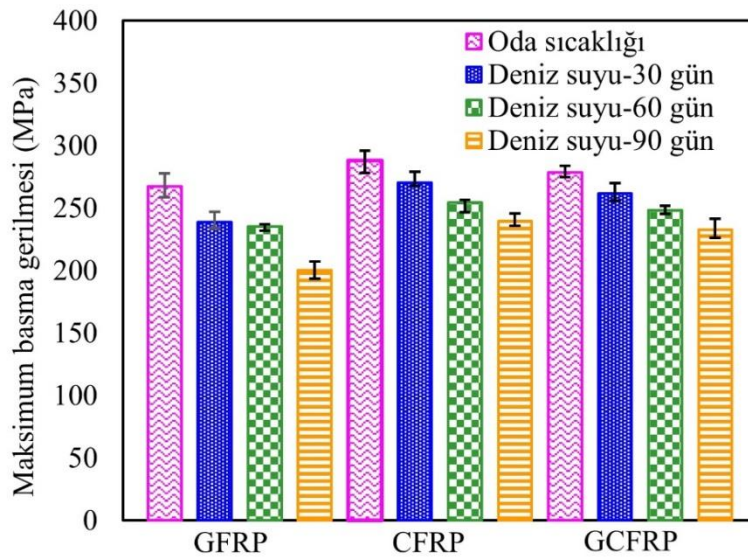
Şekil 4.65: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GCFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi.



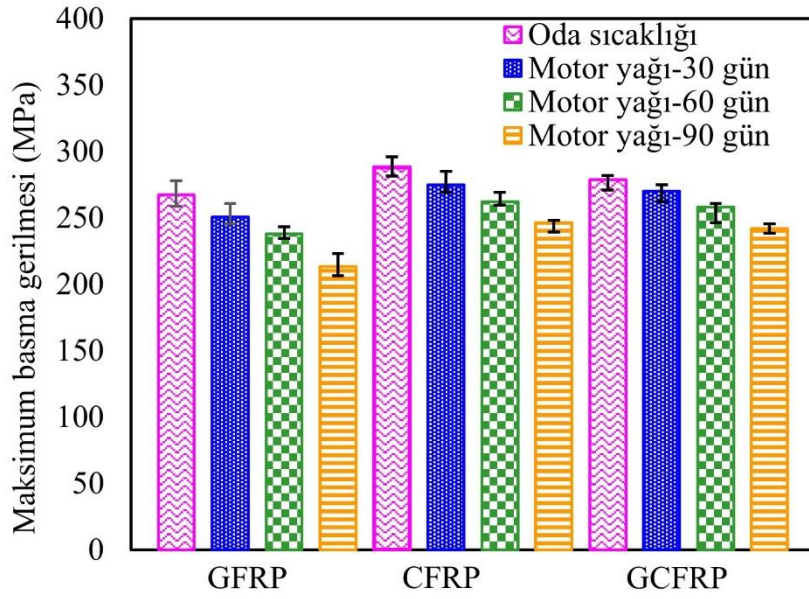
Şekil 4.66: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GCFRP kompozitlerin basma gerilmesi-şekil değişimi.

GCFRP hibrit kompozitlerin basma gerilmesini en çok düşüren ortamın deniz suyu ve motor yağı ortamı olduğu Şekil 4.64 ve Şekil 4.65'deki basma gerilmesi eğrilerinden açıkça anlaşılmaktadır. Şekil 4.66'da gösterilen dizel yakıt ortamındaki basma gerilme eğrilerine bakıldığında oda sıcaklığındaki basma gerilmesi değerlerine yakın olduğu görülmektedir.

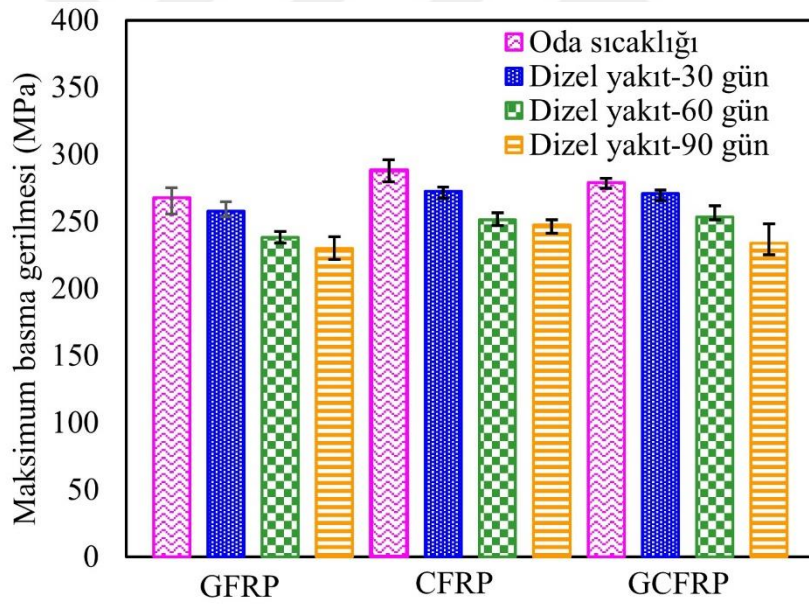
90 gün boyunca yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin maksimum basma dayanımları deniz suyu için Şekil 4.67'de, motor yağı için Şekil 4.68'de ve dizel yakıt için 4.69'da gösterilmiştir.



Şekil 4.67: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin basma dayanımlarının kıyaslanması.



Şekil 4.68: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP,CFRP ve GCFRP kompozitlerin basma dayanımlarının kıyaslanması.



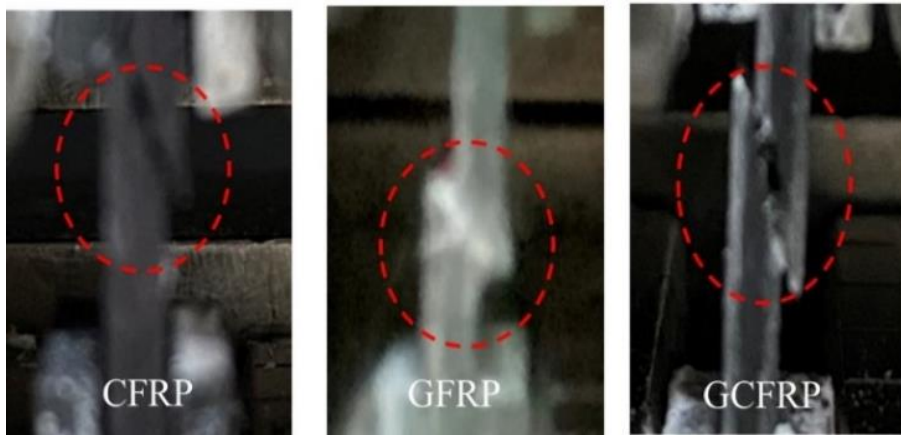
Şekil 4.69: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin basma dayanımlarının kıyaslanması.

Kompozitlerin oda sıcaklığı ortamındaki basma gerilmesi dayanımları; karbon/epoksi kompozitlerin (CFRP) 288.001 MPa, cam/epoksi (GFRP) kompozitlerin 267.528 MPa, cam-karbon/epoksi (GCFRP) hibrit kompozitlerin 278.879 MPa basma değerine sahip olduğu hesaplanmıştır (Çizelge 4.6). Deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamında 30, 60 ve 90 gün zaman periyotlarında yaşlandırılan kompozitlerin basma dayanımları

kıyaslanmıştır. Yaşlandırma ortam etkisi, yaşlandırma süresi ve kompozit tipinin değişimin basma dayanımına etkisi mukayese edilerek yorumlanmıştır.

Deniz suyu ortamında 90 gün boyunca yaşlandırılan kompozitlerin basma dayanımı incelendiğinde; maksimum basma gerilmelerinin GFRP kompozitlerde %25,13, CFRP kompozitlerde %14.10 ve GCFRP kompozitlerde %16.51 azaldığı hesaplanmıştır (Şekil 4.67). Motor yağı ortamında 90 gün yaşlandırılan kompozitlerin basma dayanımları incelendiğinde; maksimum basma gerilmelerinin GFRP kompozitlerde %20.30, CFRP kompozitlerde %14.47 ve GCFRP kompozitlerde %13.25 azaldığı hesaplanmıştır (Şekil 4.68). Dizel yakıt ortamında 90 gün yaşlandırılan kompozitlerin basma dayanımları incelendiğinde; maksimum basma gerilmelerinin GFRP kompozitlerde %17.61, CFRP kompozitlerde %14.10 ve GCFRP kompozitlerde %16.17 azaldığı hesaplanmıştır (Şekil 4.69). Tüm ortam koşulları genelinde kompozitlerin basma dayanımları kıyaslandığında, deniz suyu ortamının basma dayanımına etkisinin motor yağı ve dizel yakıt ortamlarına göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Tüm ortam koşulları ve yaşlandırma ortam süreleri göz önünde bulundurulduğunda, en yüksek basınç gerilimi değerlerinin büyükten küçüğe sıralaması karbon/epoksi (CFRP) kompozitlerde, cam-karbon/epoksi (GCFRP) hibrit GCFRP, cam/epoksi (GFRP) kompozitlerde olduğu tespit edilmiştir. Hibritleşme etkisiyle cam/epoksi kompozitlerin merkezlerindeki karbon elyafların basma dayanımını artırdığı tespit edilmiştir.

Çalışmadaki hasar görüntülerine bakıldığında literatürü destekleyen benzer bir hasar durumunun meydana geldiği, kompozit numunelerin kesme hasarı sonucu bükülerek kırıldığı hasarlar Şekil 4.70'de gösterilmektedir.

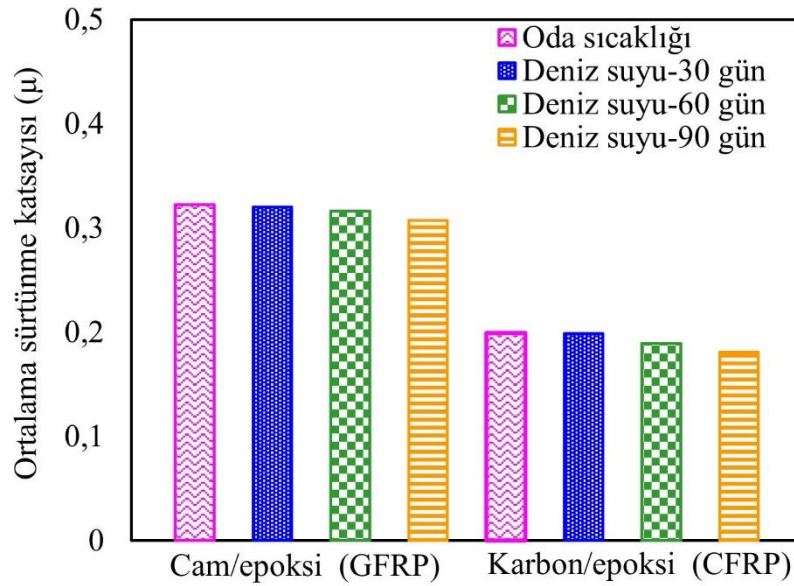


Şekil 4.70: CFRP, GCFRP ve GCFRP kompozit numunelerin basma testi sonucu oluşturdukları hasarlar.

4.4 Tribolojik Sonuçlar

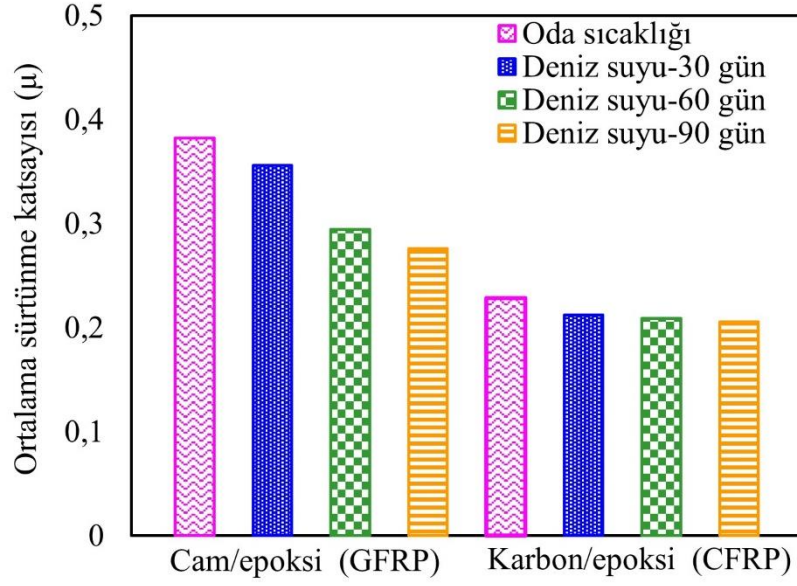
4.4.1 Aşınma test sonuçları

Cam/epoksi kompozitlerin (GFRP) ve karbon/epoksi kompozitlerin (CFRP) Bölüm 3.6'da gösterilen Çizelge 3.5'de belirlenen parametrelere göre kuru kayma aşınma testleri yapılmıştır. Çalışmada belirlenen parametrelere 60 adet deney numunesinin kuru kayma aşınma testleri yapılarak tribolojik davranışlar incelenmiştir. 10 N, 15 N ve 20 N yükleri altında yürütülen aşınma testleri boyunca sürtünme katsayısı ve aşınmadan kaynaklı ağırlık kayıpları hesaplanarak yorumlanmıştır. Deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamında 30,60 ve 90 gün boyunca yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlere aşınma testleri yapılmıştır. Deniz suyu ortamında 30,60 ve 90 gün sürelerinde yaşlandırma yapılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin aşınma testlerinden elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değerleri 10 N yük için Şekil 4.71'de, 15 N yük için Şekil 4.72'de ve 20 N yük için 4.73'de gösterilmiştir.



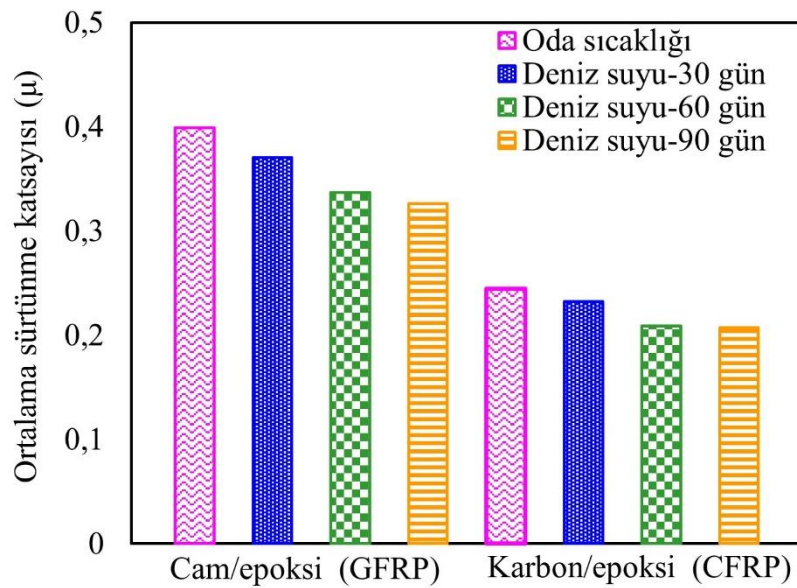
Şekil 4.71: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin 10 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayıları.

30, 60 ve 90 gün sürelerinde deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin 10 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında; oda sıcaklığına göre 30 gün yaşlandırma etkisiyle %0.76, 60 gün yaşlandırma etkisiyle %1.92, 90 gün yaşlandırma etkisiyle %4.82 oranında azaldığı hesaplanmıştır (Şekil 4.71). 30, 60 ve 90 gün sürelerinde deniz suyu ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin 10 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında; oda sıcaklığına göre 30 gün yaşlandırma etkisiyle %0.16, 60 gün yaşlandırma etkisiyle %5.14, 90 gün yaşlandırma etkisiyle %9.37 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.71).



Şekil 4.72: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin 15 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayıları.

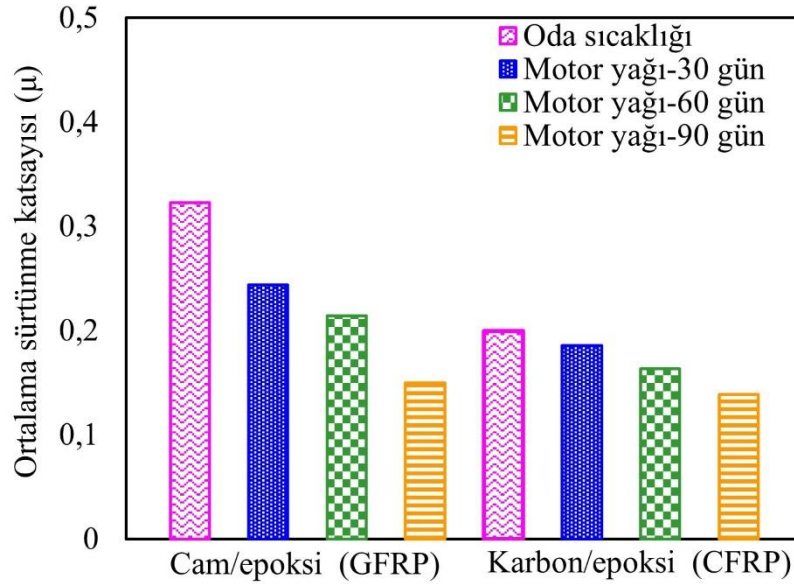
30 ,60 ve 90 gün sürelerinde deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin 15 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında; oda sıcaklığına göre 30 gün yaşlandırma etkisiyle % 6.81, 60 gün yaşlandırma etkisiyle %22.96 , 90 gün yaşlandırma etkisiyle %27.83 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır (Şekil 4.72). 30, 60 ve 90 gün sürelerinde deniz suyu ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin 15 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında; oda sıcaklığına göre 30 gün yaşlandırma etkisiyle %6.99, 60 gün yaşlandırma etkisiyle %8.58 ve 90 gün yaşlandırma etkisiyle %9.97 oranında azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.72).



Şekil 4.73: Deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin 20 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayıları.

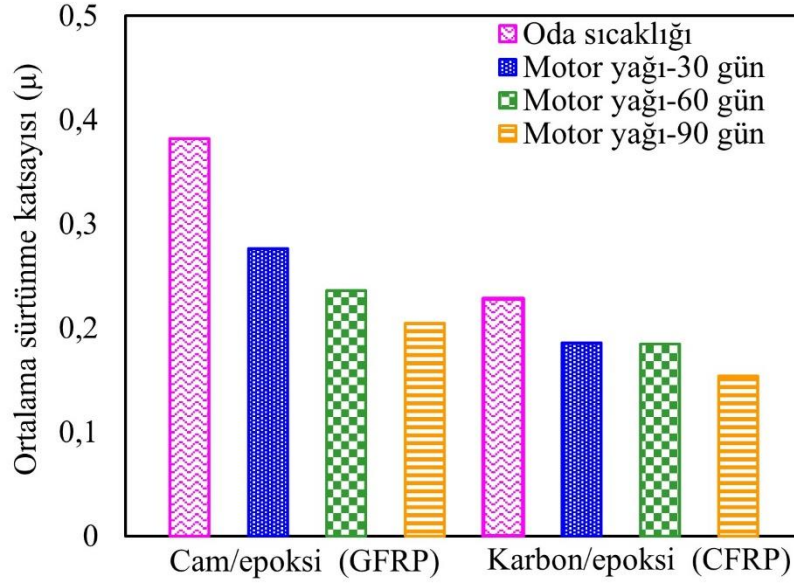
30 ,60 ve 90 gün sürelerinde deniz suyu ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin 20 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında; oda sıcaklığına göre 30 gün yaşlandırma etkisiyle %7.17, 60 gün yaşlandırma etkisiyle %15.58, 90 gün yaşlandırma etkisiyle %18.21 oranında azaldığı hesaplanmıştır (Şekil 4.73). 30, 60 ve 90 gün sürelerinde deniz suyu ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin 20 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında; oda sıcaklığına göre 30 gün yaşlandırma etkisiyle %4.99, 60 gün yaşlandırma etkisiyle %14.65 ve 90 gün yaşlandırma etkisiyle %15.15 oranında azaldığı görülmüştür (Şekil 4.73).

Motor yağı ortamında 30,60 ve 90 gün sürelerinde yaşlandırma yapılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin aşınma testlerinden elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değerleri 10 N yük için Şekil 4.74'de, 15 N yük için Şekil 4.75'de ve 20 N yük için Şekil 4.76'de gösterilmiştir.



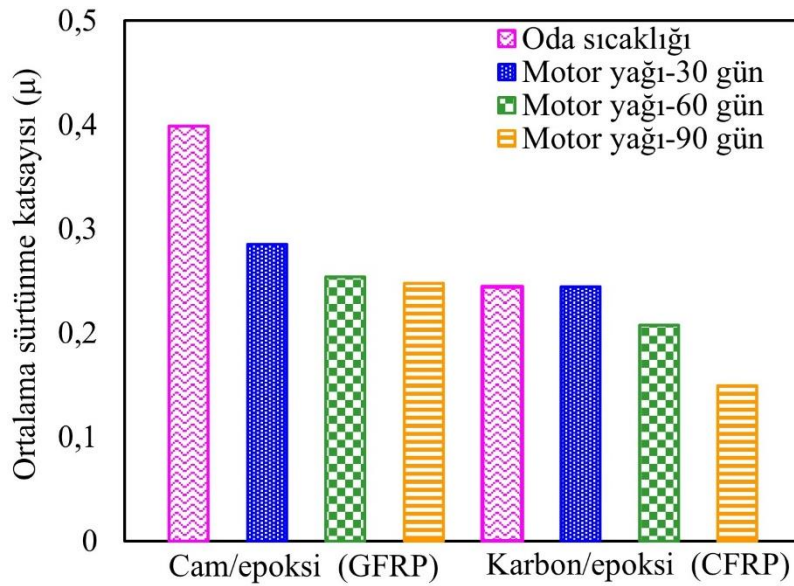
Şekil 4.74: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin 10 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayıları.

30, 60 ve 90 gün sürelerinde motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin 10 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında; oda sıcaklığına göre 30 gün yaşlandırma etkisiyle %24.45, 60 gün yaşlandırma etkisiyle %33.56, 90 gün yaşlandırma etkisiyle %53.52 oranında azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.74). 30, 60 ve 90 gün sürelerinde motor yağı ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin 15 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında; oda sıcaklığına göre 30 gün yaşlandırma etkisiyle %6.84, 60 gün yaşlandırma etkisiyle %18.09, 90 gün yaşlandırma etkisiyle %30.53 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır (Şekil 4.74).



Şekil 4.75: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin 15 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayıları.

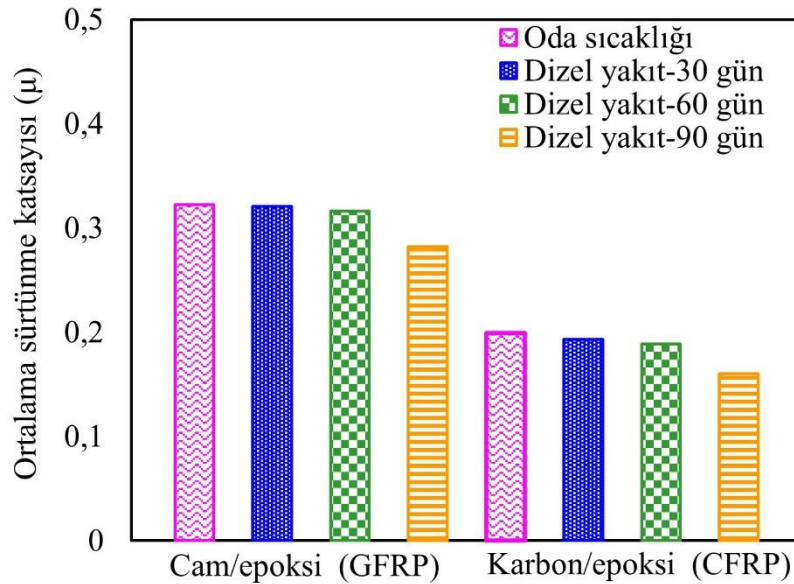
30, 60 ve 90 gün sürelerinde motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin 15 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında; oda sıcaklığına göre 30 gün yaşlandırma etkisiyle %27.72, 60 gün yaşlandırma etkisiyle %38.28, 90 gün yaşlandırma etkisiyle %46.41 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır. 30, 60 ve 90 gün sürelerinde motor yağı ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin 15 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında; oda sıcaklığına göre 30 gün yaşlandırma etkisiyle %18.63, 60 gün yaşlandırma etkisiyle %19.14, 90 gün yaşlandırma etkisiyle %32.72 oranında azaldığı hesaplanmıştır (Şekil 4.75).



Şekil 4.76: Motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin 20 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayıları.

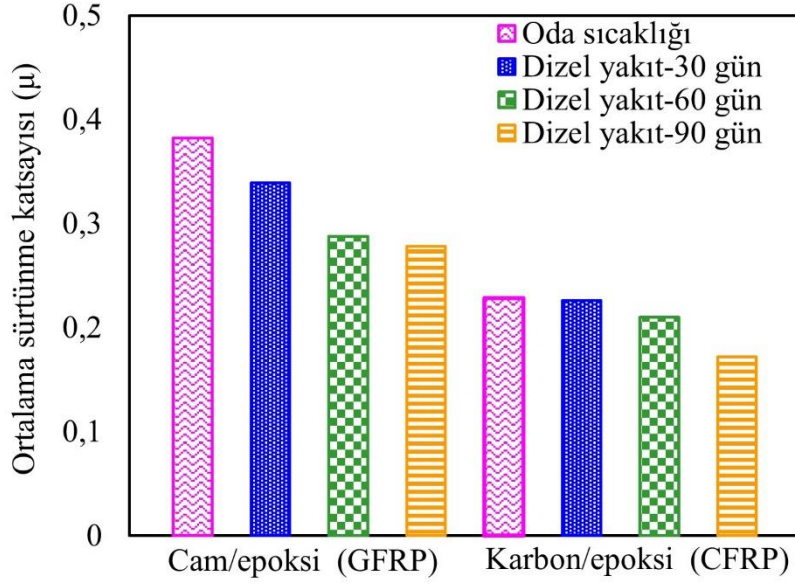
30, 60 ve 90 gün sürelerinde motor yağı ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin 20 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında; oda sıcaklığına göre 30 gün yaşlandırma etkisiyle %28.56, 60 gün yaşlandırma etkisiyle %36.36, 90 gün yaşlandırma etkisiyle %37.90 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.76). 30, 60 ve 90 gün sürelerinde motor yağı ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin 20 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında; oda sıcaklığına göre 30 gün yaşlandırma etkisiyle %0.13, 60 gün yaşlandırma etkisiyle %15.1 ve 90 gün yaşlandırma etkisiyle %39.01 oranında azaldığı görülmüştür (Şekil 4.76).

Dizel yakıt ortamında 30,60 ve 90 gün sürelerinde yaşlandırma yapılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin aşınma testlerinden elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değerleri 10 N yük için Şekil 4.77’de, 15 N yük için Şekil 4.78’de ve 20 N yük için Şekil 4.79’da gösterilmektedir.



Şekil 4.77: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin 10 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayıları.

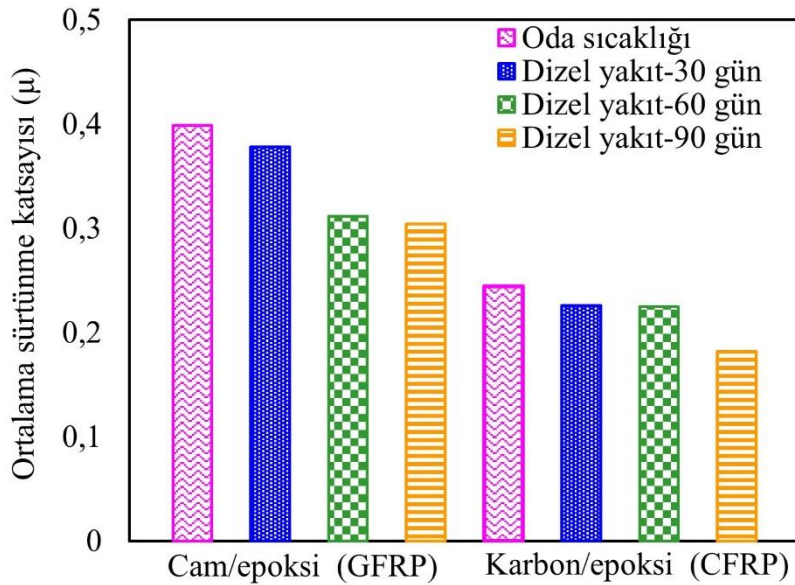
30, 60 ve 90 gün sürelerinde dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin 10 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında; oda sıcaklığına göre 30 gün yaşlandırma etkisiyle %0.57, 60 gün yaşlandırma etkisiyle %1.93 ve 90 gün yaşlandırma etkisiyle %12.49 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.77). 30, 60 ve 90 gün sürelerinde dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin 10 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında; oda sıcaklığına göre 30 gün yaşlandırma etkisiyle %3.05, 60 gün yaşlandırma etkisiyle %5.13 ve 90 gün yaşlandırma etkisiyle %19.54 oranında azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.77).



Şekil 4.78: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin 15 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayıları.

30, 60 ve 90 gün sürelerinde dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin 15 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında; oda sıcaklığına göre 30 gün yaşlandırma etkisiyle %11.25, 60 gün yaşlandırma etkisiyle %24.80 ve 90 gün yaşlandırma etkisiyle %27.28 oranında azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.78).

30, 60 ve 90 gün sürelerinde dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin 15N yük altındaki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında; oda sıcaklığına göre 30 gün yaşlandırma etkisiyle %1.03, 60 gün yaşlandırma etkisiyle %8.13 ve 90 gün yaşlandırma etkisiyle %24.75 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.78).



Şekil 4.79: Dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP ve CFRP kompozitlerin 20 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayıları.

30, 60 ve 90 gün sürelerinde dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış GFRP kompozitlerin 20 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında; oda sıcaklığına göre 30 gün yaşlandırma etkisiyle %5.24, 60 gün yaşlandırma etkisiyle %21.86, 90 gün yaşlandırma etkisiyle %23.81 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.79). 30, 60 ve 90 gün sürelerinde dizel yakıt ortamında yaşlandırılmış CFRP kompozitlerin 20 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında; oda sıcaklığına göre 30 gün yaşlandırma etkisiyle %7.60, 60 gün yaşlandırma etkisiyle %8.10 ve 90 gün yaşlandırma etkisiyle %25.65 oranında azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.78). Tüm ortam şartlarında 10 N, 20 N ve 30 N yüklerinde yapılan GFRP ve CFRP kompozitlerin aşınma testleri sonucu numunelere ait kütle kayıpları değerleri Çizelge 4.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9: GFRP ve CFRP kompozitlerin aşınma sonrası oluşan kütle kayıpları.

Ortam ve Numune tipi		Ağırlık kaybı (gr)		
		10 N	15 N	20 N
Normal ortam	GFRP	0.0013	0.0022	0.0031
	CFRP	0.0010	0.0015	0.0025
Deniz Suyu (30 gün)	GFRP	0.0015	0.0024	0.0032
	CFRP	0.0011	0.0017	0.0026
Deniz Suyu (60 gün)	GFRP	0.0016	0.0027	0.0035
	CFRP	0.0013	0.0019	0.0027
Deniz Suyu (90 gün)	GFRP	0.0017	0.0030	0.0043
	CFRP	0.0014	0.0023	0.0030
Motor Yağı (30 gün)	GFRP	0.0016	0.0029	0.0038
	CFRP	0.0015	0.0020	0.0032
Motor Yağı (60 gün)	GFRP	0.0018	0.0030	0.0041
	CFRP	0.0019	0.0023	0.0036
Motor Yağı (90 gün)	GFRP	0.0021	0.0034	0.0053
	CFRP	0.0020	0.0029	0.0041
Dizel Yakıt (30 gün)	GFRP	0.0014	0.0023	0.0030
	CFRP	0.0014	0.0021	0.0026
Dizel Yakıt (60 gün)	GFRP	0.0015	0.0025	0.0033
	CFRP	0.0015	0.0023	0.0029
Dizel Yakıt (90 gün)	GFRP	0.0017	0.0027	0.0038
	CFRP	0.0019	0.0025	0.0029

Çizelge 4.9’da gösterilmiş olan GFRP ve CFRP kompozitlerin aşınma sonrası ağırlık değişim oranını en çok etkileyen ortamın motor yağı olduğu sonucuna varılmıştır. Yaşlandırma ortamları sonrasında kütlece absorpsiyonu geçişinden dolayı numuneler daha ağır hale geldiğinden aşınma oranları bu durumdan etkilenmiştir. Bölüm 4.2’de anlatılan yaşlandırma süresi ve ortamına göre absorpsiyon yüzdelerini gösteren Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’deki grafiklerden kütlece sıvı absorpsiyonunun çoktan aza doğru sıralanışı motor yağı, deniz suyu, dizel yakıt ortamı olduğu belirtilmiştir. Motor yağının kompozit numuneye nüfuziyeti yüksek oranda gerçekleşmiş ve yüzeylerinde aşınma sonrası aşınma kütlelerini değiştirmiştir.

Çizelge 4.9’daki ağırlık kayıplarına bakıldığında,

- GFRP ve CFRP kompozitlerin tüm ortam koşullarında en düşük ağırlık kaybının 10 N yüklerde yapılan aşınma testlerinde en yüksek ağırlık kaybının 20 N yüklerinde yapılan aşınma testlerinde tespit edilmiştir.
- Yaşlandırma ortamı koşullarında en düşük ağırlık kaybının dizel yakıt ortamı, en yüksek ağırlık kaybının motor yağı ortamında gerçekleştiği tespit edilmiştir.
- Motor yağı ortamında yaşlandırma etkisiyle 20 N yük altında yapılan aşınma testleri normal ortamdaki kompozitlerin aşınma sonrası ağırlık kayıplarına göre, cam/epoksi (GFRP) kompozitlerde %70.96 oranında, karbon/epoksi (CFRP) kompozitlerde %64 oranında artış olduğu sonucuna varılmıştır.
- Deniz suyu ortamında yaşlandırma etkisiyle 20 N yük altında yapılan aşınma testleri normal ortamdaki kompozitlerin aşınma sonrası ağırlık kayıplarına göre, cam/epoksi (GFRP) kompozitlerde %38.70 oranında, karbon/epoksi (CFRP) kompozitlerde %20 oranında artış olduğu sonucuna varılmıştır.
- Dizel yakıt ortamında yaşlandırma etkisiyle 20 N yük altında yapılan yüklerinde yapılan aşınma testleri normal ortamdaki kompozitlerin aşınma sonrası ağırlık kayıplarına göre; cam/epoksi (GFRP) kompozitlerde %52 oranında, karbon/epoksi (CFRP) kompozitlerde %6.45 oranında artış olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada yapılan aşınma testleri, çok sayıda parametreye bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmadaki aşınma testi ile ilgili yapılan karşılaştırmaları daha net biçimde belirlemek için spesifik aşınma oranları (SAO) Bölüm 3.9’daki denklem (3.23)’e göre hesaplanmıştır.

Farklı ortam koşullarında ve farklı sürelerde yaşlandırılan GFRP ve CFRP kompozit numunelerin aşınma testleri sonrası hesaplanan SAO değerleri Çizelge 4.10'da sunulmuştur.

Çizelge 4.10: GFRP ve CFRP kompozit aşınma numunelerinin aşınma sonrası hesaplanan SAO değerleri.

Ortam ve Numune tipi		Spesifik aşınma oranı ($10^{-8}\text{cm}^3/\text{N.m}$)		
		10 N	15 N	20 N
Normal ortam	GFRP	2.4208	2.7312	2.8864
	CFRP	2.2371	2.2371	2.7964
Deniz Suyu (30 gün)	GFRP	2.7932	2.9795	2.9795
	CFRP	2.4608	2.5354	2.9082
Deniz Suyu (60 gün)	GFRP	2.9795	3.3519	3.2588
	CFRP	2.9082	2.8337	3.0201
Deniz Suyu (90 gün)	GFRP	3.1657	3.7243	4.0037
	CFRP	3.1319	3.4302	3.3557
Motor Yağı (30 gün)	GFRP	2.9795	3.6002	3.5381
	CFRP	3.3557	2.9828	3.5794
Motor Yağı (60 gün)	GFRP	3.3519	3.7243	3.8175
	CFRP	4.2505	3.4302	4.0268
Motor Yağı (90 gün)	GFRP	3.9106	4.2209	4.9348
	CFRP	4.4742	4.3251	4.5861
Dizel Yakıt (30 gün)	GFRP	2.6070	2.8553	2.7932
	CFRP	3.1319	3.1319	2.9082
Dizel Yakıt (60 gün)	GFRP	2.7932	3.1036	3.0726
	CFRP	3.3557	3.4302	3.2438
Dizel Yakıt (90 gün)	GFRP	3.1657	3.3519	3.5381
	CFRP	4.2505	3.7285	3.2438

Çizelge 4.10'da gösterilen spesifik aşınma oranlarına bakıldığında;

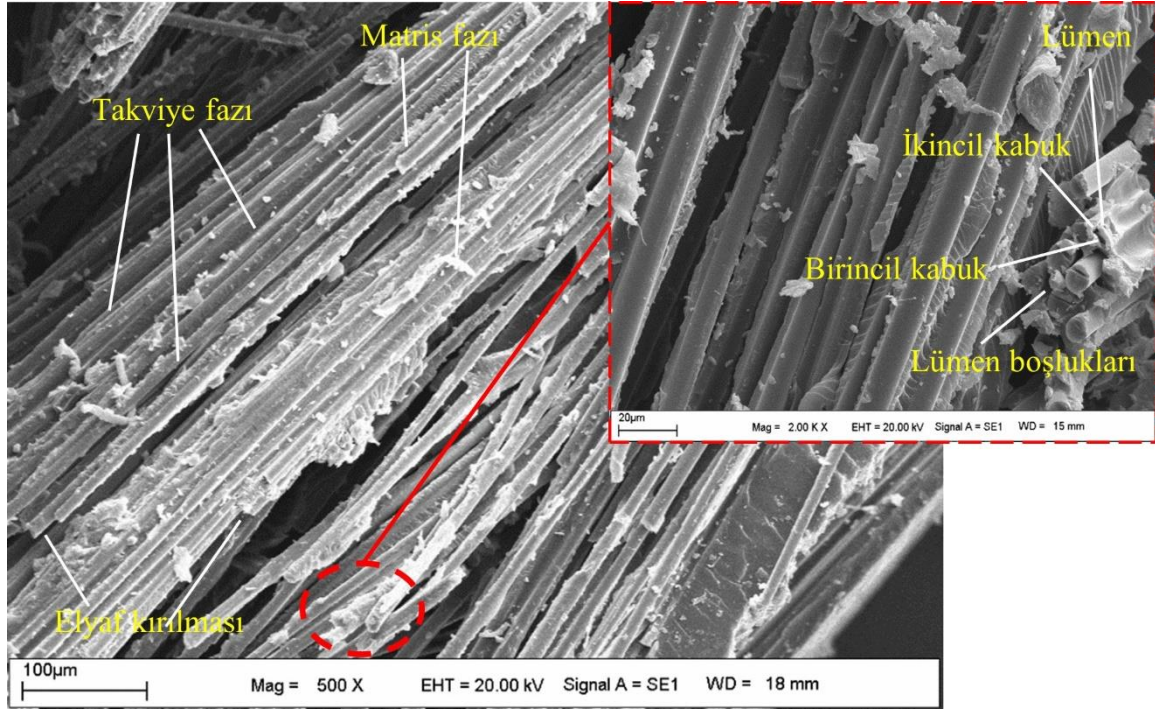
- GFRP ve CFRP kompozitlerin tüm ortam koşullarında spesifik aşınma oranlarının en düşük 10 N yüklerde yapılan aşınma testlerinde en yüksek spesifik aşınma oranının 20 N yüklerinde yapılan aşınma testlerinde gözlemlenmiştir.

- Yaşlandırma ortamı koşullarında en düşük spesifik aşınma oranlarının dizel yakıt ortamı, en yüksek spesifik aşınma oranlarının motor yağı ortamında gerçekleştiği kanaatine varılmıştır.
- 20 N yük altında yapılan aşınma testlerinde; normal ortamdaki GFRP kompozitlerin spesifik aşınma oranı 2.8864 değerindeyken 90 günlük motor yağı ortamında yaşlandırma etkisiyle artarak 4.9348 oranına ulaşmıştır.
- 20 N yük altında yapılan aşınma testlerinde; normal ortamdaki CFRP kompozitlerin spesifik aşınma oranı 2.7964 değerindeyken 90 günlük motor yağı ortamında yaşlandırma etkisiyle artarak 4.5861 oranına ulaşmıştır.
- 20 N yük altında yapılan aşınma testlerinde; normal ortamdaki GFRP kompozitlerin spesifik aşınma oranı 2.8864 değerindeyken 90 günlük deniz suyu ortamında yaşlandırma etkisiyle artarak 4.0037 oranına ulaşmıştır.
- 20 N yük altında yapılan aşınma testlerinde; normal ortamdaki CFRP kompozitlerin spesifik aşınma oranı 2.7964 değerindeyken 90 günlük deniz suyu ortamında yaşlandırma etkisiyle artarak 3.3557 oranına ulaşmıştır.
- 20 N yük altında yapılan aşınma testlerinde; normal ortamdaki GFRP kompozitlerin spesifik aşınma oranı 2.8864 değerindeyken 90 günlük dizel yakıt ortamında yaşlandırma etkisiyle artarak 3.5381 oranına ulaşmıştır.
- 20 N yük altında yapılan aşınma testlerinde; normal ortamdaki CFRP kompozitlerin spesifik aşınma oranı 2.7964 değerindeyken 90 günlük dizel yakıt ortamında yaşlandırma etkisiyle artarak 3.2438 oranına ulaşmıştır.

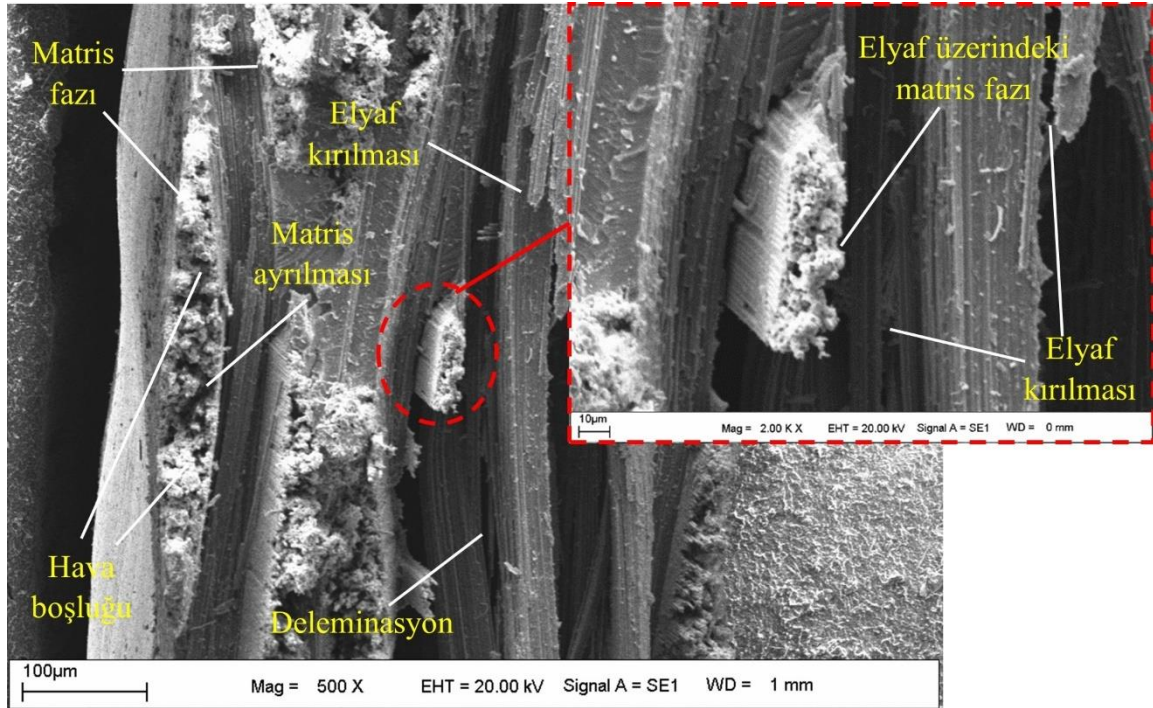
4.5 Morfolojik Analiz

Cam/epoksi kompozitlerin (GFRP), karbon/epoksi kompozitlerin (CFRP) ve cam-karbon/epoksi hibrit kompozitlerin (GCFRP) Çekme testleri sonrası kopma hasarı oluşan bölgelere taramalı elektron mikroskobu cihazında (SEM) analizi yapılarak mikroyapı incelenmiştir. Çekme testlerinde ortam yaşlandırma etkisinin mekanik dayanımın en çok etkilendiği ortam deniz suyu ortamıdır. 90 gün boyunca deniz suyu ortamında yaşlandırılmış kompozitlerin çekme testleri oluşan hasar bölgeleri normal ortamlarına göre mikroyapısındaki değişimleri incelemek için morfolojik analizler yapılmıştır. Morfolojik analiz sonuçlarında; elyaf yapısı, matris yapısı, elyaf-matris etkileşimi ve hasarları incelenmiştir.

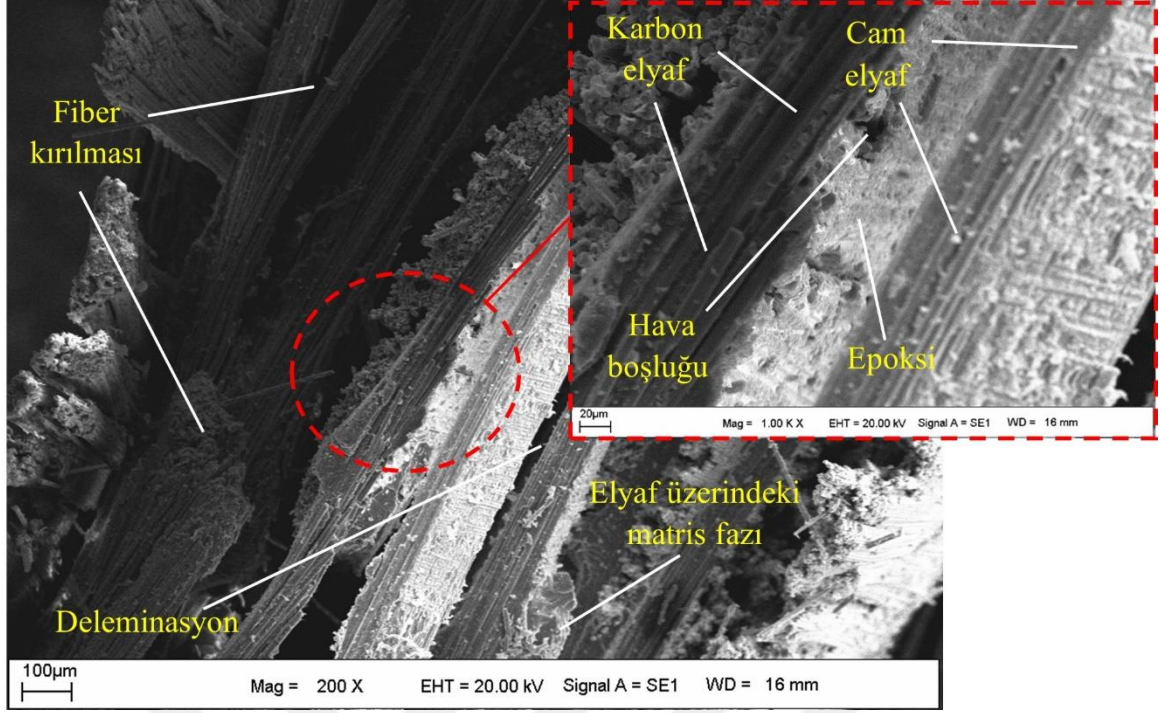
Oda sıcaklığındaki çekme testi sonrası kopan kısımların morfolojik analizinin yapıldığı GFRP kompozitlerin SEM analizi Şekil 4.80’de, CFRP kompozitlerin SEM analizi Şekil 4.81’de ve GCFRP hibrit kompozitlerin SEM analizi Şekil 4.82’de gösterilmiştir.



Şekil 4.80: GFRP kompozit numunenin SEM analizi.



Şekil 4.81: CFRP kompozit numunenin SEM analizi.

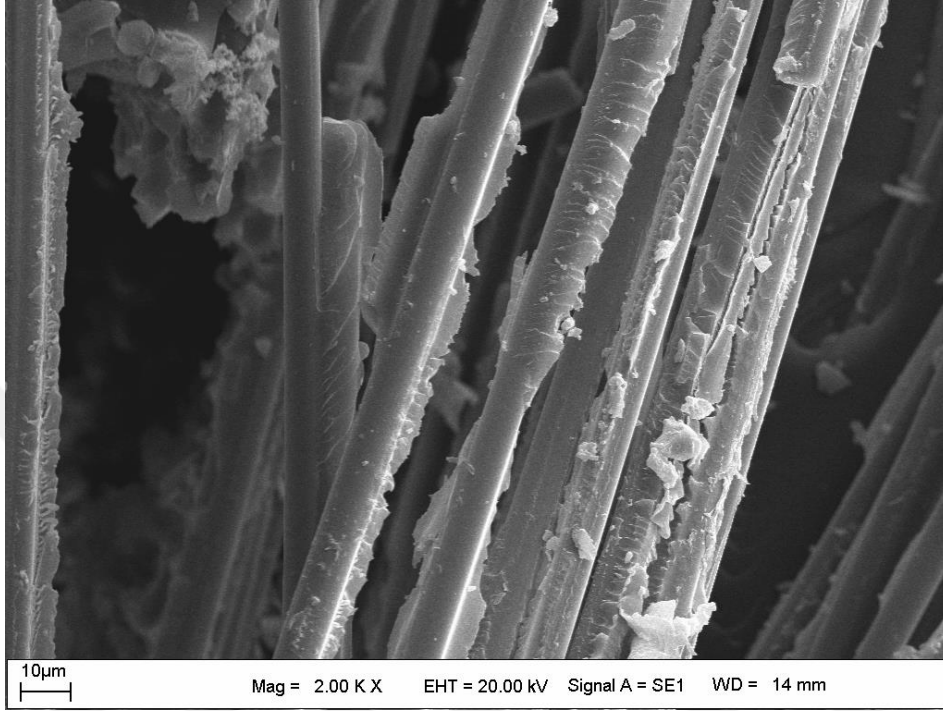


Şekil 4.82: GCFRP hibrit kompozit numunenin SEM analizi.

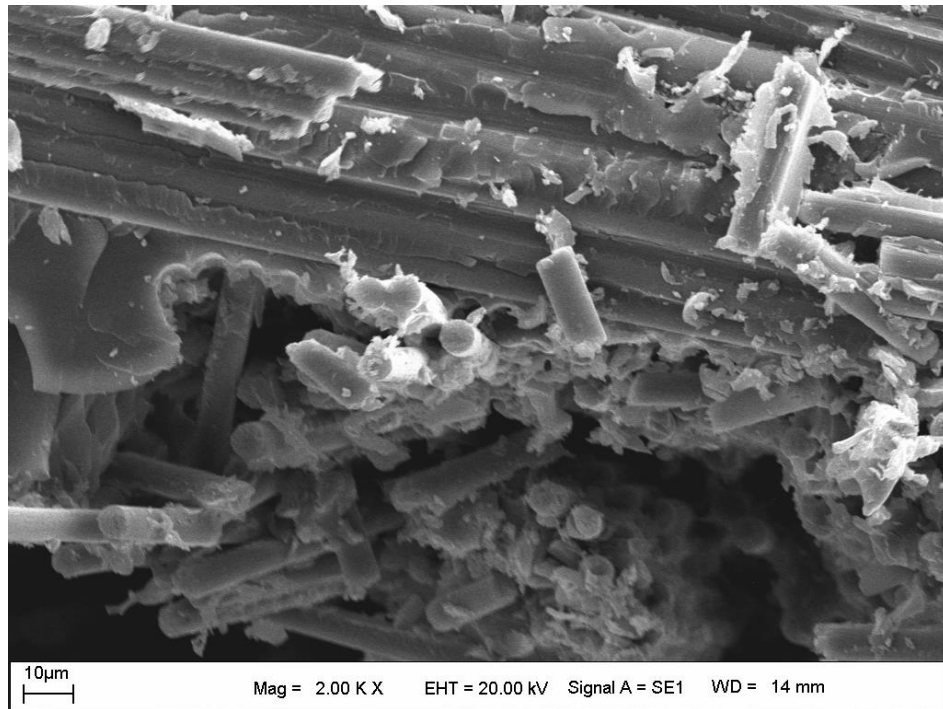
Normal ortam koşullarındaki cam/epoksi (GFRP) kompozitlerin morfolojik analizleri farklı mikron boyutlarında yaklaşılarak değerlendirilmiştir. Cam elyafın üzerine yaklaşıldığında kopan elyafların görüntüleri ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Kopan elyafların etrafında matris fazının çok az bulunduğu görüldüğü açık biçimde gösterilmektedir. Bu analiz durumu elyaf-matris arayüz yapışmasının zayıf olduğu bölgelerde hasar oluştuğunu ortaya çıkarmaktadır (Şekil 4.80). Normal ortam koşullarındaki karbon/epoksi (CFRP) kompozitlerin morfolojik analizleri farklı mikron boyutlarında yaklaşılarak değerlendirilmiştir. Karbon elyafa yaklaşarak karbon elyaf yapısı ile epoksi matris elamanın hasar sonrası görünümü ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Tabakalar arası ayrılma delaminasyon olayı matris elamanın sığ olduğu bölgelerde ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Karbon fiberlerin kırılarak koptuğu hasar bölgesine yaklaşıldığında epoksi matris içindeki hava boşlukları tespit edilmiştir (Şekil 4.81).

Normal ortam koşullarındaki cam-karbon/epoksi (GCFRP) kompozitlerin morfolojik analizleri farklı mikron boyutlarında yaklaşılarak değerlendirilmiştir. GCFRP kompozitlere hasar sonrasına yaklaşarak cam-karbon elyaf katmanlarının epoksi matris elamanı ile takviyesinin görünümü ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Cam ve karbon tabakaların birbirlerinden ayrıldığı delaminasyon hasarı matris elamanın sığ olduğu bölgelerde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Karbon-cam elyafların kırılarak koptuğu hasar bölgesine yaklaşıldığında kırılan elyafların üzerinde epoksi matrislerin hafif topaklanmaları

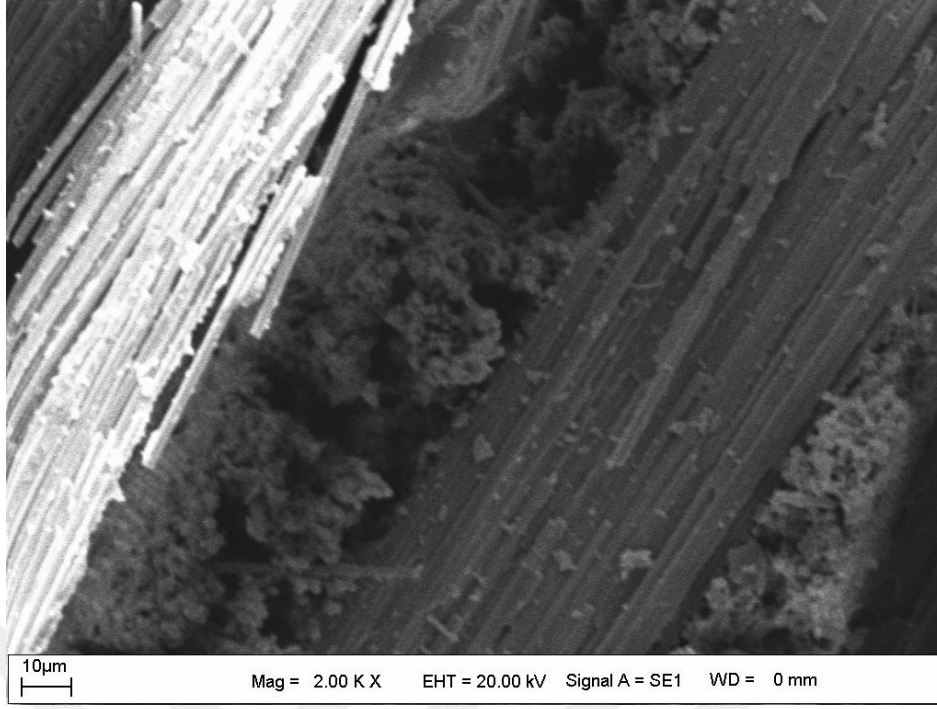
görülmektedir (Şekil 4.82). Deniz suyu ortamında 90 gün boyunca yaşlandırılmış kompozitlerin çekme testi sonrası kopan kısımların morfolojik analizinin yapıldığı GFRP kompozitlerin SEM analizi Şekil 4.83’de, CFRP kompozitlerin SEM analizi Şekil 4.84’de ve GCFRP hibrit kompozitlerin SEM analizi Şekil 4.85’de gösterilmiştir.



Şekil 4.83: Deniz suyunda 90 gün boyunca yaşlandırılmış GFRP kompozitin SEM analizi.



Şekil 4.84: Deniz suyunda 90 gün boyunca yaşlandırılmış CFRP kompozitin SEM analizi.



Şekil 4.85: Deniz suyu ortamında 90 gün boyunca yaşlandırılmış GCFRP kompozitinin SEM analizi.

Deniz suyu ortamında 90 gün yaşlandırılmış cam/epoksi (GFRP) kompozitlerin morfolojik analizleri normal ortama göre daha düşük mikron boyutlarında yaklaşarak değerlendirilmiştir. Kırılan cam elyafların üzerinde epoksi matrislerin topaklanmaları birikmiştir. Yaşlandırma etkisiyle cam tabakaların arasının daha belirgin şekilde ayrıldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.83).

Deniz suyu ortamında 90 gün yaşlandırılmış karbon/epoksi (CFRP) kompozitlerin morfolojik analizleri normal ortama göre daha düşük mikron boyutlarında yaklaşarak değerlendirilmiştir. Kırılan karbon elyafların üzerinde epoksi matrislerin topaklanmaları birikmiştir. Deniz suyunun etkisiyle takviye-matris fazları arasındaki adhezyonun azalması ile mekanik özelliklerde zayıflama görülmesi olarak yorumlanabilir. Bu durumda yaşlandırma etkisiyle karbon tabakaların arasının daha belirgin şekilde ayrıldığı delaminasyon olayıyla elyaflar kırılarak birbirinden ayrıldığı şeklinde yorumlanabilir (Şekil 4.84).

Deniz suyu ortamına 90 gün yaşlandırılmış cam-karbon/epoksi (GCFRP) kompozitlerin morfolojik analizleri normal ortama göre daha düşük mikron boyutlarında yaklaşarak değerlendirilmiştir. Cam-karbon tabakaların ara yüzeyindeki epoksi matrisin yapışma dayanımı belirleyen adhezyon kuvveti deniz suyu yaşlandırma etkisiyle azaldığı bilindiğinden buradaki fiber kırılmalarını ve ayrılmalarını daha belirgin hale getirdiği düşünülebilir (Şekil 4.85).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında; vakum destekli reçine transfer metoduyla üretilmiş cam/epoksi kompozit (GFRP), karbon/epoksi kompozit (CFRP) ve cam-karbon epoksi hibrit kompozitlerin (GCFRP) yapay deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamlarında 30,60 ve 90 gün sürelerinde yaşlandırılmasından sonra mekanik ve tribolojik davranışları kıyaslanarak incelenmiştir. Bu çalışmanın ilhamını; polimer matrisli hibrit kompozit malzemelerin farklı ortam şartlarındaki mekanik ve tribolojik dayanımlarının ne düzeyde olduğu konusuna cevap bulmak oluşturmuştur. Cam ve karbon fiberlerin farklı mekanik dayanıklılık gösterdiği uygulama alanlarında cam-karbon elyafların beraber dizilimleriyle oluşturulan tabakalı kompozitlerin hibritleşmesiyle mekanik dayanıklılığı iyileştirme etkisi denenmiştir. Mekanik testler için kompozitlere çekme, üç nokta eğilme testi, düşük hızlı darbe ve basma testleri yapılmıştır. Tribolojik testler için kompozitlerin kuru kayma aşınma testleri yapılmıştır.

Mekanik ve tribolojik davranışlarla ilgili sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Tüm yaşlandırma ortamlarında; GCFRP kompozitlerin ortalama absorpsiyon yüzdesi değerinin GFRP kompozitlerden yüksek, CFRP kompozitlerin absorpsiyon yüzdesel değerinden daha az değere sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Kompozit numunelerin tümünde kütleli absorpsiyon yüzde değerleri arasındaki farkın 30 gün (720 saat) ile 60 gün (1440 saat) arasındaki değişimlerde olduğu hesaplanmıştır. Ortamların absorpsiyon değerlerine etkisi incelendiğinde; en yüksek değerlerin makine yağı ortamında en düşük absorpsiyon değerlerinin dizel yakıt ortamında olduğu sonucuna varılmıştır.
- GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin yaşlandırma ortam etkilerinin çekme testi davranışlarına bakıldığında mekanik dayanımı en çok etkileyen ortamın deniz suyu ortamı olduğu sonucuna varılırken en az etkileyen ortamın dizel yakıt ortamı olduğu sonucuna varılmıştır. Normal ortamda oda koşullarındaki GFRP kompozitlerin 90 gün boyunca deniz suyu ortamında yaşlandırıldıktan sonraki elastisite modülü %17.01, CFRP kompozitlerin elastisite modülü %16.37 ve GCFRP kompozitlerin elastisite modülü %10.42 oranında azaldığı sonucu varılmıştır.

- GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin yaşlandırma ortam etkilerinin üç nokta eğilme testi davranışlarına bakıldığında, mekanik dayanımı en çok etkileyen ortamın deniz suyu ortamı olduğu sonucuna varılırken en az etkileyen ortamın dizel yakıt ortamı olduğu sonucuna varılmıştır. Kompozitlerin oda sıcaklığındaki gerilme dayanımları 90 günlük deniz suyu yaşlandırma etkisiyle; GFRP kompozitlerde %18.37 oranında, CFRP kompozitlerde %26.18, GCFRP kompozitlerde %17.46 oranında eğilme gerilme dayanımını azalttığı sonucuna varmıştır. Cam-karbon hibritleşme etkisinin eğilme dayanımına etkisi çok düşük oranda olduğu ve yaşlandırma etkisinde dayanımı en az olan kompozit tipi olmasına neden olmuştur.
- GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışları sonucunda en dayanıklı kompozit tipinin Cam/epoksi (GFRP) kompozitler olduğu sonucuna varılmıştır. Cam/epoksi kompozitlerin karbon/epoksi (CFRP) kompozitlerden daha dayanıklı olmasının sebebi cam elyafların darbe yüküne karşı daha sünek yapıda olmasıdır. Karbon elyaflar ise cam elyaflara göre daha kırılğan bir özelliğe sahiptirler. Karbon elyafların merkezde bulunduğu üst ve alt katmanların cam elyaflarla dizilimiyle oluşturulan GCFRP hibrit kompozitlerin darbe dayanımının arttığı sonucuna varılmıştır. Hibritleşme etkisinin düşük hızlı darbe dayanımını tüm ortam şartlarında artırdığı sonucuna varılmıştır.
- GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin düşük hızlı darbe dayanımını en çok etkileyen yaşlandırma ortamının çoktan aza doğru sıralanması deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamı olduğu sonucuna varılmıştır. Kompozitlerin oda sıcaklığındaki maksimum temas kuvveti değerinin 90 günlük deniz suyu yaşlandırma etkisiyle GFRP kompozitlerde %35.096 oranında, CFRP kompozitlerde %35.933 oranında, GCFRP hibrit kompozitlerde %35.797 oranında maksimum temas kuvvetini azalttığı sonucuna varılmıştır.
- GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin aksel basma davranışları incelenmiş, basma dayanımını en çok etkileyen yaşlandırma ortamının sırasıyla deniz suyu, motor yağı ve dizel yakıt ortamı olduğu sonucuna varılmıştır. Deniz suyu ortamında 90 gün boyunca yaşlandırılan kompozitlerin basınç dayanımları incelendiğinde; maksimum basma gerilmelerinin GFRP kompozitlerde %25,13, CFRP kompozitlerde %14.10 ve GCFRP kompozitlerde %16.51 azaldığı hesaplanmıştır. Tüm ortam koşulları genelinde kompozitlerin basma dayanımları kıyaslandığında, deniz suyu ortamında basınç dayanımına etkisinin motor yağı ve dizel yakıt ortamlarına göre daha fazla olduğu

tespit edilmiştir. Tüm ortam koşulları ve yaşlandırma ortam süreleri göz önünde bulundurulduğunda, en yüksek basınç gerilimi değerlerinin büyükten küçüğe doğru sıralaması karbon/epoksi (CFRP) kompozitlerde, cam-karbon/epoksi (GCFRP) hibrit GCFRP, cam/epoksi (GFRP) kompozitlerde olduğu tespit edilmiştir. Hibritleşme etkisiyle cam/epoksi kompozitlerin merkezlerindeki karbon elyafların basma dayanımını artırdığı tespit edilmiştir.

- Cam/epoksi (GFRP) kompozit ile karbon/epoksi (CFRP) kompozitlerin tüm ortam koşulları şartlarındaki kuru kayma aşınma test davranışları incelendiğinde, en fazla kütle kaybının olduğu yük değerinin 20 N, en az kütle kaybının 10 N yük değerinde olduğu sonucuna varılmıştır. Kompozitlerin spesifik aşınma oranını en çok artıran ortamın motor yağı yaşlandırma ortamı olduğu tespit edilmiştir. Spesifik aşınma oranını en az artıran ortamın deniz suyu ortamı olduğu sonucuna varılmıştır.
- GFRP, CFRP ve GCFRP kompozitlerin çekme testi sonrası morfolojik analizine bakıldığında; delaminasyonlar ve fiber çatlaklarının kırılma noktasında epoksi matrisinin varlığının azaldığı yerlerde hasara uğradığı sonucuna varılmıştır. Hibritleşme etkisinin sağlam bir birleşim olduğu ve dayanımı artırdığı sonucuna varılmıştır. Deniz suyu etkisiyle matris bozunması meydana geldiğinden hasarın daha düşük yüklerde başladığı tahmin edilmiştir.

Çalışma için öneriler ve değerlendirmeler aşağıda gösterildiği gibi sıralanabilir;

- Cam ve karbon elyafların örgülü kumaş seçilmesi mekanik dayanımı etkileyen bir durumdur. Farklı fiber yönelimlerine sahip cam ve karbon elyafların tercih edilmesiyle mekanik dayanımları etkileyeceği düşünülmektedir. Bu hususla; cam-karbon hibritleşme etkisini artırmak için farklı dizilimlere sahip kompozitler üretilebilir.
- Yaşlandırma etkisini en çok etkileyen deniz suyu ortamı için korozyon karşı daha güçlü polimer matrisler tercih edilebilir.
- Çalışmada test edilen kompozit tiplerinin hepsi motor yağı ortamı ve petrol yağı ortamında mekanik ve tribolojik davranışlarına ait dayanıklılıklar gayet iyi düzeydedir. Bu sonuçlar eşliğinde; cam/epoksi, karbon/epoksi ve cam-karbon/hibrit kompozitlerin yağ tankı, petrol tankı veya bu tür ortamların kullanıldığı makine elamanlarının dayanıklılık tercihinde geleneksel metal yapılara göre tercihi düşünülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Lui, J. and Patel J.** (2015). Improving product design by predicting flexural strength of a honeycomb core sandwich panel composite using ply tensile strength (Bachelor of Science). California Polytechnic State University, San Luis Obispo.
- [2] **Mayandi, K. Rajini, N. Ayrilmis, N. Devi, I.M.P. Siengchin, S. Mohammad, F. & Al-Lohedan, H.A.** (2020). An overview of endurance and ageing performance under various environmental conditions of hybrid polymer composites. *Journal of Materials Research and Technology*. 9(6),15962–15988.
- [3] **Cheng, M. Zhonga, Y. Umeyr Kureemun, U. Cao, D. Hua, H. Leed, H.P & Lie, S.** (2020). Environmental durability of carbon/flax fiber hybrid composites. *Composite Structure*. 234, 111719.
- [4] **Humeau, C. Davies, P. & Jacquemin, F.** (2018). An experimental study of water diffusion in carbon/epoxy composites under static tensile stress. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 107, 94–104.
- [5] **Ghabezi, P and Harrison N.M.** (2022). Hygrothermal deterioration in carbon/epoxy and glass/epoxy composite laminates aged in marine-based environment (degradation mechanism, mechanical and physicochemical properties), *J. Mater. Sci.* 57 (6),4239–4254.
- [6] **Tanks, J.D. Arao, Y. & Kubouchi, M.** (2018). Diffusion kinetics, swelling, and degradation of corrosion-resistant C-glass/epoxy woven composites in harsh environments. *Compos. Struct.* 202.,686–694.
- [7] **Li, C. Xian, G. & Li, H.** (2018). Influence of immersion in water under hydraulic pressure on the interfacial shear strength of a unidirectional carbon/glass hybrid rod. *Polym. Test.* 72, 164–171.
- [8] **Li, C. Yin, X. Liu, Y. Guo, R. & Xian, G.** (2020). Long-term service evaluation of a pultruded carbon/glass hybrid rod exposed to elevated temperature, hydraulic pressure and fatigue load coupling. *Int. J. Fatigue.* 134, 105480.
- [9] **Li, C. Yin, X. Wang, Y. Zhang, L. Zhang, Z. & Liu, Y.** (2020). Mechanical property evolution and service life prediction of pultruded carbon/glass hybrid rod exposed in harsh oil-well condition. *Compos. Struct.* 246, 112418.
- [10] **Rathore, D.K. Prusty, R.K. Mohanty, S.C. Singh, B.P. & Ray, B.C.** (2017). In-situ elevated temperature flexural and creep response of inter-ply glass/carbon hybrid FRP composites. *Mech. Mater.* 105, 99–111.
- [11] **Guo, R. Xian, G. Li, F. Li, C. & Hong, B.** (2022). Hygrothermal resistance of pultruded carbon, glass and carbon/glass hybrid fiber reinforced epoxy composites. *Constr. Build. Mater.* 315, 125710.
- [12] **Ghabezi, P and Harrison N.M.** (2020) Mechanical behavior and long-term life prediction of carbon/epoxy and glass/epoxy composite laminates under artificial seawater environment. *Mater. Lett.* 261, 127091.

- [13] **Chen, D. Sun, G. Meng, M. Jin, X. & Li, Q.** (2019). Flexural performance and cost efficiency of carbon/basalt/glass hybrid FRP composite laminates. *Thin-Walled Struct.* 142, 516–531.
- [14] **Li, A. J. Zhang, J. J. Zhang, F. Z. Li, L.. Zhu, S. P & Yang, Y. H.** (2020). Effects of fiber and matrix properties on the compressive strength of carbon fiber reinforced polymer composites. *Xinxing Tan Cailiao/New Carbon Mater.*, 35(6),752–761.
- [15] **Ali, M.I and Anjaneyulu, J.** (2018). Effect of fiber-matrix volume fraction and fiber orientation on the design of composite suspension system. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 455 (1), 0–10.
- [16] **Örçen, G.Turan, K. & Bingöl, S.** (2019). Mechanical properties of composite plates at different conditions. *Eur. J. Tech.* 4(4), 527–534.
- [17] **Xian, G Guo, R & Li, C.** (2022) . Combined effects of sustained bending loading, water immersion and fiber hybrid mode on the mechanical properties of carbon/glass fiber reinforced polymer composite. *Compos. Struct.* 281,115060.
- [18] **Barjasteh, E. Bosze, E.J. Tsai, Y.I. & S. R. Nutt, S.R.**(2009). Thermal aging of fiberglass/carbon-fiber hybrid composites. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 40(12), 2038–2045.
- [19] **Kumar, S.S Londe, N.V. Saviraj, A.S. & Kannanth,V.** (2017). Effect of Accelerated Ageing on Hardness and Flexural Behaviour of Woven fabric Glass/ Carbon Hybrid Epoxy Composites. *Mater. Today Proc.* 4(10), 10751–10756.
- [20] **Hawileh, R.A. Abu-Obeidah, A. Abdalla, J.A. & Al-Tamimi, A.** (2015). Temperature effect on the mechanical properties of carbon, glass and carbon-glass FRP laminates. *Constr. Build. Mater.* 75,342–348.
- [21] **Kootsookos, A. and Mouritz, A.P.** (2004). Seawater durability of glass- and carbon-polymer composites. *Compos. Sci. Technol.* 64,(10–11) 1503–1511.
- [22] **Mula, S. Bera, T. Ray, P. K. & Ray, B.C.** (2006). Effects of hydrothermal aging on mechanical behavior of sub-zero weathered GFRP composites. *Jourl of Reinfd Placs and Compts.* 6, 673–680.
- [23] **Aldajah, S. Alawsi, G. & Rahmaan, S.A.** (2009). Impact of sea and tap water exposure on the durability of GFRP laminates. *Mater. Des.* 30 (5),1835–1840.
- [24] **José-Trujillo, E. Rubio-González, C. & Rodríguez-González, J.A.** (2018). Seawater ageing effect on the mechanical properties of composites with different fiber and matrix types. *53 (23),* 3229–3241.
- [25] **Bonsu, A.O. Liang, W. Mensah,Cç & Yang, B.** (2022). Assessing the mechanical behavior of glass and basalt reinforced vinyl ester composite under artificial seawater environment. *Structures.* 38, 961–978.
- [26] **Sebaey, T.A.** Crashworthiness of GFRP composite tubes after aggressive environmental aging in seawater and soil. (2022). *Compos. Struct.* 284, 115105.

- [27] **Shreepannaga, M. Kini, V. & Pai, D.** (2022). The Ageing Effect on Static and Dynamic Mechanical Properties of Fibre Reinforced Polymer Composites under Marine Environment- A Review. *Mater. Today Proc.* 52, 689–696.
- [28] **Swami, M.C. and Dabade, B.M.** (2022). Effect Of Sea Water On Mechanical Properties Of Glass Fiber Reinforced Polymer With Silicon Dioxide & Silicon Oil Fillers. *Mater. Today Proc.* 51, 640–645.
- [29] **A. Enfedaque, A. Molina-Aldareguía, J.M. Gálvez, F. González, C. & Llorca, J.** (2010). Effect of glass fiber hybridization on the behavior under impact of woven carbon fiber/epoxy laminates. *J. Compos. Mater.* 44(25), 3051–3068,
- [30] **Imielińska K. and Guillaumat, L.** (2004).The effect of water immersion ageing on low-velocity impact behaviour of woven aramid-glass fibre/epoxy composites. *Compos. Sci. Technol.* 64 (13–14) , 2271–2278.
- [31] **Sayer, M. Bektaş ,N.B. Demir,E. & Çallioğlu, H.** (2012). The effect of temperatures on hybrid composite laminates under impact loading. *Compos. Part B Eng.* 43(5), 2152–2160.
- [32] **Suvarna, R. Arumugam, V. Bull, D.J. Chambers, A.R. & Santulli, C.** (2014). Effect of temperature on low velocity impact damage and post-impact flexural strength of CFRP assessed using ultrasonic C-scan and micro-focus computed tomography. *Compos. Part B Eng.* 66, 58–64.
- [33] **Kumar, C.S. Arumugam, V. Dhakal, H.N. & John, R.** (2015). Effect of temperature and hybridisation on the low velocity impact behavior of hemp-basalt/epoxy composites.*Compos. Struct.* 125, 407–416.
- [34] **Hoffman, J. Middleton, J. & Kumosa, M.** (2015). Effect of a surface coating on flexural performance of thermally aged hybrid glass/carbon epoxy composite rods,” *Compos. Sci. Technol.* 106,141–148.
- [35] **Komorek, A. Przybyłek, P. & Kucharczyk, W.** (2016). Effect of sea water and natural ageing on residual strength of epoxy laminates, reinforced with glass and carbon woven fabrics. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2016.
- [36] **Jesthi, D.K. Saroj, S. & Nayak, S.** (2021). The influence of seawater on mechanical properties of hybrid carbon and glass fiber polymer composites. *Mater. Today Proc.* 49, 507–509.
- [37] **Ulus, H. Kaybal, H.B. Eskizeybek, V. & Avcı, A.** (2021). Significantly improved shear, dynamic-mechanical, and mode II fracture performance of seawater aged basalt/epoxy composites: The impact of halloysite nanotube reinforcement. *Eng. Sci. Technol. an Int. J.* 24(4),1005–1014.
- [38] **Akderya, T.** (2018). Termal yaşlandırma ve termal yorulmanın yapılandırılmış cam fiber/epoksi kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkilerinin incelenmesi. (Doktora Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü. İzmir Katip Çelebi Üniversitesi.
- [39] **Kaybal, H.B.** (2019). Tuzlu su yaşlandırmasının civata bağlantılı halloysit nanotüp-epoksi/bazalt fiber nanokompozitlerin düşük hızlı darbe davranışlarına etkisi. (Doktora Tezi). Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. Konya Teknik Üniversitesi.

- [40] **Kaya, A.İ.** (2019). Doğal yaşlandırma koşullarının dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin dinamik davranışına etkisi. (Doktora Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü. Harran Üniversitesi.
- [41] **Ak, S.** (2019). Karbon nanotüp ve bor nitrür nano partikülleri ilaveli karbon fiber-epoksi kompozit borularının mekanik özelliklerine hidrotermal yaşlandırmanın etkisi. (Doktora Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü. Necmettin Erbakan Üniversitesi.
- [42] **Kaw, A.K.** (2005). *Micromechanics of Composite Materials*. CRC. Press.
- [43] **Url-1.** (2019). <https://www.bbehub.com/boat-manufacturing-using-fiberglass.php>. 5 Ağustos, 2022 tarihinde alındı.
- [44] **Url-2.** (2015, Mart 11). <https://www.plastics.gl/automotive/carbon-frame-design-for-an-automotive-body/>. 5 Ağustos, 2022 tarihinde alındı.
- [45] **Şahin, Y.** *Kompozit Malzemelere Giriş*. (2006). Ankara: Seçkin Yayınları.
- [46] **Önal, T.** (2020). Kompozit balsa yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesi. (Doktora Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü. İnönü Üniversitesi
- [47] **Mazumdar, S.** (2001). *Composites Manufacturing : Materials, Product, and Process Engineering*. CRC. Press.
- [48] **Url-3.** (2021,15 Ekim). <https://lifupipeline.en.made-in-china.com/> 6 Ağustos, 2022 tarihinde alındı.
- [49] **Kalaycı, E. Avinç, O. & A. Yavaş, A.** (2017). Polyether Ether Ketone (Peek) Fibers. *Cumhur. Sci. J.* 38(2), 168–168.
- [50] **Maul, J. Frushour, B.G. Kontoff, J.R. Eichenauer, Ott K.H. & C. Schade.** (2000). Polystyrene and Styrene Copolymers. *Ullmann's Encycl. Ind. Chem.*
- [51] **Bulut Y. and Erdoğan, Ü.H.** (2011). Selüloz esaslı doğal liflerin kompozit üretiminde takviye materyal olarak kullanımı. *J. Text. Eng.* 82,26–35.
- [52] **Tesoro, G. (1988).** Epoxy resins-chemistry and technology, 2nd Edition, Clayton A. May, Ed., Marcel Dekker, *J. Polym. Sci. Part C Polym. Lett.* 26(12), 539–539.
- [53] **Saylık, A.** (2016). Kompozit yama ile tamir edilmiş çentikli alüminyum levhalarda gerilme analizi. (Yüksek Lisans Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü. Fırat Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü.
- [54] **Choi, M.H. Byun, H.Y. & Chung, I.J.** (2002). The effect of chain length of flexible diacid on morphology and mechanical property of modified phenolic resin. *Polymer (Guildf).* 43(16), 4437–4444.
- [55] **Mindivan, F. and Gürses, A.** (2020). Resol tipi fenolik reçinelerin sentezi ve karakterizasyonu. *Afyon Kocatepe Univ. J. Sci. Eng.* 20(3), 407–417.
- [56] **Url-4.** (2018, 2 Mart) <https://epra.eu/en/phenolic-resin/application-areas/friction/> 8 Ağustos, 2022 tarihinde alındı.
- [57] **Köpnick, H. Schmidt, M. Brüggling, W. Rüter, J. & Kaminsky, W.** (1992). *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley.
- [58] **Rosato, D.V. Rosato, D.V. & Rosato, M.V.** (2004). Plastic product material and process selection handbook. Elsevier Science.

- [59] **Url-5.** (2011, 1 Temmuz). <https://www.turkchem.net/polyester-recinesi-kullanim-alanlari.html>. 7 Ağustos, 2022 tarihinde alındı.
- [60] **P.Bains, P.S. Sidhu, S.S. & Payal, H.S. (2015).** Fabrication and Machining of Metal Matrix Composites: A Review. 31(5) 53–573.
- [61] **Kumar, A. Lal, S. & Kumar, S. (2013).** Fabrication and characterization of A359/Al₂O₃ metal matrix composite using electromagnetic stir casting method. J. Mater. Res. Technol. 2(3). 250–254.
- [62] **Dieringa, H. and Kainer, K.U. (2012).** Magnesium matrix composites: State-of the-art and what's the future. Adv. Mater. Res. 410. 275–278.
- [63] **Taya, M. and Arsenault, R.J. (1989).** *Metal matrix composites : thermomechanical behavior*. Pergamon Press.
- [64] **Gooch, W.A. (2004).** An overview of ceramic armor applications, *6th Technical Conference IDEE*, Trencin, Slovakia : May 6-7.
- [65] **Windhorst T. and Blount, G. (1997).** Carbon-carbon composites: A summary of recent developments and applications. Mater. Des. 18(1),11–15.
- [66] **Gradl, P.R. and Valentine, P.G. (2017).** Carbon-carbon nozzle extension development in support of in-space and upper-stage liquid rocket engines. *53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, Atlanta, GA, USA: July 10-12.
- [67] **Kısaşöz, A.A. (2018).** Alüminyum matrisli titanyumdiborür in situ takviyeli kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu. (Yüksek Lisans Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [68] **Yastımoğlu F. and Özkan, A. (2017).** Tekrarlanan yükler altında kompozit malzemelerin yapılarının incelenmesini amaçlayan deney aygıtı tasarımı. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknol. Derg. 5(1), 56–66.
- [69] **Chawla, K.K. (2019).** *Composite Materials: Science and Engineering*. Compos. Mater. Sci. Eng.
- [70] **Beşergil, B. (2016).** *Kompozitler: Doğadan Teknolojiye Temel İlkeler*. Ankara Gazi Kitapevi.
- [71] **Sobri, S.A. R. Heinemann, R. and Whitehead, D. (2020) .** *Composite Materials: Applications in Engineering, Biomedicine and Food Science*. Springer Cham.
- [72] **Rajak, D.K. Pagar, D.D. Menezes, P.L. & E. Linul, E. 2019.** Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications. Polymers 11(10), 1667.
- [73] **Erdoğan, Y.E. (2020).** Doğal lif takviyeli partikül dolgulu polimer matrisli kompozitlerin mekanik ve tribolojik davranışlarının incelenmesi. (Doktora Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü. İnönü Üniversitesi.
- [74] **Tsai, Y.I. Bosze, E.J. Barjasteh, E & Nutt, S.R. (2009).** Influence of hygrothermal environment on thermal and mechanical properties of carbon fiber/fiberglass hybrid composites. Compos. Sci. Technol.. 69(3–4). 432–437.

- [75] **Asi, D.** (2018). Polimer matrisli kompozit malzemelerde ilave olarak kullanılan parçacıkların geometrisinin kompozit malzemelerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerine etkisinin araştırılması. (Doktora Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü. Uşak Üniversitesi.
- [76] **Aşkın, M.Y.** (2020). Alüminyum ve magnezyum matrisli prepreg takviyeli lamine kompozit malzeme üretimi ve özelliklerinin incelenmesi. (Doktora Tezi). Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. Karabük Üniversitesi.
- [77] **Singh, B. Singh, S.K. & Karnwal, S.** (2020). *Polymer matrix composite by vacuum assisted resin transfer molding*. EasyChair.
- [78] **Durgun, I.** (2014). Production of carbon with vacuum infusion method. *7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, Bursa, Turkey: 26 – 27 Mayıs .
- [79] **Lin, L.Y. Lee, J.H. Hong, C.E. Yoo, G.H. & Advani, S.G.** (2006). Preparation and characterization of layered silicate/glass fiber/epoxy hybrid nanocomposites via vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM). *Compos. Sci. Technol.*, 66(13), 2116–2125.
- [80] **Barbero, E.J.** (2017). *Introduction to composite materials design*. CRC. Press.
- [81] **Kornmann, X. Rees, M. Thomann, Y. Necola, A. Barbezat, M. & Thomann, R.** (2005). Epoxy-layered silicate nanocomposites as matrix in glass fibre-reinforced composites. *Compos. Sci. Technol.* 65(14), 2259–2268.
- [82] **Jawaid, M. Thariq, M. & N. Saba, N.** (2018). *Durability and life prediction in biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites*. Woodhead Publishing.
- [83] **Aird, F.** (1996). *Fiberglass & Composite Materials: An Enthusiast's Guide to High Performance Non-metallic Materials for Automotive Racing and Marine Use*. HP Books.
- [84] **Topkaya, T.** (2017). Bal peteği sandviç kompozitlerin darbe ön hasarı sonrası yorulma davranışlarının araştırılması. (Doktora Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü. Fırat Üniversitesi, 2017.
- [85] **Strong, A.B.** (2008). *Fundamentals of Composites Manufacturing, Materials Methods and Applications*. Society of Manufacturing Engineers.
- [86] **Hexion Specialty Chemicals** (2006). *Epikote RIMR 135 and epikure curing agent mgs RIMH 134–RIMH 137 Technical Information*. Stuttgart: Hexion
- [87] **ASTM International.** (2014). Standard test method for tensile properties of plastics. ASTM International.
- [88] **ASTM International.** (2007). Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM International.
- [89] **ASTM International.** (2012). Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites.
- [90] **ASTM International.** (1997). Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading. ASTM Stand. 16(1), 29.

- [91] **ASTM International.** (2017). Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. ASTM International.
- [92] **Applications, M.** (2015). Shell Helix HX7 10W-40. 40, 3–4.
- [93] **Fuel, A.D.** (2018). Shell v-power diesel. 2018.
- [94] **Koruvatan, A.** (2008). Farklı Kür Sıcaklığı Ve Sürelerinde Üretilen Tabakalı Kompozit Plakaların Pimli/Civatalı Bağlantılarının Hasar Analizinin İncelenmesi. (Doktora Tezi) . Fen Bilimleri Enstitüsü. Balıkesir Üniversitesi.
- [95] **Okutan, B.** (2001). Stress and Failure Analysis of Stress and Failure Analysis of. (Doktora Tezi) . Fen Bilimleri Enstitüsü. Dokuz Eylül Üniversitesi, 2001.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ahmet SAYLIK

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2016, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı
- **Doktora** : 2022, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2014-2022 Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalıştı.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

- **Saylık, A., Temiz, Ş. (2022-June)**. Low-speed impact behavior of fiber-reinforced polymer-based glass, carbon, and glass/carbon hybrid composites, (64):6, 820-831. 2022.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

- **Saylık, A., Temiz, Ş. (2021, December)**. Compression strength behavior of fiber reinforced polymer-based glass, carbon, and glass/carbon hybrid composites. In 2021 3rd International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2021) Ankara/Turkey (pp. 662-668).
- **Saylık, A., Temiz, Ş. (2022, June)**. Degradation and compression strength behavior of glass-carbon/epoxy hybrid composites subjected to aging in artificial seawater, engine oil and diesel fuel. In 2022 Karabakh III. International Congress Of Applied Sciences "Year Of Shusha- 2022 Karabagh/Azerbaijan (pp. 41-49).
- **Saylık, A., Temiz, Ş. (2022, December)**. Flexural strength behavior of aged glass-carbon/epoxy hybrid composites in seawater, engine oil and diesel fuel degradation environments. In 2022 International Conferences on Science and Technology Engineering Sciences and Technology (ICONST EST 2022) Budva, Montenegro (pp. 186-196).