

-

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İZOFTALİK POLYESTER REÇİNE MATRİSLİ SÜREKLİ E-CAMI VE BAZALT
FİBER DESTEKLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU**

TUĞÇEGÜL GÜMÜLCİNE

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MALZEME PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. AHMET ÜNAL**

İSTANBUL, 2014

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İZOFTALİK POLYESTER REÇİNE MATRİSLİ SÜREKLİ E-CAMI VE BAZALT
FİBER DESTEKLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU**

Tuğçegül GÜMÜLCİNE tarafından hazırlanan tez çalışması 16.06.2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Ahmet ÜNAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ahmet ÜNAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU
İstanbul Üniversitesi

Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2011-07-02-YULAP04 numaralı projesi ve MİR Ar-Ge A.Ş. tarafından desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışması, hayatımızın her alanına giren ve özellikleri devamlı geliştirilen kompozitlerin üretimi için daha efektif alternatif hammadde kullanımını desteklemek amacıyla yapılmış literatür ve deneysel kapsamaktadır.

Bu yüksek lisans çalışması Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde, Prof. Dr. Ahmet Ünal yönetiminde, Mir Ar-Ge A.Ş ve YTÜ Bilimsel Araştırma Projesi desteği ile tamamlanmıştır. Deneysel çalışmalar YTÜ Kimya Metalurji Fakültesinde bulunan Mir Ar-Ge A.Ş.'nin desteği ile kurulmuş olan Kompozit Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin üretimi sırasında Avitaş A.Ş. firmasından yardım alınmıştır.

Yüksek linsans tez çalışmam, Yıldız Teknik Üniversitesindeki lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bana kol kanat geren, engin bilgisi ve tecrübesi ile meslek hayatıma ışık tutan hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet ÜNAL'a adanmıştır.

Tez çalışması boyunca bana hammadde temini, cihaz ve laboratuvar kullanımı konusunda olanaklar sunan ve mühendislik yaklaşımları ile bana yardımcı olan Mir Ar-Ge A.Ş.'ye ve tüm çalışanlarına teşekkür ederim. Ar-Ge çalışmalarına inancı ve yeni fikirlerin arkasında duran Mir Holding Yönetim Kurulu Başkanı Sayın İbrahim Mirmahmutoğulları, Ar-Ge Müdürü Sayın Dr. Zafer Gemici ve proje yönetiminde her an yanımda olan Kimya Yüksek Mühendisi Mustafa Doğu'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Laboratuvarda omuz omuza çalıştığımız, bu süreçte benden hiçbir yardımı esirgemeyen Arş.Gör. Dr. Aylin Altınbay ve Duygu Gülfem Baydar'a çok teşekkür ederim. Tezin yazımında hep yanımda olan Selin Engürlü'ye sonsuz teşekkürler. Tüm eğitim hayatımda benim yanımda olan ve daha iyisi için beni her zaman yüreklendiren aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs, 2014

Tuğçegül GÜMÜLCİNE

İÇİNDEKİLER

sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	ix
KISALTMA LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ÖZET	xvii
ABSTRACT.....	xix
BÖLÜM 1	
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Hipotez	5
BÖLÜM 2	
KOMPOZİT MALZEMELERE GİRİŞ	7
2.	10
2.1 Matris ve Takviye Elemanları	10
2.1.1 Matris Malzemesine Göre Kompozitler.....	11
2.1.1.1 Polimer Matrisli Kompozitler (PMK)	11
2.1.1.2 Metal Matrisli Kompozitler (MMK)	12
2.1.1.3 Seramik Matrisli Kompozitler (SMK)	12
2.2 Takviye Elemanına Göre Kompozitler	13
2.2.1 Partikül Takviyeli Kompozitler	13
2.2.2 Fiber Takviyeli Kompozitler	14
2.3 Sandwich Yapılı Kompozitler	14
BÖLÜM 3	

POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER.....	16
3.	16
3.1 Matris Malzemeleri.....	16
3.1.1 Termoplastik Matrisler	17
3.1.2 Termoset Matrisler	18
3.1.2.1 Polyester Reçineler	20
3.1.2.1.1 Polyester Reçinelerin Kimyası	22
3.1.2.1.2 Mekanik Özellikler.....	23
3.1.2.1.3 Polyester Reçinelerin Korozyon Özellikleri	25
3.1.2.1.4 Polyester Reçinelerin Kürlenmesi	26
3.1.2.2 Epoksi Reçineler	27
3.1.2.2.1 Epoksi Reçinelerin Kürlenmesi.....	29
3.1.2.3 Fenolik Reçineler	32
3.2 Fiber Malzemeleri	32
3.2.1 Cam Fiberler	33
3.2.1.1 Cam Fiberlerin Üretimi.....	34
3.2.2 Bazalt Fiberler	36
3.2.2.1 Bazalt Fiberlerin Üretimi	37
3.2.2.2 Bazalt Fiberlerin Mekanik Özellikleri.....	38
3.2.2.3 Bazalt Fiberlerin Kullanım Alanları	42
3.2.3 Karbon Fiberler	43
3.2.3.1 Karbon Fiberlerin Mekanik Özellikleri.....	43
3.2.3.2 Karbon Fiberlerin Üretimi	45
3.2.4 Aramid Fiberler.....	46
3.2.4.1 Aramid Fiberlerin Mekanik Özellikleri.....	47
BÖLÜM 4	
KOMPOZİT MALZEMELERDE MİKROMEKANİK YAKLAŞIMLAR.....	49
4.	50
4.1 Yoğunluk	50
4.2 Fiber Takviyeli Kompozitlerde Özelliklerin Analizi	51
4.2.1 Eş Yönlü Fiberlerde Elastiklik Modülü	51
4.2.1.1 Eşgerinim Koşulu	52
4.2.1.2 Eşgerilim Koşulu	54
4.3 Fiber Uzunluk Etkisi.....	59
4.4 İmalat Gerilmeleri ve Isıl Genleşme Katsayıları	60
4.5 Minimum Fiber Hacim Oranları	61
4.6 Maksimum Fiber Hacim Oranları	63
BÖLÜM 5	
TERMOSET MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ	65
5.	68

5.1	El Yatırması Yöntemi (Hand Lay up).....	68
5.1.1	Prepreg Lay-up.....	69
5.1.2	Wet Lay-up	71
5.2	Vakum Torbalama Yöntemi (Vacuum Bagging) :	72
5.3	SCRIMP (Seeman Composites Resin Infusion Molding Process)	75
BÖLÜM 6		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR		77
6.		77
6.1	Deney Grupları	77
6.2	Takviye Malzemeleri	78
6.3	Matris Malzemesi	81
6.4	Reçinenin Hazırlanması.....	83
6.5	Kompozit Plakaların Üretimi	84
6.5.1	El Yatırması	85
6.5.2	Vakum Torbalama (Bagging)	88
6.5.2.1	Vakum Bagging Donanımları ve Kullanılan Sarf Malzemeleri	88
6.6	Deney Parçası Hazırlama İşlemleri.....	93
6.6.1	Kesme İşlemi.....	95
6.6.2	Zımparalama işlemi	96
6.6.3	Pim deliklerinin açılması	96
6.7	Elyaf Takviyeli Kompozit Numunelerin Karakterizasyonu	96
6.7.1	Mekanik Deneyler.....	97
6.7.1.1	Çekme Testi.....	97
6.7.1.2	Darbe Testi (Charpy)	98
6.7.1.3	Eğme ve Kesme Testi.....	100
6.7.2	Fiziksel Deneyler	101
6.7.2.1	Kalsinasyon (Kül) Testi.....	101
6.7.2.2	Yoğunluk Testi	102
6.7.2.3	Su Absorbsiyonu Testi	103
BÖLÜM 7		
BULGULAR.....		106
7.		106
7.1	Çekme Testi Sonucunda Elde Edilen Bulgular.....	106
7.2	Darbe Testi Sonucunda Elde Edilen Bulgular	120
7.3	Eğme Testi Sonucunda Elde Edilen Bulgular	129
7.4	Yoğunluk Testi Sonucunda Elde Edilen Bulgular	137
7.5	Nem Absorbsiyonu Testi sonucunda Elde edilen Bulgular	138
BÖLÜM 8		
SONUÇ VE ÖNERİLER		141

KAYNAKLAR.....	146
ÖZGEÇMİŞ.....	153

SİMGE LİSTESİ

α	Isıl genleşme katsayısı
Al_2O_3	Alüminyum dioksit
B_2O	Boroksit
C	Karbon
CaO	Kalsiyumoksit
CH_3	Metil
CH_2	Etilen
E	Elastiklik Modülü
F	Fahrenayt
Fe_2O_2	Demiroksit
G	Kayma modülü
GPa	Gigapaskal
H	Hidrojen
K	Kelvin
K_2O	Potasyumoksit
kg	Kilogram
M	Molaraite
MgO	Magnezyumoksit
MPa	Megapaskal
N	Azot
NaO	Sodyumoksit
O	Oksijen
OH	Hidroksil
Pa	Paskal
R	Radikal Grup
SiC	Silisyum karbür
Tg	Camsı geçiş sıcaklığı
TiO_2	Titanyumoksit
W	Watt
V_f	Fiber hacim oranı
V_m	Matris hacim oranı

σ_f	Fiberlerin çekme dayanımı
σ_c	Kompozit malzemenin çekme dayanımı
$\sigma_{//}$	Paralel yöndeki çekme dayanımı
$\sigma_{\perp}$	Dik yöndeki çekme dayanımı
ϵ	Gerinim
ϵ_f	Fiberlerin gerinimi
ϵ_m	Matris malzemesinin gerinimi
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
μ	Mikron
Ω	Ohm
ν	Poisson Oranı
$//$	Paralel

KISALTMA LİSTESİ

ASTM	American Society for Testing and Materials
CAS	Cam seramik
HEMA	Hidroksil Metakrilat Poliüretan
LPA	Low-profile additive
MEKP	Metil Etil Keton Peroksit
MMK	Metal Matrisli Kompozit
SMK	Seramik Matrisli Kompozit
PMK	Polimer Matrisli Kompozit
PEEK	Polieterketon
PI	Poliimid
PMC	Polimer Matrisli Kompozitler
PPS	Polifilen Sülfid
UPE	Doymamış Polyester Reçine (Unsaturated polyester resin)

ŞEKİL LİSTESİ

	sayfa
Şekil 2. 1 Kompozit yapıların ana bileşenlerinin şematik gösterimi [26].	7
Şekil 2. 2 a) Fiber, matris ve kompozit malzemelerin gerilim-gerinim eğrileri, b) kompozit malzeme elemanlarının şematik gösterimi.	9
Şekil 2. 3 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.	11
Şekil 2. 4 Çeşitli şekillerde takviye edilmiş kompozit malzeme yapıları. a) partikül takviyeli. b) kısa fiber takviyeli. c) uzun fiber takviyeli. d) lamine yapılı kompozit malzeme.	11
Şekil 2. 5 Metal, seramik ve polimer matris örneklerinin çekme dayanımı-%uzama eğrisi [25].	13
Şekil 2. 6 Yapısal kompozit malzemelerin yapıları ve bileşenleri (düz dolgu ve balpeteği uygulaması) [32], [33].	14
Şekil 2. 7 Artan dolgu malzemesi kalınlığının eğme dayanımı üzerindeki etkisi [27].	15
Şekil 3. 1 İzofталık bir polyesterin çapraz bağlanma reaksiyonu.	21
Şekil 3. 2 Polyester malzemenin SEM görüntüsü [41].	21
Şekil 3. 3 Polyester malzemelerin (adipik asit+etilen glikol) polimerizasyon reaksiyonu ve su açığa çıkması.	23
Şekil 3. 4 Polyester reçinenin kürlenmesi. 1. Polyester reçine içindeki kürlenmeye hazır yapılar: a) düşük molekül ağırlıklı doymamış reçine molekülleri, b) reaktif çözücü (stiren) molekülleri, c) başlatıcı molekülleri. 2. Kürlenmiş polyester yapısı, çapraz bağların oluşması. (n değeri genel amaçlı polyester reçineler için ~2-3'tür) [45].	27
Şekil 3. 5 Amin kürlenmiş epoksi reçine [46].	30
Şekil 3. 6 Fiber çekimi görüntüsü [50].	35
Şekil 3. 7 Cam fiber üretiminin şematik gösterimi.	35
Şekil 3. 8 a) Kayaç haldeki bazalt. b) Ergiyik bazalt lavı.	36
Şekil 3. 9 Çeşitli formlarda üretilmiş bazalt mamüller.	38
Şekil 3. 10 a) Fiberlerdeki miktar azalması, b) fiberlerde meydana gelen dayanım düşüşü (1 M NaOH ortamında) [17].	42
Şekil 3. 11. PAN (polyacrylonitrile) ve zift prosesinin şematik gösterimi.	45
Şekil 4. 1 Eşyönlü fiberlerde eşgerinim ve eşgerilim durumları.	51
Şekil 4. 2 Eşyönlü fiber takviyeli kompozitlerde yükleme yönleri.	51
Şekil 4. 3 Eşgerinim durumu [82].	52
Şekil 4. 4 Eşit gerilim koşulunun temsili gösterimi [82].	54

Şekil 4. 5 Eşgerilim ve eşgerinim durumlarında elastiklik modülünün fiber hacim oranı ile değişimi.	56
Şekil 4. 6 Çekme yükü altındaki fiber takviyeli kompozit malzemede oluşan kayma gerilmeleri.	56
Şekil 4. 7 Kompozit malzemeler için kayma hareketi	57
Şekil 4. 8 Poisson oranı.	57
Şekil 4. 9 Malzeme mekaniği yaklaşımı ile elastik sabitlerin belirlenmesi.	59
Şekil 4. 10 σ_f'' için $\varepsilon_f'' < \varepsilon_m''$ olduğunda karışımlar kuralı yaklaşımı.	62
Şekil 4. 11 (a) Eş yönlü sürekli fiberli plaka kesiti, (b) Bu plakada fiberlerin altıgen ve kare dizilişleri.	63
Şekil 5. 1 Termoset kompozitler için standart proses teknikleri [38].	67
Şekil 5. 2 Geleneksel el yatırması yöntemi şematik gösterimi.	68
Şekil 5. 3 El yatırması yöntemi üretilmekte olan tekne örnekleri.	69
Şekil 5. 4 Preperg lay up uygulaması.	69
Şekil 5. 5 a) Vakum bag yönteminin şematik gösterimi. b) vakum bag uygulanmış el yatırması prosesi.	72
Şekil 5. 6 Otoklav prosesi için tipik kurlama döngüsü.	74
Şekil 5. 7 Otoklav prosesinin şematik görünümü.	74
Şekil 5. 8 Otoklav.	75
Şekil 5. 9 a) SCRIMP prosesinin şematik gösterimi. b) SCRIMP prosesinin uygulanışı. ..	76
Şekil 6. 1 Deney gruplarının oluşturulması.	78
Şekil 6. 2 Takviye malzemesine göre deney grupları.	79
Şekil 6. 3 Kullanılan sürekli fiber ve dokuma elyaflar takviyeler. a) sürekli bazalt fiber, b) sürekli E-camı fiber, c) bazalt düz dokuma ve d) E-camı düz dokuma.	80
Şekil 6. 4 Doymamış polysterlerin oluşumu.	82
Şekil 6. 5 Termoset reçinenin hazırlanması. a) ilavelerin katılması, b) reçinenin homojen karıştırılması.	84
Şekil 6. 6 Kullanılan üretim yöntemleri.	84
Şekil 6. 7 El yatırması yönteminin şematik gösterimi.	85
Şekil 6. 8 a) Gerdirilmiş cam fiber, b) gerdirilmiş bazalt fiber.	86
Şekil 6. 9 El yatırması yöntemi ile üretilmiş kompozit plakalar. a) keçe takviyeli, b) dokuma takviyeli.	86
Şekil 6. 10 El yatırması yöntemi ile numune üretiminde işlem basamakları.	87
Şekil 6. 11 Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi.	88
Şekil 6. 12 Vakum torbalama yönteminde kullanılan sarf malzemeleri ve donanımlar.	89
Şekil 6. 13 Vakum bagging uygulaması.	91
Şekil 6. 14 Kurlama prosesi için sıcaklık – bekleme süresi ilişkisi.	92
Şekil 6. 15 a) Etüv fırını, b) Gergi aparatında kurlanmış plaka.	93
Şekil 6. 16 Test numunelerinin şekli ve boyutları. a) Çekme deneyi numunesi, b) Darbe deneyi numunesi, c) Eğme deneyi numunesi.	94
Şekil 6. 17 Dokuma ve keçe takviyeli termoset matrisli çekme testi numuneleri.	95
Şekil 6. 18 Darbe, eğme, yoğunluk ve su absorpsiyonu numuneleri.	95
Şekil 6. 19 Numunelerin kesilerek hazırlanması.	95
Şekil 6. 20 Çekme testi numuneleri için klape bağlantıları: (a) pim tipi ve (b) testere çene tipi.	96

Şekil 6. 21 (a) Kemik ve (b) düz kenarlı çekme test numuneleri [100] , [101]. [54, 55].	97
Şekil 6. 22 100 kN kapasiteli, bilgisayar kontrollü Mohr Federhaff marka çekme cihazı.	98
Şekil 6. 23 Izod ve Charpy darbe test cihazı ve numuneleri [27].	99
Şekil 6. 24 DEVOTRANS CD-1 marka darbe cihazı görüntüsü.	100
Şekil 6. 25 Eğme testi [3].	100
Şekil 6. 26 Kalsinasyon işlemi ve sonrasında elde edilen kül. a) Proterm, PLF 120/5 Model kalsinasyon fırını, b) Kalsinasyon testi sonrasında elde kalan kül.	102
Şekil 6. 27 Hassas terazi ve yoğunluk ölçme aparatı.	103
Şekil 6. 28 Su absorpsiyonunun nem içeriği ile değişimi [101].	104
Şekil 6. 29 Su absorpsiyonu numuneleri a) cam fiberli numuneler, b) bazalt fiberli numuneler.	105
Şekil 7. 1 Kompozit numunelerin gerilim-gerinim eğrisi.	109
Şekil 7. 2 Çekme yükü altındaki sürekli fiber takviyeli kompozit numune.	109
Şekil 7. 3 Sürekli E-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı eğrisi.	110
Şekil 7. 4 Sürekli E-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozitlerin elastiklik modülü eğrisi.	111
Şekil 7. 5 Ortalama çekme mukavemeti ve % fiber hacim oranı grafiği.	113
Şekil 7. 6 Ortalama elastiklik modülü ve % fiber hacim oranı grafiği.	114
Şekil 7. 7 Çekme testine tabi tutulmuş sürekli fiber takviyeli kompozit numuneler. a) ve b) Gevrek kırılma göstermiş numuneler. c) ve d) çoklu kırılma ve fiber sıyrılması göstermiş numuneler. e) ve f) çoklu kırılma ve delaminasyon göstermiş numuneler.	115
Şekil 7. 8 dokuma takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı-%hacim oranı grafiği.	119
Şekil 7. 9 Ortalama darbe mukavemeti ve ortalama fiber hacim oranı grafiği.	127
Şekil 7. 10 Eğme testi sonucunda elde edilen gerilim-sehim eğrisi.	131
Şekil 7. 11 Ortalama eğme mukavemeti ve % fiber hacim oranı grafiği.	132
Şekil 7. 12 Eğme modülünün fiber takviye oranına göre değişimi.	133
Şekil 7. 13 Dokuma takviyeli kompozitlerin eğme dayanımı-%hacim oranı grafiği.	137
Şekil 7. 14 Sürekli E-camı ve bazalt takviyeli kompozitlerin su absorpsiyonu grafiği.	139
Şekil 7. 15 Dokuma takviyeli kompozitlerin nem absorpsiyonu grafiği.	140

ÇİZELGE LİSTESİ

	sayfa
Çizelge 2. 1 Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları [27].	8
Çizelge 3. 1 Termoset reçinelerin avantaj ve dezavantajları [23].	19
Çizelge 3. 2 Bazı termoset reçinelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [28].	20
Çizelge 3. 3 Çeşitli polyester malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri.	23
Çizelge 3. 4 Cam fiber takviyeli polyester reçine matrisli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri.	24
Çizelge 3. 5 Takviye elemanı tipi ve miktarının mekanik özellikler üzerindeki etkisi [42].	25
Çizelge 3. 6 Polyester reçine matrisli cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin korozyon dayanımı.	26
Çizelge 3. 7 Aromatik amin kürlenmiş epoksi reçinelerin özellikleri.	31
Çizelge 3. 8 E-camı fiberlerin fiziksel ve mekanik özellikleri [26].	34
Çizelge 3. 9 Bazalt ve cam fiberlerin kimyasal kompozisyonları (%ağırlıkça).	37
Çizelge 3. 10 Tek bir bazalt ve E-camın filamentin mekanik ve ısı özelliklerinin karşılaştırılması [57].	40
Çizelge 3. 11 Bazalt ve cam fiberler malzemelerin kimyasal dayanımlarının karşılaştırılması [57].	40
Çizelge 3. 12 PAN bazlı karbon fiberlerin mekanik özellikleri.	44
Çizelge 3. 13 Zift bazlı karbon fiberlerin mekanik özellikleri.	45
Çizelge 3. 14 Yüksek modüllü aramid fiberlerin fiziksel ve mekanik özellikleri.	47
Çizelge 6. 1 Sürekli fiberlerin fiziksel özellikleri.	80
Çizelge 6. 2 Dokuma takviyelerin fiziksel özellikleri.	81
Çizelge 6. 3 Fiber malzemelerin mekanik özellikleri.	81
Çizelge 6. 4 Fiber malzemelerin kimyasal özellikleri.	81
Çizelge 6. 5 Polipol 3872 reçinenin kimyasal içeriği.	82
Çizelge 6. 6 Polipol 3872 reçinenin fiziksel özellikleri.	83
Çizelge 6. 7 Post-kür uygulanmış Polipol 3278 reçinenin mekanik özellikleri.	83
Çizelge 6. 8 Polipol 3872 kürlenmesi için yapılan ilaveler.	83
Çizelge 6. 9 El yatırması ile üretilen kompozit plakaların gruplanması.	87
Çizelge 6. 10 Vakum bagging yöntemi ile üretilen kompozit plakaların gruplanması.	87
Çizelge 6. 11 Kompozit numunelerin fiziksel ve mekanik testlerinde kullanılan standartlar.	93

Çizelge 7. 1 Sürekli E-camı fiber takviyeli kompozit numunelerin çekme deneyi sonuçları.....	107
Çizelge 7. 2 Sürekli bazalt fiber takviyeli kompozit numunelerin çekme deneyi sonuçları.	108
Çizelge 7. 3 Sürekli fiber takliveli kompozit numunelerde artan %Vf miktarına göre hesaplanan teorik çekme dayanımı ve teorik elastiklik modülü değerleri.	111
Çizelge 7. 4 Ortalama çekme deneyi, ortalama elastik modülü ve fiber hacim oranı sonuçları.....	112
Çizelge 7. 5 Dokuma ve keçe takviyeli, el yatırması ve vakum bagging yöntemleri ile üretilmiş E-camı takviyeli numunelerin çekme deneyi sonuçları.	117
Çizelge 7. 6 Dokuma ve keçe takviyeli, el yatırması ve vakum bagging yöntemleri ile üretilmiş bazalt fiber takviyeli numunelerin çekme deneyi sonuçları.....	118
Çizelge 7. 7 Sürekli E-camı ve bazalt fiber takviyeli numunelerin darbe testi sonuçları.	120
Çizelge 7. 8 El yatırması ve vakum bagging yöntemi ile üretilmiş E-camı fiber takviyeli darbe dayanımı, kırılma tokluğu ve %Vf oranı.....	125
Çizelge 7. 9 El yatırması ve vakum bagging yöntemi ile üretilmiş bazalt fiber takviyeli darbe dayanımı, kırılma tokluğu ve %Vf oranı.....	126
Çizelge 7. 10 Sürekli fiber takviyeli kompozit numunelerde artan %Vf oranına göre kırılma tokluğu değerleri.....	126
Çizelge 7. 11 Ortalama darbe mukavemeti ve ortalama fiber hacim oranı grafiği.	127
Çizelge 7. 12 Dokuma takviyeli kompozit numunlerin kırılma enerjisi, darbe dayanımı ve % fiber hacim oranı.	128
Çizelge 7. 13 Eğme testi (E-camı fiber takviyeli numunler) sonuçları.....	129
Çizelge 7. 14 Eğme testi (Bazalt fiber takviyeli numuneler) sonuçları.....	130
Çizelge 7. 15 Sürekli fiber takviyeli kompozit numunelerde artan %Vf oranına göre eğme dayanımı ve eğme modülü değerleri.	131
Çizelge 7. 16 Sürekli fiber takviyeli kompozitlerin ortalama eğme dayanımları ve fiber hacim oranları.	132
Çizelge 7. 17 E-camı dokuma takviyeli kompozit numunelerin eğme testi sonuçları. .	135
Çizelge 7. 18 Bazalt dokuma takviyeli kompozit numunelerin eğme testi sonuçları. ..	136
Çizelge 7. 19 Ortalama eğme dayanımı, eğme modülü ve sehimin üretim yöntemi ve takviye çeşidine göre değişimi.	136
Çizelge 7. 20 Sürekli fiber takviyeli kompozit numunelerin yoğunluk, %Vf ve %Mf değerleri.....	138
Çizelge 7. 21 Dokuma takviyeli kompozitlerde yoğunluk, %Vf ve %Mf değerleri.	138
Çizelge 7. 22 Sürekli fiber ve dokuma takviyeli kompozit numunelerin zamana bağlı absorbladığı nem miktarı.	139

**İZOFTALİK POLYESTER REÇİNE MATRİSLİ SÜREKLİ E-CAMI VE BAZALT
FİBER DESTEKLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU**

Tuğçegül GÜMÜLCİNE

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Ahmet ÜNAL

Günümüzde teknolojik/ileri teknolojik uygulamalarda hızla ilerleyen malzeme çeşitliliği ve talepler doğrultusunda farklı özellikler gösteren kompozitlere olan talep hızla artmaktadır. Artan bu gelişmiş malzeme talepleri arasında hafiflik ve dayanç özelliklerini en iyi sağlayabilecek malzemelere olan talepleri karşılayacak alternatiflerden bir tanesi de sürekli fiber ile desteklenmiş plastik matrisli kompozitlerdir.

Plastik matrisli kompozitler hafiflik, yüksek dayanım özelliklerinin yanı sıra düşük maliyet, kolay uygulanabilirlik, korozyon dayanımı özellikleri ile geniş uygulama alanı bulmaktadırlar. Günümüzde en çok tercih edilen plastik matris malzemesi termosetlerdir. Termoset malzemeler fiber ile desteklendiklerinde iyi yapışma sağlamakta ve kuvvetli bir ara yüzey oluşturmaktadır.

Genel amaçlı polimer matrisli kompozit uygulamalarında, düşük maliyet, yüksek dayanım ve spesifik modül avantajı dolayısı ile takviye elamanı olarak cam fiber kullanımı öne çıkmaktadır. Bazalt fiber ise cam fiberlere alternatif olarak geliştirilmiş bir fiber türü olup, özelliklerinin araştırılmasına halen devam edilmektedir. Kompozit

yapılarda fiber takviyeleri sürekli ve süreksiz formda kullanılır. Süreksiz fiberler yerine sürekli fiber kullanımı ile kuvvet yönünde daha yüksek dayanım değerleri elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada bir tür termoset olan izoftalik polyester reçine matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Takviyelendirme ise sürekli E-camı fiber ve sürekli bazalt fiberle yapılmıştır. İki farklı fiber türü ile üretilen kompozit malzemelere fiziksel ve mekanik deneyler uygulanarak malzemeler karakterize edilmiştir. Sonuçta fiber türlerinin birbiri üzerindeki üstünlükleri saptamıştır. Bu şekilde alternatif malzemelerin kombinasyonu ile yeni kompozit malzemelerin üretimi ve geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kompozit, termoset, E-camı fiber, bazalt fiber, mekanik testler

**CHARACTERIZATION OF E-GLASS AND BASALT FIBER REINFORCED
ISOPHTALIC POLYESTER MATRIX COMPOSITE MATERIALS**

Tuğçegül GÜMÜLCİNE

Metallurgical and Materials Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Ahmet ÜNAL

Today rapidly advanced materials diversity of technological/advanced technological applications and on increasing rapidly demand for composites showing different characteristics. Between increasing demands of these advanced materials lightness and strength properties of the materials to provide the one of best alternative is the continuous fibre reinforced plastic matrix composites.

Plastic matrix composites as well as characteristic of lightweight and high strength, side with a wide range of applications with low cost, easy applicability, corrosion resistance properties. Today, the most preferred plastic matrix materials are thermosetting. Thermosetting materials reinforced with fiber, provide good adhesion and constitute strong interface.

General-purpose polymer matrix composite applications stand out use of glass fibre as a reinforcement element because of strength/cost advantages. Basalt fibre is a fibre developed as an alternative type of glass fibres and properties are still investigating. Fibre reinforcement is used form of continuous and discontinuous in the composite structures. With use of discontinuous fibre rather than continuous fibres in the direction of force the higher strength values can be obtained.

In this study, isophthalic polyester resin, as one type of thermosetting, used as a matrix material. Reinforcements were continuous glass fiber and basalt fiber. The composite

materials were produced by two types of fiber and by the physical and mechanical tests were applied to characterize materials and fiber types were determined on each other advantages. In this way, intended of new composite materials production and improve with the combination of alternative materials.

Key words: Composites, thermosettings, E-glass fiber, basalt fibre, mechanical tests

1.1 Literatür Özeti

Gündelik hayatta karşılaşılan doğal yapılı kompozitler, polyester malzemelerin geliştirilmesi ve takviye edilmesi ile birlikte mekanik, fiziksel özellikleri ve korozyon davranışları kontrol edilebilen, özellikleri kullanım yerine göre görece olarak en iyi hale getirilebilen mühendislik malzemeleri şekline dönüşmüştür. Bu malzemeler özellikle spesifik dayanım özellikleri ile hafifliğin önemli olduğu havacılık uygulamalarında, korozyon dayanımları dolayısıyla ev gereçleri ve denizcilik endüstrisinde geniş bir kullanım alanı bulmuşlardır.

Cam fiber ile takviye edilen polyester matrislerin dayanım gereksinimlerini karşılayamaması alternatif fiberlere olan ihtiyaçları da beraberinde getirmiştir. Yüksek dayanım gerektiren ileri teknoloji uygulamaları karbon fiberler ve yüksek dayanımlı aramid fiberler karşılarken yüksek dayanımlı elyaflar ile genel uygulamalarda kullanılan E-camı fiberler arasında kalan; E-camı fiberlerden daha dayanıklı ve karbon fiberlerden daha ekonomik malzeme ihtiyacı baş göstermiştir. Bazalt elyaflar bu ekonomik fiyatları, kolay üretimi ve yüksek mukavemetleri ile bu açığı kapatmaya aday malzemelerdir.

Bazalt fiberler volkanik bazalt kayaların ergitilip fiber olarak çekilmesi ile elde edilirler. Bazalt kayalar farklı kimyasal bileşimlerde oluşabilirler. Sadece uygun kimyasal bileşime sahip olan kayalar ince fiber malzeme olarak çekilmeye uygundur.

Bazalt kayaların fiber malzemesi olarak çekilebilirliği 1923 yılında Fransız Paul Dhe tarafından, Paris'te patentlenmiştir. Daha sonra bazalt fiberler 1950-1960'larda Moskova ve Prag'da bilinmeye başlanmıştır. Bugün ise ağırlıklı olarak Rusya ve Çek

Cumhuriyeti'nde bu malzeme ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Bazalt malzemelerin ABD'de yaygınlaşması ise 1960-1970'leri bulmuştur. Yine bu tarihlerde Sovyetler Birliği Savunma bakanlığı bazalt fiberlerin askeri savunma alanlarında ve havacılık-uzay uygulamalarındaki kullanılabilirliği konusunda araştırmalar yapmıştır. 1990'larda ise Kiev'de sınırsız bütçeler ile sınırsız araştırmalar yapılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. alışmalar gizli tutulduğundan konu ile ilgili çok az yayın bulunmaktadır [1].

Bazalt fiberler kompozit yapılar da takviye malzemesi olarak kullanımın yanı sıra yapısal uygulamalarda, yangından korunma ve yangını engelleme uygulamalarında, inşaat sektöründe kullanım alanı bulurlar. Kimyasal bileşimleri E-camı fiberler ile benzerlik gösterse de genel anlamda 1-1,5 kat yüksek dayanıma sahiptirler. E-camı fiberlerin aksine yüksek alkali dayanımı, asidik ve tuzlu su ortamına karşı dayanımları ile köprü ve çeşitli inşaat uygulamaları için uygundur [2],[3].

Bazalt fiberlerin dayanımı karbon fiberlerden 8-10 kat ve Aramid fiberlerden 0,75-1,5 kat daha düşük olsa da çalışma sıcaklık aralığı daha geniştir. Bunun yanı sıra bazalt fiberler oksitleyici ortamlarda ve radyoaktif ortamlarda karbon ve Aramid fiberlerden daha uzun süre özelliklerini kaybetmeden çalışabilirler. Bazalt fiberlerin fiyatı E-camından pahalıdır ancak; aramid, karbon ve S-camı fiberlere, göre daha ucuzdur. Bu da daha ucuza yüksek mukavemet elde etmek anlamına gelmektedir [2].

Bazalt fiberlerin kompozit uygulamalarında kullanılması halen araştırma konusudur. Özellikle çeşitli yükleme altındaki davranışları mekanik testler ile belirlenmeye çalışılmaktadır. Bunun yanı sıra diğer bir araştırma konusunu da bazalt fiberlerin koroziyon ortamlardaki dayanım özellikleri oluşturmaktadır. Diğer taraftan inşaat uygulamalarında güçlendirme elemanı olarak kullanılan bazalt esaslı ürünlerin kullanımı ve beton içerisinde meydana getirdiği dayanım artışının saptanması üzerine çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Bu alışma ile aynı paralelde alışan Loresto ve arkadaşları E-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozit malzemeleri karşılaştırmış ve E-camı takviyeli numunelerin daha yüksek çekme yükünü taşırken, eğme ve basma yüklemelerine karşı bazalt fiber takviyeli numunelerin daha yüksek mukavemet gösterdiklerini bulmuşlardır. Çekme,

eğme ve basma yüklemeleri karşında bazalt fiber takviyeli kompozit numunelerin elastiklik modüllerinin daha yüksek olduğunu görmüşlerdir[4].

Brujin ve arkadaşları bazalt fiber takviyeli kompozitler ile E ve S camı takviyeli kompozit malzemeleri karşılaştırmış ve bazalt fiber takviyeli kompozitlerin E-camı takviyeli kompozitlerden %10-17 daha yüksek modüle sahip ve %18-34 daha yüksek dayanımlı olduğunu görmüşlerdir. S-camı takviyeli kompozitler ile bazalt fiber takviyeli kompozitleri karşılaştırdıklarında ise, bazalt fiber takviyeli kompozit numunelerin %5-11 daha düşük tokluk ve %6-16 daha düşük dayanım özelliklerine sahip olduğu görülmüştür [5].

Verpoest ve arkadaşları, epoksi reçine emdirilmiş eş yönlü bazalt ve E-camı fiber prepreglerden elyaf sarma yöntemine göre kompozit malzeme üretmiş ve bunları 3 nokta eğme testine tabi tutmuştur. Çalışmanın sonucunda; %40 hacim oranı ile elde edilen kompozit malzemelerden sürekli bazalt fiber takviyeli kompozitlerin, E-camı takviyeli kompozitlerden %13,7 daha fazla dayanıma sahip olduğu ve %17,5 daha yüksek eğme modülne sahip olduğunu görmüşlerdir [6].

Fenol reçineleri bazalt ve kenevir elyaflar ile takviye eden Öztürk ve arkadaşları takviye hacim oranına göre mekanik dayanımlarının artışını incelemişlerdir. Süreksiz kısa bazalt fiber/formaldehit kompozitlerde %32 hacim oranına kadar artan hacim oranlarında çekme dayanımının arttığını ve hacim oranı azaldıkça da çekme dayanımı düştüğü görülmüşlerdir Maksimum darbe dayanımı ise %48 bazalt hacim oranında elde edilmiştir. Organik takviye elmanları ile desteklenmiş kompozit malzemelerin araştırılması hızla devam etmektedir. Bu çalışmalar daha çok kenevir esaslı takviye elemanları üzerinde yoğunlaşmış olup, araştırılan diğer takviye elenmaları selülozik fiber, bambu, soya fasulyesi, ipek fiberdir [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13].

Melez dokumalar ile çalışan Wang ve arkadaşları 3 farklı bazalt-aramid melez dokuma ile çalışmış ve melez kompozit plakaların serbest düşmeli darbe testlerinde (low impact velocity), daha iyi sonuçlar almıştır. Melez kompozitler daha sünek davranış göstermiş, daha yüksek enerji sönümlenmişlerdir [14].

Farklı bir alan olan bazalt fiberlerin üretim geometrisi üzerine çalışmalar yürüten Czigany ve arkadaşları, matris içerisine takviye edilen bazalt elyaf malzemenin uçları

küresel olduğunda yükleme sırasında, fiberin matris içerisinde ilerlemesini engelleyerek kırılma tokluğunu arttırdığı ve çatlak ilerlemesini durdurduğunu görmüşlerdir [15], [16].

Bazalt fiberler sulu ortamlardaki korozif dayanımları dolayısıyla, özellikle inşaat sektöründe yaygın kullanım alanı oluştururlar. Bu doğrultuda Sim ve arkadaşları bazalt, karbon ve cam fiberleri 1 M NaOH ortamında 7, 14, 21 ve 28 gün bekletildikten sonra meydana gelen kütle kaybı ve dayanım düşüşü gözlemlemişlerdir. Alkali ortamda en az kütle kaybı karbon fiberlerde görülsede cam ve bazalt fiberler karşılaştırıldığında, cam fiberlerde meydana gelen dayanım düşüşü, bazaltlardan çok daha fazla olduğu görülmüştür [17], [18].

Deneylerde kullanılan matris malzemesi olan izoftalik polyester üzerine de çeşitli araştırmaların yapımı devam etmektedir. Paciornik ve arkadaşları pultrüzyon yöntemi ile izoftalik polyester ve vinilester matrisli, E-camı takviyeli kompozitler ve bunların eğme davranışlarını karşılaştırmışlardır. Pultrüzyon yöntemi ile üretilmiş E-camı takviyeli izoftalik polyester matrisli kompozitlerin eğme yüklemelerine karşı E-camı takviyeli ve vinilester matrisli kompozitlerden daha iyi dayanım gösterdiğini tespit etmişlerdir. Yine aynı çalışmada izoftalik polyester reçinelerin difüzyon katsayısının yüksek olması dolayısıyla su ortamı ile vinilesterden daha uyumlu olduğu görülmüştür [19], [20].

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında; termoset matrisli bazalt ve E-camı fiber takviyeli kompozit malzemelerin endüstriyel üretime ışık tutacak şekilde üretilmesi ve elde edilen numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin doğru bir şekilde saptanarak, endüstriyel kullanıma uygun değerlerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

E-camı takviyeli termoset matrisli kompozitler hakkında literatürden yeterli bilgi edinilebilmektedir. Ancak cam fibere alternatif olarak üretilen bazalt fiberlerin karakteristik özellikleri ve kompozit malzemelere katkısı henüz tam olarak araştırılmış bir konu değildir. Bu çalışmada E-camı ve bazalt fiber takviyeli termoset matrisli kompozit malzemelerin üretim süreçleri ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Bazalt

fiberlerin düşük maliyetli ve insan sağlığı için hiçbir tehlike oluşturmamasına ek olarak mükemmel fiziksel ve mekanik özellikleri ile E-camına rakip olması beklenmektedir [21].

E-camı, termoplastik ve termoset matrisler için yüzeyi uygun şekilde aprelendiğinde en yaygın kullanılan fiberlerdir. Bundan sonra, dayanım açısından bir sıralama yapıldığında sırasıyla S-camı ve grafit gelmektedir. Bazalt, S-camı ile grafit arasında yer alan, dayanım özellikleri olarak grafit, maliyet açısından ise cama yakın olduğundan son 5 yılda kullanım alanı bulmuş yeni nesil fiberler olarak tanımlanmaktadır. Buradan hareketle çalışmada bazalt fiberli termoset kompozitlerin özellikleri araştırılmıştır. Diğer taraftan polyester reçine termosetler en yaygın kullanılan reçine türüdür. Matris olarak izoftalik polyester reçinenin seçilmesinin amacı sabit matris değerlerinde değişken bazalt hacim oranı ve formasyonu etkisinin araştırılmasıdır. Aynı zamanda izoftalik polyester reçinenin mekanik özellikleri ile kimyasallara karşı tutumu kendi grubunda bulunan otoftalik polyester reçineye göre daha üstün özellikler gösterdiğinden tezin diğer bir özgün tarafını oluşturmaktadır [22], [23], [24].

Termoset matrisli kompozitlerin en yaygın üretim yöntemi el yatırması olup, kalın parçalarda dezavantaj olarak reçinenin fiber aralarına iyi nüfuz etmemesi gösterilmektedir. Yeni gelişen yöntemlerden biri de vakum bagging (torbalama) olup, negatif basınç altında reçine infüzyonunun daha iyi sağlanması amacıyla kullanılmaktadır. Çalışmanın diğer özgün unsuru da aynı kompozisyon ve hacim oranları için el yatırması ve vakum bagging yöntemleri ile üretilen kompozit özelliklerinin karşılaştırılmasıdır.

Yukarıdaki özgün değerlerden yararlanılarak otomotiv sektöründe, iç basınç altında silindirik kaplarda yaygın kullanımı olan böylesi kompozitlerin, bazalt fiber ve vakum bagging üretim yöntemi seçilerek imalatta hafiflik ve ekonomiklik unsurları değerlendirilmiştir.

1.3 Hipotez

Volkanik kayaçların ergitilmesi ve fiber olarak çekilmesi ile elde edilen bazalt fiberlerin kompozit yapılarda, E-camı yerine takviye malzemesi olarak kullanımı öngörülmektedir.

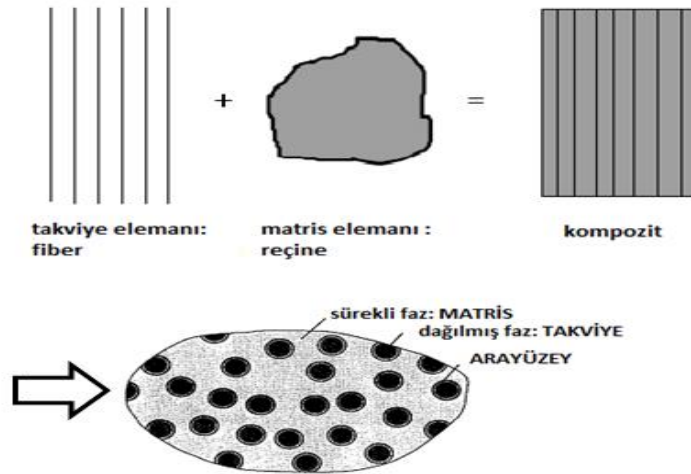
Bazalt fiberlerin çok ince çaplarda üretilmesi ve üzeri matris malzemesi olarak termoset polimer ile iyi arayüzey oluştucak şekilde silan kaplanması, kompozit yapılarda kullanımını mümkün kılmaktadır. Üretici firmalarca, bazalt fiberin elastiklik modülünün E-camı fiberlerden daha yüksek ve çekme dayanımının daha düşük olduğu söylense de bazalt fiberlerin kompozit yapılardaki davranışı konusunda çelişkiler bulunmaktadır. Bazalt fiberlerin kompozit malzemelerde kullanılması ile E-camı fiberli kompozitlerden daha iyi mekanik özellikler elde edilirken, daha ileri özellikleri sağlamak için tercih edilen karbon fiberlerden daha düşük maliyetli üretim sağlanması mümkün olacaktır. Bununla birlikte bazalt fiberlerin yüksek ve kriyojenik sıcaklıklarda dayanımını koruması, kimyasal direnci, üretim kolaylığı ve evre dostu olması gibi özellikleri ile kompozit endüstrisinde E-camı fiberler ile rekabet şansını arttıracaktır.

Fiber geometrisi olarak; E-camı 10-15 m (ortalama yaygın olarak kullanılanı 13 m), bazalt fiber 7-21 m (ortalama yaygın olarak kullanılan 14 m) ve karbon fiber 7-15 m (ortalama yaygın olarak kullanılan 10 m) ap aralıklarında olup, sonuçların karşılaştırılmasında böyle si seçimler daha gerçekçi sonuçlar elde edilmektedir. Destek malzemesi tipi olarak sürekli fiber, düz dokuma ve keçe seçilerek çeşitli kullanım olasılıklarında, malzeme özellikleri doğru bir biçimde karşılaştırılmaktadır.

Yukarıdaki hususlardan yararlanılarak matris özellikleri değişmeksizin üretim yöntemi ve farklı fiber türleri ile üretilen kompozitlerin karakterizasyon sonuçları karşılaştırılarak optimizasyona gidilmesi amaçlanmıştır.

KOMPOZİT MALZEMELERE GİRİŞ

Kompozit malzemeler, birbiri içinde çözünmeyen iki ya da daha fazla malzemenin kimyasal bağ yapmaksızın, bir arayüzey oluşturarak meydana getirdikleri yeni malzeme grubudur [10]. Kendisini oluşturan malzemelerin tek başlarına sahip olduklarından daha yüksek performans ve özellikler elde edilecek şekilde tasarlanırlar. Bu malzemelerden süreksiz, daha sert ve güçlü olanına takviye; sürekli ve daha zayıf özellikte olanına da matris bileşeni adı verilir. Bazen matris ve takviye elemanı arasında bağ kuvveti oluşturan arayüzey fazı denilen ilave bir faz oluşur [25]. Tipik bir kompozit malzemedeki matris ve takviye elemanı bileşenlerinin şematik resmi Şekil 2. 1’de gösterilmektedir.



Şekil 2. 1 Kompozit yapıların ana bileşenlerinin şematik gösterimi [26].

Fiberler ve matris, uyumlu çalışarak kompozitin özelliklerine katkıda bulunmaktadır. Çok çeşitli matris ve takviye elemanı değişik özellikler elde etmek için seçilebilmektedir. Sınırlı matris ve takviye elemanı seçimlerinde fiberlerin yönlenmesi, üretim metodu, proses koşulları ve diğer malzemelerin katkısı ile istenilen özellikler elde edilebilir [27].

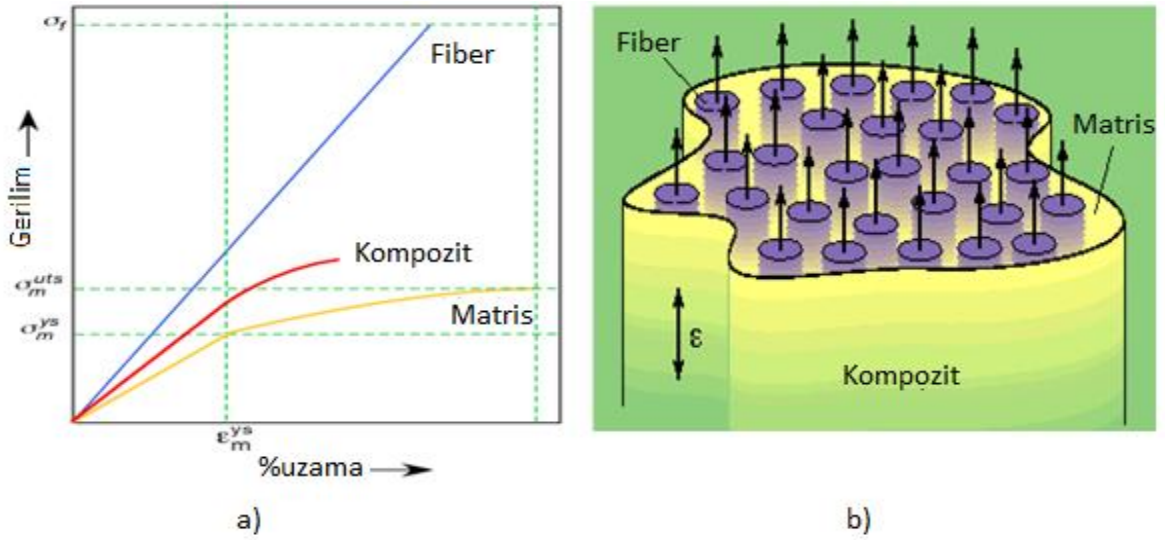
Kompozit malzeme üzerine bir yükleme geldiğinde yükü önce matris bileşeni karşılamaktadır. Genelde matris, fiberlerden daha düşük dayanıma sahip olduğundan doğal olarak da yükü taşıması beklenemez. Böylece yük sadece fiberler tarafından taşınacak ancak, elastik özellikler olarak görece olarak daha gevrek fiberlerin matris içerisinde bulunması ile sağlanmış olacaktır [26].

Kompozit malzemelerin diğer malzeme gruplarına göre hafiflik, yüksek spesifik modül, yüksek spesifik dayanım, özelliklerin optimize edilebilmesi, yüksek yorulma dayanımı, düşük termal genleşme, düşük elektrik iletkenliği gibi avantajları vardır. Üretim zorluğu, malzeme maliyetleri, solvent ve nem etkisi, düşük kullanım sıcaklığı gibi kriterler de kompozit malzemelerin dezavantajları olarak sayılabilir [27]. Polimer matrisli kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları genel bir anlatımla Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2. 1 Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları [27].

Avantajları	Dezavantajları
Hafiflik	Yüksek hammadde fiyatları
Yüksek spesifik dayanım	Tasarımda bilgi eksikliği
Yüksek spesifik tokluk	Üretim zorluğu (manuel, yavaş, çevresel problemler, zayıf güvenilirlik)
Düzenlenebilir ve geliştirilebilir özellikler	Üretim hızının düşük olması
Kompleks parçaların kolayca kalıplanabilmesi	Uzun gelişme zamanı
Daha düşük sistem maliyeti	Bağlantı elemanları
Kolay bağlanma	Sıcaklık limitleri
İyi yoruma direnci	Solvent/nem saldırıları
İyi sönümleme davranışı	Gizli bozulmalar
Enerji depolama ve salınım	Bazen EMI koruyucu gerektirmesi
Düşük termal genleşme	
Düşük elektriksel iletkenlik	
Isı taşınımı (sadece karbon fiber)	
Düşük radar görünürlüğü	

Modern kompozit malzemeler kullanılacakları uygulamalardan beklenen özellikleri sağlamak amacıyla optimize edilirler. Sonuç olarak elde edilen yeni malzemenin özellikleri, kendini oluşturan bileşenlerin özelliklerinden daha üstün yapısal özellikler gösterir. Böylece kompozit malzeme ile bileşenlerinin yapısal özellikleri arasında bir denge kurulur. Bu gelişmiş özellikler yük paylaşım mekanizması sonucunda ortaya çıkar. Uygun bileşenlerle üretilen kompozit malzemede mekanik dayanım, tokluk, korozyon direnci, aşınma direnci, hafiflik, yorulma ömrü, ısı etkisi altındaki davranışlar, termal iletkenlik ve yalıtkanlık, ses yalıtımı gibi özellikler geliştirilir. Şekil 2. 2’de matris ve fiber malzemelerinin kompozit yapı içindeki gerilim-gerinim davranışları ve yapıdaki dağılımı görülmektedir [26], [28].



Şekil 2. 2 a) Fiber, matris ve kompozit malzemelerin gerilim-gerinim eğrileri, b) kompozit malzeme elemanlarının şematik gösterimi.

Şekil 2. 2 a’da bir kompozit malzeme ve bileşenlerin farklı karakteristeki gerilim-gerinim eğrileri görülmektedir. Çekme yükü altında; $\epsilon_f^* > \epsilon_m^*$ koşulunda, fiber takviye malzemesi gevrek karakterli ve matris malzemesi sünek karakterli kırılma davranışı göstermektedir. Bu iki bileşenden elde edilen kompozit malzemenin kopma davranışının ise kendisini oluşturan bileşenlerin arasında olduğu görülmektedir [29].

2.

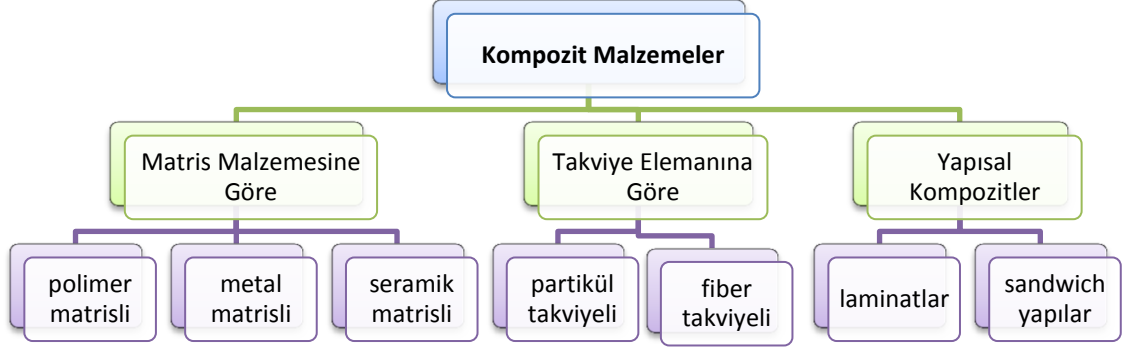
2.1 Matris ve Takviye Elemanları

Kompozit malzemeler sert ve yüksek dayanımlı bir takviye elemanı, takviye elemanın etrafını çevreleyen ve yapıya form sağlayan matris ve bunları bir arada tutan arayüzey bileşenlerinden oluşur [30]. Matris elemanı kompozit malzemenin sürekli fazını oluştururken yapıya rijitlik kazandırır. Matrisin birincil görevi malzeme yapısına bir form vermektir. Matris kohesif ve adesif yapısı ile fiberlerin etrafını sararak bir arada tutar. Fiberleri izole ederek yükleme durumunda ayrı hareket etmelerini sağlar bu da çatlak ilerlemesi durdurur ya da yavaşlatır. Matrisin en önemli görevi ise yapıya gelen yüklemeleri fiberlere iletmektir. Fiberleri çevresel etkilere karşı korur. Sürekli matris fazı fiberlere dik yöndeki özellikleri de kontrol eder. Matris malzemesinin özellikleri tabaka yapılı kompozitlerde ve yüksek sıcaklık mukavemeti gibi özellikler üzerinde doğrudan etkilidir. Matris malzemesi fiberleri kimyasal saldırı ve mekanik aşınmadan korur. Kompozit malzemenin tokluk, süneklik, darbe dayanımı gibi performans özellikleri üzerinde etkilidir [26], [27], [28].

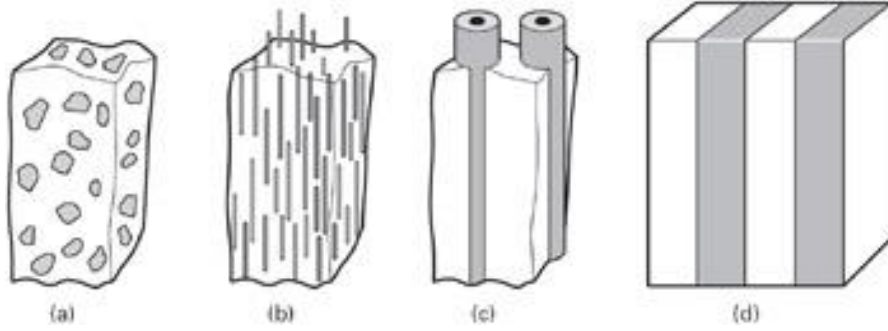
Kompozit malzemelerin diğer ana bileşeni olan takviye elemanı matris içerisinde homojen olarak dağılmış halde bulunur. Bu takviye malzemeler istenilen özellikleri sağlamak amacı ile fiber, patikül ya da visker formunda bulunabilir. Takviye elemanının başlıca görevi yük taşımaktır. Kompozit malzeme üzerine gelen yüklemenin %70-90'ı takviye elemanı (fiber formunda) tarafından taşınır. Uygulamada sünek matris- gevrek fiber koşulu için yük taşıma oranı minimum %92 değerinin sağlanması istenir. Takviye elemanları yapıda tokluk, dayanım, termal stabilite ve diğer yapısal özellikleri sağlar. Kullanılan takviye çeşidine göre kompozit yapısına elektriksel iletkenlik ya da yalıtkanlık özelliği kazandırır [26].

Matris malzemeleri uygulama alanları ve performans beklentilerine göre polimer, metal ve seramik olarak seçilebilir. Takviye elemanları istenilen mekanik özellikleri sağlamak amacıyla fiber, partikül ve yonga şeklinde olabilir. Takviye malzemesi olarak polimer, seramik ve metaller kullanılabilir. Kompozit malzeme uygulamalarında matris malzemesi olarak en çok polimer malzemeler ve bu polimer matrisi destekleyen takviye elemanı olarak da fiber takviyeleri kullanılır. Polimer esaslı matris termoplastik

ya da termoset karakterli olabilirken, seçilen fiber takviyeleri de sürekli, uzun ya da kısa formda kullanılabilir [26]. Kompozit malzemelerin genel sınıflandırılması Şekil 2. 3’de verilmiştir. Şekil 2. 4’te çeşitli takviye formları ile desteklenmiş ve lamine yapılı kompozitlerin şematik yapıları gösterilmektedir.



Şekil 2. 3 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.



Şekil 2. 3 Çeşitli şekillerde takviye edilmiş kompozit malzeme yapıları. a) partikül takviyeli. b) kısa fiber takviyeli. c) uzun fiber takviyeli. d) lamine yapılı kompozit malzeme.

2.1.1 Matris Malzemesine Göre Kompozitler Matris malzemesine göre kompozit malzemeler polimer matrisli, metal matrisli seramik matrisli olmak üzere üç grupta incelenir. Üretilen kompozit malzemenin kullanılacağı ortam şartları (sıcaklık, nem, kimyasal ortam vb.) matris malzemesi tarafından karşılanır.

2.1.1.1 Polimer Matrisli Kompozitler (PMK)

Polimerler tartışmasız en yaygın olarak kullanılan matris malzemesidir. Polimerler termoset ve termoplastik olarak iki grupta incelenir. Termoset polimerler kütleme işlemi ile yüksek oranda çapraz bağlar ile bağlanırlar. Bu üç boyutlu moleküler ağ yapısı

yüksek sıcaklıklara dayanım sağlar. Kompozit uygulamalarda kullanılan termoset reçineler epoksi, polyester ve fenolik reçinelerdir. Termoplastik polimerler ısı polimerlerdir. Çapraz bağ içermezler, yüksek sıcaklıkta erirler ve düşük sıcaklıkta yeniden katılaşırlar. Kompozit malzeme üretiminde poliimid (PI), polieterketon (PEEK), polifilen sülfid (PPS) en çok kullanılan termoplastiklerdir [31].

Epoksi ve polyester reçineler polimer matrisli kompozitlerde (PMK) en çok kullanılan matris malzemesi iken, son zamanlarda PEEK ve PPS gibi termoplastikler mükemmel tokluk, düşük nem absorpsiyonu özellikleri, basit üretim döngüsü ve yüksek sıcaklık dayanımları ile dikkat çekmektedir. Havacılık sektöründe kullanılan epoksi reçineler yaklaşık 177 °C'de kürlenip 150°C üzerinde kullanılamazken, ileri teknoloji plastikleri olarak bilinen PPS, PI ve PEEK termoplastiklerinin erime derecesi 315-370°C arasında yer almaktadır [31].

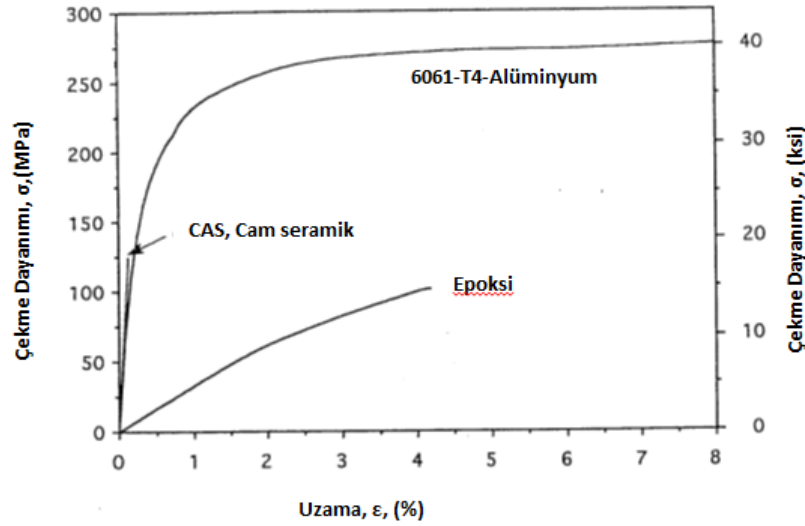
2.1.1.2 Metal Matrisli Kompozitler (MMK)

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemelerin gelişimi 1950'lerin sonlarında 1960'ların başlarında başlamış ve ileri teknoloji uygulamalarında kullanılmak üzere de devam etmektedir. MMK'ler, metalik matrislerin partikül, visker, kısa fiber ve uzun düzenli fiberler ile takviye edilmesi ile oluşsa da karşımıza daha çok partikül takviyeli olarak çıkarlar. MMK'ler yapısal uygulamalar, aşınma direnci gerektiren uygulamalar, ısı düzenlemeler ve hafiflik gerektiren durumlarda kullanılır. Kompozitin kullanım sıcaklığı limiti kendisini oluşturan bileşenlerin erime ya da yumuşama sıcaklığı ile sınırlıdır. En yaygın olarak kullanılan ticari MMK'ler alüminyum magnezyum ve titanyum alaşımlarının, silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3), ve grafit ile takviyelendirilmesi sonucu oluşurlar [25], [28].

2.1.1.3 Seramik Matrisli Kompozitler (SMK)

Yüksek sıcaklık uygulamalarında, 1000°C'ye kadar seramik matrisli kompozit (SMK) malzemeler kullanılır. Matris malzemesi olarak silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3), cam-seramik, silisyum nitrür gibi seramik; yine seramik esaslı fiberler ile takviye edilir. Karbon matris ise grafit fiber preform üzerine, pirolitik grafitten buhar biriktirme yöntemi ile üretilir. Elde edilen kompozit malzemenin kullanım sıcaklığı 2600 °C'ye

kadar çıkabilir. Şekil 2. 5'te polimer matris malzemelerinden epoksi, metal matris malzemelerinden alüminyum ve seramik matris malzemelerinden cam seramiğin çekme dayanımı-%uzama eğrisi karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 2. 4 Metal, seramik ve polimer matris örneklerinin çekme dayanımı-%uzama eğrisi [25].

2.2 Takviye Elemanına Göre Kompozitler

Kompozit malzemelerin özellikleri; kompoziti oluşturan bileşenlerin özelliklerine, geometrisine ve fazların dağılımına bağlı olarak değişir. En önemli parametre ise takviye malzemesinin matris içindeki hacim miktarı ya da farklı bir deyişle fiber hacim oranıdır. Takviye elemanının kompozit malzeme içerisindeki dağılımı ile mekanik ve fiziksel özellikler doğrudan ilişkilidir. Uniform olmayan takviye elemanı dağılımı, malzeme içinde heterojenlik ve kırılmaya elverişli zayıf bölgelerin oluşumunu artırır. Takviye elemanının geometrisi ve yönlenmesi malzeme sisteminin anizotropi özelliklerini etkiler [25].

2.2.1 Partikül Takviyeli Kompozitler

Partikül takviyeli kompozitlerde çeşitli boyut ve şekillerdeki partiküller matris içinde gelişigüzel biçimde dağılım durumunda bulunur. Partiküllerin gelişigüzel dağılımı dolayısıyla, parçacık takviyeli kompozit malzeme özellikleri homojen kabul edilir ve izotropik özellikler gösterir. Partikül takviyeli kompozitler metal dışı matris içinde metal dışı partikül (beton, kauçuk benzeri partikül takviyeli kırılğan polimer matris), metal dışı

matris içinde metalik partikül (alüminyum partikül destekli poliüretan kauçuk), metalik partikül destekli metalik matris (işleme kabiliyetini geliştirmek için kurşun partikül takviyeli çelik) ve metal dışı partikül destekli metalik matris (silisyum karbür partiküllü alüminyum) bileşenlerinden oluşabilir [25],[29].

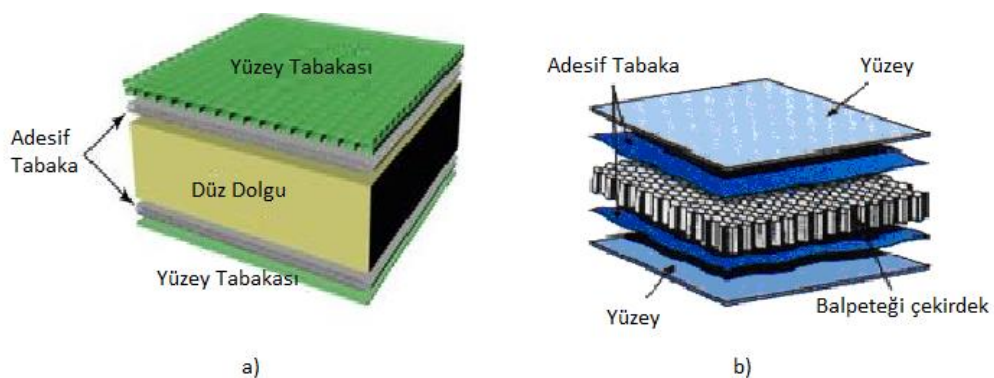
2.2.2 Fiber Takviyeli Kompozitler

Fiber takviyeli kompozitlerde takviye amaçlı kullanılan fiber malzemeleri sürekli fiber, uzun/kısa fiber, organik/inorganik fiber gibi çeşitli şekillerde olabilir. Kullanılan fiberlerin çeşidi, fiziksel özellikleri, matris ile uyumu, matris içindeki dağılımı ve matris içindeki hacim oranı kompozit malzemenin mekanik özelliklerini belirler.

2.3 Sandwich Yapılı Kompozitler

Yapısal kompozit malzemeler, iki yüzey plakası arasına düşük yoğunluklu bir dolgu malzemesinin yapıştırılması ile oluşurlar. İlk olarak 1940'lı yıllarda havacılık sektöründe yapısal hafiflik sağlayarak uçuş mesafesini arttırmak amacıyla kullanılmıştır. Yapısal kompozitlerin 3 ana bileşeni vardır:

- Dış yüzeyde ince ve güçlü yüzey tabakları,
- İki yüzü arasında hafiflik sağlayan ve yük taşıyan dolgu malzemesi,
- Yüzey plakaları ve dolgu malzemesini birbirine yapıştıran adesif tabaka.

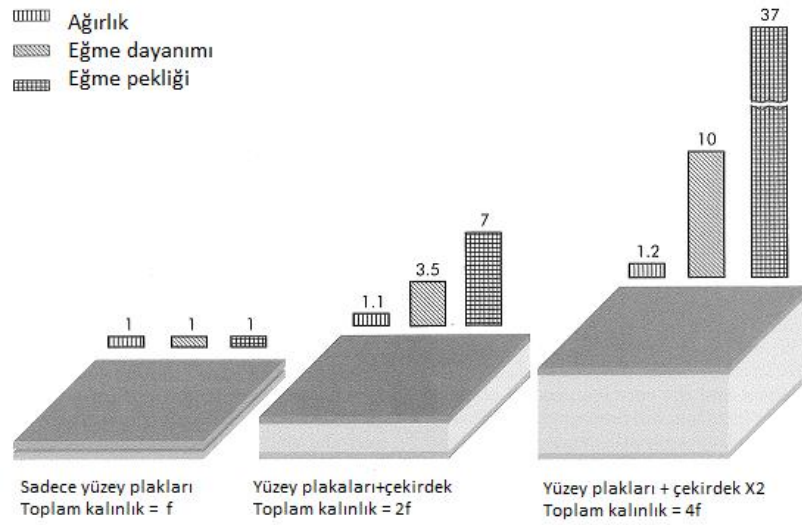


Şekil 2. 5 Yapısal kompozit malzemelerin yapıları ve bileşenleri (düz dolgu ve balpeteği uygulaması) [32], [33].

Sandwich yapılı kompozit malzemelerden düz dolgu ve balpeteği (honeycomb) dolgulu yapılar Şekil 2. 6'da gösterilmektedir. Bu tip yapılar hafiflik sağlamak amacıyla

kullanılırlar. Daha çok uçak ve havacılık endüstrisinde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra kargo konteynrları, küçük bot ve yat uygulamaları, otomotiv parçaları ve içyapı uygulamaları gibi birçok kullanım alanına sahiptirler.

Sandwich yapılar da artan dolgu malzemesi kalınlığı ile yapısal hafiflik sağlanırken, eğme dayanımında büyük bir artış sağlanır. Örnek bir sandwich yapıda dolgu malzemesinin kalınlığı iki katına çıkarıldığında eğme dayanımı 3,5 kat artmaktadır. Dolgu malzemesindeki orantılı artışın eğme dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 2. 7’de gösterilmektedir [30].



Şekil 2. 6 Artan dolgu malzemesi kalınlığının eğme dayanımı üzerindeki etkisi [27].

Yüzey plakaları eğme yüklerini taşır ve kompozitin rijitliğini sağlar. Reçine emdirilmiş cam fiber, eş yönlü cam fiber prepreg, grafit prepreg, AA2024 veya AA7075 alüminyum alaşımları, titanyum alaşımları, paslanmaz çelik vb. malzemelerden imal edilmiş olabilirler. Dolgu malzemeleri hafiflik sağlar ve özellikle kayma yüklerini taşır. Dolgu malzemesi form olarak düz dolgu ya da balpeteği olabilir. Dolgu malzemeleri; polimer esaslı köpükler, kağıt, poliefin, metal balpeteği malzemelerden seçilir. Yapıştırıcılar, yapıyı bir arada tutar ve yüklemenin yüzey plakalarından esas yük taşıyan dolgu malzemesine iletimi sağlarlar. Yapıştırıcı olarak epoksi ve formaldehit reçineler kullanılır. Bunların kürlenmesini sağlamak amacıyla ısı ve basınç uygulamalarına ihtiyaç duyulabilir [27], [30].

POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER

3.

3.1 Matris Malzemeleri

Matris malzemesinin, kompozit yapının performansını belirlemede pek çok önemli görevi vardır. Matris malzemesinin en önemli görevi yapıya fiberleri bağlamak ve yapı üzerine gelen çeşitli yükleri fiberlere aktarmaktır. Matris aynı zamanda yapıya rijitlik kazandırır ve şeklini korumasını sağlar. Matris, fiberleri izole ederek ayrı ayrı hareket etmelerini önler, bu da yapıda oluşan çatlak ilerlemesini durdurur ya da yavaşlatır. Fiberler matris malzemesi içine gömülü olduklarından kimyasal saldırı ve mekanik aşınma deformasyonundan korunurlar. Kompozit malzemenin korozyon ve nem dayanımı matris malzemesinin kimyasal dayanımı ile kontrol edilir. Matris, son şekle (net-shape) yakın parçaların üretiminde iyi bir yüzey kalitesi sağlar [28].

Seçilen matris malzemesine bağlı olarak, süneklik, darbe dayanımı, vb. gibi performans özellikleri de etkilenmektedir. Sünek bir matris kompozit yapının tokluğunu arttırmaktadır. Yüksek tokluk gereksinimleri için, dayancı görece olarak düşük olmasına karşın termoplastik esaslı kompozitler seçilir. Çeşitli ilave malzemelerin eklenmesi ile gevrek karakterli termoset matrisli kompozitlerin tokluğu arttırılabilir [28].

Kompozit malzemelerde en yaygın olarak kullanılan matris malzemesi polimerlerdir. Polimerler matrisleri de termoplastik ve termoset matrisler olarak ayırmak mümkündür. En yaygın kullanılan termoset reçineler epoksi, polyeşter ve vinileşterdir.

Termoplastikler ise ısıl plastikler olup en yaygın kullanılan örnekleri polietilen, polipropilen, poliamidtir [25].

3.1.1 Termoplastik Matrisler

Termoplastik polimerler zayıf Van Der Waals bağlarının bir arada tuttuğu çok uzun molekül zincirleri halinde bulunan, ısıl karakterli malzemelerdir. Isıtıldıklarında intermoleküler kuvvetler zayıflar ve yumuşayıp erirler. Bir basınç kuvveti ile kalıp boşluğuna transfer edilerek şekillendirilirler. Soğuyarak katılaştıran termoplastik malzeme kalıbın şeklini alır ve sertleşir. Bu ısı ile erime/yumuşama ve soğuma ile katılaşma/sertleşme işlemi döngüsel olarak tekrarlanabilir. Termoplastiklerin en büyük avantajı da bu geridönüşüm döngüsüne izin vermesidir. Termoplastik malzemeler için kütleme işlemi gerekli değildir, bu malzemeler kütleme olmaksızın ergiyip katılaşarak sertleşirler. Bu özellikleri dolayısıyla üretim hızları yüksektir [34],[35].

Termoplastikler kristalin ve amorf olarak sınıflandırılabilirler. Pratikte tamamen kristalin bir yapı elde etmek mümkün olmasa da kristalin ve yarı-kristalin eğilim gösterebilirler. Polipropilen ve naylon yüksek derecede kristalin özellik gösterirken, polistiren ve akrilik her zaman amorfudur. Termoplastik malzemelerde kristallik derecesi malzemenin termal özelliklerini ve üretim koşullarını belirlemede rol oynar [35].

Termoplastik malzemeler, termosetlerden daha sünek ve tok malzemelerdir. Bu yüzden de herhangi bir tokluk arttırıcı filler malzemesi ilave edilmeksizin kullanılabilirler. Boyutsal ve ısıl kararlılık özellikleri ise termosetlerden daha kötüdür [34].Termosetlere göre matris olarak kullanımları daha az olmakla birlikte üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geridönüşüm yeteneği ve sertleşme prosesi için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Bunun yanı sıra şekil verilen termoplastik parça işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir. Termoplastikler yüksek sertlik ve darbe dayanımı özelliğine de sahiptirler [36].

Termoplastik malzemeler proses zorluğu ve yüksek maliyetleri dolayısıyla kompozit üretiminde termosetlere nazaran daha az tercih edilirler. Bunun yanı sıra granül halde bulunmaları dolayısıyla takviye malzemesini ıslatmada problem yaşarlar. Yeterli ıslatma

sağlayabilmek için bazı katkı maddesi ilavesi, yüksek basınç ve sıcaklık şartları gerektirirler. Oda sıcaklığında düşük işleme kalitesi sağlarlar, bu üretimde zaman kaybına neden olur. Bazı termoplastikleri istenilen şekillerle sokabilmek için çözücülere ihtiyaç duyulabilir. Kullanım sıcaklıkları genelde düşük olsa da 60°C ile 245°C arasında çalışabilen poliamid, poliimid gibi termoplastik malzeme çeşitleri geliştirilmiştir [36].

3.1.2 Termoset Matrisler

Termoset malzemeler oda sıcaklığında sıvı halde bulunan bir ya da iki bileşenli malzemelerdir. Termosetler genellikle rijit karakterlidirler; çünkü kovalent bağların kurduğu çapraz-bağlar polimer zincirinin hareketini büyük ölçüde kısıtlamaktadır. Termosetin çapraz-bağ derecesi arttıkça molekül hareketleri daha fazla kısıtlandığı için sertlik ve yüksek darbe direnci gibi özellikleri ön plana çıkmaktadır. Buna ek olarak, kuvvetli kovalent çapraz bağlar sayesinde sahip oldukları boyutsal kararlılık, yeni polimer sisteminin ısı dengeye sahip olmasını, erimemesini, yüksek ısılara dayanıklı olmasını ve solventle çözünmemesini sağlamaktadır [37], [38].

Termoset reçineler sıvı halde olduklarından fiberleri ıslatma özellikleri çok iyidir. Bu da kullanım kolaylığı sağlamakta ve porozite içermeyen kompozit malzeme üretimine olanak tanımaktadır. Termoset reçineler, nihai şekillerini almaları için, belirli sıcaklıklarda ya da oda sıcaklığında kütleme işlemine tabi tutulurlar. Kütleme çevriminin uzun olması üretim miktarının düşük (uzun) olmasına neden olmaktadır. Termoset malzemelerin bir kez kürlendikten sonra tekrar şekil verilememesi ve geri dönüşümünün olmaması en büyük dezavantajıdır [28],[37]. Termoset reçinelerin avantaj ve dezavantajları Çizelge 3. 1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3. 1 Termoset reçinelerin avantaj ve dezavantajları [23].

Reçineler	Avantajları	Dezavantajları
Polyester	Kolay kullanım E-camı ile mükemmel yapışma Termal dayanım (150-200°C) Saydamlık-yarı saydamlık Düşük maliyet	Orta mekanik özellikler Yüksek büzülme Alev alabilir Nemli sıcak ortamlarda düşük dayanım Sınırlı saklama ömrü Ozmoz eğilimli
Epoksi	İyi mekanik, kimyasal, termal özellikler, Düşük büzülme (~%1) Kendi kendini söndürme Kararsız Fiberlere ve metale iyi yapışma Solventsiz işleme	Uzun kürleme çevrimi Termal yaşlanma Darbe ve neme duyarlı Düşük renklendirilebilirlik
Vinilester	İyi kimyasal dayanım Yaşlanmaya dayanım Yorulma dayanımı	Büzülme Post-kür gerekli Yüksek maliyet Özellikleri çok değiştirilemez

Termoplastik malzemelerin ilk hammaddeleri katı halde bulunmakta ve kompozit üretimi sırasında eritilmesi gerekmektedir. Termoset reçineler ise viskoz halde bulunur ve üretim sonrasında kürlenme prosesi ile katılaşır. Termosetlerin, proses döngüsü termoplastiklere göre daha uzundur, ancak termoplastikler gibi özel ekipmanlara gereksinim duyulmaz. Bu malzemelerin en büyük dezavantajı geri dönüşümün olmamasıdır. Termoset reçinelerin viskoz halde olması dolayısıyla, kompozit malzeme üretimi sırasında matris-fiber yapışma özellikleri çok iyidir, termoplastik matrisler gibi özel bağlayıcılara gereksinim duymasızın iyi bir arayüzey oluştururlar [28]. Bazı termoset reçinelerin çeşitli özellikleri Çizelge 3. 2’de görülmektedir.

Çizelge 3. 2 Bazı termoset reçinelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [28].

Termoset Reçineler	Yoğunluk (g/cm ³)	Elastiklik Modülü	Çekme Dayanımı
		GPa (10 ⁶ psi)	MPa (10 ³ psi)
Polyester	1.1–1.4	1.6–4.1 (0.23–0.6)	35–95 (5.0–13.8)
Epoksi	1.2–1.4	2.5–5.0 (0.36–0.72)	50–110 (7.2–16)
Fenolik	1.2–1.4	2.7–4.1 (0.4–0.6)	35–60 (5–9)

Termoset reçine olarak en yaygın olarak kullanılan reçineler polyester ve vinilestlerdir. Diğer organik matrisler; epoksi, bismaleimid ve poliimid reçinelerdir. Epoksi, bismaleimid ve poliimid reçineleri yüksek performanslı ve pahalı reçinelerdir. Yüksek performanslı spor malzemeleri, kimyasal proses boruları vb. uygulamalarda kullanılırlar. Genel amaçlı polyesterler ise ev-banyo gereçlerinde, otomotivde, denizcilikte vb alanlarda geniş kullanım alanı bulurlar.

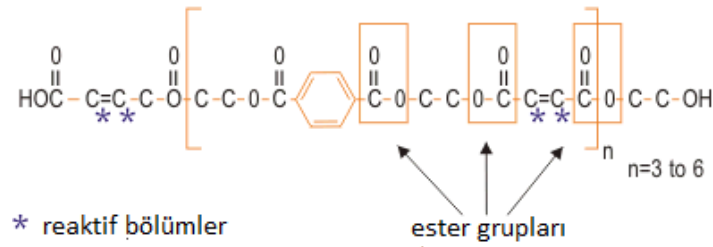
3.1.2.1 Polyester Reçineler

Termoset karakterli reçinelerden, doymamış polyester reçineler (unsaturated polyester–UPE-) çok çeşitli endüstri ve ticari uygulamalarda kullanılmaktadır. 1999 yılında ABD’de 0,8 milyar kg’dan fazla polyester reçine tüketilmiştir. Bu tüketim uygulamada takviyeli ve takviyesiz olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Takviyeli uygulamalarda reçine ve cam fiber gibi bir takviye elemanı birlikte kullanılarak, mekanik özellikleri yükseltilmiş kompozit malzeme üretilmiştir. Tipik takviyeli uygulamalar; botlar, araçlar, banyo gereçleri, yapı panelleri ile korozyona dayanıklı tank ve borulardır. Fiber takviye edilmeyen uygulamalargenelde özelliklerin modifiye edilmesi için bir mineral “filler” dolgusu ile pekiştirilir. Bazı tipik takviyesiz uygulamalar bowling topları ve kaplamalardır. Polyester reçineli kompozitler düşük maliyetlidir. Çünkü ucuz kurulum maliyetleri ve spesifik uygulamalar için tolere edilmiş fiziksel özelliklere sahiptir. Polyester reçine matrisli kompozit malzemelerin bir diğer avantajı da bitmiş parçanın fiziksel özelliklerini değiştirmeksizin çeşitli şekillerde kürlenebilmeleridir. Dolayısıyla polyester reçineli kompozitler özel piyasalarda rekabet edebilecek özelliklere sahiptir [30].

Polyesterler reçineler kürlleme işlemi sonrasında ~%2 hacimsel çekmeye uğrarlar. Bu hacimsel çekmeyi azaltmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Low-profile additive (LPA)

diye bilenen katkı malzemeleri ile hacimsel çekmenin azaldığı tespit edilmiştir. Ancak bu ilave malzemeler yapıda artık stiren kalmasına neden olur ve fazla stiren de mekanik özelliklerin düşürmektedir. En iyi mekanik özellikler %40 stiren/polyester oranında elde edilmiş olup bu karışım yüksek hacimsel çekmeye neden olduğu saptanmıştır. Lin ve arkadaşları doymamış polyesterlerin hacimsel çekmesi üzerine yaptığı çalışmalarda ilave malzeme olarak hidroksil metakrilat-poliüretan (HEMA) kullanarak hacimsel çekmenin azaldığını görmüşlerdir. Düşük HEMA (%8) oranında yüksek çekme dayanımı, yüksek HEMA (%20) ilavesinde İzod darbe dayanımında artış sağlamaktadır [39].

Polyester reçineler; viskoziteleri ayarlanabilen sıvı termoset reçineler ailesinin bir elemanıdır. Polyester reçineler ısı veya hızlandırıcı gibi bir katalizör yardımı ile kürlenerek oldukça sert ve katı form alırlar. Kimyasal bağlanma reaksiyonu Şekil 3. 1'de polyester malzemenin SEM fotoğrafı Şekil 3. 2'de görülmektedir. Polyester reçineler polimerizasyon işlemi sonrasında rijit, çapraz bağlı, termoset makromolekül yapılar haline gelirler [40].



Şekil 3. 1 İzofthalik bir polyesterin çapraz bağlanma reaksiyonu.



Şekil 3. 2 Polyester malzemenin SEM görüntüsü [41].

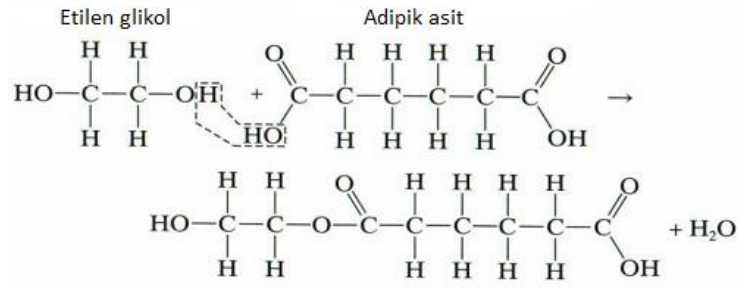
Polyester ve vinilester reçineler; endüstriyel ulaşım uygulamaları (sıvı taşıyan iç basınca maruz kap ve borular), kimyasal dayanımlı borular, reaktörler, kamyon kasası ve gövdesi, duş teknesi, kapılar, aksesuarlar, güverte, döşeme vb. uygulamalarda kullanılırlar. Çok sayıda reçine formülasyonu, kür ajanı ve nihai özellikleri değiştirecek çok sayıda katkı maddesi bulunmaktadır.

Polyester ve vinilester reçineler ile karbon ve aramid fiberler arasında iyi yapışma sağlanamadığından kompozit yapılarda birlikte kullanılamazlar. Polyester reçinelerin ileri teknoloji kompozitleri olarak bilinen malzemelerden düşük mekanik özellikler göstermesi ve kürleme sırasında yüksek hacim değişimine uğramaları dolayısıyla askeri ve havacılık yapıları gibi yüksek performans uygulamalarında kullanılmaları mümkün değildir.

Cam fiber üzerine reçine uyumlu silan kaplanmanın gelişmesi, cam fiber takviyeli polyester ve vinilester matrisli kompozitlerin yüksek mukavemetli, çevresel dayanımlı olarak fabrikasyonuna olanak sağlamıştır [30].

3.1.2.1.1 Polyester Reçinelerin Kimyası

Polyesterler; difonksiyonel asit ve anhidritlerin, difonksiyonel epoksi reçineler ile kondensasyon polimerizasyonu ile hazırlanan makromolekülleridir. Polyester reçine olarak ifade edilen doymamış polyesterlerde esterin alt kısmı fumarik asit, 1-2 etilensel doymamış bileşenden oluşur. Genelde maleik anhidrid bu fumaratın kaynağıdır. Maleik anhidrit, fumarat esterlerle polimerize sağlamak için polyester iskeletine dahil olur. Birçok polyester-stiren reaksiyonu için polyesterin viskozitesi 0,2-2 Pa aralığında olmalıdır. Diğer reaktif monomerleri; vinil toluen, diallyl fitalat, metil metakrilat spesifik özellikleri sağlamak amacıyla kullanılabilirler. Reçinelerin viskozitesi bağımsız radikal proses ile kürlenebildiği özel üretim prosesleri için ayarlanabilir. Reçinenin final formülasyonu organik peroksit gibi bağımsız radikal başlatıcılar içerir. Bu formülasyon kalıplama sürecinde doymamış polyester ve doymamış monomerler arasında çapraz bağlanma reaksiyonunun gerçekleşmesi ile form alır. Kürleme, çapraz bağlanma reaksiyonu ile düşük viskoziteli solüsyonun 3 boyutlu termoset plastiğe dönüşmesidir [30], [38]. Şekil 3. 3'te polyester malzemenin polimerizasyon reaksiyonu görülmektedir. Polyester kondensasyon polimerizasyonu ile oluştuğu için açığa su çıkmaktadır.



Şekil 3. 3 Polyester malzemelerin (adipik asit+etilen glikol) polimerizasyon reaksiyonu ve su açığa çıkması.

3.1.2.1.2 Mekanik Özellikler

Polyester matrisli kompozit malzemelerin fiziksel özelliklerinin kontrolünde baskın rolü takviye malzemesi oynarken, polyester matris kompozite form ve termal-kimyasal dayanım sağlar. Termal dayanım ve tokluk artışı sağlamak için polyester malzemeler modifiye edilebilirler. Polyester malzeme gruplarının takviyesiz mekanik özellikleri Çizelge 3.3'te görülmektedir. Çizelge 3.3'ten de görüldüğü gibi izoftalik reçineler, ortoftalik reçinelerden daha yüksek çekme ve eğme özellikleri göstermektedirler. Bunun sebebi izoftalik reçinelerin ortoftalik reçinelerden daha lineer, yüksek molekül ağırlığına sahip olmasıdır. Buna karşılık, BPA fumarat ve klorendik reçineler daha agresif korozyon koşulları için geliştirilmişlerdir ve çok daha rijittirler. Bunun sonucunda düşük çekme uzaması ve çekme dayanımına sahiptirler. Sonuç olarak takviyesiz döküm polyester malzemeler gevrektiler, düşük çekme dayanımı ve çekme uzamasına sahiptirler. Bisfenol dioksit bileşimi ile vinil esterler mükemmel çekme, esneme ve uzama özellikleri gösterirler [30].

Çizelge 3. 3 Çeşitli polyester malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri.

Malzeme	Barkol sert.	Çekme Day.	Çekme mod.	Uzama	Eğme Day.	Eğme Mod.	Basma Day.	Isıl bozunma sic.
		MPa	GPa	%	MPa	GPa	MPa	°C
Ortoftalik	-	55	3,45	2,1	80	3,45	-	80
İzoftalik	40	75	3,38	3,3	130	3,59	120	90
BPA fumarate	34	40	2,83	1,4	110	3,38	100	130
Klorendik	40	20	3,38	-	120	0,57	100	140
Vinilester	35	80	3,59	4	140	0,54	-	100

Dihidrik alkol, asitler, doymamışlık derecesi, monomer tipi ve miktarı ile kür sıcaklığının mekanik özellikler üzerinde doğrudan bir etkisi olduğunu söylemek mümkün değildir. Genelde dihidrik alkol zinciri uzunluğu arttıkça çapraz bağlı reçinenin esneme özelliği artar. Bu durum doymuş asitlerle de ortaya çıkar. Aromatik gruplar, dihidrik alkol ya da asit bileşeni sertlik ve rijitlik özelliklerini artırır [30].

Fiber takviye elemanı kullanılarak üretilen polyester matrisli kompozit malzemenin çekme ve esneme özellikleri önemli ölçüde artar. Çizelge 3.4’de değişik oranlarda cam fiber ile takviyelendirilmiş kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin takviye oranına göre değişimi gösterilmektedir. Çizelge 3.5’te ise cam fiber takviyesi ve takviyelendirme miktarının kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi görülmektedir [30].

Çizelge 3. 4 Cam fiber takviyeli polyester reçine matrisli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri.

Reçine	Cam Fiber Oranı	Eğme Dayanımı	Eğme Modülü	Çekme Dayanımı	Çekme Modülü	Basma Dayanımı
	%	MPa	GPa	MPa	GPa	MPa
Ortaftalık	30	170	5,5	140	4,8	-
	40	220	6,9	150	5,5	-
İzoftalik	30	190	5,5	150	8,27	-
	40	240	7,87	190	11,7	210
BPA fumarate	25	120	5,1	80	7,58	170
	35	150	8,27	100	10,3	170
	40	160	8,96	120	11	180
Klorendik	24	120	5,9	80	7,58	140
	34	160	6,89	120	9,65	120
	40	190	9,65	140	9,65	120
Vinilester	25	110	5,4	86,2	6,96	180
	35	260	9,52	153,4	10,8	230
	40	220	8,89	160	11	210

Çizelge 3.5’te çeşitli formdaki cam fiber ile takviyelendirilmiş polyester matrisli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri görülmektedir.

Çizelge 3. 5 Takviye elemanı tipi ve miktarının mekanik özellikler üzerindeki etkisi [42].

Cam takviye tipi	Cam fiber	Yoğun.	Çekme day.	Çekme Mod.	Uzama	Eğme Day.	Eğme Mod.	Basma Day.
	%	g/cm ³	MPa	GPa	%	MPa	GPa	MPa
Kürlenmiş reçine	0	1,22	59	5,4	2	88	3,9	156
Kırık fiber keçe	30	1,5	117	10,8	3,5	197	9,784	147
	50	1,7	288	16,7	3,5	197	14,49	160
Demet dokuma	60	1,76	314	19,5	3,6	317	15	192
Demet dokuma	70	1,88	331	25,86	3,4	403	17,38	280
Eşyönlü elyaf	70	1,96	611	32,54	2,8	403	29,44	216

Çizelge 3. 5'ten de görüldüğü gibi tek yönlü ağırlıkça %70 cam fiber içeren kompozit malzemenin fiberlere paralel yönde çekme ve eğme modülü diğerlerine göre çok daha yüksektir. Tek yönlü kompozit malzemeler, tipik polyester lamine kompozitlere göre çok daha anizotropik yapı gösterirler. Fiberlere dik yönde ölçülen mekanik özellikler boş döküm polyester malzemelerin mekanik özelliklerine yakındır. Pultrüzyon ve elyaf sarma prosesleri ile yaygın olarak polyester matrisli kompozit malzemeler tek yönlü fiberler ile takviyelendirilerek üretilirler. Bunlar sadece tek yönlü dayanım gerektiren yapısal uygulamalarda kullanım alanı bulurlar. Pultrüzyon yöntemi ile üretilmiş cam fiber takviyeli izoftalik reçine matrisli kompozitler ile vinilester matrisli cam fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini karşılaştıran Paciornik ve arkadaşları izoftalik matrisli kompozitlerin eğme dayanımının vinilester matrislilerden daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir [19].

3.1.2.1.3 Polyester Reçinelerin Koroziyon Özellikleri

Polyester reçinelerin korozyon dayanımı reçine çeşidine göre değişiklik göstermektedir. Özellikle klorendik reçineler korozyon dayanımı yüksek reçinelerdir. Bunlar korozyon dayanımı gerektiren yerlerde kullanılmak amaçlı geliştirilmişlerdir. İzofitalik reçinelerinde asit ortamındaki korozyon özellikleri oldukça iyidir. Saf su ile reaksiyona girme eğiliminde değildirler. İzofitalik polyesterlerin difüzyon katsayısı vinilesterlerden daha yüksektir. Bu durumda izoftalik reçineler su ortamına vinilesterlerden daha

uyumludur [43]. Polyester reçinelerin çeşitli korozyon ortamlarına dayanımları Çizelge 3. 6'da gösterilmektedir [30], [44].

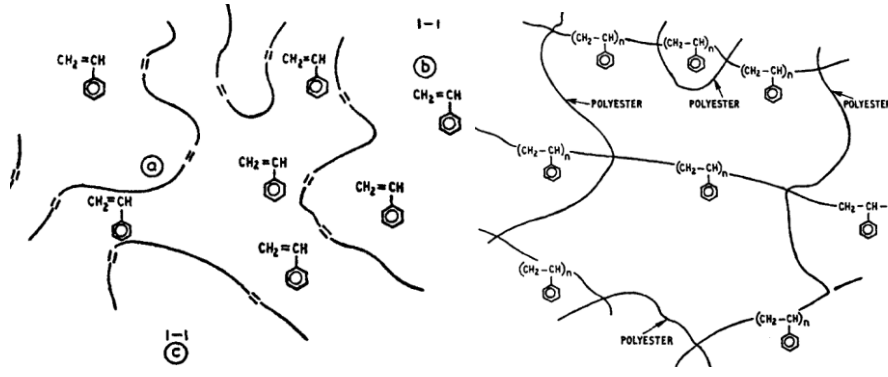
Çizelge 3. 6 Polyester reçine matrisli cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin korozyon dayanımı.

Reçine	%75 H ₂ SO ₄ 80°C	%15 NaOH 65°C	%5,25 NaCl 65°C	Ksilen	Deiyonize su 100°C	Deniz suyu 80°C
İzoftalik	-	-	-	+	-	-
Klorendik	+	-	-	+	+	+
BPA fumarate	-	+	-	+	-	+
Vinilester	-	-	+	-	-	+
+ iyi , - kötü						

3.1.2.1.4 Polyester Reçinelerin Kürlenmesi

Kürleme sistemi, polyester malzemelerin final özelliklerini fazla değiştirmese de, depolama ömrü, kalıp/pres zamanı, post-küre şartları, maksimum çalışma sıcaklığı gibi özellikler kürleme sistemi ile kontrol edilir ve geliştirilir. Polyester reçinenin reaktivitesi, boyut, son ürün şekline göre kürleme sistemi seçilir. Kürlemeki bu çeşitlilik oda sıcaklığında hızlı kürlemeden yüksek sıcaklıklara genişleyebilir [40].

Polyester reçineler, oda sıcaklığından 149-163°C'ye kadar kürlenebilirler. Sadece organik peroksit ilavesiyle 82°C ve üzerinde kürleme yapılabilir. Daha düşük sıcaklıklarda kürleme yapmak peroksit katalizör ve bir promotör (başlatıcı) gerektirir. Doymamış polyester reçinelerin kürlenmesinde en çok kullanılan katalizör ve başlatıcılar organik peroksitlerdir. Genel anlamda %90 organik peroksitler kullanılır. Bunlarbenzol peroksit, kümen peroksit, di-tert-butil peroksit, metil etil keton peroksitlerdir (MEKP). MEKP oda sıcaklığında kürleme yapmak için en çok kullanılan peroksittir. Promotör olarak genelde organik kobalt tuzları ve dimetil/diethylaniline kullanılır [40]. Polyester reçinenin kürlenmesi Şekil 3. 4'te görülmektedir.



Şekil 3. 4 Polyester reçinenin kürlenmesi. 1. Polyester reçine içindeki kürlenmeye hazır yapılar: a) düşük molekül ağırlıklı doymamış reçine molekülleri, b) reaktif çözücü (stiren) molekülleri, c) başlatıcı molekülleri. 2. Kürlenmiş polyester yapısı, çapraz bağların oluşması. (n değeri genel amaçlı polyester reçineler için ~2-3'tür) [45].

Reçinelerin polimerizasyonu bağımsız radikal ilavesi ile (the free radical addition) meydana gelir. Katalizörler (organik peroksitler) bağımsız radikal grupların kaynağını oluşturur. Yüksek sıcaklıklarda peroksitler parçalanır ve bağımsız radikal gruplar ortaya çıkar. Peroxyester ve benzol peroksitler yüksek sıcaklıklarda kullanılan başlıca organik peroksitlerdir. Promotörler, tek başlarına ya da geciktiricilerle birlikte kürlenme sisteminde kullanılırlar [40].

3.1.2.2 Epoksi Reçineler

Epoksi reçinelerin ilk olarak üretimi 1930'ların sonlarına 1940'ların başlarında bisfenol A ve epiklorohidrinin reaksiyonunun geliştirilmesi ile gerçekleşmiştir. Epoksi ailesi ilk ticari uygulamalarda döküm (casting) bileşeni ve kaplama olarak kullanılmıştır. Aynı reçineler bugün epoksi formülasyonlarının temelini oluşturur.

Epoksi reçineler; diğer termoset reçineler ile ulaşılması mümkün olmayan ve benzersiz bir kompozit bileşimi sunarak yapısal ve özel kompozit uygulamalarında kullanılan malzeme sınıfıdır. Düşük viskozite özelliğinden yüksek ergime dereceli katı özelliğine kadar geniş aralıkta fiziksel özelliklere ulaşılması mümkün olduğundan, epoksi reçineler geniş proses edilebilme ve çok çeşitli uygulama alanı bulmaktadırlar. Epoksiler yüksek mukavemet, düşük büzülme, çeşitli yüzeylere mükemmel yapışma, etkili elektrik izolasyonu, kimyasal ve solvent direnci, göreceli düşük maliyet ve düşük toksik özellikler sunarlar. Epoksi reçinelerin kürlenme prosesleri oldukça kolaydır, herhangi bir uçucu ya da yan ürün çıkarmazlar. Aynı zamanda epoksi reçineler birçok yüzey ile

uyumludur ve birçok yüzeyi ıslatma eğilimindedirler. Bu yüzden kompozit malzeme üretimi için çok uygundurlar.

Epoksi reçineler genel olarak yapıştırıcı, kaplama, döküm materyali, matris malzemesi ve bağlayıcı olarak kullanılırlar. Epoksi reçinelerin en iyi performans gösteren uygulamaları fiber ile takviye edilerek yüksek performans sergilediği havacılık ve eğlence endüstrisidir. Havacılık endüstrisinde epoksi reçineler kompozit matris olarak zemin panelleri, yatay ve dikey stabilizatörler, kanatlar ve hatta gövdede kullanılırlar. Havacılık uygulamaları için geliştirilen aynı kimya şimdi hafif bisiklet gövdesi, golf takımları, snowboards, arabalar ve müzik aletleri için kullanılmaktadır.

Epoksi malzemeler kürlenmiş ve kürlenmemiş, her iki halde de neme karşı oldukça hassas olmalarına rağmen; nem dayanımı, diğer çevresel etkiler, düşük hacimsel çekme ve iyi mekanik özellikleri ile polyester malzemelerden üstündürler. Kürlenmiş epoksilerin kopma uzamasının göreceli olarak düşük olmasına rağmen, epoksi malzemeler birçok uygulama için işleme karakteristiği, proses esnekliği (özelliklerin istenilen doğrultuda geliştirilebilmesi), kompozitlerde üstün mekanik özellikler ve kabul edilebilir fiyatı ile yenilmez özellikler sağlarlar.

Epoksi malzemelerin nem absorpsiyonu T_g (camsı geçiş sıcaklığı) ile düşer. Çünkü T_g sıcaklığında epoksilerin özelliklerinde önemli bir düşüş meydana gelir. T_g birçok durumda kompozitlerin üst kullanım sıcaklığı limiti olarak tanımlanır. Epoksi malzemeler bu sıcaklıktan ya da “wet T_g ” denilen daha yüksek bir limit sıcaklıktan sakınılmalıdır. Epoksi reçinelerin maksimum servis sıcaklığı ani yüklemeler için 120°C, uzun vadeli yüklemeler ve toklaştırılmış epoksi reçineler için daha düşük sıcaklıklardır (80-105 °C) (wet T_g : dengeye gelene kadar nem absorblamasına izin verilmiş ve özel ıslak ortama maruz bırakıldıktan sonra ölçülen T_g). Bu limitler ciddi performans zorluklarına yok açmaktadır. Epoksi reçinelerin ıslak koşullarda ve yüksek sıcaklıklarda tatmin edici performans sağlamaları için yapılan çalışmalar devam etmektedir.

Epoksi malzemeler gevrekler, düşük kopma uzaması gösterirler. Bunların tokluğunu arttırmak amacıyla modifiye işlemi yapılır. Modifiye işlemi tipik olarak elastomer veya termoplastik ilavesi ile gerçekleştirilir. Modifiye edilmiş epoksi formülasyonu gelişmiş uzama yeteneğine sahiptir.

Bir epoksi reçine formülasyonu seçerken göz önüne alınması gereken üç temel unsur bulunmaktadır. Bunlar baz alınan reçine, kürleyiciler ve düzenleyecilerdir. Belirli bir kullanım için bir epoksi reçine formüle edilirken bu bileşenlerin üretim sırasında ve üretim sonrasında ürünün fiziksel ve mekanik performansına olan katkısının bilinmesi gerekmektedir [30].

Epoksi malzemelerin fiziksel ve mekanik çeşitli reçine formülasyonu, kürlenme sistemleri, modifiye elemanları, diluentler ve katkı maddeleri dolayısıyla çok geniş bir aralıktadır. Bunu yanı sıra kürlenme koşulları ve post kür uygulamaları da özellikler üzerinde etkilidir.

3.1.2.2.1 Epoksi Reçinelerin Kürlenmesi

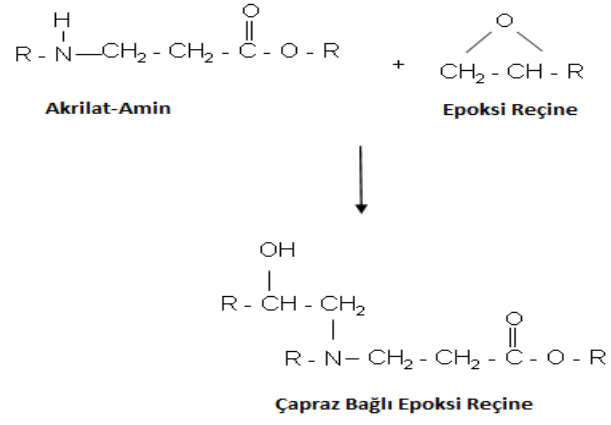
Oda sıcaklığında saf durumda bulunan epoksi molekülleri normal şartlarda aynı kap içerisinde birbirleri ile reaksiyona girmeden yıllarca durabilirler. Epoksi moleküllerinin birbirleri ile tepkimeye girerek çapraz bağlar kurmasını sağlayan kimyasal ilaveler iki gruba ayrılır:

1. Kür ajanları
2. Katalizörler

Sertleştirici (hardener) de denilen kür ajanları, epoksi reçinenin içine belli bir miktar ilave edildiğinde network ağının bir parçası olarak reaksiyona girerler. Bu kür ajanları;

- Alifatik aminler
- Aromatik aminler
- Anhidritler olabilir.

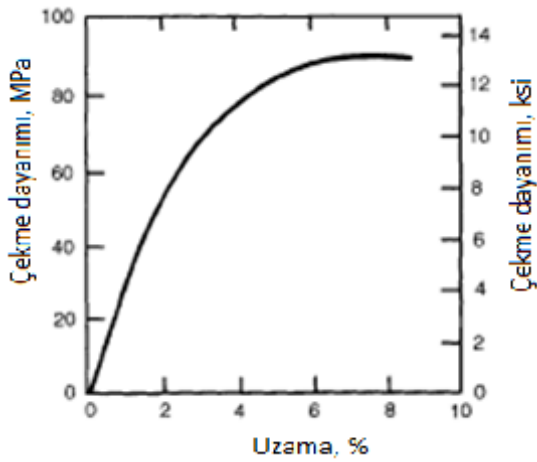
Katalizörler ise epoksi moleküllerinin direkt olarak birbirleri ile homopolimerizasyon reaksiyonuna girebilmeleri için çok az miktarda ilave edilen maddelerdir. Bazen homopolimerizasyon için katalizör olarak kullanılan kimyasallar; epoksi+sertleştirici karışımına az miktarda ilave edilerek reaksiyonun hızlandırmak amacıyla da kullanılabilirler. Bu amaç için kullanıldıkları durumlarda hızlandırıcı adını alırlar [30]. Amin kürlenmiş çapraz bağlı epoksi Şekil 3. 5’da görülmektedir.



Şekil 3. 5 Amin kürlenmiş epoksi reçine [46].

Şekil 3. 7' de aromatik amin kürlenmiş epoksi reçinelerin özellikleri görülmektedir [30].

Çizelge 3. 7 Aromatik amin kürlenmiş epoksi reçinelerin özellikleri.

Aromatik Amin-Kürlenmiş Epoksi Reçine Sistemi	
Reçine sistemi bileşenleri:Ağırlıkça	
Epoksi:	DGEBA, e.g. Epon 826 (Shell) 100
Kür ajanı:	MDA-MPDA eutectic, e.g. Tonox 6040 (UniRoyal) 29
Diluent:	BDE, e.g. RD-2 (Ciba-Geigy) 25
Kür çevrimi	3 saat 60°C (140°F) + 2 saat 120°C (248°F)
Vizkozite 25°C : 1,2 Pa s	Isıl bozunma sıcaklığı : 1820 kPa 62°C
Yoğunluk: (25°C) Kürlenmemiş reçine : 1,15 gm ⁻³ Kürlenmiş reçine :1.21 gm ⁻³	Lineer termal genleşme katsayısı: 298-375 K 6,81 x 10 ⁻⁵ °C ⁻¹
Hacimsel büzülme: Jelleşmeden sonra→%3,7 Kürlemeden sonra→%5,4	Ortalama özgül ısı: 363 K 1,54 x 10 ³ J kg ⁻¹ 424 K 1,71 x 10 ³ J kg ⁻¹
Su absorpsiyonu: 6 saat kaynar suda →Wt %0,93	Isıl iletkenlik katsayısı: 325 K'de → 0.243 W m ⁻¹ K ⁻¹ 356 K'de → 0,244 W m ⁻¹ K ⁻¹ 389 K'de → 0,256 W m ⁻¹ K ⁻¹
Darbe dayanımı (izod) →m ⁻¹ (çentikten)	Çekme özellikleri % uzama : %8,0 Elastiklik modülü: 2,9 GPa 
Kayma özellikleri Kopma gerilmesi: 52 MPa	
Basma dayanımı: 111 MPa	
24 sa 60°C (140°F)'de kürleme + 24 sa 77°C (171°F) post kür.	

3.1.2.3 Fenolik Reçineler

Fenolik reçineler çeşitli dolgu maddeleri ile birleştirilerek fenolik kalıplama bileşikleri meydana getirilir. Isı ve basınç altında kalıplandıklarında, iyi ısı ve kimyasal direnç, iyi elektrik kuvveti, iyi boyutsalkararlılık ve düşük maliyette kalıplanabilme özelliğine sahipolurlar.

Fenolik reçineler, formaldehit ve fenolün tepkime ürünleri olup, yumuşak yağ ve kauçuklarla rekabet edebilirler. Son ürün özellikleri, kullanılan formaldehit miktarına ve katalizörün cinsine bağlıdır. Asit katalizörlerle, kolaylıkla kırılabilen ve eritilebilen termoplastik reçineler olan çift safhalı reçineler (novalak) hazırlanmaktadır. Kolayca kırılmayı önlemek için etilen ilave etmek gerekir. Baz katalizörlü (kireç ya da amonyak gibi) reçineler tek safhalı reçineler (resol) olarak adlandırılır. Bu işlemde yeterli miktarda formaldehit ilavesi ile bir termoset reçine elde edilir. Tepkimenin çok dikkatli kontrol edilmesi, tepkimenin zamanında durdurulması ve yeterli derecede düşük molekül ağırlığının elde edilip edilmediğinden emin olunması gerekmektedir. Fenolik reçineler, toz ve sıvı halde piyasaya sunulurlar. Kontrol plakalarının lamineinde, izolasyonunda, tekerlerin aşınan yerlerinin onarımında, fren balatasında bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, elektrikli aletlerin tellenmesinde, telefon nakil sistemlerinde, bağlayıcı ve kapayıcılarda kullanım alanları bulmaktadır. Fenolik reçinelerin yüksek alev dayanımı, düşük maliyetleri en büyük avantajlarını oluştururken düşük yüzey kalitesi vermeleri, gevrek oluşları ve yaş haldeyken sağlığa zararlı olmaları dezavantajlarını oluşturur [30].

3.2 Fiber Malzemeleri

Kompozit malzeme içerisindeki takviye elemanı kompozit malzemenin iskeletini oluşturmaktadır. Takviye elemanı kompozit malzeme içindeki mekanik dayanım, rijitlik ve diğer mekanik özelliklerini sağlamaktadır. Kompozit malzeme üzerine gelen yük fiber-matris arayüzeyi tarafından fiberler üzerine transfer edilmektedir. Gelen yüklemenin %70-90'ı fiberler tarafından taşınmaktadır. Fiberler, mekanik özelliklerin yanı sıra ısı genleşme, iletkenlik, ısı taşıma katsayısı üzerinde de etkindirler [28], [38].

Yüksek mühendislik özellikleri; fiberlerin türü, fiber uzunluğu, fiber oryantasyonu ve fiber hacim oranı ile belirlenmektedir. Sürekli fiberler ve süreksiz uzun fiberler en iyi mühendislik özelliklerini sağlamaktadır. Fiber boyu kısaltıkça kompozit malzemenin mühendislik özellikleri düşmektedir. Kompozit malzeme içindeki fiber boyunun kısalması, kompoziti partikül dolgulu bir sistem karakteristiğine yaklaştırmaktadır [36].

Kompozit malzeme sürekli fiber, süreksiz kısa fiber, süreksiz uzun fiber, kırık fiber, dokuma ve keçe şeklindeki kumaşlar ile takviyelendirilebilir. En iyi mekanik özellikler ise uzun sürekli fiberli kompozit malzemelerde elde edilmektedir. Fiber malzemesi olarak en yaygın olarak cam fiber kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra karbon fiber, aramid fiber, boron fiber, silika fiber vb. fiber türleri mevcuttur. Bu çalışmada E-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri incelenecektir.

3.2.1 Cam Fiberler

Cam fiberler kompozit üretiminde kullanılan en yaygın fiber çeşididir. Silikaya, alümina, kalsiyum karbonat, magnezyum oksit, bor oksit gibi ilaveler yapılarak çeşitli yöntemlerle üretilmektedirler. Sağladıkları özellikler ve bileşimlerine göre 4 farklı tip cam fiber bulunur:

- A (alkali) camı
- C (korozyon) camı
- E (elektrik) camı
- S, R (muvemet)camı

Bu çalışmada kullanılmak üzere mekanik performans özellikleri ve maliyet yönünden optimum değerler veren E-camı seçilmiştir. E-camının düşük alkali oranı nedeniyle elektriksel yalıtkanlığı diğer cam fiberlere göre daha iyidir. Mukavemeti oldukça yüksektir. Suya karşı direnci iyidir. Nemli ortamlar için geliştirilen kompozitlerde genellikle E-camı tercih edilmektedir. Isıl dirençleri düşüktür. Yüksek sıcaklıkta yanmazlar ancak yumuşayabilirler. E-camı fiberlerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3. 8’da verilmektedir.

Çizelge 3. 8 E-camı fiberlerin fiziksel ve mekanik özellikleri [26].

	Çap	Yoğunluk	Elastiklik Modülü	Çekme Dayanımı	Spesifik Modül	Spesifik Dayanım	% Uzama
	(μm)	(ρ , gr/cm^3)	(E, GPa)	(σ , GPa)	(E/ ρ)		
E-camı	7	2,54	70	3,45	27	1,35	4,8

Çizelge3.8’den görüldüğü gibi E-camı fiberlerin yoğunlukları düşük ve buna karşın çekme dayanımları çok yüksektir. Spesifik dayanım özellikleri bakımından çelik ile karşılaştırıldığında E-camının birim ağırlık başına düşen mukavemet değeri çelikten yüksektir.

Cam fiberler kompozit yapılarda matris ile iyi bir arayüzey oluşturabilmeleri için aprenirler. Apre, fiberin birlikte çalışacağı matris malzemesine göre değişir ve dolayısıyla termosetler ve termoplastikler için farklı apre uygulanır. Apre, organik silikon bileşiği gibi reçine matris ile takviye cam arasında yapışmayı sağlar. Fiber yüzeyi üzerinde bir film oluşturur, bir asit amit lübrikant ve anti-statik özellikler veren diğer malzemeleri içermektedir. Cam fiberler yalnızca bu apreleme işleminden geçtikten sonra çeşitli şekillerde proses edilerek plastik matrise uygun takviye malzemesi olarak kullanılabilir [31], [48], [49].

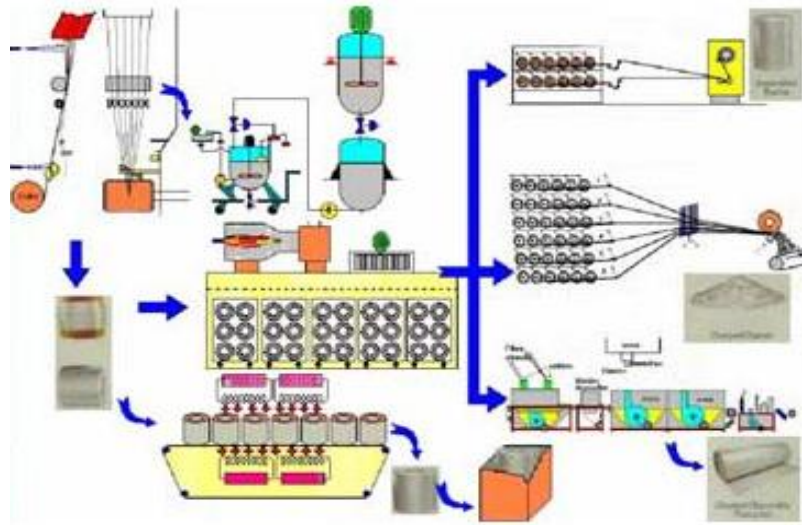
3.2.1.1 Cam Fiberlerin Üretimi

Cam fiber üretimi için silika hammaddesi içerisine, alümina, kalsiyum karbonat, magnezyum oksit, bor oksit ilaveleri eklenerek çok ince tane boyutuna öğütülür ve bunlar karıştırılarak homojen bir karışım elde edilir. Hazırlanan hammadde yaklaşık 1600°C sıcaklıkta çalışan bir ergitme fırınına beslenir. Fırın içinde, karışım yavaşça sıvı hale geçer. Sıvı hale geçen karışım çok ince delikleri olan bir kovandan geçerek fiber halini alır. Şekil 3. 6’da ergiyik silikadan fiber çekimi görülmektedir.



Şekil 3. 6 Fiber çekimi görüntüsü [50].

Prosesse uygun olarak yerleştirilmiş bir sarma sistemi ile 50-70 m/sn gibi yüksek bir hız ile daha sonraki uygulama türüne bağlı olarak 5 ila 20 mikron çapında çekilen cam lifleri bir mandral üzerine sarılarak “kek” adı verilen bir bobin üzerinde toplanır. Cam fiberlerin üretim prosesi Şekil 3. 7’de görülmektedir.



Şekil 3. 7 Cam fiber üretiminin şematik gösterimi.

Cam lifleri, demet haline getirilmeden önce, bağlayıcı adı verilen bir kimyasal bileşim ile kaplanır. Bağlayıcı cinsi, kompozit malzeme içinde cam elyafının performansını etkileyen en önemli faktörlerden birisidir.

Kompozitin mukavemeti, reçine-cam bağının kuvveti ile orantılıdır. Bu bağın kuvveti, kullanılan bağlayıcı (apre-sizing) içindeki bağlama gruplarının cinsine bağlıdır. Bağlayıcı,

"film oluşturucu", "bağlama grupları", "antistatik katkı", "plastifiyan" "Lübrikant" adı verilen malzemelerin karışımından oluşmaktadır.

Kek adı verilen bir bobin üzerine sarılan cam lifleri kurutulduktan sonra, kırılmış demetten keçe, çok uçlu fitil, kırılmış demetler gibi cam elyafı ürünlerinin elde edilmesi amacıyla prosese tabi tutulur [33].

3.2.2 Bazalt Fiberler

Bazalt, ağırlıkça yaklaşık %52 silika (SiO_2) içeren, sert, siyah renkli volkanik kayalardır (Şekil 3.11 a). Bazalt kayalar ince taneli çeşitli minerallerin karışımından oluşur. Genel olarak olivin, proksin ve plagioclase minerallerini içerirler. Her bazalt yatağı kimyasal açıdan farklılık gösterse de genel özellik ve parametreler bakımından benzerdir. Bazı yataklar ise fiber elde etmek için daha elverişlidir. Şekil 3.8’de kayalardaki bazalt ve ergiyik haldeki bazalt lavı görülmektedir [52].



Şekil 3. 8 a) Kayalardaki bazalt. b) Ergiyik bazalt lavı.

Bazalt kayalar ergiyik halde iken yüksek viskoziteye sahiptir. Bazalt lavı çok hızlı bir şekilde akabilir ve yer değiştirebilir. Birleşik Devletler Jeoloji araştırmalarına göre bazaltın yüksek akış kabiliyeti düşük silika içeriğinden kaynaklanmaktadır [52].

Bazalt kayaları yer kabuğunda yaygın olarak bulunmaktadır. Özellikle de okyanuslarda büyük miktarda bazalta rastlanmaktadır. Bazaltik magma direkt olarak yer kabuğunun ergimesi ile oluştuğundan 10-50 km derinlikte bazalt kayalarına rastlamak mümkündür. Bazalt kayalar Hawaii, Kolombiya Nehri, Washinton şehrinin güneydoğusunda, Oregon ve Idaho bölgelerinde bulunur [52].

3.2.2.1 Bazalt Fiberlerin Üretimi

Mineral bazlı fiberlerin nihai özellikleri kullanılan mineralin kimyasal kompozisyonu, termal geçmişi, üretim şartları, filament çapları ve uygulanan kimyasal yüzey aprelemesine göre şekillenir. Örneğin cam fiberler çeşitli hammaddelerin harmanlanması ile elektriksel özellikli E-camı, kimyasal dayanımlı C-camı ve yüksek mukavemetli S-camı olarak üretilebilir [53].

Bazalt fiberler volkanik bazalt kayaçların başka bir ilave olmaksızın ergitilmesi ve fiber olarak çekilmesi ile üretilirler. Elde edilen fiberlerin özellikleri bazaltın alındığı ocağın kimyasal kompozisyonuna bağlıdır. Doğal olarak oluşan kayaçlardan elde edilen fiberler yüksek stabilite sağlar.

Bazalt ve cam fiberlerin kimyasal kompozisyonları karşılaştırıldığında bazalt fiberlerin doğal olarak içerdiği minerallerin, çeşitli özelliklerin elde edilmesi için cam fiberlere edildiği görülmektedir. Al_2O_3 , viskoziteyi arttırmak ve kimyasal dayanım sağlamak amacı ile ilave edilirken; kalsiyum, titanyum ve magnezyum oksitler korozyon ve neme karşı dayanım elde etmek için kullanılırlar. Bazalt içerisinde bulunan demir oksitler de bazalt fiberlere altın rengini vermektedir. Bazalt fiberler ve cam fiberlerin kimyasal kompozisyonu Çizelge 3. 9 'da verilmiştir [52], [54], [55].

Çizelge 3. 9 Bazalt ve cam fiberlerin kimyasal kompozisyonları (%ağırlıkça).

Kimyasal Kompozisyon	Bazalt Fiber	Cam Fiber
Silisyum dioksit (SiO_2)	%48-59	%52-56
Bor oksit (B_2O)	<%1	%55-10
Kalsiyum oksit (CaO)	%6-9	%21-24
Titanyum dioksit (TiO_2)	%0,8-2,3	%0-1,5
Demir oksit (Fe_2O_3)	%7-12	<%1
Alüminyum oksit (Al_2O_3)	%15-18	%12-14
Magnezyum oksit (MgO)	%3-5	%0-5
Sodyum+potasyum oksitler ($NaO+K_2O$)	%4-5	%0-1

Sürekli bazalt ve cam fiberler benzer şekilde üretilirler. Cam fiber ve bazalt fiberlerin üretiminde kullanılan ekipmanlar birbirine benzerken sıcaklık ve viskozite parametreleri değişiklik gösterir. Bazalt fiberlerin üretiminde dışarıdan herhangi bir

ilave malzemesine gerek duymaz. Bazalt kayaçları önce kırılır ve yıkanır, kurutma işleminden sonra direkt olarak fırına beslenir.

Ergimiş doğal bazalt hızla soğuyarak, kısmi kristalin yapıdan tamamen amorf yapıya dönüşür. Amorf katı son derece yüksek viskoziteli süper-soğumuş sıvı gibi davranır. Ergiyik bazalt üzerinde yüzlerce mikro delik bulunan platin bir burca beslenir ve bu deliklerden akışı sağlanarak filament olarak çekilir. Filament çapları delik çapları ve bazaltın viskozitesi ile kontrol edilir. Üretilen filamentler su ile soğutulur ve katılaşması sağlanır. Elde edilen filament çapları 7-17 μ 'dur. Daha sonra kullanım amacına göre gereken apreleme yapılabilir [52].

3.2.2.2 Bazalt Fiberlerin Mekanik Özellikleri

Bazalt fiberler, fiber çekme işleminden sonra roving, kısa fiber, öğütülmüş fiber, düz dokuma kumaş, fitilli kumaş, keçe, rebar vb. form kazandırılarak çeşitli endüstrilerin kullanımına sunulur. Çeşitli formlarda üretilmiş bazalt mamüller Şekil 3. 9'da gösterilmektedir.



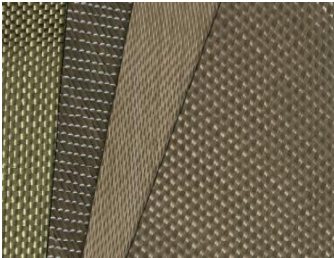
a) Sürekli fiber



b) Kırık bazalt fiber



c) Bazalt keçe



d) Bazalt dokuma (düz,fitilli)



e) Ağ



f) Rebar

Şekil 3. 9 Çeşitli formlarda üretilmiş bazalt mamüller.

Bazalt fiberlerin mekanik özellikleri E-camı ve S-camı arasında yer alır. E-camına kıyasla 280°C daha yüksek operasyon sıcaklığında çalışabilirler. E-camı fiberlere göre daha yüksek elastiklik modülüne sahiptirler ve düşük uzama gösterirler. Bazalt fiberler kimyasal dayanımları da E-camı fiberlerden daha iyidir. Elyaf sarma yöntemi ile basınçlı kapların üretimi için karbon fiberlere alternatif teşkil etmektedirler. Basınçlı kaplarda kullanım için 650 bar ve 15000 çevrim gerektiren sertifikasyon testlerinde bazalt fiberler başarılı sonuç vermektedir [Reinforced Plastics, Kasım,2006]. Bazalt fiberler özellikle asit ortamında mükemmel korozyon dayanımına sahiptirler. Su ve alkali ortamında ise E-camı fiberlere göre daha düşük bozulmaya uğrarlar [17], [52], [56].

Bazalt fiberler genel anlamda mükemmel mekanik özellikleri ile kompozit malzemeler için takviye malzemesi olarak, alev almama ve yüksek sıcaklıkta özelliklerini kaybetmeme kabiliyeti ile yangından korunma sektöründe, ısı ve ses yalıtımı özellikleri ile izolatör olarak ve mükemmel kimyasal direnç göstermeleri nedeniyle korozif ortam uygulamalarında kullanım alanı bulurlar. Tüm bu özellikler bir araya geldiğinde bazalt fiberler; kompozit, otomotiv, inşaat, ulaşım endüstrileri, depolama tankları, kimyasal transfer sistemleri, makine imalatı, denizcilik ve yatçılık, spor ve eğlence malzemeleri üretiminde alternatif bir hammadde olarak karşımıza çıkmaktadır[1], [57], [58].

Bazalt fiber ile e-camı fiberler karşılaştırıldığında bazalt fiberlerin çekme dayanımının e-camı fiberlerden %15-20 daha fazla olduğu görülmektedir. Ancak literatürde bazalt ve e-camı fiberlerin mekanik mukavemetinin karşılaştırılması konusunda bazı tezatlar bulunduğundan çalışmalar devam etmektedir. Bazalt fiberler daha geniş çalışma sıcaklığına sahiptir. Kriyojenik sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara kadar mekanik özelliklerini kaybetmez. Kimyasal dayanımları ve çevresel uyumluluğu e-camı fiberlerden daha iyidir. Çizelge 3.10 'da tek filament bazında bazalt ve e-camı fiberlerin karşılaştırılması görülmektedir. Çizelge 3. 11'de ise iki fiber tipinin kimyasal dayanımlarının karşılaştırılması verilmektedir [57], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65], [66], [67].

Çizelge 3. 10 Tek bir bazalt ve E-camın filamentin mekanik ve ısı özelliklerinin karşılaştırılması [57].

Isıl ve Mekanik Özellikler	Bazalt fiber	E-camı fiber
Çekme Dayanımı (ASTM D2101), MPa	4000 - 4300	3450 - 3800
Çekme Modülü (ASTM D2101), GPa	84 - 87	72 - 76
Operasyon sıcaklığı, °C	-820	-520

Çizelge 3. 11 Bazalt ve cam fiberler malzemelerin kimyasal dayanımlarının karşılaştırılması [57].

Kimyasal Ortam	Bazalt fiber	E-camı fiber	A-camı fiber
Doymuş çözeltide 3 saat kaynatılmış fiberdeki kütle kaybı, %	0,35	4,5	0,15
1N'lık HCl'de kaynatılmış fiberdeki kütle kaybı, %	7,1	38,5	-

Bazalt fiberler özellikleri E-camı fiberlerden daha yüksek olmakla birlikte S-camı fiberler, karbon fiber, kimyasal dayanımlı cam fiber ve silika fiberlere daha yakındır. Ancak fiyat olarak bakıldığında bazalt ve e-camı fiberler hemen hemen aynıdır. S-camı elyaflar bazalt elyaflardan %40-60 daha pahalıdır. Karbon elyafların fiyatı ise bazalt elyaflardan %60-70 daha ucuzdur [68], [69].

Loresto ve arkadaşları E-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozit malzemeleri karşılaştırmış ve E-camı takviyeli numunelerin daha yüksek çekme yükünü taşıırken, eğme ve basma yüklemelerine karşı bazalt fiber takviyeli numunelerin daha yüksek mukavemet gösterdiklerini bulmuşlardır. Çekme, eğme ve basma yüklemeleri karşında bazalt fiber takviyeli kompozit numunelerin elastiklikmodüllerinin daha yüksek olduğunu görmüşlerdir [4].

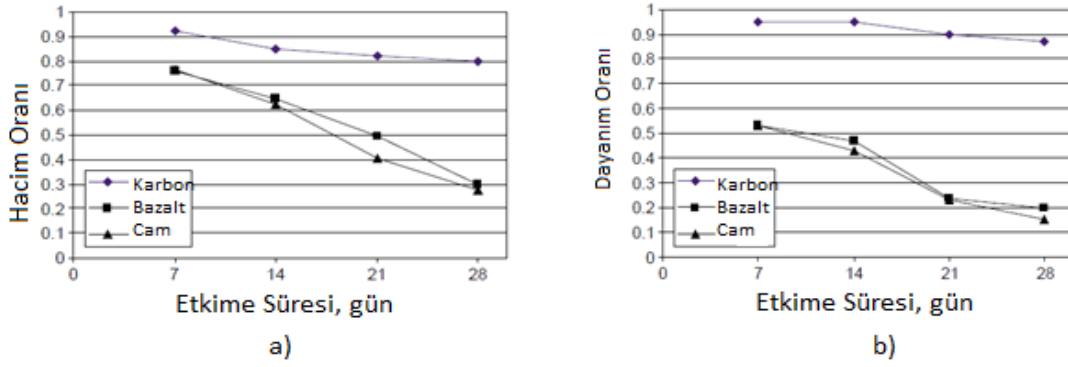
Brujin ve arkadaşları bazalt fiber takviyeli kompozitler ile E ve S camı takviyeli kompozit malzemeleri karşılaştırmış ve bazalt fiber takviyeli kompozitlerin E-camı takviyeli kompozitlerden %10-17 daha stiff, %18-34 daha mukavim olduğunu görmüşlerdir. S-camı takviyeli kompozitler ile bazalt fiber takviyeli kompozitleri karşılaştırdıklarında ise, bazalt fiber takviyeli kompozit numunelerin %6-16 daha düşük mukavemet özelliklerine sahip olduğu görülmüştür [5].

Verpoest, epoksi reçine emdirilmiş eş yönlü bazalt ve E-camı fiber prepreglerden elyaf sarma yöntemine göre kompozit malzeme üretmiş ve bunları 3 nokta eğme testine tabi tutmuştur. Çalışmanın sonucunda; %40 hacim oranı ile elde edilen kompozit malzemelerden sürekli bazalt fiber takviyeli kompozitlerin, E-camı takviyeli kompozitlerden %13,7 daha fazla dayanıma sahip olduğu ve %17,5 daha rijit (eğme modülü) olduğunu görmüştür [6].

Bazalt fiberlerin e-camı/bazalt, karbon/bazalt ve aramid/bazalt şeklinde hibrit dokuma ticari pazarda bulunmaktadır. Bu hibrit dokumalar kompozit üretiminde takviye malzemesi olarak kullanıldığında, dayanım/maliyet açısından tek çeşit fiber dokumalara göre daha efektif sonuçlar vermektedir. Özellikle hibrit kompozit plakaların darbe testlerinde (low impact velocity) tek çeşit takviyeli kompozit plakalara göre daha iyi sonuçlar alınmıştır. Hibrit kompozitler daha sünek davranış göstermiş, daha yüksek enerji absorbmışlardır [7], [70].

Fiber malzemeler kompozit yapılarda takviye elamanı olarak kullanılırken, kullanılacak matris tipine göre fiber yüzeylerine apreleme (sizing) işlemi yapılır. Yapılan aprenin kalitesi matris fiber arasındaki bağlanmayı sağladığından mekanik özelliklere direkt olarak etki eder. Cam ve bazalt fiberler amino silanlar ile aprenir. Optimum apre konsantrasyonu ile çekme dayanımı, iç yüzey kayma gerilmeleri gibi mekanik özellikler iyileşir [71]. Bunun yanı sıra fiberlerin üretim yöntemini spesifik hale getirme yoluyla küresel uçlu fiberler, yükleme sırasında fiberin matris içerisinden ayrılıp gitmesini engelleyerek kırılma tokluğunu artırır. Bu yolla çatlak ilerlemesini azaltmak mümkündür [15], [72], [73], [74], [75], [76].

Elyaf malzemeler betonarme yapılarda süneklik ve dayanım artırmanın yanı sıra korozyon dayanımını arttırmak amacıyla kullanılırlar. Yapılan deneysel çalışmalarda alkali solüyonunda bekletilmiş elyaf malzemelerde kütle kaybı ve dayanımda düşüş görülmektedir. Cam fiberlerdeki kütle kaybı bazaltlara göre daha fazladır. Karbon, bazalt ve cam elyafların 1 M NaOH ortamında 7, 14, 21 ve 28 gün bekletildikten sonra meydana gelen kütle kaybı ve dayanım düşüşü Şekil 3. 10'de gösterilmektedir. Alkali ortamda en az kütle kaybı karbon fiberlerde görülmektedir [17].



Şekil 3. 10 a) Fiberlerdeki miktar azalması, b) fiberlerde meydana gelen dayanım düşüşü (1 M NaOH ortamında) [17].

3.2.2.3 Bazalt Fiberlerin Kullanım Alanları

Bazalt fiberlerin yüksek mekanik dayanım, yüksek sıcaklık dayanımı, süneklik, kimyasal dayanım ve çevresel uyumluluk gibi özellikleri dolayısıyla her geçen gün kullanım alanı artmaktadır. Üretim kolaylığı, çevresel uyum ve ekonomik oluşu dolayısıyla kompozit endüstrisinde kullanılan elyaf malzemeler için bir alternatif oluşturmaktadır[57].

Bazalt fiberler bu çalışmada da araştırıldığı üzere kompozit endüstrisinde kullanılmaktadır. Termoset ve termoplastik polimerler ile uyumlu silan kaplama yapılarak E-camı, S-camı ve karbon fiberlerin yerine kullanılması mümkündür. Mukavemetinin elverdiği ölçüde ev ve banyo gereçleri, otomotiv, denizcilik ve yatçılık endüstrisinde, taşımacılık, elektrik elektronik endüstrisinde kullanımı mümkündür [57], [78].

Bazalt fiberler çok iyi bir yalıtım malzemesidir ve kendi kendini söndürme özelliğine sahiptirler. Isıyı iletmeyen koruyucu kıyafetler, tren vb. toplu taşıma araçlarının koltuk ya da panellerinde kullanılması mümkündür. Yine yalıtkanlık özelliği ile ısı altında çalışan makine imalatında, sıcak su iletim hatlarında ve benzeri yalıtkanlık istenen yerlerde kullanımı mümkündür. Başka bir yalıtım malzemesi olan asbestin çevresel zararları göz önünde bulundurduğunda bazalt elyafların asbestin yerini alacağı düşünülmektedir [57], [78].

İnşaat sektöründe konstrüksiyon yapıların inşasında betonun demir çubuklar ile takviye edilmesi geleneksel bir yöntemdir. Demir çubukların yerine bazalt elyaftan yapılmış bazalt ribar malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Bazalt ribar çubuklar konstrüksiyon

yapının süneklik özelliğini geliştirirler. Yapıyı korozyif etkilerden metallere kıyasla daha iyi korurular. Bazalt ribar çubuklar pultrüzyon ve elyaf sarma yöntemlerinin kombine edilmesi ve polyester, epoksi ve vinilester reçinelere takviye edilerek üretilirler. Rebar olarak kullanımın yanı sıra bazalt fiberler geniş atkı ve çözgü aralıkları ile dokunup karayolu ve kaldırımlarda trafik dolayısıyla meydana gelebilecek çatlamayı engellemek, kaldırım ömrünü uzatmak ve sıcaklık değişimleri ile meydana gelen genleşmelerin oluşturduğu çatlamaları engellemek amacıyla kullanılırlar [57], [79].

3.2.3 Karbon Fiberler

3.2.3.1 Karbon Fiberlerin Mekanik Özellikleri

Karbon takviyeli kompozit malzemeler SAE1020 çeliğinden 5 kat daha sağlam ve 5 kat daha hafifken AA6061 alüminyum alaşımından 7 kat daha güçlü ve 1,5 kat daha hafiftir. Karbon takviyeli kompozit malzemelerin yorulma dayanımı tüm metal malzemelerden daha üstündür. Aynı zamanda karbon fiber uygun matris malzemesi ile birleştirildiğinde korozyon dayanımı en mükemmel olan kompozit malzeme üretmek mümkün olmaktadır. Belirli zift bazlı karbon fiberler bakırdan 3 kat daha iyi termal iletkenliğe sahiptirler. PAN ve zift bazlı karbon fiberler, elektrik iletkenliği özelliği ile çeşitli bilgisayar parçalarında toplanan statik elektiriği boşaltmak amaçlı kullanılır. Bunlar sıcaklıkla erime ve yumuşama göstermediklerin, uçak frenleri, roket nozulları gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılırlar. Karbon fiberlerin dayanımı oksitleyeci olmayan ortamlarda sıcaklıkla artar. Bu eşsiz özellik yatay ve dikey yöndeki fiber mikroyapısının bir sonucudur. Yapıda bulunan kuvvetli C-C bağları yüksek dayanım ve tokluk sağlar, zayıf Van der Valls bağları ise zayıf kayma dayanımı verir ve ayrıca termal ve elektriksel iletkenlik sağlar. Fiber yapısının kristalin özellikleri sonucu ısı ve termal iletkenlik özellikleri belirlenir. Mikroyapının geliştirilmesi ile elastiklik modülü, yoğunluk ısı ve termal iletkenlik özellikleri geliştirilir [30], [80].

Çizelge 3. 12 ve Çizelge 3. 13’de PAN ve zift bazlı karbon fiberlerin fiziksel ve mekanik özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 3. 12 PAN bazlı karbon fiberlerin mekanik özellikleri.

Özellikler	Ticari standart modül	Havacılık Endüstrisi		
		Standart modül	Orta modül	Yüksek modül
Elastiklik modülü, GPa	228	220-241	290-297	345-448
Çekme dayanımı, MPa	380	3450-4830	3450-6200	3450-5520
% uzama	1,6	1,5-2,2	1,3-2,0	0,7-1,0
Elektriksel öz direnç, $\mu\Omega\cdot\text{cm}$	1650	1650	1450	900
Termal iletkenlik, W/m.K	20	20	20	50-80
Termal genişleme katsayısı, 10^{-6}K	-0,4	-0,4	-0,55	-0,75
Yoğunluk, gr/cm^3	1,8	1,8	1,8	1,9
Karbon oranı, %	95	95	95	99
Filament çapı, μm	6-8	6-8	5-6	5-8
Üretici firma	Zoltek, Fortafil, SGL	BPAmoco, Hexcel, Mitsubishi Rayon, Toho, Toray, Tenax, Soficar, Formosa		

PAN bazlı fiberle karşılaştırıldığında zift bazlı fiberlerin daha geniş kristalin yapılar içermesi ve mikroyapı oryantasyonunun daha iyi olması nedeniyle daha üstün modüle sahip oldukları ve iyi elektriksel iletkenliği ve düşük termal genişleme katsayısına sahip görülmektedir. Bu avantajlar ile zift bazlı karbon fiberler uydu yapımında kullanılır.

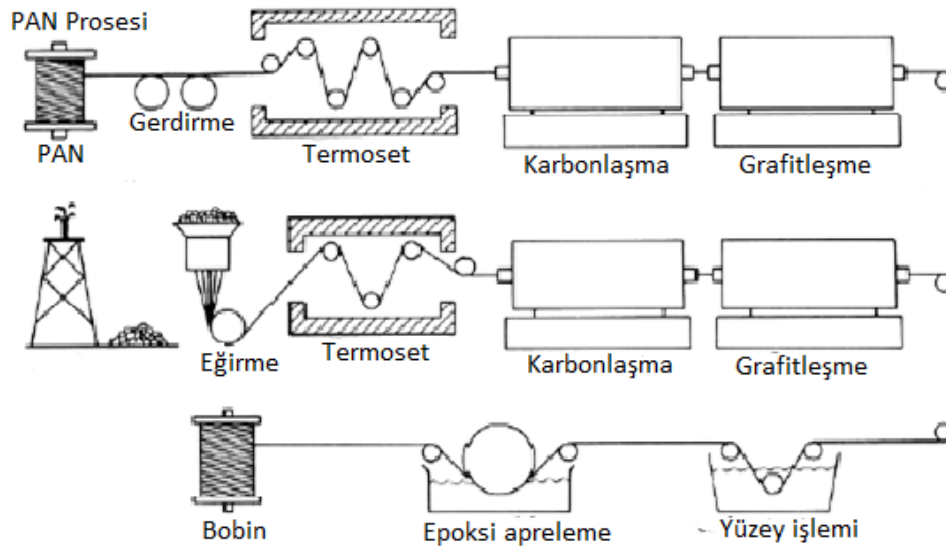
Karbon fiberler inorganik malzemeler olduklarından nem, atmosfer şartları, solventler ve oda sıcaklığındaki zayıf asitlerden etkilenmezler. Ancak yüksek sıcaklıklarda oksidasyon bir sorun teşkil eder. Düşük modüllü PAN, yüksek modüllü PAN ve zift bazlı karbon fiberlerin uzun çalışma süreleri için oksidasyon sıcaklıkları $350-450^{\circ}\text{C}$ 'dir. Empirüteler düşük sıcaklıklarda oksidasyonu başlatma eğiliminde olduklarından, oksidasyon direnci yüksek saflıktaki fiberler ile sağlanabilir [30].

Çizelge 3. 13 Zift bazlı karbon fiberlerin mekanik özellikleri.

Özellikler	Düşük modüllü	Yüksek modüllü	Çok yüksek modüllü
Elastiklik modülü, GPa	170-241	380-620	690-965
Çekme dayanımı, MPa	1380-3100	1900-2750	2410
% uzama	0,9	0,5	0,4-0,27
Elektriksel öz direnç, $\mu\Omega\cdot\text{cm}$	1300	900	220-130
Termal iletkenlik, W/m.K	-	-	400-1100
Termal genleşme katsayısı, 10^{-6}K	-	-0,9	-1,6
Yoğunluk, gr/cm^3	1,9	2	2,2
Karbon oranı, %	97	99	99
Filament çapı, μm	11	11	10
Üretici firma	BPAmoco, Mitsubishi Kasei		BPAmoco

3.2.3.2 Karbon Fiberlerin Üretimi

Karbon fiber üretiminde kullanılan hammadde kaynakları PAN, zift ve rayon'dur. Her prosesin hammadde kaynağına göre kendine özgü detayları olmasına rağmen genel olarak eğirme (spinning), stabilizasyon, karbonizasyon, bitirme işlemleri veya kolay proses edilebilmeleri için apre (sizing) işlemleri uygulanır. Prosesin şematik gösterimi Şekil 3. 11'de görülmektedir.



Şekil 3. 11. PAN (polyacrylonitrile) ve zift prosesinin şematik gösterimi.

Karbon elyafların üretiminde kullanılan hammadde kaynaklarında ilki rayondur (suni ipek). Rayon inert bir atmosferde 1000 - 3000 °C civarına ısıtılır ve aynı zamanda çekme kuvveti uygulanır. Bu işlem mukavemet ve tokluk sağlar. Ancak yüksek maliyet nedeniyle rayon elyaflar çok tercih edilmezler [30].

Günümüzde kullanılan karbon fiberlerin büyük çoğunluğu PAN bazlı karbon fiberlerdir. Üretim zifleşmiş çoğul liflerin (precürsor) bir dizi operasyon görmesiyle sağlanır. İlk adımda precursor yüksek sıcaklıklarda epoksi tarafından oksitlenir ve sonra karbonizasyon ve grafitleştirme proseslerinden geçer. Bu prosesler süresince, precursorler stiffness/ağırlık, dayanım/ağırlık özelliklerini geliştiren bir düzü kimyasal değişime uğrarlar. Yüzey işleme ve sizing işlemleri fiberlerin reçine ile uyumlu hale getirir ve işlenebilme özelliğini geliştirir. PAN tekstil kökenli bir polimer lifi olan poliakrilonitril anlamına gelmektedir. Zift bazlı fiberler ise petrol ya da kömürün arıtılıp eğirilmesi ile meydana gelirler. Zift bazlı fiberler PAN bazlı fiberlere göre daha sert (stiffer) ve daha gevrekler. Karbon fiberlerin maliyeti hammadde ve proses maliyetine göre değişmektedir. PAN bazlı fiber üretiminde precursorlar işlem sırasında ağırlıklarının %50'sini kaybettiklerinden bir maliyet artışı meydana gelse de, zift bazlı fiberlerin arılaştırma işlemleri maliyetli olduğu için zift bazlı fiberler çok daha pahalıdır. Aynı zamanda üretilen fiberlerin bir demetteki lif sayısına, dayanım özelliklerine göre de fiyatları değişmektedir [30].

3.2.4 Aramid Fiberler

Aramid fiberler 1960'larda tekstil amaçlı olarak aromatik poliamidlerden üretilmiştir. Daha sonra mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ile inorganik fiberlerle yarışır hale gelmiş ve kompozit endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır. Aramid fiberler takviye lifleri arasında en yüksek mukavemet/ağırlık oranını sağlamaktadırlar. Bu hafiflik, yüksek mukavemet, yüksek tokluk özellikleri kompozit uygulamalarda kullanımını sağlar. Yapısal kompozit uygulamaların yanı sıra balistik koruma elemanları, lastik, halat kablo üretiminde de kullanılmaktadır [30],[36].

3 çeşit aramid fiber mevcuttur :

- Düşük modüllü (Low Modulus (LM)): Technora T200 (Teijin)

- Orta modüllü (Intermediate modulus (IM)): Twaron (Akzo)
- Yüksek Modüllü (High Modulus (HM)): Kevlar (Dupont)

3.2.4.1 Aramid Fiberlerin Mekanik Özellikleri

Yüksek modüle sahip aramid fiberlerden Kevlar 29 yüksek tokluk, Kevlar 49 yüksek elastiklik modülüne sahiptir. Yapısal kompozit uygulamalarında yüksek elastiklik modülünün yanı sıra yüksek tokluk, hasar toleransı, balistik durdurma performansı dolayısıyla Kevlar 49 daha çok tercih edilmektedir. Ultra yüksek dayanım gerektiren durumlar için de çok yüksek çekme dayanımına sahip Kevlar 149 mevcuttur [30]. Yüksek modüllü aramid fiberlerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.14'te gösterilmektedir.

Çizelge 3. 14 Yüksek modüllü aramid fiberlerin fiziksel ve mekanik özellikleri.

Malzeme	Yoğunluk g/cm ³	Filament çapı µm	Çekme mod. ^(a) GPa	Çekme day. ^(b) MPa	% uzama	İplik sayısı
Kevlar 29 (Yüksek tokluk)	1,44	12	83	3,6 2,8 ^(b)	4	134- 10000
Kevlar 49 (yüksek modül)	1,44	12	131	3,6-4,1	2,8	25-5000
Kevlar 149 (ultra yüksek modül)	1,47	12	179	3,4	2	1000
(a) ASTM D 2343, impregnated strand. (b) ASTM D 885, unimpregnated strand.						

Aramid fiberlerin çekme modülü moleküler oryantasyonun bir fonksiyonudur. Tek bükümlü Kevlar 29'un elastiklik modülü 62 GPa iken, kompozit yapıda elastiklik modülü 83 GPa'la yükselir (E-Camı 69 GPa). Isıl işlem ile gerilim altında kristalin oryantasyon artar sonuç olarak Kevlar 49 fiberin elastiklik modülü 131 GPa'a ulaşır. Kevlar 149 daha yüksek elastiklik modülüne sahiptir ve özel durumlar için kullanılır. Bu modül yaklaşımları kevlar fiberler için maksimum modül yaklaşımlarıdır.

Aramid fiberin çekme dayanımı 4,1 ile 3,6 GPa arasındadır. Bu geleneksel naylon 66 fiberin dayanımından 2 kat daha fazla ve E-Camı roving dayanımından %50 fazladır. Kopma başlangıcının fibriller ile başladığı sanılmaktadır. Yüksek modüllü aramid

ipliklerin çekme dayanımı ve çekme modülü yüksek sıcaklıklarda lineer olarak azalır. Çekme modülü ve dayanım özelliklerinin %80'den fazlası 180 °C'ye kadar korunur

Oda sıcaklığında aramid fiberlerin çekme özelliklerine nem etkisi %5'ten küçüktür. Yüksek sıcaklıklarda ortaya çıkan nem etkisi geridönüşümlüdür.

Aramid fiberler dinamik ve statik yorulmaya dirençlidir. Sürünme oranı cam fiberlere benzer olarak düşüktür, ancak camın aksine aramid fiberler sürünme çatlaklarına daha az duyarlıdır. Basma yüklemesi altında lineer olmayan sünek davranış sergilerler. Basınç altında %0,3-0,5 akma görülür.

Aramid fiberin aromatik bölümü yüksek termal stabiliteye sahiptir. Aramid fiberlerin diğer polimerler gibi camsı geçiş sıcaklığı ya da ergime derecesi yoktur. Aramid fiberler 450°C'de havada bozunurlar. Kısa yüklemeler için -200/200 °C aralığında, uzun süreli yüklemelerde ise 150°C üzerine çıkılmaması gerekmektedir [30].

KOMPOZİT MALZEMELERDE MİKROMEKANİK YAKLAŞIMLAR

Kompozit malzemelerin mekaniği mikromekanik ve makromekanik olmak üzere iki seviyede incelenir. Mikromekanik fiber ve matris malzemesi arasındaki etkileşimleri inceleyerek kompozit yapının davranışlarını belirler. Mikromekanikğin yüksek seviyeli lamine kompozitlerin özelliklerinin belirlenmesinde bazı kısıtlamaları vardır. Lamine yapıların özelliklerini belirlemede makromekanik yaklaşımlar kullanılır.

Kompozit malzemelerin mikromekanik karakterizasyonu fiber ve matris arasındaki bağlanmayı inceleyerek, kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesini sağlar. Matris elemanının fiberleri bir arada tutma görevinin yanı sıra, malzeme üzerine gelen yüklemeyi fiberlere transfer etmede önemli bir fonksiyonu vardır. Kompozit bir malzemenin özelliklerini belirleyebilmek için kompoziti oluşturan bileşenlerin özellikleri ve yapı içerisindeki geometrik dizilimlerinin bilinmesi gerekmektedir. Fiber takviyeli kompozit malzemeler için birçok mikromekanik yaklaşım bulunmaktadır. Örneğin fiber hacim oranı bilinen bir kompozit malzemenin karışımlar kuralı yardımı ile birçok fiziksel özelliğini belirlemek mümkündür. Elastiklik teorisi esaslı daha komplike yaklaşımlar kullanılarak, kompozit malzemenin bir çok özelliği hakkında bilgi edinmek mümkündür [81].

Kompozit malzemelerin mekanik davranışları karışımlar kuralı ile ifade edilen mikromekanik yaklaşımlar ile tahmin edilir. Bu yaklaşımlar,

- Fiberler matris içerisinde uniform olarak dağılır.

- Fiber ve matris arasında mükemmel bir bağlanma vardır.
- Matriste boşluklar bulunmaz.
- Uygulanan yüklemeler fiberlere paralel ya da dik yönlüdür.
- Lamine yapılar başlangıçta iç gerilmeler (artık gerilmeler) içermezler.
- Fiber ve matris birlikte lineer elastik malzeme gibi davranır [82], [83], [84], [85].

4.

4.1 Yoğunluk

Kompozit bir malzemenin kütlesine m_c ve hacmine v_c dersek, kompozit malzemenin toplam kütlesi kendisini oluşturan fiber ve matris elemanlarının kütlelerinin toplamı olarak ifade edilir:

$$m_c = m_f + m_m \quad (4.1)$$

Ancak yukarıda verilen (4.1) eşitliği boşluksuz kompozit yapılar için geçerlidir. Yapıda boşluk olduğu durumlarda, boşluğun hacmi v_v olarak ifade edilir ve kompozit malzemenin hacmi;

$$v_c = v_f + v_m + v_v \quad (4.2)$$

(4.1) eşitliği m_c ve (4.2) eşitliği v_c ile bölündüğünde kütle ve hacim oranları M_f , M_m ve V_f , V_m , V_v elde edilir ve aşağıdaki eşitlikleri yazmak mümkün olur;

$$M_f + M_m = 1 \quad (4.3)$$

$$V_f + V_m + V_v = 1 \quad (4.4)$$

Kompozit malzemenin yoğunluğu $\rho_c (=m/v)$ olduğundan;

$$\rho_c = \frac{m_c}{v_c} = \frac{m_f + m_m}{v_c} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{v_c} \quad (4.5)$$

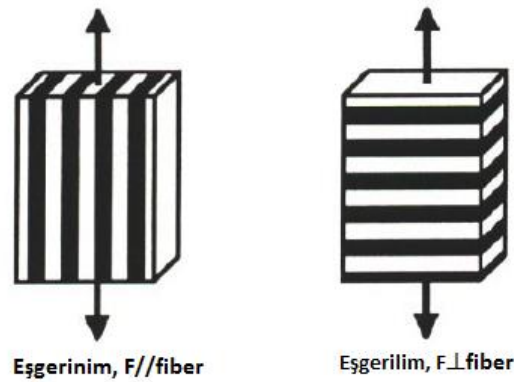
ifadesi ile yoğunluk hesabı yapılır [81].

4.2 Fiber Takviyeli Kompozitlerde Özelliklerin Analizi

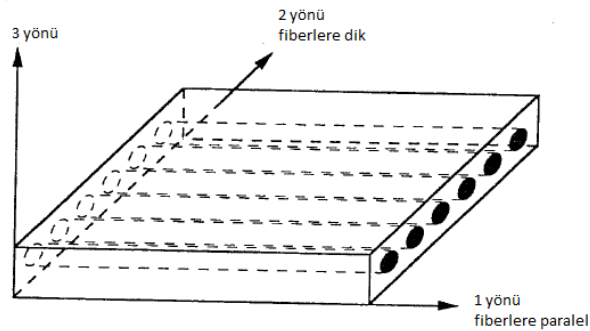
Fiber takviyeli kompozit malzemelerde mekanik özellikler sadece fiber bileşeninin özelliklerine değil, uygulanan yükün matristen fiberlere iletirme derecesine bağlıdır. Fiberlerin uzunluğu, yönlenmesi, hacim oranı, uygulanan yükün yönüne göre fiberlerin yönelimi kompozit malzemenin özelliklerini belirler.

4.2.1 Eş Yönlü Fiberlerde Elastiklik Modülü

Eş yönlü fiber takviyeli kompozit malzemede özellikler yükleme yönüne bağlı olarak değişir. Şekilde gösterilen kompozit malzemede 1 yönü fiberlere paralel ($//$, L), 2 yönü dik yön ($\perp$, T) olarak ifade edilir. Eğer kompozit plakada kuvvet etkisi ile kalınlığı boyunca kesit daralması meydana geldiğinde bu da 3 yönü ile gösterilir. Gerilim ve gerinim durumları Şekil 4.1 ve malzeme üzerine gelen yükleme yönleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir [86].



Şekil 4.1 Eşyönlü fiberlerde eşgerinim ve eşgerilim durumları.



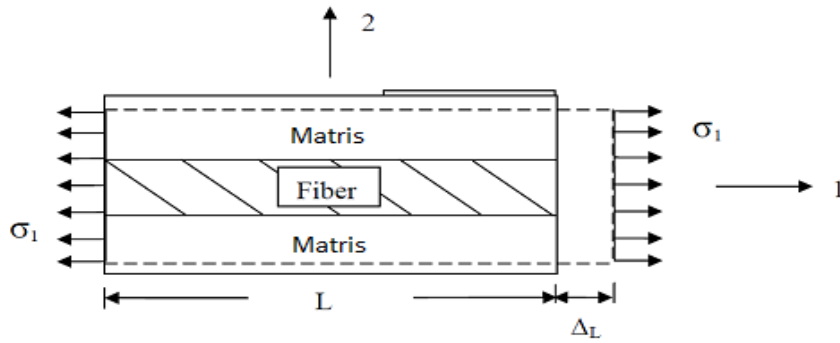
Şekil 4.2 Eşyönlü fiber takviyeli kompozitlerde yükleme yönleri.

4.2.1.1 Eşgerinim Koşulu

Kompozit yapı içerisinde iki bileşen birbirine mükemmel bir şekilde yapışıp aynı Poisson oranına sahip olduğunda her bileşende kuvvet yönünde meydana gelen uzamalar (Δl) eşit olur. Fiberler paralel yönde (1 yönündeki) zorlamalarda; elastik alanda; fiber, matris ve kompozit üzerindeki gerinimler eşit olduğundan; bu koşula “eşit gerinimler koşulu = izostrain” denir. Fiberlerin Elastiklik modülleri matrisinkinden daha büyükse $E_f \gg E_m$;

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m = \frac{\Delta l}{l} \quad (4.6)$$

(4.6) eşitliği ε_c kompozit malzemenin gerinimi, ε_f fiberlerin gerinimi ve ε_m matrisin gerinimini ifade eder. Eşit gerinim altındaki kompozit malzeme şematik olarak Şekil 4.3'te şematik olarak gösterilmektedir. Eşit gerinimler koşulu ilk defa Voight tarafından kullanılmıştır[81].



Şekil 4.3 Eşgerinim durumu [82].

Fiber ve matris elastik olduğunda, iki bileşene birden etkiyen kuvveti (σ), gerinim (ε) ve Young Modülü (E), ile ilişkilendirebiliriz. Böylece fiber ve matrisin gerinimi kompozit gerinimine eşit olur. Fiber ve matris üzerine gelen kuvvetler sırasıyla σ_f ve σ_m olduğunda, Young Modülü, E ;

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_c \quad (4.7)$$

ve

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_c \quad (4.8)$$

olarak ifade edilir.

Statik denge şartına göre toplam bileşke kuvvet, fiber ve matris üzerine gelen kuvvetlerin toplamına eşittir. A_c 'ye kompozit malzemenin kesiti dersek, matrisin kesiti A_m ve fiberin kesiti A_f olur. Fiberler doğrultusunda gelen yükleme, iki bileşen üzerine gelen yüklemenin toplamına eşittir.

$$P_c = P_f + P_m \quad (4.9)$$

ya da

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (4.10)$$

(4.9) ve (4.10) eşitlikleri kullanılarak;

$$\sigma_c = (E_f A_f + E_m A_m) \varepsilon_c \quad (4.11)$$

ya da

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = E_f \frac{A_f}{A_c} + E_m \frac{A_m}{A_c} \quad (4.12)$$

(4.11) ve (4.12) eşitlikleri yazılır. Burada A_c , A_f ve A_m kompozit, fiber ve matrisin kesitleridir. Bunları hacim oranı $V_f = A_f/A_c$ ve $V_m = A_m/A_c$ şeklinde de ifade edebiliriz. Böylelikle daha basit olarak fiberlere paralel yönde bir kuvvet geldiğinde elastiklik modülü aşağıdaki (4.13) gibi ifade edilir.

$$E_{//} = E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (4.13)$$

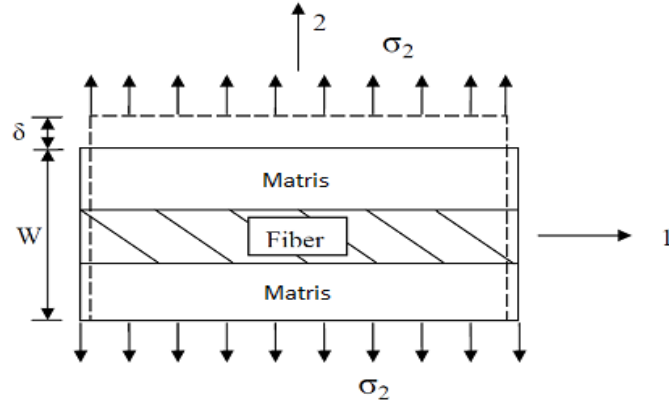
(4.13) eşitliğine fiberlere paralel yöndeki yüklemeler için, karışımlar kuralı ile Young Modülü ifadesi denir. Bu eşitlik fiber-matris arayüzeyinin mükemmel düzeyde yapışmış olduğu ve fiberlerin eş yönlü ve hatasız biçimde dizildiği öngörülerek; doğru sonuçlar vermektedir. Bu kabul ile fiberlere paralel yöndeki çekme dayanımı ve Poisson oranı, ν ;

$$\sigma_{//} = \sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (4.14)$$

$$\nu_{//} = \nu_c = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (4.15)$$

olarak formüle edilir [81].

4.2.1.2 Eşgerilim Koşulu



Şekil 4.4 Eşit gerilim koşulunun temsili gösterimi [82].

Eş yönlü kompozitlerde, fiberlere dik yöndeki özellikler “eşit gerilimler = izostres koşulu” ile ifade edilir. Bu durumda fiberler sürekli faz ile birlikte yüklemeye dik yönde konumlanmış olur. Bu durumda kompozit malzeme üzerine gelen toplam yük (σ_c), fiberlerin taşıdığı yük (σ_f) ve matrisin taşıdığı yük (σ_m) eşit olur. Eşgerilim durumu Şekil 4.4’te şematik olarak gösterilmektedir. Eşgerilim koşulu ilk defa Reuss tarafından uygulanmıştır. Yükleme fiberlere dik olduğunda;

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m \quad (4.16)$$

(4.16) eşitliğini yazılır. Kompozit malzemenin kalınlığında meydana gelen toplam değişim, t_c ; matris (t_m) ve fiberlerde (t_f) meydana gelen değişimin toplamıdır, bu da;

$$\Delta t_c = \Delta t_f + \Delta t_m \quad (4.17)$$

(4.17) eşitliği t_c ile bölüldüğünde,

$$\frac{\Delta t_c}{t_c} = \frac{\Delta t_f}{t_c} + \frac{\Delta t_m}{t_c} \quad (4.18)$$

(4.18) eşitliği elde edilir. Bu durumda fiberlere dik yönde kompozit malzemenin gerinimi $\Delta t_c/t_c = \varepsilon_c$ olurken, Δt_m ve Δt_f fiber ve matrisin kendi gerinimleri ile çarpımına eşittir. Bu da $\Delta t_m = \varepsilon_m t_m$ ve $\Delta t_f = \varepsilon_f t_f$ ‘dir ve formüldeki yerine koyulduğunda;

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta t_c}{t_c} = \frac{\Delta t_m}{t_m} \frac{t_m}{t_c} + \frac{\Delta t_f}{t_c} \frac{t_m}{t_c} \quad (4.19)$$

ya da

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m \frac{t_m}{t_c} + \varepsilon_f \frac{t_f}{t_c} \quad (4.20)$$

Uygulanan yük altında kompozit malzemenin kesiti için, fiber ve matrisin hacim oranları;

$$V_m = \frac{t_m}{t_c} \text{ ve } V_f = \frac{t_f}{t_c} \quad (4.21)$$

olarak yazılabilir. Bu eşitlikler (4.21)'de yerine yazıldığında kompozit malzemenin toplam gerinimi;

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f V_f \quad (4.22)$$

olarak bulunur.

Aynı şekilde eşyönlü fiber takviyeli kompozit malzemenin, fiberlere dik yöndeki yani eşit gerilim, $\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m$, durumunda elastiklik modülü;

$$\frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_c}{E_m} V_m + \frac{\sigma_c}{E_f} V_f \quad (4.23)$$

veya

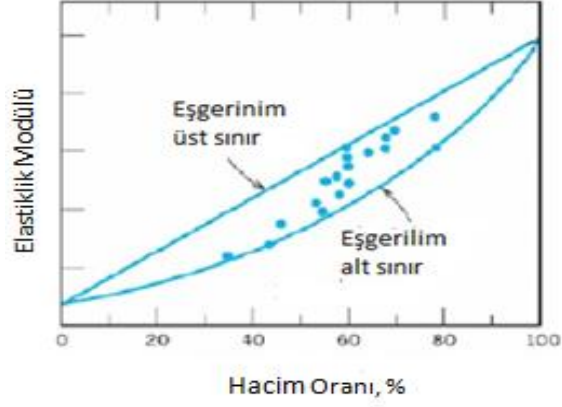
$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E_m} V_m + \frac{1}{E_f} V_f \quad (4.24)$$

olur. Bu eşitliği biraz daha sade bir şekilde ifade etmek istersek;

$$E_c = E_{\perp} = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f} \quad (4.25)$$

eşitliğini elde ederiz [81].

Kompozit malzemeler için eşgerinim ve eşgerilim koşulları maksimum ve minimum dayanım koşullarını temsil eder. Şekil 4. 4'de gösterildiği gibi, eşgerilim durumunda takviye elemanı olan yüksek dayanımlı fiber bileşeni fiberlere dik yöndeki elastiklik modülünde (tranverse modulus) kayda değer bir artış sağlamamıştır. Partikül takviyeli kompozit malzemeler eşgerinim ve eşgerilim koşullarının arasında davranış gösterir.

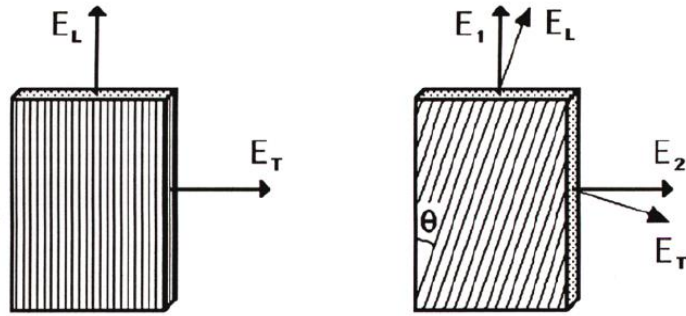


Şekil 4.5 Eşgerilim ve eşgerinim durumlarında elastiklik modülünün fiber hacim oranı ile değişimi.

$$\text{Eşgerinim yaklaşımı : } E_c = E_p V_p + E_m V_m \quad (4.26)$$

$$\text{Eşgerilim yaklaşımı : } E_c = \frac{E_m V_p}{E_p V_m + E_m V_p} \quad (4.26)$$

Fiberlere paralel ve fiberlere dik konumlu yüklemeler “malzeme eksenlerini” (enine ve boyuna eksenler) ifade eder. Ancak kompozit malzeme üzerine Şekil 4. 6’da görüldüğü gibi farklı yönden bir yükleme gelebilir. Eğer kuvvet eşyönlü fiberlere bir θ açısı ile gelirse, kuvvet yönündeki elastik özellikler malzeme eksenlerine (enine ve boyuna eksenler) göre hesaplanabilir [86].



Şekil 4. 6 Çekme yükü altındaki fiber takviyeli kompozit malzemede oluşan kayma gerilmeleri.

$$E_1 = E_{//} \left[\cos^4 \theta + \frac{E_{\perp}}{E_{//}} \sin^4 \theta + \frac{1}{4} \left(\frac{E_{\perp}}{G_{//,\perp}} - 2\nu_{//,\perp} \right) \sin^2 2\theta \right]^{-1} \quad (4.27)$$

ve

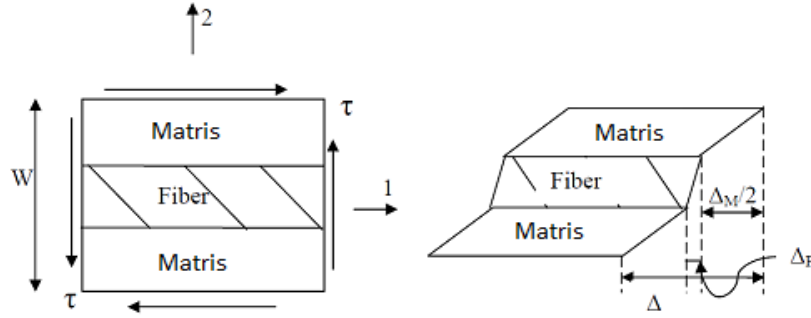
$$E_2 = E_{//} \left[\sin^4 \theta + \frac{E_{\perp}}{E_{//}} \cos^4 \theta + \frac{1}{4} \left(\frac{E_{\perp}}{G_{//,\perp}} - 2\nu_{//,\perp} \right) \sin^2 2\theta \right]^{-1} \quad (4.28)$$

olarak hesaplanır. Düzlemsel dağılımlı plakada ortalama Elastiklik modülü, Kayma modülü ve Poisson oranını için aşağıdaki eşitlikler kullanılır.

$$\bar{E} = \frac{3}{8}E_{//} + \frac{5}{8}E_{\perp} \quad (4.29)$$

$$\bar{G} = \frac{1}{8}E_{//} + \frac{1}{4}E_{\perp} \quad (4.30)$$

(4.29) ve (4.30) eşitliğinden de görüldüğü gibi bir θ açısı ile gelen yüklemelerde θ açısı, kayma modülü ($G_{//,\perp}$), Poisson oranı ($\nu_{//,\perp}$) ile paralel ve dik yöndeki elastiklik modülü ($E_{//}$ ve $E_{\perp}$) gibi parametrelere ihtiyaç vardır.



Şekil 4.7 Kompozit malzemeler için kayma hareketi

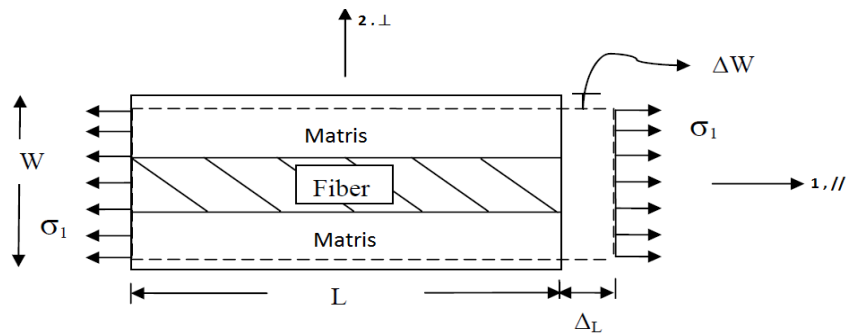
İzotropik malzemeler için Kayma Modülü,

$$G = \frac{E}{2(1-\nu)} \quad (4.31)$$

Eşyönlü fiber takviyeli kompozitler için kayma modülü karışımlar kuralının tersi şeklinde ifade edilebilir. G_f fiberlerin, G_m de matris bileşeninin kayma modülünü temsil eder.

Böylece eşyönlü fiber takviyeli kompozit malzemeler için kayma modülü, $G_{//,\perp}$;

$$\frac{1}{G_{//,\perp}} = \frac{\nu_m}{G_m} + \frac{\nu_f}{G_f} \quad (4.32)$$



Şekil 4.8 Poisson oranı.

Karışımlar kuralı uygulanarak fiberlere paralel yöndeki yüklemeler için (fiberlere paralel yönde yükleme ve fiberlere dik yönde uzama durumunda) poisson oranı, $\nu_{//, \perp}$;

$$\nu_{//, \perp} = \nu_c = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (4.33)$$

olur. Fiberlere paralel yükleme durumunda elde edilen Poisson oranı ile fiberlere dik yükleme durumunda elde edilen Poisson oranı arasında (4.34) gibi bir bağıntı kurulabilir.

$$\nu_{\perp, //} = \frac{E_{\perp}}{E_{//}} \nu_{//, \perp} \quad (4.34)$$

Halpin-Tsai Eşitlikleri : Halpin, Tsai ve Kardos komplike mikromekaniksel eşitliklerden daha tatmin edici sonuçlar alabilmek için deneysel genel eşitlikler geliştirmişlerdir. Bu eşitlikler düşük fiber hacim oranları söz konusu olduğunda tam doğru sonuçlar vermektedir. Aynı zamanda bu eşitlikler yükleme yönüne göre paralel yönlenmiş süreksiz fiber takviyeli kompozit malzemelerin özelliklerinin belirlenmesinde de kullanılır[81].

Halpin-Tsai tarafından fiberlere dik gelen yükleme durumlarında ($F_{\perp}$ fiber, tranverse) kullanılmak üzere çok amaçlı bir eşitlik geliştirilmiştir. Bu eşitlik;

$$\frac{M}{M_m} = \frac{(1 + \xi \eta V_f)}{(1 - \eta V_f)} \quad (4.35)$$

Burada η ;

$$\eta = \frac{(M_m/M_f) - 1}{(M_f/M_m) + \xi} \quad (4.36)$$

olarak ifade edilir. (4.36)'daki M , modül ya da malzemenin özgül özelliği olarak tanımlanmaktadır. Bu modül, paralel ve dik yöndeki elastiklik modülü, kayma modülü olabilir. V_f , fiber hacim oranını ifade eder. ξ , fiber geometri, fiber dağılımı ve yükleme koşullarına göre değişen takviye etki faktörüdür. ξ ifadesi (4.36) eşitliğinde deneysel sonuçları daha doğru hale getiren empirik bir faktördür.

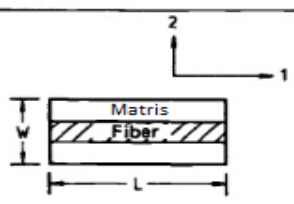
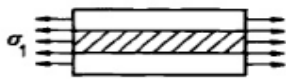
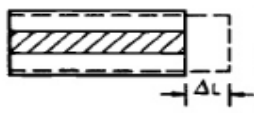
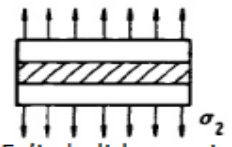
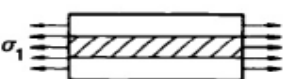
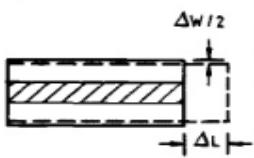
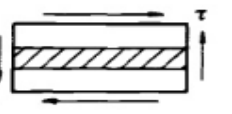
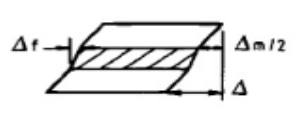
$$M \Rightarrow E_{\perp}, G_{\perp}, \nu_{\perp}$$

$$M_f \Rightarrow E_f, G_f, \nu_f$$

$$M_m \Rightarrow E_m, G_m, \nu_m$$

gibi özelliklerinin bulunmasında kullanılmaktadır. (4.36) eşitliğindeki ξ , takviye etki faktörü plastik matrisli kompozitler için $\xi = 0,2$ olarak tespit edilmiştir [86].

Malzemenin yük altındaki davranışlarını kontrol eden malzeme sabitlerini Şekil 4. 9'da görüldüğü gibi özetlemek mümkündür.

Deformasyon öncesi		
		
Gerilim uygulaması	Deformasyonlar	İlişki
 E_L 'in belirlenmesi		$E_1 = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$
 E_L 'in belirlenmesi		$1/E_2 = V_f/E_f + (1 - V_f)/E_m$
 ν_{12} 'in belirlenmesi		$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f)$
 G_{12} 'in belirlenmesi		$1/G_{12} = V_f/G_f + (1 - V_f)/G_m$

Şekil 4. 9 Malzeme mekaniği yaklaşımı ile elastik sabitlerin belirlenmesi.

4.3 Fiber Uzunluk Etkisi

Kompozit malzemenin etkili bir biçimde dayanım kazanabilmesi için kritik bir l_c boyu tanımlanır. Bu l_c boyu aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c} \quad (4.37)$$

(4.37) eşitliğinde σ_f^* fiberin çekme dayanımı, d fiber çapı ve τ_c , arayüzey dayanımı ifade etmektedir. Fiber boyları $l \gg l_c$ (normal şartlarda $l > 15 l_c$) olduğunda sürekli, süreksiz ya da kısa fiber olarak ifade edilir [88].

Fiber Oryantasyonu ve Boy Etkisi

Fiberlerin boyları ve yapı içerisindeki dağılımları karışımlar kuralını etiler. Bu yüzden karışımlar kuralına fiberlerin boy ve yön etki faktörü ilave edilir. Karışımlar kuralı Eşitlik gibi düzenlenir.

$$E_c = \eta_0 \eta_l E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (4.38)$$

(4.38)'deki η_0 , fiberlerin yön faktör ve η_l , fiberlerin boy faktörünü ifade eder. Uzun fiberli kompozitlerde $\eta_l = 0,99$ (sürekli fiberlerde 1,0) alınabileceğini saptamışlardır.

Fiber oryantasyonu açısından iki olasılık mevcuttur; paralel yönlenme ve rastgele yönlenme. Sürekli fiberler genelde düzenli paralel şekilde konumlanırken, süreksiz fiberler yapı içerisinde gelişigüzel veya kısmi yönlenmiş olarak bulunur. Yapı üzerine gelecek olan yükleme de iki şekilde olabilir; fiberlerle eş yönlü yükleme ve fiberlere dik yükleme. η_0 , yön etki faktörünü fiberlerin yapı içerisindeki dağılımına ve yükleme (F) yönüne göre aşağıdaki gibi değerler alır [86]:

Sürekli fiber takviyeli kompozit malzemed, $F // \text{fiber} \rightarrow \eta_0 = 1$

Sürekli fiber takviyeli kompozit malzemed, $F \perp \text{fiber} \rightarrow \eta_0 = 0$

Düzlemsel gelişigüzel dağılımlı plakada, $\eta_0 = \frac{3}{8}$

Kalınlığı olan gelişigüzel dağılımlı plakada, $\eta_0 = \frac{1}{5}$

4.4 İmalat Gerilmeleri ve Isıl Genleşme Katsayıları

Kompozit bileşenlerinden fiber ve matrisler çok farklı karakterli malzemeler olduğu için farklı ısı genleşme katsayılarına sahiptirler. Bu nedenle üretim ve kullanım aşamasında fiber ve matris arayüzeyinde ısı ve imalat gerilmeleri oluşur. Bu gerilmeler matrsten

fibere doğru basma gerilmesi ya da fiberden matrise doğru çekme gerilmesi şeklinde olur. Basma gerilmeleri sorun oluşturmazken, fiberden matrise çekme gerilmesi durumunda fiber-matris arayüzeyinde ayrılmalar meydana gelir.

Eş yönü fiber takviyeli kompozit malzemelerde, fiberlere paralel yönde yüklemelerde ısı genleşme katsayısı, $\alpha_{//}$;

$$\alpha_{//} = \frac{E_f \alpha_f V_f + E_m \alpha_m (1 - V_f)}{E_f V_f + E_m (1 - V_f)} \quad (4.39)$$

(4.39) eşitliği kullanılarak fiberlere dik yöndeki ısı genleşme katsayısı, $\alpha_{\perp}$;

$$\alpha_{\perp} = (1 + \nu_m) \alpha_m (1 - V_f) + (1 + \nu_m) \alpha_f V_f - \alpha_{//} [v_f V_f + \nu_m (1 - V_f)] \quad (4.40)$$

olarak bulunur. α_f , fiberlerin ısı genleşme katsayısı ve α_m matris malzemesinin ısı genleşme katsayısıdır.

(4.39) ve (4.40) eşitlikleri kullanılarak, gelişigüzel fiber dağılımlı kompozit plakada ortalama ısı genleşme katsayısı, $\bar{\alpha}$;

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{2} (\alpha_{//} + \alpha_{\perp}) + \frac{\frac{1}{2} (E_{//} - E_{\perp})}{E_{//} + (1 + 2\nu_{//}) E_{\perp}} (\alpha_{//} - \alpha_{\perp}) \quad (4.41)$$

olarak hesaplanır [86].

4.5 Minimum Fiber Hacim Oranları

Fiberlere paralel yüklemelerde tüm fiberlerin aynı yükleme seviyesinde, aynı düzlemde ve aynı anda koptuğu varsayılır. Bu yaklaşım büyük ölçüde gerçekçi olması rağmen daha gerçekçi yaklaşımlar için çıkış noktası sağlar. Fiberlere paralel yöndeki elastiklik modülünün, $E_{//}$, belirlenmesinde gerilmeler eşit kabul edilir. İleri karbon/epoksi kompozitlerde Şekil 4. 10'dan da görüldüğü gibi fiberler yüksek dayanım ve düşük kopma uzaması, ε_f'' , kabiliyetine sahip ve matris daha düşük kopma uzamasına, ε_m'' , kabiliyetine sahiptirler. Yükleme durumunda önce fiberler kopar ve bütün yük matrise transfer olur. Kompozitin iki kırılma modu da fiber hacim oranının, V_f , değişimine göre tasarlanır. Yüksek V_f durumunda, fiberler koptuğunda, matris tüm yükü taşıyamaz ve fiberlerin ardından hemen kopar. Bu durumda kompozit malzemenin dayanımı;

$$\sigma_{||}'' = \sigma_f'' V_f + \sigma_m'' V_m \quad (4.42)$$

olur. (4.42)'te σ_f'' , fiberlerin kopma dayanımı ve σ_m'' , kompozit malzemenin koptuğu andaki matrisin tarafından taşınan yükü ifade eder (Şekil 4. 10). Düşük V_f olduğu durumda, yeterli matris malzemesi fiberlerin kopmasından sonraki tüm yükü taşır. Bu budumdaki kompozit malzemenin çekme dayanımı;

$$\sigma_{||}'' = \sigma_m'' V_m \quad (4.43)$$

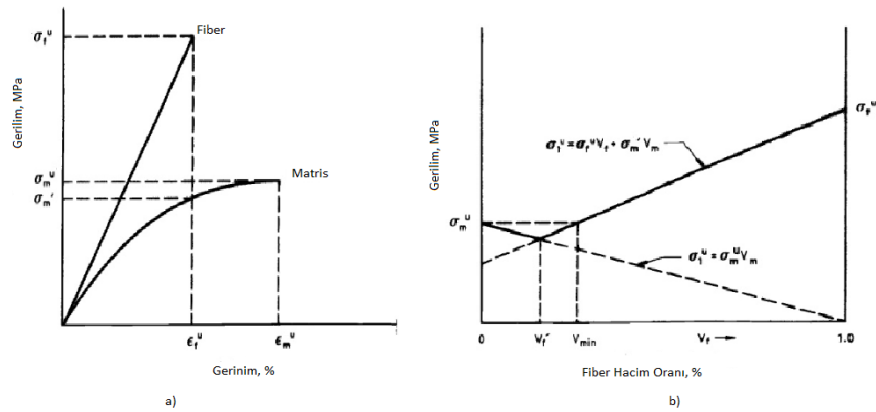
olarak ifade edilir. $\sigma_{||}''$, Şekil 4. 10b'de fiber hacim oranı, V_f 'nin bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Buradan V_f 'ye göre değişen kopma modu da ;

$$V_f = \frac{(\sigma_m'' - \sigma_m')}{(\sigma_f'' + \sigma_f' - \sigma_m')} \quad (4.44)$$

olur. Aynı zamanda fiber malzemenin hacim oranı minimum, V_{min} , olduğunda, kompozit malzemenin toplam çekme dayanımı, matrisin çekme dayanımının altında olur.

$$V_{min} = \frac{(\sigma_m'' - \sigma_m')}{(\sigma_f'' - \sigma_f')} \quad (4.45)$$

minimum fiber hacim oranı olarak bulunur.

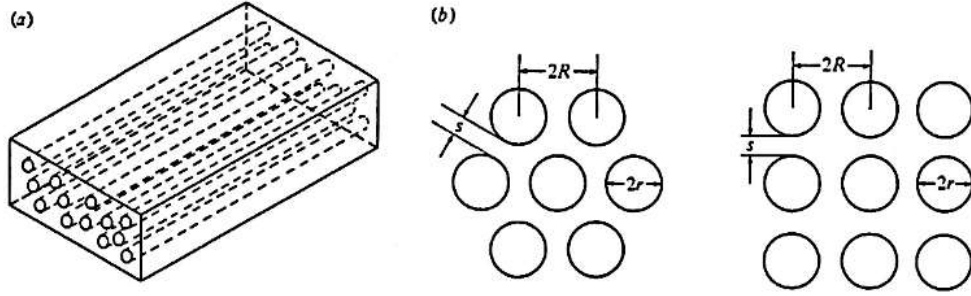


Şekil 4. 10 $\sigma_{||}''$ için $\epsilon_f'' < \epsilon_m''$ olduğunda karışımlar kuralı yaklaşımı.

Karbon fiber-epoksi matris için eş yönlü kompozit plakalarda yapılan çalışmalarda minimum fiber hacim oranı $V_{min} = 0,026$ olarak bulunmuştur [89].

4.6 Maksimum Fiber Hacim Oranları

Şekil 4. 11a'da gösterildiği gibi sürekli fiberlerin kesitine dik yönde bir inceleme yapıldığında, doğanın temel kurallarından biri olan temel dizilim prensibi ortaya çıkar. Fiberlerin ya altıgen ya da kare biçiminde dizilimleri Şekil 4. 11'de görülmektedir.



Şekil 4. 11 (a) Eş yönlü sürekli fiberli plaka kesiti, (b) Bu plakada fiberlerin altıgen ve kare dizilişleri.

2R fiber merkezleri arası uzaklık, 2r fiber çapı, s fiberler arası uzaklık olduğunda bu geometrik oranlar cinsinden, hacim oranları;

Altıgen :

$$V_f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad (4.46)$$

$$\text{Kare : } V_f = \frac{\pi}{4} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad (4.47)$$

Benzer şekilde fiberler arası uzaklık;

Altıgen:

$$s = 2 \cdot \left[\left(\frac{\pi}{2\sqrt{3}V} \right)^{1/2} - 1 \right] \cdot r \quad (4.48)$$

Kare:

$$s = 2 \cdot \left[\left(\frac{\pi}{4V} \right)^{1/2} - 1 \right] \cdot r \quad (4.49)$$

olur. Maksimum fiber hacim hacim oranı sağlamak için fiberler arası uzaklığın, fiber yarıçapına eşit (r=R) olması gerekmektedir. Bu durumda maksimum hacim oranı;

$$\text{Altıgen : } V_f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0,907 \quad (4.50)$$

$$\text{Kare : } V_f = \frac{\pi}{4} = 0,786 \quad (4.51)$$

(4.50) ve (4.51) eşitlikleri sonucunda altıgen diziliimli kompozit yapılarda maksimum hacim oranı %90,7 ve kare diziliimli kompozit yapılarda maksimum fiber hacim oranı %78,6 olarak bulunur [89].

TERMOSET MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Kompozit uygulamalarının %75'ini termoset matrisli kompozit malzemeler oluşturmaktadır. Termoset matrisli kompozit malzemeler ağırlıklı olarak havacılık endüstrisi, otomotiv, marine, bot, spor gereçleri ve yapısal uygulamalarda kullanılırlar. Termoset matrisli kompozit malzemelerin üretilmesi için birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemler çeşitli ihtiyaçlara cevap vermek amacıyla geliştirilmişlerdir.

Her üretim yönteminin malzemenin son şekli üzerinde fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirebilecek etkileri mevcuttur. Bu yüzden malzemeye göre üretim methodu seçimi üretilen parçanın nihai özellikleri ve daha sonra uygulanacak işlemler açısından önemlidir. Örneğin kompozit malzemelerin şekillendirilmesinde fiberlerin kesilerek süreksizlik yaratmasından kaçınmak için talaşlı yöntemlerden tercih edilmez. Bu yüzden de kompozit parçaların üretiminde yakın parça şekli (near-net-shape) amaçlanır. Near-net-shape parça üretiminin iki önemli yararı vardır. Bunlardan ilki talaşlı işlem gerekliliğini minimize ederek üretim maliyetlerini düşürür. Diğer faydası hurda miktarını azaltarak malzeme tüketimini azaltır [26].

Kompozit malzemelerin üretimi diğer malzeme gruplarına göre daha kolaydır. Kompozitler metaller gibi yüksek sıcaklık ve yüksek basınçlara gerek duyulmaksızın, çok düşük maliyetli kalıplama yöntemleri ile üretilirler. Örneğin bot gövdesini oda sıcaklığında ve düşük bir basınç uygulaması ile üretmek mümkündür. Kompozit malzemelerin düşük bir enerji ile son parça şekline yakın üretimi metal malzemeler ile kıyaslandığında yeni fırsatlar sunmaktadır [26].

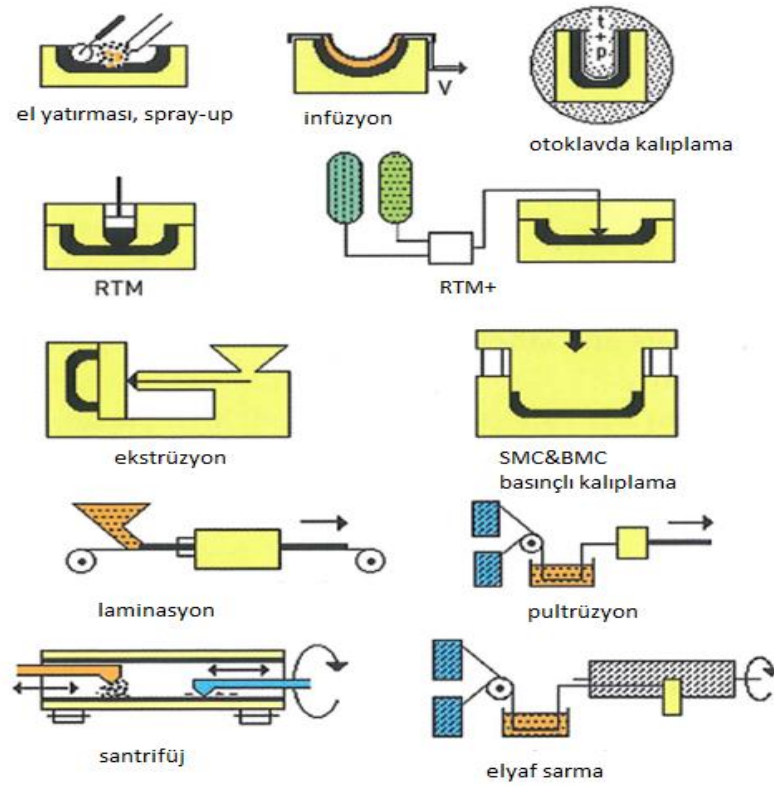
Diğer malzeme gruplarında da olduğu gibi, kompozit malzemelerde de kullanılan hammadde gereksinimleri, üretim hızı, parça boyutu, parça şekli ve maliyet gibi kriterler üretim yöntemini belirler [26].

Termoset matrisli kompozit malzemelerin üretimi, matris malzemesinin sıvı fazda olması dolayısıyla termoplastik matrisli malzemelerin üretimine göre daha kolaydır. Termoset reçineler fiber malzemeleri kolayca ıslatarak yapıda boşluk ve porozite hatalarını en aza indirirler. Termoplastiklere göre daha düşük ısı ve basınç gerektirdiklerinden enerji tasarrufu sağlarlar. Bununla birlikte termoset matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan kalıp malzemeleri basit ve düşük maliyetlidir. Termoset matrisli kompozit malzemelerin bu üretim avantajlarının yanı sıra uzun kürleme süreleri dolayısıyla düşük üretim hızı, ikinci kez şekillendirilememe ve geri dönüşümlerinin mümkün olmayışı gibi dezavantajları da vardır [26].

Kompozit malzemelerin üretiminde ıslatma/emdirme, yatırma, sağlamlaştırma ve katılaşma olmak üzere dört ana adım mevcuttur. Farklı yollardan da olsa her kompozit üretim yönteminde bu adımlar mevcuttur. Kompozit malzemelerin üretiminde fiber malzemelerin matris ile tam olarak ıslatılması ve matrisin reçineye emdirilmesi istenir ve üst üste yatırma yöntemi ile üretilen malzemenin kalınlığı artırılır. Fiber ve matris malzemesinin arasında iyi bir ara yüzey oluşturmak ve gerekli bağlanmayı sağlamak üretilen parçanın nihai performansı üzerinde direkt etkilidir. Bunu için basınç gibi dışarıdan bir kuvvet uygulamak gerekebilir. Katılaşma adımı ise matris malzemesinin çeşidine göre değişim gösterir. Termoplastik matrisler saniyeler ile ölçülebilecek bir hızla katılaşabilirken, termoset matrisler uzun kürleme süreleri ile düşük üretim hızına sahiptirler. Termoset matrisli kompozitlerde katılaşma oranı reçinenin formülasyonu ve kürleme kinetiğine bağlı olarak değişir. Termoset reçineler yüksek sıcaklıklarda daha hızlı bir çapraz bağlanma göstererek daha hızlı katılaşırlar [26], [90], [91].

Termoset matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri:

- El Yatırması Yöntemi (Hand Lay-up)
- Püskürtme Yöntemi (Spray-up)
- Sıcak ve Soğuk Kalıplama
- RTM- Resin Transfer Molding
- BMC (Bulk Molding Compound)
- SMC (Sheet Molding Compounda)
- Structural Reaction Injection Molding (SRIM) Process
- Sürekli Profil Çekme (Pultrüzyon)
- Elyaf Sarma Yöntemi
- Santrifüj Döküm
- Enjeksiyonla Kalıplama Yöntemi

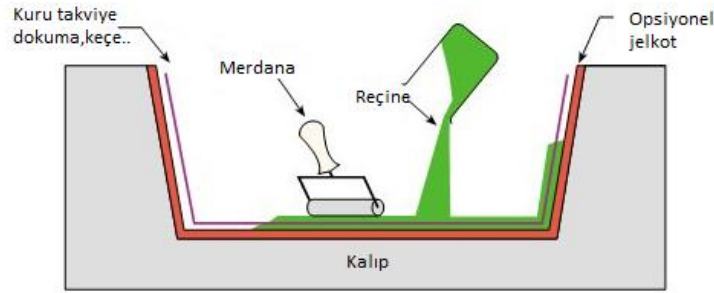


Şekil 5.1 Termoset kompozitler için standart proses teknikleri [38].

5.

5.1 El Yatırması Yöntemi (Hand Lay up)

El yatırması büyük ve geniş yüzeyli parçaların üretiminde kullanılan geleneksel bir yöntemdir. El yatırması wet lay up ve prepreg lay up olarak ikiye ayrılabilir. Wet lay up prosesine vakum bag ya da otoklav prosesi de denilmektedir. El yatırması yöntemi Şekil 5.2’de şematik olarak gösterilmektedir [26]. Şekil 5. 3’te ise el yatırması yöntemi ile üretilmekte olan tekne görülmektedir.



Şekil 5. 2 Geleneksel el yatırması yöntemi şematik gösterimi.

El yatırması işlemlerinde kalıp yüzeyi işlemiden önce temizlenir. Release ajanı olarak wax kullanılır. Daha sonra parçada yüzey kalitesi sağlamak amacı ile jelkot uygulanır. Jelleşme tamamlandıktan sonra takviye elemanı reçine kalıp üzerine yatırılır [28].

Jelkot genelde 250g/m^2 için 0,3-0,4 mm kalınlığındadır. Jelleşme 15-20 dakika sürebilir. Agrasif korozif alanlarda kullanılacak parçalar için jelkot kalınlığı 2 mm’ye çıkarken, jelleşme süresi de 1-2 saat zaman alır. Jelkot 2 amaç için uygulanır. Birincisi parçayı nemden ve diğer çevreden etkenlerden korumak, kimyasal dayanım ve bakteri barındırmamasını sağlamaktır. Diğer amaç ise parçanın renklendirilmesidir. Jelkot renk pigmentlerini taşıyıcı aynı zamanda parçayı ultraviyole (UV) ışınlarından korur[28].



Şekil 5. 3 El yatırması yöntemi üretilmekte olan tekne örnekleri.

Kalıplanmış parçanın kürlenme zamanı kullanılan reçine ve parça kalınlığına göre değişebilir. Genelde jelleşme 30dk-1 saat, ön kürlenme 3-4 saat, kürlenme ise 6-8 saat sürer. Polimerizasyonun tamamlandığına dair herhangi bir kaynak bulunmamaktadır. Parçanın %90'ının kürlenmesi için 100-200 saat geçebilir ve %100 kürlenme aylar alabilir. Kürlenme zamanının kısaltılması için ısı kullanılabilir. Ancak bu sıcaklığın reçine cinsine göre 40-60°C'yi geçmemesine dikkat edilmelidir [28].

5.1.1 Prepreg Lay-up

El yatırması yönteminde prepregler açık kalıp içine istenilen oryantasyonda ve fiber oranında yatırılarak üzerine reçine uygulaması işlemlerini kapsar. Bu işlemlerden sonra malzeme vakum torbası içine alınarak vakum uygulanabilir ve ardından fırında kürlenebilir.



Şekil 5. 4 Preperg lay up uygulaması.

Genel uygulamaları: el yatırması yöntemi yaygın olarak havacılık endüstrisinin yanı sıra prototip araçların yapında kullanılır. Kanat yapıları, yat parçaları, spor gereçleri bu yöntem ile üretilir.

Hammaddeler: Grafit/epoksi prepregler bu yöntemde yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Cam/epoksi ve kevlar/epoksi de kullanılan hammaddeler arasındadır ancak karbon/epoksiler daha çok tercih edilir. Çünkü karbon/epoksi malzemeler diğer malzemelere göre daha mukavim ve daha hafif olduğundan kitle tasarrufu sağlarlar. Epoksi dışındaki poliimid, polisiyanat, BMI, polyester gibi diğer reçineler de kullanılabilir.

Araç gereksinimleri: El yatırması için kullanılan açık kalıplar ve prototipler metal, ahşap, kompozit ve plastik malzemeden yapılmış olabilir. Kürleme yapılacak kompozitler için seçilecek kalıp malzemesi kürleme sıcaklığına dayanıklı olmalıdır.

Parça yapımı:Öncelikle el yatırmasında kullanılacak olan takviye elemanları bilgisayar kontrollü ya da uygun kesiciler kullanılarak kesilerek hazırlanır. Açık kalıp üzerine parçanın kalıptan daha kolay çıkması için kalıp ayırıcı sürülür. Preperg lay up yönteminde prepregler tasarımda belirlenen oryantasyon ve sıra ile kalıba yatırılır. Her katta lamineler arasında hapsolmuş havanın çıkması sağlanır ve reçine takviye elemanlarına iyice emdirilir.

Basit işlem adımları;

- Prepreg soğutucudan çıkarılıp işleme hazırlanması amacıyla çözünmesi sağlanır.
- Prepreg kesme tezgahında arzulanan boyut ve oryantasyonda kesilir,
- Kalıp temizlenir ve ardından realese film uygulanır. Realese film hapsolmuş havanın, reçine fazlasının ve açığa çıkan uçucuların parça dışarı çıkmasını sağlar.
- Prepreg üzerinde bulunan yüzey kağıtları çıkarılır. Prepregler istenilen yönlerde ve istenilen miktarda kalıp üzerine yerleştirilir.
- Ardından basınç uygulanır.

Prepreg Lay Up Prosesinin avantajları:

Yüksek fiber hacim oranı elde edilebilir. Prepregler %60'tan fazla fiber içermektedirler.

Kompleks parçalar bu yolla kolayca üretilebilir. Prototip üretimi için oldukça uygundur. Araç-gereç maliyetleri düşüktür ancak otoklav kurulumu için yüksek yatırım maliyeti gerekmektedir.

Oldukça sağlam ve sert parçaların fabrikasyonu bu prosesle yapılabilir [38].

5.1.2 Wet Lay-up

Bu proseste sıvı haldeki reçine kalıba uygulanır ve daha sonra üstüne takviye yerleştirilerek reçine takviye malzemeye emdirilir. Uygun kalınlık elde edilene kadar reçine takviye üst üste koyularak işleme devam edilir. Küçük bir sermaye yatırımı ve işçilik gerektirir. Açık kalıpta uygulandığından stiren emisyonu açısından endişeler vardır.

Genel uygulamaları: Bu proses daha çok bot yapımı, rüzgar türbini kanatları, depolama tankları yapımında kullanılır. Küçük sermaye yatırımı dolayısıyla prototip parçaların yapımı için uygundur.

Hammaddeler: Cam dokumalar, kevlar, karbon fiber takviye elemanı olarak kullanılır ancak cam fiberler daha yaygındır. Epoksi, polyester ve vinilester reçineler matris malzemesi olarak kullanılır. Polyester reçineler bot yapımında ve diğer ticari uygulamalarda daha çok tercih edilir.

Araç gereksinimleri: Bu yöntem için çoğunlukla oda sıcaklığında kürleme eterli olduğundan basit CTP ya da ahşap kalıplar kullanılır. Genelde tek parçalı kalıplar kullanılır ancak hem erkek hem de dişi kalıpların kullanıldığı uygulamalar da vardır.

Parça yapımı: Bir seri takviye elemanı ve reçine uygulanarak istenilen kalınlıkta parçalar elde edilir. Bir merdane yardımı ile reçine emdirilir ve uniform parça kalınlığı elde edilir aynı zamanda takviye malzemesi homojen olarak ıslatılır. Parça genelde oda sıcaklığında kürlenir ve katılaştıktan sonra kalıptan alınır. Kürleme zamanı reçine tipi ve parça boyutları ile belirlenir.

Sıcaklık ve basınç uygulama methodları: İşlem genelde oda koşullarında gerçekleşir. Reçinenin kimyasına bağlı olarak bir gün boyunca kürlemeye bırakılabilir. Kür zamanı sıcak hava üflenmesi ile kısaltılabilir. Basınç ise basit el merdaneleri ile uygulanır. İyi bir

birleşme sağlamak için vakum bag uygulanabilir. Bazı durumlarda parçanın performansını arttırmak için post-kür işlemi uygulanabilir.

Basit proses adımları :

- Kalıba bir release ajanı uygulanır
- İyi bir yüzey kalitesi elde etmek için jelkot uygulanır. Jelkot reçine uygulanmadan katılır.
- Takviye tabakası kalıp yüzeyine yatırılır ve ardından reçine emdirilir.
- Bir merdane kullanılarak reçine yüzeye uniform olarak dağıtılır.
- Yeterli kalınlığı elde etmek için takviye+reçine uygulaması tekrar edilir.
- Sandwich, balsa, köpük, honeycomb uygulaması durumlarında yüzey tabakaları ile yapışma sağlanır.
- Parça oda koşullarında da yüksek sıcaklıklarda kürlenebilir [38].

5.2 Vakum Torbalama Yöntemi (Vacuum Bagging) :

Vakum bag, wet lay up ya da prepreg lay up yöntemleri ile kalıp üzerine yatırılmış malzemelerin kürlleme işlemleri için gerekli basıncı karşılamak amacıyla uygulanır. İşlem yatırılarak üretilmekte olan malzemenin bir vakum torbası içerisine alınarak vakum uygulanmasını kapsar. Basınç uygulamasıyla matris ile takviye elemanları arasındaki bağlanma sağlanır, gözenekler ve uçucular giderilir. Vakum bag uygulanmış kalıp yüksek sıcaklık uygulaması için otoklav içerisine alınabilir.

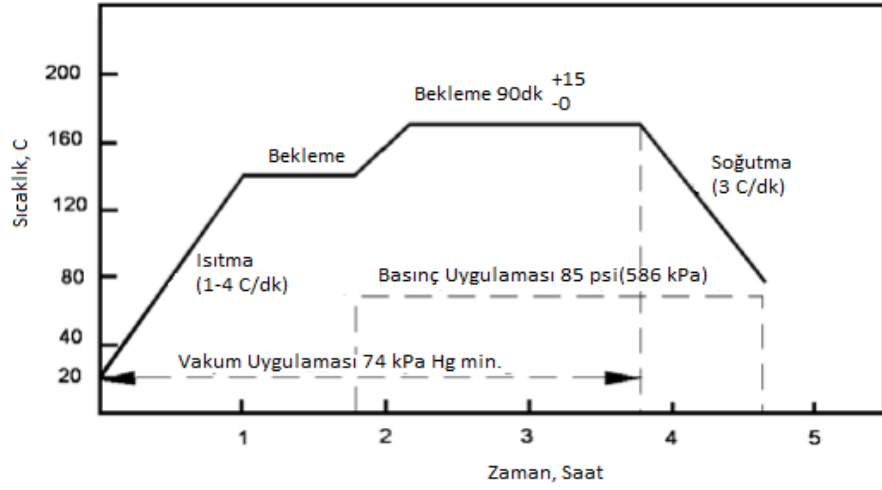


Şekil 5. 5 a) Vakum bag yönteminin şematik gösterimi. b) vakum bag uygulanmış el yatırması prosesi.

Vakum bag uygulamalarında;

- Barrier film uygulanır. Bu release filme benzer ancak yapısı gözenekli veya delikli değildir.
- Breater layer ile hazırlanan parçanın üzeri örtülür. Breaterın havalandırma fonksiyonu vardır. Bunun yanı sıra uçucuların dışarı çıkmasını ve basıncın eşit olarak dağıtılmasını sağlar.
- Son olarak da vakum bag hazırlanan parça üzerine örtülür. Vakum bag poliamid ya da elastomer malzemeden imal edilmiş olabilir. Bu film parça üzerine örtüldükten sonra çift taraflı bir bant yardımıyla tezgah üzerine yapıştırılır. Bir vakum pompası vakum bage bağlanır ve vakum uygulanır.
- Isı ile kürleme gerektiren parçaların üretiminde kalıplanmış parça kürleme için fırında yerleştirilir.
- Termokupul ve vakum hortumlarının bağlantıları sağlandıktan sonra otoklavın kapağı kapatılır.
- Belirli bir kür çevrimi ile parçanın kürlenmesi bilgisayar kontrollü sağlanır.
- Parça kürlendikten sonra parça soğutulur ve vakum bag çıkarılır [26].

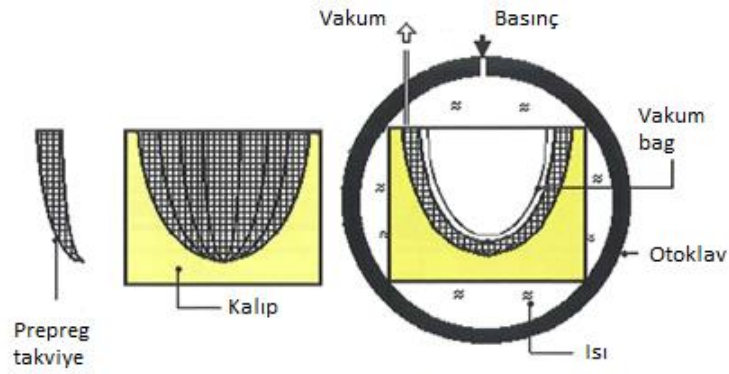
Isı ve basınç uygulamam metodu: laminasyon ve bagging işleminden sonra kalıp kürleme işlemi için otoklava yerleştirilir. Otoklav basınçlı kaplara benzerdir, istenilen sıcaklık ve basınç otoklav içerisinde korunabilir. Tipik kür çevrimi Şekil 5. 6'da görülmektedir. Kür çevrimi reçine malzemesi, parça kalınlığına ve geometrisine bağlıdır.



Şekil 5. 6 Otoklav prosesi için tipik kürleme döngüsü.

Kürleme için gerekli olan basınç iki şekilde oluşturulur: Bunlardan ilki vakum torbası gibi otoklav içinde dış basınç kullanarak. Vakum torbası malzeme içinde bir vakum oluşturarak katılaşmaya yardımcı olur. Vakum torbası içerisinde vakum oluşturmak için bir vakum pompasından yararlanılır.

İkincil olarak vakum otoklav (Şekil 5. 7) içerisine dış basınçlı hava veya azot gazı enjekte edilerek oluşturulur. Yüksek sıcaklıklarda yangından kaçınmak için azot gazı tercih edilir. Böylece dış basınç torba dışında ve vakum torba içerisinde etkili basınç oluşturur ve laminatlar arasında bağlanma sağlanır.



Şekil 5. 7 Otoklav prosesinin şematik görünümü.

Kürleme işlemi için gerekli olan ısı, sıcak hava ve azottan elde edilir. Basınçlı gaz otoklav içerisine ısıtılmış gelir ve sıcaklık artışı sağlanır. Sıcaklık sağlamak amacıyla fişek ısıtıcılar yerleştirilebilir. Otoklav içindeki sıcaklık ve basınç bilgisayar kontrollü ekipman

tarafından kontrol edilir. Örnek bir otoklav resmi Şekil 5.8’de gösterilmektedir [26], [90].



Şekil 5. 8 Otoklav.

5.3 SCRIMP (Seeman Composites Resin Infusion Molding Process)

SCRIMP teknolojisi Seeman Composite ve HardCore Composite şirketinin patentli üretim yöntemini temsil etmektedir. SCRIMP genelde orta ve büyük boyutlu parçaların üretiminde kullanılır. Bu proses VARTM yöntemine ile benzemektedir [26],[28], [92].

Hammaddeler:

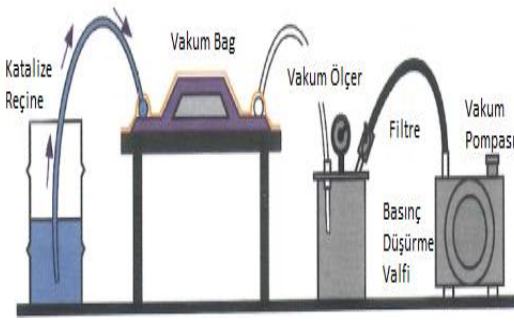
*Takviye elemanı:*cam mat ve dokuma, karbon olabilir. Takviye miktarı %20-40 olabilir.

Matris malzemesi : genelde polyester reçineler reçineler kullanılır,vinilester, epoksive fenolik reçineler de kullanılır.

*Dolgu:*ahşap, köpük, honeycomb malzemeler kullanılabilir [28].

Prosesin prensipleri:

İnfüzyon reçine yönteminde vakum torbası içine alınmış takviye elemanına düşük basınçla reçine infüze edilir. Vakum torbası esnek hava geçirmez bir filmidir ve kalıp üzerine örtülüdür. Reçine oldukça akıcı, düşük viskoziteli (500-1000 cps) olmalıdır. Vakum, reçine beslenen tarafın karşısından uygulanır. Emiş ile parça geometrisine bağlı olarak takviye boyunca reçineyi homojen olarak dağıtır. Kalıba, parça geometrisine bağlı olarak paralel, dik, balıksırtı ve eğik olarak beslenme kanalları yerleştirilebilir [28], [92], [93], [94].



a)



b)

Şekil 5. 9 a) SCRIMP prosesinin şematik gösterimi. b) SCRIMP prosesinin uygulanışı.

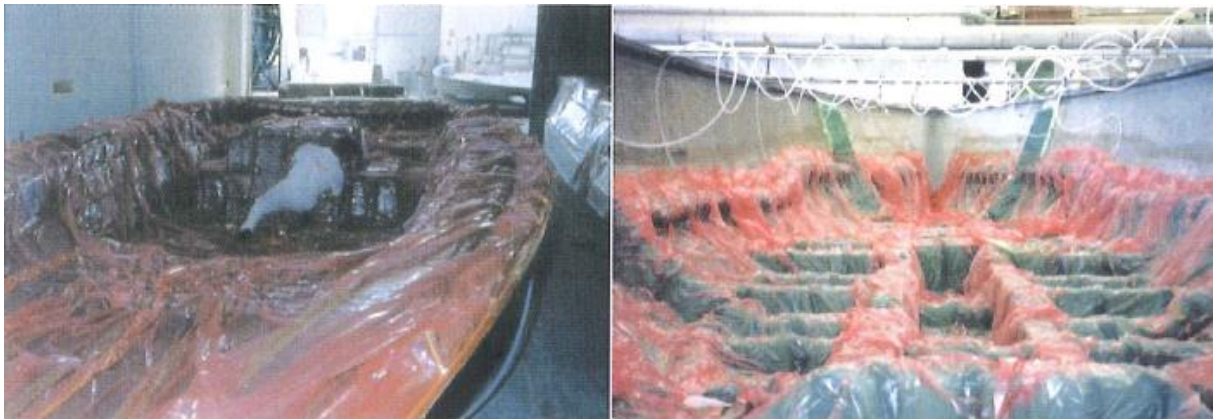
Uygulamaları: SCRIMP proses için marina yerleştirme çamurlukları, rüzgar türbini kanatları, çanak antenler, hızlı trenler, otobüs, araba parçaları, fizik tedavi havuzları, havacılık uygulamalarında kullanım alanı bulmaktadır.

Avantajları: Kapalı kalıplama olduğu için stiren emüsyonu wet lay up prosesine göre daha azdır. Ayrıca kuru yatırma ve dolgu malzemesi kullanımı ile işçilikten ve zamandan tasarruf edilir. SCRIMP geniş parçaların üretimine olanak tanır.

Dezavantajları: Sistem tam otomatik olmadığından uzun hazırlama ve işlem süresi gerektirir (buna rağmen operasyon süresi el yatırmasından %30 daha kısadır). Eğer sistem tam olarak hava geçirmez değilse vakum kaybı söz konusudur. Bu da parçanın hasarlı çıkmasına neden olur. Ağır parçalar için %20 daha sarf malzemesi kullanılır.

Üretim ekipmanları: Kalıp, vakum torbası ve vakum pompası[28].

Bu yöntemin bot üretimine dair örnekler Şekil 5. 10'da görülmektedir.



Şekil 5. 10 SCRIMP prosesinin bot üretiminde uygulamalarına dair örnekler [38].

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

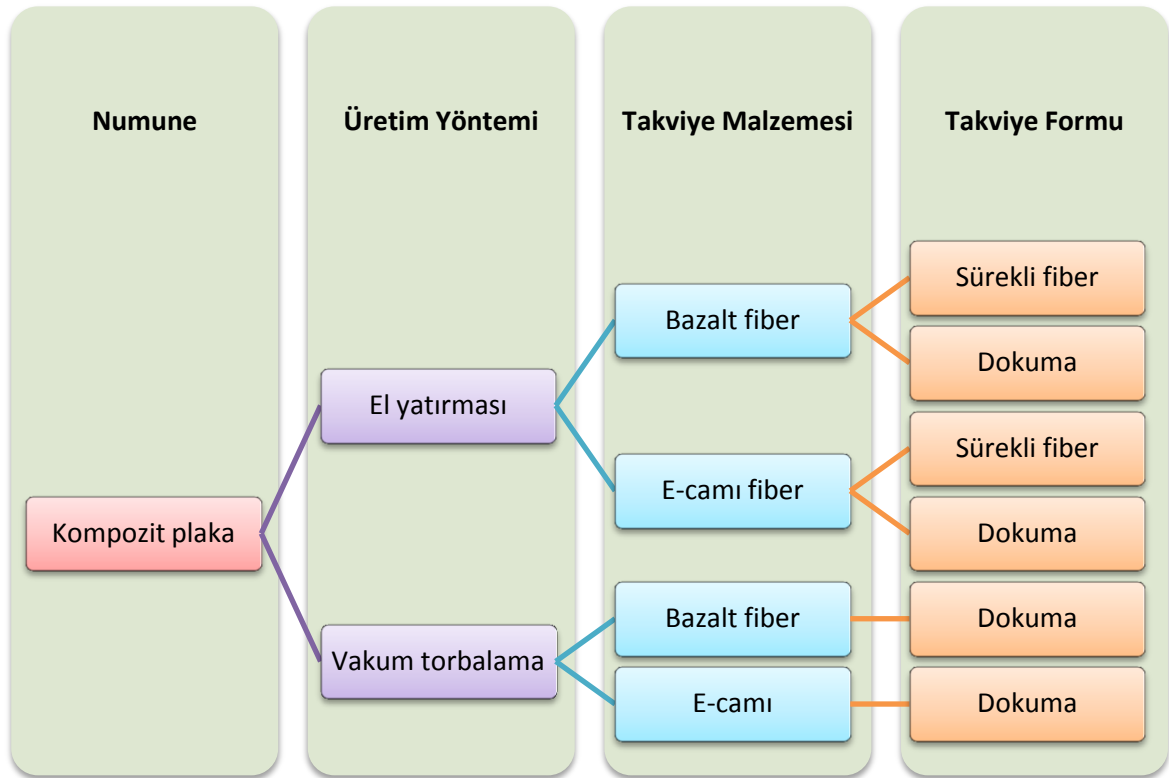
Termoset matrisli bazalt fiber ve E-camı fiber takviyeli kompozit malzemelerin karakterizasyonu çalışmasında bazalt fiberli kompozitler ile E-camı fiberli kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Öncelikle karşılaştırma yapabilmek için deney grupları oluşturulmuştur. Kullanım alanı, özellikler ve maliyet gibi kriterler değerlendirilerek iki farklı üretim yöntemi seçilmiş ve üretim yöntemlerinin ürün üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kompozit üretmek için endüstride yaygın olarak bulunan, yüksek özellikli matris ve fiber malzemeler seçilmiştir. Belirlenen üretim yöntemleri kullanılarak ticari pazardan temin edilen fiber ve matris malzemeleri ile kompozit plakalar hazırlanmıştır. Üretilen kompozit malzemelerin karakteristiği gereğince özelliklerin belirlenmesi için en uygun mekanik ve fiziksel test yöntemleri seçilmiş ve bu testleri destekleyen standartlara uygun olarak kompozit numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan kompozit numuneler mekanik ve fiziksel testlere tabi tutularak, elde edilen sonuçlarla hedeflenen kıyaslamalar yapılmıştır.

6.

6.1 Deney Grupları

Bazalt fiber takviye malzemelerinin E-camı fiberler yerine kullanılıp kullanılamayacağı bu projenin esas amacı olduğundan birincil değişken fiber malzemeleridir. İlk aşamada matris malzemesi sabit tutulup 2 çeşit sürekli bazalt fiber ve 2 çeşit sürekli E-camı fiber takviyeli, termoset reçine matrisli kompozit plakalar üretilmiştir. Daha sonra dokuma

formundaki elyaf malzemeler termoset reçineye takviye edilerek elyaf formunun kompozit malzemenin özelliklerine ne şekilde etki ettiği incelenmiştir.



Şekil 6.1 Deney gruplarının oluşturulması.

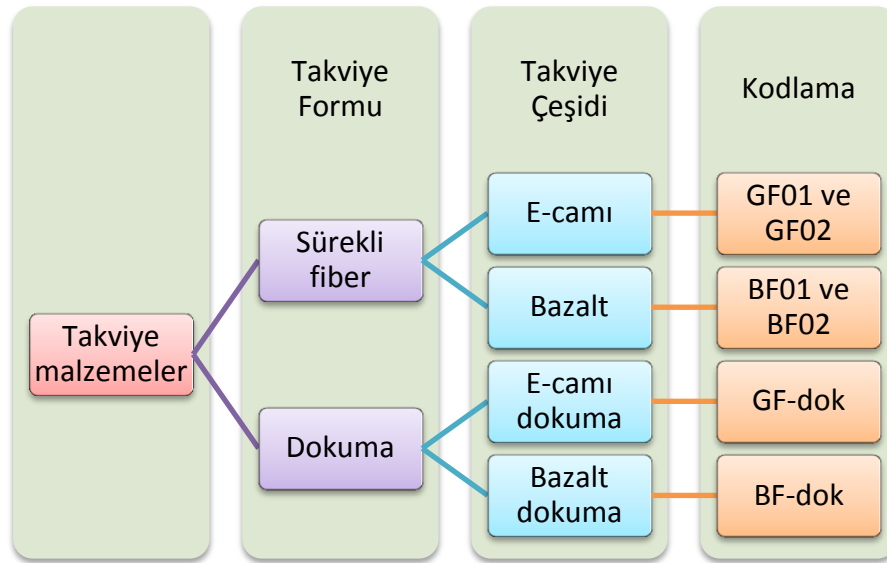
İkincil olarak üretim yöntemin etkisini incelenmiştir. El yatırması ve vakum torbalama yöntemleri ile kompozit plakalar üretilmiş ve dayanım, hacim oranı ve yoğunluk artışları izlenmiştir. Deney grupları Şekil 6.1’de şematik olarak gösterilmektedir.

Gösteriliş olarak E, el yatırması; VB, vakum bagging yöntemini simgelemektedir. Daha sonra kullanılan örneğin 4k, 4 katlı, sürekli fiber için S, dokuma için dok. gösterimi seçilmiştir. Son olarak GF, cam fiberi; BF ise bazalt fiberi simgeleyecek şekilde bir gösteriliş yöntemi oluşturulmuştur.

6.2 Takviye Malzemeleri

Çalışmada sürekli fiber ile düz dokuma bazalt ve cam elyaf malzemeler kullanılmıştır. Özellikleri aynı sadece bir demetindeki filament sayısı farklı olan 2 çeşit sürekli e-camı fiber ve filament çapları birbirinden farklı olan iki çeşit sürekli bazalt fiber kullanılmıştır.

Kullanılan elyaf malzemeler, termoset reçine ile iyi bir arayüzey oluşturabilmesi için termoset reçineye uyumlu silan kaplı olarak seçilmiştir.



Şekil 6. 2 Takviye malzemesine göre deney grupları.

Çalışmada kullanılan elyaf malzemeler Şekil 6.2'deki gibi gruplanarak karakterizasyon deneylerine tabi tutulmuştur. Genel olarak ticari pazardan demet halindeki fiberler ve düz dokuma elyaflar temin edilerek kullanılmıştır. E-camı fiberler CAM ELYAF A.Ş. ve bazalt fiberler INCOTELOGY LTD. ŞTİ.'nden satın alınmıştır. Şekil 6.3'te kullanılan bazalt ve E-camı formları resim olarak verilmiştir.



a) Sürekli bazalt



b) Sürekli E-camı fiber



c) Bazalt düz dokuma



d) E-camı düz dokuma

Şekil 6.3 Kullanılan sürekli fiber ve dokuma elyaflar takviyeler. a) sürekli bazalt fiber, b) sürekli E-camı fiber, c) bazalt düz dokuma ve d) E-camı düz dokuma.

Düz dokuma bazalt ve düz dokuma cam elyaflardan tek bir elyaf çeşidi için denemeler yapılırken, E-camı ve bazalt demetlerden 2'şer çeşit kullanılmıştır. Bazalt fiber demetlerden 7 μm filament çapına sahip olan BF01 ve 14 μm filament çapına sahip olan elyaf BF02 olarak kodlanmıştır. E-camı fiberler de teks sayılarına göre farklılık göstermektedir. Kullanılan iki çeşit sürekli bazalt fiber de 1200 teks iken E-camı fiberlerden BF01 olarak kodlanan 1200 teks ve BF02 olarak kodlanan ticari malzeme 2200 tekstir. Elyaf malzeme özellikleri ve kodlamaları Çizelge6.1'de verilmektedir [52], [68].

Çizelge 6. 1 Sürekli fiberlerin fiziksel özellikleri.

Takviye	Kodlama	Teks	Filament çapı (μm)	Apres (sizing)
Sürekli E-camı Fiber	GF01	1200	12	Silan
	GF02	2400	12	Silan
Sürekli Bazalt Fiber	BF01	1200	14	Silan
	BF02	1200	7	Silan

Dokuma tipindeki elyaflardan bazalt düz dokuma ve E-camı düz dokuma elyaf malzemeler kullanılmıştır. Karşılaştırma bakımında birbirine yakın fiziksel özellikteki E-camı ve bazalt dokumalar tercih edilmiştir. Kullanılan dokumaların fiziksel özellikleri Çizelge6.2'de verilmiştir [57].

Çizelge 6. 2 Dokuma takviyelerin fiziksel özellikleri.

Takviye	Dokuma Şekli	Ağırlık (g/m ²)	Apri (sizing)	Filament Çapı (µm)	Nem Miktarı (%)	Atkı (10 cm)	Çözü (10 cm)
E-camı dokuma	Düz	500	silan	17	0,15	19	22
Bazalt dokuma	Düz	500	silan	10	< 0.1	20	25

Takviye malzemelerin mekanik özellikleri ise Çizelge 6.3 ve kimyasal özellikleri çizelge 6.4'teki gibidir [57].

Çizelge 6. 3 Fiber malzemelerin mekanik özellikleri.

Mekanik ve termal özellikler	Birim	Bazalt fiber	E-camı fiber
Çekme dayanımı (ASTM D2101)	MPa	4000-4300	3450-3800
Elastiklik Modülü (ASTM D2101)	GPa	84-86	72-76
Uygulama sıcaklığı	°C	-260 ile +560	-60 ile +460

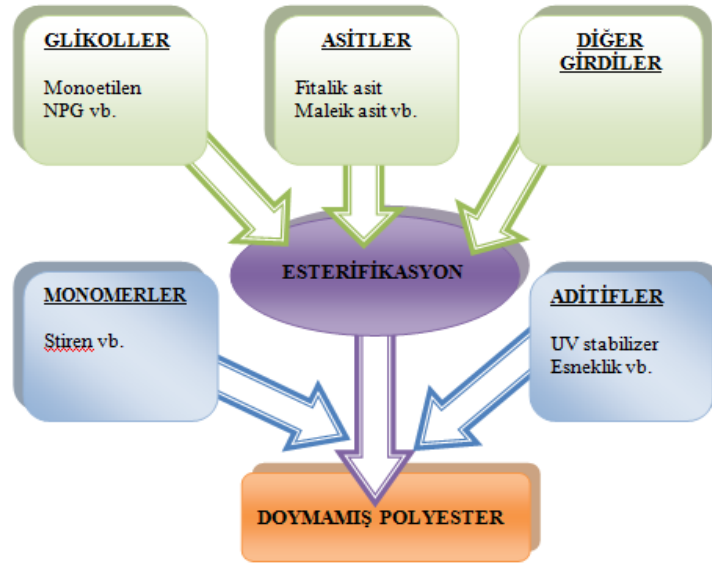
Çizelge 6. 4 Fiber malzemelerin kimyasal özellikleri.

Kimyasal Özellikler	Bazalt Fiber	A- Cam Fiber	E-camı Fiber
Doymuş alkali çözeltide 3 saat kaynatılmış fiberdeki kütle kaybı, %	0,35	0,15	4,5
1 N HCl çözeltisinde 3 saat kaynatılmış fiberdeki kütle kaybı, %	7,1	-	38,5

6.3 Matris Malzemesi

Deneysel çalışmada kullanılmak üzere matris malzemesi olarak doymamış polyester reçine seçilmiştir. Bu polyester reçine termoset karakterli bir polimer olup oda koşullarında sıvı halde bulunmaktadır.

Termoset karakterli reçineler glikol ve asitlerin reaksiyonu sonucunda oluşurlar. Polyesteri oluşturan bu komponentlerin oranları, farklı asit ve glikollerin (NPG, vs.) kullanılması ve farklı ilaveler ile modifiye edilmesi sonucunda polyester çok değişik özelliklere ve uygulama alanlarına sahip bir ürün halini alır. Doymamış polyester reçinelerin oluşumu ve ilave malzemeler Şekil 6.4'te şematik olarak gösterilmiştir [95].



Şekil 6. 4 Doymamış polyesterlerin oluşumu.

Polyester reçineler içerdikleri asit çeşidine göre isimlendirilirler. Bu asit bileşeni polyester reçinenin nihai özellikleri üzerinde etkilidir. Çalışmada kullanılmak üzere seçilen polyester reçine izoftalik asit içeren doymamış polyester reçinedir. Genel amaçlı uygulamalarda kullanılan ortohtalik reçinelere göre göreceli olarak daha yüksek mekanik dayanım ve korozyon direncine sahiptir.

Çalışmada kullanılan izoftalik polyester reçine POLİYA firmasından temin edilmiş olup, ticari kodu POLİPOL 3872'dir. Polipol 3872, izoftalik esaslı, orta–yüksek reaktivitede doymamış polyester reçinedir. Ortohtalik polyester reçinelerin korozyon dayanımı, aşınma dayanımı ve mekanik dayanım açısından yetersiz kaldığı durumlarda kullanılır. Ayrıca çok iyi mekanik dayanımı ve termal dayanımı özellikleri ile otomotiv sektöründe, tekne imalatında, modüler kabin imalatı vb. uygulamalarda kullanılabilir. El yatırması, elyaf sarma yöntemleri için uygundur. Hızlandırıcı içermez, kütleme işlemi için kobalt ve peroksit ilavesi yapılır. Polipol 3872 reçinenin kimyasal içeriği Çizelge 6.5'de verilmiştir [95].

Çizelge 6. 5 Polipol 3872 reçinenin kimyasal içeriği.

Reçine	Reçine	Bileşen	Monomer
Polipol 3872	Polyester	İsoftalik asit	39%

Polipol 3872 termoset reçinenin ilgili standartlarla belirlenmiş bazı fiziksel özellikleri Çizelge 6.6’de verilmiştir [95].

Çizelge 6. 6 Polipol 3872 reçinenin fiziksel özellikleri.

Test	Metod	Değer
Yük altında eğilme sıcaklığı	ISO 0075-A	79 °C
	ISO 0075-B	93 °C
Su absorpsiyonu	ISO 0062	0,19%
Barcol sertliği	ASTM-D2583	44
Hacimsel çekme	ISO 2114	-

Polyester reçinenin kürlenmesini sağlamak amacıyla başlatıcı olarak kobalt oktoat, hızlandırıcı olarak da %2’lik MEK peroksit ilave edilir. Kürlenmiş ve post-kür uygulanmış izoftalik reçinenin teorik mekanik özellikleri Çizelge 6.7’de verilmektedir [95].

Çizelge 6. 7 Post-kür uygulanmış Polipol 3278 reçinenin mekanik özellikleri.

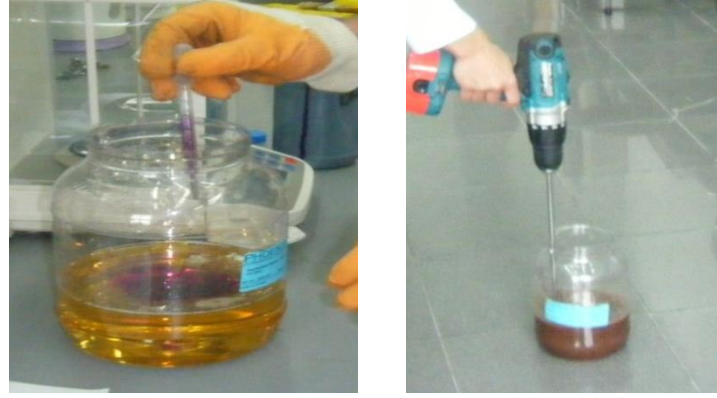
Test	Metod	Değer
Çekme dayanımı	ISO 527	40 MPa
Elastiklik modülü	ISO 527	3600 MPa
Kopma uzaması	ISO 527	4,20%
Eğme dayanımı	ISO 178	136 MPa
Eğme modülü	ISO 178	3700 MPa
Darbe dayanımı	ISO 180	13 kJ/m ²

6.4 Reçinenin Hazırlanması

Sıvı halde bulunan Polipol 3872 reçinenin çapraz bağlar kurarak sertleşmesini sağlamak amacıyla kütleme; mekanik ve korozyon özelliklerinde artış sağlamak amacıyla külemeyi takiben post-kür işlemi uygulanmıştır. Kütleme oda sıcaklığında yapılırken, post-kür işlemi yüksek sıcaklıkta kademeli olarak gerçekleştirilmiştir. Kürlenmenin sağlanması için sırasıyla başlatıcı olarak %0,2 kobalt oktoat ile katalizör olarak %1 MEK-Peroksit ilave edilmiş ve homojen karışım sağlanmıştır. Yeterli bir kütleme işlemi için hazırlanması gereken reçete Çizelge 6.8’deki gibidir. Bu şekilde kürlenmiş reçine ürün bilgi formundaki sertlik değerini sağlayabilmektedir.

Çizelge 6. 8 Polipol 3872 kürlenmesi için yapılan ilaveler.

Reçine	Asit	İlaveler	Barcol serliği
Polipol 3872	izoftalik	%0,2 Co +%1’lik peroksit	44



a)

b)

Şekil 6.5 Termoset reçinenin hazırlanması. a) ilavelerin katılması, b) reçinenin homojen karıştırılması

Polipol 3872 reçine Çizelge 6.8’de miktarları ile birlikte verilen ilavelerin eklenmesi ile hazırlanır.

6.5 Kompozit Plakaların Üretimi

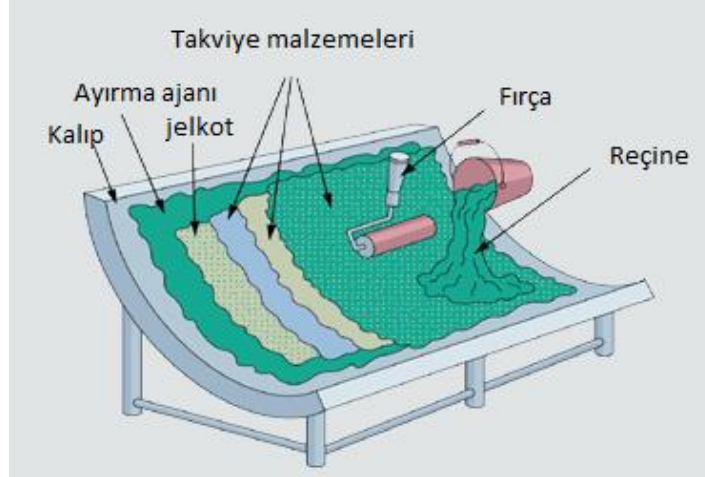
Bu çalışmada kompozit numunelerin iki farklı üretim yöntemi seçilmiştir. Bu yöntemler endüstride çok kullanılan, yatırım ve sarf maliyetlerinin çok düşük olduğu yöntemlerdir. Çalışmada kullanılan kompozit numuneler el yatırması (hand lay-up) ve vakum torbalama (vacuum bagging) (Şekil 6.7) yöntemleri ile üretilmiş olan kompozit plakalardan kesilerek çıkartılmıştır.



Şekil 6. 6 Kullanılan üretim yöntemleri.

6.5.1 El Yatırması

Bu proseste sıvı haldeki reçine kalıba uygulanır ve daha sonra üstüne takviye yerleştirilerek reçine takviye malzemeye emdirilir. Uygun kalınlık elde edilene kadar bir kat reçine bir kat takviye üst üste koyularak işleme devam edilir (Şekil 6.7).



Şekil 6. 7 El yatırması yönteminin şematik gösterimi.

El yatırması yönteminde kalıp malzemesi olarak düzgün yüzeyli östenitik paslanmaz çelik plaklar kullanılmıştır.

El yatırması işleminde kalıp yüzeyi işlemiden önce temizlenir. Ayırma (release) ajanı olarak wax kullanılır. Wax, üretilen kompozit malzemenin kolayca kalıp yüzeyinden ayrılmasını sağlar.

El yatırması yöntemi ile kompozit üretilirken, öncelikle kullanılacak olan takviye malzemeleri ve matris malzemeleri hazırlanır. Takviye malzemeleri dokuma ya da keçeler kalıptan daha küçük olacak şekilde kesilir. Reçine malzemesi, takviye malzemesinin kütlege yaklaşık 2 katı olacak şekilde hazırlanır ve içerisine yeterli miktarda katalizör ve başlatıcı ilaveleri konularak birkaç dakika karıştırılır. Bir fırça yardımı ile viskoz reçine kalıp üzerine sürülür, sonra üzerine ilk kat takviye serilir ve küçük fırça darbeleri ile reçine takviye malzemesine iyice emdirilir. Termoset reçineler 20 dk gibi kısa bir sürede jelleşir[91].

Sürekli fiber takviyeli plakaların üretimi sırasında fiberlerin yükleme yönünde paralel ve düzgün bir biçimde yönlenmesini sağlamak amacıyla fiber dizimi yapılmıştır. Fiberler bir gergi aparatı üzerine dizilmiş, tüm fiberlerde eşit gerilim oluşturmak amacıyla fiber

uçlarına eşit ağırlıklar takılmıştır. Daha sonra aparat üzerindeki fiberler gerdirilmiştir. Reçine uygulaması gergin fiber malzemeler üzerine yapılmıştır. Fiber gergi aparatları Şekil 6.8’de görülmektedir.



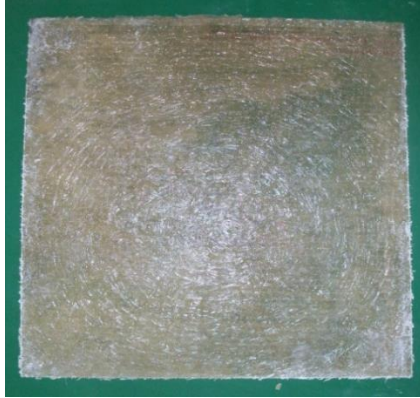
a)



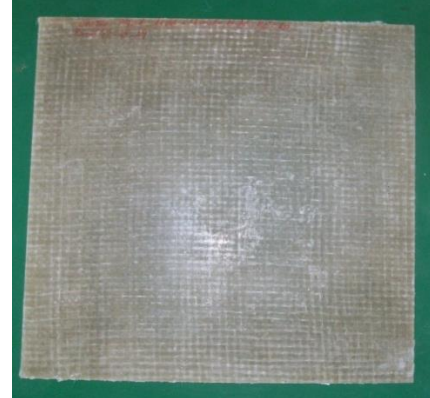
b)

Şekil 6. 8 a) Gerdirilmiş cam fiber, b) gerdirilmiş bazalt fiber.

Dokuma ve keçe takviyeli kompozit plakaların üretimi sürekli fiber takviyeli malzemelere göre çok daha kolaydır. Dokuma ve keçe takviyeler için aparat yardımı ile yapılan gerdirmeye gerek yoktur. Takviye malzemeleri uygun boyutta kesilerek el yatırması yapılabilir. El yatırması ile üretilmiş kompozit plakalar Şekil 6.9’da görülmektedir.



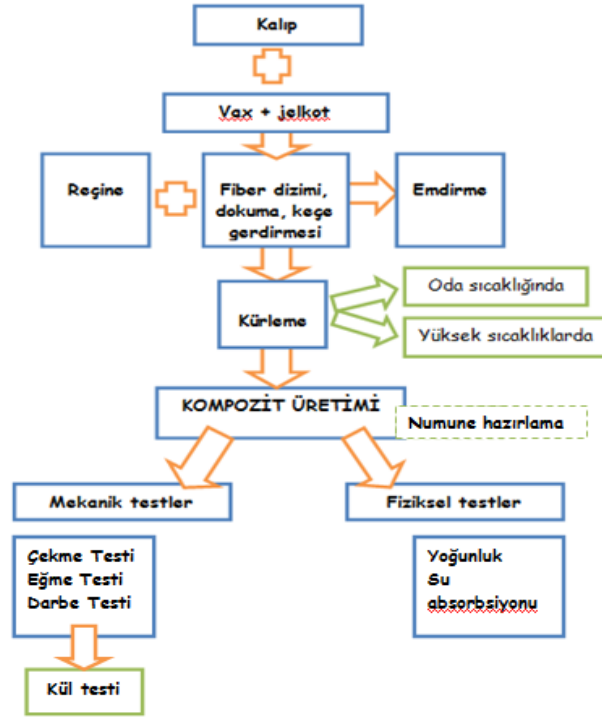
a)



b)

Şekil 6.9 El yatırması yöntemi ile üretilmiş kompozit plakalar. a)keçe takviyeli, b) dokuma takviyeli.

Termoset reçine matrisli ve cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin el yatırması yöntemi ile üretimi, karakterizasyon işlem basamakları Şekil 6.10’daki gibi gösterilebilir.



Şekil 6. 10 El yatırması yöntemi ile numune üretiminde işlem basamakları.

Önce sürekli E-camı ve bazalt fiber takviyeli plakalar elde edilmiştir. Daha sonra yine 6 ve 4 kat E-camı ve bazalt dokumalı plakalar üretilmiştir. El yatırması yöntemi ile üretilen kompozit plakaların notasyonu Çizelge 6.9'da ve vakum bagging yöntemi ile üretilen plakaların notasyonu da Çizelge 6. 10'da gösterilmiştir.

Çizelge 6. 9 El yatırması ile üretilen kompozit plakaların gruplanması.

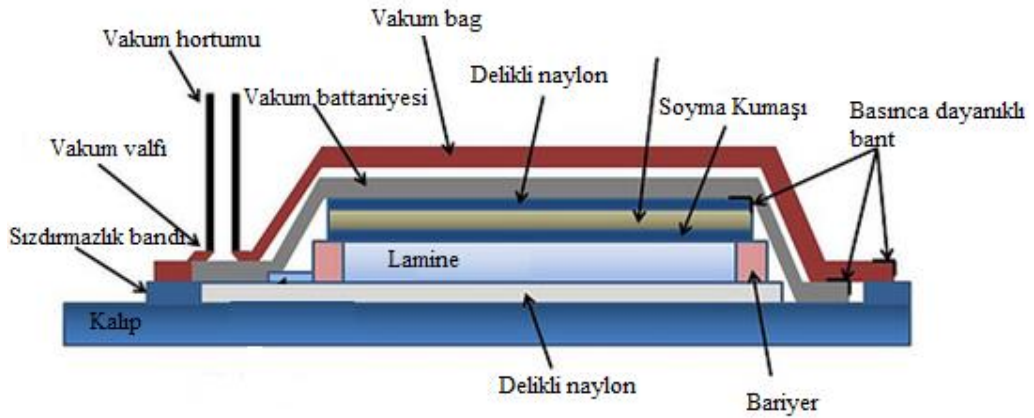
Takviye	Demet Takviyeli Kompozit Plakalar	Dokuma Takviyeli Kompozit Plakalar
Bazalt	BF01-BF02	Sürekli fiber
	Dokuma	4 kat
		6 kat
E-camı	GF01- GF02	Sürekli fiber
	Dokuma	4 kat
		6 kat

Çizelge 6. 10 Vakum bagging yöntemi ile üretilen kompozit plakaların gruplanması.

Takviye	Demet Takviyeli Kompozit Plakalar	Dokuma Takviyeli Kompozit Plakalar
Bazalt	Dokuma	4 kat
		6 kat
E-camı	Dokuma	4 kat
		6 kat

6.5.2 Vakum Torbalama (Bagging)

Vakum torbalama, wet lay up ya da prepreg lay up yöntemleri ile kalıp üzerine yatırılmış malzemelerin, vakum torbası içerisinde negatif basınç uygulanarak imal edilmesi esasına dayanır. Negatif basınç uygulanmasıyla öncelikle reçinenin çok daha iyi infüzyonu sağlanarak matris-fiber arayüzey bağı sağlanır. Yöntemin doğal getirisi olarak da boşluklar ve uçamayan bileşenler dokudan ayrılarak en az hatalı görece olarak daha ince ve makrobiyometrik olarak eş kalınlıklı plakalar elde edilir. Daha sonra mekanik ve fiziksel özellikleri geliştirmek amacıyla kalıp yüksek sıcaklık uygulamaları için, bu amaca uygun hazırlanmış otoklav içine de alınabilir. Yöntem şematik olarak Şekil 6.11’de verilmiştir.



Şekil 6. 11 Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi.

6.5.2.1 VakumBagging Donanımları ve Kullanılan Sarf Malzemeleri

Vakum torbalama yönteminde kullanılan sarf malzemeleri ve donanımlar Şekil 6.12’de gösterildiği gibi vakum torbası, sızdırmazlık bandı, vakum battaniyesi, delikli naylon, soyma kumaşı ve bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Söz konusu donanımlar ve işlevleri aşağıdaki gibidir.



a) Vakum Torbası (bag)



b) Sızdırmazlık bandı



c) Vakum battaniyesi



d) Delikli Naylon (Release film)



e) Soyma Kumaşı (Peel ply)



f) Vakum bağlantı elemanları (fittings)

Şekil 6. 12 Vakum torbalama yönteminde kullanılan sarf malzemeleri ve donanımlar.

Vakum Torbası(Vacuum bag):Bu malzemeler uygulamanın en üst katmanında yer alarak uygulamaya form verirler. Sızdırmazlık bandı (sealant tape) ile kalıba yapıştırılır ve içerideki malzemeye vakum uygulandığında dış atmosfer ile malzeme arasında teması keserler. Bu yüzden torba malzemesi kür çevrimi boyunca tamamen sızdırmaz olmalıdır.

Vakum bag olarak kullanılan en yaygın malzeme mükemmel fiziksel özellikleri ile naylon filmlerdir. Naylon filmler yeterince tok, esnek ve yüksek uzamaya sahiptir. Bazı özel ilavelerle yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirler. Kompleks parçaların üretiminde naylondan daha fazla uzama gösteren elastomer filmlerin kullanılması daha uygundur.

Sızdırmazlık bandı (Sealant tape) : Sızdırmazlık bandı (selant tape) bir tarafı ile kalıp, diğer tarafı ile bag filme bağlanarak sızdırmazlık sağlar. Sızdırmazlık bandı kalıp yüzeyine çok iyi yapışmalı, bag film yüzeyinde ise yeniden konumlandırmayı sağlayacak şekilde hareket edebilmelidir. Kür döngüsü sonunda kalıp yüzeyinde herhangi bir kalıntı bırakmadan ayrılır.

Vakum battaniyesi (Breather / Bleeder Fabric) : Non-woven polyester vakum battaniyesi vakum ile havanın ortamdan uzaklaştırılması amacıyla kullanılır. Bu sayede hem bag içindeki serbest hava ortamdan uzaklaştırılırken, hem de katılaşma sırasında reçineden çıkan zararlı gazlar ortamdan alınır. Polyester vakum battaniyesi aynı zamanda vakumu el yatırması üzerine homojen olarak dağıtır ve reçine fazlasını üzerinde toplar. Bu battaniyenin kürlenme süresince uygulanan basınç kuvvetine ve yüksek sıcaklığa dayanıklı olması beklenir.

Vakum battaniyesi uygulamada kalınlığına göre birkaç kat olarak kullanılır. Vakum çıkış aparatının altına ise daha kalın koyulmalıdır. Kür sıcaklık ve basınçlarına göre değişik tipte vakum battaniyelerine ulaşmak mümkündür

Delikli Naylon (Release Film) : Delikli naylon (Release) filmler kürlenme boyunca reçine akışını kontrol etmek amacı ile kullanılır. Aynı zamanda kürlenmiş parçanın vakum bagging malzemelerinden ayrılmasını sağlar. Reçine karakterine, kür şartlarına ve parça geometrisine bağlı olarak çeşitli delikli naylon filmler ile çalışmak mümkündür.

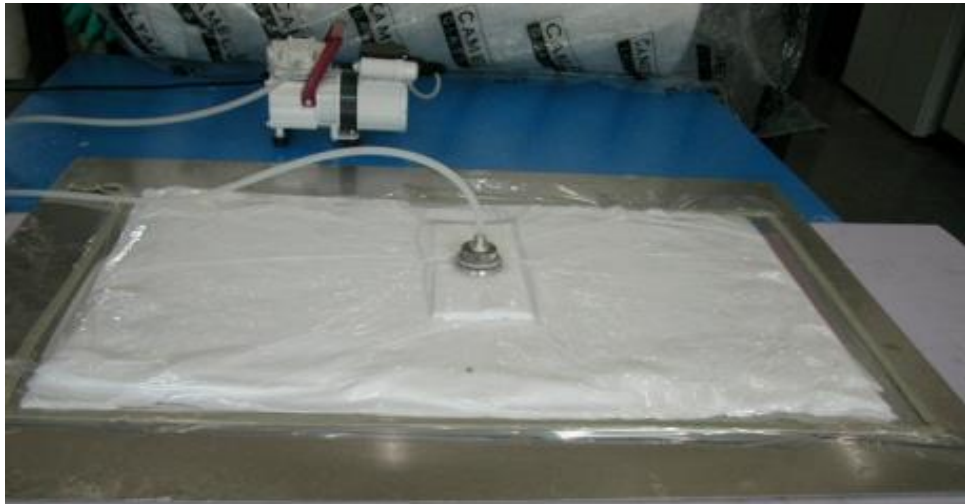
Peel Ply (Soyma Kumaşı): Kalıp yüzeyine ve el yatırması üzerine opsiyonel olarak tatbik edilir. Parça ile vakum malzemeleri ve kalıp arasında ikincil bir ayrılma yüzeyi oluşturur. Yüzey düzgünlüğü ve ikincil yüzey işlemleri (boyama vb.) için kendine özgü dokuma desenli yüzey sağlar.

Vakum Bağlantı Elemanları (Fittings): Vakum pompası ile vakum bag arasındaki bağlantıyı sağlayan parçalardır. Bunlar vakum kesme valfleri, iki parçalı, döngülü-döngüsüz bağlantı elemanları, vakum ve otoklav bağlantı hortumları olarak sayılabilir.

Vakum bag uygulamalarında aşağıdaki sıra izlenir;

- Öncelikle vakum bagging işleminin uygulanacağı kalıp hazırlanır. Kalıp temizlenir, üzerine kalıp ayırıcı sürülür.

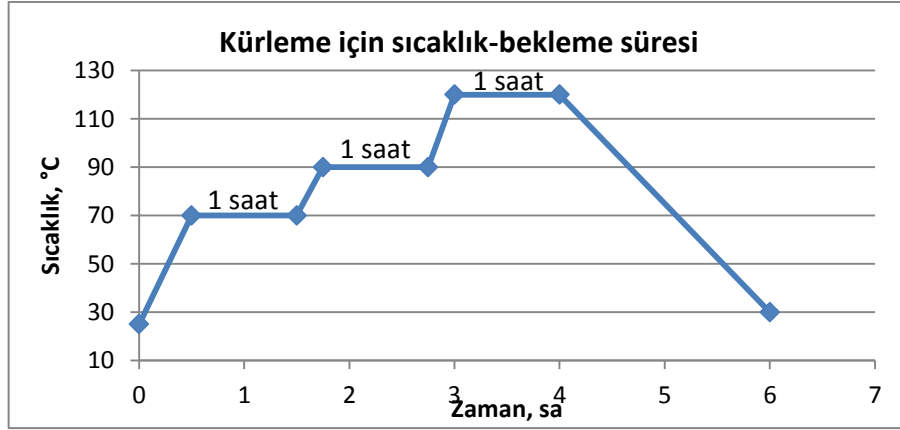
- İşlemin uygulanacağı çerçevede, kalıp etrafına sızdırmazlık bandı (sealant tape) yapıştırılır. Kalın ve 3 boyutlu parça üretiminde sızdırmazlık bandı ile pile yapmak gerekir. Düz plaka uygulamalarında parça geometrisi dolayısıyla pile yapmaya gerek yoktur.
- Reçine takviye malzemesine emdirilerek hazırlanan el yatırması vakum bag içerisine alınır.
- El yatırmasının üzeri soyma kumaşı ile örtülür.
- Soyma kumaşı üzerine delikli naylon film koyulur. Delikli naylon filmin (Realese film) üzerine vakum battaniyesi örtülür. Vakum battaniyesi, battaniyenin kalınlığına bağlı olarak 3-4 kat serilmelidir. Vakum pompası çıkış aparatının altına gelen kısım daha kalın vakum battaniyesi ile beslenmelidir.
- Üzerine vakum çıkış aparatı yerleştirilerek, hava sızıntısını önlemek için sıkıca kapatılmış vakum bag film hazırlanan uygulamanın üstüne yerleştirilir. Vakum torbası ile sızdırmazlık bandı hiçbir hava sızıntısı olmayacak şekilde yapıştırılır.
- İşlem tamamlandıktan sonra vakum çıkış aparatına vakum hortumu yerleştirilir ve vakum pompası yardımı ile vakum uygulanır (Şekil 6.13).
- Kullanılan reçineye göre vakum altında kürleme sonrasında yüksek sıcaklıkta kürleme sıcaklıkları ve süreleri seçilir.
- Kürleme tamamlandıktan sonra parça yavaş soğutulur ve vakumdan çıkarılır.



Şekil 6. 13 Vakum bagging uygulaması.

Vakum bag uygulamalarında kullanılan vakum motorları standart olup aynı vakum uygulamaktadırlar. Uygulanan vakum miktarı 14,7 psi'dir. Dolayısı ile kompozit numuneler basınç miktarı sabit tutularak üretilmiş ve uygulama sırasındaki basınç etkisi incelenmemiştir [91].

Kompozit plakalar gerekli çapraz bağlanmanın gerçekleşmesi için üretici firma ar-ge laboratuvarının verdiği bilgiler doğrultusunda en az 6 saat, en fazla 24 saat olmak üzere oda sıcaklığında ve durgun havada kürlenmiştir. Bu bilgiden hareketle her bir numune için ortalama 18 saat kürleme süreci seçilmiştir. Buna ilaveten yüksek sıcaklıkta durgun atmosferli NÜVE FN 400 marka fırında post-kür yapılmıştır. Post-kür işleminde sıcaklık kademeli olarak arttırılmıştır. Her sıcaklıkta 1 saat beklenmiş ve yavaş soğutulmuştur. Kürleme işlemi için sıcaklık ile bekleme süresi arasındaki ilişki Şekil 6.14'de verilmiştir.



Şekil 6. 14 Kürleme prosesi için sıcaklık – bekleme süresi ilişkisi.

Şekil 6.14'de de gösterildiği gibi numuneler önce oda sıcaklığından yüksek sıcaklığa ısıtılmış ve 70°C'de 1 saat, 90°C'de 1 saat ve 120°C'de 1 saat beklendikten sonra durgun havada yavaş soğutulmuştur. Şekil 6. 15'te kürlenmenin yapıldığı etüv ve kürleme sonucu gergi aparatı ile birlikte kürlenmiş kompozit plaka gösterilmiştir.



a



b

Şekil 6. 15 a) Etüv fırını, b) Gergi aparatında kürlenmiş plaka.

6.6 Deney Parçası Hazırlama İşlemleri

Üretilen kompozit plakalardan fiziksel ve mekanik özelliklerin saptanması amacıyla uygulanacak deneylerin yapılması için uygun boyutlu numuneler  izelge 6. 11’de gösterilen standartlar esas alınarak numuneler çıkarılmıştır. Standartlar Türk Standardı gibi görünmesine karşın ISO ve EN’nin doğrudan karşılığıdır.

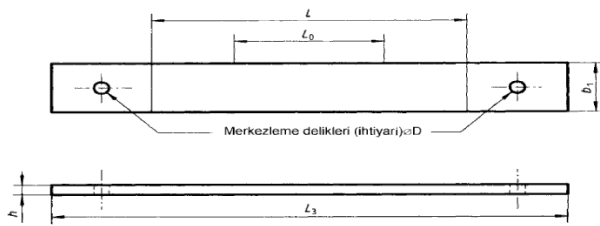
Çizelge 6. 11 Kompozit numunelerin fiziksel ve mekanik testlerinde kullanılan standartlar.

Test	Metod
Çekme testi	TS EN ISO 527-4/5
Eğme testi	TS EN ISO 14125
Darbe testi	TS EN ISO 179-1
Kalsinasyon testi	TS EN ISO 1172
Yoğunluk tayini	TS EN ISO 1183-1
Barcol sertliği	TS EN 59
Su absorbsiyonu	TS 4502 ISO 2896

Şekil 6. 16’da 3 önemli mekanik deney olan çekme, eğme ve darbe deney numuneleri gösterilmiştir. Çekme için boyu 250 mm, genişliği 25 mm olan düz numuneler seçilmiştir. Bağlama çeneleri arasında numunenin kaymasını önlemek amacıyla her iki uca da söz konusu standart uyarınca çapı 4 mm olan pim delikleri delinmiştir. Deney sırasında bu deliklere plastik şekil değiştirmesi minimuma indirilmiş maraging dokulu pimler geçirilmiştir.

Darbe deneyi 15x80 mm boyutlarındaki dikdörtgenler prizması şeklinde numuneler seçilerek gerçekleştirilmiştir. Hem termoplastik matrisin hem de E-camı ve bazalt fiberlerin gevrek tutumu nedeniyle Charpy türü kırma için bu numuneler en elverişli boyutlardadır. Deneyde mesnetler arası uzaklık 62 mm standart olarak seçilmiştir.

Benzer şekilde 3 noktalı eğme deneyi için 15 x 80 mm'lik numuneler seçilmiştir. Burada da mesnetler arası uzaklık standart olarak 64 mm alınmıştır. Şekil 6.17'de çekme numuneleri, 6. 18'de ise darbe, eğme, yoğunluk ve su absorpsiyonu deneylerinde kullanılan numuneler gösterilmiştir [96],[97],[98], [99].



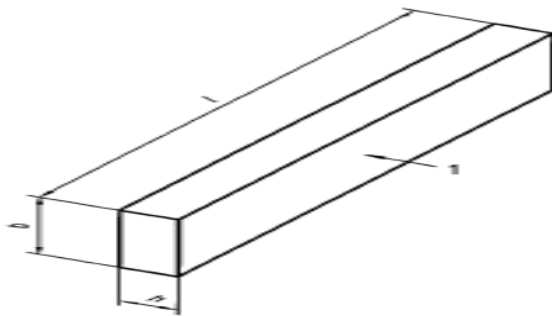
Çekme numunesi:

L, Toplam uzunluk ≥ 250 mm

B, Genişlik $25 \pm 0,5/50 \pm 0,5$ mm

h, Kalınlık 2 – 10mm

a) Çekme deneyi numunesi.



Darbe Numunesi:

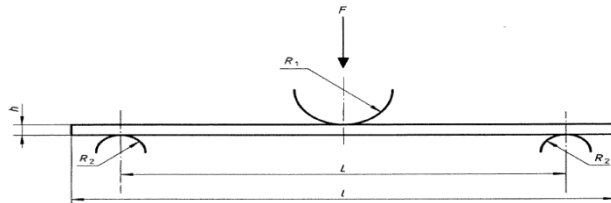
b, genişlik 10 veya 15 mm

b, genişlik 10 veya 15 mm

h, kalınlık 3 mm

l, uzunluk 25 h

b) Darbe deneyi numunesi.



Eğme Numunesi:

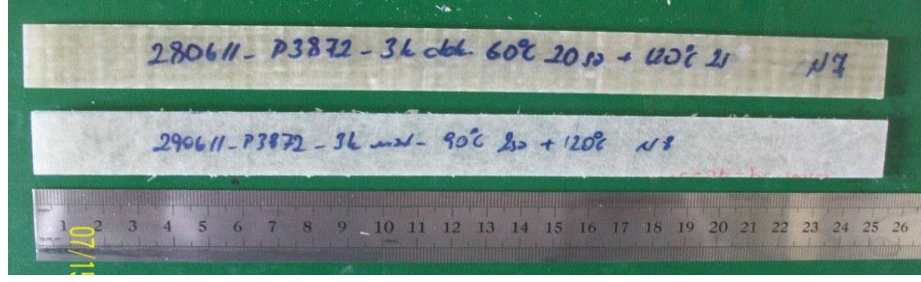
l, uzunluk 80 mm

w, genişlik 15 mm

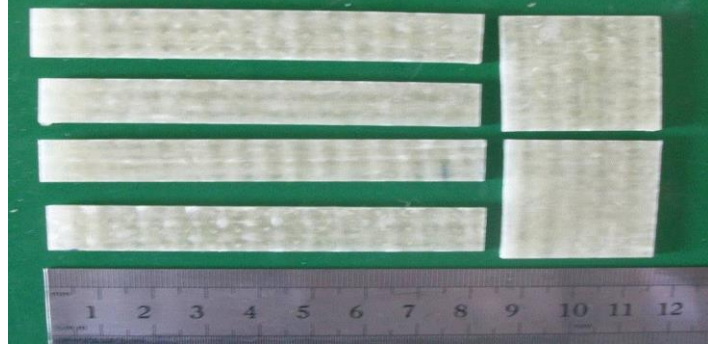
h, kalınlık 4 mm

c) Eğme deneyi numunesi.

Şekil 6. 16 Test numunelerinin şekli ve boyutları. a) Çekme deneyi numunesi, b) Darbe deneyi numunesi, c) Eğme deneyi numunesi.



Şekil 6. 17 Dokuma ve keçe takviyeli termoset matrisli çekme testi numuneleri.



Şekil 6. 18 Darbe, eğme, yoğunluk ve su absorpsiyonu numuneleri.

Şekil 6.17 ve 6.18’de karakterizasyon testleri için hazırlanmış kompozit numuneler görülmektedir.

6.6.1 Kesme İşlemi

El yatırması ve vakum bagging yöntemleri ile 30x30 cm’lik plaka boyutlarında üretilmiş olan kompozit plakalardan gerekli mekanik ve fiziksel testleri yapmak için uygun numuneler kesilerek çıkarılmıştır. Kesme işlemi DEWALT marka döner diskli testere ve elmas kesme diski ile sulu olarak yapılmıştır. İşlemden sonra matrisin su çekme özelliği dolayısıyla numuneler hemen etüv fırınında kurutulmuştur. Numunelerin kesim işlemi ve kullanılan testere Şekil 6.19’da görülmektedir.



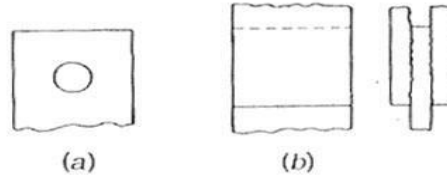
Şekil 6. 19 Numunelerin kesilerek hazırlanması.

6.6.2 Zımparalama işlemi

Mekanik testlerin uygulanacağı numunelerin kenarları zımparalamak suretiyle düzeltilmiştir. Kesme sırasında matrisin gevrekliği dolayısıyla meydana gelebilecek kenar bozuklukları zımparalama ile giderilmiştir. Böylelikle olası çentik etkisinden kaçınılmış olur. Zımparalama işlemi iki kademe yapılmıştır. Kaba zımparalama için 180-200 numara ve daha ince zımparalama için 800-1000 numaralı zımparalar uygundur.

6.6.3 Pim deliklerinin açılması

Çekme numuneleri sırasında numunenin çekme çenelerinden sıyrılmaması için pim takılarak teste tabi tutulması gerekmektedir. Bu sözü edilen delikler TS EN ISO 527-4/5 Çekme Standardında anlatıldığı gibi kenarlardan uygun paylar bırakılarak ve pimplere uygun delik çapı seçilerek bir el matkabı yardımıyla açılmıştır. Açılan pim delikleri Şekil 6.20’de gösterilmektedir.



Şekil 6. 20 Çekme testi numuneleri için klape bağlantıları: (a) pim tipi ve (b) testere çene tipi.

Pim delikleri standart doğrultusunda y ekseninde numunenin kenarından 12,5 mm içeride ve x eksenin tam ortadan açılmıştır. Pim deliklerinin çapı standarda uygun olarak 4 mm olarak delinmiştir.

6.7 Elyaf Takviyeli Kompozit Numunelerin Karakterizasyonu

Daha önce yapılan çalışmalarda metal, seramik ve plastik malzemeler ile ilgili yeterli bilgi birikimine ulaşılabilmektedir. Ancak termoset matris ve özellikle bazalt fiberler için yapılan çalışmaların az ve arayüzey işlemlerinin farklı olması sebebiyle görüş birliğine varılmış sonuçlara ulaşmak çok zordur. Bunun nedeni üretim yöntemi, arayüzeyin geliştirilmesi ve bazaltın farklı firmalar tarafından üretilmesidir. Bunların yanı sıra kompozit malzeme üretiminde çeşitli malzemelerin bir araya getirilmesi, çeşitli

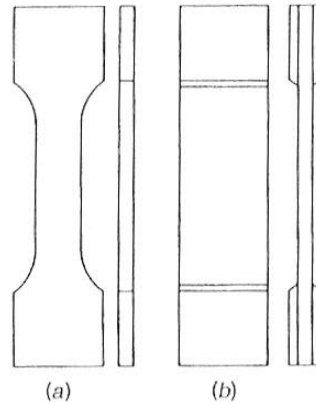
oryantasyonlar üzerinde çalışılması kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin çok geniş bir yelpazede elde edilmesini sağlamaktadır.

6.7.1 Mekanik Deneyler

Bu çalışmada imal edilmiş olan kompozit malzemenin karakterizasyonu için çeşitli mekanik ve fiziksel testler yapılmıştır. Çekme testi, 3 nokta eğme testi, darbe testi uygulanan mekanik testlerdir.

6.7.1.1 Çekme Testi

Statik tek eksenli çekme testi en basit ve en çok kullanılan mekanik testtir. Bu test malzemenin elastiklikmodülünü, çekme dayanımını ve Poisson oranını belirlemek için yapılmaktadır. Kompozit malzemelerde çekme testi genellikle düz (yassı) numunelere uygulanmaktadır. En çok kullanılan numune geometrileri Şekil 6.18’da görüldüğü gibi kemik ve klape uçlu düz kenarlı numunelerdir. Tek eksenli bir yük Şekil 6.21’deki gibi pim tipi veya testere çenesi tipi bağlantı ucu sayesinde uygulanmaktadır [100] , [101].



Şekil 6. 21 (a) Kemik ve (b) düz kenarlı çekme test numuneleri[100] , [101]. [54, 55].

Fiber-reçine kompozitlerin çekme özellikleri TS EN ISO 527-5 ve ASTM D 3039/D3039M-00 standartları ile tayin edilmektedir [100] , [101].

Çekme testi fiberlere dik ya da paralel yönde uygulanır. Gerinmeler bir ekstansometre veya elektrikli bir gerinim ölçerin (strain gauge) ortalaması alınarak ölçülür. Numuneler eksenel yönde çekme yükü altında bulunur ve kopma sonucunda bir gerilim-gerinim eğrisi oluşturulur.



Şekil 6. 22 100 kN kapasiteli, bilgisayar kontrollü Mohr Federhaff marka çekme cihazı.

Çekme testi için numuneler, TS EN ISO 527-5'e göre hazırlanmıştır. Fiber oryantasyonu çekme yönüne paralel olmak üzere 250 x 25mm boyutlarında, standardın öngördüğü düz numune tipinde kesilmiştir. Çekme deneyi, bilgisayar kontrollü, 100 kN kapasiteli MOHR FEDERHAFF marka çekme cihazında (Şekil 6.22) yapılmıştır. Çekme hızı, standart 5mm/dakika olarak seçilmiştir. Bilgisayar programı tarafından numunelere ait gerilme (MPa)-gerinim (%) eğrileri otomatik olarak çizilmiştir.

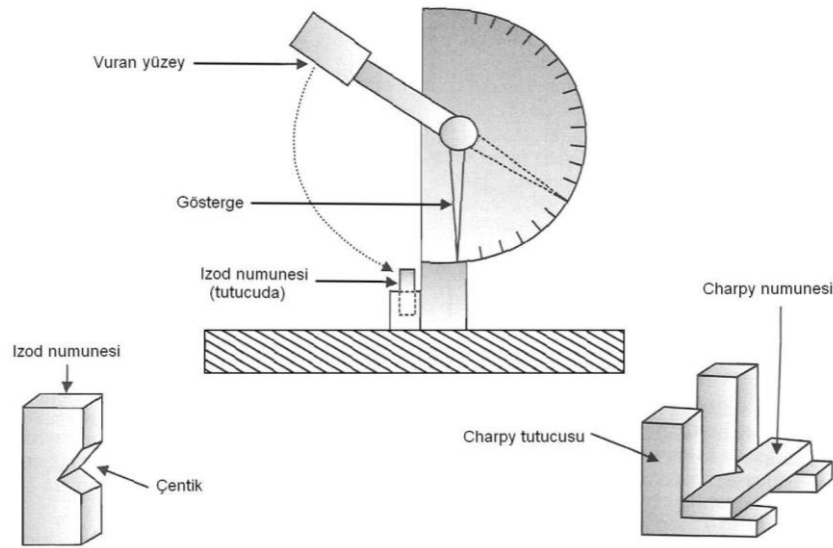
6.7.1.2 Darbe Testi (Charpy)

Charpy deneyi, malzemelerin belirli darbe yükleri altında özelliklerinin araştırılması ve numunenin kırılma veya rijitliğinin tayini için kullanılmaktadır. Bu metod ayrıca benzer malzeme tipleri içinkarşılaştırmalı verilerin elde edilmesi amacıyla kullanılmaktadır [25].

Malzemenin kırılma olmaksızın absorbe ettiği enerjiye tokluk denir. Denge tokluğu ve darbe tokluğu olmak üzere iki çeşit tokluk vardır. Denge tokluğu, çekme testinin hızının genellikle denge koşulları varsayılacak kadar yavaş olmasından dolayı denir. Çekme testi sonucu ortaya çıkan gerilim-gerinim eğrisinin altında kalan alan olarak tanımlanır, çünkü enerjinin absorblanması sistemdeki tüm kuvvetlerin direnç etkilerinin toplamıdır. Denge tokluğu gerilim-gerinim eğrisinin altında kalan alan olarak

hesaplanır. Darbe tokluğu ise ani darbe ile malzemenin absorbe ettiği enerji olarak ifade edilmektedir [27], [101].

Darbe tokluğu darbeyi barındırmak için malzemenin içten hareket etmesi veya deforme olma yeteneğidir. Bu hareket uzama veya gerinmeyle alakalıdır. Bu nedenle yüksek uzama sergileyen malzemeler özellikle iyi dayanıma sahipse, toktur. Ancak modül bu malzemelerde genellikle düşüktür (düşük rijitlik). Bu yüzden yüksek uzama gösteren ve düşük modüllü malzemeler tok, düşük uzama gösteren ve yüksek modüllü malzemeler kırılgan olarak tanımlanmaktadır. Şekil 6.31’de test metodları görülen serbest salınlı bir çekiç ile darbe testleri yapılmaktadır [27].



Şekil 6. 23 Izod ve Charpy darbe test cihazı ve numuneleri[27].

Bu çalışmada darbe deneyi, TS EN ISO 179-1 standardının öngördüğü şekilde Charpy metodu ile çentiksiz numuneler kullanılarak yapılmıştır. Numuneler, 80 x 15 mm boyutlarında kesilmiş ve çentik etkisini yok etmek için kenarları zımparalanmıştır. Test, DEVOTRANS CD-1 marka darbe cihazında (Şekil 6.32) 25J’lük çekiç ile gerçekleştirilmiştir. Cihazın gösterge kadranından okunan kırılma sırasında absorblanan enerji miktarı standartta verilen kırılma tokluğu denklemi yerine konarak darbe mukavemeti hesaplanmaktadır. Darbe mukavemeti denklemi Eşitlik 6.1’de verilmiştir.

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h.b} \times 10^3 (6.1)$$

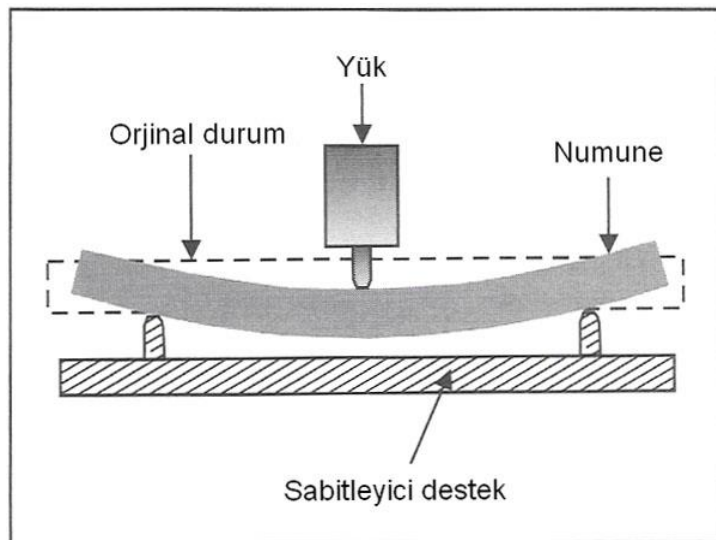
(6.1)'de E_c , deney numunesi kırılırken absorplanan ve düzeltilen enerjiyi, (J); h deney numunesinin kalınlığını (mm); b deney numunesinin genişliğini (mm) göstermektedir.



Şekil 6. 24 DEVOTRANS CD-1 marka darbe cihazı görüntüsü.

6.7.1.3 Eğme ve Kesme Testi

Eğme kuvvetleri iki desteğe yerleştirilen dikdörtgen biçimli numunenin üzerine basılmasıyla belirlenmektedir. Çoğunlukla eğme Şekil 6.35'da görüldüğü gibi tek noktadan yapılmaktadır. Buna standart eğme testi veya üç noktalı eğme testi denir. Ender olarak kompozitlerde iki noktadan basınç uygulanmaktadır. Bu durumda dört noktalı eğme testi olur [27].



Şekil 6. 25 Eğme testi[3].

Test sırasında numunenin üst kısmı basma kuvveti altında kalırken, alt kısmı çekme kuvveti altında kalmaktadır. Parçanın orta kısmında bir tür geçiş kuvveti oluşmaktadır. Bu geçiş düzleminde saf kesme gerçekleşmektedir. Kesme testleri, fiber-matris arası bağ dayanımlarını belirlemek açısından önem teşkil eder [27], [100].

Bu çalışmada 3 nokta eğme deneyi; TS EN ISO 14125 standardına göre, 50 kN yük kapasiteli, ± 1 N hassasiyete sahip ve kalibreli olan MARES marka ve TST-SE-J-2T model çekme cihazına uygun eğme ucu aparatı takılarak, 5mm/dakika hızla yapılmıştır. Deney çıktısı olarak Fmax/sehim grafikleri bilgisayar programı yardımı ile çizilmiştir. Cihazdan okunan maksimum yük (N) değeri ve (6.2) ile eğme mukavemeti hesaplanmıştır.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{bh^2} \quad (6.2)$$

(6.2)'de σ_f , eğme mukavemeti (MPa); F, maksimum kuvvet (N); b, numune genişliği (mm) ve h, numune kalınlığını (mm) ifade etmektedir.

6.7.2 Fiziksel Deneyler

6.7.2.1 Kalsinasyon (Kül) Testi

Kompozit malzemenin kütlece fiber oranını belirlemek amacıyla TS 1177 EN ISO 1172 'ye göre yapılmaktadır. Deney numuneleri tartılmakta ve hemen ardından tanımlanan sıcaklıkta kalsine edilmektedir. Deney numuneleri sonra tekrar tartılmakta ve kalsinasyon işleminden önce ve sonraki deney numunelerinin kütle farkından belirlenen yanmayan madde muhtevası (cam + dolgu maddeleri) belirlenmektedir. Her numune için cam muhtevası M_{cam} , başlangıç kütlelerinin yüzdesi olarak aşağıdaki eşitlik (6.3) kullanılarak hesaplanmaktadır[102].

$$M_{cam} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (6.3)$$

Burada;

m1: Kuru kayıkçık veya krozenin başlangıç kütlesi, g.

m2: Kuru kayıkçık veya krozenin ve kurutulmuş numunenin başlangıç kütlesi, g.

m3: Kayıkçık veya kroze ve kalsinasyon işleminden sonraki kalıntının son kütlesi, g'dır.

Matris ve fiber malzemesinin yoğunluğu da hesaba katılarak belirlenen kütle oranından fiber hacim oranı hesaplanmaktadır.

Mekanik testleri tamamlanan numunelerin fiber hacim oranlarını belirlemek için test edilmiş numune parçalarına kalsinasyon testi uygulanmıştır. Kalsinasyon testi, kompozit numunelerin kütlece takviye oranını belirlemek amacıyla TS 1177 EN ISO 1172 standardının öngördüğü şekilde yapılmıştır. Kül testi de denilen bu analiz için Proterm Marka, PLF 120/5 Model kalsinasyon fırını (Şekil 6. 40 a) kullanılmıştır. Numuneler önceden tartılmış krozeler (Şekil 6.40 b) içerisinde 1 saat 750°C’de kalsine edilmiş ve kalsinasyon işlemi ile kimyasal bozunarak ortamdan ayrılan termoset matristen arda kalan takviye miktarı tartılarak takviye miktarının kütlesi hesaplanmıştır. Matris ve fiber malzemesinin bilinen yoğunlukları kullanılarak, kalsinasyon testi sonucunda belirlenen kütle oranından % fiber hacim oranı hesaplanmıştır.



a)



b)

Şekil 6.26 Kalsinasyon işlemi ve sonrasında elde edilen kül. a) Proterm, PLF 120/5 Model kalsinasyon fırını, b) Kalsinasyon testi sonrasında elde kalan kül.

Kalsinasyon deney sonuçları Bölüm 6.7.1’de yapılan mekanik deneyleri destekleyecek şekilde verilmiştir. Kalsinasyon deneyi sonucu elde edilen %V_f değerlerine göre mekanik test sonuçları değerlendirilebilmiştir.

6.7.2.2 Yoğunluk Testi

Kompozit numunelerin yoğunluklarını belirlemek amacıyla TS EN ISO 1183-1 göre yoğunluk tespiti daldırma metodu ile yapılmaktadır. Yoğunluk tayini için numune, azami çapı 0,5 mm olan bir telle havada asılı şekilde tartılmakta ve kütlesi

kaydedilmektedir. Numune, bir destek üzerinde bulunan daldırma kabı içerisindeki daldırma sıvısına, tel üzerinde asılı bir şekilde daldırılmaktadır. Daldırma sıvısının sıcaklığı $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ olmalıdır. Numune yüzeyine tutunan hava kabarcıkları bir tel yardımıyla uzaklaştırılmaktadır. Daldırılmış numune 0,1 mg doğrulukla tartılmaktadır. Numunenin 23°C 'deki yoğunluğu, ρ_S , g/cm^3 olarak aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır [103]:

$$\rho_S = \frac{m_{S,A} \times \rho_{IL}}{m_W - m_{S,IL}} \quad (6.4)$$

Burada;

$m_{S,A}$: numunenin havada görünür kütlesi, g.

$m_{S,IL}$: numunenin daldırma sıvısında görünür kütlesi, g.

ρ_{IL} : daldırma sıvısının yoğunluğu, g/cm^3 'tür.

Yoğunluk ölçümü için kullanılan hassas terazi ve düzenek Şekil 6.41'deki gibidir.



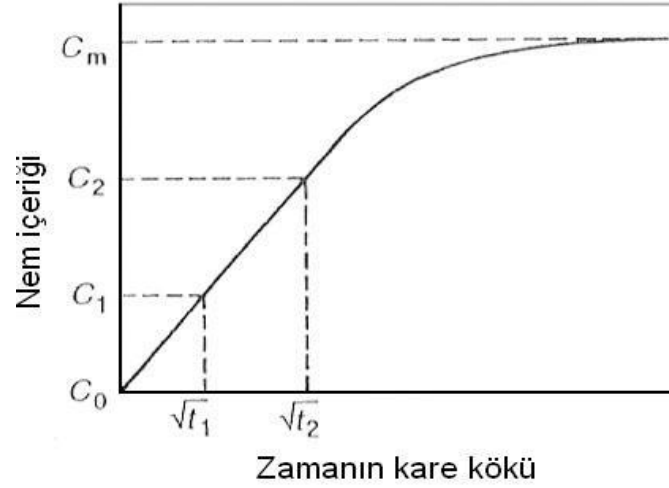
Şekil 6. 27 Hassas terazi ve yoğunluk ölçme aparatı.

6.7.2.3 Su Absorbsiyonu Testi

Polimer matrisli kompozitlerde nem absorpsiyonu, özelliklere doğrudan etkimesi açısından önemlidir. Absorpsiyon veya nemin yapıda yayınması ağırlık artışı ve zamanın fonksiyonu olarak belirtilmektedir. Desikatörde kuru koşullarda saklanan numune daha sonra nemli ortama konulmaktadır. Nem içeriği C' 'nin, zamanın karekökü $\sqrt{t}$ ile değişimi eğri şeklinde çizilmektedir. Absorpsiyon yüzdesi;

$$C = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \quad (6.5)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. m_s , t sürede nem absorbe eden kütle, m_0 , kuru ilk kütledir. Bu şekilde elde edilecek olası eğri Şekil 6. 42’de gösterilmiştir.



Şekil 6. 28 Su absorpsiyonunun nem içeriği ile değişimi [101].

Polimer matrisli kompozitlerin nem absorpsiyonu ve desorpsiyonu büyük öneme sahiptir. Kompozit laminaların nem içeriklerine etkisi üzerinde yapılan çalışmalar boylamasına ve enlemesine yönlerdeki tek eksenli bir kompozitin yayınmayla ve denge nem içeriğiyle ilgili olduğunu ortaya koymaktadır. Kompozitlerin yayınma gücü deneysel olarak belirlenip ve Eşitlik 4 ile hesaplanmaktadır [100], [101].

$$G = \frac{C - C_0}{C_m - C_0} = 4 \left(\frac{Dt}{\pi S^2} \right)^{1/2} \quad (6.6)$$

Difüzyon testleri, numune sabit bir sıcaklık ve nem ortamına maruz bırakıldığında, zamanın bir fonksiyonu olarak ağırlık artışı ölçümünden oluşmaktadır. Nem absorpsiyon testine başlamadan numuneler bir desikatörde tamamen kurulmaktadır. Nem içeriği C , $\sqrt{t}$ 'nin fonksiyonu olarak işaretlenmektedir. C ve $\sqrt{t}$ arasındaki bağıntı Şekil 6.24’de görülmektedir. Yayınma gücü D , lineer başlangıç ilişkisinden hesaplanmaktadır. Bu amaçla kısa süreler için aşağıdaki bağıntıya yaklaşılmaktadır [31], [32]:

$$D = \frac{\pi}{16} \left(\frac{C_1 - C_2}{C_m - C_0} \right)^2 \left(\frac{S}{\sqrt{t_1} - \sqrt{t_2}} \right)^2 \quad (6.7)$$

t_1 ve t_2 'ye bağı olan iki nem sabiti C_1 ve C_2 , eğrinin başlangıç bölgesinden seçilmekte ve (6.7)'de yerine konmaktadır. Buradan yayınma gücünü D , kolaylıkla hesaplanabilir.

Su absorpsiyonu testinde kompozit numunelerin önce kuru ağırlıklar tespit edilmiştir. Daha sonra numuneler Şekil 6.43 'de gösterilen beherler içerisinde 2, 4, 6 ve 8 ve 24 saat süre ile bekletilmiş ve sonrasında kurutularak tekrar tartılmıştır. İki tartım arasındaki fark numunenin absorbladığı su miktarını göstermektedir. Buradan elde edilen veriler ile Şekil 6.43'te gösterilen grafik elde edilmiştir.



a)



b)

Şekil 6.29 Su absorpsiyonu numuneleri a)Cam fiberli numuneler, b) Bazalt fiberli numuneler.

Sürekli bazalt fiber ve dokuma takviyeli numunelerin absorbladıkları nem miktarının artışı Çizelge 6. 17'de gösterilmektedir. Çizelgede C_1 - C_5 arasındaki ölçüm değerleri, her iki ölçümdeki numunenin absorbladığı nem miktarındaki değişmeyi göstermektedir. Bir doyum noktasından sonra numunelerin absorbladığı nem miktarı sabit kalmaktadır.

BÖLÜM 7

BULGULAR

7.

7.1 Çekme Testi Sonucunda Elde Edilen Bulgular

Çekme testi sürekli E-camı takviyeli (GF01 takviyeli 19 adet ve GF02 takviyeli 21 adet) 40 ve bazalt takviyeli (BF01 takviyeli 15 adet ve BF02 takviyeli 20 adet) 35 numune üzerinde uygulanmıştır.

Burada belirtilen a, b,...,h değerleri numunenin alındığı kompozit plaka kodu, numaralar numunenin sırasını ifade etmektedir. Örneğin a-01-GF01 kodlu numune GF01 sürekli fiber takviyeli a kodlu kompozit plakanın 1. numunesidir. Bu testlere ait max. çekme yükü (F_{max}), çekme dayanımı σ_{max} , % uzama, elastiklik modülü, fiber hacim oranı ($\%V_f$) fiber ağırlık oranı ($\%M_f$) ve yoğunluk değerleri Çizelge 7.1 ve 7.2’de verilmektedir.

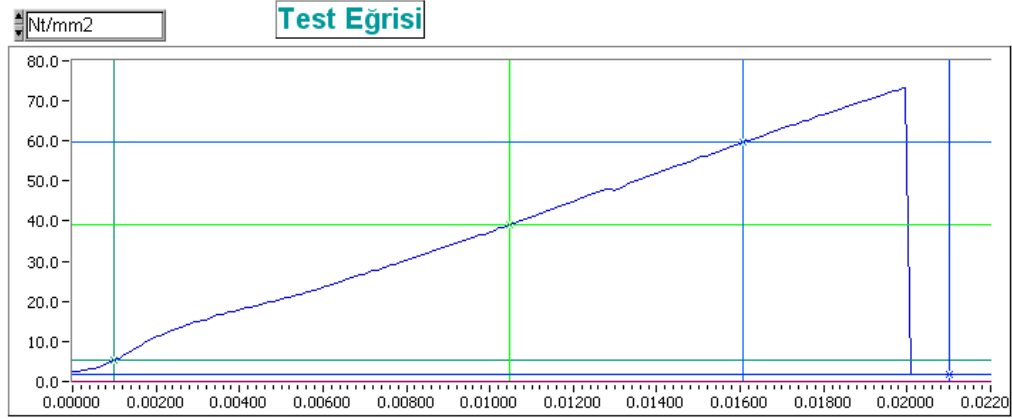
Çizelge 7. 1 Sürekli E-camı fiber takviyeli kompozit numunelerin çekme deneyi sonuçları.

No	Numune	F_{max}	σ_{max}	% uzama	Elastiklik mod.	%V _f	%M _f	Yoğunluk
		kN	MPa		GPa			gr/cm ³
1	a-01-GF01	9,24	54,73	11,42	4,25	1,1166	2,4335	1,2271
2	a-02-GF01	7,13	39,58	4,22	4	1,3257	2,882	1,2295
3	a-03-GF01	6,68	39,09	6,5	4,5	1,562	3,3859	1,3456
4	a-04-GF01	6,6	41,13	10,3	3,33	1,4069	3,0556	1,2377
5	a-05-GF01	9,7	65,15	12,7	3	1,65	3,5731	1,2333
6	a-06-GF01	3,87	32,43	9,84	3,591	1,3369	2,9059	1,2248
7	a-07-GF01	6,34	38,25	16,76	4	1,728	3,7385	1,2316
8	a-08-GF01	7,25	52,04	7,32	4,667	1,7323	3,7477	1,2317
9	b-09-GF01	4,07	26,81	8,32	3,403	1,4089	3,0598	1,2197
10	b-10-GF01	5,28	34,78	7	5,5	1,4961	3,2458	1,2301
11	b-11-GF01	6,61	41,95	4,02	3,8377	1,5056	3,2661	1,228
12	b-12-GF01	9,75	60,91	6	4,527	1,5494	3,3592	1,2334
13	b-13-GF01	7,5	43,14	9,2	4	1,0738	2,3412	1,223
14	b-14-GF01	8,91	65,06	13,04	5	1,9586	4,226	1,2366
15	b-15-GF01	3,19	23,53	7,4	4,45	0,9614	2,099	1,2222
16	b-16-GF01	6,81	46,48	14,68	5	1,863	4,0241	1,244
17	d-17-GF01	7,37	53,97	4,94	5,21	1,5031	3,2606	1,2265
18	M-18-GF01	7,22	45,9	11	4	1,7157	3,7124	1,2277
19	M-19-GF01	8,67	52,04	10,9	4,167	1,5514	3,3635	1,2367
20	c-01-GF02	11,9	61,05	12,1	3,542	3,4227	7,2593	1,251
21	c-02-GF02	12,32	76,96	14,6	5,714	3,4176	7,2489	1,2571
22	c-03-GF02	11,58	78,1	9,5	6	3,5244	7,4663	1,2673
23	c-04-GF02	16,48	85,46	14	5	3,099	6,5977	1,2466
24	c-05-GF02	15,23	89,54	17,54	5	2,6501	5,6715	1,2485
25	c-06-GF02	14,79	70,66	12,36	5	3,0901	6,5793	1,2352
26	c-07-GF02	11,67	66	14,1	4,375	2,7027	5,7806	1,2454
27	c-08-GF02	11,1	54,98	11,79	5,102	3,2718	6,9515	1,2414
28	c-09-GF02	11,39	77,67	6,48	6,896	3,8748	8,1753	1,2663
29	c-10-GF02	7,12	43,21	8,88	4,75	3,813	8,0507	1,2361
31	d-11-GF02	11,48	74,05	11,6	5	3,782	7,9881	1,252
32	d-12-GF02	9,75	55,91	5,5	5	3,5414	7,5008	1,2602
33	d-13-GF02	12,5	62,5	21,1	4,5	3,5574	7,5333	1,2475
34	d-14-GF02	8,86	65,02	10	4,85	3,455	7,3251	1,2469
35	d-15-GF02	11,28	69,85	17,16	5,833	4,1364	8,701	1,2556
36	d-16-GF02	13,65	88,59	16,6	4	3,1387	6,679	1,2553
37	d-17-GF02	9,79	65,22	14,28	5	3,5668	7,5525	1,2588
38	d-18-GF02	10,51	50,09	11,96	5	2,8112	6,0051	1,2427
39	a-19-GF02	10,54	66,28	6,44	6	3,3775	7,1672	1,0369
40	b-20-GF02	5,67	43,53	7,18	4	2,8718	6,1302	1,241

Çizelge 7. 2 Sürekli bazalt fiber takviyeli kompozit numunelerin çekme deneyi sonuçları.

No	Numune	F_{max}	σ_{max}	% uzama	Elastiklik mod.	%V _f	%M _f	Yoğunluk
		kN	MPa		Gpa			gr/cm ³
1	e-02-BF01	7,46	33,99	2,6	4	0,7955	1,8276	1,2185
2	e-03-BF01	5,29	38,11	9,64	4,622	1,582	3,5977	1,2159
3	e-07-BF01	12,96	58,99	18,42	3,75	0,9872	2,2624	1,2248
4	e-08-BF01	9,92	72,57	12,32	5	2,8007	6,2705	1,2266
5	f-09-BF01	11,47	106,69	10,76	6,25	2,2439	5,0596	1,2149
6	f-13-BF01	9,75	63,17	13,58	4,444	1,3605	3,103	1,2155
7	f-16-BF01	6,78	50,46	10,56		1,4119	3,2181	1,2155
8	g-23-BF01	10,31	66,81	15,46	4,375	2,2549	5,0837	1,2284
9	g-24-BF01	6,84	59,29	10,82	6,667	2,2819	5,1429	1,2249
10	g-25-BF01	10,19	93,06	15,58	6,667	3,6526	8,0898	1,2169
11	h-27-BF01	10,2	92,07	16,52	5,71	2,7411	6,1415	1,2394
12	h-30-BF01	6,19	40,16	4,98	5	2,4005	5,4018	1,2302
13	h-31-BF01	6,57	37,3	15,76	4	2,1857	4,9322	1,2289
14	h-34-BF01	13,69	70,65	13,2	4,348	2,0649	4,6668	1,2271
15	h-35-BF01	7,75	37,84	8,08		1,909	4,323	1,2134
16	e-01-BF02	8,49	36,11	9,5	3,571	0,8193	1,8818	1,2248
17	e-04-BF02	4,79	35,99	5,66	4,284	1,3446	3,0673	1,2287
18	e-05-BF02	16,18	70,97	17,24	3,75	0,7948	1,8261	1,2243
19	e-06-BF02	5,88	47,19	11,1	4,28	1,3714	3,1273	1,2255
20	f-10-BF02	8,09	65,18	13,34	5	1,1761	2,6888	1,2267
21	f-11-BF02	14,26	107,07	16	5,07	1,4119	3,218	1,2207
22	f-12-BF02	8,59	70,82	10,9	4,815	1,2494	2,8537	1,2267
23	f-14-BF02	8,24	56,55	13,22	4	0,7593	1,7453	1,2236
24	f-15-BF02	17,01	70,93	13,14	3,846	0,7135	1,6411	1,2171
25	f-17-BF02	12,26	70,92	12	5	1,3218	3,0161	1,2494
26	g-18-BF02	7,66	47,71	11,9	4,167	1,8256	4,1386	1,2229
27	g-19-BF02	7,04	40,01	8,44	3,583	1,2968	2,9601	1,2351
28	g-20-BF02	5,89	41,37	9,18	4,21	1,8793	4,2574	1,2092
29	g-21-BF02	7,17	50,31	10,8	4,333	2,3573	5,3076	1,2213
30	g-26-BF02	10,69	92,3	19,92	4,167	1,8963	4,295	1,227
31	h-28-BF02	6,84	52,72	6,1	5	1,5256	3,472	1,2118
32	h-29-BF02	12,19	86,63	25,84	5	1,6945	3,8481	1,2273
33	h-32-BF02	12,83	98,95	15,56	5	2,1618	4,8797	1,2173
34	h-33-BF02	6,14	52,97	10,58	4,562	1,6287	3,7017	1,2208
35	h-36-BF02	5,46	33,7	9,36	4,374	1,8412	4,1732	1,2289

Test edilen kompozit malzemelere ait gerilme/gerinim eğrisi örneğin f-11-BF02 numunesine ait Şekil 7. 1'deki gibi elde edilmiştir. Diğer numunelere ait eğriler de benzer şekilde elde edilmiştir. Bu eğrilerden hareketle tüm numunelerin lineer elastik tutumda bulunduğu yani başka bir deyişle gevrek malzeme özelliği sergilediği saptanmıştır.



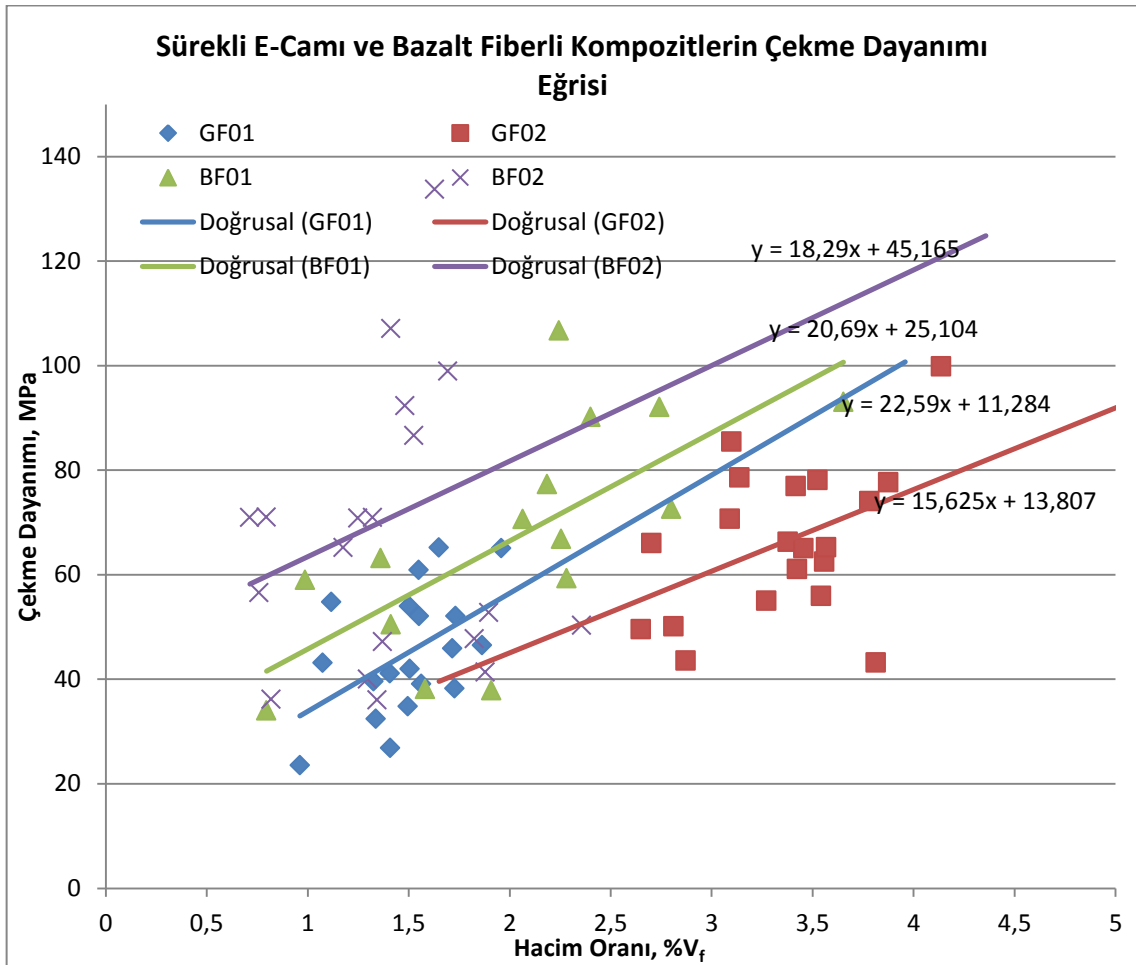
Şekil 7.1 Kompozit numunelerin gerilim-gerinim eğrisi.

Fiber oryantasyonuna paralel yönde uygulanan çekme yükü altındaki kompozit numune (a-02-GF01 numunesi) Şekil 7. 2'de görülmektedir. Çekme testi sonucunda üretilen kompozit numunelerin çekme dayanımı ($\sigma_{//}$) ve elastiklik modülü ($E_{//}$) saptanmıştır.

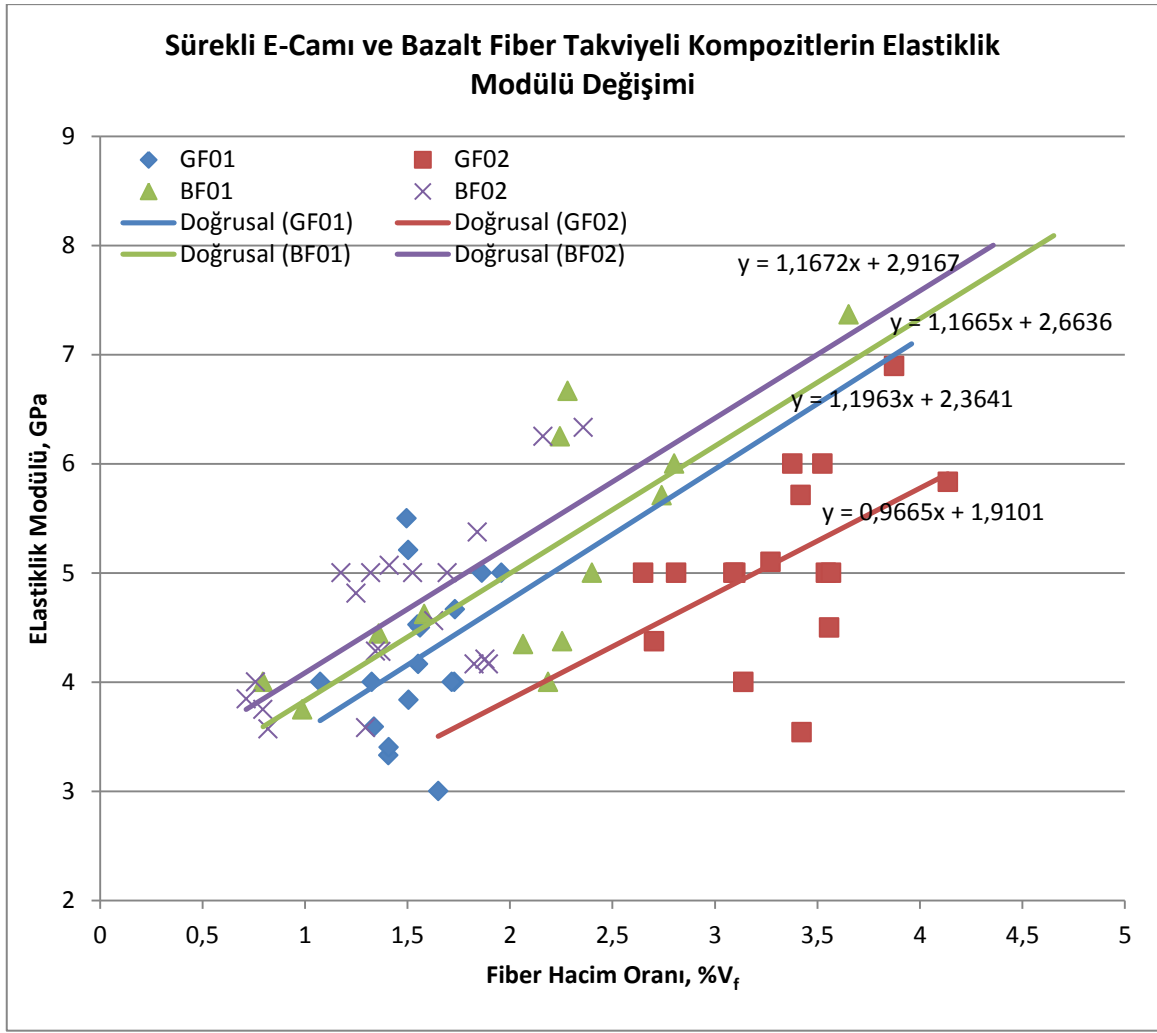


Şekil 7. 2 Çekme yükü altındaki sürekli fiber takviyeli kompozit numune.

Sürekli fiber takviyeli kompozit numunelere uygulanan çekme testi sonucunda fiber hacim oranına ($\%V_f$) göre artan çekme dayanımı Şekil 7. 3'te ve elastiklik modülü eğrileri 7. 4'da verilmektedir. Doğru denklemleri malzemelerin servis verecekleri yerlerde ihtiyaç duyulan mekanik değeri sağlayacak kompozit malzemeleri üretmede yol gösterici bir unsur olarak kullanılabilir. Grafiklerde görülen doğru denklemler kullanılarak teorik $\%1-5 V_f$ 'de elde edilecek teorik çekme dayanımı ve elastiklik modülü değerleri Tablo 7. 3'te belirtilmiştir.



Şekil 7. 3 Sürekli E-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı eğrisi.



Şekil 7. 4 Sürekli E-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozitlerin elastiklik modülü eğrisi.

Çizelge 7. 3 Sürekli fiber taklivelik kompozit numunelerde artan %V_f miktarına göre hesaplanan teorik çekme dayanımı ve teorik elastiklik modülü değerleri.

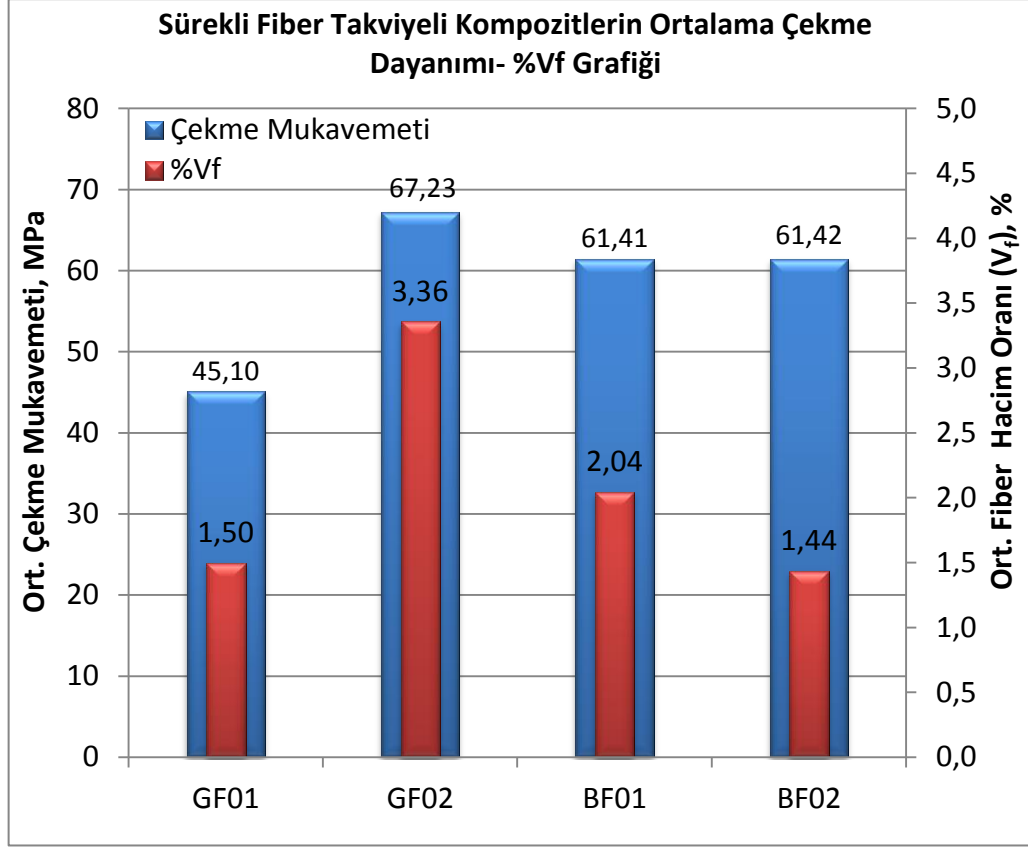
Takviye	Mekanik Özellik	%V _f				
		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
GF01	Çekme Dayanımı, MPa	33,874	56,464	79,054	101,644	124,234
	Elastiklik Modülü, GPa	3,5604	4,7567	5,953	7,1493	8,3456
GF02	Çekme Dayanımı, MPa	29,432	45,057	60,682	76,307	91,932
	Elastiklik Modülü, GPa	2,8766	3,8431	4,8096	5,7761	6,7426
BF01	Çekme Dayanımı, MPa	45,794	66,484	87,174	107,864	128,554
	Elastiklik Modülü, GPa	3,8301	4,9966	6,1631	7,3296	8,4961
BF02	Çekme Dayanımı, MPa	63,455	81,745	100,035	118,325	136,615
	Elastiklik Modülü, GPa	4,0839	5,2511	6,4183	7,5855	8,7527

Reel anlamda üretilen sürekli fiber takviyeli numunelerin birbiri üzerindeki üstünlüğünü göstermek için, deney gruplarına göre elde edilen çekme deneyi sonuçlarının ve hacim oranlarının (V_f) ortalama değerleri alınarak Şekil 7. 5 ve Şekil 7. 6'deki grafikler elde edilmiştir.

Çizelge 7. 4 Ortalama çekme deneyi, ortalama elastik modülü ve fiber hacim oranı sonuçları.

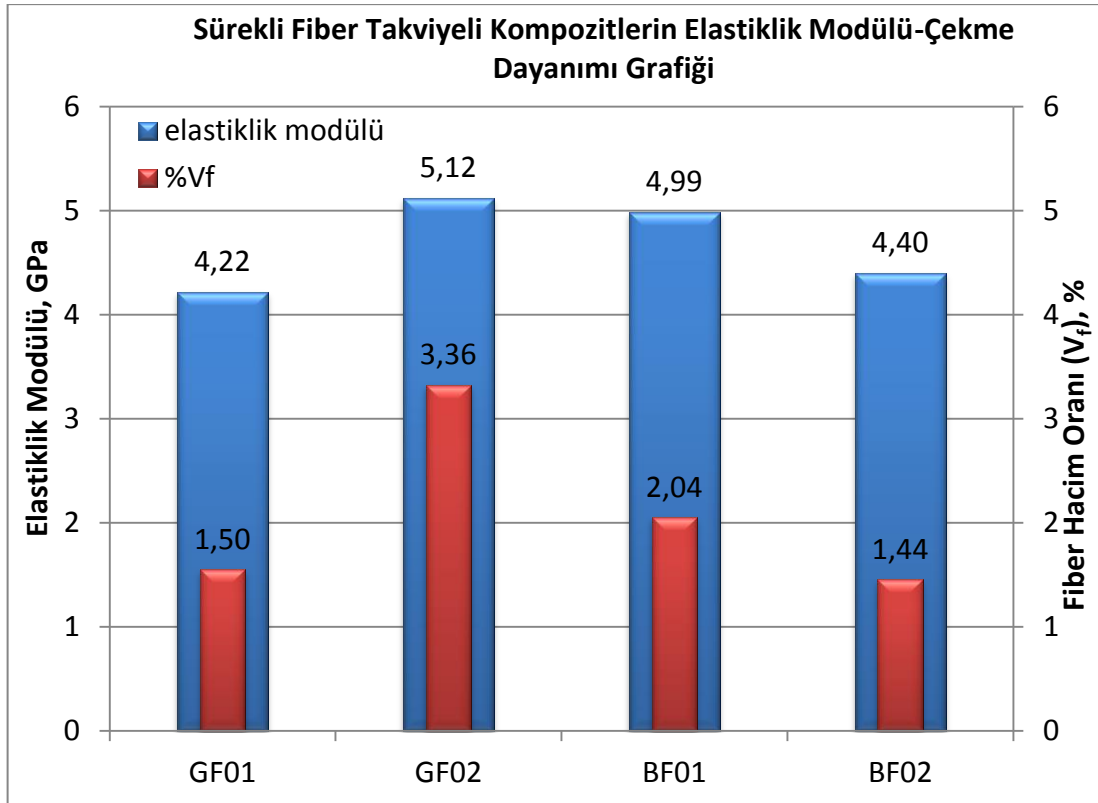
Numune	V_{f-ort} %	σ_{ort} MPa	E_{ort} GPa
GF01	1,5	45,1	4,22
GF02	3,36	67,23	5,12
BF01	2,04	61,41	4,99
BF02	1,44	61,42	4,40

Çizelge 7. 4'te gösterilen ortalama çekme mukavemeti ve hacim oranı verilerine göre Şekil 7. 5'teki çekme mukavemeti grafiği elde edilmiştir. Numunelerde en yüksek hacim oranı GF02 takviyeli kompozit numunelerde elde edilmiştir. Bunun nedeni GF02 demetinde, kullanılan diğer fiber çeşitlerine göre yaklaşık 2 kat fazla fiber bulunmasıdır. GF02 takviyeli numunelerde daha fazla hacim oranı elde edilmesine rağmen bazalt fiberli numunelere göre yüksek çekme mukavemeti gözlemlenmemiştir. GF01 takviyeli numuneler ile GF02 takviyeli numuneleri karşılaştıracak olursak, basit bir orantıyla aynı hacim oranına sahip olma durumunda GF01 takviyeli numunelerin daha yüksek çekme mukavemeti vereceği görülmektedir. Bazalt fiber takviyeli numunelerde ise farklı fiber hacim oranında yaklaşık aynı çekme mukavemeti değerleri deneysel olarak elde edilmiştir. Yaklaşık eşit çekme mukavemetine sahip BF01 ve BF02 takviyeli numunelerden BF02 takviyeli numunelerin hacim oranının daha az olması fiber çapının çekme mukavemeti üzerinde etkisini göstermektedir. Fiber çapının küçülmesi çekme mukavemeti üzerinde artan bir etki yapmaktadır.



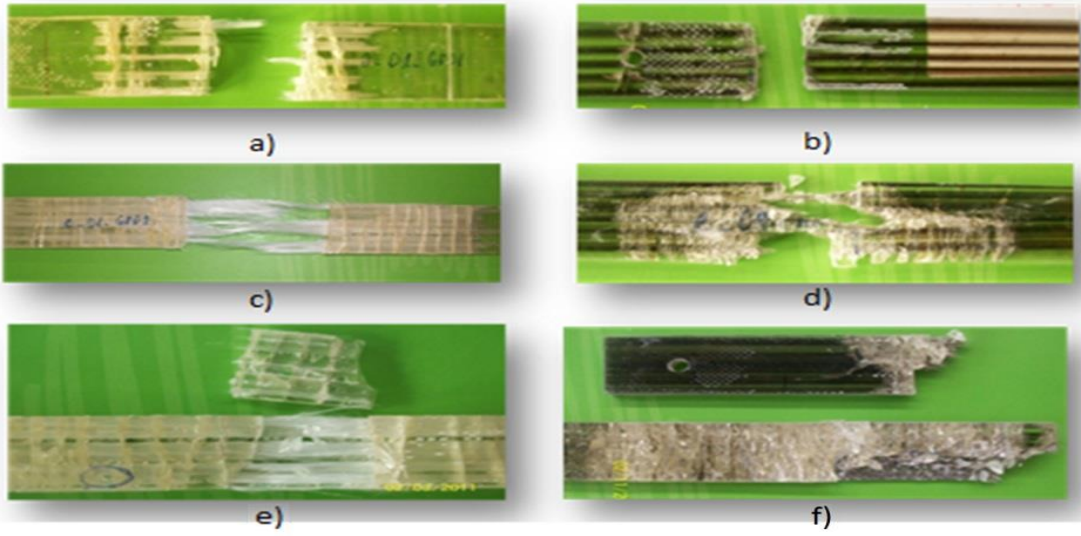
Şekil 7. 5 Ortalama çekme mukavemeti ve % fiber hacim oranı grafiği.

Şekil 7. 5'ten alınan ortalama çekme mukavemeti değerlerine göre eşit fiber hacminde (örneğin %5,0 V_f 'de) çekme dayanımı hesaplanmıştır. Buna göre %5 fiber hacim oranında elde edilen çekme dayanımı için BF02 takviyeli kompozit numuneler daha kalın çaplı BF01 takviyeli numunelerden %6,2, GF01 takviyeli numunelerden %9,9, GF02 takviyeli numunelerden %48,6 daha yüksek çekme mukavemetine sahip olacaktır. BF01 takviyeli numunelerin çekme mukavemeti GF01 takviyelilerden %3,4, GF02 takviyelilerden ise %39,8 daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Cam fiber takviyeli kompozit numunelerin çekme mukavemetini kendi aralarında karşılaştırdığımızda ise GF01 takviyeli numuneler GF02 numunelerden %35 daha iyi performans sergilemiştir.



Şekil 7. 6 Ortalama elastiklik modülü ve % fiber hacim oranı grafiği.

Şekil 7. 6’da gösterilen elastiklik modülü değerlerine göre cam ve bazalt fiber takviyeli kompozitleri karşılaştırdığımızda bazalt fiber takviyelilerin cam fiber takviyelilerden daha yüksek elastiklik modülüne sahip olduğu görülmektedir. Eşit fiber hacminde (örneğin %5,0 V_f ’de) BF02 takviyeli numuneler BF01 takviyelilerden %3, GF01 takviyelilerden %4,9, GF02 takviyelilerden de %29,8 daha yüksek çekme modülüne sahiptirler. BF01 takviyeli numunelerin elastiklikmodülü GF01 takviyelilerden %1,8, daha az iken, GF02 takviyelilerden %26 daha yüksektir. GF01 takviyeli numunelerin elastiklik modülü GF02 takviyeli numunelerden %23,8 daha yüksek olarak bulunmuştur.



Şekil 7. 7 Çekme testine tabi tutulmuş sürekli fiber takviyeli kompozit numuneler. a) ve b) Gevrek kırılma göstermiş numuneler. c) ve d) çoklu kırılma ve fiber sıyrılması göstermiş numuneler. e) ve f) çoklu kırılmave delaminasyon göstermiş numuneler.

Kompozit malzemelerde fiber sıyrılması (fiber pull-out) ve tabaka ayrılması (delaminasyon) en sık görülen hasar çeşitleridir. Şekil 7. 7’de çekme testi sonucunda oluşan kırılmaların makroskobik görüntüleri yer almaktadır. Fiber sıyrılması, takviye malzemesi ile matris arasında iyi ara yüzey oluşmaması durumunda meydana gelmektedir. GF02 takviyeli kompozit numunelerde fiber sıyrılması diğer numunelere oranla daha fazla görülmüştür. Bunun sebebi, GF02’li numunelerin çok yoğun fiber içermesi ve bu yüzden reçinenin fiberleri tam olarak ıslatamayıp iyi arayüzey oluşturamamış olmasıdır. Diğer taraftan bu yoğun fiber içeriği ile fiber yapı içerisinde birbirlerine çok yakın konumlanmış ve deformasyon sırasında gerilim homojen olarak dağılmamıştır.

Bazalt fiber takviyeli kompozit numunelerden BF02 takviyelilerde daha yüksek mekanik mukavemet değerleri elde edilmiştir. Bu numunelerin kırılma şekilleri makroskobik olarak incelendiğinde, numunelerde çoklu kırılmalar gözlemlenmiştir. Bu numunelerde cam fiber takviyeli numunelere göre daha iyi ara yüzey elde edilmiş ve dolayısıyla matristen fibere yük aktarımı daha iyi sağlanmıştır. Çekme kuvvetiyle gevrek karakterli matrisin önce kırılması sırasında fiberler matris içerisinden sıyrılmamış, aksine fiberler tam olarak kopuncaya kadar matriste çoklu kırılmalar meydana getirmişlerdir. BF02 takviyeli kompozit numunelerin E-camı fiber takviyeli kompozit numunelerden daha

yüksek mukavemete sahip olması iyi ara yüzey özellikleri ve daha ince fiber çapı ile açıklanabilir.

El yatırması ve vakum bagging yöntemi ile üretilmiş dokuma takviyeli bazalt ve E-camı takviyeli kompozit plakalar halinde üretildikten sonra deneyler üretilen kompozit plaka bazında alt gruplarda değerlendirilmiştir. Üretilen her plakadan 4-6 adet olmak üzere toplam 53 adet çekme numunesi incelenmiştir. Test sonuçlarını değerlendirirken aynı plakadan üretilmiş numunelerin test sonuçlarının ortalaması alınmıştır (Çizelge 7. 5 ve Çizelge 7.6).

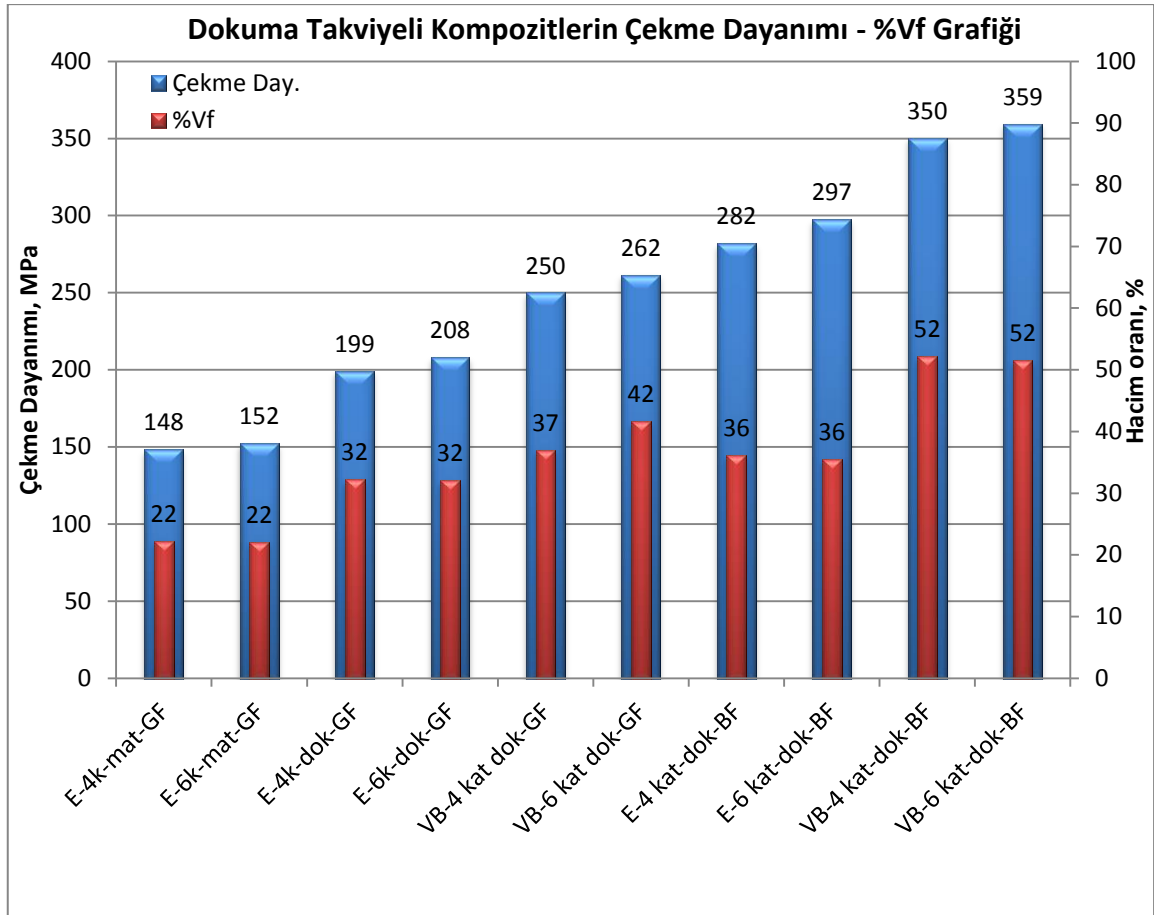
Çizelge 7. 5 Dokuma ve keçe takviyeli, el yatırması ve vakum bagging yöntemleri ile üretilmiş E-camı takviyeli numunelerin çekme deneyi sonuçları.

Numune	NO	F_{max}	σ_{max}	Takviye
		N	MPa	%V _f
E-4k-mat-GF	1	10,69	137,12	22,2608
	2	10,41	123,53	22,2608
	3	10,97	137,55	22,2608
	4	11,65	159,39	22,2608
	5	10,99	130,22	22,2608
	6	11,38	142	22,2608
ort.		11,02	138,3	
E-6k-mat-GF	1	19,57	167,7	22,0932
	2	19,04	159,56	22,0932
	3	16,99	155,98	22,0932
	4	17,92	140,28	22,0932
	5	18,36	153,67	22,0932
	6	17,78	135,44	22,0932
ort.		18,28	152,11	
E-4k-dok-GF	1	13,39	220,6	32,1974
	2	15,51	216,15	32,1974
	3	15,93	255,71	32,1974
	4	16,41	260,32	32,1974
	5	14,79	284,97	32,1974
	6	16,46	257,83	32,1974
ort.		15,42	249,26	
E-6k-dok-GF	1	19,82	178,07	32,0298
	2	22,31	109,79	32,0298
	3	20,48	194,13	32,0298
	4	18,44	201,96	32,0298
ort.		20,26	170,99	
VB-4 kat dok-GF	1	8,54	197,21	37,019
	2	15,95	296,59	37,019
	3	17,64	303,6	37,019
	4	14,73	254,06	37,019
	5	16,07	275,91	37,019
	6	17,28	294,7	37,019
ort.		15,11	269,91	
VB-6 kat dok-GF	1	17,14	221,19	45,581
	2	19,73	284,73	45,581
	3	22,11	330,22	45,581
	4	18,96	236,09	45,581
	5	18,03	197,69	45,581
	6	22,44	284,65	45,581
ort.		19,68	261,51	

Çizelge 7. 6 Dokuma ve keçe takviyeli, el yatırması ve vakum bagging yöntemleri ile üretilmiş bazalt fiber takviyeli numunelerin çekme deneyi sonuçları.

Numune	NO	F_{max}	σ_{max}	Takviye
		N	MPa	%V _f
E-4 kat-dok-BF	1	11,41	278,3579	39,112
	2	13,18	320,6064	39,112
	3	12,58	289,98	39,112
	4	11,53	257,5506	39,112
	5	10,22	262,5225	39,112
ort.		11,78	281,8	
E-6 kat-dok-BF	1	16,86	305,6075	35,501
	2	19,83	313,6571	35,501
	3	20,55	308,1422	35,501
	4	20,2	310,0747	35,501
	5	24,72	349,2428	35,501
ort.		20,43	317,34	
VB-4 kat-dok-BF	1	11,17	335,0169	52,198
	2	12,08	375,4736	52,198
	3	11,48	350,3161	52,198
	4	11,39	340,0751	52,198
ort.		11,53	350,22	
VB-6 kat-dok-BF	1	16,79	346,8292	51,555
	2	18,27	385,1749	51,555
	3	17,29	338,8402	51,555
	4	16,48	366,0107	51,555
	5	16,92	360,1119	51,555
ort.		17,15	359,39	

El yatırması ve vakum bagging yöntemi ile üretilmiş dokuma takviyeli bazalt ve E-camı takviyeli kompozit numelerin çekme deneyi sonucunda elde edilen çekme dayanımı-%hacim oranı sonuçları Şekil 7. 8’de verilmiştir.



Şekil 7. 8 dokuma takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı-%hacim oranı grafiği.

Dokuma takviyeli kompozit numunelerin karakterizasyon deneylerinin diğer bir amacı da üretim yönteminin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini gözlemlemektir. Numuneler el yatırması ve vakum bagging olmak üzere iki farklı yöntem kullanılarak üretilmiştir. Vakum bagging ile üretilmiş numuneler el yatırması ile üretilmiş numunelere göre çok daha düzgün, ince kesitli olarak elde edilmiştir. Eşit miktarda takviye malzemesi ile vakum bagging yöntemi kullanılarak üretilmiş numuneler el yatırması ile üretilenlere göre daha incedir. Aynı takviye miktarında daha ince numune elde edilmesi de yüklemenin geldiği yüzey alanını azalttığından, çekme dayanımını arttırıcı yönde etki yapmaktadır. Üretim yönteminin mekanik özelliklere diğer bir etkisi de takviye oranındaki artıştır. Kompozitlerin vakum bagging yöntemi ile üretilmesiyle takviye malzemenin kompozit içerisindeki % hacim oranı yaklaşık %75 artmıştır. Hacim oranındaki artış karışımlar kuralına göre dayanım ve elastiklik modülünde de artış sağlamaktadır.

Takviye formlarından keçe ve dokuma takviye edilirken aynı miktarda keçe takviyeyi ıslatmak için daha fazla miktarda polyester reçine kullanılmıştır. Böylece dokuma takviyeli kompozitlerde fiber hacim oranı keçe takviyelilere göre daha yüksek elde edilmiştir. Dolayısıyla da el yatırması ile üretilmiş dokuma takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı, yine el yatırması ile üretilmiş keçe takviyeli numunelerden yaklaşık %20 yüksek olarak tespit edilmiştir.

El yatırması ile üretilmiş numunelerde, bazalt dokuma hacim oranları %11-17 daha fazla elde edilmiştir. Çekme dayanımları ise bazalt dokuma takviyeli numunelerde cam takviyeli numunelerden %29-46 daha yüksek bulunmuştur.

Vakum bagging yöntemi ile üretilmiş dokuma takviyeli numuneler karşılaştırıldığında bazalt dokuma takviyeli numunelerin hacim oranları, cam dokuma takviyeli numunelerden %11-28 daha fazla ve çekme dayanımları da %22-27 daha fazladır.

7.2 Darbe Testi Sonucunda Elde Edilen Bulgular

Sürekli fiber takviye E-camı takviyeli numuneler üzerinde toplam 56 adet (GF01 takviyeli 25 adet, GF02 takviyeli 31 adet), bazalt fiber takviyeli numuneler üzerinde toplam 71 adet (BF02 takviyeli 22 adet, BF02 takviyeli 49 adet) darbe deneyi yapılmıştır. Yapılan darbe deneyi sonuçları, kırılma enerjisi yolu ile hesaplanan kırılma tokluğu değerleri ve kül testi yolu ile hesaplanan ağırlıkça/hacimce fiber oranları Çizelge 7.7’te verilmektedir.

Çizelge 7. 7 Sürekli E-camı ve bazalt fiber takviyeli numunelerin darbe testi sonuçları.

No	Numune	Kırılma enerjisi	Kırılma tokluğu	%V _f	%M _f
		E _c (J)	a _{cu} (kJ/m ²)		
1	D-a-01-GF01	3,5	55,2553	1,8711	4,0412
2	D-a-02-GF01	3,3	49,7593	1,8929	4,0874
3	D-a-04-GF01	3,2	52,7962	1,3803	2,9986
4	D-a-05-GF01	2,9	50,8111	1,6695	3,6146
5	D-a-06-GF01	1,8	31,0328	0,8186	1,7904
6	D-a-08-GF01-a	5,2	60,4696	2,38	5,1098
7	D-a-08-GF01-b	3,4	53,7976	2,38	5,1098
8	D-b-09-GF01	3	44,6362	1,7406	3,7652
9	D-b-10-GF1	3,5	57,5702	2,4312	5,2165
10	D-b-11-GF01-a	2,9	43,3195	1,6459	3,5643

No	Numune	Kırılma enerjisi	Kırılma tokluğu	%V _f	%M _f
		E _c (J)	a _{cU} (kJ/m ²)		
11	D-b-11-GF01-b	2,2	37,0256	1,686	3,6495
12	D-b-12-GF01-a	4,2	71,2488	2,1922	4,7169
13	D-b-12-GF01-b	3,8	56,1051	2,4233	5,2
14	D-b-12-GF01-c	4,8	53,5166	2,4364	5,2273
15	D-b-13-GF01	0,3	4,2077	0,8138	1,78
16	D-b-14-GF01	6,4	97,7517	2,435	5,2243
17	D-b-15-GF01-a	3,1	51,0705	1,8775	4,0549
18	D-b-15-GF01-b	1,4	15,7504	1,374	2,9852
19	D-a-15-GF01	4,6	69,7295	1,7017	3,6829
20	D-d-17-GF01	3	42,8758	1,3363	2,9046
21	D-M-18-GF01-a	5,8	63,1668	2,2384	4,8138
22	D-M-18-GF01-b	4,6	56,1006	2,1899	4,7122
23	D-M-18-GF01-c	3,4	53,3983	1,91	4,1234
24	D-M-18-GF01-d	3,5	60,3307	1,8739	4,0472
25	D-M-19-GF01	4	56,4158	1,5663	3,3951
26	D-c-02-GF02-a	5,8	92,5334	4,4379	9,3029
27	D-c-02-GF02-b	5,4	118,1278	4,3035	9,0351
28	D-c-03-GF02-a	3,2	54,9129	4,5443	9,5143
29	D-c-03-GF02-b	3,6	78,9401	4,4031	9,2337
30	D-c-03-GF02-c	3,9	57,4011	3,0485	6,4939
31	D-c-03-GF02-d	4	76,5732	3,465	7,3456
32	D-c-04-GF02-a	2,4	34,3801	3,3958	7,2047
33	D-c-04-GF02-b	3,3	57,585	2,7903	5,9619
34	D-c-04-GF02-c	4	55,8745	3,8861	8,1981
35	D-c-04-GF02-d	3	48,0168	3,7921	8,0085
36	D-c-05-GF02-a	4,6	55,0648	3,6602	7,7418
37	D-c-05-GF02-b	7,3	83,0648	2,8527	6,0908
38	D-c-07-GF02-a	4,2	57,1335	3,977	8,381
39	D-c-07-GF02-b	2,8	39,1538	3,4214	7,2567
40	D-c-07-GF02-c	3	47,8872	3,4705	7,3566
41	D-c-07-GF02-d	3,3	56,7615	3,0846	6,568
42	D-c-08-GF02-a	1,6	20,6926	3,0078	6,4103
43	D-c-08-GF02-b	1,4	21,4903	3,5721	7,5631
44	D-c-09-GF02	4,5	64,8794	4,2452	8,9188
45	D-c-10-GF02-a	4,2	66,015	4,0029	8,4331
46	D-c-10-GF02-b	2	35,9664	3,982	8,3912
47	D-c-10-GF02-c	5,2	64,5793	4,4828	9,3923
48	D-d-11-GF02-a	1,8	30,012	4,2164	8,8612
49	D-d-11-GF02-b	3,6	61,7449	4,5485	9,5227
50	D-d-12-GF02-a	6	90,0366	2,8995	6,1873

No	Numune	Kırılma enerjisi	Kırılma tokluğu	%V _f	%M _f
		E _c (J)	a _{cU} (kJ/m ²)		
51	D-d-12-GF02-b	4,3	72,2367	3,615	7,6501
52	D-d-14-GF02-a	0,4	6,6885	3,1878	6,7796
53	D-d-14-GF02-b	3,5	50,4836	3,0774	6,5532
54	D-d-14-GF02-c	3,2	47,2822	3,5123	7,4418
55	D-a-19-GF02	1,6	22,263	2,7145	5,805
56	D-b-20-GF02	3,2	48,6791	2,6927	5,7599
57	D-e-02-BF01-a	1,5	17,7486	0,7854	1,8047
58	D-e-02-BF01-b	4,2	31,9708	1,5586	3,5456
59	D-e-02-BF01-c	2,6	29,6275	0,8622	1,9792
60	D-e-03-BF01-a	4,2	94,4058	2,4272	5,4601
61	D-e-03-BF01-b	3,4	105,2189	3,0483	6,8033
62	D-e-07-BF01-a	3,8	30,0228	1,5558	3,5395
63	D-e-07-BF01-b	2,3	28,7322	1,5118	3,4413
64	D-e-07-BF01-c	3,6	40,8821	1,1412	2,6101
65	D-e-08-BF01-a	3	47,8583	1,7997	4,0813
66	D-e-08-BF01-b	3,9	44,2137	1,557	3,542
67	D-e-08-BF01-c	2,2	33,3495	1,3418	3,061
68	D-f-09-BF01	2,4	38,072	1,8214	4,1294
69	D-f-13-BF01-a	1,9	29,9103	1,1348	2,5958
70	D-f-13-BF01-b	4,4	64,0429	2,6136	5,8655
71	D-f-13-BF01-c	3,3	49,3637	1,4952	3,4041
72	D-f-16-BF01	2,8	49,0395	1,5775	3,5877
73	D-g-23-BF01	4,3	63,0143	1,8021	4,0866
74	D-g-24-BF01	3	39,6536	1,2919	2,949
75	D-g-25-BF01	2	39,0608	1,2427	2,8387
76	D-h-30-BF01	2,7	41,2674	1,3803	3,1473
77	D-h-31-BF01	1,5	31,5455	1,12	2,5624
78	D-h-34-BF01	2,3	33,0688	1,3376	3,0517
79	D-e-01-BF02-a	2,4	25,2981	0,8547	1,9623
80	D-e-01-BF02-b	2	22,1508	0,9271	2,1264
81	D-e-04-BF02	2,3	41,8383	1,3229	3,0187
82	D-e-05-BF02	1,4	15,5257	0,8901	2,0426
83	D-e-06-BF02-a	4	59,4734	1,5861	3,6069
84	D-e-06-BF02-b	1,1	20,7584	1,2999	2,967
85	D-e-06-BF02-c	2,5	48,1252	1,2573	2,8714
86	D-f-10-BF02-a	2,8	44,1039	1,1598	2,652
87	D-f-10-BF02-b	2,5	37,5782	1,1204	2,5634
88	D-f-10-BF02-c	2,8	37,1542	1,0824	2,4776
89	D-f-11-BF02	3,1	49,7091	1,6266	3,697
90	D-f-12-BF02-a	2,6	37,0573	1,1029	2,5239

No	Numune	Kırılma enerjisi	Kırılma tokluğu	%V _f	%M _f
		E _c (J)	a _{cU} (kJ/m ²)		
91	D-f-12-BF02-b	1,2	17,7276	0,9094	2,0862
92	D-f-12-BF02-c	2,4	44,5852	1,0569	2,42
93	D-f-14-BF02-a	1,7	24,8164	2,6956	6,0432
94	D-f-14-BF02-b	0,9	17,6013	0,7378	1,6964
95	D-f-14-BF02-c	2	30,5536	0,9168	2,103
96	D-f-15-BF02-a	3,1	27,3385	0,8812	2,0224
97	D-f-15-BF02-b	1,7	19,0301	0,8055	1,8505
98	D-f-15-BF02-c	1,6	16,6249	0,7467	1,7167
99	D-f-17-BF02-a	3,4	38,5691	1,684	3,8247
100	D-f-17-BF02-b	3,3	48,636	1,5664	3,5629
101	D-f-17-BF02-c	2,9	44,4236	1,48	3,3702
102	D-g-18-BF02-a	3,2	56,9383	1,0273	2,3533
103	D-g-18-BF02-b	2,4	40,9526	1,3227	3,0183
104	D-g-18-BF02-c	1,7	27,9609	1,1374	2,6016
105	D-g-19-BF02-a	2,7	42,0015	1,134	2,5939
106	D-g-19-BF02-b	2,1	35,3815	1,1178	2,5574
107	D-g-20-BF02-a	2,8	55,0607	1,7356	3,9392
108	D-g-20-BF02-b	1,2	32,6059	1,5639	3,5575
109	D-g-21-BF02	2,6	39,5608	1,468	3,3435
110	D-g-22-BF02-a	3,9	68,6067	1,5592	3,5469
111	D-g-22-BF02-b	1,3	25,512	1,5564	3,5407
112	D-g-26-BF02-a	1,1	31,1262	0,9652	2,2127
113	D-g-26-BF02-b	1,4	24,4414	1,0434	2,3895
114	D-g-26-BF02-c	1,2	31,2256	0,7925	1,8208
115	D-h-28-BF02-a	2,5	34,7297	1,7337	3,935
116	D-h-28-BF02-b	1,9	46,1398	1,185	2,7088
117	D-h-28-BF02-c	1,4	19,2756	1,1968	2,7354
118	D-h-29-BF02-a	1,5	24,2492	1,1923	2,7252
119	D-h-29-BF02-b	2,1	32,928	1,1986	2,7394
120	D-h-29-BF02-c	1,6	35,7346	1,2936	2,953
121	D-h-32-BF02-a	2,5	29,8455	1,3799	3,1465
122	D-h-32-BF02-b	2	27,4715	1,579	3,5911
123	D-h-32-BF02-c	2,6	46,2193	1,3834	3,1542
124	D-h-33-BF02-a	1,9	35,9906	1,1533	2,6375
125	D-h-33-BF02-b	2	55,7656	1,422	3,2406
126	D-h-36-BF02-a	2,5	38,3421	1,3951	3,1804
127	D-h-36-BF02-b	1,6	36,6764	1,2393	2,8309

El yatırması ve vakum bagging yöntemi ile üretilmiş E-camı ve bazalt fiber takviyeli numuneler diğer test gruplarında olduğu gibi burada ayrı değerlendirilmiş olup, bu numunelerin darbe testi sonuçları, (6.1) denklemi yardımı ile hesaplanmış kırılma tokluğu ve numunelerin içerdiği hacimce fiber oranı Çizelge 7.8 ve Çizelge 7. 9'da verilmektedir.

Çizelge 7. 8 El yatırması ve vakum bagging yöntemi ile üretilmiş E-camı fiber takviyeli darbe dayanımı, kırılma tokluğu ve %V_f oranı.

Numune	No	Sehim mm (x)	F _{max} N (y)	Eğme Dayanımı σ_f (MPa)	Sehim %	Elastiklik Modülü E _f (MPa)	%M _f
E-4k-mat-GF	1	6,92	358,9	226,24	0,05	8574,31	
	2	7,48	392,24	226,17	0,06	7489,7	
	3	6,91	376,55	191,47	0,06	6265,33	
	4	7,34	377,53	228,98	0,06	7365,76	
	5	7,19	350,07	205,34	0,06	6291,21	
ort.				215,64	0,06	7197,26	22,26
E-6k-mat-GF	1	4,61	852,14	200,09	0,05	6505,64	
	2	5,31	698,19	241,33	0,05	7594,87	
	3	4,6	822,72	197,69	0,06	6157,91	
	4	5,03	856,06	213,58	0,06	6448,55	
	5	5,03	898,23	215,5	0,06	6260,68	
ort.				213,64	0,06	6593,53	22,09
E-4k-dok-GF	1	10,49	332,42	359,85	0,06	11156,81	
	2	7,48	370,67	336,08	0,05	13187,9	
	3	9,37	361,84	364,41	0,06	11737,64	
	4	9,05	424,6	373,24	0,06	12089,41	
	5	9,83	394,2	392,91	0,06	12249,55	
ort.				365,3	0,06	12084,26	32,2
E-6k-dok-GF	1	7,38	698,19	258,19	0,07	9314,88	
	2	6,48	716,82	342,53	0,06	19062,1	
	3	6,19	678,58	300,18	0,06	11908,47	
	4	5,18	793,31	299,22	0,05	11044,97	
	5	5,9	893,33	348,43	0,06	11624,04	
ort.		6,226	756,05	309,71	0,06	12590,89	32,03
VB-4k dok-GF	1	9,62	72,32	81,15	0,04	2839,43	
	2	13,23	70,85	93,34	0,05	2801,61	
	3	14,36	73,05	101,89	0,05	2789,99	
	4	13,81	76,98	96,87	0,04	3748,87	
	5	11,62	66,19	87,06	0,05	2536,43	
ort.				92,06	0,05	2943,27	37,02
VB-6 k dok-GF	1	9,87	130,91	107,17	0,01	2942,53	
	2	10,23	124,29	130,85	0,01	4026,78	
	3	10,2	61,78	80,84	0,06	2483,59	
	4	10,6	114,98	118,85	0,01	3922,3	
	5	9,34	106,4	141	0,01	5212,86	
	6	10,45	68,13	79,18	0,05	2951,96	
ort.				109,65	0,02	3590	45,58

Çizelge 7. 9 El yatırması ve vakum bagging yöntemi ile üretilmiş bazalt fiber takviyeli darbe dayanımı, kırılma tokluğu ve %V_f oranı.

Numune	No	Sehim	Fmax	Eğme Dayanımı	Sehim	Elastiklik Modülü	%M _f
		mm (x)	N (y)	σ_f (MPa)	%	E _f (MPa)	
E-4 k-dok-BF	1	13,27	22,06	51,31	1,25	2702,66	
	2	17,04	22,8	47,32	1,6	2311,63	
	3	12,59	22,31	48,72	1,16	2888,46	
ort.				49,12	1,34	2634,25	39,11
E-6 k-dok-BF	1	7,08	54,67	51,81	0,07	2673,71	
	2	7,43	54,18	57,12	0,07	3640,27	
	3	7,24	58,84	57,58	0,06	2701,04	
ort.				55,5	0,06	3005,01	35,5
VB-4 k-dok-BF	1	10,16	11,52	47,56	5,18	2869,95	
	2	7,76	11,03	38,83	5	2617,05	
	3	10,33	13,24	50,64	3,36	2644,16	
ort.				45,68	4,51	2710,39	52,2
VB-6 k-dok-BF	1	6,31	37,02	41,18	0,17	1999,95	
	2	5,54	34,32	53	0,17	3317,39	
	3	6,54	30,15	51,63	0,28	3446,36	
ort.				48,6	0,21	2921,23	51,56

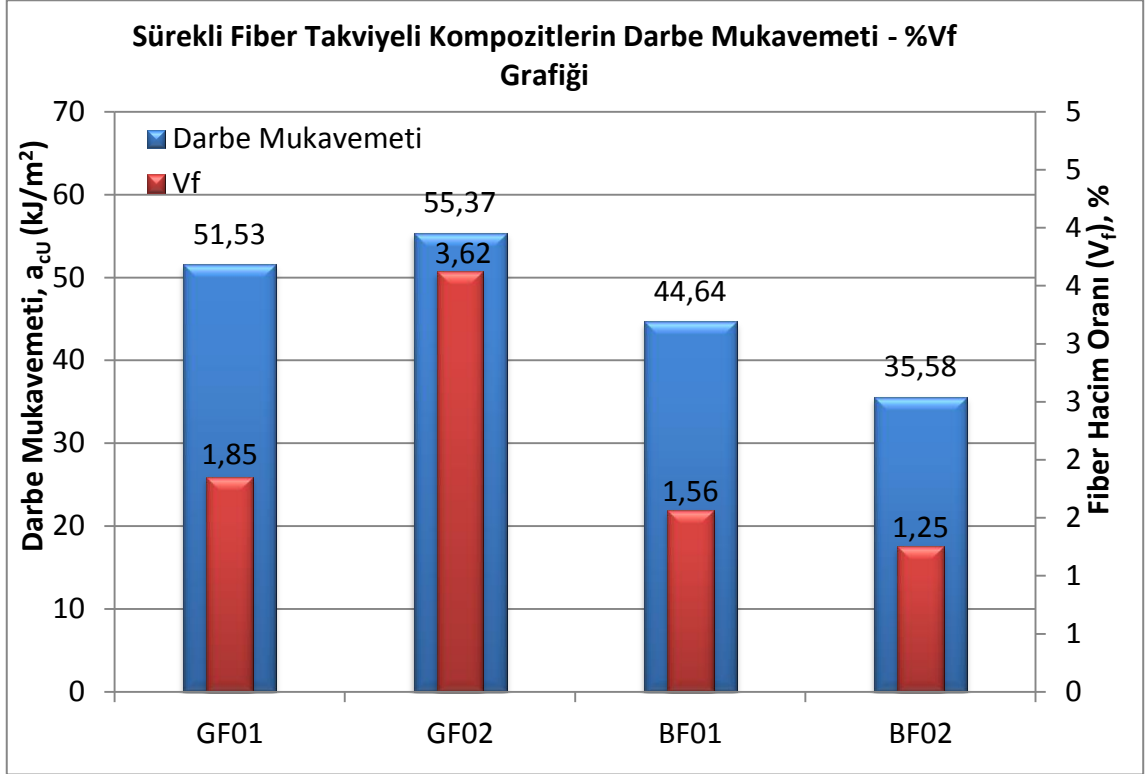
Darbe deneyi sonrasında sürekli cam ve bazalt fiber takviyeli kompozit numunelerinin (GF01, GF02, BF01, BF02) kırılması ile elde edilen kırılma enerjisi değeri (6.1) yardımı ile fiber takviyeli kompozitlerin darbe mukavemeti (a_{cu}) hesaplanmıştır. Hesaplanan darbe mukavemeti ve bunu sağlayan fiber hacim oranı Çizelge 7. 10'da verilmiştir. Ayrıca numunelerin, teorik ($V_{f-teorik}$) olarak %1,0-5,0 hacim oranına sahip olduklarında gösterebilecekleri teorik darbe mukavemet değerleri ($a_{cu-teorik}$) de üretilen kompozitleri karşılaştırmak amacıyla hesaplanarak burada verilmiştir.

Çizelge 7. 10 Sürekli fiber takviyeli kompozit numunelerde artan %V_f oranına göre kırılma tokluğu değerleri.

Takviye		%V _f				
		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
GF01	Kırılma Tokluğu, a_{cu} (kJ/m ²)	25,4615	54,7285	83,9955	113,2625	142,5295
GF02	Kırılma Tokluğu, a_{cu} (kJ/m ²)	21,6325	35,6755	49,7185	63,7615	77,8045
BF01	Kırılma Tokluğu, a_{cu} (kJ/m ²)	27,2098	56,5078	85,8058	115,1038	144,4018
BF02	Kırılma Tokluğu, a_{cu} (kJ/m ²)	30,5477	63,4747	96,4017	129,3287	162,2557

Çizelge 7. 11 Darbe deneyi sonuçlarına göre hesaplanmış ortalama kırılma tokluğu ve ve fiber hacim oranı sonuçları.

Numune	a_{cu} MPa	V_{f-ort} %
GF01	51,53	1,85
GF02	55,37	3,62
BF01	44,64	1,56
BF02	35,58	1,25



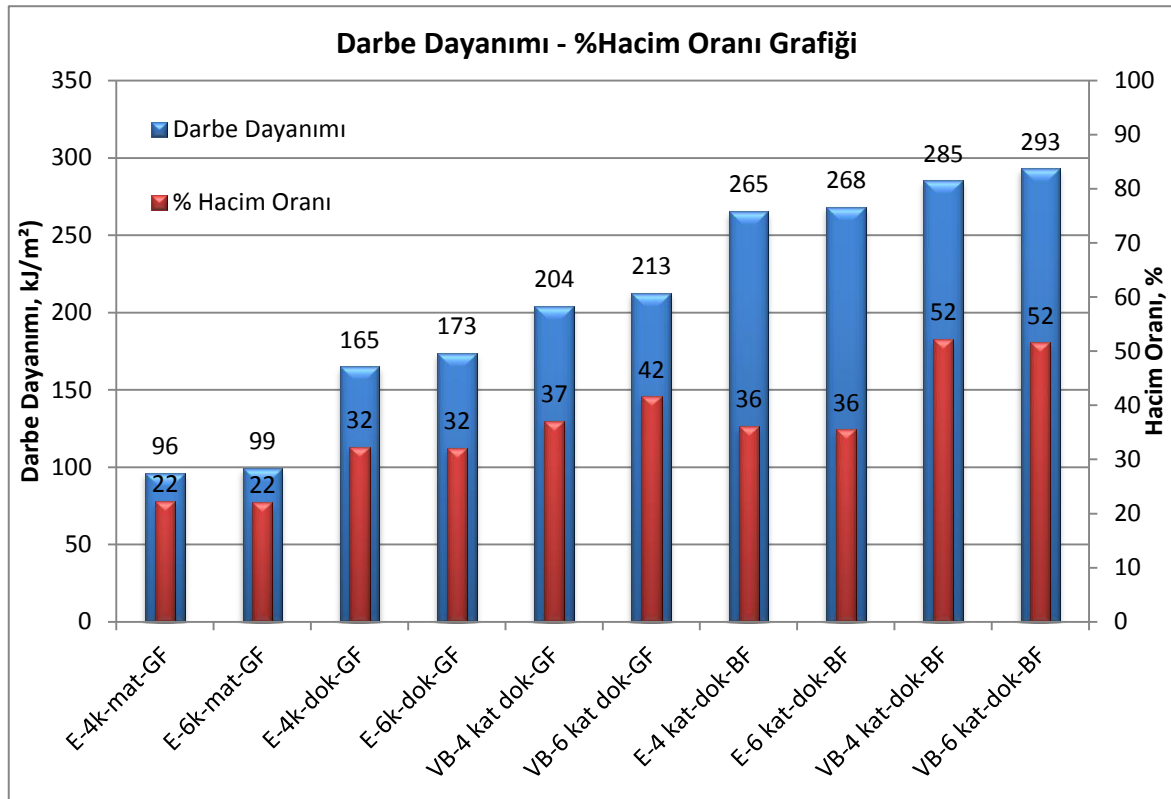
Çizelge 7. 11 Ortalama darbe mukavemeti ve ortalama fiber hacim oranı grafiği.

Darbe deneyi sonucunda sürekli fiber takviyeli numunelerden elde edilen darbe mukavemeti fiber hacim oranı ile değişimi Şekil 7. 8’de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre aynı fiber hacim oranında (örneğin %5,0 V_f ’de) BF01ve BF02 takviyeli kompozit numunelerden birbirlerine yakın sonuçlar alınmakla birlikte, BF01 görece biraz daha iyi sonuçlar vermiştir. BF02 takviyeli numunelerin darbe mukavemeti, BF01 takviyelilerden %12,4, GF01 takviyelilerden %13,8 ve GF02 takviyelilerden %108,5 daha yüksek bulunmuştur. Cam fiber takviyeli kompozit numuneleri karşılaştırdığımızda ise GF01 takviyeli numunelerin GF02 takviyeli numunelerden %83,2 daha yüksek darbe mukavemetine sahip olduğu görülmektedir.

Bazalt ve E-camı dokuma takviyeli kompozit numunlerin darbe deneyi sonucunda cihazdan okunan kırılma enerjisi ve (6.1) eşitliği ile hesaplanan darbe dayanımı değerlerinin numune gruplarına göre ortalmaları Çizelge 7. 12 'da verilmiştir. Çizelge 7. 12 yardımı ile üretim yöntemine ve takviye miktarına bağlı olarak sahip olduğu darbe dayanımı Şekil 7. 9'daki gibidir.

Çizelge 7. 12 Dokuma takviyeli kompozit numunlerin kırılma enerjisi, darbe dayanımı ve % fiber hacim oranı.

Numune Grubu	E_c (J)	a_{cU} (kJ/m ²)	% V_f
E-4k-mat-GF	4,70	96,13	22,26
E-6k-mat-GF	8,80	99,07	22,09
E-4k-dok-GF	6,35	164,93	32,20
E-6k-dok-GF	11,40	173,45	32,03
VB-4 kat dok-GF	8,18	203,99	37,02
VB-6 kat dok-GF	10,38	212,57	41,58
E-4 kat-dok-BF	1,23	265,48	36,11
E-6 kat-dok-BF	3,25	268,35	35,50
VB-4 kat-dok-BF	2,22	285,26	52,20
VB-6 kat-dok-BF	4,27	293,00	51,56



Şekil 7. 9 dokuma takviyeli kompozitlerin darbe dayanımı-% V_f grafiği.

7.3 Eğme Testi Sonucunda Elde Edilen Bulgular

Sürekli fiber takviyeli numunelerin eğme yükü altındaki davranışları 16 adet GF01 ve 7 adet GF02 olmak üzere 23 adet E-camı fiber takviyeli ve 9 adet BF01 ve 19 adet BF02 olmak üzere 28 adet bazalt takviyeli numune üzerinde incelenmiştir. Sürekli fiber takviyeli numunelerin dayanabildiği max. eğme yükü (F_{max}), eğme dayanımı(σ_{max}), eğme modülü(E_f)ve bu sonuçları destekleyen hacimce ve ağırlıkça % takviye miktarları Çizelge 7.13 ve Çizelge 7. 14'te verilmiştir.

Çizelge 7. 13 Eğme testi (E-camı fiber takviyeli numunler) sonuçları.

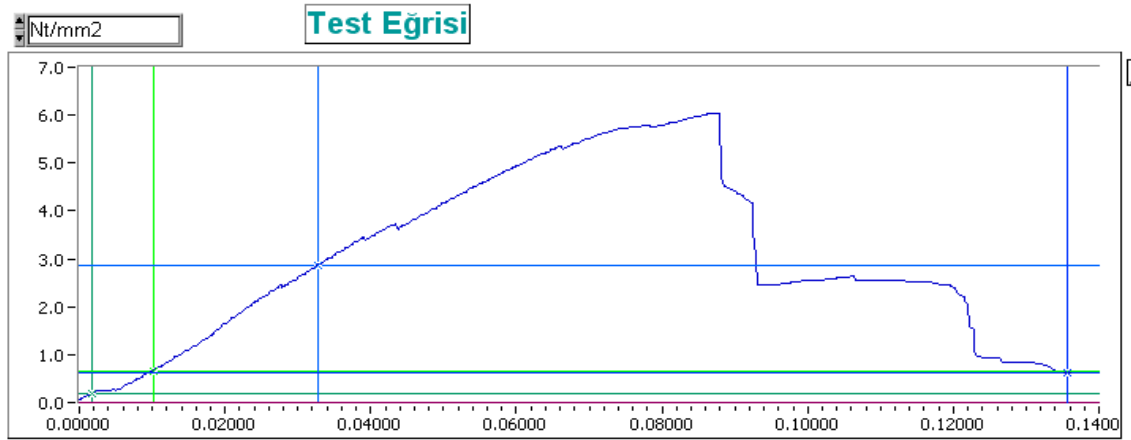
No	Numune	F_{max}	σ_{max}	Elastiklik mod.	%V _f	%M _f
		N	MPa	E _f (GPa)		
1	E-a-01-GF01	1081,60	187,16	6,14	2,02	4,35
2	E-a-02-GF01	1530,72	229,07	5,51	2,39	5,13
3	E-a-03-GF01	1462,07	204,02	5,01	2,50	5,37
4	E-a-04-GF01	1046,00	161,60	0,00	2,55	5,47
5	E-a-05-GF01	1072,78	207,56	5,20	2,70	5,78
6	E-a-06-GF01	1854,31	292,14	5,42	2,45	5,25
7	E-b-09-GF01	718,78	127,44	5,58	0,88	1,92
8	E-b-10-GF01	852,14	173,61	5,08	1,60	3,47
9	E-b-11-GF01-a	494,22	91,52	5,69	1,72	3,72
10	E-b-11-GF01-b	699,17	145,65	5,71	1,88	4,07
11	E-b-12-GF01	1570,92	327,85	5,35	1,89	4,08
12	E-b-13-GF01	1727,82	248,31	5,28	2,04	4,39
13	E-b-14-GF01	1733,70	331,91	5,81	2,20	4,74
14	E-b-15-GF01	883,52	174,86	5,26	0,74	1,63
15	E-d-17-GF01	1766,06	229,91	4,57	1,69	3,67
16	E-M-19-GF01	1666,04	271,76	5,12	1,91	4,12
17	E-c-05-GF02	2264,21	273,75	5,21	2,58	5,53
18	E-c-06-GF02	1571,90	168,29	4,96	2,73	5,83
19	E-c-09-GF02	1255,17	202,80	4,78	2,89	6,17
20	E-c-10-GF02	1528,76	195,97	5,79	3,02	6,44
21	E-d-14-GF02	2493,67	371,88	6,31	4,15	8,72
22	E-a-19-GF02	1900,40	284,04	5,52	4,15	8,73
23	E-b-20-GF02	2267,15	368,42	6,94	3,56	7,53

Çizelge 7. 14 Eğme testi (Bazalt fiber takviyeli numuneler) sonuçları.

No	Numune	F_{max}	σ_{max}	Elastiklik mod	%V _f	%M _f
		N	MPa	E _f (GPa)		
1	E-e-02-BF01	2144,57	210,37	5,36	1,11	2,54
2	E-e-07-BF01	2249,5	203,9	5,43	1,06	2,43
3	E-e-08-BF01	1181,62	185,48	5,41	1,76	3,99
4	E-f-09-BF01	944,32	208,86	7,78	1,67	3,78
5	E-f-13-BF01	1479,73	210,66	5,23	1,36	3,11
6	E-f-16-BF01	1033,55	176,82	5,16	1,18	2,7
7	E-g-24-BF01	1208,1	182,14	5,8	0,99	2,27
8	E-g-25-BF01	1772,92	284,86	5,34	1,51	3,43
9	E-h-30-BF01	1224,77	179,86	5,14	1,66	3,78
10	E-h-34-BF01	2031,8	220,02	5,32	1,28	2,93
11	E-e-01-BF02-a	1229,67	99,23	5,19	0,92	2,11
12	E-e-01-BF02-b	1400,3	117,17	5,56	0,85	1,95
13	E-e-04-BF02	1657,21	362,2	5,42	1,18	2,69
14	E-e-05-BF02	2393,64	196,91	5,14	0,82	1,88
15	E-e-06-BF02	1480,71	387,97	6,67	1,46	3,32
16	E-f-10-BF02	1054,14	150,77	5,79	0,88	2,01
17	E-f-11-BF02	1494,43	263,02	5,67	1,42	3,23
18	E-f-12-BF02	869,79	189,76	5,6	1,23	2,81
19	E-f-14-BF02	556	98,78	5,22	1,39	3,17
20	E-f-15-BF02	1305,18	102,24	5,33	0,74	1,7
21	E-f-17-BF02	2506,41	336,26	5,63	1,34	3,06
22	E-g-18-BF02	1085,52	214,43	5,14	1,68	3,82
23	E-g-19-BF02-a	882,54	161,4	5,04	1,05	2,4
24	E-g-19-BF02-b	728,59	124,56	5,24	1,05	2,39
25	E-g-21-BF02	3121,25	469,08	5,87	1,62	3,68
26	E-g-22-BF02-a	1337,54	316,31	5,56	1,33	3,03
27	E-g-22-BF02-b	1059,05	300,71	5,54	1,34	3,05
28	E-g-26-BF02	838,41	219,47	5,26	1,07	2,45
29	E-h-28-BF02	871,75	153,01	5,39	1,53	12,55
30	E-h-29-BF02	841,35	159,93	4,96	1,26	2,88
31	E-h-32-BF02	703,09	117,66	5,44	1,28	2,93
32	E-h-36-BF02	856	179,85	4,82	1,25	2,86

Eğme yükü altındaki kompozit numuneye (E-g-21-BF02 kodlu numune) ait gerilim-sehim eğrisi Şekil 7. 10'da verilmektedir. Bu eğriden görüldüğü gibi numune yüzeyine eğme gerili uygulandıkça numune sehim vermekte, bir maksimum noktasına ulaştıktan sonra malzemede deformasyon meydana geldiği görülmektedir. Burada sürekli fiber

takviyeli numunede delaminasyon meydana gelmiş, malzemenin yükleme yüzeyi kırıldıktan sonra eğme yükünü alt yüzey taşımıştır.



Şekil 7. 10 Eğme testi sonucunda elde edilen gerilim-sehim eğrisi.

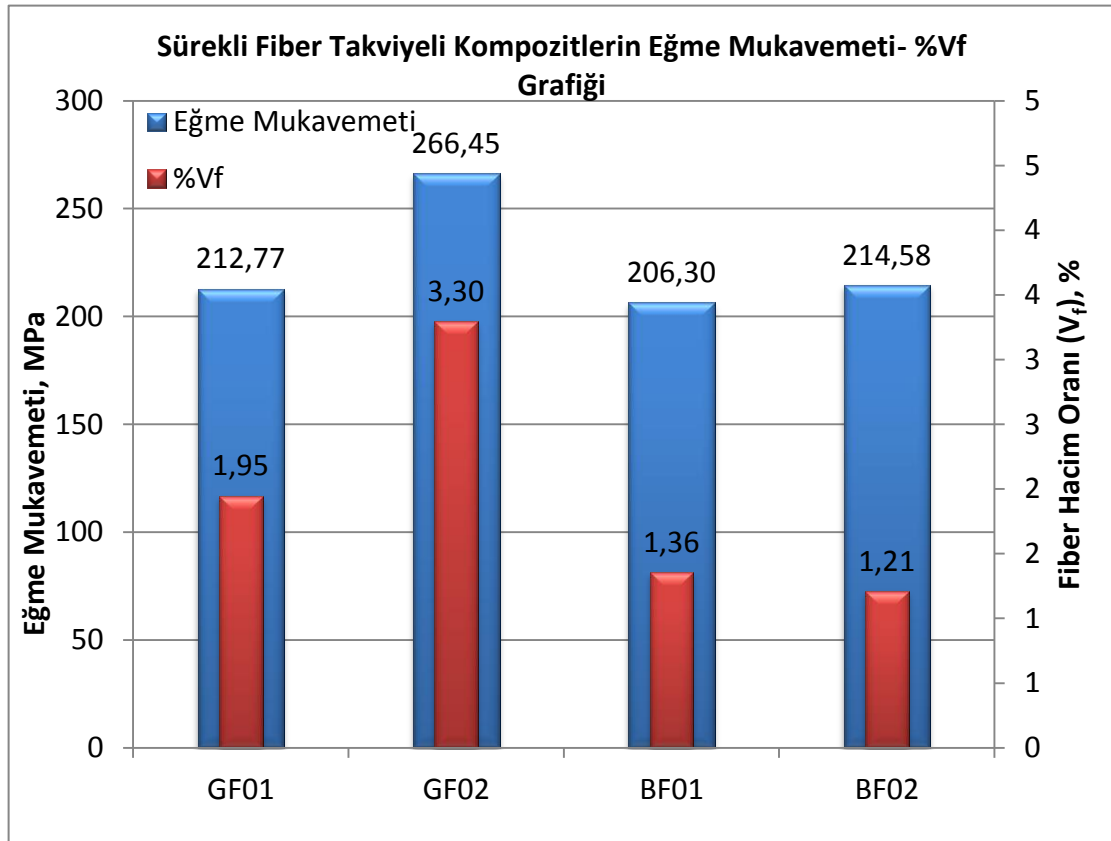
Sürekli fiber takviyeli kompozit numunelerin (GF01, GF02, BF01, BF02) eğme testi sonuçları ile hesaplanan yüzde fiber hacim oranına (V_{f-ort}) göre değişen eğme mukavemeti (σ_{f-ort}) ve eğme modülü değerleri Çizelge 7. 12’te verilmiştir. Ayrıca sürekli fiber takviyeli numunelerin, teorik ($V_{f-teorik}$) olarak %5,0 hacim oranına sahip olduklarında gösterebilecekleri teorik eğme mukavemet ($\sigma_{f-teorik}$) değerleri de üretilen kompozitleri karşılaştırmak amacıyla hesaplanarak burada verilmiştir. Tüm eğme deneyleri sonucunda hesaplanan ortalama eğme dayanımı ve eğme modülü değerleri, ortalama %fiber hacim oranlarına göre Şekil 7. 15 ve Şekil 7. 16’de grafiksel olarak gösterilmektedir.

Çizelge 7. 15 Sürekli fiber takviyeli kompozit numunelerde artan $\%V_f$ oranına göre eğme dayanımı ve eğme modülü değerleri.

Takviye		$\%V_f$				
		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
GF01	Eğme Dayanımı, MPa	173,863	250,474	327,085	403,696	480,307
	Eğme Modülü, GPa	4,7678	5,2979	5,828	6,3581	6,8882
GF02	Eğme Dayanımı, MPa	65,268	152,857	240,446	328,035	415,624
	Eğme Modülü, GPa	4,1244	4,7234	5,3224	5,9214	6,5204
BF01	Eğme Dayanımı, MPa	186,942	279,937	372,932	465,927	558,922
	Eğme Modülü, GPa	5,3136	6,1049	6,8962	7,6875	8,4788
BF02	Eğme Dayanımı, MPa	178,161	332,791	487,421	642,051	796,681
	Eğme Modülü, GPa	5,3296	6,2385	7,1474	8,0563	8,9652

Çizelge 7. 16 Sürekli fiber takviyeli kompozitlerin ortalama eğme dayanımları ve fiber hacim oranları.

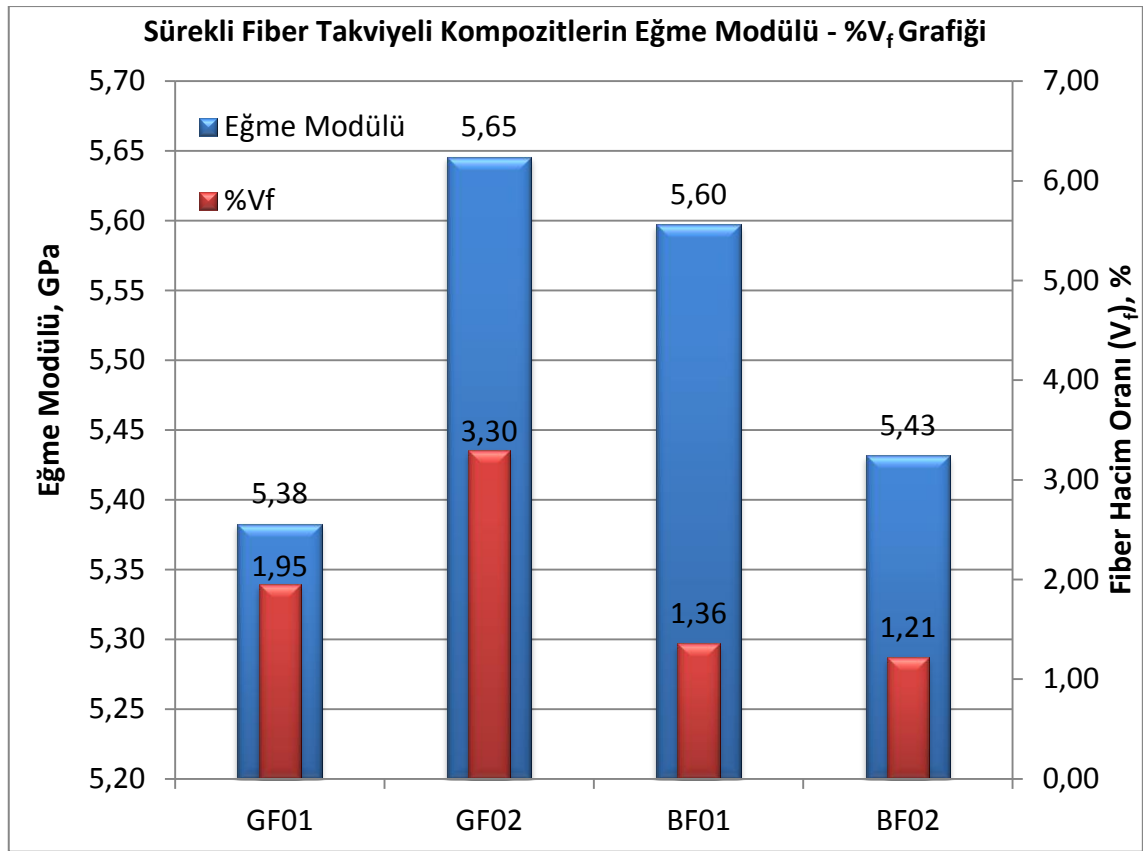
Numene	σ_{f-ort} MPa	V_{f-ort} %
GF01	212,77	1,95
GF02	266,45	3,3
BF01	206,3	1,36
BF02	214,58	1,21



Şekil 7. 11 Ortalama eğme mukavemeti ve % fiber hacim oranı grafiği.

Şekil 7. 11’de görüldüğü gibi eğme deneyi sonunda çekme deneyine benzer mekanik davranış elde edilmiştir. BF02 kodlu numunelerin eğme mukavemetinin, hem BF01 hem de E-camı takviyeli kompozit numunelerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. BF02 fiberlerin BF01 ve E-camı fiberlere göre çapının daha küçük olmasıyla görece olarak aynı miktarda takviye edilmesine rağmen daha düşük fiber hacim oranı elde edilmiş buna rağmen diğer takviye çeşitlerine göre daha yüksek eğme mukavemeti gözlenmiştir.

Takviye çeşidine göre eşit fiber hacmine sahip (örneğin %5,0 V_f 'de) kompozit numunelerin eğme mukavemetini karşılaştırdığımızda BF02 takviyeli numunelerin eğme mukavemeti, BF01 takviyeli numunelerden %16,9, GF01 takviyeli numunelerden %62,5 ve GF02 takviyeli numunelerden %119,6 yüksek olduğu görülmüştür. Cam fiberli numuneler kendi aralarında kıyaslanacak olursa; GF01 takviyeli kompozit numunelerin eğme mukavemeti GF02 takviyeli numunelerden %35,1 daha yüksek olarak bulunmuştur. BF01 takviyeli numuneler de GF01 takviyelilerden %39 ve GF02 takviyeli numunelerden %26 daha yüksek eğme mukavemetine sahiptir.



Şekil 7. 12 Eğme modülünün fiber takviye oranına göre değişimi.

Eğme mukavemeti hesaplanan sürekli fiber takviyeli kompozit numunelerin eğme modülünün karşılaştırılması Şekil 7. 12'de yapılmıştır. Buna göre eşit fiber hacmine sahip (örneğin %5,0 V_f 'de) BF02 takviyeli numunelerin eğme modülü, BF01 takviyeli numunelerden %5,7, GF01 takviyeli numunelerden 30,1 ve GF02 takviyelilerden %37,4 daha yüksek olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda BF01 takviyeli kompozitlerin eğme modülü GF01'lilerden %23 ve GF02'lilerden %30 daha yüksektir. GF01 takviyeli

numunelerin eğme modülü de GF02 takviyeli numunelerden %5,6 daha yüksek olarak bulunmuştur.

Dokuma takviyeli kompozit numunelerin eğme davranışları çekme ve darbe deneylerinde olduğu gibi plakalar halinde incelenmiştir. Her deney grubunu temsil eden bir kompozit plaka üretilmiş ve bu plakadan 3-5 adet eğme numunesi hazırlanmıştır. Dokuma takviyeli kompozitlerin eğme deneyi için 10 deney grubu ve toplam 43 adet numune incelenmiştir. Dokuma takviyeli kompozit numunelerin eğme testi sonuçları Çizelge 7. 17 ve Çizelge 7. 18’de verilmektedir.

Çizelge 7. 17 E-camı dokuma takviyeli kompozit numunelerin eğme testi sonuçları.

Numune	No	Sehim	F_{max}	Eğme Dayanımı	Sehim	Elastiklik Modülü	%M _f
		mm (x)	N (y)	σ_f (MPa)	%	E_f (MPa)	
E-4k-mat-GF	1	6,92	358,9	226,24	0,05	8574,31	
	2	7,48	392,24	226,17	0,06	7489,7	
	3	6,91	376,55	191,47	0,06	6265,33	
	4	7,34	377,53	228,98	0,06	7365,76	
	5	7,19	350,07	205,34	0,06	6291,21	
ort.				215,64	0,06	7197,26	22,26
E-6k-mat-GF	1	4,61	852,14	200,09	0,05	6505,64	
	2	5,31	698,19	241,33	0,05	7594,87	
	3	4,6	822,72	197,69	0,06	6157,91	
	4	5,03	856,06	213,58	0,06	6448,55	
	5	5,03	898,23	215,5	0,06	6260,68	
ort.				213,64	0,06	6593,53	22,09
E-4k-dok-GF	1	10,49	332,42	359,85	0,06	11156,81	
	2	7,48	370,67	336,08	0,05	13187,9	
	3	9,37	361,84	364,41	0,06	11737,64	
	4	9,05	424,6	373,24	0,06	12089,41	
	5	9,83	394,2	392,91	0,06	12249,55	
ort.				365,3	0,06	12084,26	32,2
E-6k-dok-GF	1	7,38	698,19	258,19	0,07	9314,88	
	2	6,48	716,82	342,53	0,06	19062,1	
	3	6,19	678,58	300,18	0,06	11908,47	
	4	5,18	793,31	299,22	0,05	11044,97	
	5	5,9	893,33	348,43	0,06	11624,04	
ort.		6,226	756,05	309,71	0,06	12590,89	32,03
VB-4k dok-GF	1	9,62	72,32	81,15	0,04	2839,43	
	2	13,23	70,85	93,34	0,05	2801,61	
	3	14,36	73,05	101,89	0,05	2789,99	
	4	13,81	76,98	96,87	0,04	3748,87	
	5	11,62	66,19	87,06	0,05	2536,43	
ort.				92,06	0,05	2943,27	37,02
VB-6 k dok-GF	1	9,87	130,91	107,17	0,01	2942,53	
	2	10,23	124,29	130,85	0,01	4026,78	
	3	10,2	61,78	80,84	0,06	2483,59	
	4	10,6	114,98	118,85	0,01	3922,3	
	5	9,34	106,4	141	0,01	5212,86	
	6	10,45	68,13	79,18	0,05	2951,96	
ort.				109,65	0,02	3590	45,58

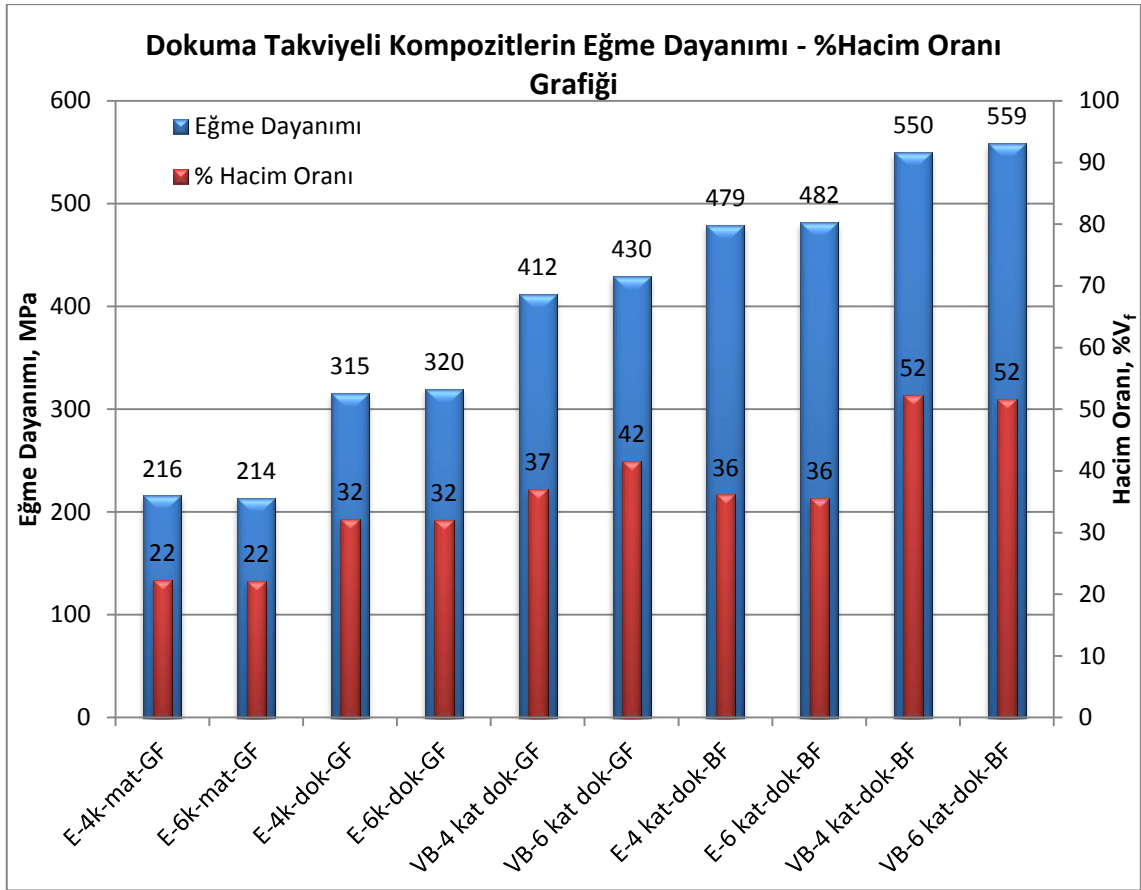
Çizelge 7. 18 Bazalt dokuma takviyeli kompozit numunelerin eğme testi sonuçları.

Numune	No	Sehim	Fmax	Eğme Dayanımı	Sehim	Elastiklik Modülü	%M _f
		mm (x)	N (y)	σ_f (MPa)	%	E _f (MPa)	
E-4 k-dok-BF	1	13,27	22,06	51,31	1,25	2702,66	
	2	17,04	22,8	47,32	1,6	2311,63	
	3	12,59	22,31	48,72	1,16	2888,46	
ort.				49,12	1,34	2634,25	39,11
E-6 k-dok-BF	1	7,08	54,67	51,81	0,07	2673,71	
	2	7,43	54,18	57,12	0,07	3640,27	
	3	7,24	58,84	57,58	0,06	2701,04	
ort.				55,5	0,06	3005,01	35,5
VB-4 k-dok-BF	1	10,16	11,52	47,56	5,18	2869,95	
	2	7,76	11,03	38,83	5	2617,05	
	3	10,33	13,24	50,64	3,36	2644,16	
ort.				45,68	4,51	2710,39	52,2
VB-6 k-dok-BF	1	6,31	37,02	41,18	0,17	1999,95	
	2	5,54	34,32	53	0,17	3317,39	
	3	6,54	30,15	51,63	0,28	3446,36	
ort.				48,6	0,21	2921,23	51,56

Dokuma takviyeli el yatırması ve vakum bagging yöntemi ile üretilmiş kompozit numunelerin ortalama eğme deneyi dayanımı ve hacim oranları Çizelge 7. 19’da verilmektedir. Bu doğrultuda çizilen eğme dayanımı-hacim oranı grafiği Şekil 7. 13’teki gibidir. Bu değerler reel deney sonuçlarının ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 7. 19 Ortalama eğme dayanımı, eğme modülü ve sehimin üretim yöntemi ve takviye çeşidine göre değişimi.

Numune Grubu	Eğme Dayanımı	Sehim	Elastiklik Modülü	Hacim Oranı
	σ_f (MPa)	%	E _f (Mpa)	%V _f
E-4k-mat-GF	215,64	0,06	7,20	22,26
E-6k-mat-GF	213,64	0,06	6,59	22,09
E-4k-dok-GF	315,30	0,06	12,08	32,20
E-6k-dok-GF	319,71	0,06	12,59	32,03
VB- 4 kat dok-GF	412,06	0,05	2,94	37,02
VB- 6 kat dok-GF	429,65	0,02	3,59	41,58
E-4 kat-dok-BF	479,12	1,34	2,63	36,11
E-6 kat-dok-BF	481,50	0,06	3,01	35,50
VB-4 kat-dok-BF	549,68	4,51	2,71	52,20
VB-6 kat-dok-BF	558,60	0,21	2,92	51,56



Şekil 7. 13 Dokuma takviyeli kompozitlerin eğme dayanımı-%hacim oranı grafiği.

Şekil 7. 13’de verilen dokuma takviyeli kompozitlerin eğme dayanımı grafiği çekme deneyi sonuçlarını destekler nitelikte olup, vakum bagging yöntemi ile üretilen numunelerin el yatırması üretilenlere göre ve bazalt dokumalar ile desteklenmiş numunelerin de E-camı ile desteklenmiş kompozit numunelere daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

7.4 Yoğunluk Testi Sonucunda Elde Edilen Bulgular

Sürekli fiber takviyeli E-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozitlerin yoğunluk değerleri Bölüm 6.7.2.2’de açıklandığı gibi numune bazında incelenmiştir. Deney grubu bazında numunelerin genel eğilimine bakacak olursak ortalama yoğunluk değerleri kütlece ve hacimce %fiber oranları ile birlikte Çizelge 7. 20 ‘deki gibidir.

Çizelge 7. 20 Sürekli fiber takviyeli kompozit numunelerin yoğunluk, %V_f ve %M_f değerleri.

Takviye	Yoğunluk gr/cm ³	%M _f	%V _f
GF01	1,2363	3,1483	1,5153
GF02	1,2396	6,8559	3,3459
BF01	1,225	4,608	2,0438
BF02	1,2227	3,3082	1,4404

Dokuma takviyeli E-camı bazalt fiber takviyeli malzemelerin yoğunlukları üretilen kompozit plaka bazında, aynı deney grubunu kapsayacak şekilde ölçülmüştür. Dokuma takviyeli deney gruplarında ölçülen yoğunluk değerleri Çizelge 7. 21'deki gibidir.

Çizelge 7. 21 Dokuma takviyeli kompozitlerde yoğunluk, %V_f ve %M_f değerleri.

Takviye	Yoğunluk gr/cm ³	%V _f	%M _f
E-4k-mat-GF	1,4983	22,26	37,7368
E-6k-mat-GF	1,4960	22,09	37,5056
E-4k-dok-GF	1,6315	32,2	50,1312
E-6k-dok-GF	1,6292	32,03	49,9362
VB-4 kat dok-GF	1,6961	37,02	55,4405
VB-6 kat dok-GF	1,7572	41,58	60,1041
E-4 kat-dok-BF	1,7236	36,11	54,4693
E-6 kat-dok-BF	1,7148	35,5	53,8103
VB-4 kat-dok-BF	1,9569	52,2	69,8023
VB-6 kat-dok-BF	1,9476	51,56	69,2591

Yoğunluk değerleri mekanik dayanım konusunda tam bir bilgi vermese de üretilen kompozit malzemelerin hafiflik/dayanım kıyaslamalarında kullanılmaktadır.

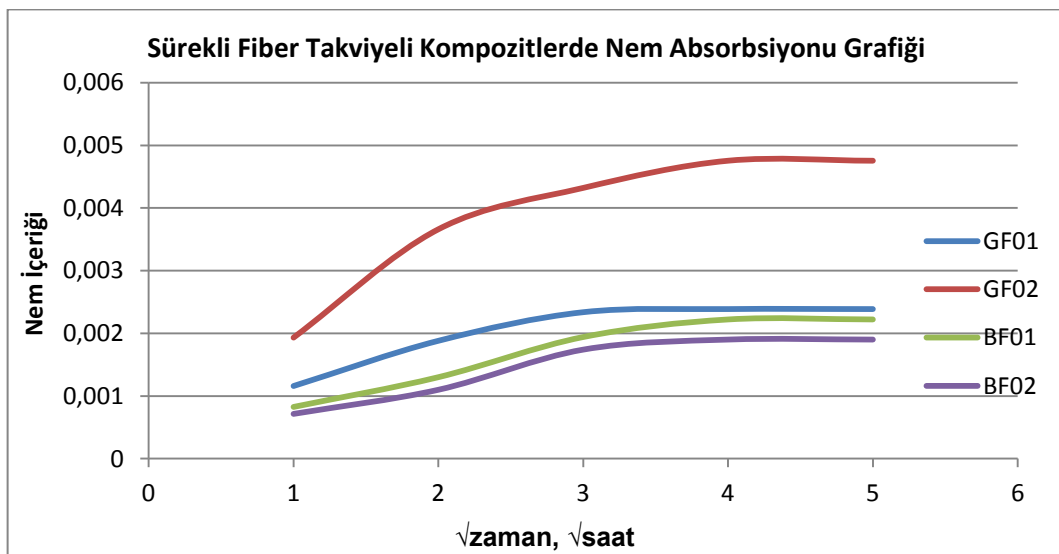
7.5 Nem Absorbsiyonu Testi sonucunda Elde edilen Bulgular

Kompozit numunelerin yoğunlukları Bölüm 6.7.2.3' te açıklandığı gibi hesaplanmıştır. Sürekli fiber takviyeli ve dokuma takviyeli plakaların absorbladığı nem miktarı Çizelge 7. 22'de verilmektedir.

Çizelge 7. 22 Sürekli fiber ve dokuma takviyeli kompozit numunelerin zamana bağlı absorbladığı nem miktarı.

Sürekli fiber takviyeli kompozitlerde :					
	C1	C2	C3	C4	C5
GF01	0,00116	0,001881	0,002337	0,002387	0,002387
GF02	0,001932	0,00366	0,004321	0,004754	0,004754
BF01	0,000826	0,001301	0,001942	0,002222	0,002222
BF02	0,000715	0,0011	0,001741	0,001901	0,001901
Dokuma takviyeli kompozitlerde :					
	C1	C2	C3	C4	C5
El yatırması GF	0,001139	0,0015	0,001921	0,00228	0,00228
El yatırması BF	0,00104	0,001238	0,001637	0,001921	0,001921
Vakum Bagging GF	0,000758	0,001108	0,001332	0,001704	0,001704
Vakum bagging BF	0,000741	0,000909	0,001274	0,001565	0,001565

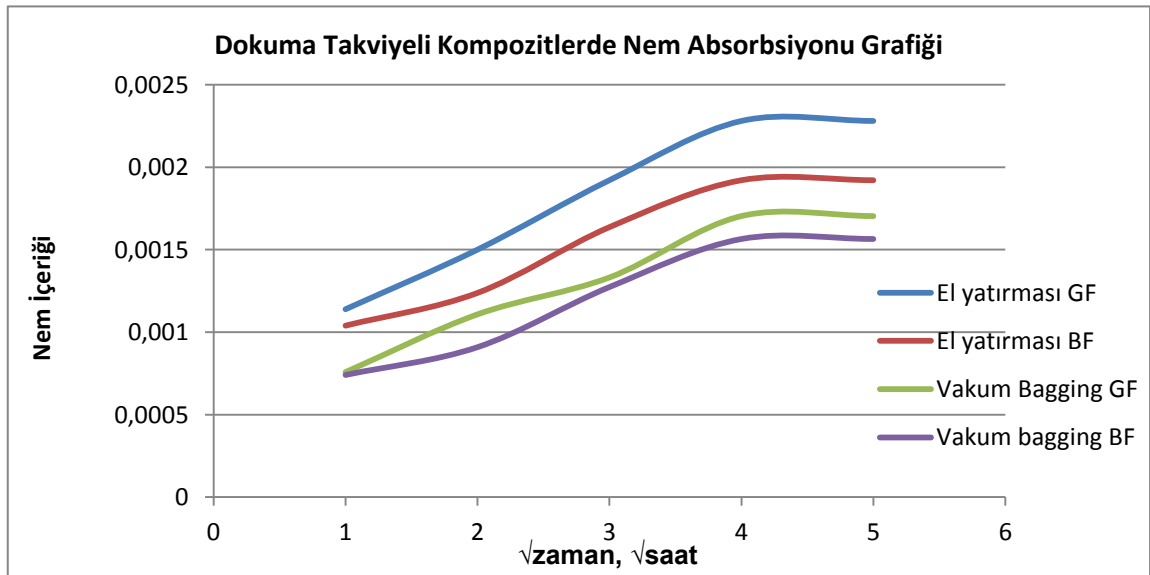
Genel anlamda tüm numunler nemli ortamda aynı nem absorblama karakteristiği göstermiştir. Matris malzemesinin kendine özgü nemli ortamda nem alarak şişme özelliği bulunmaktadır. Bunun yanı sıra numune absorbladığı nem miktarı fiber-matris bağlantı hakkında fikir vermektedir. Çizelge 7. 17’de verilen değerler ile çizilmiş sürekli bazalt ve E-camı takviyeli kompozitlerin zamana bağlı olarak su absorblama grafiği Şekil 7. 14’te ve dokuma takviyeli el yatırması ve vakum bag yöntemi ile üretilmiş numunelerin zamanın kareköküne bağlı su absorblama grafiği Şekil 7. 15’te görülmektedir.



Şekil 7. 14 Sürekli E-camı ve bazalt takviyeli kompozitlerin su absorbsiyonu grafiği.

Şekil 7. 14'ten görüldüğü gibi numuneler nemli bir ortam içerisine koyulduklarında önce hızla bünyelerine nem almaya başlamıştır. Daha sonra belli bir doygunluğu ulaşıldığında aldıkları nem miktarı sabit kalmaktadır. BF01, BF02 ve GF01 kodlu numuneler birbirine yakın miktarda nem absorblarken GF02 kodlu numunelerin diğerlerinden daha fazla nem absorbladığı görülmektedir. GF02 kodlu numunelerde fiber matris arasında iyi bağlanma elde edilememesi dolayısı ile nem fiber matris arasındaki kılcal boşluklardan içeri sızmıştır. Bu durum mekanik testler ile doğrulanmaktadır.

Dokuma takviyeli kompozit numeler için de su absorblama eğilimi sürekli fiber takviyeli kompozitlerde olduğu gibi olsa da absorblanan nem miktarı yarı yarıya daha düşüktür. Özellikle vakum bagging yöntemi ile üretilmiş plakalarda negatif basınç sayesinde daha kuvvetli bir ara yüzey oluşturmuş kompozit yapıların daha el yatırması ile üretilmiş yapılardan daha az nem absorbladığı görülmektedir. Dokuma takviyeli el yatırması ve vakum bagging yöntemi ile üretilmiş numunelerin nem absorpsiyonu grafiği Şekil 7.15'te görülmektedir.



Şekil 7. 15 Dokuma takviyeli kompozitlerin nem absorpsiyonu grafiği.

Su absorblama daha çok matrisin özelliği olarak düşünülse de burada fiber matris arasındaki bağlanma ile ilgili olarak da bize bilgi vermektedir. Su matris ile fiber arasındaki arayüzey alanından yapı içerisine girdiğinden fazla su absorblama arayüzey yapışmasının görece olarak daha kötü olduğunu göstermektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tüm kompozit numunelerin çekme dayanımı - %uzama eğrileri benzer bir karakteristik göstermiştir. Bu eğrilerden hareketle tüm numunelerin lineer elastik tutumda bulunduğu yani başka bir deyişle gevrek malzeme özelliği sergilediği saptanmıştır.

Numunelerin mekanik testleri genel olarak incelendiğinde yapıdaki fiber hacim oranı arttıkça malzemenin dayanımı da artmaktadır. Dokuma takviyeli numunelerde, kompozit yapısına eşit miktarda elyaf malzemesi takviye edildiğinde elde edilen %hacim oranları birbirinden farklılık göstermektedir. Kullanılan bazalt dokumaların ıslanabilme kabiliyetinin, E-camı dokumalardan daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni bazalt dokumanın fiziksel özellikleri ve yüzey özellikleri olabilir.

Mekanik deneylerin tümü bir arada değerlendirildiğinde numuneler, çekme-eğme ve darbe yüklemeleri karşısında paralel sonuçlar vermiştir. Genel anlamda sürekli fiber takviyeli numuneler kendi ara aralarında karşılaştırılırsa sürekli bazalt fiber takviyeli numunelerin E-camı fiber takviyeli numunelerden daha iyi sonuçlar vermiştir. Fiber çapı 7µm olan bazalt fiber deney grupları arasında en mukavim, sürekli E-camı GF02 takviyeli numuneler ise en kötü dayanımları gösteren deney gruplarını oluşturur. Dokuma takviyeli numuneler de literatürü doğrulayan, tutarlı sonuçlar vermiştir. Dokuma takviyeliler arasında da bazalt fiberli kompozitlerde daha yüksek dayanım değerlerine sahiptir. Vakum bagging yöntemi ile üretilmiş numunelerde ise bariz dayanım ve fiziksel üstünlükler görülmüştür. Vakum bagging yöntemi ile üretilmiş numuneler aynı takviye malzemesi ile üretilmiş numunelerden daha düşük plaka

kalınlığı elde edilmiştir. Bu da aynı miktarda takviye malzemesi ile taşınan yükün, yüzey alanına bölünerek elde edilen dayanım değerinin (MPa) artması anlamına gelmektedir. Vakum bagging ile üretilmiş numuneler mekanik özelliklerinin yanı sıra iyi fiziksel özellikler ve düzgün yüzey özellikleri ile de dikkat çekmiştir.

Sürekli fiber takviyeli numuneler incelenirken numunelerde en yüksek hacim oranı GF02 takviyeli kompozit numunelerde elde edilmiştir. Bunun nedeni GF02 demetinde, kullanılan diğer fiber çeşitlerine göre en az 2 kat fazla fiber bulunmasıdır. GF02 takviyeli numunelerde daha fazla hacim oranı elde edilmesine rağmen bazalt fiberli numunelere göre yüksek çekme mukavemeti gözlemlenmemiştir. GF01 takviyeli numuneler ile GF02 takviyeli numuneleri karşılaştıracak olursak, basit bir orantıyla aynı hacim oranına sahip olma durumunda GF01 takviyeli numunelerin daha yüksek çekme mukavemeti vereceği görülmektedir. Bazalt fiber takviyeli numunelerde ise farklı fiber hacim oranında yaklaşık aynı çekme mukavemeti değerleri deneysel olarak elde edilmiştir. Yaklaşık eşit çekme mukavemetine sahip BF01 ve BF02 takviyeli numunelerden BF02 takviyeli numunelerin hacim oranının daha az olması fiber çapının çekme mukavemeti üzerinde etkisini göstermektedir. Fiber çapının küçülmesi çekme mukavemeti üzerinde artan bir etki yapmaktadır.

Elastiklik modülü değerlerine göre sürekli cam ve sürekli bazalt fiber takviyeli kompozitleri karşılaştırdığımızda bazalt fiber takviyelilerin cam fiber takviyelilerden daha yüksek elastiklik modülüne sahip olduğu görülmektedir. Eşit fiber hacim yaklaşımı (örneğin %5,0 V_f 'de) ile BF02 takviyeli numuneler BF01 takviyelilerden %24,8, GF01 takviyelilerden %8,6, GF02 takviyelilerin yaklaşık iki katı yüksek çekme modülüne sahiptirler. BF01 takviyeli numunelerin elastiklik modülü GF01 takviyelilerden %13 daha az iken, GF02 takviyelilerden %60,5 daha yüksektir. GF01 takviyeli numunelerin elastiklik modülü GF02 takviyeli numunelerden %84,5 daha yüksek olarak bulunmuştur.

Kompozit malzemelerde fiber sıyrılması (fiber pull-out) ve tabaka ayrılması (delaminasyon) en sık görülen hasar çeşitleridir. Çekme deneyi sonucunda, GF02 takviyeli kompozit numunelerde fiber sıyrılması diğer numunelere oranla daha fazla görülmüştür. Bunun sebebi, GF02 demetlerin çok yoğun fiber içermesi ve bu yüzden

reçinenin fiberleri tam olarak ıslatamayıp iyi arayüzey oluşturmamış olmasıdır. Diğer taraftan bu yoğun fiber içeriği ile fiberler yapı içerisinde birbirlerine çok yakın konumlanmış ve deformasyon sırasında gerilim homojen olarak dağılmamıştır.

Bazalt fiber takviyeli kompozit numuneler kendi aralarında karşılaştırıldığında BF02 takviyelilerde daha yüksek mekanik mukavemet değerleri elde edilmiştir. Bu numunelerin kırılma şekilleri makroskobik olarak incelendiğinde de numunelerde çoklu kırılmalar gözlemlenmiştir. Bu numunelerde cam fiber takviyeli numunelere göre daha iyi arayüzey elde edilmiş ve dolayısıyla matristen fibere yük aktarımı daha iyi sağlanmıştır. Çekme kuvvetiyle gevrek karakterli matrisin önce kırılması sırasında fiberler matris içerisinden sıyrılmamış, aksine fiberler tam olarak kopuncaya kadar matriste çoklu kırılmalar meydana getirmişlerdir. BF02 takviyeli kompozit numunelerin E-camı fiber takviyeli kompozit numunelerden daha yüksek mukavemete sahip olması iyi ara yüzey özellikleri ve daha ince fiber çapı ile açıklanabilir.

Dokuma takviyeli kompozitler incelenirken vakum bagging ile üretilmiş numuneler el yatırması ile üretilmiş numunelere göre çok daha düzgün, ince kesitli olarak elde edildiği görülmüştür. Vakum bagging ile üretilmiş numuneler el yatırması ile üretilenlere göre takviye oranları doğrultusunda daha incedir. Aynı takviye miktarında daha ince numune elde edilmesi de çekme dayanımını arttırıcı yönde etki yapmaktadır. Üretim yönteminin mekanik özelliklere diğer bir etkisi de takviye oranındaki artıştır. Kompozitlerin vakum bagging yöntemi ile üretilmesiyle takviye malzemenin kompozit içerisindeki % hacim oranı yaklaşık %75 artmıştır. Hacim oranındaki artış karışımlar kuralına göre dayanım, elastiklik modülünde de artış sağlamaktadır.

Takviye formlarından keçe ve dokuma takviye edilirken aynı miktarda keçe takviyeyi ıslatmak için daha fazla miktarda polyester reçine kullanılmıştır. Böylece dokuma takviyeli kompozitlerde fiber hacim oranı keçe takviyelilere göre daha yüksek elde edilmiştir. Dolayısıyla da el yatırması ile üretilmiş dokuma takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı, yine el yatırması ile üretilmiş keçe takviyeli numunelerden yaklaşık %20 yüksek olarak tespit edilmiştir.

El yatırması ile üretilmiş numunelerde, bazalt dokuma hacim oranları %11-17 daha fazla elde edilmiştir. Çekme dayanımları ise bazalt dokuma takviyeli numunelerde E-camı takviyeli numunelerden %29-46 daha yüksek bulunmuştur.

Vakum bagging yöntemi ile üretilmiş dokuma takviyeli numuneler karşılaştırıldığında bazalt dokuma takviyeli numunelerin hacim oranları, cam dokuma takviyeli numunelerden %11-28 daha fazla ve çekme dayanımları da %22-27 daha fazladır.

Darbe deneyinde kompozit numunelerin tümü gevrek kırılma davranışı göstermişlerdir. Darbe deneyi sonucunda BF01, BF02 ve GF01 kodlu sürekli fiber takviyeli numunelerin darbe dayanımları birbirine çok yakın bulunmuştur, GF02 takviyeli numuneler ise daha düşük darbe dayanımına sahiptir. Aynı fiber hacim oranında (örneğin %5,0 V_f'de) BF01 takviyeli numunelerin darbe mukavemeti, BF02 takviyelilerden %0,5, GF01 takviyelilerden %3 ve GF02 takviyelilerden %87 daha yüksek bulunmuştur. Cam fiber takviyeli kompozit numuneleri karşılaştırdığımızda ise GF01 takviyeli numunelerin GF02 takviyeli numunelerden %82 daha yüksek darbe mukavemetine sahip olduğu görülmektedir.

Eğme deneyi sonunda çekme deneyine benzer mekanik davranış elde edilmiştir. BF02 kodlu numunelerin eğme mukavemetinin, hem BF01 hem de E-camı takviyeli kompozit numunelerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. BF02 fiberlerin BF01 ve E-camı fiberlere göre çapının daha küçük olmasıyla görece olarak aynı miktarda takviye edilmesine rağmen daha düşük fiber hacim oranı elde edilmiş buna rağmen diğer takviye çeşitlerine göre daha yüksek eğme mukavemeti gözlenmiştir.

Takviye çeşidine göre eşit fiber hacmine sahip (örneğin %5,0 V_f'de) kompozit numunelerin eğme mukavemetini karşılaştırdığımızda BF02 takviyeli numunelerin eğme mukavemeti, BF01 takviyeli numunelerden %16,9, GF01 takviyeli numunelerden %62,5 ve GF02 takviyeli numunelerden %119,6 yüksek olduğu görülmüştür. Cam fiberli numuneler kendi aralarında kıyaslanacak olursa; GF01 takviyeli kompozit numunelerin eğme mukavemeti GF02 takviyeli numunelerden %35,1 daha yüksek olarak bulunmuştur. BF01 takviyeli numuneler de GF01 takviyelilerden %39 ve GF02 takviyeli numunelerden %26 daha yüksek eğme mukavemetine sahiptir.

Sürekli fiber takviyeli numuneleri eğme modülü açısından karşılaştırdığımızda aynı paralelde, en yüksek fiber hacmine sahip GF02 takviyeli numunenin eğme modülü en yüksek, diğerlerinin de birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Buna göre eşit fiber hacmine sahip (örneğin %5,0 V_f'de) BF02 takviyeli numunelerin eğme modülü, BF01 takviyeli numunelerden %9 ve GF01 takviyeli numunelerin eğme modülü, GF02 takviyelilerden %61 daha yüksek olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda BF02 takviyeli kompozitlerin eğme modülü GF01'lilerden %63, GF02'lilerden %162 daha yüksektir. BF01 takviyeli numunelerin eğme modülü de GF01 takviyeli numunelerden %49 ve GF02 takviyeli numunelerden %140 daha yüksek olarak bulunmuştur.

Dokuma takviyeli numuneler için her numune grubunda uygun kalınlığa ulaşılamadığından bu numuneler için doğru sonuçlar elde edilememiştir.

Eğme deneyleri sırasında ilk hasar numunenin alt yüzeyinde meydana gelmiş, artan yükleme ile yük kesme kuvvetleri ile numunelerin üst kısmına taşınmıştır. Özellikle lamine yapılarda bu yük aktarımı net olarak gözlemlenebilmektedir. Bu durumda test grafiklerinde yükleme kademeli olarak artarken, y ekseninin sabit kaldığı, x eksenindeki deformasyonun arttığı yük aktarım basamakları görülür.

Darbe ve eğme deneyleri değerlendirilirken malzeme kalınlığının etkisi de göz önünde bulundurulmalıdır. Yalnız numune kalınlıkları belirli bir aralıkta olduğu takdirde bu deneylerden doğru sonuçlar elde edilebilmektedir. Özellikle vakum bagging gibi daha ince et kalınlığına ulaşmak için kullanılan bir yöntem ile üretilmiş numune, plastik matrisin de elastik özellikleri etkisinde olduğunda doğru bir sonuç almak mümkün olmayacaktır.

KAYNAKLAR

-
- [1] Basaltex NV, www.basaltex.com, 10 Mayıs 2012.
 - [2] Prince Engineering, PLC, www.build-on-prince.com/basalt-fiber.html, 10 Mayıs 2012.
 - [3] Berozashvili, M., Continuous Reinforcing Fibers Are Being Offered For Construction, Civil Engineering And Other Composites Applications, Advanced Material Composite News, Composite Worldwide, 21(6): p. 5-6, 2001.
 - [4] Lopresto V., Leone C., De Iorio I., Mechanical Characterisation Of Basalt Fibre Reinforced Plastic, Composites: Part B 42 (2011) 717-723, İtalya, 2011.
 - [5] Bruijn M., Adams M., Staey K., Evaluation of Basalt Continuous Filament Fibres in Composite Material Katholieke Universiteit Leuven, Department of Metallurgy and Materials Engineering (MTM), Kasteelpark Arenberg 44, B-3001, Belçika, Haziran 2007.
 - [6] Verpoest, I., Evaluation Of Basalt Continuous Filament Fibres In Composite Material, Katholieke Universiteit Leuven, Department of Metallurgy and Materials Engineering (MTM), Kasteelpark Arenberg Heverlee, Belçika, 2007.
 - [7] Öztürk, S., The Effect Of Fibre Content On The Mechanical Properties Of Hemp And Basalt Fibre Reinforced Phenol Formaldehyde Composites, Journal Of Materials Science 0022-2461 C, Türkiye, 2005.
 - [8] Wambua, P.a.V., I. Hemp Fabric Reinforced Polypropylene Composites: An Investigation Of The Mechanical Properties, Composite For The Future - 10th European Conference on Composite Materials, Belçika 2002.
 - [9] Katayama, T.e.a. Study On Injection Molding Of Bamboo Fiber Reinforced Thermoplastics, International Conference on High Performance Structure&Composites, İspanya, 2002.
 - [10] Wool, R.P., Hu, B. and Shenton, H. W. Composites From Soybeans. In Composite For The Future - 10th European Conference on Composite Materials, Belçika, 2002.
 - [11] Katori, S.a.K., T. Injection Molding Of Silk Fiber Reinforced Biodegradable Composites, International Conference on High Performance Structure&Composites, İspanya, 2002.

- [12] Vazquez, A.e.a. Processing And Properties Of Biodegradable Composites Based On Mater-Bi And Sisal Fiber, 12th International Conference on Composite Materials ICCM-12, Fransa, 1999.
- [13] Liholt, H.e.a. Natural Composites Based On Cellulosic Fibers And Polypropylene Matrix-Their Processing And Characterization, Composite For The Future-10th European Conference on Composite Materials, Belçika, 2002.
- [14] Wang X., Hu B., Feng Y., Liang F., Mo J., Xiong,J., Qiu, Y., Low Velocity Impact Properties Of 3D Woven Basalt/Aramid Hybrid Composites, Composites Science and Technology 68 (2008) 444–450, Çin, Haziran 2007.
- [15] Czigány T., Vad, J., Pölöskei, K., Basalt Fiber As A Reinforcement Of Polymer Composites,Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng. Vol. 49, No. 1, Pp. 3–14, 2005.
- [16] Militky, J.K., Vladimir, Ultimate Mechanical Properties of Basalt Filaments, Textile Research Journal, 66(4): p. 225-229, 1996.
- [17] Sim, J., Park, P., Moon, D., Characteristics Of Basalt Fiber As A Strengthening Material For Concrete Structures, Composites: Part B 36 (2005) 504–512, Güney Kore, Haziran 2005.
- [18] Zhang, S., Karbhari, Vistasp M., Ye, Lin and Mai, Yiu-Wing, Evaluation of Property Retention in E-Glass/Vinylester Composites after Exposure to Salt Solution and Natural Weathering. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 19(09): p. 704-731, 2000.
- [19] Kaw, A.K., Mechanics of Composite Materials, 2nd Edition, Taylor&Francis Group, USA. 2006.
- [20] Adams, D.F.a.W., D. E., In-Plane and Interlaminar Iosipescu Shear Properties of Various Graphite Fabric/Epoxy Laminates. Journal of Composites Technology & Research, 9(3): p. 88-94,1987.
- [21] Icardi, G., Market Overview of Industrial Processes In Composites: Future Trends, Internal Report Saint-Gobain Vetrotex, s. p. a. p. 1-61, İtalya, 2000,
- [22] Artemenko, S.E., Polymer Composite Materials Made From Carbon, Basalt, And Glass Fibers, Structure and Properties. Fiber Chemistry, 35(3): p. 226-229, 2003.
- [23] Shu, K.H., Interfacial Bonding In Basalt Fiber Polymer Composite Systems,Washing State University,1978.
- [24] Subramanian, R.V.a.S., K. H., Silane Coupling Agents For Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites, Polymer Preprints, 1983.
- [25] Dave, R.S., Loos, AC., Processing of Composites, Hanser Publishers, Almanya, 1999.
- [26] Jones, R.M., Mechanic of Composite Materials, 2nd Edition, Taylor&Francis Inc., USA, 1999

- [27] Strong, B.A., Fundamentals of Composites Manufacturing Materials, Methods and Applications, Second Edition, Society of Manufacturing Engineers, 2008.
- [28] Mazumdar, Sanjay K. Composites Manufacturing: Materials, Product, And Process Engineering, CRC Press, USA, 2001.
- [29] Matthews, F.L., Rawlings, R. D., Composite Materials: Engineering and Science, 1994.
- [30] Miracle, Daniel B., Donaldson, Steven L., Composites, Volume 21 of ASM Handbook, ASM International Handbook Committee, 2001.
- [31] Sidney H. Goodman, Handbook Of Thermoset Plastics, Second Education, Raytheon System Company, El Segundo, California, 1998.
- [32] Composites, <http://www.engineeredmaterialsinc.com/composites.htm>, 10 Mayıs 2012.
- [33] Polynova Composites, Sandwich Construction and Infusion <http://polynovacomposites.blogspot.com>, 12 Mayıs 2012.
- [34] Harper, C. A., Plastics Materials And Processes A Concise Encyclopedia, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, Kanada, 2003.
- [35] Crawford, R.J. (Roy J.) Plastics engineering. 3rd ed, Butterworth-Heinemann Elsevier Science Linacre House. Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 225 Wildwood Avenue, Woburn, MA 01801-204, 1998.
- [36] Peters, S.T, Handbook of Composites, 2nd Edition, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [37] Sidney H. Goodman, Handbook Of Thermoset Plastics, Second Education, Raytheon System Company, El Segundo, California, 1998.
- [38] Odian, G., Principles of Polymerization, Staten Island, New York: A John Wiley & Sons, INC, 2004.
- [38] Reyne, M., Composite Solutions Thermosets and Thermoplastics, Jec Publications, 2006.
- [39] Lin S.P., Shen J.H., Han J.L., . Lee Y.J., Liao K.H., Yeh J.T., Chang F.C., Hsieh K.H., Volume Shrinkages And Mechanical Properties Of Various Fiber-Reinforced Hydroxyethyl Methacrylate–Polyurethane/Unsaturated Polyester Composites, Composites Science and Technology 68 (2008) 709–717, Eylül 2007.
- [40] Harper C., Handbook of Plastics, Elastomers and Composites 4th ed-C. Harper McGraw-Hill, 2004.
- [41] MSc in Advanced Textiles & Performance Clothing <http://www.leeds.ac.uk/textiles/CTT/master.html>, 12 Mayıs, 2012.
- [42] Crawford, R.J. Plastics engineering. 3rd ed, Butterworth-Heinemann Elsevier Science Linacre House. Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 225 Wildwood Avenue, Woburn, MA 01801-204, 1998.
- [43] Paciornik, S., Martinho F.M., De Mauricio M.H.P., d’Almeida J.R.M., Analysis Of The Mechanical Behavior And Characterization Of Pultruded Glass Fiber–

- Resin Matrix Composites, Composites Science and Technology 63 (2003) 295–304, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, Eylül 2002.
- [44] Wu, L., Murphy, Karen, Karbhari, Vistasp M. and Zhang, James S., Short-Term Effects of Sea Water on GFRP. Journal of Applied Polymer Science, 2002.
 - [45] Brydson J. A., Plastik Materials, Seventh Edition, Butterworth-Heinemann, 1995-1999.
 - [46] Sartomer Arkema, www.sartomer.com, 18 Mayıs 2012.
 - [47] E-Glass Product Information, <http://www.ayg.com>, South Carolina, USA, 23 Eylül 2010.
 - [48] Plueddemann, E.P., Silane Coupling Agents, Plenum Press, 2. baskı 1991.
 - [49] Plueddemann, E.P., Clark, H. A., Nelson, L. E. and Hoffmann, K. R., Silane coupling agents for reinforced plastics. Modern Plastics, 1962.
 - [50] Joint Stok Company Polotsk-Steklovolokno, Glass Fiber Production, www.eng.polotsk-psv.by/company/manufacture.com, 18 Mayıs 2012
 - [51] Cam Elyaf Sanayi A.Ş., Cam Elyaflar, Üretimi, Ürünler, www.camelyaf.com.tr, 18 Mayıs 2012
 - [52] Swink M., Continuous Filament Basalt A Unique Fiber Capable of Leadership in High Temperature Applications, Kuzey Amerika Tekstil Sempozyumu, Atlanta, GA, USA Nisan, 2002
 - [53] Gur'ev, V., Neproshin, E., Mostovoi G., The Effect Of Basalt Fiber Production Technology On Mechanical Properties Of Fiber, UDC 666.193:539.216:620.171.3, No. 2, pp. 24, 27, Şubat 2001.
 - [54] Sim, J., C. Park, and D. Moon, Characteristics Of Basalt Fiber As A Strengthening Material For Concrete Structures, Composites Part B: Engineering, 36(6-7): p. 504-512, 2005.
 - [55] Subramanian, R.V., Basalt Fiber - A New Cost Mineral Fiber For Composites, Advanced Composites Technology - Conference on Advanced Composite Technology, 1978.
 - [56] Van de Velde K., Kiekens P., Van Langenhove L., Basalt Fibres As Reinforcement For Composites, Department of Textiles, Ghent University, Belçika.
 - [57] Kamenny Wek, www.basfiber.com, 19 Mayıs 2012.
 - [58] Bird, R.B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N., Transport Phenomena, John Wiley, NY, 2001.
 - [59] Militký, J., Kovačič, V., Bajzík, V., Mechanical Properties of Basalt Filaments, Fibres & Textiles, Eastern Europe, Volume 15, No. 5-6(64-65), Aralık/Ocak 2007.
 - [60] Czirány T., Special manufacturing and characteristics of basalt fiber reinforced hybrid polypropylene composites: Mechanical properties and acoustic

- emission study, *Composites Science and Technology* 66 (2006) 3210–3220, Şubat 2005
- [61] Li, X., Study on Thermal Resistance of Basalt Filament Yarn, *Advanced Materials Research*, 146: p. 666-669, 2011.
 - [62] Foster, D.C. The Feasibility of a Composite Highway Bridge, ACUN-3 International Composites Conference, 2001.
 - [63] Mingchao, W., et al., Chemical Durability and Mechanical Properties of Alkali-proof Basalt Fiber and Its Reinforced Epoxy Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2008.
 - [64] Ellyin, F.a.R., Christof, The Influence of Aqueous Environment, Temperature and Cyclic Loading on Glass-Fibre/Epoxy Composite Laminates, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 22(7): p. 615-636, 2003.
 - [65] Karbhari, V.M.a.Z., S., E-Glass/Vinylester Composites in Aqueous Environments-I: Experimental Results. *Applied Composite Materials*, 2003.
 - [66] Boinard, E., Pethrick, Richard A., Dalzel - Job, Jody and Macfarlane, Colin J., Influence Of Resin Chemistry On Water Uptake And Environmental Ageing In Glass Fiber Reinforced Composites-Polyester And Vinyl Ester Laminates, *Journal of Materials Science*, 2000.
 - [67] Fujii, Y., Mizoguchi, M. & Hamada, H., Durability and degradation mechanism of E and ECR glass reinforced vinylester resin under acid and alkaliconditions. *Durability Analysis of Composite Systems*, 2001.
 - [68] Xperial Basalt Products Co., www.xperial.com, 15 Mayıs 2012.
 - [69] Dost Kimya End. Ham. San. ve Tic. Ltd. Sti, www.kompozit.net, 14 Mayıs 2012.
 - [70] Fiore V., Di Bella G., Valenza A., Glass–Basalt/Epoxy Hybrid Composites For Marine Applications, *Materials And Design*, 2011.
 - [71] Park J. M, Shin W.G., Yoon D.J., A Study Of Interfacial Aspects Of Epoxy-Based Composites Reinforcedwith Dual Basalt And Sic Fibres By Means Of The Fragmentation And Acoustic Emission Techniques, *Composites Science and Technology* 59 (1999) 355-370, Kore, Mart 1998.
 - [72] ThomINETTE, F., Salmon, L., Pays, M. F. and J. Verdu, J., Influence of The Nature of The Coupling Agent On The Aging Of Glass Fiber-Epoxy Composite Materials, *European Conference On Composite Materials*, 8: p. 157-158, 1998.
 - [73] Park, J.M., Subramanian, R. V., Effects Of Silane Coupling Agents On Internal Reinforcement Of Wood By E-Glass And Basalt Fibers, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 1994.
 - [74] Park, J.M., Subramanian, R. V. and Bayoumi, A. E., Interfacial Shear Strength And Durability Improvement By Silanes In Single-Filament Composite Specimens Of Basalt Fiber In Brittle Phenolic And Isocyanate Resins, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 1994.

- [75] Park, J.M.a.S., R. V., Interfacial Shear Strength And Durability Improvement By Monomeric And Polymeric Silanes In Basalt Fiber/Epoxy Single-Filament Composite Specimens, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 1991.
- [76] Subramanian, R.V.a.S., K. H., Silane Coupling Agents For Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites, *Polymer Science and Technology*, 1985.
- [77] Subramanian, R.V.a.A., H. F., Silane Coupling Agents In Basalt - Reinforced Polyester Composites, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1980.
- [78] Medvedyev, O.O.T., Y. L., The Outlook For The Use Of Basalt Continuous Fibers For Composite Reinforcement, *International SAMPE Symposium and Exhibition*, 2004.
- [79] Jianrun, M., Xuemei Q., Litao Cheng, Youlong Wang, Experimental Research On Fundamental Mechanical Properties Of Presoaked Basalt Fibre Concrete, *The 5th International conference on FRP composites in civil engineering*, Çin, 2010.
- [80] Curtis, P.T.a.B., S. M., An Assessment Of The Potential Of Woven Carbon Fiber Reinforced Plastics For High Performance Applications, *Composites*, 1984.
- [81] Chawla K. K., *Composite Materials Science and Engineering*, Springer-Verlag, New York, USA, 1997.
- [82] YADAMA,V., CE 537, FALL 2007, <http://pas.ce.wsu.edu/CE537-1/Lectures/Rule%20of%20Mixtures.pdf>, 25 Mayıs 2012
- [83] Dadkhah, M.S., Flintoff, J. G., Kniveton, T. and Cox, B. N., Simple Models for Triaxially Braided Composites, *Composites*, 1995.
- [84] Cox, B.N., Dadkhah, M. S., Inman, R. V. and Morris, W. L., Mechanics of Compressive Failure in 3D Composites, *Acta Metallurgica et Materialia*, 1992.
- [85] Cox, B.N., Dadkhah, M. S., Morris, W. L. and Flintoff, J. G., Fatigue Mechanism of 3D Woven Composites in Tension, Compression, and Bending. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1994.
- [86] Daniel, I. M., Islai, O., *Engineering Mechanics Of Composite Materials*, Oxford Üniversitesi Yayınları, New York, 1994.
- [87] Kailas Satish V., Material Science, Associate ProfessorDept. of Mechanical Engineering, Indian Institute of Science, India
- [88] Baker A., Dutton S., Donald K., *Composite Materials for Aircraft Structure*, Second Edition, American Institute of Aeronautics, Inc., Education Series, 2004.
- [89] Gutowski, T.G., *Advanced Composites Manufacturing*, John Wiley & Sons, Inc. 1997
- [90] Akovali, G., *Handbook of Composite Fabrication*, 2001.
- [91] Kruckenberg, T.P., R., *Resin transfer moulding for Aerospace Structures*, The Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1998.
- [92] Xu, J.a.M., Yulu, *The Technology and Applications of Resin Transfer Molding (RTM)*, China Plastics, 1992.

- [93] Huber, U.a.M., M. Methodical Application Of Liquid Composite Molding Simulation. In Proceedings Of The International Conference On High Performance Structures&Composites, İspanya, 2002.
- [94] Poliya, Polipol 3872, Ürün Bilgi Formu, www.poliya.com , 20 Mayıs 2012.
- [95] Plâstikler–Çekme Özelliklerinin Tayini–Bölüm 4: İzotropik Ve Ortotropik Elyaf Takviyeli Plâstik Kompozitler İçin Deney Şartları TS EN ISO 527-4 Revizyon
- [96] Plastik Kompozitler - Elyaf Takviyeli - Eğilme Özelliklerinin Tayini TS EN ISO 14125, Nisan 1999.
- [97] Plâstikler-Charpy Darbe Özelliklerinin Tayini - Bölüm 1: Ölçü Aletsiz Darbe Deneyi TS EN ISO 179-1, Ekim 2006.
- [98] Tekstil-Cam Takviyeli Plâstikler –Prepregler, Kalıplama Hamurları Ve Lâminatlar–Tekstil - Cam Ve Mineral Dolgu Muhtevasının Tayini – Kalsinasyon Metotları TS 1177 EN ISO 1172, Nisan 2004.
- [99] Agarwal, B.D., Broutman, L.J., Chandrashekara, K., Analysis and Performance of Fiber Composites, 3. Edition, Wiley, 2006.
- [100] Donald F. Adams, Comprehensive Composite Materials Volume 5: Test Methods, Nondestructive Evaluation, and Smart Materials, Test Methods for Mechanical Properties, Elsiver, 2000.
- [101] Tekstil-Cam Takviyeli Plâstikler –Prepregler, Kalıplama Hamurları Ve Lâminatlar – Tekstil - Cam Ve Mineral Dolgu Muhtevasının Tayini – Kalsinasyon Metotları TS 1177 EN ISO 1172, Nisan 2004.
- [102] Plastikler-Gözeneksiz Plâstikler–Yoğunluk Tayin Metotları–Bölüm 1: Daldırma Metodu, Sıvı Piknometre Metodu Ve Titrasyon Metodu, TS EN ISO 1183-1, Aralık 2006.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Tuğçegül GÜMÜLCİNE
Doğum Tarihi ve Yeri : 03.11.1986
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : tgumulcine@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Malzeme Bilimi	YTÜ	2014
Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	YTÜ	2010
Lise	Fen Bilimleri	Edremit Anadolu Lisesi	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012	Asil Çelik A.Ş	Satış Mühendisi
2011-2012	Mir Ar-Ge A.Ş	Ar-Ge Mühendisi

YAYINLARI

Makale

1. İzofitalik Polyester Matrisli Sürekli E-camı ve Bazalt Fiber Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri Üzerine Deneysel Bir Çalışma, Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 2013 BEEM Özel Sayısı YTUJENS-2012-194

Bildiri

1. Polipropilen Matrisli Kompozitlerde Maleik Anhidrit Aşılı Uyumlaştırıcı İlavesinin Kırılma Davranışlarına Etkisi, 9.Uluslararası Kırılma Konferansı, 2011
2. Rinoplasti Cerrahisinde Septal Kartilaj Yerine Kullanılabilecek Kostal Kartilajların Kırılma Davranışlarının İncelenmesi, 9.Uluslararası Kırılma Konferansı, 2011

Proje

1. İzofitalik Polyester Reçine Matrisli Cam Fiber ve Bazalt Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu, YÜLAP, 2010-2012