

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

**EPOKSİ MATRİS E-CAMI DOKUMA FİBER TAKVİYELİ
TERMOSET KOMPOZİTLERDE ÜÇÜNCÜ BİLEŞEN
KALSİT DOLGUNUN ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

CEVRIYE İLKAY ÜN

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

**DANIŞMAN
PROF. DR. AHMET ÜNAL**

İSTANBUL, 2015

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

**EPOKSİ MATRİS E-CAMI DOKUMA FİBER TAKVİYELİ
TERMOSET KOMPOZİTLERDE ÜÇÜNCÜ BİLEŞEN
KALSİT DOLGUNUN ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

CEVRİYE İLKAY ÜN

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

**DANIŞMAN
PROF. DR. AHMET ÜNAL**

İSTANBUL, 2015

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EPOKSİ MATRİS E-CAMI DOKUMA FİBER TAKVİYELİ
TERMOSET KOMPOZİTLERDE ÜÇÜNCÜ BİLEŞEN
KALSİT DOLGUNUN ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Cevriye İlkay ÜN tarafından hazırlanan tez çalışması 07/07/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 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
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Erdem DEMİRKESEN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programı'na bağlı olarak yapılan yüksek lisans tez çalışmasında, dünyanın öne çıkan mühendislik malzemelerinden termoset matrisli kompozitler temel alınarak epoksi matrisli dokuma e-camı fiber takviyeli kompozitlere üçüncü bileşen olarak ilave edilen kalsit (CaCO_3) dolgunun mekanik, fiziksel ve maliyet özelliklerine etkisi araştırılmış ve üretilen yeni malzemelerin karakterizasyonu yapılmıştır.

Bu çalışma altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde konuya genel bir giriş yapılarak konunun literatürdeki yeri belirtilmiş, bu çalışma için belirlenen amaca ve çalışma bitiminde elde edilmesi beklenen bilgilere değinilmiştir. İkinci bölümde, kompozitler hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde plastik malzemeler, takviye malzemeleri ve dolgu maddeleri hakkında bilgi verilmiş olup, plastik matrisli kompozitlerin önemi ve üretim yöntemleri açıklanmıştır. Tezin dördüncü bölümü deneysel çalışmalar olup, kullanılan malzeme ve yöntemler detaylı olarak anlatılmıştır. Beşinci bölümde ise deney sonucunda elde edilen bulgular tablo ve grafik şeklinde verilmiş olup, deney sonuçları irdelenmiştir. Tezin son bölümünde ise deney bulguları değerlendirilmiş, deneyin olumlu ve olumsuz yanları belirtilerek deney optimize edilmiştir.

Tez çalışmam esnasında beni destekleyen ve her koşulda yol gösteren, çok saygıdeğer danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet ÜNAL'a en derin şükranlarımı sunarım. Bu çalışma esnasında gerekli olan makine, teçhizat ve malzemelerin teminini sağlayan ve laboratuvarlarını kullanmama izin veren Mir Araştırma ve Geliştirme San. Tic. A.Ş.'ye teşekkür ederim. Çalışmam esnasında yardımlarından çok mutlu olduğum ve benden desteğini esirgemeyen sevgili hocam Arş. Gör. Dr. Aylin BEKEM'e ve Kimya Yüksek Mühendisi Betül KAHRAMAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Leoben'deki çalışmalarımda desteklerini esirgemeyen ve misafirperverliklerinden çok mutlu olduğum değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ralf SCHLEDJEWSKI'ye ve Spiridon KONSTANTOPOULOS'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Hayatım boyunca sevgi, ilgi ve desteklerini hissettirerek bana güç veren ve varlıklarından sonsuz mutluluk duyduğum canım annem Zehra ÜN'e; sevgili kuzenim Sibel SOĞUKKANLI'ya; sevgili kardeşim Emre ÜN'e en içten sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs, 2015

Cevriye İlkay ÜN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	4
BÖLÜM 2	
KOMPOZİT MALZEMELER	5
2.1 Kompozitlerin Özellikleri	6
2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	9
2.2.1 Genel Özelliklerine göre Kompozit Malzemeler	9
2.2.2 Yapı Bileşenlerinin Şekillerine göre Kompozit Malzemeler	9
2.2.2.1 Dağılma ile Dayancı Arttırılmış Kompozitler	9
2.2.2.2 Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler	10
2.2.2.3 Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler	11
2.2.2.4 Tabaka Yapılı Kompozit Malzemeler	14
2.2.2.5 Hibrit Kompozit Malzemeler	15
2.2.3 Matris Malzemelerine göre Kompozit Malzemeler	15
2.2.3.1 Metal Matrisli Kompozit Malzemeler	15
2.2.3.2 Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler	16
2.3 Kompozit Malzemelerin Mekaniği	17
2.3.1 Eş Yönlü Fiberlerde Elastiklik Özelliklerinin Analizi	17
2.3.2 Düzlemsel Gelişigüzel Dağılmış Sürekli Fiberlerin Elastiklik Modülü. 21	

2.3.3	Kompozit Malzemelerde Fiber Uzunluğunun Etkisi	22
2.3.4	Eş Yönlü Plakalarda Gerilmelerin İncelenmesi	26
2.3.5	Fiberlerin Hacim Oranlarının Bulunması	27
2.3.6	Ağırlık ve hacim oranları arasındaki ilişki.....	27
2.4	Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	27

BÖLÜM 3

PLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİTLER	31
3.1 Plastik Matrisli Malzemelerin Sınıflandırılması.....	37
3.1.1 Termoplastik Matrisli Malzemeler	38
3.1.2 Termoset Matrisli Malzemeler	39
3.1.2.1 Polyester	42
3.1.2.2 Vinilester	42
3.1.2.3 Epoksi	43
3.2 Fiber Malzemeleri	47
3.2.1 Cam Fiber.....	48
3.2.2 Karbon Fiber	50
3.3 Kompozitlerde Dolgu Maddelerinin Kullanımı	51
3.3.1 Dolgu Maddelerinin Genel Özellikleri.....	52
3.3.2 Dolgu Maddelerinin Seçimi	53
3.3.2.1 Kalsiyum Karbonat	54
3.3.2.2 Talk	57
3.3.2.3 Kaolen.....	59
3.4 Üretim Yöntemleri	60
3.4.1 Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi	60
3.4.2 Hazır Kalıplama Yöntemi.....	60
3.4.3 Otoklav Yöntemi	60
3.4.4 Fiber Sarma Yöntemi	61
3.4.5 Elle Yatırma Yöntemi	61
3.4.6 Profil Çekme Yöntemi	62
3.4.7 Sıcak Presleme Yöntemi	63
3.4.8 Reçine Transfer Kalıplama (RTM)	63
3.4.9 Vakum Torbalama Yöntemi	64
3.4.10 Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Prosesleri	66
3.4.10.1 Vakum Destekli Reçine İnfüzyonu (VARIM)	67
3.4.10.2 Vakum Destekli Reçine Kalıplama (VARTM)	68

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	69
4.1 Malzemeler	69
4.2 Numunelerin Hazırlanması	70
4.3 Mekanik Deneyler	74
4.3.1 Çekme Deneyi.....	74
4.3.2 Eğme Deneyi.....	77
4.3.3 Darbe Deneyi	79

4.3.4	Shore D Sertlik Deneyi	80
4.4	Fiziksel Deneyler	81
4.4.1	Kalsinasyon Deneyi	81
4.4.2	Su Absorbsiyonu	83
4.5	Mikroskobik Görüntüleme	84
4.5.1	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	84
BÖLÜM 5		
DENEYSEL BULGULAR VE İRDELEME		85
5.1	Mekanik Özellikler Açısından Deneysel Bulgular ve İrdeleme.....	85
5.1.1	Çekme deneyi	85
5.1.2	Eğme Deneyi	89
5.1.3	Darbe Dayanımı	93
5.1.4	Shore D Sertlik Deneyi	97
5.2	Fiziksel Açıdan İrdeleme	99
5.2.1	Kalsinasyon	99
5.2.2	Su Absorbsiyonu	101
5.3	Mikroskobik Görüntüleme	102
5.3.1	Taramalı Elektron Mikroskop (SEM).....	102
5.4	Maliyet Açısından İrdeleme	111
BÖLÜM 6		
SONUÇLAR VE ÖNERİLER		116
KAYNAKLAR.....		118
ÖZGEÇMİŞ.....		123

SİMGE LİSTESİ

E_m	Matris elastiklik modülü
E_p	Parçacık elastiklik modülü
V_m	Matrisin hacim oranı
V_p	Parçacığın hacim oranı
A_f	Fiberin kesit alanı
A_m	Matrisin kesit alanı
G_m	Matrisin kayma modülü
ν_m	Matrisin viskozitesi
P_f	Fibere uygulanan yük
P_m	Matrise uygulanan yük
M_m	Matris modülü
M_f	Fiber modül
ξ	Takviyelendirme ölçüsü
η	Yön faktörü
l_c	Kritik fiber uzunluğu
d_e	Fiber çapı
σ_ζ	Çekme dayanımı
σ_e	Eğme dayanımı
b	Deney numunesinin genişliği
h	Deney numunesinin kalınlığı
α_c	Charpy darbe mukavemeti
E_c	Deney numunesi kırılırken absorplanan ve düzeltilen enerji
b_N	Deney numunesinin genişliği
ρ_m	Matris yoğunluğu
ρ_f	E-camı fiber yoğunluğu
ρ_a	Kalsit dolgu yoğunluğu
M_t	Su absorbe etme yüzdesi
W_t	Sudaki numune kütlesi
W_O	Numune kütlesi

KISALTMA LİSTESİ

CTP	Cam Takviyeli Polimer
PE	Polietilen
PP	Polipropilen
PVC	Polivinilklorür
RTM	Reçine Transfer Kalıplama
VARIM	Vakum Destekli Reçine İnfüzyonu
VARTM	Vakum Destekli Reçine Kalıplama
E	Epoksi
ECF	Dokuma E-camı Fiber Takviyeli Epoksi Kompozit
E5K	Ağırlıkça % 5 Kalsit İçeren Epoksi
E10K	Ağırlıkça % 10 Kalsit İçeren Epoksi
E15K	Ağırlıkça % 15 Kalsit İçeren Epoksi
ECF5K	Ağırlıkça % 5 Kalsit içeren Dokuma E-camı Fiber Takviyeli Epoksi Kompozit
ECF10K	Ağırlıkça % 10 Kalsit içeren Dokuma E-camı Fiber Takviyeli Epoksi Kompozit
ECF15K	Ağırlıkça % 15 Kalsit içeren Dokuma E-camı Fiber Takviyeli Epoksi Kompozit

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Parçacık takviyeli kompozit yapı.....	10
Şekil 2. 2 Kompozit malzeme ve bileşenlerinin gerilme-gerinim grafiği.....	11
Şekil 2. 3 Fiberlerin kompozit içerisine yerleşim biçimleri.....	13
Şekil 2. 4 Tabaka yapılı kompozit üretiminin şematik gösterimi	15
Şekil 2. 5 Eşit gerinim durumunda fiber takviyeli kompozit malzeme	17
Şekil 2. 6 Eşit gerilme durumunda fiber takviyeli kompozit malzeme.....	19
Şekil 2. 7 Eşit gerinim ve eşit gerilmenin analitik düzlemde gösterimi.....	20
Şekil 2. 8 Voight ve Resus modeli	20
Şekil 2. 9 Elastiklik modülü ve elastiklik açısı arasındaki ilişki.....	22
Şekil 2. 10 Çekme gerilmesinin fiber boyuna göre değişimi	22
Şekil 2. 11 Çekme gerilmesine maruz kalan fiber etkisindeki matris	24
Şekil 2. 12 $l = l_c$ için fiber gerilim-pozisyon profili	24
Şekil 2. 13 $l > l_c$ için fiber gerilim-pozisyon profili	25
Şekil 2. 14 $l < l_c$ için fiber gerilim-pozisyon profili	25
Şekil 3. 1 Epoksi grubu	43
Şekil 3. 2 Epoksi reçinenin kimyasal kürlenmesi	44
Şekil 3. 3 Bisfenol A bazlı epoksi reçine bileşenleri.....	46
Şekil 3. 4 Bisfenol A bazlı epoksi reçine oluşumu	46
Şekil 3. 5 Diglisid eter bisfenol A	46
Şekil 3. 6 Trigonal rombohedral kalsit	56
Şekil 3. 7 Trigonal rombohedral kalsit	57
Şekil 3. 8 Kaolenin SEM görüntüsü	59
Şekil 3. 9 Enjeksiyon kalıplama yöntemi	60
Şekil 3. 10 Elle yatırma yöntemi.....	62
Şekil 3. 11 Hidrolik pres cihazının şematik gösterimi	63
Şekil 3. 12 Reçine transfer kalıplama	64
Şekil 3. 13 Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi	66
Şekil 3. 14 Vakum infüzyon yönteminin şematik gösterimi.....	68
Şekil 4. 1 Kürlenme esnasındaki % 10 kalsit dolgulu epoksi numune.....	71
Şekil 4. 2 Vakum torbalama deney görüntüleri	73
Şekil 4. 3 Vakum torbalama deney düzeneği.....	73
Şekil 4. 4 Kompozit plaka	74
Şekil 4. 5 Çekme deney numunesi	74

Şekil 4. 6 Çekme deney standardına uygun parça tipi	75
Şekil 4. 7 Çekme deney düzeneği.....	76
Şekil 4. 8 Çekme deney esnasında numunenin kopma anı.....	77
Şekil 4. 9 Üç noktadan eğme deneyi	77
Şekil 4. 10 Eğme deneyi	79
Şekil 4. 11 Darbe deney numunesi	79
Şekil 4. 12 Darbe deney düzeneği.....	80
Şekil 4. 13 Shore D sertlik deneyi.....	81
Şekil 4. 14 Kül fırını ve kroze içerisindeki numuneler	82
Şekil 4. 15 Su absorpsiyon deney numuneleri	83
Şekil 4. 16 Su absorpsiyon deneyi.....	83
Şekil 4. 17 Taramalı elektron mikroskop numunesi ve deney düzeneği	84
Şekil 4. 18 Elektrikli kesme makinası	84
Şekil 5. 1 Çekme deney grafiği	85
Şekil 5. 2 Çekme dayanımı grafiği	88
Şekil 5. 3 Çekme deneyi sonrası numuneler	89
Şekil 5. 4 Eğme deney grafiği	89
Şekil 5. 5 Eğme dayanımı grafiği	92
Şekil 5. 6 Eğme deneyi öncesi ve sonrası numune	92
Şekil 5. 7 Kompozit numunelerin çekme ve eğme modülü grafiği	93
Şekil 5. 8 Kompozit numunelerin darbe kırılma tokluğu grafiği	96
Şekil 5. 9 Darbe deney öncesi ve sonrası numune	97
Şekil 5. 10 Shore D sertlik deney grafiği.....	98
Şekil 5. 11 Kompozit malzemelerin mekanik değerleri.....	99
Şekil 5. 12 Kompozit malzemelerin su absorpsiyon grafiği.....	101
Şekil 5. 12 E-camı fiber epoksi kompozitin kopma alanı SEM görüntüsü	102
Şekil 5. 13 E-camı fiber epoksi kompozitin kopma alanı SEM görüntüsü.....	103
Şekil 5. 14 % 5 kalsit dolgulu e-camı fiber epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü.....	103
Şekil 5. 15 % 5 kalsit dolgulu e-camı fiber epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü.....	104
Şekil 5. 16 % 10 kalsit dolgulu e-camı fiber epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü....	104
Şekil 5. 17 % 10 kalsit dolgulu e-camı fiber epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü....	105
Şekil 5. 18 % 10 kalsit dolgulu e-camı fiber epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü....	105
Şekil 5. 19 % 15 kalsit dolgulu e-camı fiber epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü....	106
Şekil 5. 20 % 15 kalsit dolgulu e-camı fiber epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü....	106
Şekil 5. 21 % 5 kalsit dolgulu epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü	107
Şekil 5. 22 % 5 kalsit dolgulu epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü	108
Şekil 5. 23 % 5 kalsit dolgulu epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü	108
Şekil 5. 24 % 10 kalsit dolgulu epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü	109
Şekil 5. 25 % 10 kalsit dolgulu epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü	109
Şekil 5. 26 % 15 kalsit dolgulu epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü	110
Şekil 5. 27 % 15 kalsit dolgulu epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü	110
Şekil 5. 28 Malzemelerin maliyet grafiği.....	112
Şekil 5. 29 Kompozitlerin mekanik değerlere ve maliyete göre puanlandırılması	112
Şekil 5. 30 Maliyetin % 20, mekanik değerlerin % 80 önemli olduğu puanlama	113
Şekil 5. 31 Maliyetin % 50, mekanik değerlerin % 50 önemli olduğu puanlama	114
Şekil 5. 32 Maliyetin % 75, mekanik değerlerin % 25 önemli olduğu puanlama	114

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1 Çeşitli fiber malzemelerin mekanik özellikleri	12
Çizelge 2. 2 En çok kullanılan metal matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri	16
Çizelge 3. 1 Çeşitli malzemelerin mekanik değerleri	37
Çizelge 3. 2 En çok kullanılan termoplastiklerin mekanik ve fiziksel özellikleri	39
Çizelge 3. 3 Termoset malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri	41
Çizelge 3. 4 Polyesterlerin avantajları ve dezavantajları	42
Çizelge 3. 5 Epoksilerin avantaj ve dezavantajları	45
Çizelge 3. 6 Kompozitlerde kullanılan fiber çeşitlerinin özellikleri	47
Çizelge 3. 7 Cam fiberlerin mekanik özellikleri ve bileşimleri	49
Çizelge 4. 1 Epoksi 188 özellikleri	69
Çizelge 4. 2 Epoksi kalsit yüzde ağırlıkları	71
Çizelge 4. 3 Epoksi, fiber ve kalsit yüzde ağırlıkları	72
Çizelge 4. 3 Çekme deney numune boyutlandırılması	75
Çizelge 4. 4 Eğme deney numune boyutlandırılması	78
Çizelge 4. 5 Darbe deney numune boyutlandırılması	80
Çizelge 5. 1 Epoksi ve kalsit dolgulu epoksi numunelerin çekme deney verileri	86
Çizelge 5. 2 Dolgusuz ve kalsit dolgulu e-camı fiber epoksinin çekme deney verileri	87
Çizelge 5. 3 Epoksi ve kalsit dolgulu epoksi numunelerin eğme deney verileri	90
Çizelge 5. 4 Dolgusuz ve kalsit dolgulu e-camı fiber epoksilerin eğme deney verileri ...	91
Çizelge 5. 5 Epoksi ve kalsit dolgulu epoksi numunelerin darbe deney verileri	94
Çizelge 5. 6 Dolgusuz ve kalsit dolgulu e-camı fiber epoksilerin darbe deney verileri ...	95
Çizelge 5. 7 Shore D sertlik deney verileri	97
Çizelge 5. 8 Malzemelerin yoğunlukları	99
Çizelge 5. 9 Kalsinasyon ve kütle hesaplamaları	100
Çizelge 5. 10 Malzemelerin kütle ve hacim oranları	100
Çizelge 5. 11 Malzeme fiyatları	111

**EPOKSİ MATRİS E-CAMI DOKUMA FİBER TAKVİYELİ TERMOSET
KOMPOZİTLERDE ÜÇÜNCÜ BİLEŞEN
KALSİT DOLGUNUN ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

Cevriye İlkay ÜN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet ÜNAL

Polimer ve polimer kompozitler, yüksek modül, yüksek tokluk, korozyona karşı direnç, kolay işlenebilme, maliyet azaltma ve iyi tribolojik özellikleri sebebiyle endüstrisine kadar pek çok endüstriyel alanda önemli rol oynamaktadırlar. Günümüzde kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini arttırmaya yönelik birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar ağırlıklı olarak, çeşitli fiber hacim oranlarının kullanılması ve fiber yönünün değiştirilmesi ile mekanik özelliklerin artırılması şeklindedir. Bu alandaki son gelişme ise, fiber takviyeli kompozit malzemeye dolgu malzemeleri olarak adlandırılan ikinci bir takviye malzemesinin eklenerek mekanik özelliklerinin incelenmesi yönündedir.

Bu çalışmanın amacı üç bileşenli kompozitlerde (epoksi reçine, dokuma e-camı fiber, kalsit dolgu) değişen epoksi reçine ve kalsit dolgu hacim oranları değişiminin özelliklere etkisini incelemek ve bu inceleme sonucunda kompozit üretiminde hangi durumlarda hangi dolgu maddesi oranının kullanılabileceğini belirlemektir. Ağırlıkça % 0, 5, 10, 15 gibi çeşitli oranlarda kalsit dolgu maddesi ile dokuma e-camı fiber epoksi kompozit malzemeler vakum torbalama tekniği kullanılarak üretilmiştir. Ayrıca ikinci bir araştırma olarak epoksi malzemeye kalsit etkisi de çalışılmıştır. Ağırlıkça % 0, 5, 10, 15 gibi çeşitli oranlarda kalsit dolgu maddesi ile epoksi üretilmiştir.

Üretilen kompozitlerin, çekme dayanımı, eğme dayanımı, darbe dayanımı ve sertlik değerleri mekanik testlerle elde edilmiştir. Su absorpsiyonu ve fiber hacim oranları fiziksel testlerle edilmiştir. Ayrıca kompozitlerin üretiminde kullanılan fiber, epoksi ve dolgu maddelerinin fiyatları belirlenerek bir maliyet hesabı yapılmıştır. Sonuç olarak mekanik değerler ve maliyet için çeşitli tablolar elde edilmiştir.

Son olarak, deneysel veriler analitik olarak değerlendirilmiş, kırık yüzey görüntüleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Epoksi, E-camı fiber, Kalsit (CaCO_3), Mekanik özellikler.

ABSTRACT

THE EFFECT OF THIRD COMPONENT CALCITE FILLER ON PROPERTIES OF EPOXY MATRIX E-GLASS WOVEN FABRIC REINFORCED THERMOSET COMPOSITES

Cevriye İlkay ÜN

Department of Metallurgical and Material Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Ahmet ÜNAL

Composite materials play a vital role in many industrial applications because of high modulus and high toughness, resistance to corrosion, good tribological properties and so on. Nowadays lot of research is going towards enhancing the mechanical properties of the composites. Works are reported mainly enhancing the properties by varying the fiber volume fraction, orientation and so on. Recent development in this field is improving mechanical properties by adding secondary reinforcements called fillers.

Aim of this study is to investigate the effect of properties of a three component (epoxy resin matrix, e-glass woven fiber and calcite filler) composites with the change of epoxy resin and calcite filler volume ratios and determine in which cases which filler ratios should be used for manufacturing glass fiber reinforced composites. The e-glass woven fabric-epoxy composites have been fabricated with varying amounts of calcite particulate filler such as 0, 5, 10 and 15 (weight %) by using vacuum bagging technique. Also, the effects of calcite filler on epoxy resin have been studied in a second investigation. The epoxy have been fabricated with varying amounts of calcite particulate filler such as 0, 5, 10 and 15 (weight %).

The tensile strength, flexural strength, impact strength, hardness values of the produced composites were obtained by mechanical tests. The water absorption and fiber volume ratios were obtained by physical tests. Furthermore, a cost calculation

was made by determining the fiber, epoxy and filler prices. As a result, various charts related to mechanical properties and cost were obtained.

Finally, experimental data were considered analytically and the morphology of fractured surfaces is examined by using scanning electron microscopy (SEM).

Keywords: Epoxy, E-glass fiber, Calcite(CaCO_3), Mechanical properties.

1.1 Literatür Özeti

Polimer ve polimer kompozitler, yüksek modül, yüksek tokluk, korozyona karşı direnç, kolay işlenebilme, maliyet azaltma ve iyi tribolojik özellikleri sebebiyle havacılık ve uzay sanayinden otomotiv endüstrisine kadar pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Termoset polimerler arasında, epoksiler fiber takviyeli kompozitler için matris malzemeleri, yapısal yapıştırıcılar, kaplamalar ve diğer mühendislik uygulamaları gibi yüksek performans gerektiren yerlerde en çok kullanılan malzemelerdir. Epoksiler, yüksek mekanik ve termal özellikler, yüksek kimyasal ve korozyon direnci, çeşitli koşullar altında kolay işlenebilme, kürlenme esnasında düşük viskozite ve düşük kendini çekme özelliklerine sahiptirler. Bu polimer malzemeler yüksek mukavemet ve yüksek modül gereksinimlerine uygun olarak fiberlerle (cam fiber, karbon fiber v.b.) desteklenerek daha yüksek performansa sahip fiber takviyeli polimer kompozitler elde edilmektedir. Bunun yanı sıra, endüstride epoksi gibi polimer malzemelere dolgu malzemeleri ilavesi de oldukça rastlanılan bir durumdur. Dolgu malzemelerinin ilavesi, sertlik, tokluk ve yüksek sıcaklıkta yük taşıma kapasitesini artırırken, büzülme ve maliyeti azaltmaktadır.

Kompozit malzemeler kullanımları sırasında çekme, eğme ve basma gibi yüklere maruz kaldıklarından, bu malzemelerde mekanik hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu yüzden günümüzde kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini arttırmaya yönelik bir çok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar ağırlıklı olarak, çeşitli fiber hacim oranlarının kullanılması ve fiber yönünün değiştirilmesi ile mekanik özelliklerin artırılması

şeklindedir. Bu alandaki son gelişme ise, fiber takviyeli kompozit malzemeye dolgu malzemeleri (doğal dolgu malzemeleri, kalsit, talk, mika, mermer tozu v.b.) olarak adlandırılan ikinci bir takviye malzemesinin eklenerek mekanik özelliklerinin incelenmesi yönündedir.

Çekme yükü altındaki kısa cam fiber takviyeli epoksi kompozit malzemede dolgu maddesi olarak kullanılan uçucu kül malzemenin etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar, kısa cam fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin kırılma özelliklerinin, uçucu kül ilavesi ve fiberlerin kaplanması ile artabileceğini göstermiştir. Organize edilen sistemli bir deneysel çalışma ile partikül dolgu malzemelerin, cam fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin mekanik özelliklerini ve aşınma direncini geliştirme potansiyeline sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Srivastava vd. [1]).

Dokuma cam fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin çekme, eğme, basma ve kırılma yüklemeleri altındaki mekanik özelliklerini incelenmiştir (Wang vd. [2]).

Epoksi reçine ve kalsit içeren mermer tozlarından oluşan kompozit malzemenin deformasyon özellikleri üzerine bir çalışma yürütülmüş ve epoksi reçine ile mermer tozlarının etkileşim bölgelerinde malzemenin deformasyona uğradığını tespit edilmiştir (Khristova vd. [3]).

Cam fiber takviyeli ve kalsit (CaCO_3) dolgulu epoksi kompozit malzemenin çekme mukavemetini araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda cam fiber takviyeli epoksi kompozit malzemede, ağırlıkça artan cam fiber takviyesiyle beraber çekme mukavemetinin de arttığı gözlenmiştir. Cam fiber takviyeli ve CaCO_3 dolgulu epoksi kompozit malzemede fiber oranı ağırlıkça sabit kalmak koşulu ile malzeme içerisinde ağırlıkça artan dolgu malzemesi ile birlikte çekme mukavemetinin düştüğü gözlenmiştir (Paliwal vd. [4]).

Bambu fiber ve cam fiber takviyeli epoksi kompozit malzemeye çeşitli ağırlık oranlarında dolgu maddesi olarak kırmızı çamur ilave edilmiştir. Kırmızı çamur ilavesi ile mekanik özelliklerde iyileşme gözlemlenmiş ve erozyon testleri de uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kırmızı çamurun polimer kompozit yapıda potansiyel bir dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Biswas vd. [5]).

Cam fiber takviyeli epoksi kompozit malzemeye üçüncü bileşen olarak hacimce % 5, % 10, % 15 gibi değişen oranlarda yüksek miktarda kalsit içeren deniz kabukları ilave etmiş olup, bu dolgu malzemesinin kompozit malzemenin çekme mukavemeti, eğme mukavemeti ve sertlik gibi mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, dolgu malzemesi kullanılmayan kompozit malzemenin çekme ve eğme mukavemet değerlerinin, dolgu malzemesi kullanılan malzemeye oranla daha yüksek, sertlik değerlerinin ise daha düşük olduğunu gözlemlenmiştir. Hacimce değişen dolgu oranlarına sahip kompozit malzemeler karşılaştırıldığında, % 10 dolgu içeren kompozit malzemenin çekme ve eğme mukavemetinin diğerlerine göre daha yüksek, % 15 dolgu içeren kompozit malzemenin ise sertlik değerinin en yüksek olduğunu görülmüştür (Fernandes vd. [6]).

Epoksi malzemeye dolgu maddesi olarak ağırlıkça değişen oranlarda (% 10, % 20, % 30, % 40 ve % 50) dolomit, kuvars ve kalsit içeren uçucu kül ilave edilmiştir. Çekme, eğme, sıkıştırma, sertlik ve darbe deneyleri ile malzemenin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Yapılan çalışmada, ağırlıkça artan dolgu maddesi ile birlikte sertlik, çekme mukavemeti ve sıkıştırma mukavemetinin arttığı, darbe dayanımının ise azaldığı sonucuna varılırken, eğme mukavemeti ile ilgili kesin bir sonuca ulaşamamıştır (Saleh vd. [7]).

Cam fiber takviyeli polyester ve epoksi kompozit malzemelere pirinç kabuğu, buğday kabuğu ve hindistan cevizi lifi gibi doğal dolgu maddeleri ilave ederek, malzemenin mekanik özelliklerini ve aşınma direncini incelenmiş ve aynı zamanda bu iki farklı kompoziti karşılaştırılmıştır (Dhawan vd. [8]).

Dokuma cam fiber takviyeli epoksi kompozit malzemeye dolgu olarak ilave edilen geri dönüştürülmüş kauçuk malzemenin, kompozit yapının mekanik özelliklerine etkisini incelenmiştir. Elde edilen yeni kompozit malzemenin çekme ve eğme testlerinde iyi mekanik özelliklere sahip olduğu saptanmış olup, geri dönüştürülmüş kauçuk malzemenin takviye elemanı olarak kullanılabileceğini ileri sürülmüştür (Cerbu vd. [9]).

1.2 Tezin Amacı

Bu tez kapsamında, yapılan literatür araştırmaları doğrultusunda, dokuma E-camı fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerde, üçüncü bileşen olarak kullanılan kalsit (CaCO_3)

dolgunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi üzerine deneysel bir çalışma yapılması amaçlanmıştır. Bu şekilde üretilen kompozit malzemenin dokuma e-camı fiber takviyeli epoksi kompozit malzeme ile karşılaştırılması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda; epoksi, ağırlıkça % 5, % 10, % 15 oranlarda kalsit ilavesi ile elde edilen epoksi kompozit, dokuma e-camı fiber takviyeli epoksi kompozit ve ağırlıkça % 5, % 10, % 15 oranlarda kalsit ilavesi ile elde edilen dokuma e-camı fiber takviyeli epoksi kompozit üretimi olmak üzere dört farklı çeşit malzeme üretimi gerçekleştirilecek olup, mekanik ve fiziksel özellikleri yani karakterizasyonu belirlenecektir. Karakterizasyon ile elde edilen bilgilerden yola çıkarak malzemelerin karşılaştırılması yapılacaktır. Bu sonuçlardan hareketle yeni malzeme grupları oluşturularak mekanik özelliklerden ödün vermeksizin daha ucuz kompozit malzeme üretimi sağlanacaktır.

1.3 Hipotez

Cam fiber takviyeli termoset matrisli kompozit malzemeye dolgu ilavesi ile yeni bir kompozit malzeme üretilmesi ve karakterizasyonunun yapılması bu çalışmanın temel amacıdır. Literatür çalışmalarından elde edilen bilgilerle, polimer ve polimer kompozit malzemelerde kullanılan dolgu maddelerinin maliyeti düşürücü ve plastik özelliklerinin istenilen şekilde değiştirilmesi yani mekanik özellikleri iyileştirici etkisi düşünüldüğünde, dolgu ilaveli kompozit malzemelerin kullanımı daha da ön plana çıkmaktadır. Bu şekilde üretim yönteminde fazla bir değişiklik yapılmaksızın daha ekonomik yeni malzeme gruplarının elde edilmesi hedeflenmektedir. Üçüncü bileşen etkisinin (kalsit) dokuya katılması ile fiziksel ve kimyasal bazı özelliklerin değişimi de kaçınılmazdır. Bu özelliklerin saptanmasıyla da karakterizasyon işlemi tamamlanacaktır. Tüm bu çalışmaların sonucunda, hibrit yapıların özelliklerinin değişimi konusunda detaylı bilgiye ulaşılabilecektir.

BÖLÜM 2

KOMPOZİT MALZEMELER

Birbiri içinde çözünmeyen iki veya daha fazla malzemenin, aralarında bir ara yüzey oluşturmak koşuluyla, kimyasal bağ yapmaksızın meydana getirdikleri yeni malzeme grubuna "kompozit malzeme" denir (Hull [10]).

Kompozit malzemelerin en önemli avantajı, sergilediği özelliklerin kendini oluşturan bileşenlerinden üstün olmasıdır. Kompozit malzemelerin oluşturulmasıyla malzemede dayanım, tokluk, korozyon direnci, aşınma dayanımı, hafiflik, yorulma ömrü, ısıya bağlı davranışlar, termal yalıtım, termal iletkenlik, akustik yalıtım gibi özellikler iyileştirilebilmektedir.

Kompozit malzemeler makroskobik düzeyde birbirleriyle birleşmiş, matris ve takviye malzemesi olmak üzere 2 ana bileşenden oluşmaktadır. Bunun yanı sıra, maliyeti düşürmek ve malzeme özelliklerini geliştirmek amacıyla matrise veya kompozit yapısındaki iki ana bileşene ek olarak dolgu maddeleri ilave edilmektedir.

Kompozit yapısındaki iki ana bileşenden matris malzemeleri, takviye malzemelerini yük altında birarada tutmakta ve yükü eşit olarak takviye malzemelerine dağıtmaktadır. Böylece takviye malzemelerde plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkacak çatlak ilerlemesi olayının önüne geçilmekte ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirilmektedir. Ayrıca matris malzemeleri, aşınma gibi mekanik hasarlara ve çeşitli çevresel ve kimyasal etkilere karşı takviye malzemesini korumaktadır. Matris malzemeleri, kompozitin darbe, mukavemet, tokluk gibi mekanik özelliklerinde de çok önemli bir yer teşkil etmektedir. Bir kompozit yapı içerisinde yer alan matris

malzemesinin, yüksek mukavemet, yüksek elastik uzama, yüksek kayma mukavemeti, kullanım sıcaklığında düşük sürünme, yüksek tokluk ve darbe dayanımı, düşük ısı iletkenlik, takviye ile iyi bağ oluşturma, kimyasallara ve çözücülere dayanım, düşük nem emme, hızlı kürleşme, kürleşme sıcaklığının kullanım sıcaklığından çok yüksek olması, düşük çekme oranı, uzun raf ömrü, düşük öz kütlesi ve fiyat gibi özelliklere sahip olması istenmektedir (Peters [11]).

Takviye malzemeleri ise, kompozit malzemelere uygulanan yükün yaklaşık % 70-90'lık kısmını taşımakta ve matrisin maruz kaldığı gerilmeleri destekleyerek kompozit malzemenin dayanımını ve rijitliği arttırmaktadır. Kompozit malzeme içerisinde iskelet görevi üstlenen takviye malzemeleri, mekanik ve fiziksel özelliklerini matris yapıya aktararak, kompozit yapının özelliklerinin geliştirmektedir. Kullanılan takviye malzemesine göre elektriksel iletkenliği veya yalıtkanlığı sağlamaktadır.

Özetle kompozit yapının temel felsefesi, ana doku olarak adlandırılan düşük elastiklik modüllü ve yüksek kopma uzamalı matris malzemesi ile taşıyıcılık görevi görerek sistemin yükünü taşıyan görece olarak yüksek elastiklik modüllü ve düşük kopma uzamalı takviye veya dolgu malzemesinin birarada bulunmasıdır (Hull [10]).

2.1 Kompozitlerin Özellikleri

Kompozit malzemelerin günümüzde yaygın olarak kabul görmesindeki en önemli etken de kuşkusuz sunduğu avantajlardır. Kompozit malzemeler birçok özelliklerinin metallerinkine oranla çok farklılıklar göstermesinden dolayı, metal malzemelere göre önem kazanmışlardır. Kompozitlerin özgül ağırlıklarının düşük oluşu hafif konstrüksiyonlarda kullanımda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında, fiber takviyeli kompozit malzemelerin korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik izolasyonu sağlamaları da ilgili kullanım alanları için bir üstünlük sağlamaktadır. Kompozit malzemelerin özelliklerinin daha iyi anlaşılması, kompozitin son ürüne daha kolay ve etkin şekilde dönüştürülmesine olanak vermektedir. Özellikle kompozit malzemelerin dezavantajlı yanlarını ortadan kaldırmaya yönelik çalışmaların olumlu sonuçlanması ile kompozit malzemeler diğer malzeme gruplarının özellikle metalik malzemelerin yerini alabilecektir. Kompozit malzemelerin özelliklerini şu şekilde sıralayabiliriz.

Yüksek Mukavemet: Kompozit malzemelerin çekme ve eğilme mukavemeti birçok metalik malzemeye göre çok daha yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı kompozit malzemelere istenen yönde ve bölgede gerekli mukavemet verilebilir. Böylece malzemedan tasarruf yapılarak, daha hafif ve ucuz ürünler elde edilir.

Hafiflik: Kompozitler birim alan ağırlığında hem takviyesiz plastıklere, hem de metallere göre daha yüksek mukavemet değerleri sunmaktadırlar. Ürüne sağladığı yüksek mukavemet/hafiflik özelliği etkin bir şekilde kullanılmasındaki en önemli nedenlerden biridir. Metal kompozitlerin yoğunluğu genelde 3–4,5 gr/cm³ civarındadır, dolayısıyla en ağır kompozit türü olarak değerlendirilmektedir. Seramik kompozitler ise metal kompozitlere göre daha düşük yoğunluğa sahipler. Ancak en hafif kompozit ürünleri ise polimer esaslı kompozitlerden oluşmaktadır. Polimer kompozitlerin yoğunluğu genelde 1,5–2 gr/cm³ civarındadır. Metal kompozitlerle karşılaştırıldığında oldukça avantaj sağlamaktadır.

Rijitlik ve boyutsal kararlılık: Genleşme katsayıları nispeten düşük olup sert, sağlam bir yapı ve büyük bir boyut kararlılığı gösterir. Çeşitli mekanik, çevresel baskılar altında termoset kompozit ürünler şekillerini ve işlevselliklerini korumaktadırlar. Kompozitler takviyesiz termoplastiklerin viskoelastik ve büzülme özelliklerini sergilemezler.

Kolay Şekillendirilebilme: Büyük ve karmaşık parçalar tek işlemle bir parça halinde kalıplanabilir. Bu da malzeme ve işçilikten kazanç sağlar.

Elektriksel Özellikler: Uygun malzemelerin seçilmesiyle çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit malzeme ürünleri elde edilebilir. Bugün büyük enerji nakil hatlarında kompozit malzemeler iyi bir iletken ve gerektiğinde de başka bir yapıda, iyi bir yalıtkan malzemesi olarak kullanılabilirler.

Korozyona ve Kimyasal Etkilere Karşı Mukavemet: Kompozit malzemeler, hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilere zarar görmezler. Bu özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler kimyasal madde tankları, boru ve aspiratörler, tekne ve diğer deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır. Özellikle korozyona karşı mukavemetli olması, endüstride birçok alanda avantaj sağlamaktadır.

Isıya Dayanıklılık ve Yanmazlık Özelliği: Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozit malzemelerin ısıya dayanıklılık özelliği, yüksek ısı altında

kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bazı özel katkı maddeleri ile kompozit malzemelerin ısıya dayanımı arttırılabilir.

Kalıcı Renklendirme: Kompozit malzemeye, kalıplama esnasında reçineye ilave edilen pigmentler sayesinde istenen renk verilebilir. Bu işlem ek bir masraf ve işçilik gerektirmez.

Titreşim Sönümlendirme: Kompozit malzemelerde süneklik nedeniyle doğal bir titreşim sönümleme ve şok yutabilme özelliği vardır. Çatlak ilerlemesi olayı da böylece en aza indirilmiş olmaktadır.

Bütün bu özelliklerinin dışında kompozit malzemeleri olumsuz yanları da şu şekilde sıralanabilir.

- Kompozit malzemelerdeki hava boşlukları malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkilemektedir.
- Kompozit malzemeler değişik doğrultularda değişik mekanik özelliklere sahiptir. Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterir. Fiber doğrultusundaki elastik modülü, fibere dik doğrultudaki elastik modülünden daha büyüktür.
- Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları liflerde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez.
- Üretimi nispeten pahalıdır.

Görüldüğü gibi kompozit malzemeler, dezavantajlarına rağmen çelik ve alüminyuma göre birçok olumlu özelliğe sahiptir. Ancak olumlu özelliklerin hepsi aynı anda sağlanamaz. Kullanım yerine göre gereken özellikleri sağlayan uygun kompozit malzemenin seçimi ve üretimi yapılır. Bu özellikler ile kompozit malzemeler otomobil gövde ve tamponlarından deniz teknelerine, bina cephe ve panolarından komple banyo ünitelerine, ev eşyalarından tarım araçlarına kadar birçok sanayi kolunda problemleri çözümlenecek bir malzemedir.

2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri, genel özelliklerine, yapı bileşenlerinin şekillerine ve yapılarını oluşturan matris malzemelerine göre olmak üzere 3 şekilde sınıflandırmak mümkündür (Peter [11]).

2.2.1 Genel Özelliklerine göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeleri genel özelliklerine göre şu şekilde sıralayabiliriz.

- Doğal Kompozit Malzemeler (kas, kemik, ağaç vb.)
- Mikro Kompozit Malzemeler (çelik, cam takviyeli plastikler vb.)
- Makro Kompozit Malzemeler (helikopter kanadı, tekne gövdesi vb.)

2.2.2 Yapı Bileşenlerinin Şekillerine göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme yapılarını oluşturma seçeneği çok geniş ve farklı olduğundan dolayı sınıflandırma yapabilmek oldukça güç olmakla beraber, yapı bileşenlerinin şekillerine göre şu şekilde sınıflandırma yapılabilir (Peters [11]).

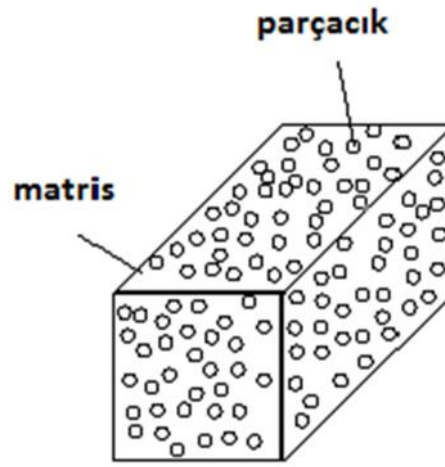
- Dağılma ile Dayancı Arttırılmış Kompozitler
- Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler
- Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler
- Tabaka Yapılı Kompozit Malzemeler
- Hibrit Kompozit Malzemeler

2.2.2.1 Dağılma ile Dayancı Arttırılmış Kompozitler

Bu tür kompozitlerde dokuda dağılmış ikincil parçacıklarla dayanç arttırılır. Parçacıkların dokuda düzgün dağılımı ve eş büyüklükte olması istenir. Parçacık çapı yaklaşık 5-10 A° olup homojen dağılma ile 10^{12} adet parçacık/mm³ koşulu sağlandığında bu tür kompozit oluşur (Hull [10]).

2.2.2.2 Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

Dağılma ile dayancı arttırılmış kompozitlere göre en önemli fark parçacık çaplarının daha büyük olmasıdır. Parçacık çapı 10^{-5} cm'dir. İzotropik özellik göstermektedirler. Makroskobik veya mikroskobik boyutlu parçacıklar kompozit malzeme özelliklerini farklı şekilde etkilerler. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. Bu kompozit türünde dayancın ve sertliğin artışı, parçacık oranının artmasıyla hacimsel şekil değiştirmenin zorlaştırılması esasına dayanır. Şekil 2.4'te parçacık takviyeli kompozit yapı gösterilmektedir (Kaw [13]).



Şekil 2. 1 Parçacık takviyeli kompozit yapı

Parçacık takviyeli kompozitin elastiklik modülü, "karışımlar kuralı'na" göre belirlenir. Kompozitin elastiklik modülü (2.1)'de gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$E_c = E_m V_m + E_p V_p \quad (2.1)$$

Burada E_m matris elastiklik modülü, E_p parçacık elastiklik modülü, V_m matrisin hacim oranı ve V_p parçacığın hacim oranıdır.

Benzer eşitlikten hareketle çekme dayancı (2.2)'de gösterildiği gibi ifade edilir. Burada σ_m matrisin çekme dayanımı, σ_p ise parçacığın çekme dayanımıdır.

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_p V_p \quad (2.2)$$

Diğer önemli parametre kayma modülü ise G_m matrisin kayma modülü, V_p parçacığın hacmi olmak üzere (2.3)'de gösterildiği gibi bulunur.

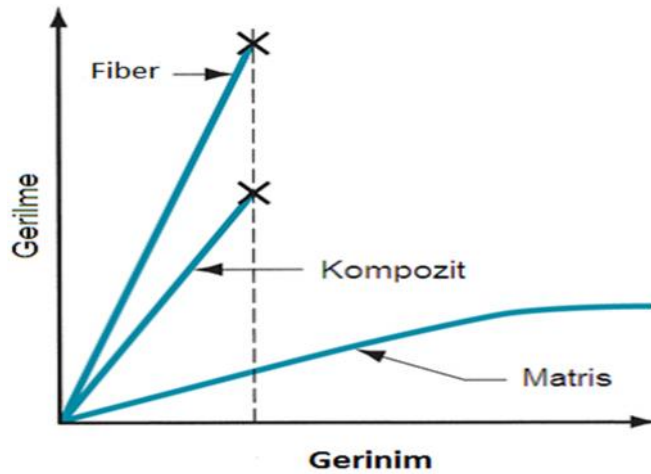
$$G_c = G_m(1 + 2,5V_p + 14,1 V_p^2 + \dots) \quad (2.3)$$

Bu şekilde elde edilmiş bir kompozitin plastik şekil değiştirme eğilimi kayma modülü ile orantılıdır. v_m matrisin viskozitesi, V_p parçacığın hacmi olmak üzere kompozitin viskozitesi (2.4)'te gösterildiği gibi ifade edilmektedir (Kaw [13]).

$$v_c = v_m(1 + 2,5V_p + 14,1 V_p^2 + \dots) \quad (2.4)$$

2.2.2.3 Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

Mekanik özellikleri büyük gelişme gösteren ve en çok kullanılan kompozit malzemeler, fiber takviyeli olanlardır. Fiber takviyeli kompozitler, elastisite modülü ve dayanımı düşük matris malzemesi içine yüksek bükülmezlik ve rijitlik değerlerine sahip olan fiberlerin ilave edilmesiyle meydana getirilmektedir. Bu fiberlerin matris malzemesi içerisine ilave edilmesiyle elde edilen kompozit malzemenin çekme dayanımı, yorulma dayanımı rijitlik ve bükülmezlik özelliklerinde iyi yönde artışlar olur. Kompozit malzeme içerisindeki fiber yoğunluğu kompozit malzemenin özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Fiber takviyeli kompozit malzeme bir yüke maruz kaldığında matris malzemesi yükü takviye malzemesine iletir ve yükün büyük bir kısmı takviye malzemesi tarafından karşılanır. Fiber takviyeli kompozitlerde kullanılan fiber malzemeler, yeni malzemenin dayanım ve rijitlik gibi özelliklerini geliştirmekle birlikte kompozit malzemenin çalışma sıcaklığında da iyileştirmeler yapmaktadır [14], [15].



Şekil 2. 2 Kompozit malzeme ve bileşenlerinin gerilme-gerinim grafiği

Kompozit malzeme ve bileşenlerinin gerilme-gerinim grafiği Şekil 2.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 2. 1 Çeşitli fiber malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastiklik modülü (GPa)	Kopma uzaması (%)
E-camı	2,54	3448	72,4	2,75
S-camı	2,49	4585	85,5	-
Bor	2,68	3448	413,7	0,7
Karbon	1,85	2900-2000	520-220	0,5-1,3
Kevlar49	1,44	2706	131	2,5

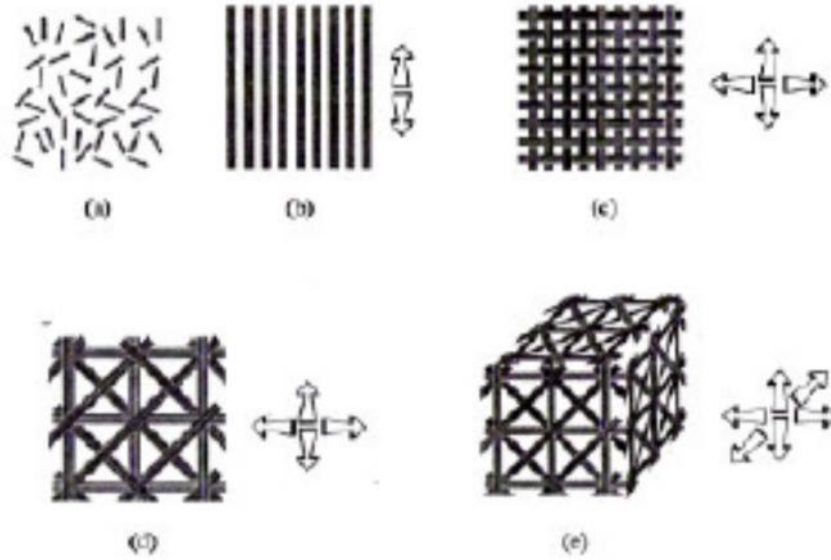
Cam, karbon, aramid, bor, SiC ve metal gibi malzemeler fiber olarak çok kullanılır. Cam fiberlerin dayanımları yüksektir ancak elastiklik modülleri alüminyum kadardır. Karbon, kristal ya da amorf yapı içinde bulunabilir. Kristal şekilde bulunması yüksek rijitlik sağlarken, amorf yapıya dahil olması dayanımı yükseltir. Kevlar, yoğunluğu çok düşük, daha az rijit, fakat karbona göre daha ucuz takviye bir malzemesidir. İmalat özellikleri iyi olduğundan sıkça kullanılır. Bor, rijitliği yüksek bir takviye türü olup, metal matrise uygun bir malzemedir. Ancak diğer fiber çeşitlerine göre pahalıdır. Çeşitli fiber malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 2.1’de saptanmıştır.

Fiber takviyeli kompozitlerin mühendislik performansını etkileyen en önemli faktörleri; fiberlerin şekli, uzunluğu, yönlenmesi, matrisin mekanik özellikleri ve fiber-matris arayüzey özellikleridir.

Fiber takviyeli kompozitlerde fiberler sürekli ve süreksiz formlarda olup, süreksiz fiberler kısa süreksiz ve uzun süreksiz fiber olmak üzere ikiye ayrılır. Sürekli fiber takviyeli kompozitlerin temel birimi; bükümlü veya bükümsüz fiberlerin tek yönlü, dokuma ya da örgü olarak matris içinde dizilmesiyle oluşan tabakalardır. Tabakalar birbirleri üzerinde çeşitli açılarda istiflenerek çok yönlü tabakaları oluşturmaktadır.

Fiber takviyeli kompozitlerde kullanılan fiberlerin malzeme içerisindeki yönlenmeleri kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini direkt olarak etkilemektedir. Fiberler kompozit içerisine uygun geometrilerde yerleştirilerek, kompozitin çekme gibi yüklemelere farklı yönlerde farklı yanıtlar vermesi sağlanmakta, yani malzeme

anizotropik özellik göstermektedir. Matris yapısında homojen dağılmış kısa fiberlerle ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Fiber takviyeli kompozitlerde fiberlerin kompozit içerisine yerleşim biçimlerine örnekler (a) kesikli rastgele, (b) sürekli tek yönlü, (c) sürekli düzlemsel iki yönlü, (d) sürekli düzlemsel üç yönlü, (e) üç boyutlu (oklar, mekanik dayanımın iyi olduğu yönleri gösterir.) olmak üzere Şekil 2.3’de gösterilmiştir (Kulshreshta ve Vasile [15]).



Şekil 2. 3 Fiberlerin kompozit içerisine yerleşim biçimleri

Sürekli fiberler, polimer matris içerisine genellikle rastgele dağıtılırlar ve böyle bir kompozit mekanik özellik açısından izotropik davranır. Sürekli fiberler genelde yükün yönüne paralel olacak şekilde reçine içerisine yatırılırlar. Birkaç yönden yüklemeye karşılaşılabilecek kompozitler, fiberlerin farklı yönlerde yerleştirilmesi veya dokumalar kullanılarak hazırlanabilir. Dokumalar, kompozite her zaman en az iki yönde dayanıklılık kazandırılan takviye edicilerdir. Üç boyutlu dokumalarla kompozitin mekanik dayanımı her üç yönde arttırılmaktadır (Wallenberger vd. [16]).

Sürekli fiber takviyeli kompozitler, yönlendirme özelliklerinden dolayı diğer takviye elemanlarına göre daha üstün özelliklere sahiptirler. Tek yönde çekme zorlanmasına maruz kalan bölgelerde yönlendirilmiş uzun fiberler nedeniyle maksimum dayanım özellikleri sergilenir. Ancak fiber eksenine dik doğrultuda düşük özellikler elde edilir. Çünkü fiber eksenine dik doğrultuda çekme zorlanmasına karşı direnç gösteren ve yükü taşıyan matris malzemesidir. Bu sorunu gidermek için hem fiber eksenine dik hem de

fiber eksenine paralel doğrultuda kuvvet uygulandığında mekanik özellikleri iyileştirmek için ise değişik açılarda takviyelendirme yapılmak suretiyle bu doğrultularda daha yüksek özelliklerin elde edilmesi mümkün olabilmektedir.

Fiberlerin mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Ayrıca, fiberlerin uzunluk/çap oranı arttıkça matris tarafından fiberlere iletilen yük miktarı artmaktadır. Elyaf yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir.

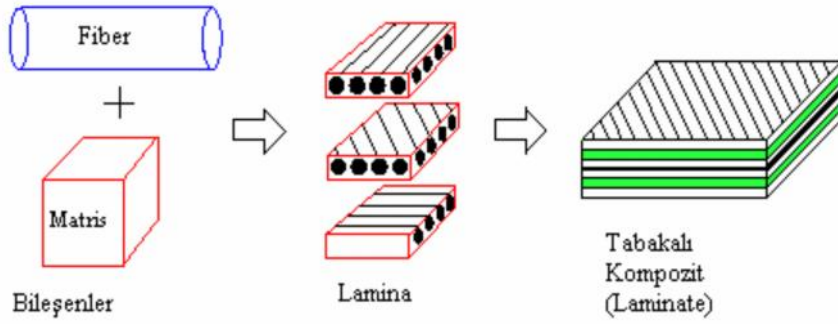
Kompozit yapının mukavemetinde önemli olan diğer bir unsur ise fiber matris arasındaki bağın yapısıdır. Matris yapıda boşluklar söz konusu ise fiberlerle temas azalacaktır. Nem absorpsiyonu da elyaf ile matris arasındaki bağı bozan olumsuz bir özelliktir [14], [16].

2.2.2.4 Tabaka Yapılı Kompozit Malzemeler

Tabaka yapılı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiptir. Farklı fiber yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilir. Isıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Genelde lamine (çok katlı) ve sandviç (basit tipli) olmak üzere iki grupta ele alınmaktadır. Sandviç yapılar, yük taşımayarak sadece izolasyon özelliğine sahip olan düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemenin alt ve üst yüzeylerine mukavemetli levhaların yapıştırılması ile elde edilirler.

Bu tür kompozitlerin en önemli avantajı yüzey kırılmalarında kullanılan malzemeleri aşındırıcı, saldırgan ve benzeri ortamlara dayanıklı ve seçildiğinde korozyon problemini ortadan kaldırıcı nitelikte olmasıdır.

Sürekli fiber takviyeli tabaka yapılı kompozitler uçak yapılarında, kanat ve kuyruk grubunda yüzey kaplama malzemesi olarak çok yaygın bir kullanıma sahiptirler. Ayrıca, uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanı olan sandviç yapılar da tabaka yapılı kompozit malzemelere örnektir. Şekil 2.4'te tabaka yapı kompozit üretiminin şematik gösterimine yer verilmiştir (Wallenberger vd. [16]).



Şekil 2. 4 Tabaka yapılı kompozit üretiminin şematik gösterimi

2.2.2.5 Hibrit Kompozit Malzemeler

Aynı kompozit yapıda iki ya da daha fazla fiber çeşidinin bulunması olasıdır. Bu tip kompozitlere hibrit kompozit malzemeler denir. Bu alan yeni tip kompozitlerin geliştirilmesine uygun bir alandır. Örneğin, kevlar ucuz ve tok bir fiberdir fakat basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ancak iyi basma mukavemeti olan bir fiberdir. Bu iki fiberin kompozit yapısında hibrit kompozitin tokluğu grafit kompozitten iyi, maliyeti düşük ve basma mukavemeti de kevlar fiberli kompozitden daha yüksek olmaktadır (Wallenberger vd. [16]).

2.2.3 Matris Malzemelerine göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler yapılarında kullanılan matris malzeme türlerine göre metal matrisli kompozit malzemeler, seramik matrisli kompozit malzemeler ve plastik matrisli kompozit malzemeler olmak üzere 3 ana grupta incelenmektedir.

2.2.3.1 Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Bu malzemeler ana yapıyı matris metalin oluşturduğu ve takviye elemanı olarak da genellikle seramik bir takviye fazının kullanıldığı kompozitlerdir. Metal matris kompozitler geleneksel malzemelere en büyük alternatiftir. Bu malzemeler, genel matris malzemesi ile karşılaştırıldığında daha yüksek mukavemete, elastisite modülüne, sertliğe ve aşınmaya karşı dayanım özelliklerine, daha iyi mukavemete, tokluğa, ısı iletkenliğe, abrazyon ve sürtünme direnci ile boyutsal stabiliteye sahiptirler.

Metal matrisli malzemelerde çok yaygın olarak kullanılan matris malzemesi, düşük yoğunluklu iyi tokluk ve mekanik özelliklere sahip olan hafif metaller ve alaşımlarıdır.

Bu hafif metal alaşımları dayanım ve özgül ağırlık oranlarının iyi olması nedeniyle hafif yapı konstrüksiyonlarda tercih edilirler. Genellikle alüminyum, magnezyum, nikel, bakır ve çinko matris malzemesi olarak kullanılır. Metallerin ve metal alaşımlarının birçoğu yüksek sıcaklıkta bazı özellikleri sağlamalarına rağmen kırılgan olmaktadır. Fakat metalik fiberler ile takviye edilmiş metal matrisli kompozitler her iki fazın uyumlu çalışması ile yüksek sıcaklıkta da yüksek mukavemet özelliklerini vermektedir. Bakır ve alüminyum matrisli, wolfram ve molibden fiberli kompozitler ve alüminyum-bakır kompoziti bize bu kompozisyonu en iyi veren örneklerdir. Bu tip kompozitler, matrisin özelliklerini iyileştirdiği gibi bu özelliklere daha ekonomik ulaşılmasını sağlar.

Metal matrisli kompozitlerin üretiminde yaygın olarak kullanılan takviye malzemeleri ise silisyum karbür, bor karbür ve alüminadır. Bu kompozitler yaygın olarak otomotiv, havacılık ve savunma sanayinde kullanılmaktadır. Bazı metal matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir (Wallenberger vd. [16]).

Çizelge 2. 2 En çok kullanılan metal matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri

Özellik	SiC/Al	Grafit/Al	Çelik	Al
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,6	2,2	7,8	2,6
Elastiklik modülü (GPa)	117,2	124,1	206,8	68,95
Çekme dayanımı (MPa)	1206	448,2	648,1	234,4

2.2.3.2 Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

Seramik malzemeler çok sert ve kırılgandırlar. Ayrıca yüksek sıcaklık dayanımlarına ve göreceli düşük yoğunluk özelliklere sahiptirler. Seramik malzemeler ısı şok direnci ve tokluğu düşük malzemelerdir. Seramiklerin, matris olarak kullanılması halinde kompozit malzemeler 1300 °C sıcaklığa kadar kullanılabilme şansına sahip olur. Alümina, silisyum nitrür ve bor karbür gibi yapısal ve fonksiyonel nitelikli yüksek teknoloji seramikleri kullanılarak seramik matrisli kompozitler elde edilmektedir. Sandviç zırhlar, çeşitli askeri amaçlı parçalar imali ile uzay araçları bu ürünlerin başlıca kullanım yerleridir.

Seramik matrise ilave edilen karbon, seramik ve cam fiberler özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları gibi özel şartlar için geliştirilmektedir. Seramik malzemelerin seramik fiberler ile takviye edilmesi durumunda, mukavemet yükselmekte ve tokluklar da artmaktadır. Alümina ve zirkonya esaslı seramik kompozitler üzerindeki son yıllardaki çalışmalar, bu malzemelerin sadece roket başlığı, uzay araçları gibi uygulamalarda değil aynı zamanda insan vücudunda da biyomalzeme olarak kullanılmaya başlanmasına sebebiyet vermiştir.

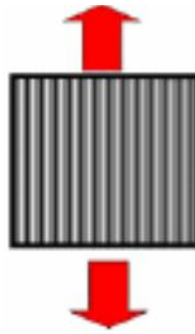
Metal veya metal olmayan malzemelerin bileşiminden oluşan seramik kompozitler, yüksek sıcaklıklara karşı çok iyi dayanım göstermekle birlikte rijit ve gevrek bir yapıya sahiptirler. Ayrıca elektriksel olarak çok iyi bir yalıtkanlık özelliği gösterirler (Wallenberger vd. [16]).

2.3 Kompozit Malzemelerin Mekaniği

Bu kısımda lineer elastik davranış gösteren alanda fiber takviyeli kompozitlerin elastiklik özellikleri incelenecektir.

2.3.1 Eş Yönlü Fiberlerde Elastiklik Özelliklerinin Analizi

Sürekli fiber takviyeli bir malzeme Şekil 2.3'te gösterildiği gibi fiber yönüne paralel (1 yönünde) bir yükleme etkisi altında iken, fiber ve matris üzerindeki gerilmeler sırasıyla (2.5) ve (2.6)'da gösterildiği gibi ifade edilir.



Şekil 2. 5 Eşit gerinim durumunda fiber takviyeli kompozit malzeme

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1 \quad (2.5)$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_1 \quad (2.6)$$

Eğer doğru bir kompozit yapılmışsa $E_f \gg E_m$ ise yükün büyük bir kısmı fiberler tarafından taşınacaktır.

Kompozitin kesit alanı A , zorlamanın yapıldığı 1 yönünde ortalama gerilme σ_1 ise yük (2.7)'de gösterildiği gibi ifade edilir.

$$P = \sigma_1 A \quad (2.7)$$

Bu ifade aynı zamanda P_f , P_m sırasıyla fibere ve matrise uygulanan yük olmak üzere (2.8)'de gösterildiği gibidir.

$$P = P_m + P_f \quad (2.8)$$

$$P_f = \sigma_f A_f \quad (2.9)$$

$$P_m = \sigma_m A_m \quad (2.10)$$

$$P = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (2.11)$$

(2.11)'de ifade edilen A_f , A_m sırasıyla fiberin ve matrisin kesit alanıdır.

(2.5) ve (2.6)'yı (2.11)'de yerine koyduğumuzda (2.13)'de belirtilen "eşit gerinim koşulu" elde edilir.

$$E_1 \varepsilon_1 A = E_f \varepsilon_f A_f + E_m \varepsilon_m A_m \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f \quad (2.13)$$

$$E_1 = E_f \frac{A_f}{A} = E_m \frac{A_m}{A} \quad (2.14)$$

Eğer hatasız bir üretim yapılmışsa (2.15) ve (2.16)'dan yararlanılarak (2.19) bulunur.

$$\frac{A_f}{A} = V_f \quad (2.15)$$

$$\frac{A_m}{A} = V_m \quad (2.16)$$

$$E_1 = E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.17)$$

$$V_m = 1 - V_f \quad (2.18)$$

$$E_1 = E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2.19)$$

(2.19) eşitliği “karışımlar kuralı” olarak bilinir ve lineer bir ifadedir. Karışımlar kuralı, çekme dayancı içinde geliştirilebilir ve çekme dayancı (2.20)’de gösterildiği gibi ifade edilir.

$$\sigma_1 = \sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (2.20)$$

Doğru kompozit yapıp yapılmadığının göstergelerinden biri de kırılma anında yükün ne kadarının fiberler tarafından taşındığının belirlenmesidir.

P yük, f fiber olmak üzere (2.21) eşitliği bulunur.

$$\frac{P_f}{P_1} = \left(\frac{E_f}{E_1} \right) V_f \quad (2.21)$$

Sürekli fiber takviyeli bir malzeme Şekil 2.6’da gösterildiği gibi fiber yönüne dik olarak (2 yönünde) bir yükleme etkisi altında iken, (2.22)’de gösterildiği gibi eşit gerilme koşulu oluşur.



Şekil 2. 6 Eşit gerilme durumunda fiber takviyeli kompozit malzeme

$$\sigma_2 = \sigma_c = \sigma_m = \sigma_f \quad (2.22)$$

Gerilmeler, gerinim cinsinden (2.23) ve (2.24) ile ifade edilir.

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f} \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m} \quad (2.24)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_f + \varepsilon_m \quad (2.25)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m V_m \quad (2.26)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_f} V_f + \frac{\sigma_2}{E_m} V_m \quad (2.27)$$

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f} \quad (2.28)$$

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{E_f(1-V_f) + E_m V_f} \quad (2.29)$$

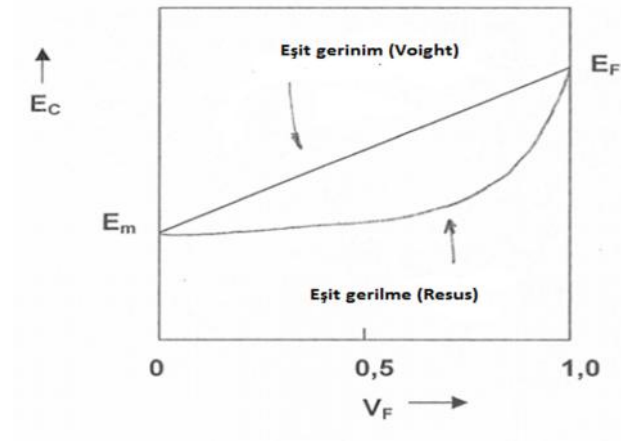
(2.29)'da gösterilen eşitlikle kompozit malzemenin gerilmesi bulunur.

Eğer kalın cidarlı kompozitler söz konusu ise matrisin sünekliği söz konusu olacağından (2.30) ve (2.31) eşitliği kullanılır [13], [16], [17].

$$E_2 = \frac{E_f E_{m'}}{E_f(1-V_f) + E_{m'} V_f} \quad (2.30)$$

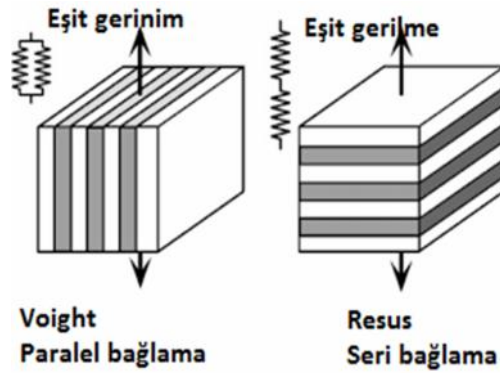
$$E_{m'} = \frac{E_m}{1-v_m^2} \quad (2.31)$$

Burada v_m matrisin poisson oranıdır.



Şekil 2. 7 Eşit gerinim ve eşit gerilmenin analitik düzlemde gösterimi

Eşit gerinim ve eşit gerilmenin analitik düzlemde gösterimi Şekil 2.7'te verilmiştir. Bunun yanı sıra, eşit gerinim ve eşit gerilme yayların paralel ve seri bağlanması biçiminde Şekil 2.8'da gösterildiği gibi modellenenebilir [17], [18].



Şekil 2. 8 Voight ve Resus modeli

Sonlu elemanlar ve elastisite teorileri ile yeni teoremler geliştirilmektedir. Amaç uygulamada en az hata veren eşitlik elde etmektir.

$$E_1 = E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2.32)$$

$$v_{1,2} = v_f V_f + v_m V_m \quad (2.33)$$

(2.32) ve (2.33)'de gösterilen eşitlikler sınırlamalarla veya eşitliğin doğru modifiye edilmesiyle doğru sonuçlar vermektedir. Bu yüzden (2.34) ve (2.35)'te gösterilen Halpin-Tsai eşitlikleri geliştirilmiştir.

$$\frac{M}{M_m} = \frac{(1+\xi V_f)}{(1-\eta V_f)} \quad (2.34)$$

$$\eta = \frac{\frac{M_f}{M_m} - 1}{\frac{M_f}{M_m} + \xi} \quad (2.35)$$

Burada M modül, M_m matris modülü, M_f fiber modülü, η yön faktörü ve ξ takviyelendirme ölçüsüdür. ξ fiber yönlenmesi ve diziliş geometrisine bağlı olup, Halpin-Tsai plastik matrisli kompozitler için $\xi = 0,2$ elde etmiştir (Kutz [18]).

2.3.2 Düzlemsel Gelişigüzel Dağılmış Sürekli Fiberlerin Elastiklik Modülü

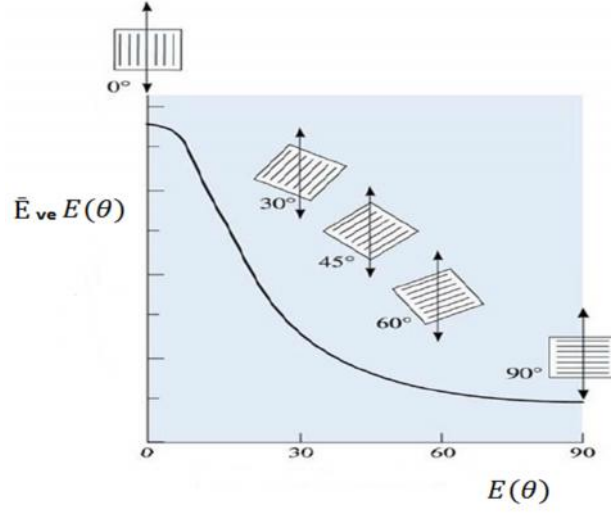
Yeterince uzun veya dokuma şeklindeki fiberler sahip bir kompozit malzemede elastiklik özellikler $-\frac{\pi}{2}$ 'den $+\frac{\pi}{2}$ 'ye kadar alanda incelenir ve makro oranda düzlemsel izotropik (düzgün yerleştirilmiş) kabul edilir. Böylesi bir kompozitte inceleme yapıldığında kompozit üzerinde var olan etkin elastiklik modülü $\bar{E}$ olup, (2.36) ile ifade edilir (Kaw [13]).

$$\bar{E} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} E(\theta) d\theta \quad (2.36)$$

Eşitlikteki $E(\theta)$ eş yönlü fiber kompozitte fiberlerle θ açısı yapan yöndeki E modülüdür. Sabit hacim oranları için $E(\theta)$, (2.37)'da gösterildiği gibi bulunur.

$$\frac{1}{E(\theta)} = \frac{1}{E_1} \cos^4 \theta + \left(\frac{1}{G_{1,2}} - \frac{2v_{1,2}}{E_1} \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{1}{E_2} \sin^4 \theta \quad (2.37)$$

Burada v poisson oranı, G kayma modülü, E_1 paralel yöndeki elastiklik modülü ve E_2 ise dik yöndeki elastiklik modülüdür. Konunun analitik gösterimi Şekil 2.9'da verilmiştir (Kutz [18]).

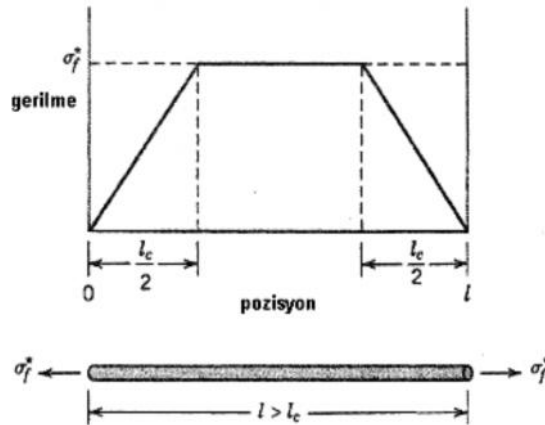


Şekil 2. 9 Elastiklik modülü ve elastiklik açısı arasındaki ilişki

2.3.3 Kompozit Malzemelerde Fiber Uzunluğunun Etkisi

Tek yönlü sürekli fiber takviyeli kompozitlere bir kuvvet uygulandığında kompozit önce elastik olarak deforme olur. Bunun sonucu olarak kompozitte meydana gelen uzama miktarları, $\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f$ şeklindedir. Burada ε_c kompozit gerinimi, ε_m matris gerinimi ve ε_f fiber gerinimidir.

Mühendislik uygulamaları için geliştirilen kompozit malzemelerin çoğunda süreksiz fiberler kullanılır. Fiberler malzemenin boyunca uzamadıklarından fiberle matris arasındaki bağ orta kısımlara göre daha düşük oranlarda gerilme taşıyan fiber uçlarında kopar.



Şekil 2. 10 Çekme gerilmesinin fiber boyuna göre değişimi

Şekil 2.10'da görüldüğü gibi fiberlerdeki gerilme uçlarda düşük olup belirli bir mesafede maksimum değerine ulaşmakta ve fiberin orta kısımlarında sabit kalmaktadır. Gerilmenin uç kısımlarda düşük olması nedeniyle mukavemet hesaplamalarında fiberin maksimum gerilmesi yerine ortalama gerilmesinin alınması gerekir. Süreksiz fiber kompozitlerde, fiberler genellikle elastik davranış gösterirler. Fiberlerin elastik, matrisin elastik veya plastik davranmaları durumuna göre kompozit malzemeye gelen gerilmenin fiberlere ne şekilde transfer edildiğini anlamak için d_e çapındaki bir fiberin, matris içerisinde l mesafesine kadar yer aldığı ve matris ile kusursuz ara yüzey bağı oluşturduğu kabul edilir.

Fibere bir çekme gerilmesi uygulandığında fiber-matris ara yüzeyinde kayma gerilmesi oluşur. Bu kayma gerilmesine göre fiber üzerine etkiyen kuvvet (2.38)'de gösterildiği gibi olacaktır.

$$F = 2\pi \tau_m l \quad (2.38)$$

Fiber-matris ara yüzeyindeki kayma gerilmesinin maksimum değeri τ_m , fiberin kopma gerilmesi σ_f ile gösterildiğinde fiber üzerindeki çekme kuvveti arttırılırsa fiberin matristen ayrılmadan (ara yüzeyden sıyrılmadan) kopabilmesi için (2.39)'de verildiği gibi olmalıdır.

$$2\pi \tau_m l > \pi r^2 \sigma_f \quad (2.39)$$

$$d_e = 2r \quad (2.40)$$

$$\frac{l}{d_e} \geq \frac{\sigma_f}{4\tau_m} \quad (2.41)$$

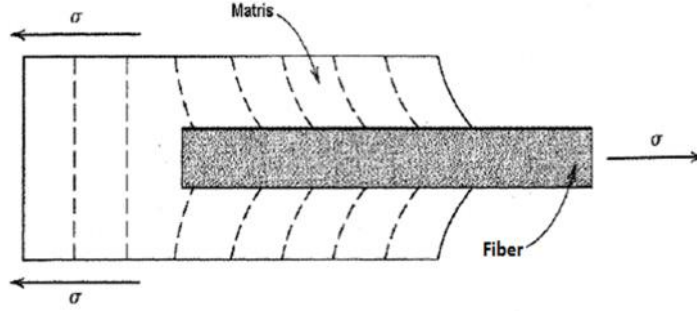
l/d_e oranı "şekil oranı" olarak adlandırılır. Bu oran fiberin matristen ayrılmadan kopabilmesi için gereken değerdir. (2.41) fiberin mukavemet artışında etkili olması için yeterince ince ve uzun olması gerektiğini göstermektedir.

Ara yüzeydeki kayma gerilmesi yüksek olduğunda l/d_e oranının küçülmesi mümkündür. Şekil 2.10'a göre fiberin çekme mukavemetine $l = l_c/2$ mesafesinde ulaşıldığından, (2.41)'da l yerine $l = l_c/2$ yazılarak (2.42) elde edilir.

$$\frac{l_c}{d_e} = \frac{\sigma_f}{2\tau_m} \quad (2.42)$$

Burada l_c/d_e kritik şekil oranıdır.

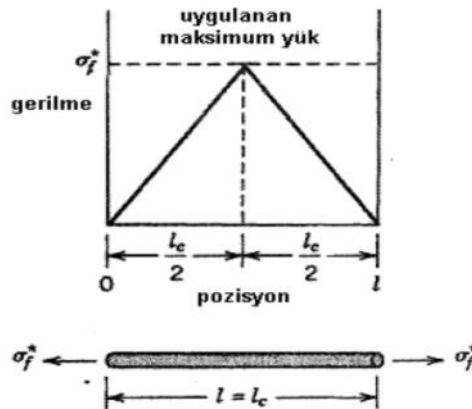
Fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, bileşenlerinin özelliklerine ve uygulanan yükün matris tarafından fiberlere iletilme derecesine bağlıdır. Bu iletim temel olarak fiber ve matris arasındaki bağ ile sağlanır. Kesikli fiberlerde, fiber matris arasındaki bağ fiberin sonunda kesilmektedir. Bu, her bir fiberin sonunda, matristen fibere bir yük transferi olmaması anlamına gelir.



Şekil 2.11 Çekme gerilmesine maruz kalan fiber etkisindeki matris

Şekil 2.11’de fiber yönü boyunca uygulanan çekme yükünde fiber çevresindeki matriste meydana gelen deformasyon örneği gösterilmiştir. Deformasyonun fiberin sonuna doğru azaldığı görülmektedir.

Fiber takviyesinin boyu çok kısa olursa, matrinden fibere yük aktarılamaz veya yükün çok küçük bir kısmı aktarılabilir. Bu da kompozit malzemede fiberle takviyelendirme ile anlamlı bir dayanım artışı sağlanamaması anlamına gelir

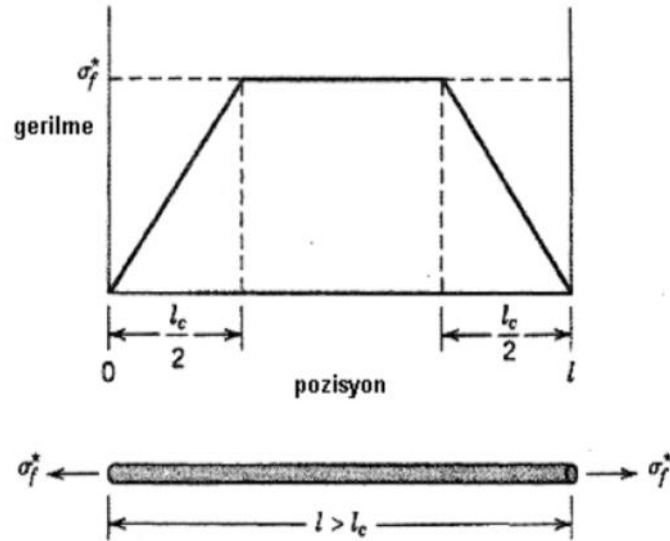


Şekil 2.12 $l = l_c$ için fiber gerilim-pozisyon profili

Kompozit, σ_f ’e eşit bir gerilmeye maruz kalırsa, gerçek fiber boyu ile kritik fiber boyu arasındaki ilişkiye göre üç farklı durum oluşur.

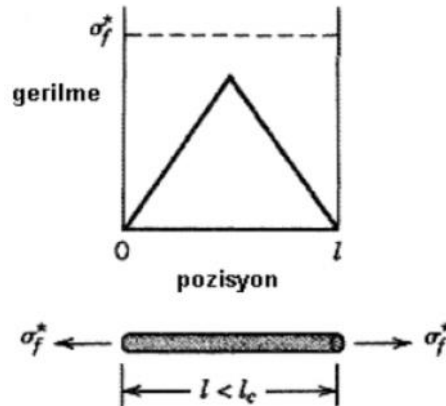
Fiber uzunluğu kritik uzunluğuna, eşit olduğunda, maksimum fiber y¼k¼ne şekil 2.12’de g¼r¼ld¼ę¼ gibi sadece fiberin aksenal merkezinde ulaşılır.

Fiber uzunluğu kritik uzunluktan b¼y¼k olduğunda, fiberdeki gerilme u¼larda d¼ř¼k olup belirli bir mesafede maksimum değerine ulaşmakta ve fiberin orta kısımlarında sabit kalmakta, fiber şekil 2.13’te g¼r¼ld¼ę¼ gibi daha fazla maksimum kuvvet taşır.



şekil 2. 13 $l > l_c$ için fiber gerilim-pozisyon profili

Fiber uzunluğu kritik fiber uzunluğundan k¼ç¼k olduğunda ise şekil 2. 14’te g¼r¼ld¼ę¼ gibi maksimum fiber gerilmesine ulaşılamaz, yeterli miktarda y¼k taşınamaz.



şekil 2. 14 $l < l_c$ için fiber gerilim-pozisyon profili

Fiber boyu, kritik fiber boyundan ne kadar uzun olursa kompozitin dayanım ve tokluğuna o kadar katkıda bulunacağı açıktır. S¼rekli fiber ($l \gg l_c$) takviyeli

kompozitlerin süreksiz fiber takviyeli kompozitlere göre daha iyi dayanım göstermeleri de bundan dolayıdır [14], [17].

2.3.4 Eş Yönlü Plakalarda Gerilmelerin İncelenmesi

Eş gerinim koşullarında çekme dayancı (2.43)'deki gibi ifade edilir.

$$\sigma_1 = E_f \varepsilon_1 V_f + E_m \varepsilon_1 (1 - V_f) \quad (2.43)$$

$$\sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (2.44)$$

Kopma anında fiber veya matrisin önce kopması durumunda iki koşul söz konusudur. $\varepsilon_f^* > \varepsilon_m^*$ ise, önce matris kopacak yük fiberlere transfer olacak ve fiber kopacaktır. Bu durumda 2 farklı hasar şekli görülecektir. Bunlardan birincisi düşük yani yetersiz hacim oranında diğeri ise yeterli hacim oranında kopma değerleridir.

Malzemenin düşük fiber hacim oranına sahip olması durumunda, fiberler görevlerini yeteri kadar yerine getiremeyeceklerdir. Bu durumda kırılma veya kopma (2.45) eşitliği uyarınca olur.

$$\sigma_1^* = \sigma_f' V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (2.45)$$

Eğer dokuda yeterli fiberler varsa ve $\varepsilon_f^* > \varepsilon_m^*$ koşulu sağlanıyorsa kompozitin kopması için gerekli gerilme (2.46)'de gösterilmektedir.

$$\sigma_1^* = \sigma_f^* V_f \quad (2.46)$$

(2.45) ve (2.46) ortak çözümüyle (2.47) elde edilir.

$$V_f' = V_m = \frac{\sigma_m^*}{\sigma_f^* - \sigma_f' + \sigma_m^*} \quad (2.47)$$

$\varepsilon_m^* > \varepsilon_f^*$ ise bu tür uygulamalarda daha sünek fiberler kullanılmaktadır.

Düşük yani yetersiz V_f değerlerinde kırılma veya kopma (2.48) eşitliği ile ifade edilir.

$$\sigma_1^* = \sigma_m^* V_m + \sigma_m^* (1 - V_f) \quad (2.48)$$

Yeterli V_f değerlerinde kırılma veya kopma (2.49)'de gösterildiği gibi ifade edilir.

$$\sigma_1^* = \sigma_f^* V_f + \sigma_m' (1 - V_f) \quad (2.49)$$

Her iki eşitliğin ortak çözümünden minimum hacim oranı (2.50)'daki gibi gösterilir (Hollaway vd. [17]).

$$V_f' = V_m = \frac{\sigma_m^* - \sigma_m'}{\sigma_f^* + \sigma_m^* - \sigma_m'} \quad (2.50)$$

2.3.5 Fiberlerin Hacim Oranlarının Bulunması

$2R$ fiber merkezleri arasındaki uzaklık, s fiberler arası uzaklık ve $2r$ fiber çapı olmak üzere, fiber hacim oranları kare ve heksagonal diziliş için sırasıyla (2.51) ve (2.52) eşitliği ile ifade edilir.

$$V_f = \frac{\pi}{4} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad (2.51)$$

$$V_f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad (2.52)$$

Maksimum hacim oranı için $r = R$ koşulu söz konusudur. Buradan heksagonal için maksimum hacim oranı 0,907 iken kare için 0,787'dir [13], [18].

2.3.6 Ağırlık ve hacim oranları arasındaki ilişki

Kompozit malzemelerin imalatında ağırlık, yapılan çalışmaların ifade edilmesinde ise hacim oranları kullanılmaktadır. Bir kompozitin ağırlık ve hacim oranları sırasıyla (2.53) ve (2.54)'te gösterildiği gibi ifade edilir (Kaw [13]).

$$M_1 = \frac{\rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \dots} \quad (2.53)$$

$$V_1 = \frac{M_1 / \rho_1}{M_1 / \rho_1 + M_2 / \rho_2 + \dots} \quad (2.54)$$

Burada M_1, M_2 ağırlık oranları; V_1, V_2 hacim oranları ve ρ_1, ρ_2 yoğunluktur.

2.4 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler artık gittikçe artan oranlarda ve yeni sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır. Uzun zaman uçak sanayisindeki ihtiyaçların yönlendirdiği kompozit malzeme gelişimleri son dönemde yeni birçok sektörde birçok farklı amaç için

kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin başlıca kullanım alanları ve bu alanlarda sağlanan avantajlar şu şekilde sıralanabilir.

Şehircilik: Bu alanda kompozitler, toplu konut yapımında, çevre güzelleştirme çalışmalarında (heykel, banklar, elektrik direkleri v.s.) kullanılmaktadır. Üreticinin çok sayıda standart ürünü kısa zamanda imal edebilmesi, montajdan tasarruf ve ucuz maliyet imkanları, kullanıcıya da yüksek izolasyon kapasitesi, hafiflik ve yüksek mekanik dayanım imkanları sağlamaktadır.

Ev Aletleri: Masa, sandalye, televizyon kabinleri, dikiş makinesi parçaları, saç kurutma makinesi gibi çok kullanılan ev aletlerinde ve dekoratif ev eşyalarında kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu şekilde komple ve karışık parça üretimi, montaj kolaylığı, elektriksel etkilerden korunum ve hafiflik gibi avantajlar sağlamaktadır.

Elektrik ve Elektronik Sanayi: Kompozitler, başta elektriksel izolasyon olmak üzere her tür elektrik ve elektronik malzemenin yapımında kullanılmaktadır.

Havacılık Sanayi: Havacılık sanayisinde kompozitler, gün geçtikçe daha geniş bir uygulama alanına sahip olmaktadır. Planör gövdesi, uçak modelleri, uçak gövde ve iç dekorasyonu, helikopter parçaları ve uzay araçlarında başarıyla kullanılmaktadır. Daha hafif malzemeyle atmosfer şartlarına dayanım ve yüksek mukavemet sağlanmaktadır (Peters [11]).

- B2 bombardıman uçağı gövde panelleri; karbon fiber+epoksi
- A380 yolcu uçağı kanat panelleri; karbon fiber+epoksi
- A380 yolcu uçağı burun bölümü; CTP
- A380 yolcu uçağı dikey stabilizer; aramid fiber+epoksi

Otomotiv Sanayi: Otomobil firması müşterilerinin ihtiyaçlarına karşılık vermek çevresel şartların baskısı altında daha hafif otomobiller üretmektedirler. Hafifi otomobiller daha çabuk hızlanabilen, daha çabuk durabilen ilerlemek için daha küçük bir motora ve daha az benzine ihtiyaç duyan araç anlamına gelmektedir. Bu alanda kompozitlerden oluşan başlıca ürünler; otomobil kaportası parçaları, iç donanımı, bazı motor parçaları, tamponlar ve oto lastikleridir (Crawford [19]).

- Fitre kutusu; %35 cam+poliamid 66
- Pedallar; %40 cam+poliamid 6
- Otomobil yan gövde iskeleti; CTP

İş Makinaları: İş makinalarının kapakları ve çalışma kabinleri yapımında da kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu şekilde üretimde kullanılan parça sayısı azaltılabilmekte, tek parça üretim mümkün olmaktadır. Ayrıca elektrik izolasyon malzemelerinden de tasarruf sağlanmaktadır.

İnşaat Sektörü: Cephe korumaları, tatil evleri, büfeler, otobüs durakları, soğuk hava depoları, inşaat kalıpları birer kompozit malzeme uygulamalarıdır. Tasarım esnek ve kolay olmakta, nakliye ve montajda büyük avantajlar sağlamaktadır. İzolasyon problemi çözülmekte ve bakım giderleri azalmaktadır.

- Köprü tabanı; CTP
- Trabzanı; CTP
- Yürüme yolları; CTP
- Taşıyıcı konstrüksiyon; CTP
- Bina balkon korkuluğu; CTP
- Kapı; CTP
- Taşıyıcı konstrüksiyon, yüzme havuzu, yer karoları; SMC
- Bina kaplama panelleri; CTP

Tarım Sektörü: Seralar, tahıl toplama siloları, su boruları ve sulama kanalları yapımında kompozitler özel bir öneme sahiptirler. Kompozit malzemelerden yapılan bu örnekler istenirse ışık geçirgenliği, tabiat şartlarına ve korozyona dayanıklılık, düşük yatırım ve kolay montaj gibi avantajlar sağlamaktadır (Crawford [19]).

Denizcilik Sanayi:

- Basamaklar; CTP
- Yelken direği; kevlar+epoksi

Spor Araçları: Kompozit malzemelerin popüler olduğu yeni sektörler arasında spor araç ve gereçleri her geçen gün daha da öne çıkmaktadır. Özellikle ağırlığın azalması, dolayısıyla hareket kabiliyetinin artması ve dayanıklılığın artmasına neden olan cam ve karbon elyafı takviyeli kompozitler kullanılmaktadır. Kompozitler kano, sörf ve yatlar için çok önemli olan malzeme yoğunluğu ve darbe dayanımı konusunda üstün özelliklere sahiptirler. Dağ bisikletleri en iyi katılık/ağırlık oranı ve en düşük ağırlık özellikleri kazanmak için karbon elyafı ile üretilmektedir. Korozyona dayanım, şok emme ve sağlamlık gibi üstün özellikler kazandırmaktadır (Peters [11]).

Ayrıca golf sopası, tenis raketi gibi spor ürünlerinde ağırlığı düşürmek için karbon elyafı takviyeli kompozit malzemelerden üretilmektedirler (Crawford [19]).

- Su kayağı; Termoplastik prepreg
- Kar kayağı; Ahşap üzerine sarılmış karbon, aramid, cam elyafı karışımı+epoksi
- Su kaydırakları; CTP
- Sörf tahtaları; CTP
- Bisiklet; karbon+poliamid 6
- Golf sopası; karbon fiber+epoksi
- Tenis raketi; aramid (kevlar)+epoksi

Müzik aletleri: İleri kompozit malzemelerle müzikal enstrümanlar yapılması üzerine çalışmalar bulunmaktadır. İleri kompozit malzemelerle yapılan yaylı sazlarda boyun kısmının tellerin gerilmesinden dolayı deforme olması karşılaşılan temel sorunlardandır (Crawford [19]).

- Keman; karbon fiber+epoksi
- Gitar; karbon lamine tabakalar arası polimer köpük
- Akustik gitar; grafit+epoksi
- Çello; karbon+epoksi

PLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Plastiklerin ana maddesini organik polimerler oluşturur. Bunlar genellikle büyük molekülü organik bileşiklerdir. Kimyasal bakımdan incelendiğinde plastiklerde genelde karbon (C), hidrojen (H), azot (N), oksijen (O), silisyum (Si), kükürt (S), klor (Cl) ve flor (F) elementlerinin bulunduğu görülür. Bu elementlerden oluşan monomer, polimerizasyon yoluyla başka monomerlerle birleşerek tekrarlanan ünitelerden oluşan çok uzun zincir şeklinde bir makro molekül meydana getirilir ve böylece polimerler oluşur. Başka bir deyişle, plastikler monomer denilen kimyasal ünitelerden meydana gelen zincir şeklinde bir yapıya sahip sentetik malzemelerdir (Rudin [20]).

Plastikler en son ortaya çıkan malzeme gruplarından olmasına rağmen, günlük hayatımıza en fazla giren malzemelerden birisidir. Kısa sürede yaygınlaşmalarının ve ekonomik önem kazanmalarının nedeni olarak plastiklerin özelliklerinin ve çeşitlerinin çok geniş bir aralıkta değişmesi gösterilmektedir.

Plastiklerin tipik özellikleri şu şekildedir (Crawford [19]).

- Özgül ağırlıkları azdır.
- Çok çeşitli mekanik özelliklere sahiptirler.
- Kolay şekil verilebilir ve kolay işlenebilirler.
- Katkı maddeleri ile özellikleri değiştirilebilir.
- Isı ve elektrik iletkenlikleri düşüktür.
- Saydamdırlar.
- Korozyona ve kimyasal maddelere karşı dayanıklıdırlar.

- Yeniden işlenip kullanılır hale getirilebilirler.
- Ucuz bir şekilde üretilebilirler.

Plastiklerin genel özellikleri şu şekildedir.

Plastiklerin Görünüşü: Plastiklerin çoğu renksizdir. Bu yüzden istenilen rengi elde etmek için renk verici maddeler kullanılır. Pigmentlerle opak görünüş elde edildiği gibi, çözünür organik boyalarla şeffaf bir görünüş de elde edilebilir.

Plastiklerin Yüzey Sertliği: Plastik malzemelerin bir dezavantajı, yüzeylerinin yumuşaklığı ve çizilmeye karşı direncinin az olmasıdır. Plastikler cam, seramik ve metallere göre daha az serttirler. Opak, renklendirilmiş plastikler, yüzeyi boya ile kaplanmış plastiklerden daha serttir.

Plastiklerin Yoğunluğu: Plastik malzemelerin yoğunlukları, diğer çoğu malzemelerin yoğunluklarından daha azdır. Plastiklerin yoğunluğu $0,8-2,5 \text{ g/cm}^3$ arasındadır. Bundan dolayı ağırlığın önemli olduğu yerlerde plastikler kullanılmaktadır.

Isısal Özellikler: Çoğu plastikler geniş bir sıcaklık aralığında yumuşama gösterirler. Plastiklerin önemli bir ısısal özelliği ısı iletkenliğidir. Genellikle plastiklerin ısı iletkenliği düşüktür. Plastiklerin ısı iletkenliklerinin düşük olmasından dolayı, sürtünme veya tekrarlanan gerilmelerin sebep olduğu sıcaklık büyümesi, malzeme içerisinde ısı birikmesine neden olur. Bu olay ısıl yorulmaya yol açar. Isıl yorulmayı azaltmak için, plastik malzemelere katkı maddeleri ilave edilir. Bu amaçla en çok kullanılan katkı maddeleri metal tozları veya çeşitli elyaflar, katkılı plastiklerin ısı iletkenlikleri en az 10 kat daha yüksektir. Genellikle termoplastikler yük uygulanmadığı zaman (kendi ağırlıkları altında) $65-120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ da, bazı çeşitleri ise $260 \text{ }^{\circ}\text{C}$ gibi yüksek sıcaklıklarda bozulurlar. Bu yüzden yüksek sıcaklıklarda düşük bir yük altında kullanılmalıdırlar. Termosetler daha sert ve ısıya daha dayanıklıdırlar. Sıcaklık artarsa belirli bir sıcaklığa kadar sert kalırlar fakat yüksek sıcaklıklarda kömürleşir bozulurlar. Genellikle termosetler $150-230 \text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklığa devamlı maruz kalabilirler. Bazı özel termoset çeşitleri $260 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ye kadar dayanabilir. Asbest ve cam dolgu gibi dolgu malzemeleri plastiklerin ısıl dirençlerini artırır.

Kimyasal Özellikler: Plastikler, metal malzemelere göre kimyasal alanlara daha dayanıklıdır. Genellikle termoplastikler zayıf asit, alkali ve tuzların sulu çözeltilerinden etkilenmezler, örneğin polietilen ve polipropilen asit depolama kabı imalinde kullanılmaktadır. Termoplastiklerin çoğu organik solventlerin etkisi altında çözünme veya şişme gösterirler ve kuvvetli asit veya alkalilerden kimyasal olarak etkilenirler. Termosetler, termoplastiklere göre kimyasal çevreye daha az duyarlıdır. Kimyasal çevre ile birlikte gerilmenin etkisi, plastik malzemenin yüzeyinde gerilmenin konsantre olduğu zayıf bölgeler oluşturur. Örneğin, eğilme ve benzeri gerilmeler malzeme yüzeyinde çatlaklara sebep olur. Kimyasal madde bir çatlak içine sızar ve kimyasal etki yaparak bozunmayı başlatır. Polimerlerin kimyasal dirençleri reaktif maddenin cinsine ve konsantrasyonuna, polimerik yapıya, sıcaklığa, uygulanan gerilmeye, yüzey pürüzlülüğüne ve morfolojisine bağlıdır. Kısa süreli polimer kimyasal çevre etkileşimleri, çekme deneyleriyle ve uzun süreli etkileşimler ise sürünme deneyleriyle belirlenirler.

Özgül Ağırlık: Plastiklerin en önemli özelliklerinden biri bir yapı malzemesi olarak hafif oluşlarıdır. Plastiklerin çoğunun özgül ağırlıkları $1-2 \text{ g/cm}^3$ arasındadır, özgül ağırlıkları $1.7-12 \text{ g/cm}^3$ arasında olan metallere göre bu durum büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Özgül Isı: Plastiklerden çeşitli eşyaların üretimi genellikle hammaddenin ısıtılmasını gerektirdiğinden malzemenin özgül ısı arttıkça ısıtma işleminin maliyeti de artar ve plastiklerin özgül ısıları metallere göre genellikle yüksektir. Bu durumda plastikler metallere göre daha güç ısınmakta ve daha geç soğumaktadır.

Termal Genleşme Katsayısı: Plastiklerin metallere göre termal genleşme katsayıları çok daha büyüktür, birçok halde sıcaklık değişimleri sonucunda meydana gelen genleşmeler sorun yaratır. Özellikle kalıplı üretimde çekme (büzülme) nedeniyle önemli problemler ortaya çıkar ve bu yüzden plastikler, metaller gibi küçük toleranslarda kalıplanamazlar ve dökülemezler.

Eriyik İndeksi: Bir plastiğin eriyik indeksi değeri, polimerin ortalama molekül ağırlığına bağlıdır. Buna göre molekül ağırlığı arttıkça, plastik malzeme daha az akışkanlığa sahip olacaktır.

Yanıcılık: Plastiklerin yanma karakteristikleri çok önemlidir. Yanmanın başlama sıcaklık derecesi kadar, plastik yanmaya başladıktan sonra yanmanın kendiliğinden yayılma hızı da önemlidir.

Hava Etkisiyle Bozulma: Plastiklerin zamanla yıpranmasına kimyasal bozulmaları neden olur. Bu bozulma termik, mekanik, fotokimyasal, biyolojik ve kimyasal faktörler nedeniyle meydana gelebilir.

Su Emilimi: Plastiklerin çoğu suda çözünmezler, fakat bir miktar suyu bünyelerine katabilirler. Su emilimi özelliklerde değişim getirebilir ve bu nedenle plastiğin etkinliği düşebilir. Mesela; elektriksel özelliklerde belirgin bir bozulma gözlemlenir, mekanik dayanımın düştüğü görülür. Ham plastikte ise rutubet üretimi güçleştirir ve son üründe hatalara yol açar.

Çözücüye Dayanıklılık: Bir çözücünün plastiği çözebilmesi için, bu çözücünün plastikteki moleküller arası kuvvetleri yenmesi gerekmektedir. Çözücüler plastik molekülleri arasına girip onları ayırarak çözerler. Plastik malzemede moleküller arası bağlar ne kadar zayıf ise, çözücünün ayırma işlemi o kadar kolaydır.

Distorsiyon (Biçim değiştirme): Bir malzemeye gerilim uygulandığında malzemede bir şekil değişimi (kesitte bir daralma) meydana gelir ve bu deneysel olarak bulunabilir. Distorsiyon; malzeme içinde atom ve molekül ölçeğinde meydana gelen mikroskobik değişimlerin toplamıdır.

Elektriksel Özellikler: Genelde plastiklerin elektrik iletkenlikleri zayıftır. Polimerlerin elektrik iletmesi için yapısında serbest elektron veya iyon bulundurması gerekmektedir ve bu elektron veya iyonların yapıda serbestçe hareket edebilmesi gereklidir. Fakat polimerlerin yapısında sert ve bükülmez zincirlerin olması, bu zincirlerin birbirini kuvvetli etkilemesi, yüksek kristal yapıya sahip olma ve yönlenme yüzünden yapıdaki elektronlar serbest hareket edemezler ve bu da plastiklerin düşük elektrik iletkenliğine sahip olmalarına neden olmaktadır (Rudin [20]).

Plastiklerin kimyasal özellikleri maddeler halinde incelenmiştir [21], [22].

Kristalin Yapı: Kristalin polimerlerde atomlar belli noktalarda yerleşmiştir ve hareketsiz bir düzen içine girmişlerdir.

Amorf Yapı: Polimer zincirlerinin gelişi güzel dönme ve bükülme hareketleri yaparak düzensiz bir yapının oluşmasıdır. Yapı camsı ve kırılıgandır. Böyle bir yapıya gerilim uygulandığında; çok az bir deformasyon göstermesi beklenir.

Yönlenme: İntermoleküler düzenin üçüncü şekli olan yönlenme, polimerik fiber, film ve köpüklerde gözlenir. Eğer erimiş bir polimer soğutulursa, gelişi güzel yönlenmede amorf veya kristalin yapı oluşur. Katılma sırasında; polimerik malzeme çekilirse, polimer zincirleri çekme yönünde yönlenmektedirler. Yönlenmenin oluşabilmesi için yapı içinde zincirlerin bir hareketliliğe sahip olmaları gerekmektedir. Bu nedenle yönlenme, amorf bölgeler üzerinden olur. Eğer kristalin yapı yeteri kadar amorf bölge içermiyorsa bu malzemede yönlenme görülmez.

Plastiklerin mekanik özellikleri ise sıcaklıktan çok etkilenmektedir. Buna göre plastiklerde mekanik özelliklerin sıcaklık kontrollü olduğu söylenebilir. Plastiklerin bazı mekanik özellikleri şunlardır (Crawford [19]).

Çekme Özellikleri: Bir plastiğin çekme gerilmesi–uzama deneyi metallere yapılan deneylere benzemektedir. Aradaki fark yükleme hızıdır. Plastiklerde yapılan çekme deneylerinde meydana gelen uzamanın doğru olarak ölçülebilmesi için sabit bir hızla yükleme yapılması zorunludur.

Gerilme-Uzama Eğrileri: Gerilme-% uzama, ikili koordinat sisteminde grafiğe aktarılarak elde edilen eğriler plastiklerin mekanik özellikleri hakkında önemli bilgiler vermektedir.

Young (Esneklik) Modülü: Bir plastik malzemenin esneklik modülü, uygulanan gerilimin malzemede meydana getirdiği uzama oranıdır. Ayrıca eğrinin başlangıçtaki doğrusal bölgesinin eğimidir.

Çekme Dayanımı: Malzemenin kopmadan dayanabildiği maksimum çekme gerilmesidir.

Akma Gerilmesi: Esnek olmayan deformasyonun yani plastik şekil değiştirmenin başladığı gerilme değeridir.

Kopmada Uzama: Kopma noktasında malzemenin boyut değişim miktarıdır ve daima ilk uzunluğun %'si olarak belirlenir.

Birim Hacim Başına Kopma Enerjisi (Tokluk): Çekme gerilmesi-% uzama eğrisi altında kalan alan miktarıdır ve malzemenin dayanıklılığının bir ölçüsüdür.

Yapılan deneylerde elde edilen yukarıdaki parametrelere bağlı olarak plastiklerin mekanik özellikleri şu terimlerle açıklanabilir.

Sert/Yumuşak: Elastiklik modülünün yüksek veya düşük değerde olduğunu ifade eder. Elastiklik modülü yüksek malzeme daha kuvvetli bağlara, bu nedenle daha yüksek bir rijitliğe sahiptir, daha serttir. Yumuşak malzemeler de ise bu durumun tam tersi geçerlidir.

Kuvvetli/Zayıf: Akma gerilmesinin yüksek veya düşük olduğunu gösterir.

Gevrek: Malzemenin akma gerilmesine ulaşmadan kopacağını veya kırılacağını ifade eder.

Dayanıklı (Sünek): Malzemenin kopması için gerekli birim enerjinin çok yüksek olduğunu ifade eder.

Plastik matrisli kompozit malzemeler, çoğunlukla fiber formunda sert, dayanımlı malzemelerle takviye edilerek oluşturulur. En yüksek mukavemet artışı sürekli fiber kullanımı ile sağlanmakta ve üretilen kompozit üstün özelliklere sahip olmaktadır. Fiber miktarı belirli bir değere arttıkça kompozit malzemenin mukavemeti de artmaktadır. Plastikler birçok nedenle önemli mühendislik malzemeleridir. Plastikler hafiflikleri, iyi korozyon dayanımı gibi özellikleri sayesinde kompozit uygulamalarında daha sık kullanılmakla birlikte; düşük ergime sıcaklıklarına sahip olduğundan üretimleri kolaydır ve çok iyi yüzey kalitesi sağlanabilmektedir. Bu sayede hem çok büyük veya kompleks yapıdaki şekillerin üretimi sağlanmakta hem de talaşlı işleme gerek olmadığından üretim maliyetleri düşmektedir. Böylece fiber takviyeli plastik kompozitler metallere daha kolay üretilmektedir. Plastikler özellikle mükemmel yalıtım özelliklerine sahip oldukları için, birçok elektrik mühendisliği tasarımı için çok elverişlidir. Plastik matrisli kompozitler, metal ve seramik kompozitlerine göre sıvılarla etkileşime daha yatkındırlar. Bu nedenle otomotiv sanayinde ve makine parçalarında, sıvılarla temas halindeki malzemelerin üretiminde plastik matrisli kompozitler daha çok tercih edilmektedir (Herman [22]).

Çizelge 3. 1 Çeşitli malzemelerin mekanik değerleri

Malzeme	Özgöl ağırlık (g/cm ³)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Özgöl çekme dayanımı $\left(\frac{\sigma}{\rho}\right)$	Özgöl modülü $\left(\frac{E}{\rho}\right)$	Uzama (%)
Al	2,8	84	71	30	25	-
Al alaşımı	2,8	600	71	210	25	-
Titanyum	4,51	700	117	192	25,1	20
Alaşımsız çelik	7,86	460	210	60	27	20
Düşük alaşımlı çelik	7,8	600	207	80-250	26,5	20-30
Dökme demir	-	275	138	-	-	0,6
Pirinç/ %30 Zn	8,5	550	100	60	12	-
Karbon/ %60 epoksi	1,62	1400	220	865	135	0,8
Cam/%60 epoksi	1,66	1510	165	910	99	-
Cam/%50 polyester	1,9	750	38	390	19,8	1,8

Plastik matrisli kompozitlerin en önemli özellikleri yüksek özgöl mukavemet ve özgöl elastisite modülüdür. Dolayısıyla bu özellikleri ile diğer malzemelerden üstün durumundadırlar. Bu üstünlüklerinden dolayı plastik kompozitler uçak ve uzay endüstrisinde alüminyum alaşımlarına tercih edilir. Bu malzemelerin genel olarak dezavantajı düşük işlem sıcaklıkları, yüksek ısıl genleşme katsayısı ve nem genleşmesi ve belirli yönlerde düşük elastik özelliklerdir. Çeşitli malzemelerin bazı mekanik değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir [19], [20].

3.1 Plastik Matrisli Malzemelerin Sınıflandırılması

Plastik matrisli kompozitlerde kullanılan matris malzemeleri, termoplastik matrisli malzemeler ve termoset matrisli malzemeler olmak üzere iki grupta sınıflandırılmaktadır.

3.1.1 Termoplastik Matrisli Malzemeler

Molekül yapısı olarak yan zincirler ve gruplar ihtiva ederler. Moleküller elastomerlerde ve termosetlerde olduğu gibi üç boyutlu bir yapı teşkil etmezler. Moleküller arasında zayıf Vander Wals bağı vardır. Bu nedenle rijit yapıya sahip değildirler. Isıtılırsa yumuşar, sıcaklık arttıkça viskozitesi düşer. Bu özellik bunlardan yapılan ürünleri daha ekonomik yapar ve kolaylıkla şekillenmesini sağlar. Şekil değişikliği esnasında hiçbir kimyasal değişikliğe uğramazlar. Tekrar tekrar ısıtılarak yeni şekiller alabilirler ve tekrar soğutulduğunda yeniden sertleşir. Piyasada ise toz ve granül halde bulunurlar. Üretimi termosetlere göre daha zordur. Kullanım sıcaklıkları termosetlerden daha azdır. Sıvı halde bulunduğu sıcaklıklarda viskozite hali yüksektir. Bu nedenle ara yüzey bağı termosete göre daha zordur. Ancak şekillendirme kapasitesi iyi olduğundan bunların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu polimerler kristalin veya şekilsiz (amorf) olabilir. Kristal şekilli olanlarda moleküller büyük uzaklıklarda oldukça düzenli şekil oluştururlar. Amorf polimerler de ise uzun zincirler birçok noktada birbirine dolaşmıştır. Bunlar polimeri daha büyük sıcaklıklarda rijit yapar. Termoplastik malzemeler genellikle iyi elektrik yalıtkanıdır. Plastik malzemelerin dielektrik dayanımları, elektrik yalıtım dirençleridir. Son zamanlarda hafif konstrüksiyon uygulamalarını arttırmaya doğru bir yönelme söz konusu olduğundan, termoplastik matrisli kompozitlerin kullanım fikri yaygınlaşmıştır. Bunun başlıca sebebi olarak termoplastiklerin daha düşük yoğunluğa, daha yüksek kimyasal dirence, yüksek gerinime sahip ve geri dönüşebilir olması gibi avantajları gösterilebilir. Kullanım sıcaklıkları termosetlerden daha azdır. Termoplastik malzemelerin kullanılabileceği en yüksek sıcaklık malzemelerin çoğunda 50-150 °C arasında değişmektedir. Buna rağmen bazı termoplastik malzemeler daha yüksek sıcaklıklara kadar örneğin teflon 288 °C'ye kadar dayanabilmektedir. Polietilenler (PE), Polipropilen (PP) ve Polivinilklorür (PVC) termoplastiklere örnek verilebilir. En çok

kullanılan termoplastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir (Crawford [19]).

Çizelge 3. 2 En çok kullanılan termoplastiklerin mekanik ve fiziksel özellikleri

Malzeme özellikleri	Polietilen	Politetratken	Polipropilen	Poliamid 6.6
Yoğunluk (g/cm ³)	0,95	0,92	0,90	1,14
Elastik modül (MPa)	1000	22	1400	700
Çekme mukavemeti (MPa)	30	14-34	35	70
Kopma uzama (%)	10-1200	100-650	10-500	300
Termal iletkenlik (W/mK)	0,48	0,33	0,12	0,25
Isıl genleşme katsayısı (10 ⁻⁶ /°C)	60-110	100-220	80-100	70-120
Ergime sıcaklığı (°C)	-	-	175	260

3.1.2 Termoset Matrisli Malzemeler

Termosetler, zincirleri arasında yoğun çapraz bağlı bir yapı bulunan, ısı ile sertleşip tekrar ısıtıldığında yumuşamayan plastiklerdir. Ayrıca bu malzemeler çözücülerde çözünmezler. Makro moleküller birbirlerine çeşitli yerlerinden kısa aralıklarla kovalent bağlarla bağlanmış yani ağlanmışlardır. Bu ağ yapı sıcaklık ve basınç altında oluşur (sertleşir) ve tekrar çözülmez. Bu sebeple şekillendirildikten sonra kimyasal yapı bozulana kadar, tekrar yumuşatmak, şekillendirmek ve kaynatmak mümkün değildir. Sıcak ortamda kimyasal yapıları bozulana kadar önemli oranda yumuşamadıkları için sıcaklığa karşı daha dayanıklıdır.

Termosetlerin polimerizasyonu genelde iki aşamada tamamlanarak üretilecek malzemeler elde edilir. İlk aşamada mol kütlesi 500-5000 arası değişen düşük mol kütleli doğrusal bir polimer hazırlanır (önpolimer). Önpolimer içerisine boya gibi çeşitli katkı maddeleri katılır ve viskoz sıvı görünümünde bir karışım elde edilir. Kalıplama işleminden sonra kullanılabilir termoset malzemeye dönüşecek olan bu viskoz sıvıya “reçine” denir. Bu adlandırmadan dolayı termoset polimerler yerine, “termoset reçineler” tanımlaması daha yaygın kullanılmaktadır.

İkinci aşamada reçine uygun kalıplara konarak; ısı, ısın gibi etkilerle çapraz bağlı yapıya dönüştürülür. Termoset plastikler genellikle elle yatırma veya transfer kalıplama yöntemleriyle şekillendirilir. Telefon kutuları, bilgisayar klavyesi, televizyon kabinleri, mutfaklarda kullanılan melamin tabaklar termoset polimerlerden yapılmış malzemelerdir. Bu malzemelerin eritilip yeniden şekillendirilmesi söz konusu değildir.

Termoset plastiklerin mühendislik tasarımı uygulamalarında tercih edilmelerine neden olan özellikler şunlardır (Herman [22]).

- Yüksek ısıl kararlılık
- Yüksek sertlik
- Yüksek boyutsal kararlılık
- Yük altında sürünme ve biçim değiştirmeye direnç
- Hafiflik
- Yüksek elektrik ve ısı yalıtım özellikleri

Termoset plastikler genellikle basınçlı kalıplama veya transfer kalıplama yöntemleriyle şekillendirilir. Fakat bazı durumlarda şekillendirme masraflarını azaltmak amacıyla termosetler için enjeksiyonlu kalıplama yöntemi geliştirilmiştir.

Termosetlerin çoğunun iki ana katkı maddeli kalıplama bileşiği bulunmaktadır (Crawford [19]).

- Olgunlaştırıcı maddeleri, sertleştirici ve şekil vermeyi kolaylaştıran bir reçine,
- Organik veya inorganik dolgu ve/veya güçlendirici (takviye eden) malzemeler.

Termoset plastiklerin yoğunlukları plastik malzemelerin çoğundan daha yüksek olup 1,34 ile 2,3 g/cm³ arasında bir değer almaktadır. Termosetlerin çekme dayanımları ise nispeten düşük olup yoğunlukla 28 ile 103 MPa arasında değişmektedir. Yüksek miktarda cam fiber takviyesi kullanıldığında termoset malzemelerin çekme dayanımları 207 MPa'a kadar yükseltilebilmektedir. Cam fiber takviyeli termosetler aynı zamanda yüksek darbe dayanımına da sahiptirler. Termoset malzemelerin dielektrik güçleri 5516 ile 25610 V/mm arasında olup, oldukça yüksektir. Fakat bütün plastik malzemeler gibi bunların da en yüksek kullanılma sıcaklıkları düşüktür. Termosetlerin en yüksek kullanılma sıcaklıkları 77 ile 288 °C arasında değişmektedir.

Çizelge 3. 3 Termoset malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellik	Epoksi	Polyester	Fenolik
Yoğunluk (gr/cm ³)	1,11	1,04-1,46	1,24-1,32
Çekme dayanımı (MPa)	70	41-90	34-62
Kopma uzaması (%)	3-6	4,2	1.5-2
Isıl iletkenlik (W/mK)	0,19	0,19	0,15
Isıl genleşme katsayısı (10 ⁻⁶ /°C)	45-65	55-100	68

Fenolik, poliester ve epoksi reçineleri termoset plastiklere örnektir, Çizelge 3.3'te mekanik ve fiziksel özellikleri verilmiştir (Dodiuk ve Goodman [21]).

Kullanılan takviye malzemelerinin başlıcaları ise, cam fiber, kevlar fiber, bor fiber ve karbon fiberlerdir. Ayrıca dolgular, kimyasallar ve diğer katkıları; özelliklerin geliştirilmesi amacıyla kullanılırlar.

En çok kullanılan ileri teknoloji kompozitleri, ince çaplı fiberler (cam, karbon, aramid, vb.) ile takviyelendirilmiş polimerlerden (epoksi, polyester, ürean, vb.) oluşan plastik matrisli kompozitlerdir. Başlıca kullanım alanları ise, korozyon direnci sebebiyle denizcilik uygulamaları, hafifliği sebebiyle otomotiv ve diğer taşımacılık endüstrileri ile

spor malzemeleri, yanmazlık özelliği istenen otomotiv iç dekorasyonu gibi alanlar olarak gösterilebilir.

3.1.2.1 Polyester

Özellikle denizcilik ve inşaat alanında en çok kullanılan termoset reçinedir. Kompozit malzemelerde kullanılan 2 tür polyester reçine vardır; daha ekonomik olan ortoftalik ve suya dayanım gibi daha iyi özelliklere sahip olan isoftalik polyesterlerdir.

Çizelge 3. 4 Polyesterlerin avantajları ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
Sertleşme oldukça hızlı gerçekleşir	Kokusu oldukça rahatsız edicidir.
Mekanik özellikleri iyi	Isıyla büzülür.
Düşük ısıda kürenirler	
Karışım oranlarında çok hassas değildirler.	
Maliyetleri düşüktür.	

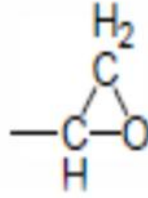
Polyester reçinelerini polimerizasyon süreçlerinin tamamlaması için katalizör ve hızlandırıcı olarak adlandırılan ek maddelere ihtiyaç duyarlar. Doymamış kovalent bağlı polyesterler düşük viskoziteli lineer polimer olmakla beraber, katkı maddeleriyle birlikte işlem uygulayarak çapraz bağlı oluştururlar bunu sonucu termoset plastiğe dönüştürürler. Polyesterlerin avantajları ve dezavantajları Çizelge 3.4’de gösterilmiştir (Dodiuk ve Goodman [21]).

3.1.2.2 Vinilester

Poliesterlere benzerler. En önemli avantajları elyaf ve matris arasında iyileştirilmiş bir bağ mukavemetine sahip olmalarıdır. Son derece yüksek kimyasal ve çevresel dayanıma sahiptirler. Poliesterden daha yüksek mekanik özellik gösterirler. Bununla beraber, aşırı stiren içermesi, poliesterden daha pahalı olması, iyi özellikler için ikincil kür işlemlerine ihtiyaç duyulması ve sertleşme sırasında yüksek oranda çekmesi gibi olumsuz özellikleri de vardır (Herman [22]).

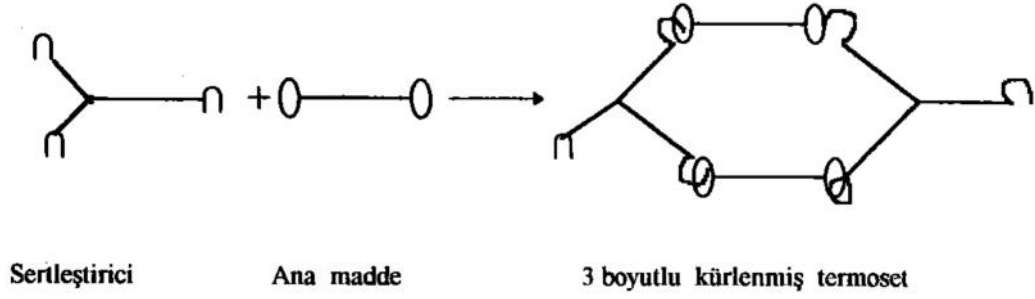
3.1.2.3 Epoksi

Termoset reçineler arasında en yüksek performansa sahip olan epoksi reçinelerdir. Mekanik performansları ve çevresel etkilere karşı dirençleri diğerlerinden daha yüksektir. Epoksi reçineler, birbirleri ile etkileşerek olağanüstü dayanıklı, kimyasal dirençli ve yapıştırma kuvveti yüksek çapraz bağlı ürünler meydana getiren polimer oluşturuıcı sistemlerdir. Suyu, aside ve alkaliye dirençleri çok yüksek olan epoksi reçineler, zamanla bu özelliklerini yitirmezler. Şekil 3.1’de gösterildiği gibi polimerizasyondaki kilit eleman bir oksijen ve iki karbon atomundan oluşan 3 elemanlı gergin halkadır. Buna oksirane grubu (halkası) denilmektedir. Bu yapı, halkayı açmak için eklenen aktif hidrojen bileşiği ile tepkimeye girmektedir (Augustsson [23]).



Şekil 3. 1 Epoksi grubu

Epoksiler, reçine ve sertleştirici olmak üzere iki kısımdan oluşur. Sertleştiriciler (genellikle “amine”) ilave bir reaksiyon ile epoksinin katılaşmasını sağlarlar. Her iki malzeme de kimyasal reaksiyona girer. Böylece epoksi molekülleri “amine” molekülleri ile birbirlerine bağlanırlar. Bu kompleks üç boyutlu bir yapı ortaya çıkarır. Amine molekülleri epoksi molekülleri ile sabit bir oranda reaksiyona girdiği için reçine ile sertleştirici arasında doğru bir karışım oranı elde edilmelidir. Bu tam bir reaksiyonun sağlanması için çok önemlidir. Aksi takdirde matris içinde reaksiyona girmemiş reçine veya sertleştirici kalır ve ürünün pışme sonrası özelliklerine etki eder. Epoksi reçine karışımı hazırlanırken dikkat edilmesi gereken en önemli husus; ölçülerin hacme göre değil, ağırlığa göre ayarlanması gerektiğidir. Genellikle iki komponentli olan epoksiler, diğer termoset plastikler gibi belli süre sonra sıvı halden katı hale geçer ve sonrasında bir iki hafta içinde kürlenerek final sertliğe ulaşır. Şekil 3.2’de epoksi reçinenin kimyasal kürlenmesi şematik olarak gösterilmiştir (Augustsson [23]).



Şekil 3. 2 Epoksi reçinenin kimyasal kürlenmesi

Epoksi Reçinelerin temel özelliklerini şu şekilde sıralanmaktadır (Augustsson [23]).

- Düşük viskoziteli sıvılar olup uygun, bir karşıt bağlama ile karıştırılmasıyla termoset hale dönüşebilirler. Ayrıca sertleştiricileri düşük viskoziteli ve uygulanmaları kolay olup, modifiye edilebilirler.
- Kolay sertleşebilme özelliğine sahiptirler. Seçilen sertleştiriciye bağlı olarak epoksi reçineleri kolay ve hızlı bir şekilde 50 – 1500 °C arasındaki sıcaklıklarda sertleşebilirler.
- En önemli avantajlarından biri de sertleşme sırasında az büzülmesidir. Diğer reçinelerden farklı olarak çok az bir geri döngü ile yan ürün açığa çıkarmadan reaksiyon verirler.
- Kimyasal yapılarında özellikle polar hidroksil ve eter gruplarını içermelerinden dolayı çok iyi yapıştırıcılardır. Sertleşme sırasında çok az bir büzülme gerçekleştirdikleri için yüzeyler arasındaki adezyon kuvvetinde azalma gözlenmez. Bu yüzden de adhezyon kuvvetleri, herhangi bir basınç ve bekleme ismeksizin elde edilebilecek en iyi değerlerdir.
- Mekanik özellikleri oldukça yüksektir. Diğer formulasyona sahip epoksi reçinelerin mukavemeti genellikle diğer döküm reçinelerinkini aşar. Bu epoksilerin düşük büzülme özelliklerinin sonucudur. Böylece mekanik yapıyı zayıflatan gerilmeler azaltılmış olunur.
- Yüksek elektrik yalıtkanlığına sahiptir.

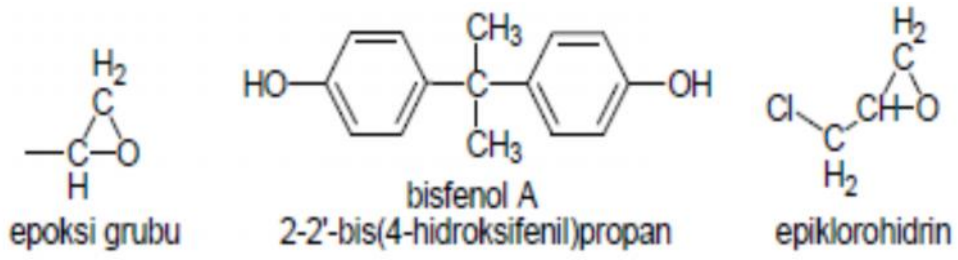
- Mukavemetini kazanmış epoksi reçinelerin kimyasal dirençleri, kullanılan sertleştiricinin türüne bağlıdır. Eğer uygun sertleştirici kullanılırsa çok üstün direnç elde edilir.

Epoksi reçineler, iyi yapışmaları ve iyi mekanik ve kimyasal dirençleri nedeniyle koruyucu ve süs kaplaması olarak birçok yerde kullanılır. Örnek kullanım alanları içinde konserve ve fıçı kaplamaları, otomotiv ve mutfak eşyalarında ilk kat kaplamalarını ve kablo kaplamalarını gösterebiliriz. Epoksi reçineler elektrik ve elektronik sanayinde, dielektrik dayanımları, olgunlaştırma sırasındaki düşük büzüşmeleri, iyi yapışmaları, ıslanma ve yüksek nem dahil kötü çevre koşullarına karşı dirençleri nedeniyle tercih edilir. Örnek olarak yüksek gerilim yalıtkanları, şalterleri ve transistör koruyucuları gösterilebilir. Epoksi reçineleri lifle güçlendirilmiş anafaz malzemelerindeki katmancıkların yapımında da kullanılır. Epoksi reçineleri, grafit gibi yüksek modüllü güçlendiriciler kullanan yüksek performanslı malzemelerin çoğunun anafazıdır. Epoksi reçineler çok kullanışlı plastiklerdir. Temel özellikleri bir çok yolla modifiye edilebilir. Epoksilerin avantaj ve dezavantajları Çizelge 3.5'te gösterilmiştir (Ratna [24]).

Çizelge 3. 5 Epoksilerin avantaj ve dezavantajları

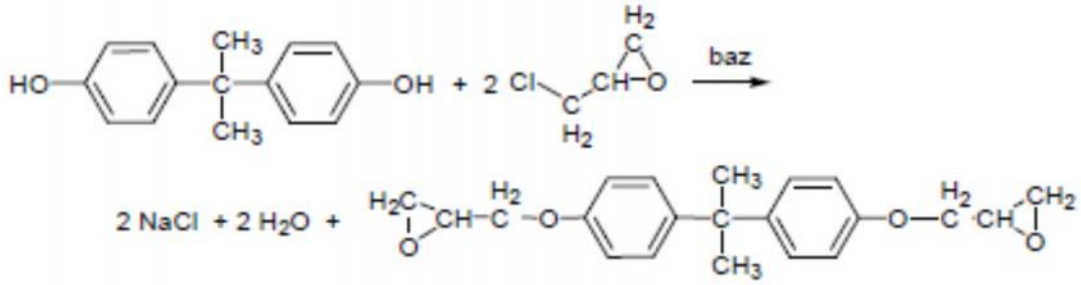
Avantajları	Dezavantajları
Aşınmaya karşı dirençli	Fleksibilitesi kötü (rijit)
Darbeye karşı iyi dirençli	Ultraviyole ışınlarına karşı düşük dirençli
Sıkışmaya karşı dirençli	Maliyeti yüksek
Kimyasal etkilere karşı dirençli	
İyi renk uyumuna sahip	

Epoksi reçineler; Bisfenol A bazlı epoksi reçineler, Bisfenol F bazlı epoksi reçineler, novalak reçineler, alifatik epoksi reçineler, glisidilamin reçineler olarak gruplandırılmaktadır. Epoksi reçinelerin en önemli ve en yaygın tipi Bisfenol A bazlı epoksi reçinelerdir. Bisfenol A bazlı epoksi reçineler, epiklorohidrin ve bisfenol A bileşiklerinden üretilir. Şekil 3.3'te bisfenol A bazlı epoksi reçine bileşenlerinin kimyasal yapısı şematik olarak verilmiştir (Augustsson [23]).



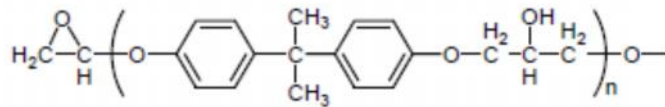
Şekil 3. 3 Bisfenol A bazlı epoksi reçine bileşenleri

Bir bisfenol A ve epiklorohidrin epoksi reçinesi prosesinde karışım NaOH ile 60 °C'de reaksiyona sokulur; reaksiyon ekzotermiktir, soğutma uygulanır. Bisfenol A bazlı epoksi reçine oluşumu Şekil 3.4'te şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3. 4 Bisfenol A bazlı epoksi reçine oluşumu

Diglisid eter bisfenol A polimerik yapısı Şekil 3.5'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3. 5 Diglisid eter bisfenol A

Reaksiyon ürünleri epoksi polimeri ve sodyum klorürdür; karışım, süzmeyi kolaylaştırmak için bir miktar toluen edildikten sonra süzülür. Süzüntüdeki toluen vakum altında distilasyonla ayrılır, reçine içerdiği uçucu maddelerden arındırılmak için 5 mm Hg basıncında 150 °C'de kurutulur. Kurutma işlemi çok önemlidir, reçinede uçucu madde kalması kullanım sırasında kabarcıklar oluşmasına neden olur.

Epoksi reçinelerin molekül ağırlıkları ve yumuşama noktaları polimerizasyonda kullanılan monomerlerin molar oranlarına göre değişir; epiklorohidrin miktarının artması molekül ağırlığının ve yumuşama noktasının yükselmesine neden olur. Bu

reçineler 25 °C sıcaklıkta, tipik olarak 515 Pa.s aralığında viskoziteye sahip, oda sıcaklığında saydam, renksiz, soluk sarı renkte olan reçinelerdir [24], [25].

3.2 Fiber Malzemeleri

Matris malzeme içinde yer alan fiber takviyeler kompozit yapının temel mukavemet elemanlarıdır. Düşük yoğunluklarının yanı sıra yüksek elastite modülüne ve sertliğe sahip olan fiberler kimyasal korozyona da dirençlidir. Fiberlerin ince çaplı olarak üretilmeleri ile, büyük kütsel yapılara oranla yapısal hata olasılıkları en aza indirilmiştir. Bu nedenle üstün mekanik özellikler gösterirler. Ayrıca, fiberlerin yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olmalarının nedenleri aşağıda verilen özelliklere de bağlıdır (Devendra ve Rangaswamy [26]).

- Üstün mikroyapısal özellikler, tane boyutlarının küçük oluşu ve küçük çapta üretilmeleri,
- Boy/çap oranı arttıkça matris malzeme tarafından fiberlere iletilen yük miktarının artması,
- Elastisite modülünün çok yüksek olması.

Günümüzde kompozit yapılarda en önemli takviye malzemeleri sürekli fiberlerdir. Bu fiberler özellikle modern kompozitlerin oluşturulmasında önemli bir yer tutarlar. Cam fiberler teknolojiye kullanılan en eski elyaf tipleridir.

Çizelge 3. 6 Kompozitlerde kullanılan fiber çeşitlerinin özellikleri

Özellik	E-camı	Karbon (HT türü)	Aramid (Kevlar 49)
Çekme dayanımı (MPa)	2410	3100	3617
Çekme modülü (GPa)	69	220	124
Kopmada uzama (%)	3.5	1.4	2.5
Yoğunluk (g/cm ³)	2,54	1,75	1,48
Fiyat (TL/1b)	3	36	57

Son yıllarda geliştirilmiş olan bor, karbon, silisyum karbür ve aramid fiberler ise gelişmiş kompozit yapılarda kullanılan fiber tipleridir. Kompozitlerde kullanılan bazı fiber çeşitlerinin mekanik özellikleri Çizelge 3. 6'da verilmiştir (Circiumaru vd. [27]).

3.2.1 Cam Fiber

Cam fiberler, plastik malzemeleri güçlendirmek için kullanılan en yaygın malzemelerdir. Bu başarısı, uygun fiyatı (yaklaşık olarak plastikle aynı) ve istenilen özellikler arasındaki mükemmel dengenin sonucudur. “Cam” terimi, inorganik camların geniş bir grubunu ifade etmek için kullanılır. Cam fiberler, erimiş camın yüksek hızlarda, çok sayıda delik (100-1000 arası) içeren platin bir levha üzerinden geçirilmesiyle elde edilir. Elde edilen uzun lifler yüksek hızda döndürülerek camsı geçiş sıcaklığı civarında soğuyup katılaşır. Uygulamalarda cam fiberlerin aşağıdaki iki özelliği avantaj sağlar (Kinsella vd. [28]).

- Camın yumuşama noktası 850 °C'dir, bu nedenle yüksek sıcaklıklara dirençlidir.
- Görünür ışığa karşı şeffaftır, böylelikle kompozit matrisin rengini alır.

Cam fiberler yüksek çekme mukavemetine sahiptirler, birim ağırlık başına mukavemeti çelik malzemeden yüksektir. Genellikle kopma mukavemetleri 6,0-7,3 g/denye arasında değişmektedir. Bununla beraber ince liflerin mukavemeti kalın liflerden daha iyidir. Bunların kopma anındaki uzama yüzdeleri % 2 civarındadır ve diğer tekstil liflerine nazaran oldukça düşüktür. Isıl dirençleri düşüktür. Yanmazlar, ancak yüksek sıcaklıkta (1150 °C) yumuşarlar. Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler.

Yoğunlukları 2,5-2,7 g/cm³'dür. Nem absorbe etme özellikleri yoktur, ancak cam fiberli kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir çözülme olabilir. Özel fiber kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabilir. Elektriği iletmezler. Bu özellik sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda cam fiberli kompozitlerin kullanılmasına imkan tanırırlar (Ebewe [29]).

Cam fiber imalinde silis kumuna çeşitli katkı malzemeleri eklendiğinde yapı bu malzemelerin etkisi ile farklı özellikler kazanır. Dört farklı tipte cam fiber mevcuttur.

A (Alkali) Camı: A camı yüksek oranda alkali içeren bir camdır. Bu nedenle elektriksel yalıtkanlık özelliği kötüdür. Kimyasal direnci yüksek, en yaygın cam tipidir.

Çizelge 3. 7 Cam fiberlerin mekanik özellikleri ve bileşimleri

Özellikler	Cam tipi			
	A	C	E	S
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,5	2,49	2,54	2,48
Elastiklik modül (GPa)	-	69,90	72,40	85,5
Çekme mukavemeti (MPa)	3033,0	3033,0	3448,0	4585,0
Isıl genleşme katsayısı (10 ⁻⁶ /°C)	8,6	7,2	5,0	5,6
Yumuşama sıcaklığı (°C)	727,0	749,0	841,0	970,0
Katki malzemeleri (%)				
SiO ₂	72.0	64.4	52.4	64.4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	0.6	4.1	14.4	25.0
CaO	10.0	13.4	17.2	-
MgO	2.5	3.3	4.6	10.3
Na ₂ O, K ₂ O	14.2	9.6	0.8	0.3
B ₂ O ₃	-	4.7	10.6	-
BaO	-	0.9	-	-

C (Korozyon) Camı: Kimyasal çözeltilere direnci çok yüksektir.

E (Elektrik) Camı: % 0.8'den daha az oranda alkali oksit bileşikleri içeren alüminyum bor silikat camlarıdır. Sentetik liflerin takviyesinde ve yüksek mukavemet ve elektrik dayanımı gereken durumlarda kullanılmaktadır. E-camı, geniş bir kullanım alanına sahip olup, esasen elektroteknik amaçlar için geliştirilmiştir. Ancak bugün sentetik

maddelerin takviyesinde de kullanılmaktadır (özellikle dokuma kumaş formundaki cam takviyeli plastiklerde). Asitlere, alkalilere ve diğer kimyasal maddelere karşı dayanıklı olduklarından kimya sanayinde filtre yapımında geniş oranda kullanılmaktadırlar. Düşük alkali oranı nedeniyle elektriksel yalıtkanlığı diğer cam tiplerine göre çok iyidir. Mukavemeti oldukça yüksektir. Suya karşı direnci de oldukça iyidir. Nemli ortamlar için geliştirilen kompozitlerde genellikle e-camı kullanılır (Kinsella vd. [28]).

S (Mukavemet) Camı: Yüksek mukavemetli bir camdır. Çekme mukavemeti e-camına oranla % 33 daha yüksektir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda oldukça iyi bir yorulma direncine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle havacılıkta ve uzay endüstrisinde tercih edilir. Cam fiberler genellikle plastik veya epoksi reçinelerle kullanılırlar. Cam fiberlerin mekanik özellikleri ve bileşimleri Çizelge 3.7’de gösterilmiştir (Ebewele [29]).

3.2.2 Karbon Fiber

Karbon, yoğunluğu $2,268 \text{ gr/cm}^3$ olan kristal yapıda bir malzemedir. Karbon fiber ilk defa karbonun çok iyi bir elektrik iletkeni olduğu bilinmesinden dolayı üretilmiştir. Karbon fiber cam fiberlere göre çekme dayanımı, elastikiyet modülü, ısı iletkenlik, boyut kararlılığı, aşınma direnci, sürünme ve yorulma dayanımı gibi birçok alanda üstünlük sağlar. Cam fiberlere nazaran üç kat daha yüksek elastiklik modülüne sahip olan karbon fiberlere sertliğin önemli olduğu parçalarda tercih edilirler. Matris içerisine karbon fiber eklenmesi ile kompozit parçalar iletken haline getirilebilir. Bu özelliklerinden dolayı makaralı yataklarda, plastik elektrotlarda, motor farlarında kullanılır. Karbon fiber üreticileri devamlı bir gelişim içerisinde çalışmalarından dolayı karbon fiberlerin çeşitleri sürekli değişmektedir. Karbon fiberlerin üretimi çok pahalı olduğu için ancak uçak sanayinde, spor gereçlerinde veya tıbbi malzemelerin yüksek değerli uygulamalarında kullanılmaktadır.

Karbon fiberlerin en önemli özellikleri düşük yoğunluğun yanı sıra yüksek mukavemet ve tokluk değerleridir. Karbon fiberler, nemden etkilenmezler ve sürtünme mukavemetleri çok yüksektir. Karbon fiber, bilinen tüm malzemelerle eşit ağırlıklı olarak karşılaştırıldığında en sert malzemedir. Aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Bu nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Karbon fiberler çeşitli plastik matrislerle ve en yaygın olarak epoksi

reçinelerle kullanılırlar. Ayrıca karbon fiberler alüminyum, magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılırlar. Karbon fiberlerin uygulamadaki avantajları; boyutsal açıdan kararlı oluşları, kimyasal ve elektriksel/ısısal iletkenliklerinin yüksek oluşudur. Karbon liflerin kullanıcı açısından en önemli dezavantajı ise siyah renginden dolayı kompozit renginin istenilen şekilde korunamamasıdır. Diğer bir dezavantaj olarak yüksek maliyet söylenebilir (Ebewele [29]).

3.3 Kompozitlerde Dolgu Maddelerinin Kullanımı

Dolgu maddeleri, matrisin kompozisyon ve yapısından farklı olarak katı halde eklenen malzemelerdir. Genelde laminat malzemenin ağırlıkça % 40-65'ini oluşturur. Ürünler arasında en az maliyeti olan ve maliyet düşürücü olarak kullanılan malzemelerdir. Ayrıca dolgu maddeleri son ürünün mekanik veya fiziksel özelliklerini kontrol etme açısından da önem taşırlar.

Genelde inorganik yapıda bulunurlar fakat organik yapıda olanları da vardır. Etkisiz dolgu maddelerinin yoğunluğu arttırma ve maliyeti düşürme etkisi vardır. Aktif dolgu maddeleri ise takviye dolgu maddeleri olarak da bilinir ve mekanik veya fiziksel özelliklere önemli katkıları vardır.

Günümüzde çok yaygın biçimde kullanılan dolgu maddeleri ve takviye malzemeleri kullanıldıkları yerde belirgin farklar görülmesini sağlar. Asıl amaç kalıp bileşenlerinin maliyetini düşürmek olsa da günümüzde öncelik plastik özelliklerinin istenilen şekilde değiştirilmesi yönünde gelişmiştir.

Etkisiz dolgu maddeleri direkt olarak yoğunluğa etki eder. Dolgu maddelerinin eklenmesiyle takviye yapılacak malzemenin molekül zincirleri normalde olmaları gereken şekilde bulunamazlar. Polimer segmentlerinin dolgu maddelerinin yüzeyiyle sırasıyla birincil veya ikincil bağlarıyla bağlanması, bağ yapan segmentlerin hareketsiz hale gelmesine ve polimer matrisinin uygun bir dizilime sahip olmasını sağlar.

Dolgu maddelerinin matris içinde düzenli bir dağılıma sahip olması, daha çok polimer zincirinin serbest dolgu maddesi yüzeyiyle temas etmesi açısından önemlidir. Ayrıca serbest yüzey enerjisi ve dolgu maddesiyle matris arasındaki bağın polaritesi de bu açıdan önem taşır.

Etkisiz ve aktif dolgu maddelerinin, ayrıca cam küreleri ve talk gibi küresel yapılı dolgu maddelerinin hepsinin elastik modülüs ve tokluk değerlerini bir miktar artırmaları dışında aralarındaki temel fark, çekme dayanımının sadece aktif dolgu maddeleriyle artırılabilmesidir. Küresel yapılı dolgu maddelerinin eklenmesi yüksek sıcaklıklarda tokluk vb. özelliklerin artırılmasında takviye dolgu maddeleri kadar etkili değildir. Buna rağmen talk ve mika gibi yaprak şeklinde olan dolgu maddeleri bu değerlerde artış sağlayabilir [29], [30].

3.3.1 Dolgu Maddelerinin Genel Özellikleri

- Dolgular, laminat malzeme içeriğindeki yanabilir hidrokarbon miktarını düşürerek, bileşim üretimlerinin alev dayanımını artırır.
- Reçineleri seyrelterek ve gerekli takviye miktarını azaltarak maliyet düşürücü etkileri vardır.
- Takviye dolgu maddeleri, laminatın mekanik özelliklerini iyileştirir.
- Üründe reçine ve matris arasında yük dağılımını sağlayarak laminatın mekanik ve fiziksel performansını artırır.
- Reçinenin çatlama dayanımı ve çatlamların önlenmesi özellikleri dolgu kullanılarak arttırılabilir.
- Laminat üzerindeki her noktanın aynı özellikleri taşıması ve dolgu maddelerinin de matris içinde düzenli dağılmasıyla daha etkili bir ürün elde edilebilir.
- Dolgu maddeleri ile reçinede boyutsal stabilite, su ve hava direnci, ısıl dayanım, yüzey düzgünlüğü, sertliği artırılabilir.
- Farklı yapıda ve tane boyutlarında dolgu maddelerinin kullanılması yapının daha homojen olmasını sağlar.
- Hafif dolgu maddeleri ağırlık artışına katkıda bulunmaz fakat performansı çok iyi etkileyerek en düşük maliyeti sağlar [31], [32].

3.3.2 Dolgu Maddelerinin Seçimi

Dolgu malzemeleri genellikle kalıplanan parçaların performans ve maliyet unsurları dikkate alınarak seçilmektedir. Bir dolgu malzemesinin seçiminde kimyasal bileşenler, partikül hacmi ve seçilmesi olası malzemelerin hacmi gibi faktörler önem kazanmaktadır. Aynı şekilde kompozit ürünün bulunacağı ortam da dikkate alınması gereken bir husustur.

Örneğin; son ürün mineral asite maruz kalacaksa, kalsiyum karbonat gibi asitlerden etkilenecek olan dolgu malzemeleri kullanılmamalıdır. Eğer son ürünün alev dayanımlı veya ark dayanımlı özelliklere sahip olması gerekiyorsa, dolgu malzemesi seçimi kil veya kalsiyum karbonat ile hidrit alüminyum oksit'in karışımı olması gerekir. Yüksek yüzey alanı özellikleri nedeniyle, düzgün yüzey görünümü vermek amacıyla kil sıkça kullanılan bir malzemedir.

Kullanılacak dolgu maddelerinin seçilmesi aşamasında dikkat edilmesi gereken birçok unsur vardır. Bunlardan birkaçı şöyledir.

- Uygun parçacık boyut dağılımı
- Dolgu maddesi yüzeyinde meydana gelebilecek kimyasal reaksiyonlar
- Matris içinde dağılımı ve matrisle arasında zincir bağlanması
- Üretim sırasında oluşabilecek aşınmalar
- Bileşimin özellikleri
- Üretim sırasında endüstriyel açıdan güvenlik
- Maliyet

Bu kriterlerden en önemlisi maliyet olarak kabul edilebilir. Çünkü takviye malzemeleri sadece ürünün mekanik özelliklerinde bir gelişme istenirse veya farklı yöntemlerle takviye edilemeyecek durumlarla karşılaşıldığında kullanılır.

Kompozit üretimi sırasında kompozitte çekme, iç gerilmeler, çatlak oluşmaması ve kalıptan kolay çıkarılması için eklenen dolgu maddesinin matris içinde homojen dağılması; ayrıca kompozite düşük özgül ısı, düşük ısı genleşme özelliklerini kazandırması gerekir. Bunun dışında takviye ve plastiğin birbirine iyi bağlanmasına da

etki eder. Üretim makinelerinde aşınma olmaması için dolgu maddelerinin düşük sertlik değerine sahip olması, yüzey enerjisinin düşük olması için küresel yapıda olması ve yüzey işlemlerine yüksek ısıl direnç göstermesi üretim prosesine katkıda bulunur.

Dolgu maddelerinin mekanik özelliklere de kısmen etkisi olduğundan bahsedilmiştir. Örneğin, kompozitin çekme gerilmesi ve uzamasının artması için kullanılan dolgu maddesinin matrise göre daha yüksek mukavemete sahip olması gerekir. Bunun dışında kullanılan fiberlerin uzunluk/çap oranının yüksek olması, fiber ve matrisin iyi bağlanması ve matris içinde iyi dağılıma sahip olması lazımdır. Basma gerilmesini iyileştirmek içinse küçük ve küresel dolgu maddeleri kullanılabilir. Tokluğun artması için matrise göre daha yüksek elastik modüle sahip dolgu maddeleri kullanılmalıdır. Ayrıca bunların yüksek oryantasyona sahip olması gerekir.

Bu mekanik özelliklerden başka yüksek darbe mukavemeti istenirse uzun fiberler kullanılabilir. Kompozitin sertliğini artırmak için sert dolgu maddeleri eklenebilir. Ayrıca parçacık boyut dağılımını kontrol ederek yüksek yoğunluk elde edilebilecek sıkı paket yapı oluşturulabilir. Yumuşak ve kayma özelliği iyi olan dolgu maddeleri ekleyerek de kompozite düşük aşınma özelliği kazandırılabilir.

Son zamanlarda dolgu maddelerinin ve takviye malzemelerinin kullanılması, teknik uygulamalarda çok önemli bir faktör haline gelmiştir. Bu durum ayrıca yüksek tonajlarda plastik üretiminde de büyük kar sağlamaktadır. Fakat dünyada cam fiber sektörü dışında neredeyse hiçbir sektör dolgu maddelerinin ekonomik açıdan önemini belirtecek bir rakam açıklamamışlardır [32], [33].

3.3.2.1 Kalsiyum Karbonat

Günümüzde karbonat dolgu maddeleri genel olarak maliyet düşürücü olarak kullanılmaktadır. Taş ocağından çıkarılması, saflığı, içerdiği empürite oranı ve çeşitleri, işleme metodu ve bundan sonraki yüzey düzeltme işlemleri açısından özellikle plastik endüstrisinde son derece önemli bir yeri vardır.

Ayrıca kalsiyum karbonata uygun yüzey işlemi uygulayarak yağ sever bir özellik kazandırılabilir. Bu da plastik endüstrisinde tercih edilmesini sağlayan bir özelliktir.

Kalsiyum karbonat, epoksi ve polyester reçine sistemleriyle birlikte en çok kullanılan dolgu maddesidir. Doğada tebeşir, kireç taşı ve mermer şeklinde bulunur ve çok az miktarda başka mineralleri de içerebilir (Al-Zubaidi vd. [34]).

Ağırlık açısından bakıldığında öğütülmüş kalsiyum karbonat plastiklere eklenen en önemli dolgu maddesidir. Çok ince olarak öğütülmüş çeşidi de özellikle PVC’de kullanılmaktadır. Kalsiyum karbonat hem maliyet düşürme hem de fiziksel ve mekanik özelliklerin artmasına yardımcı olur (Valasek ve Chocholous [35]).

Kalsiyum karbonat dolgu maddelerinin genel özellikleri aşağıdaki gibidir [29], [36].

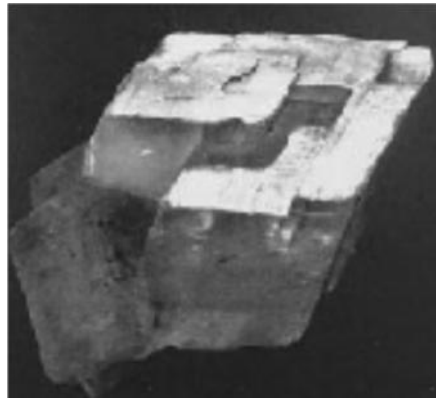
- Yüksek saflığa sahiptir. Böylece plastiğin kataliz işlemlerinde yapıda metal iyonları bulunmaz.
- Topaklanma eğilimi yoktur.
- Kalsit, düşük yüzey enerjisine sahiptir ve kararlı yapıda olduğundan dolayı plastikleştiricilerle diğer eklentiler üzerinde çok büyük etkisi görülmez.
- Çok yüksek derecede beyazdır, bu yüzden çok pahalı olan beyaz renk pigmentleri yerine kullanılabilir.
- Yüksek dolgu içeriklerinde bile plastiği açık renklerde boyamak mümkündür.
- Aşındırıcı etkisi yoktur, kolay işlenebilir (Mohs sertlik ~ 3).
- Geçirgenliği yüksektir fakat son ürünün mekanik ve elektriksel özelliklerinde küçük bir etki bırakabilir.
- Tokluk ve elastik modülünde artış sağlar.
- Boyutsal çekmeyi azaltır, renklerde kalıcılık sağlar.
- Yüzey düzgünlüğüne katkısı vardır.
- Çökelme eğilimi düşüktür.
- Özellikle kaplama yapılan bölgelerinde ürünün darbe mukavemetini ve yaşlanma direncini arttırıcı etkisi vardır.
- Zararsız, tatsız, kokusuz bir dolgu maddesidir.

- Isıl direnci 600 °C'ye kadar çıkabilir.
- Özellikle çöktürme yoluyla hazırlanan kalsiyum karbonata göre daha düşük maliyeti vardır. Ayrıca ağırlık ve hacimde de yüksek miktarda artış sağlar.

Kalsiyum karbonat üretimde en çok kullanılan üç farklı kristal yapı vardır. Bunlar kalsitin sahip olduğu trigonal rombohedral ve trigonal skalenohedral kristal yapıları ile aragonitin sahip olduğu ortorombik kristal yapılarıdır. Aragonit daha az kararlı bir yapıdır ve ısıtma ile kalsite dönüştürülebilir. İki mineral yoğunluk (aragonit 2,9 gr/cm³, kalsit 2.7 gr/cm³), kırınım indeksi (aragonit 1.7, kalsit 1.49 ve 1.66; kalsit iki kez kırınma etkisi gösterir.) ve sertlik (aragonit 3,5-4, kalsit 3) gibi fiziksel özellikleriyle birbirinden ayırt edilebilirler [29], [37].

İstenen parçacık boyutunu elde edebilmek için farklı üretim metodları kullanılır. Bunlar öğütme, çöktürme ve kaplamadır. Örneğin yüksek saflıkta ve çok ince taneli kalsiyum karbonat, eriyikten çöktürme yoluyla hazırlanır. Ayrıca bu yolla hazırlanan kalsiyum karbonatın matris içinde kolay dağılma özelliği de vardır. Öğütme yoluyla da çok ince taneli CaCO₃ taneleri elde edilebilir. Bu durumda öğütmenin yaş veya kuru olmasına bağlı olarak eğer yaş öğütme yapılmışsa ürün müşteriye sıvı bir çamur halinde teslim edilir. Böylece proses daha ekonomik ve çevreye zarar vermeden tamamlanmış olur [24], [38].

Kalsiyum karbonat tanelerinin yüzeyleri geniş olduğundan reçine emiliminin yüksek olduğu yerlerde kullanılır. Kalsit adı verilen yarı amorf halde bulunan kalsiyum karbonat taneleri ise daha yüksek reçine emebilme özelliğine sahiptir. Şekil 3.6'da trigonal rombohedral kalsit yapısı gösterilmektedir [29], [38].



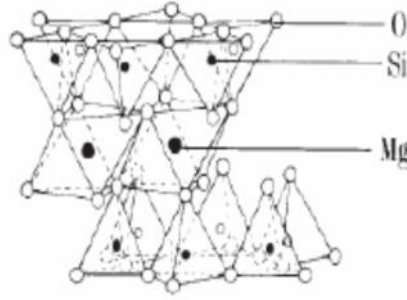
Şekil 3. 6 Trigonal rombohedral kalsit

3.3.2.2 Talk

Talk doğada $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ formülüne sahip su içeren bir bileşik halinde magnezyum silikat olarak bulunur. Talk; lifli, lamelar, iğnesel ve plaka şeklinde olmak üzere dört farklı parçacık şekline sahiptir fakat ticari olarak yalnızca lamelar yapıli talkın kullanımı yaygındır.

Talk kompozisyonu, elde edildiğı kaynağı göre değışiklik gösterir. Burada en önemli faktör içerdiği tremolit miktarıdır. Örneğın; Montana talkı asbest ve tremolit içermezken levha şeklindeki California talkı % 3’den az ve sert talklar % 5-25 oranlarında tremolit içerirler.

Talkın başlıca içeriğı magnezyumun hidroksit ve oksit bileşikleridir ve bunlar sandviç şeklinde iki silikon oksit tabakası arasında yer alırlar. Şekil 3.7’de trigonal rombohedral kalsit yapısı gösterilmiştir [22], [39].



Şekil 3. 7 Trigonal rombohedral kalsit

Talkın iyi kayabilme özelliklerine sahip olması, büyük ölçüde bu lamelar yapıya ve düşük sertliğine bağlıdır. Bu sandviç şeklindeki yapı her katmanın belli bir su uzaklaştırma derecesi olmasını ve kimyasal reaksiyonlara karşı dirençli olmasını sağlar. Talkı 800 °C civarında ısıtırsak içerdiği suyu kaybeder fakat bu olursa levha şeklindeki yapı kaybolur ve özellikler değışir. Yapıdaki katmanlar birbirlerine zayıf Van der Waals bağlarıyla bağlı oldukları için, düşük kesme kuvvetlerinin etkisinde bile delaminasyona uğrayabilir ve birbirlerinden ayrılabilirler. Katmanlar arası bu zayıf bağların var olmasından dolayı talk ele kayganlık hissi verir ve eklendiğinde yapı içinde kolay dağıtılabilir.

Plaka şeklinde talk, eklendiğı plastiklerde yüksek direnç ve daha az gaz geçirgenliği gibi özellikler kazandırır. Ayrıca Mohs sertlik skalasında en yumuşak mineral olması ve

yüzeyinin suyu sevmeyen özellikte olması nedeniyle daha az aşınmaya neden olur [22], [40].

Talk, son zamanlarda polimer sektöründe özellikle tokluk söz konusu olunca en çok tercih edilen dolgu maddelerinden biridir. Bu bakımdan talkın işlevi sadece dolgu amaçlı olmasına değil, aynı zamanda ince taneli ve katmanlı bir yapısı olmasına da bağlıdır.

Diğer silikatlardan farklı olarak talka yüzey uygulamalarıyla yapılan mekanik özellikleri iyileştirme deneylerde henüz istenilen sonuç alınamamıştır. Talkın plastiklerin mekanik özelliklerine etkisi şunlardır [19], [41].

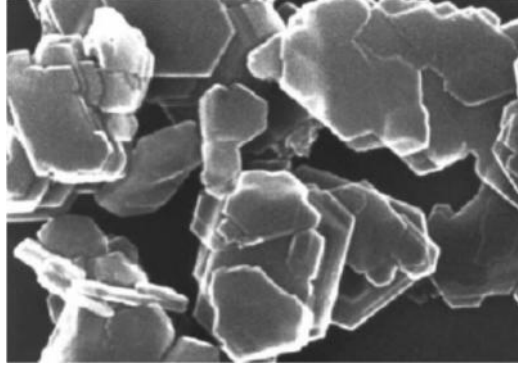
- Tokluk, eğme ve burma modülüslerinde artış sağlar.
- Eğme mukavemetinde artış sağlar.
- Yüksek sıcaklıklarda sürünme özelliklerini iyileştirir.
- Boyutsal stabiliteye önemli derecede katkısı vardır.
- Çekme ve darbelere karşı direnci arttırır, ısı genleşme katsayısını düşürür.
- Isıl iletkenliği artırır.
- Kalıplanan parçaların yüzey sertliklerini artırır.

Birçok iyileştiren özelliğine rağmen talkın kompozite yan etkileri de vardır [20], [42].

- Kırılma anında çekme mukavemeti ve uzamada azalma görülür.
- Çentikli darbe mukavemetinin azalmasına ve sertliğin artmasına neden olur.
- Takviye ve çekme durumlarında yöne bağımlı davranışa neden olur.
- Yapıdaki katmanlar arasında zayıflığa neden olur.
- Kullanıldığı kompozit malzemenin renginin değişmesine neden olabilir.
- Kullanıldığı malzemeye bağlı olarak gıda maddeleriyle teması sağlık açısından uygun olmayabilir.
- Saf olan ürünler genelde pahalıdır.

3.3.2.3 Kaolen

Kaolen granit ve feldsparın bozunması sonucu oluşan bir üründür. Yeryüzünde çok fazla bulunur fakat saflığı düşüktür. Ayrıca “china clay” olarak da bilinir. Birincil ve ikincil kaolinitleri içerir. Lamelar yapısı vardır. Birincil kaolinitler uzunluklarının kalınlığına oranlarında 10:1 gibi bir değere sahip olurlar ve kalan lamelar yapı ise hekzagonaldır [20], [43].



Şekil 3. 8 Kaolenin SEM görüntüsü

Kaolen, yapısında su içeren alüminyum silikat halinde bulunur ve formülü $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ şeklindedir. Bileşimin % 38.8’ini Al_2O_3 , % 45.4’ünü SiO_2 , % 0.2’sini MgO , % 0.97’sini K_2O , % 0.07’sini Na_2O , kalanını da FeO ve diğer mineraller oluşturur [44], [45].

Kaolen, lastik endüstrisinde karbon siyahından sonra en önemli ikinci dolgu maddesidir. Lastik kimyasında kaolenin sert veya yumuşak olması, son ürünün yüksek veya düşük modüle sahip olmasına göre ayırt edilebilir. Tane boyutu çok düşüktür [46], [47].

Morfolojik açıdan bakıldığında ise asıl fark; sert kaolen tanelerinin neredeyse % 75’inin 2 μm ’den küçük, yumuşak kaolen tanelerinin ise daha büyük olmasıdır. Şekil 3.8’de kaolen yapısı gösterilmektedir.

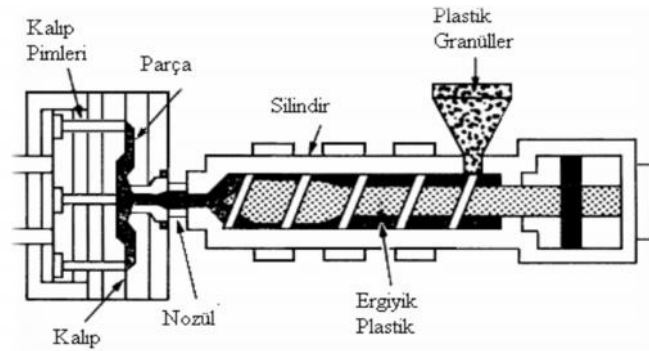
Kaolen daha çok polyester gibi termoset plastiklerde kullanılır. Yüksek derecede beyazdır, elektrik iletkenliği göstermez, kimyasallara karşı dirençli ve güçlü asitlere bile çok dayanıklıdır. Ayrıca kullanıldığı üründe su emme özelliğini de azaltır. Son üründe oluşabilecek çatlak eğilimini düşürür. Bunun dışında daha iyi şok direnci ve yüzey kalitesi sağlar. Lamelar yapıda olması son ürünün daha sert olmasını sağlar.

Ayrıca kaoleni kalsinasyon işleminden geçirerek daha sert fakat polimerin elektriksel özelliklerini kısmen daha fazla iyileştiren bir ürün elde edilebilmektedir [48], [49].

3.4 Üretim Yöntemleri

3.4.1 Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi

Fiber takviyeli termoplastiklerin, imalatında tercih edilen bir yöntemdir. Her bir kalıplama periyodunda birkaç gramdan on kilograma kadar değişen aralıklarda parçaları kalıplayabilecek kapasitede enjeksiyon makinalarının kullanılması mümkündür. Enjeksiyon makinalarına beslenen kalıplama bileşikleri, boyları 3-6 m arasında değişen granüller halinde ön karışımlardır. Enjeksiyonla kalıplama tekniğinde genellikle palet şeklindeki ön karışımlar kullanılır. Şekil 3.9’da enjeksiyon kalıplama yöntemi şematik olarak gösterilmiştir (Goodman [50]).



Şekil 3. 9 Enjeksiyon kalıplama yöntemi

3.4.2 Hazır Kalıplama Yöntemi

Ürün boyutuna göre 3-6 dakikalık bir kalıplama süresi sağlayan hızlı, seri bir kalıplama metodudur. Önceden hazırlanmış, pestil veya hamur haldeki cam fiber–polyester–dolgu ve katkı malzemeleri karışımının 150-170 °C sıcaklıkta, 50-120 kg-f/cm² basınç altında çelik kalıplarda şekillendirilmesi metodudur (Goodman [50]).

3.4.3 Otoklav Yöntemi

Termoset kompozit malzemelerin performanslarını artırmak için fiber/reçine oranını artırmak ve malzeme içinde oluşabilecek hava boşluklarını tamamen gidermek

gerekmektedir. Bunun sağlanması için malzemeyi yüksek ısı ve basınca uygulayarak sağlanabilir. Vakum paketlenme yöntemindeki gibi sızdırmaz bir torba ile fiber/reçine yatırmaya basınç uygulanabilir. Fakat 1 atmosferden fazla düzenli ve kontrol edilebilir bir basıncın uygulanabilmesi için dışsal basınca ihtiyaç duyulur. Bu uygulama için, otoklav yönteminde de uygulanan ve kompleks şekillerde en çok kontrol edilebilen metot, dışarıdan sıkıştırılmış gazın kompozit malzemenin içinde bulunduğu kaba verilmesidir. Otoklav kesin basıncın, ısının ve emişin kontrol edilebildiği basınçlı bir kaptır. Vakum paketlenme yöntemi ile benzerdir. Fırın yerine bir otoklav kullanılır. Böylece özel amaçlar için yüksek kalitede kompozit üretebilmek için kür şartları tam olarak kontrol edilebilir. Bu yöntem diğerlerine oranla daha uzun sürede uygulanır ve daha pahalıdır (Goodman [50]).

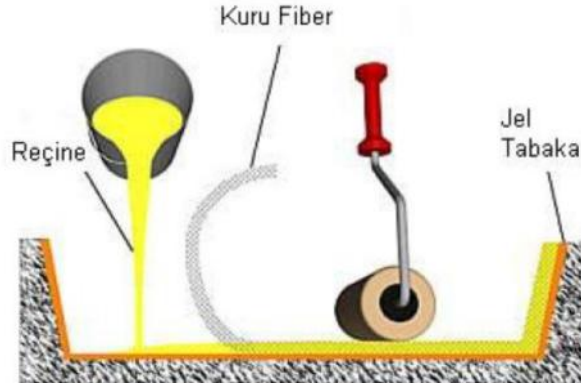
3.4.4 Fiber Sarma Yöntemi

Özellikle boru ve tank üretimi için kullanılan kalıplama metodudur. Bu yöntem özel biçime sahip ürünlerin seri üretimine uygundur. Fiber sarma yöntemi sürekli fiber liflerinin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılmasıdır. Sürekli liflerin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklerde ürünler elde edilebilir. Yeterli sayıda fiber katının sarılmasından sonra ürün sertleşir. Ardından döner kalıp ayrılır. Genellikle, filament sarım için başlangıç malzemesi filament lifler (iplikler) ve sıvı termoset reçinelerdir. İplikler arka askıda makara formunda bekletilir ve dağıtım ünitesindeki bir reçine banyosu içerisinden geçirilir. Cam, karbon ve kevlar lifleri filament sarım için kullanılır. Cam lifleri ucuz olduğundan kullanımı en yaygın olan liflerdir. Epoksi, polyester ve vinil ester reçineleri kullanılır. Polyester reçine ile cam lifi düşük maliyetli uygulamalar için oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [51], [52].

3.4.5 Elle Yatırma Yöntemi

Dokuma veya kırılmış fiberlerle hazırlanmış takviye kumaşları hazırlanmış olan kalıp üzerine elle yatırılarak üzerine sıvı reçine fiber katmanlarına emdirilir. Fiber yatırılmadan önce kalıp temizlenerek jelkot sürülür. Jelkot sertleştikten sonra fiber katları yatırılır. Reçine ise kompozit malzemenin hazır olması için en son sürülür. Bu

işlemede fiber kumaşına reçinenin iyi nüfuz etmesi önemlidir. El yatırma tekniğinde en çok kullanılan polyester ve epoksinin yanı sıra vinil ester ve fenolik reçineler de tercih edilmektedir. Elle yatırma yoğun işçilik gerektirmesine rağmen düşük sayıdaki üretimler için çok uygundur ve Şekil 3.10'te elle yatırma yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. 10 Elle yatırma yöntemi

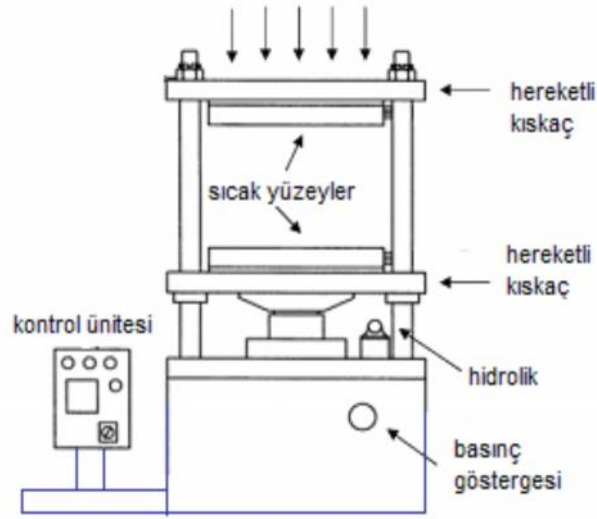
El yatırma prosesi için gerekli kalıp tasarımı, diğer üretim prosesleriyle karşılaştırıldığında çok basittir. Çünkü proses çoğunlukla oda sıcaklığında ve düşük basınç kür şartları gerektirir. Çelik, tahta, cam takviyeli plastik ve diğer maddeler kalıp malzemesi olarak kullanılabilir. Kalıp dişi veya erkek kalıp olabilir. Küvet yapımında bir erkek kalıp kullanılır. Tekne endüstrisinde, yat gövdelerinin yapımı için, tek yönlü cam takviyeli plastikten yapılmış dişi kalıp kullanılır. Kalıbın dış kabuğu, ahşap bir iskelet ile sertleştirilir (Masuelli [52]).

3.4.6 Profil Çekme Yöntemi

Devamlı cam fiberlerin fitillerin polyester banyosundan geçirildikten sonra istenilen profilde bir sıcak kalıp içinden çekilirken sertleştirilmesi prensibine dayanır. Fiber takviyesi yönünde çok dayanıklı ve cam elyafı oranı çok yüksek profil ürünler elde edilir. Fiberler reçine tankından geçirilerek reçine tatbik edilir. Bu yöntemle genellikle çubuk ve boru şekilli ürünler elde edildiğinden, karışımın çubuk ve boru şekli kazanması için uygun kalıplardan çekilirler. Şekillerin kalıcı olması için çekme kafaları ısıtılabilceği gibi bir fırından da geçirilebilir. Bu üretim yöntemiyle; kapı, pencere profilleri, korkuluklar gibi mamüller üretilmektedir [52], [53].

3.4.7 Sıcak Presleme Yöntemi

Fiberlerin konumunu muhafaza etmesi için metal tabakalar arasına yerleştirilir. Belirli bir sıcaklıkta presleme yapılır. Presleme sırasında bağlayıcı madde püskürtülür. Presleme sırasında uygulanan basınç üretilecek olan kompozitin boyutuna bağlı olarak 0,5-15 MPa aralığındadır. Sıcaklık ise reçine sıcaklığına bağlı olarak, 80-170 °C aralığında uygulanır. Saatte 15-30 adet ürün elde edilebilir. Genellikle yassı mamüller üretilir. Şekil 3.11’de hidrolik presleme cihazının şematik görünümüne yer verilmiştir [54], [55].

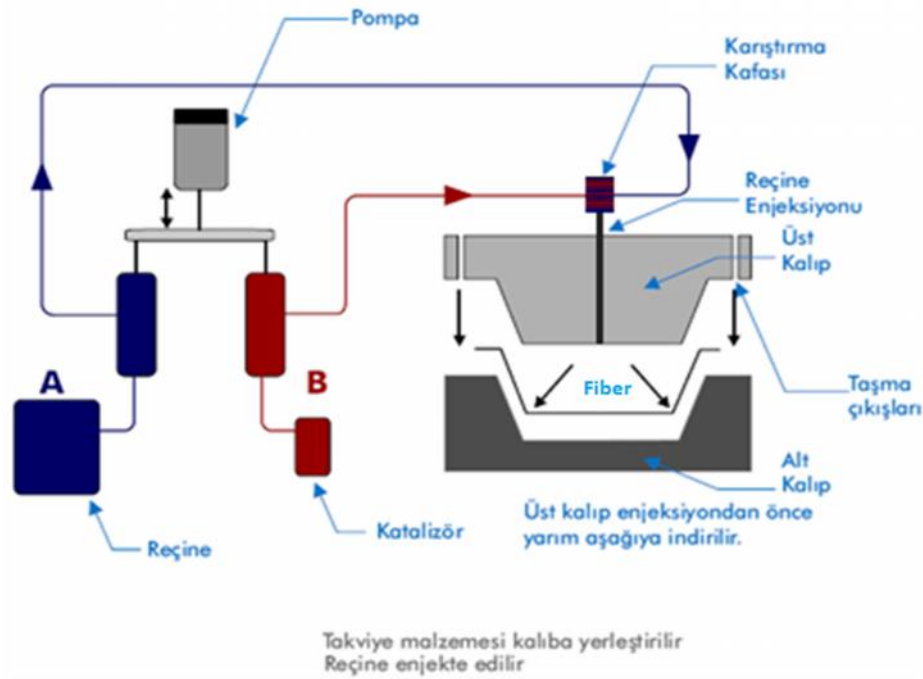


Şekil 3. 11 Hidrolik pres cihazının şematik gösterimi

3.4.8 Reçine Transfer Kalıplama (RTM)

Bu kompozit üretim yönteminde elle yatırma sistemlere daha hızlı ve uzun ömürlü olmakla birlikte iki parçalı kalıp kullanmak gereklidir. Kalıbın kompozit malzemeyle yapılması çelik kalıp maliyetine göre daha düşük kalmasına neden olmaktadır. RTM yöntemi çoğunluk jelkotlu veya jelkotsuz her iki yüzeyinde düzgün olması istenen parçalarda kullanılır. Takviye malzemesi kuru olarak keçe, kumaş veya ikisinin kombinasyonu kullanılır. İnfüzyon yönteminden farklı olarak burada jelkot uygulanmış iki kalıp (dişi ve erkek) kullanılır. Takviye malzemesi önceden kalıp boşluğu doldurulacak şekilde kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Fiberler matris içinde geç çözünen reçinelerle kaplanarak kalıp içerisinde sürüklenmesi önlenir. Reçine basınç altında kalıba pompalanır. Bu süreç daha fazla zaman ister. Matris enjeksiyonu soğuk, ılık veya en çok 80 °C'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Bu yöntemde içerideki

havanın dışarı çıkarılması ve reçinenin fiber içine iyi işlemesi için vakum kullanılabilir. Fiberin kalıba yerleştirilmesini gerektirmesinden dolayı uzun sayılabilecek bir işçilik gerektirir.



Şekil 3. 12 Reçine transfer kalıplama

Kalıp kapalı olduğu için ise zararlı gazlar azalır ve gözeneksiz bir ürün elde edilebilir. Bu yöntemle karmaşık parçalar üretilebilir. Uçaklarda ve Formula 1 arabalarında bazı parçalar bu yöntemle hazırlanmaktadır. Şekil 3.12’de reçine transfer yöntemi şematik olarak gösterilmiştir [53], [55].

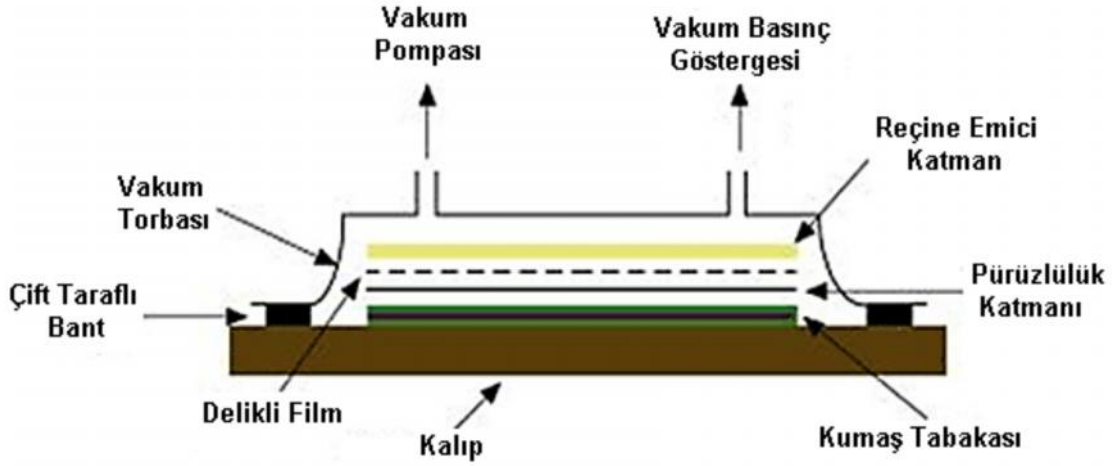
3.4.9 Vakum Torbalama Yöntemi

Vakum torbalama üretim tekniği esas itibari ile fiberli malzemenin bir kalıp içerisine elle yatırılması ve reçinenin elle kalıp içine dağıtılması sürecinden sonra devreye alınan bir uygulamadır. Vakum torbalamadaki negatif basınç uygulaması, kompozit kumaş ve reçine arasındaki havanın dışarı çekilmesini sağlamakta ve bu sayede hava kabarcıklarından arınmış bir katmanlı yapı imalatı mümkün olmaktadır. Ayrıca vakum uygulaması sayesinde reçinenin bütün katmanlar içine tam olarak nüfuz etmesi sağlanabilmekte ve bu sayede tüm bölgelerin reçine ile ıslatılmış olması garanti edilebilmektedir (Mazumdar [55]).

Vakum torbalama için gerekli adımlar şunlardır (Goren ve Atas [56]).

- Üretilecek parçanın kalıbı hazırlanır.
- Kalıp önce işlemlere ait atık ve kalıntılardan temizlenir.
- Kalıp yüzeyine iki kat kalıp ayırıcı ince bir tabaka halinde sürülür.
- Kalıp ayırıcı sürülmüş yüzeye bir kat jelkot sürülür.
- Hazırlanan reçine karışımı ilk kat olarak kalıbın yüzeyine sürülür.
- Fiber kumaş reçine üzerine yatırılır ve üzerine fırça yardımı ile reçine sürülür. Bu işlem kaç kat takviye malzemesi varsa o kadar devam eder.
- Fiber kumaşının üzerine pürüzlülük katmanı ve delikli naylon yerleştirilir.
- Delikli naylonun üzerine de hava çıkışını sağlayan ve fazla reçineyi tutmaya yarayan bir kumaş yerleştirilir.
- Kalıbın kenarlarına çift taraflı bantlar yapıştırılır.
- En son olarak da vakum torbası sistem hava almayacak şekilde bantların üzerine yerleştirilir.
- Vakum hortumları sisteme bağlanır.
- Daha sonra bir vakum pompasından faydalanılarak vakumlama işlemi başlatılır ve reçinenin fiber kumaş tarafından tamamen emilmesi sağlanır.
- Reçine emildikten sonra vakum kesilir ve parça kürleşmeye bırakılır.
- Parça kürleştikten sonra kalıptan çıkarılır.

Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.13'te verilmiştir (Durgun vd. [57]).



Şekil 3. 13 Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi

3.4.10 Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Prosesleri

Literatürde vakum ortamında reçine infüzyonu mantığına dayanan ve farklı isimler ile adlandırılan çeşitli yöntemler vardır. Aralarında küçük birtakım farklılıklar olmakla birlikte temel işlem olarak vakum destekli infüzyon prosesleri üretiminde, kuru kumaşlar (fiber) bir kalıp içerisine istiflenir. İstiflenmiş kumaşlar (lamine); “vakum paketlenme” yönteminde olduğu gibi plastik bir vakum filmi ve çift taraflı yapışkan sızdırmazlık macunları kullanılarak dış ortamdan izole edilir. Laminenin üzerine bir ayırıcı film ve reçine dağıtıcı tabaka konur. Vakum yardımı ile reçinenin istiflenmiş kuru kumaşlara nüfuz etmesi sağlanır (Mazumdar [55]).

Genel olarak; epoksi, polyester ve vinilester reçineler kullanılır. Bilinen klasik fiberler bu yöntemde kullanılabilir. Birbirlerine önceden dikilmiş fiber tabakalarının kullanımı durumunda bu yöntemler daha iyi sonuçlar verir. Ayrıca sandviç kompozit üretiminde; balpeteği dışındaki çekirdek malzemelere de uygulanabilirler (Durgun vd. [57]).

Avantajları şu şekilde sıralanabilir.

- Tek taraflı bir kalıba ihtiyaç vardır.
- Yüksek mukavemetli bir kalıba ihtiyaç yoktur.
- Bu nedenlerle kalıp ve üretim maliyeti RTM ye oranla daha düşüktür.
- Büyük parçalar bu yöntemle üretilebilir.

- Elle yatırma yönteminde kullanılan kalıplar bu yöntem için modifiye edilerek kullanılabilir.
- Çekirdek yapılar tek adımda üretilebilir.

Dezavantajları ise şunlardır.

- İşlem basamakları kısmen komplekstir.
- Düşük viskoziteye düşük reçine kullanımı mekanik özellikleri olumsuz etkileyebilir.
- Reçine ile ıslanmamış bölgeler kalabilir; bu da pahalı atık malzeme demektir.

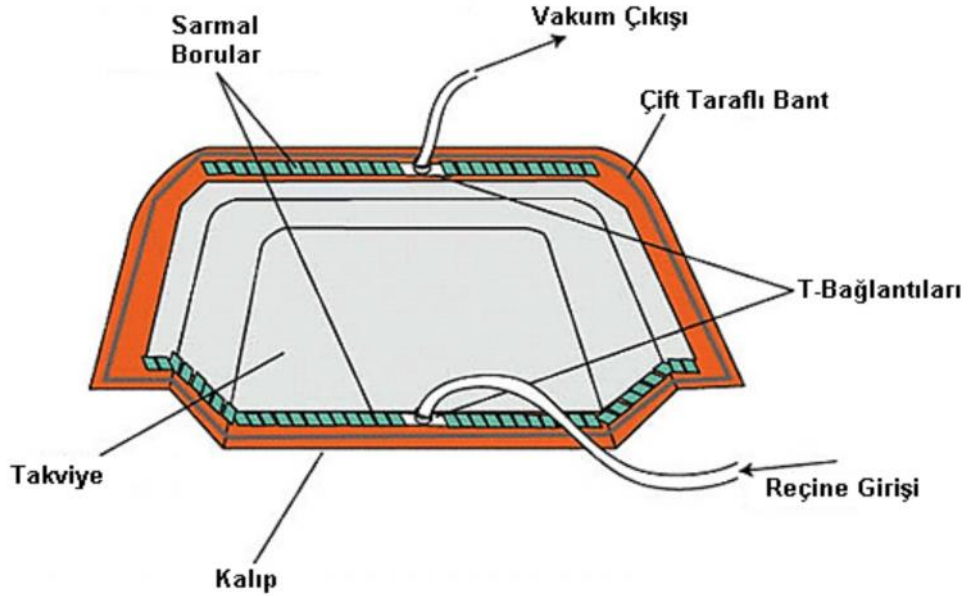
Küçük tekne ve yatların gövdelerinde, tren ve kamyon gövdelerinde, rüzgar türbin kanatlarında kullanılmaktadır.

3.4.10.1 Vakum Destekli Reçine İnfüzyonu (VARİM)

Vakum destekli reçine infüzyonu yüksek kaliteli, büyük kompozit parçaların üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemin temel prensibi, vakum altına alınmış kuru takviye ve dolgu malzemelerinin basınç farkından yararlanılarak reçinenin ilerlemesi ile tamamen doyurulmasıdır. Büyük ölçekli ürünlerde en iyi cam/reçine oranı bu yöntem ile sağlanabilmektedir ki bu da dayanımı çok daha yüksek ve daha hafif ürünler elde edilmesini sağlamaktadır. Reçine kendi başına oldukça kırılgan bir yapıdadır ve bu yöntem çoğunlukla serbest reçinenin üründe kalmasına engel teşkil eder. Diğer yöntemlere göre maliyetleri daha fazla olmasına rağmen iş güvenliği ve işçi sağlığı açısından riskleri daha azdır. Bu yöntemin rüzgâr türbini kanatlarında kullanılmaya başlanması ile birlikte özellikle kalıp yapım teknolojileri de oldukça gelişmiş, kendinden ısıtılmalı (su ya da elektrik ile), vakum girişleri hazır, izolasyonları yapılarak ısı kayıplarının en aza indirildiği kalıplar üretilerek ürün kalitesinin daha da artması sağlanmıştır (Mazumdar [55]).

Vakum destekli reçine infüzyon yönteminde, kalıp yüzeyi bir ayırıcı ile kaplanır. Belli bir dizilişte kuru kumaşlar (fiber) veya bir preform malzeme kalıba yatırılır. Kumaşın üzerine soyma kumaşı, ayırıcı film, reçine dağıtıcı filmler konur. Plastik bir vakum naylonu (filmi) ve çift taraflı yapışkan sızdırmazlık macunları kullanılarak, istiflenmiş

kumaşlar çepeçevre dışı ortamdaki izole edilir. Vakum yardımı ile reçinenin istiflenmiş kuru kumaşlara tamamen nüfuz etmesi sağlanır ve malzeme pişmeye bırakılır. Vakum infüzyon yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.14’te gösterilmiştir [56], [57].



Şekil 3. 14 Vakum infüzyon yönteminin şematik gösterimi

3.4.10.2 Vakum Destekli Reçine Kalıplama (VARTM)

RTM yöntemine benzer olarak, VARTM yönteminde kalıp yüzeyine yatırılan kumaşların üzerine sırasıyla sökme kuması ve reçine akış hattı yerleştirilir. Ana reçine dağıtım hattı da döşendikten sonra vakum naylonu ile kaplanan sisteme vakum uygulanır. Bu yöntemin bir avantajı da reçinenin sisteme verilmesinden önce olası vakum kaçaklarının tespit edilebilmesi için bütün sistemin vakuma alınarak test edilebilmesidir. Eğer sistemde, kaçak yoksa, reçine ortamdaki atmosfer basıncının ve sistemin vakum hattından gelen negatif basıncın etkisi ile sisteme verilir [56], [57].

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Malzemeler

Bu çalışmada ana malzeme olarak Polikem firmasından temin edilen modifiye edilmemiş bisfenol A epiklorohidrin esaslı Polires 188 marka epoksi reçine kullanılmıştır. Polires 188, açık saman renkli ve orta viskoziteye sahip olup, amin anhidrid, poliamid, veya arzu edilen özelliklere bağlı olarak uygun sertleştiricilerle kürlenebilen standart sıvı reçinelerden biridir. Çizelge 4.1’de verilen özelliklere sahip bu epoksi reçine, mükemmel bir kimyasal direnç, üstün fiziksel ve elektriksel özellikleri ile yüksek ısı direnci ve iyi yapışma özelliğine sahiptir. Sertleştirici seçimine bağlı olarak, oda sıcaklığında veya yükseltilmiş sıcaklıklarda sertleştirilebilir.

Çizelge 4. 1 Epoksi 188 özellikleri

Epoksi eşdeğer ağırlığı	182–192 (g)
Viskozite 25 °C	11,000–15,000 (cps)
Özgül ağırlık	1,15–1,18 (g/cm ³)

Koruyucu kaplama, elektrik bileşenleri için döküm, laminasyon, kalıp, yapışkanlık ve inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılmaktadır. Raf ömrü kuru ortam koşullarında muhafaza edildiğinde en az 12 aydır.

Sertleştirici malzeme olarak, yine Polikem firmasından temin edilen, Epoksi reçine ile uyumlu Cetapox 1588 LH marka sertleştirici kullanılmıştır.

Takviye malzemelerinin seçimi ise kompozitin mekanik performansına etki eden 4 faktör dikkate alınarak yapılmıştır. Bunlar takviyenin şekli, uzunluğu, yönlenmesi ve malzemesidir. Bu etkenlerden ilk üçü geometrik faktör, sonuncusu ise malzeme faktörü olarak tanımlanır. Takviye malzemesi şekli yönünden ele alındığında, kompozit malzemeye uygulanacak yükün tüm malzeme boyunca taşınabilmesi açısından, partikül ya da yonga türü yerine, fiber türü seçilmiştir. Mekanik özellik ve maliyet açısından optimum değerlere Cam Elyaf A.Ş.'den alınan CD 125-300 ürün kodlu 300 g/m^2 , $0-90^\circ$ dokuma e-camı fiberler uygun takviye malzemesi olarak belirlenmiştir. Cam fiber yoğunluğu $2,55 \text{ g/cm}^3$ tür.

Dolgu malzemesi olarak ise 5 mikron metre boyutlarında, yoğunluğu $2,75 \text{ g/cm}^3$ kalsit kullanılmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, dokuma e-camı fiber epoksi kompozit malzemeye üçüncü bileşen olarak eklenen kalsit dolgu maddesinin mekanik ve fiziksel özelliklere etkisini belirlemektir. Deneysel çalışma esas olarak iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama, kompozit numunelerin üretimi, ikinci aşama ise mekanik ve fiziksel özelliklerin belirlenmesi, yani karakterizasyon işlemidir.

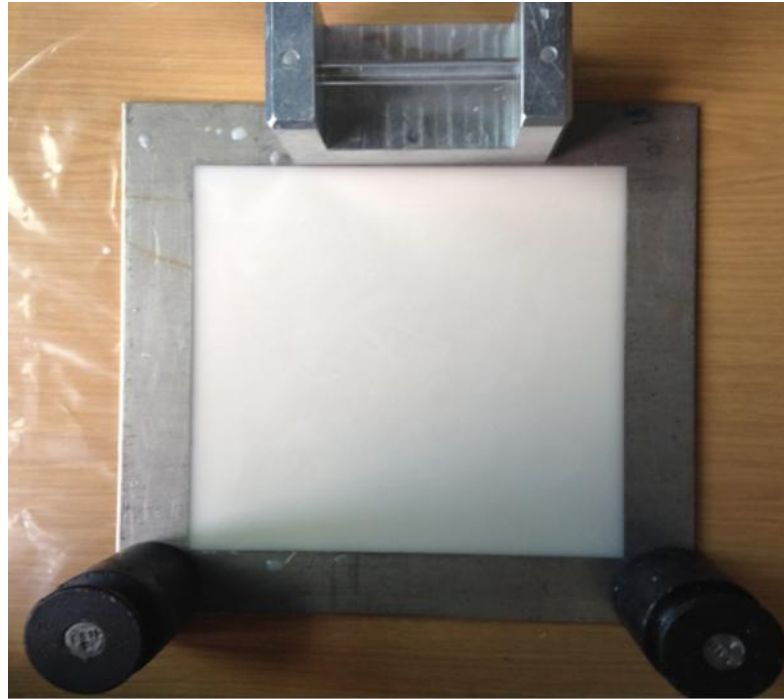
4.2 Numunelerin Hazırlanması

Epoksi üretimi için, düz bir zemine konulan ince bir film üzerine $250 \times 250 \text{ mm}$ boyutlarında 4 mm kalınlığında metal çerçeve yerleştirilir. Bu çerçeve ile kompozitin en iyi koşullarda oluşması amaçlanmaktadır. Metal çerçeve içerisine ağırlıkça 100/50 oranında epoksi reçine/sertleştirici karıştırılarak elde edilen epoksi karışımı dökülür. Levha üzerine konulan yükler sayesinde epoksinin metal çerçeve dışına taşmaması ve çerçeve içerisinde eşit oranda yayılarak homojen bir kalınlığa sahip olması sağlanır. Üretilen epoksinin yüzeyinin düzgün ve pürüzsüz olması için epoksi yavaşça karıştırılarak, epoksi yüzeyindeki hava kabarcıkları giderilir. Bu işlemlerden sonra epoksinin sertleşmesi (kürlenme) beklenir. Bu süre 24-48 saat arasındadır. Ardından aynı deney düzeneği kullanılarak kalsit dolgulu epoksi kompozit numunelerin üretimi Şekil 4.1'de gösterildiği gibi gerçekleştirilir. Üretilen numunelerin ağırlıkça yüzde miktarları Çizelge 4.2'de belirtilmektedir. Kalsit dolgulu epoksi kompozitlerin üretimi esnasında dikkat edilecek hususlardan biri de, malzeme içerisinde kalsitin topaklaşmaması ve

homojen bir şekilde dağılması için epoksi-kalsit karışımının mikser yardımıyla iyice karıştırılmasıdır.

Çizelge 4. 2 Epoksi kalsit yüzde ağırlıkları

Numune	Epoksi karışımı (Ağırlıkça %)	Kalsit (Ağırlıkça %)
E (Kontrol grubu)	100	-
E5K	95	5
E10K	90	10
E15K	85	15



Şekil 4. 1 Kürlenme esnasındaki % 10 kalsit dolgulu epoksi numune

Dokuma e-camı fiber takviyeli epoksi kompozit üretimi, vakum torbalama yöntemi ile gerçekleştirilir. Bu yöntemle, fiberin epoksiyi daha iyi emmesi ve malzeme yüzeyinin düzgün ve pürüzsüz olması sağlanır. Numunelerin ağırlıkça yüzde miktarları Çizelge 4.3'de belirtilmektedir.

Çizelge 4. 3 Epoksi, fiber ve kalsit yüzde ağırlıkları

Numune	Epoksi (Ağırlıkça %)	Dokuma e-camı fiber (Ağırlıkça %)	Kalsit (Ağırlıkça %)
ECF (Kontrol grubu)	65	35	-
ECF5K	60	35	5
ECF10K	55	35	10
ECF15K	50	35	15

Düz bir zemine konulan 500x500 mm boyutlarında metal plakanın üzeri sızdırmazlık bantı ile çerçevelenir. Bu çerçeve ile reçinenin dışarı taşmaması ve kompozitin en iyi koşullarda oluşması amaçlanır. Çerçevenin ortasına yerleştirilen 300X300 mm boyutlarındaki metal plakaya, sertleşmenin (kürleşme) ardından kompozit malzemenin metal plakaya yapışmaması ve kolay ayrılması için silikon sprej sıkılır. Metal plaka üzerine ağırlıkça 100/50 oranında epoksi reçine/sertleştirici karıştırılarak elde edilen epoksi karışımı dökülür ve üzerine 300X300 mm boyutlarında dokuma e-camı fiber yerleştirilir. Epoksi karışımının fırça yardımı ile E-camı fibere iyice emdirilmesi sağlanır. Aynı işlemler 4 katlı dokuma e-camı fiber kompozit elde edilince kadar tekrarlanır. Bu işlemler yapılırken epoksi kaybının olmamasına dikkat edilmelidir; bunun nedeni başta başta hesaplanan cam fiber/epoksi oranının korunmasıdır.

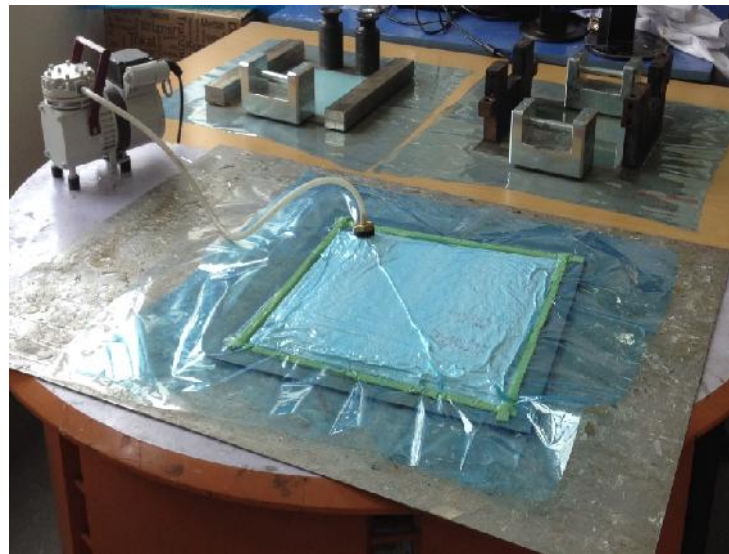
Şekil 4.2’de vakum torbalama deney görüntülerine yer verilmiştir. Hazırlanan numunenin üzeri sırasıyla peel ply adı verilen ve vakum torbasından kompozit plakanın daha kolay ayrılmasını sağlayan poliamid malzeme ve fazla reçinenin geri dönüp dokuma üzerinde birikmesini önleyen release film ile örtülür. Fazla reçineyi emmeye yarayan polyesterden yapılan reçine emici kat yüzeyi kapatacak şekilde yerleştirilir. Uygun boyutlarda hazırlanan vakum torbası üzerinde numunenin belirlenen kenar kısmına denk gelecek şekilde makasla küçük bir yarık açılarak vakum valfi yerleştirilir. Ardından hava geçirmeyen vakum torbası, sızdırmazlık bantı üzerine bantın yerleştirildiği hat boyunca yapıştırılır. Vakum torbası yapıştırıldıktan sonra vakum pompası hortumu, vakum valfine takılarak, vakum pompası çalıştırılır ve vakum her

bölgede etkili oluncaya kadar beklenir. Vakum kaçağı olup olmadığı kontrol edilerek ve vakum kaçağı var ise bu bölgelerin izolasyonu sızdırmazlık bantı ile yapılır.



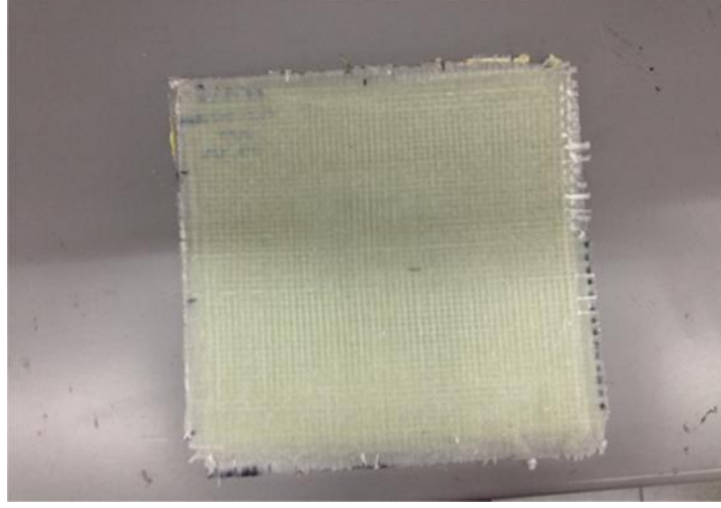
Şekil 4. 2 Vakum torbalama deney görüntüleri

Kompozit malzeme -1 atmosfer basınçta ve 24 saat vakum altında tutulur. Aynı deney düzeneği kullanılarak kalsit dolgu dokuma e-camı fiber takviyeli epoksi kompozit numunelerin üretimi de gerçekleştirilir.



Şekil 4. 3 Vakum torbalama deney düzeneği

Vakum torbalama deney düzeneği ve deney sonucunda üretilen örnek bir kompozit plaka sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Elde edilen kompozit plakalar ileri kürleme için 1 atm basınçta ve 60 °C sıcaklıkta 24 saat kurutma fırınında bekletilir.



Şekil 4. 4 Kompozit plaka

4.3 Mekanik Deneyler

4.3.1 Çekme Deneyi

Kompozit numuneler, TS EN ISO 527 standardına uygun olarak çekme deneyine numune oluşturmak amacıyla kesilerek Şekil 4.5'te gösterildiği gibi elde edilmiştir.



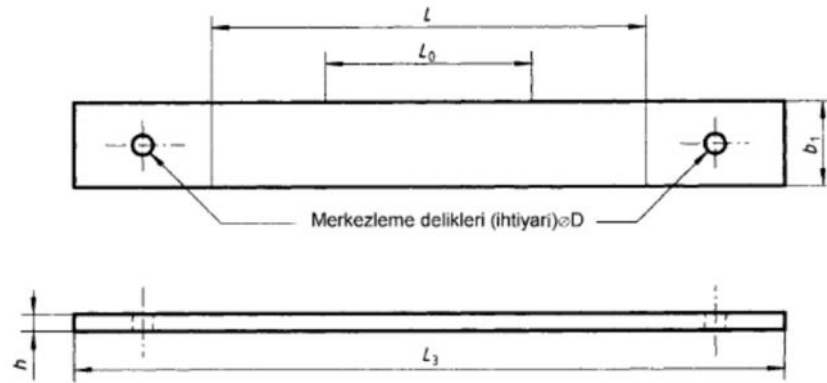
Şekil 4. 5 Çekme deney numunesi

Çekme numuneleri, standardın önerdiği doğrultuda Çizelge 4.3’de belirtildiği gibi boyutlandırılmış olup, standarda uygun olarak kesilen parça tipi Şekil 4.6’te gösterilmiştir [58].

Her malzeme için 5 çekme deney numunesi elde edilir. Bu 5 numune çekme cihazına yerleştirilmeden önce, bilgisayara girilmek üzere kalınlıkları ve genişlikleri ölçülmektedir. Bu ölçüm numune boyunca 3 yerden (iki baştan ve ortadan) alınır ve bu 3 değerden en küçüğü bilgisayar verisi olarak kabul edilir. En küçük değer baz alınmasının nedeni, numunenin deney esnasında kopmasının bu zayıf noktadan gerçekleşeceği düşünülmektedir.

Çizelge 4. 3 Çekme deney numune boyutlandırılması

Anlam	Sembol	Ölçü (mm)
Toplam uzunluk	L_3	≥ 250
Genişlik	b_1	$25 \pm 0,5$ $50 \pm 0,5$
Kalınlık	h	2 - 10
Ölçme uzunluğu	L_0	50 ± 1
Çeneler arasındaki başlangıç mesafesi	L	150 ± 1
Merkezleme deliklerinin çapı	D	$3 \pm 0,25$



Şekil 4. 6 Çekme deney standardına uygun parça tipi

Çekme deney standartlarına uygun olarak hazırlanan numune, çekme cihazı düzeneğindeki çenelere iki ucundaki genişleyen bölümlerden sıkıştırılarak yerleştirilir. Numune yine standartta belirtilen 5 mm/dakika hızda çekilmekte olup deney esnasında şeffaf koruma paravanları kullanılarak çıplak gözle izlenebilmektedir. Deney esnasında, numune üzerine yerleştirilen ekstansometre ile daha hassas ölçüm yapılır.

Şekil 4.7’de gösterilen INSTRON marka ve 3369 model çekme cihazı 50 kN yük kapasiteli ve dakikada 500 mm maksimum hıza sahip olup, gösterilen yükün % 0.5 yük hassasiyetine sahiptir. Bilgisayar kontrollü olan çekme cihazı mekanik olarak çalışmaktadır. Teste başlamadan önce test hızı, ön yük miktarı, ön yük hızı ve numune boyutları programa girilerek, gerekli hesaplamalar test programı tarafından bu veriler doğrultusunda otomatik olarak hesaplanır.



Şekil 4. 7 Çekme deney düzeneği

Program test bitiminde otomatik olarak çekme eğrisini çizmekte ve maksimum yükü, kopma anındaki yükü, % uzamayı ve kopma dayanımını vermektedir. Elde edilen grafiklere göre; kopma gerçekleşmeden önce görülen maksimum nokta çekme dayanımını gösteren noktadır. Malzemenin taşıyabileceği yükü bulabilmek için, cihazın

hesaplamış olduğu çekme dayanımı $\sigma_{\text{ç}}$ (MPa) kesit alanı $b \cdot h$ (mm²) ile çarpılarak (4.1) yük F (N) değeri hesaplanır.

$$F_m = \sigma_{\text{ç}}(b \cdot h) \quad (4.1)$$

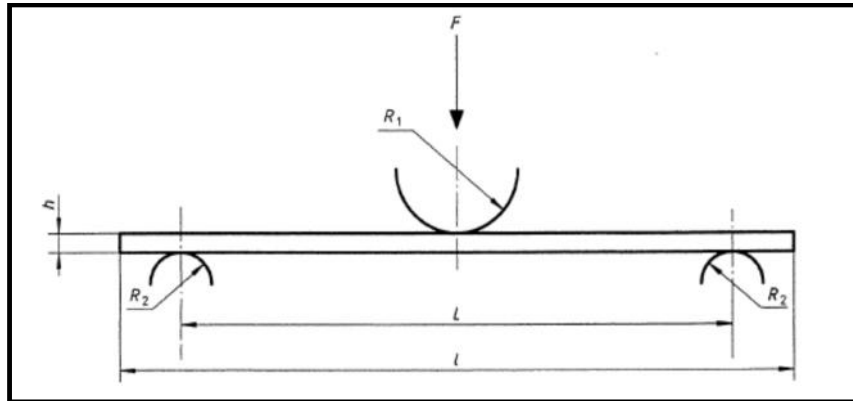


Şekil 4. 8 Çekme deney esnasında numunenin kopma anı

Çekme deney esnasında bir numunenin kopma anı Şekil 4.8’de gösterilmektedir.

4.3.2 Eğme Deneyi

Eğme deneyi, iki mesnet üzerine yerleştirilmiş dikdörtgen veya yuvarlak kesitli deney numunesinin ortasına bir kuvvet uygulandığında oluşan şekil değişimine karşı gösterdiği direnci belirlemek amacıyla yapılmaktadır.



Şekil 4. 9 Üç noktadan eğme deneyi

Şekil 4.9’da üç noktadan eğme deneyinin şematik gösterimi verilmiştir. Bu çalışmada, eğme deney numuneleri TS EN ISO 14125 standardına uygun olarak Çizelge 4.4’de gösterildiği gibi hazırlanmıştır. Her malzeme için 5 deney numunesi hazırlanmıştır [59], [60].

Çizelge 4. 4 Eğme deney numune boyutlandırılması

Malzeme	Uzunluk (mm) (<i>l</i>)	Mesnetler arası mesafe (mm) (<i>L</i>)	Genişlik (mm) (<i>b</i>)	Kalınlık (mm) (<i>h</i>)
Termoset kompozit	80	64	15	4
Toleranslar	- 0 + 10	± 1	± 0,5	± 0,2

Eğme deneyi, INSTRON marka ve 3369 model bilgisayar kontrollü çekme cihazında eğme aparatları kullanılarak standarda uygun biçimde gerçekleştirilmiştir. Eğme düzeneği olarak kullanılan iki mesnet tabla üzerine, yükleme bloğu denilen mandrel ise cihazın üst kısmına yerleştirilmektedir. Bu düzende mandrel çapı ve mesnetlerin çapı, kullandığımız termoset malzemeye göre ve bu malzemeye ait olan standarda uygun olarak seçilmiştir. Mesnetler arası açıklık ise yine standartlara uygun olup 64 mm dir. Düzenek ayarlandıktan sonra mesnetler üzerine numune yerleştirilmiş ve test hızı, ön yük miktarı, ön yük hızı, numune boyutları programa girilerek numune yükün uygulandığı mandrel yardımı ile Şekil 4.10’da gösterildiği gibi eğilmiştir.

Program test bitiminde eğme eğrisini çizmekte, numunenin kırıldığı andaki maksimum yükü F_m (N) ve eğme dayanımını σ_e (MPa) vermektedir. Eğme dayanımı (4.2) eşitliği ile bulunur. Burada L (mm) mesnetler arası uzaklık, h (mm) kalınlık, b (mm) genişliktir.

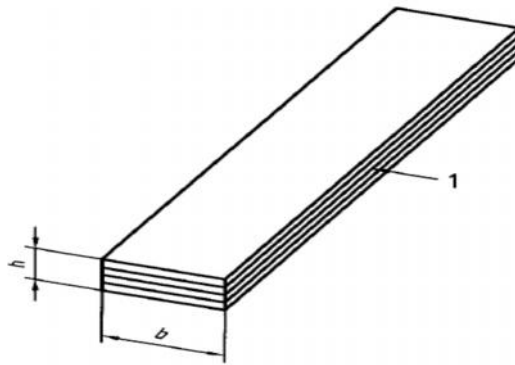
$$\sigma_e = \frac{3F}{2bh^2} \quad (4.2)$$



Şekil 4. 10 Eğme deneyi

4.3.3 Darbe Deneyi

Termoset matrisli numunelere uygulanan Charpy darbe deneylerinde TS EN ISO 179-1 standartları esas alınmıştır. Bu deneyde, yatay bir kiriş şeklinde uçlarından mesnetlenen deney numunesinin tam ortasına, darbe ucu vasıtasıyla tek bir darbe uygulanır ve deney numunesi yüksek, hemen hemen sabit bir hızla eğilir. Darbe deney numunesi ve numune boyutlandırılması sırasıyla Şekil 4.11 ve Çizelge 4.5'te gösterilmiştir [61].



Şekil 4. 11 Darbe deney numunesi

Çizelge 4. 5 Darbe deney numune boyutlandırılması

Numune tipi	Uzunluk (mm) (l)	Genişlik (mm) (b)	Kalınlık (mm) (h)	Destekler arası mesafe (mm) (L)
1	80 ± 2	$10,0 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$	$62 \pm 0,2$



Şekil 4. 12 Darbe deney düzeneği

Deney numunelerinin Charpy darbe mukavemeti, a_c , kJ/m² cinsinden (4.3) yardımıyla hesaplanır.

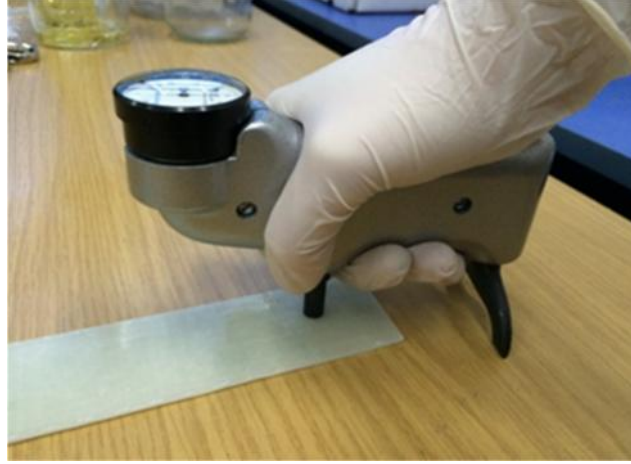
$$a_c = \frac{(E_c 1^3)}{(hb_N)} \quad (4.3)$$

E_c deney numunesi kırılırken absorplanan ve düzeltilen enerji (J), h deney numunesinin kalınlığı (mm), b_N deney numunesinin çentikten sonra kalan genişliği (mm) şeklinde verilmektedir.

4.3.4 Shore D Sertlik Deneyi

Kalıptan çıkarılan malzemelerin sertlik ölçümleri, Durotech marka Shore D sertlik cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sertlik değerleri, EN ISO 868 standardına uygun olarak Shore D cinsinden ölçülmüştür. Malzemedeki uniformluğu tam olarak sağlanamadığı ihtimali göz önünde bulundurularak, malzemenin çeşitli noktalarından 5 farklı sertlik değeri

okunmuştur. Genel görünümünden çok fazla sapma gösteren değerler atılmış ve değerlerin ortalaması alınarak sertlik derecesi tayin edilmiştir. Şekil 4.13'te sertlik deneyinden bir görüntüye yer verilmiştir.



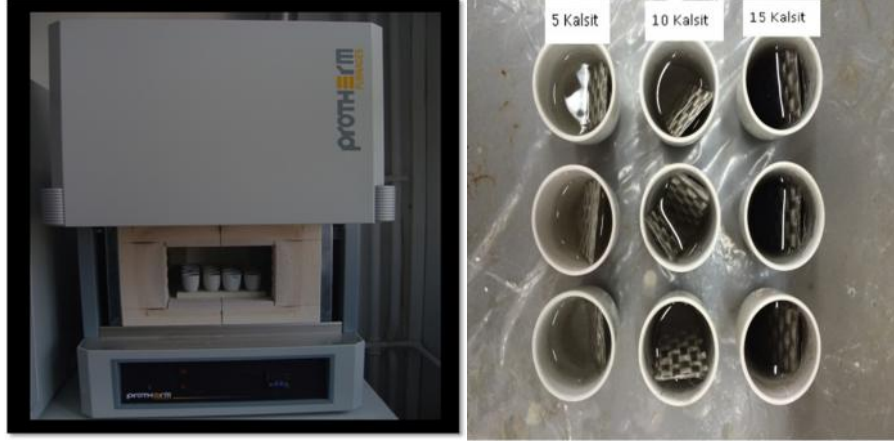
Şekil 4. 13 Shore D sertlik deneyi

4.4 Fiziksel Deneyler

4.4.1 Kalsinasyon Deneyi

Kalsinasyon deneyi, TS 1177 EN ISO 1172 standardına uygun olarak, numunelerin fiber ve dolgu hacim oranlarını belirlemek amacıyla yapılır. Bu standard, cam takviyeli plastiklerin tekstil cam ve mineral dolgu muhtevasının tayini için iki kalsinasyon metodunu kapsar. Tekstil cam ve mineral dolgu maddelerinin her ikisinin de mevcut olduğu durumlarda her ikisinin tayini için Metod B'den yararlanılmıştır [62].

Deney esnasında, 0,1 mg doğrulukta tartabilen terazi, içine deney numunesi konulması için silisyum dioksit veya porselen kroze, çeker ocak altına yerleştirilmiş ve seçilen sıcaklığa yaklaşımla sabit tutabilen Protherm PLF 120/5 model kül fırını, uygun bir kurutucu bulunduran desikatör ve sıcaklığı 250 °C'ye ayarlanabilen havalandırılmalı kurutma etüv kullanılmaktadır. Laboratuarda kullanılan kül fırının maksimum sıcaklığı 1200 °C'ye kadar çıkarılabilmektedir. Seramik bazlı yalıtım tabakası bulunan fırının kapağı yukarı doğru açılarak kullanıcıyı sıcaklık etkisinden korumaktadır. Şekil 4.14'te kül fırını ve kroze içerisindeki numuneler gösterilmektedir.



Şekil 4. 14 Kül fırını ve kroze içerisindeki numuneler

Deney için kullanılan numune çekme deneyi sonrasında elde edilen numunelerin hasar görmemiş kısımlarının kesilmesiyle elde edilmiştir. Krozelerin boş ağırlıkları hassas bir şekilde tartılarak m_1 olarak kaydedilmiştir. Sonraki adımda içerisine numunelerimiz yerleştirilerek tekrar tartılıp elde edilen değer m_2 olarak kaydedilmiştir. 650 °C sıcaklığa ısıtılmış olan kül fırınında 1 saat süre ile kalsine edilir.

Fırından çıkarılan krozeler tekrar tartılarak kalsinasyon sonrasında kütle m_3 olarak kaydedilir. Cam ve dolgu maddelerinin her ikisinin de bulunması durumunda kalsinasyon işleminden sonra kalan cam ve dolgu, dolgu maddelerinin hidroklorik asit (HCl) içerisinde çözülmesiyle ayrılır. Her numune için cam muhtevası m_f ve dolgu muhtevası m_d , başlangıç kütlelerinin yüzdesi olarak (4.4) ve (4.5) kullanılarak ayrı ayrı hesaplanır.

$$m_f = \left(\frac{m_5 - m_4}{m_2 - m_1} \right) 100 \quad (4.4)$$

$$m_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} - \frac{(m_5 - m_4)}{(m_2 - m_1)} 100 \quad (4.5)$$

m_4 kuru süzgecin kütlesi (g), m_5 kalıntının asit ile reaksiyonundan sonra süzgeç ve muhtevasının kütlesini (g) ifade eder.

Malzemelerin epoksi matris yoğunluk ρ_m , e-camı fiber yoğunluk ρ_f ve kalsit dolgu yoğunluk ρ_d olmak üzere (4.6) kullanarak fiber hacim oranları hesaplanır.

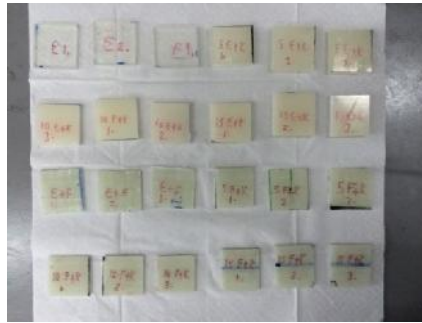
$$\%V_f = \frac{m_f / \rho_f}{m_f / \rho_f + m_d / \rho_d + m_m / \rho_m} \quad (4.6)$$

(4.6) yardımıyla elde edilen yüzde fiber hacim oranından çekme değerini sağlayan hacim oranı kesin olarak elde edilir ve kompozitin karakteri belirlenmiş olur.

4.4.2 Su Absorbsiyonu

Su absorpsiyonu deneyi, ASTM 570–98 (2010) standardına uygun olarak kompozit malzemelerin su absorbe etme özelliklerini belirlemek amacıyla yapılmıştır.

İlk olarak, Şekil 4.15'te gösterildiği gibi 8 farklı malzemenin her birinden küçük boyutlarda 3 numune elde edilir. Numaralandırılan numuneler fırına yerleştirilir, 50 °C sıcaklıkta 1 saat süreyle kurutulur. Kurutma işleminin ardından, çıkarılan numuneler soğuyuncaya kadar bekletilir. Her bir numunenin kütle ağırlıkları hassas terazi kullanılarak tespit edilir [63], [64].



Şekil 4. 15 Su absorpsiyon deney numuneleri

Numuneler, Şekil 4.16'da gösterildiği gibi su ile dolu bir beher kap içerisine konularak, oda sıcaklığında 24 saat süreyle bekletilir. 24 saat sonunda beher kaptan alınan numune, yüzeyleri temizlenerek hassas terazide tartılır. Tartım işleminin ardından tekrar beher kap içerisine konulan numuneler için aynı işlemler 28 gün boyunca tekrarlanır [65], [66].



Şekil 4. 16 Su absorpsiyon deneyi

M_t su absorbe etme yüzdesi, W_t sudaki numune kütlesi (g), W_0 numune kütlesi (g) olmak üzere (4.7) eşitliği yardımıyla su absorpsiyon yüzdesi bulunur [63], [66].

$$M_t = \frac{(W_t - W_0)}{W_0} 100 \quad (4.7)$$

4.5 Mikroskopik Görüntüleme

4.5.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Çekme deney sonrası numunelerin kırık yüzeylerini araştırmak ve hasar sonrası ara yüzeydeki fiber ve dolgu malzemelerinin davranışını gözlemlemek için Şekil 4.17’de gösterilen JEOL JSM-5410 LV marka taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.



Şekil 4. 17 Taramalı elektron mikroskop numunesi ve deney düzeneği

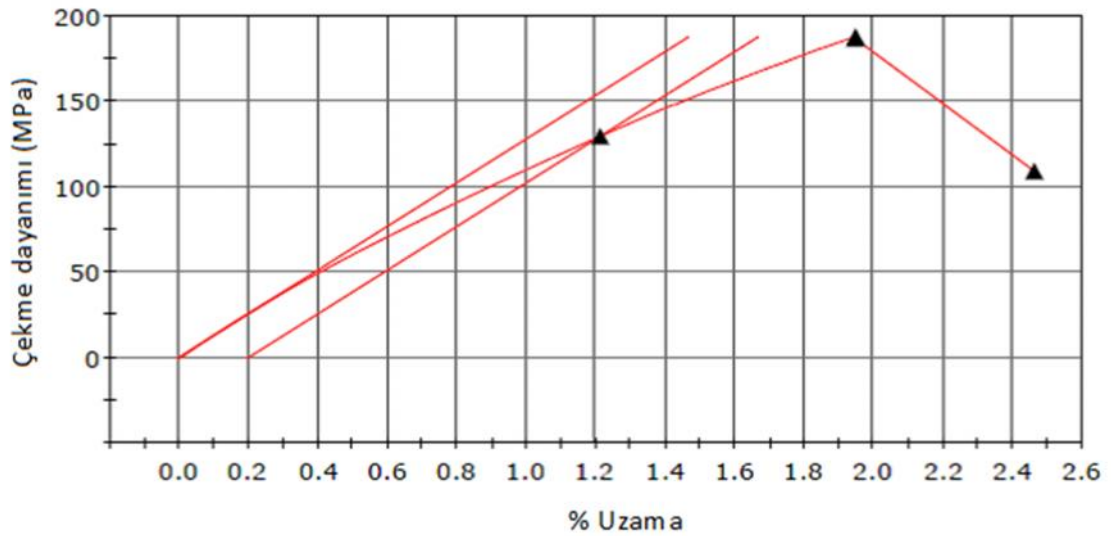
Yapılan bütün deneylerde kompozit plakalardan numune elde etmek amacıyla Şekil 4.18’de gösterilen elektrikli kesme makinası kullanılmıştır.



Şekil 4. 18 Elektrikli kesme makinası

DENEYSEL BULGULAR VE İRDELEME**5.1 Mekanik Özellikler Açısından Deneysel Bulgular ve İrdeleme****5.1.1 Çekme deneyi**

Kompozit malzemelerin çekme dayanımı, fiberlerin dayanım ve modüllerine, matrislerin dayanım ve kimyasal stabilitesine, fiber-matris etkileşimine ve fiber uzunluğuna bağlıdır.



Şekil 5. 1 Çekme deney grafiği

% 15 kalsit (CaCO_3) dolgulu dokuma e-camı fiber numunenin çekme deneyi esnasındaki dayanım-% uzama grafiği Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Grafikte malzemenin 187,42 MPa maksimum çekme dayanımına ve % 2.46 maksimum kopma uzamasına sahip

olduğu görölür. Deneyde çekme numunelerinden elde edilen veriler Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’de yer almaktadır.

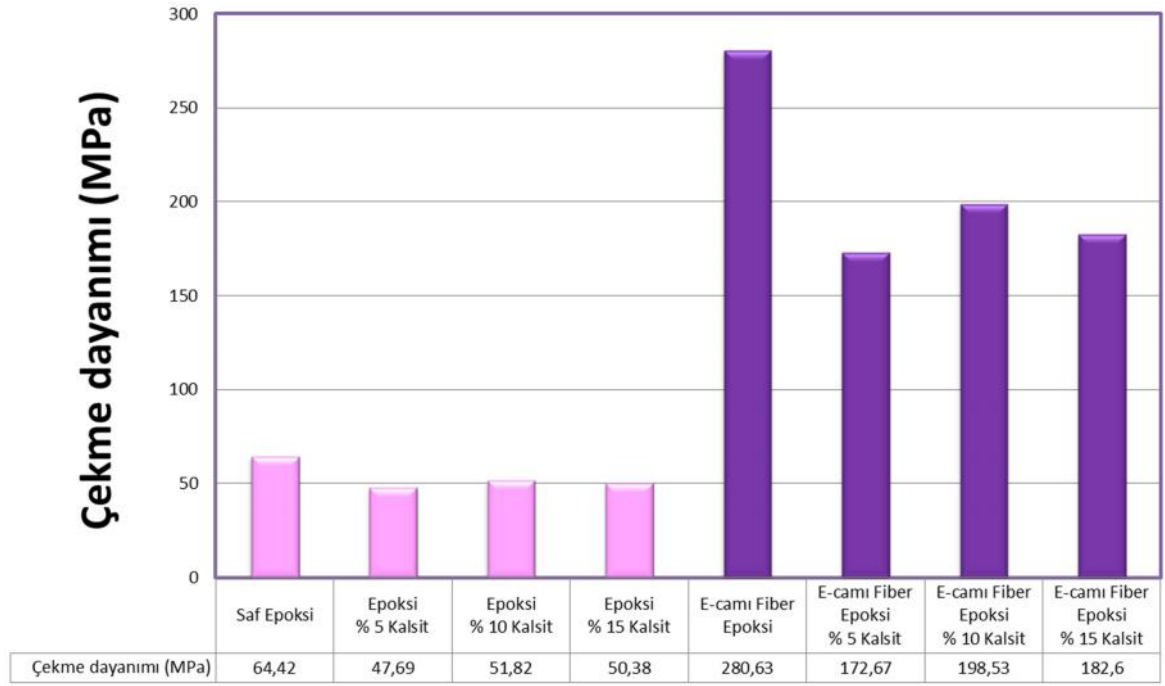
Çizelge 5. 1 Epoksi ve kalsit dolgulu epoksi numunelerin çekme deney verileri

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Çekme dayanımı (MPa)	Yük (N)	Çekme modülü (MPa)
E.1	23,45	4,71	59,77	6600,91	3063,46
E.2	24,96	5,16	68,42	8818,36	3653,37
E.3	25,00	5,15	64,09	7709,64	3700,44
E.4	24,89	4,93	67,20	8247,47	4141,30
E.5	24,80	4,66	62,60	7234,19	3568,04
E5K.1	24,76	4.18	42,33	4379,12	2960,15
E5K.2	24,36	3.86	49,30	4640,77	3585,50
E5K.3	24,63	3.56	50,35	4415,07	3501,95
E5K.4	24,55	3.96	48,60	4728,35	3281,82
E5K.5	24,67	3.90	47,85	4599,23	3189,19
E10K.1	24,45	3.22	53,21	4183,46	3624,00
E10K.2	24,56	3.66	52,65	4734,37	3667,57
E10K.3	24,78	3.82	51,48	4878,06	3757,04
E10K.4	24,87	4.28	53,15	5652,80	3678,50
E10K.5	24,82	4.38	48,63	5292,60	3068,52
E15K.1	24,83	4.27	48,48	5143,75	2775,09
E15K.2	24,87	4.47	52,60	5843,29	3360,98
E15K.3	24,89	4.68	51,99	6051,50	3029,51
E15K.4	24,90	4.61	51,37	5900,01	2935,27
E15K.5	24,89	4.52	47,45	5340,70	2927,01

Çizelge 5. 2 Dolgusuz ve kalsit dolgulu e-camı fiber epoksinin çekme deney verileri

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Çekme dayanımı (MPa)	Yük (N)	Çekme modülü (MPa)
ECF.1	24,82	2,15	283,88	15163,04	16725,32
ECF.2	24,58	2,02	274,64	13662,97	12449,89
ECF.3	24,78	2,15	285,89	15264,53	20993,48
ECF.4	24,56	1,97	277,47	13445,54	13458,47
ECF.5	24,76	2,11	281,27	14667,47	15451,10
ECF5K.1	24,74	2,68	166,33	11011,33	7496,19
ECF5K.2	24,87	2,85	163,96	11605,29	7320,33
ECF5K.3	24,72	2,21	160,14	8746,68	7283,71
ECF5K.4	24,83	2,35	163,44	9528,88	7493,57
ECF5K.5	24,80	2,56	209,47	13307,27	8890,35
ECF10K.1	24,67	2,55	183,85	11549,82	13215,14
ECF10K.2	24,78	2,52	226,86	14178,97	15334,31
ECF10K.3	24,86	2,76	182,46	12588,91	13742,63
ECF10K.4	24,73	2,48	198,62	12167,48	13742,90
ECF10K.5	24,38	1,92	200,87	9380,48	12811,40
ECF15K.1	24,75	2,82	207,05	14451,07	14895,09
ECF15K.2	24,81	2,96	179,89	13223,41	12259,36
ECF15K.3	24,88	3,13	169,71	13205,51	10490,02
ECF15K.4	24,73	2,67	168,93	11147,13	10366,12
ECF15K.5	24,89	3,07	187,42	14324,98	14753,76

Çekme deney numunelerinden elde edilen çekme dayanımı grafiği Şekil 5.2’de gösterilmektedir.



Şekil 5. 2 Çekme dayanımı grafiği

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi dokuma e-camı fiber takviyeli kompozit malzemelerin çekme dayanımları, takviyesiz epoksilere göre çok daha yüksektir. Fiber malzemesinin yük taşıyıcı ve mukavemeti arttırıcı özellikleri dikkate alındığında bu teorik olarak beklenen bir durumdur.

Dolgu maddesi olarak kullanılan kalsitin mekanik değerleri arttırıcı özelliği olmamakla birlikte, maliyeti düşürücü etkisi vardır. Şekil 5.2’de de görüldüğü gibi dolgusuz epoksi ve dokuma e-camı fiber epoksilerin mekanik değerleri dolgulu diğer numunelere göre daha yüksektir çünkü bu çalışmada kullanılan kalsit dolgu maddesi yapıda süreksizlik ve çentikler oluşturarak dayanımı düşürmektedir.

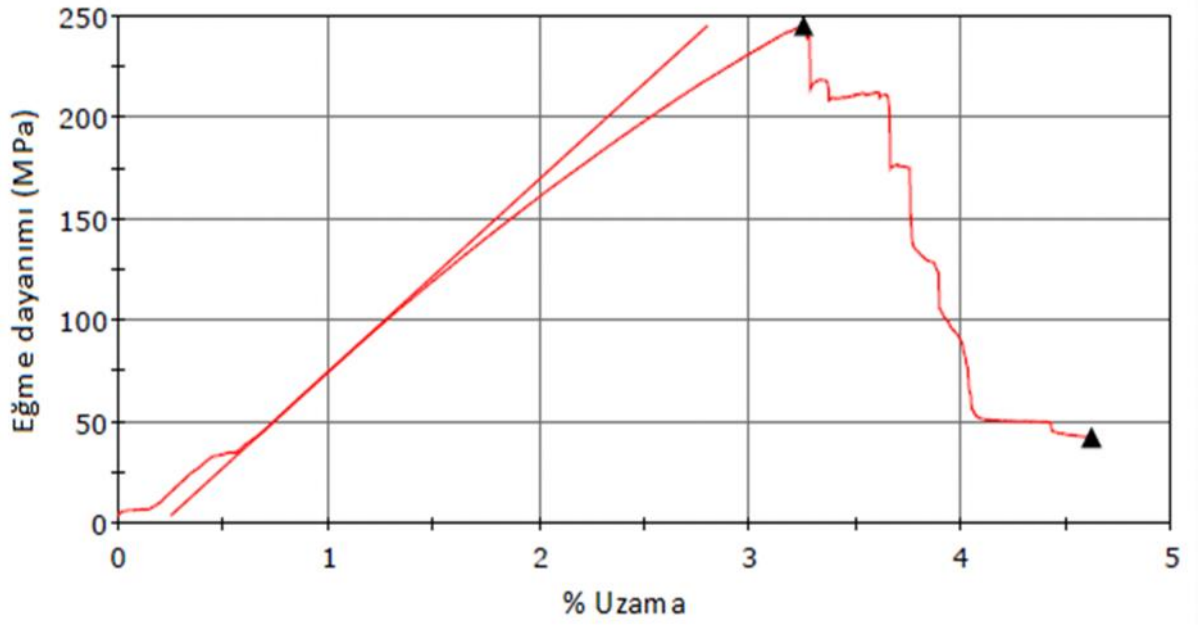
Dolgulu dokuma e-camı fiber epoksi kompozit malzemeleri kendi içlerinde karşılaştırmak gerekirse, % 10 kalsit dolgulu dokuma e-camı fiber kompozitin maksimum çekme dayanımına (198,53 MPa) sahip olduğu görülmektedir. % 10 kalsit dolgulu yapının sahip olduğu iyi parçacık dağılımının ve güçlü polimer-dolgu ara yüzey yapışmasının etkili gerilme transferine sebep olduğu düşünülmektedir.

% 15 kalsit dolgulu yapıdaki dayanım düşüşü, malzemeye daha fazla kalsit ilavesi ile maksimum dayanım sınırının aşılmasından ve yapı içerisinde kalsitin topaklaşmasından kaynaklanmaktadır. Çekme deney sonrası kopan numuneler Şekil 5.3’te gösterilmiştir.



Şekil 5. 3 Çekme deneyi sonrası numuneler

5.1.2 Eğme Deneyi



Şekil 5. 4 Eğme deney grafiği

Şekil 5.4'te % 10 kalsit dolgulu dokuma e-camı fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin eğme dayanım-% uzama grafiği gösterilmektedir. 245,15 MPa maksimum eğme dayanımına ve % 3.25 eğme uzamasına sahip olduğu görülür.

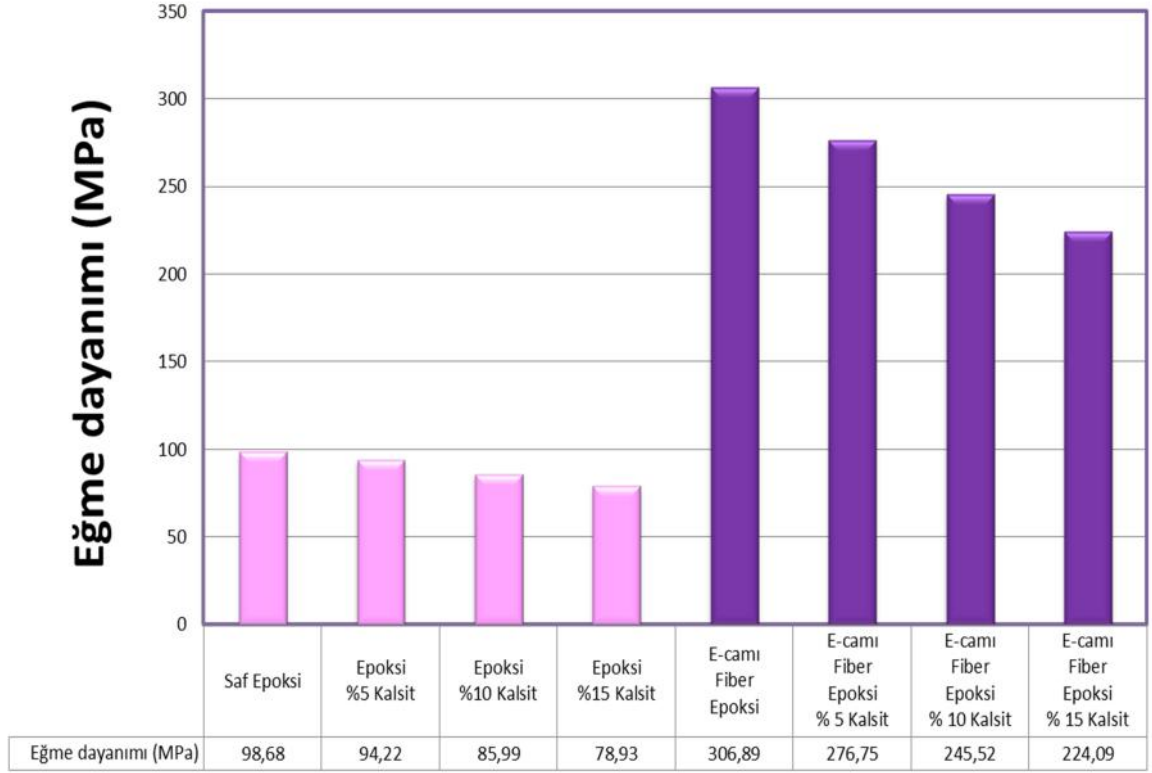
Deney esnasında elde edilen eğme verileri Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'te verilmektedir.

Çizelge 5. 3 Epoksi ve kalsit dolgulu epoksi numunelerin eğme deney verileri

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Eğme dayanımı (MPa)	Yük (N)	Eğme modülü (MPa)
E.1	15,04	4,89	101,69	381,53	3334,92
E.2	15,36	4,53	98,64	324,36	3068,86
E.3	14,76	4,45	96,98	294,99	3244,26
E.4	14,60	4,76	97,50	336,44	3235,71
E.5	14,39	4,52	98,61	301,87	3338,40
E5K.1	14,80	4,62	96,45	316,97	3539,57
E5K.2	14,91	4,51	94,79	299,76	3510,14
E5K.3	14,82	4,23	93,90	258,94	2962,72
E5K.4	14,87	4,55	94,67	304,00	2912,26
E5K.5	14,61	4,18	91,27	243,02	2879,97
E10K.1	14,83	4,40	91,38	273,85	3133,93
E10K.2	14,40	3,89	87,30	197,89	2701,60
E10K.3	14,93	4,46	81,98	253,76	3307,12
E10K.4	14,98	4,82	82,91	300,67	3063,99
E10K.5	14,98	4,72	86,36	349,76	2668,29
E15K.1	14,97	4,56	80,03	259,43	3158,89
E15K.2	14,95	4,67	78,09	264,82	2874,22
E15K.3	14,82	4,10	75,05	197,17	2472,11
E15K.4	14,79	3,82	79,53	178,79	2935,32
E15K.5	14,89	4,47	81,97	253,70	3307,12

Çizelge 5. 4 Dolgusuz ve kalsit dolgulu e-camı fiber epoksilerin eğme deney verileri

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Eğme dayanımı (MPa)	Yük (N)	Eğme modülü (MPa)
ECF.1	14,80	2,46	301,04	280,58	10233,32
ECF.2	14,56	2,63	324,85	348,21	11260,35
ECF.3	14,83	2,66	312,36	340,23	11126,51
ECF.4	14,82	2,50	298,32	285,93	12565,92
ECF.5	14,78	2,50	297,90	287,01	11779,59
ECF5K.1	14,30	1,86	290,04	149,72	10651,46
ECF5K.2	14,67	2,50	281,87	268,16	8528,08
ECF5K.3	14,59	2,48	286,83	267,77	9205,18
ECF5K.4	14,48	2,57	270,94	269,98	1276,83
ECF5K.5	14,51	2,10	254,06	168,84	8796,88
ECF10K.1	14,60	2,59	253,57	259,16	10370,13
ECF10K.2	14,67	2,79	243,06	289,69	9863,96
ECF10K.3	14,56	2,66	245,15	263,89	9457,28
ECF10K.4	14,62	2,51	248,99	239,61	11605,52
ECF10K.5	14,70	2,59	236,82	244,13	10330,09
ECF15K.1	14,63	2,47	225,53	209,43	8361,77
ECF15K.2	14,70	2,60	215,95	223,53	8411,97
ECF15K.3	14,68	2,58	236,82	240,13	10030,47
ECF15K.4	14,72	3,04	216,66	308,09	9156,16
ECF15K.5	14,75	2,89	225,47	289,69	9867,72

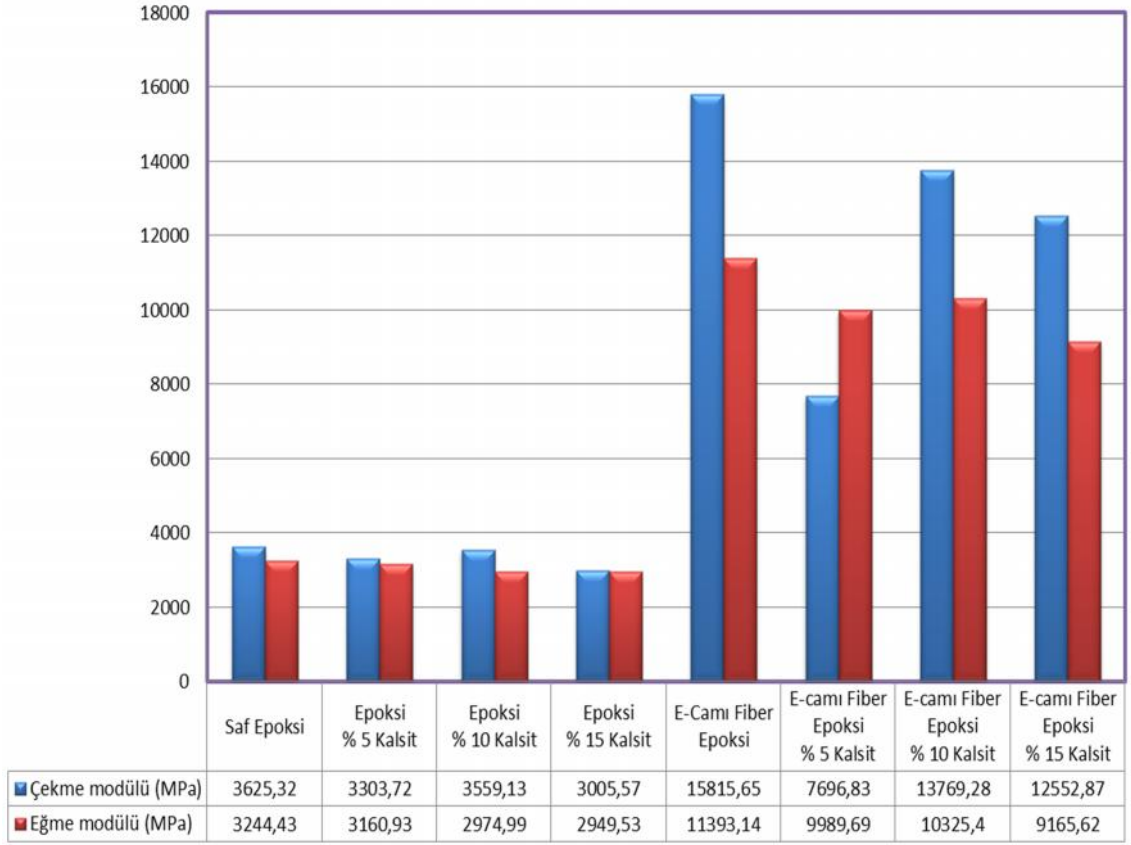


Şekil 5. 5 Eğme dayanımı grafiği

Şekil 5.5'te gösterilen deney sonuçları incelendiğinde, dokuma e-camı fiber epoksi kompozit malzemenin maksimum eğme dayanımına (306,89 MPa) sahip olduğu görülmektedir. Eğme dayanımındaki azalma, dolgu artışı ile açıkça gözlenmektedir. Bu durum, kalsit dolgu maddesinin epoksi matris devamlılığını rahatsız etmesinden ve fiber-dolgu-matris bağlanma mukavemetindeki azalmadan kaynaklanmaktadır.



Şekil 5. 6 Eğme deneyi öncesi ve sonrası numune



Şekil 5. 7 Kompozit numunelerin çekme ve eğme modülü grafiği

Şekil 5.7’de çekme ve eğme modülünün artan kalsit dolgu oranı ile azaldığı açıkça görülmektedir. Çekme modülünde en yüksek değer dolgusuz numuneye aittir, bunun nedeni kullanılan dolgu maddesinin sadece maliyet düşürücü nitelikte olması ve tokluğu arttırmasıdır.

5.1.3 Darbe Dayanımı

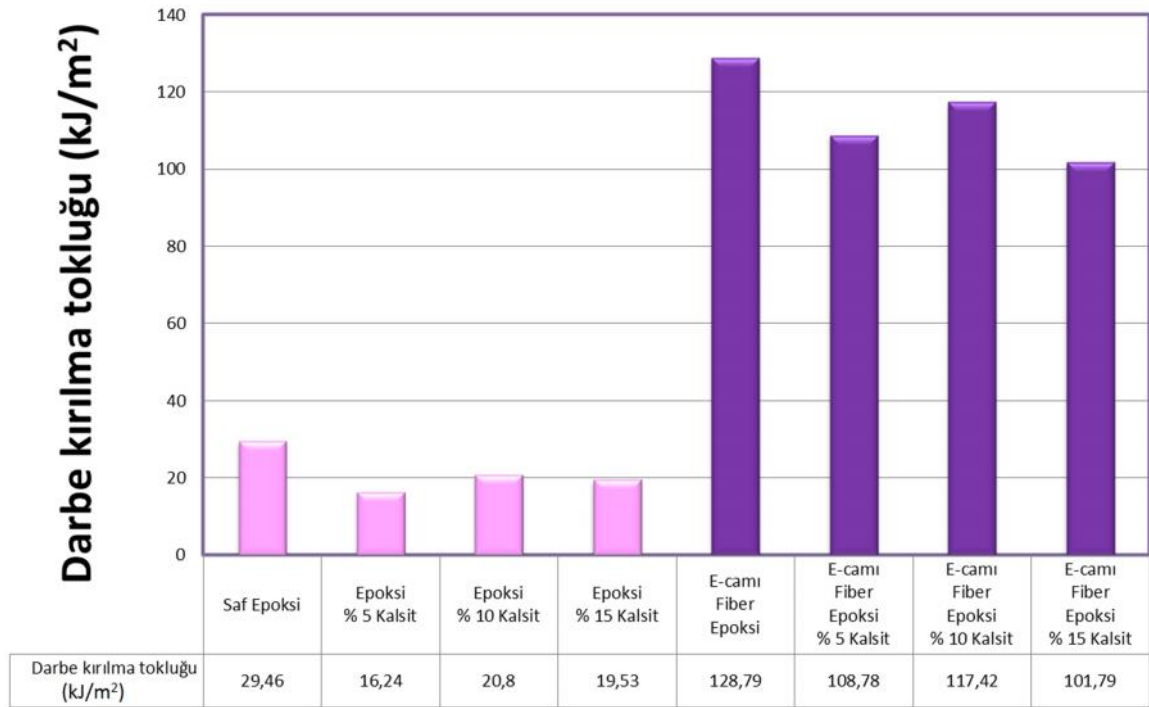
Darbe dayanımı yüksek hızda uygulanan stres altında çatlamaya karşı bir malzemenin yeteneği olarak tanımlanır. Kompozit malzemelerin darbe özellikleri, genel tokluk ile laminar ve ara yüzey dayanım parametrelerinden etkilenen kompozit kırılma tokluğu ile doğrudan ilişkilidir. Deney esnasında elde edilen darbe kırılma tokluğu verileri Çizelge 5.5 ve Çizelge 5.6’da verilmektedir.

Çizelge 5. 5 Epoksi ve kalsit dolgulu epoksi numunelerin darbe deney verileri

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Yük (J)	Darbe kırılma tokluğu (kJ/m ²)
E.1	14,85	4,64	1,70	24,68
E.2	14,81	4,41	2,45	37,52
E.3	14,97	4,89	2,20	30,07
E.4	14,89	4,58	2,20	32,26
E.5	14,91	4,70	1,60	22,79
E5K.1	14,97	4,72	1,20	17,00
E5K.2	14,87	4,62	1,10	16,00
E5K.3	14,90	4,60	1,10	16,06
E5K.4	14,96	4,72	1,35	19,10
E5K.5	14,99	5,11	1,00	13,06
E10K.1	14,83	4,65	1,60	23,20
E10K.2	14,95	4,80	1,30	18,10
E10K.3	14,98	4,46	1,50	22,45
E10K.4	14,80	4,66	1,40	21,21
E10K.5	14,98	4,74	1,35	19,03
E15K.1	15,03	4,28	1,40	21,76
E15K.2	14,98	4,71	1,35	19,13
E15K.3	14,88	4,86	1,30	17,98
E15K.4	14,87	4,72	1,30	18,52
E15K.5	14,81	4,50	1,35	20,26

Çizelge 5. 6 Dolgusuz ve kalsit dolgulu e-camı fiber epoksilerin darbe deney verileri

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Yük (J)	Darbe kırılma tokluğu (kJ/m ²)
ECF.1	9,49	2,60	3,20	129,69
ECF.2	9,30	2,85	3,45	130,16
ECF.3	9,48	2,58	3,00	122,66
ECF.4	9,75	2,76	3,5	130,06
ECF.5	8,94	2,81	3,30	131,36
ECF5K.1	9,04	3,14	3,20	112,73
ECF5K.2	8,64	2,81	2,70	111,21
ECF5K.3	9,77	2,71	2,75	103,86
ECF5K.4	9,85	2,80	2,70	97,90
ECF5K.5	8,80	2,50	2,60	118,18
ECF10K.1	9,73	2,70	3,50	133,02
ECF10K.2	9,63	2,61	2,80	111,43
ECF10K.3	9,03	2,99	2,70	99,95
ECF10K.4	9,48	2,73	3,00	116,11
ECF10K.5	9,60	2,55	3,10	126,61
ECF15K.1	9,46	2,88	2,45	89,93
ECF15K.2	9,76	2,62	2,75	107,54
ECF15K.3	9,58	2,77	2,90	109,28
ECF15K.4	9,47	2,51	2,10	88,35
ECF15K.5	9,51	2,68	2,90	113,78



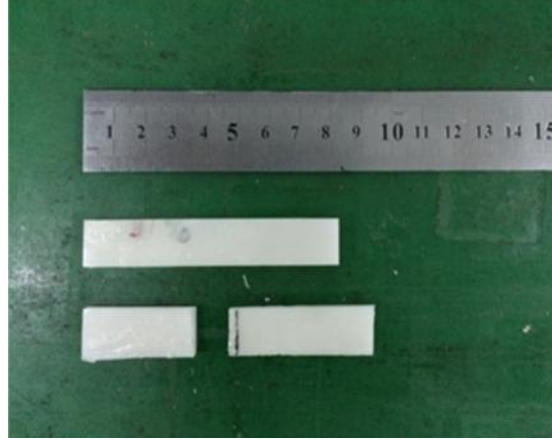
Şekil 5. 8 Kompozit numunelerin darbe kırılma tokluğu grafiği

Şekil 5.8’de % 10 kalsit dolgulu dokuma e-camı fiber kompozit diğer dolgulu cam fiber kompozitlerle karşılaştırıldığında, maksimum darbe kırılma tokluğuna ($117,42 \text{ kJ/m}^2$) sahip olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum, dolgu-fiber-matris arası iyi yapışma özelliği ve arayüz zincir molekül esnekliği sonucu olarak daha fazla enerji absorblanmasından ve çatlakların etkili bir şekilde önlenmesinden kaynaklanmaktadır.

Kalsit dolgu maddesi içeriği arttıkça oluşan boşluklar, malzeme içerisindeki çatlak yayılmasını arttırmaktadır. Bunun sonucu olarak kalsit içeriği arttıkça, darbe direnci azalmaktadır.

Darbe mukavemeti, kalsit ilavesiyle birlikte azalmaktadır. Tipik olarak, yüksek dolgulu bir polimer, dolgu maddesinin matris sürekliliğini bozması ve mikro çatlak oluşumunda rol oynaması, kompozitin yapışma ve enerji absorblama özelliğini azaltması sebebiyle, daha az darbe enerjisi absorbe etme yeteneğine sahiptir.

Şekil 5.9’da darbe deney öncesi ve sonrası numune gösterilmektedir.



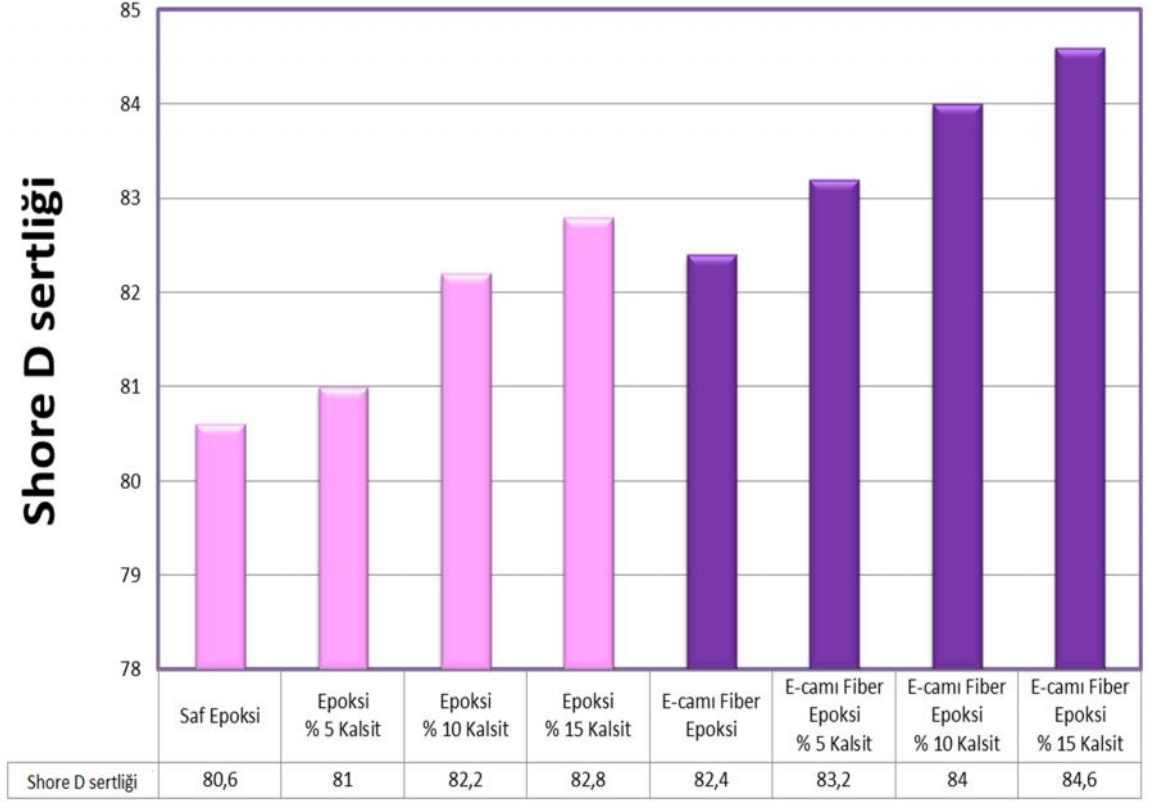
Şekil 5. 9 Darbe deney öncesi ve sonrası numune

5.1.4 Shore D Sertlik Deneyi

Shore D sertlik deney sonucu elde edilen veriler Çizelge 5.7’de gösterilmektedir.

Çizelge 5. 7 Shore D sertlik deney verileri

	Shore D Sertlik					
Malzeme\Numune	1	2	3	4	5	Ortalama
E	82	80	79	80	82	80,6
E5K	81	79	82	83	80	81
E10k	83	81	82	82	83	82,2
E15K	83	84	82	83	82	82,8
ECF	82	83	82	82	83	82,4
ECF5K	83	83	84	83	83	83,2
ECF10K	85	85	84	83	83	84
ECF15K	85	86	85	83	84	84,6

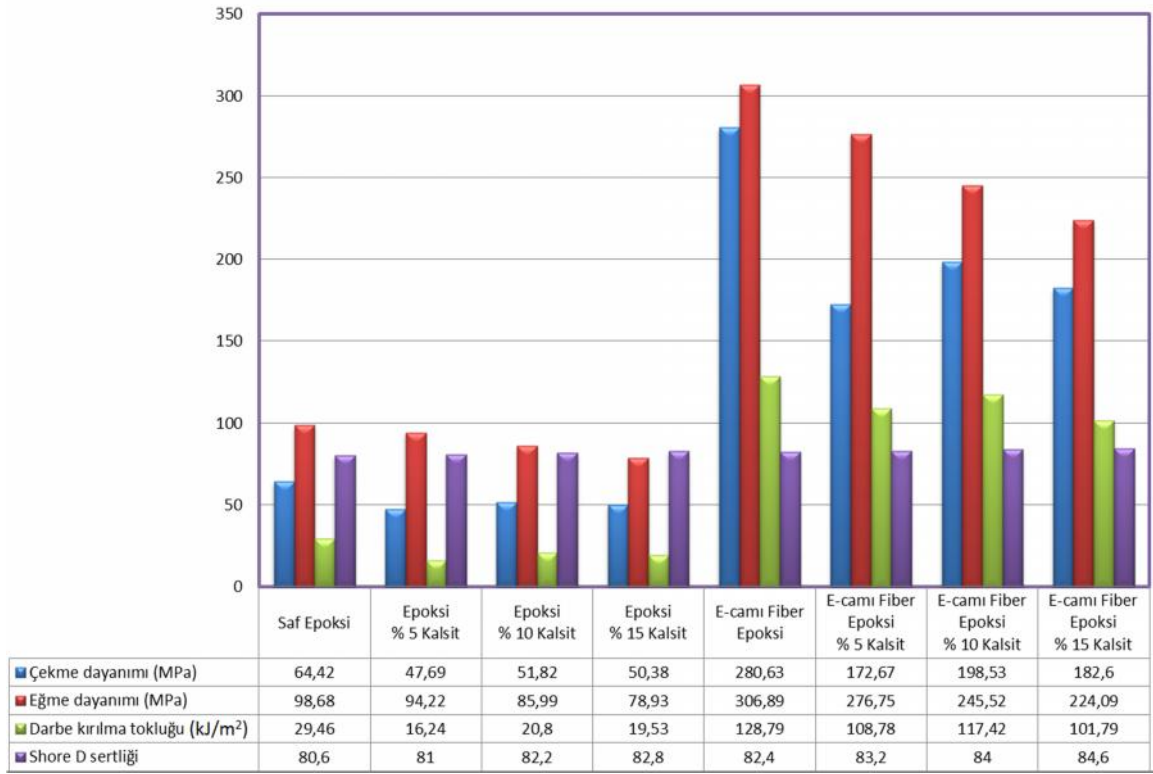


Şekil 5. 10 Shore D sertlik deney grafiği

% 15 kalsit dolgulu dokuma e-camı fiber epoksi kompozitin sertlik değerinin, diğer epoksi kompozitlerle karşılaştırıldığında daha yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 5.10'da kalsit içeriğindeki artış ile malzemenin sertliğinin arttırdığı görülmektedir. Bu durum, kalsit içeriğindeki artışın, polimerin plastik deformasyona karşı direncini arttırmasından kaynaklanmaktadır. Matris fazı ve dolgu fazı daha sıkı temas halindedir.

Şekil 5.11'de kompozit malzemelerin bütün mekanik değerleri bir grafik üzerinde gösterilmektedir. Dolgusuz epoksi kompozitin mekanik değerleri, dolgulu diğer numunelere göre daha yüksektir. Çünkü kullanılan kalsitin dolgu mekanik özellikleri iyileştirici değil, maliyet düşürücü niteliktedir. Kalsit, maliyet düşürücü etkisinin yanı sıra epoksi reçineye bağlanma ve reçinede homojen dağılma kabiliyetinin yüksek olması sebebiyle tercih edilmektedir.



Şekil 5. 11 Kompozit malzemelerin mekanik değerleri

5.2 Fiziksel Açıdan İrdeleme

5.2.1 Kalsinasyon

Kalsinasyon sonrası kompozit malzemelerin hacim oranlarını belirlemek için malzemelerin yoğunluklarını bilmek gerekir. Çizelge 5.8’de malzemelerin yoğunlukları verilmektedir.

Çizelge 5. 8 Malzemelerin yoğunlukları

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)
Epoksi	1,18
E-camı fiber	2,55
Kalsit (CaCO ₃)	2,75

Çizelge 5.9’da kompozit içerisinde yer alan matris, fiber ve dolgu malzemesinin kütle verileri verilmektedir.

Çizelge 5. 9 Kalsinasyon ve kütle hesaplamaları

Numune	Kroze kütlesi (g)	Kroze ve numune kütlesi (g)	Kalsinasyon sonrası kütle (g)	HCl ile reaksiyondan sonra kütle (g)	E-camı fiber kütlesi (g)	Epoksi matris kütlesi (g)	Kalsit dolgu kütlesi (g)
E5K	44,0971	46,1655	44,194	-	-	1,9715	0,0969
E10K	44,8705	47,3172	45,0978	-	-	2,2194	0,2273
E15K	27,1098	31,2152	27,6703	-	-	3,5449	0,5605
ECF	44,7605	48,3705	46,7605	-	2	1,61	-
ECF5K	25,1358	27,0561	26,2279	26,1772	1,0414	0,8282	0,0507
ECF10K	46,5969	50,1929	48,6510	48,4979	1,9010	1,5419	0,1531
ECF15K	49,829	52,4159	51,3188	51,1522	1,3232	1,0971	0,1666

Çizelge 5.8'deki malzeme yoğunluklarından ve Çizelge 5.9'daki kütle verilerinde yararlanılarak hesaplanan kütle ve hacim oranları Çizelge 5.10'da gösterilmektedir.

Çizelge 5. 10 Malzemelerin kütle ve hacim oranları

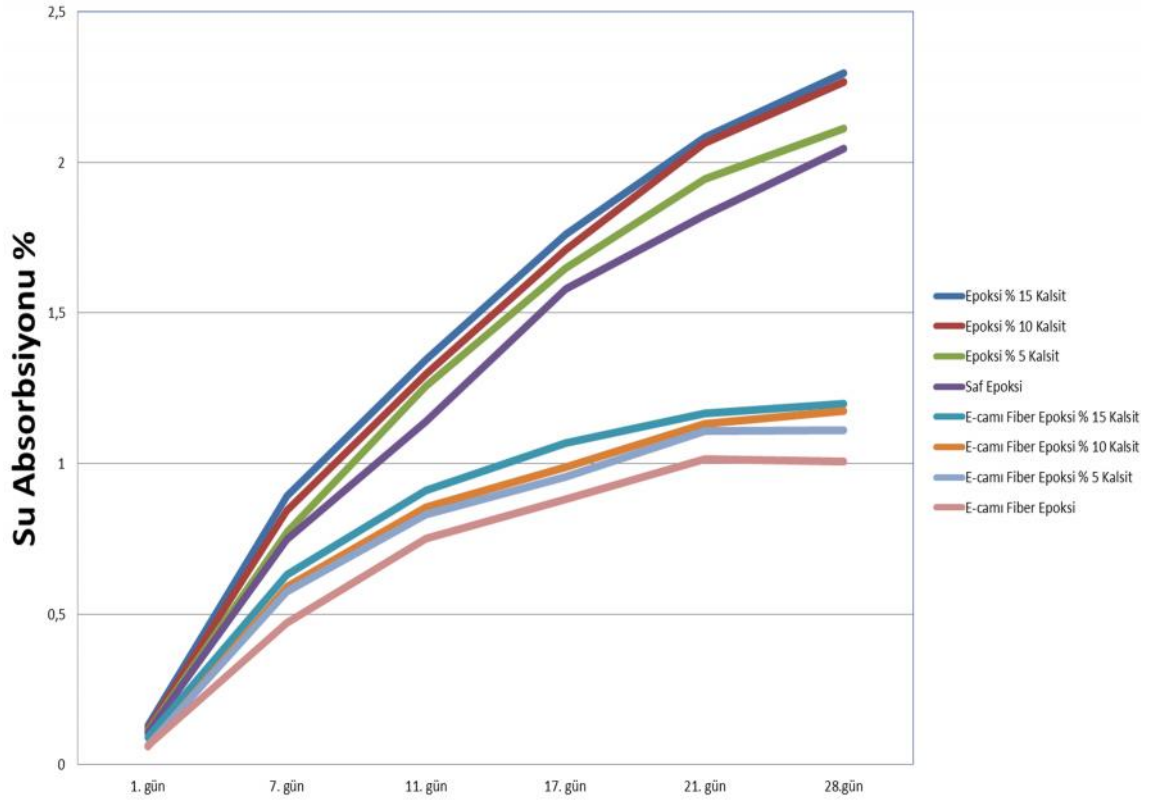
Numune	Kütlece % fiber	Hacimce % fiber	Kütlece % kalsit	Hacimce % kalsit	Kütlece % epoksi	Hacimce % epoksi
E5K	-	-	4.7	2.1	95.315	97.925
E10K	-	-	9.3	4.2	90.709	95.771
E15K	-	-	13.7	6.4	86.347	93.618
ECF	55.4	36.5	-	-	44.598	63.498
ECF5K	54.2	36.0	2.6	1.6	43.128	62.397
ECF10K	52.9	35.1	4.3	2.7	42.878	62.196
ECF15K	51.2	34.2	6.4	4.0	42.409	61.797

Kalsinasyon deneyi sonucunda, dokuma e-camı fiber takviyeli kompozit malzemelerin ortalama % 35 fiber hacim oranına sahip olduğu görülmektedir.

5.2.2 Su Absorbsiyonu

Malzemelerin % su absorpsiyonlarını belirlemek amacıyla 28 gün boyunca yapılan ölçümlerle oluşturulan grafik Şekil 5.12’de yer almaktadır. Grafikte, dokuma e-camı fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin % su absorpsiyonunun, epoksi malzemeye göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi, epoksiye takviye edilen cam fiberin, kompozit yapıda doku oluşturarak suyun penetrasyonuna engel olmasıdır.

Grafik detaylı olarak incelendiğinde, fiber takviyeli epoksi kompozit malzemeye ilave edilen kalsit miktarı arttıkça, % su absorpsiyonunun arttığı gözlenir. Bu durum, kalsitin hidrofilik özellikte bir dolgu maddesi olması sebebiyle, yüksek oranda su absorbe etmesinden kaynaklanır.



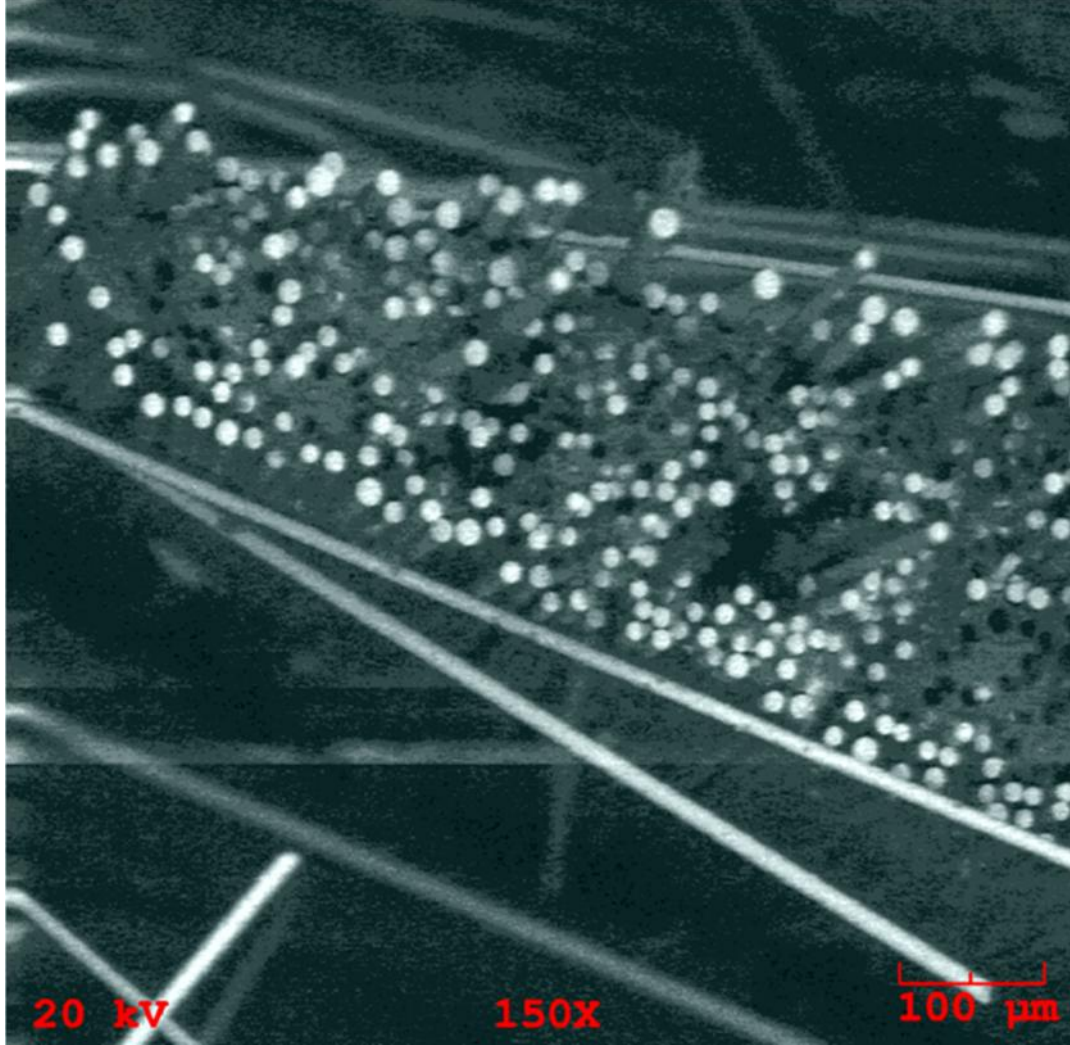
Şekil 5. 12 Kompozit malzemelerin su absorpsiyon grafiği

Saf epoksiye ilave edilen kalsit yüzdesi arttıkça, % su absorpsiyonunun arttığı da görülmektedir.

5.3 Mikroskopik Görüntüleme

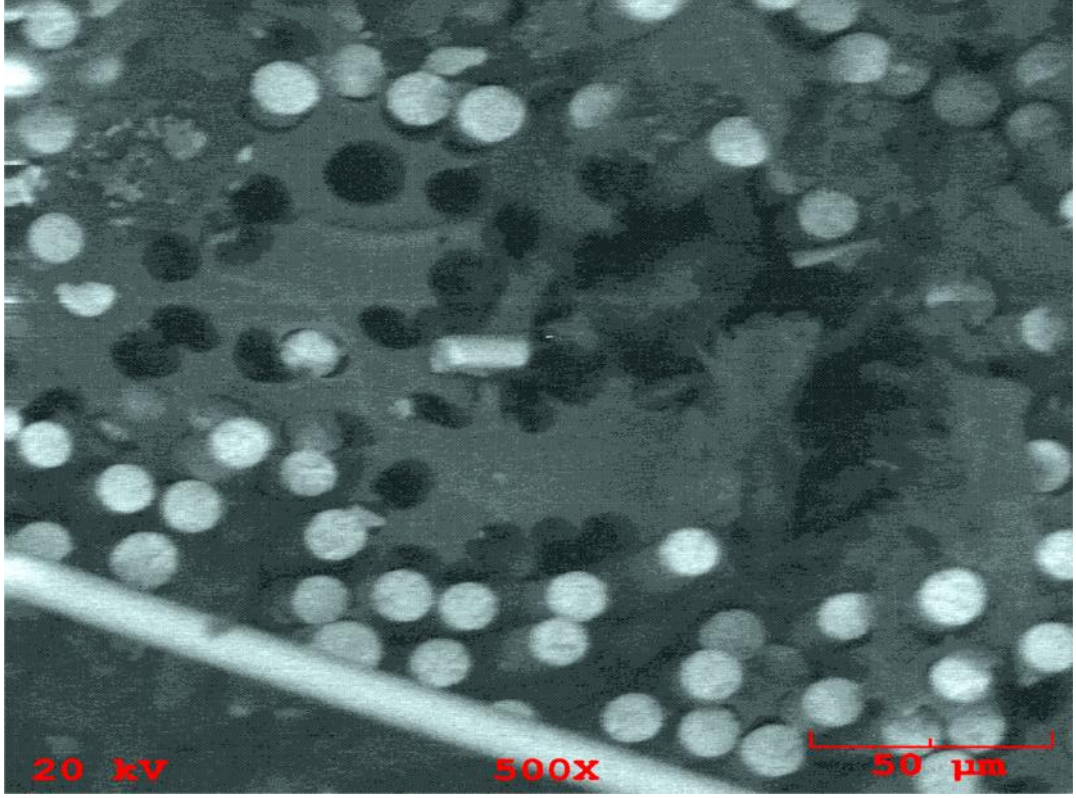
5.3.1 Taramalı Elektron Mikroskop (SEM)

Bu çalışmada, çekme deneylerinde kullanılan numunelerin kırık yüzeyleri, taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenmiştir.

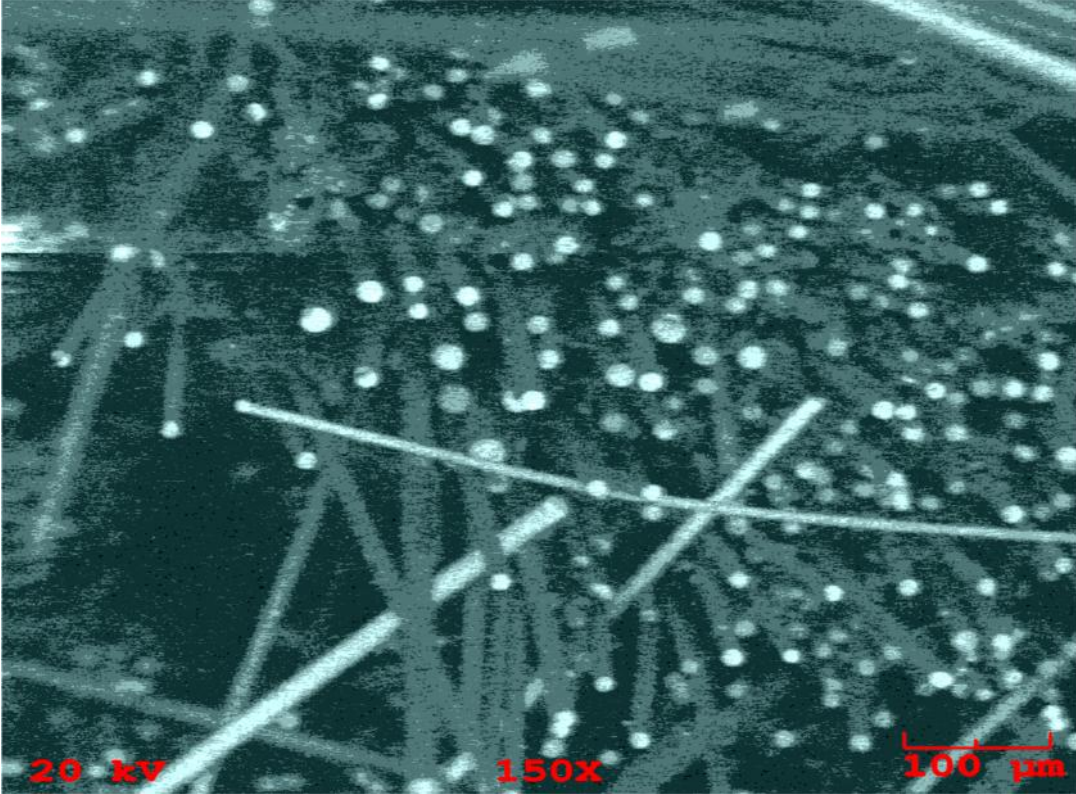


Şekil 5. 12 E-camı fiber epoksi kompozitin kopma alanı SEM görüntüsü

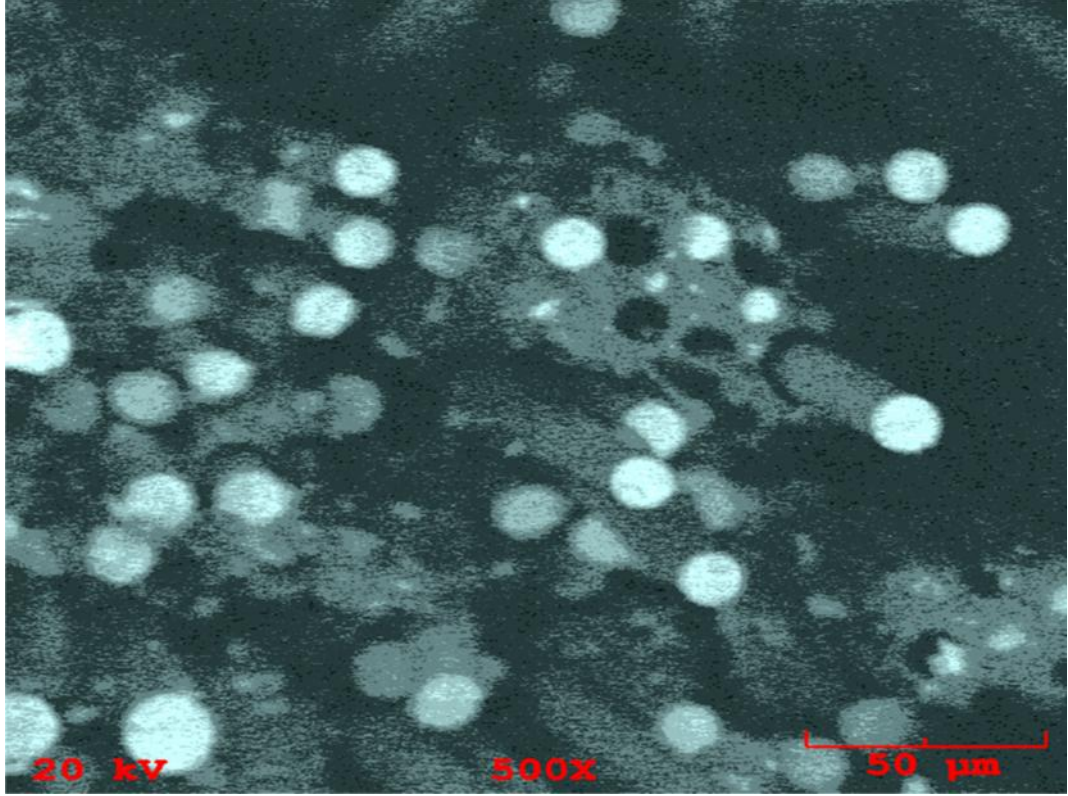
Şekil 5.13'te görülen siyah noktalardan anlaşılabildiği gibi epoksi cam elyafı tam olarak ıslatmamıştır. Siyah noktalar, elyafın kopmasıyla oluşan boşluklardır. Bağlanması çok kötü olmamasına rağmen matriste çatlaklar gözlenmektedir. Bu, matrisin yeterince mukavim olmamasından veya vakum torbalama yönteminin profesyonelce uygulanamamasından kaynaklanmış olabilir.



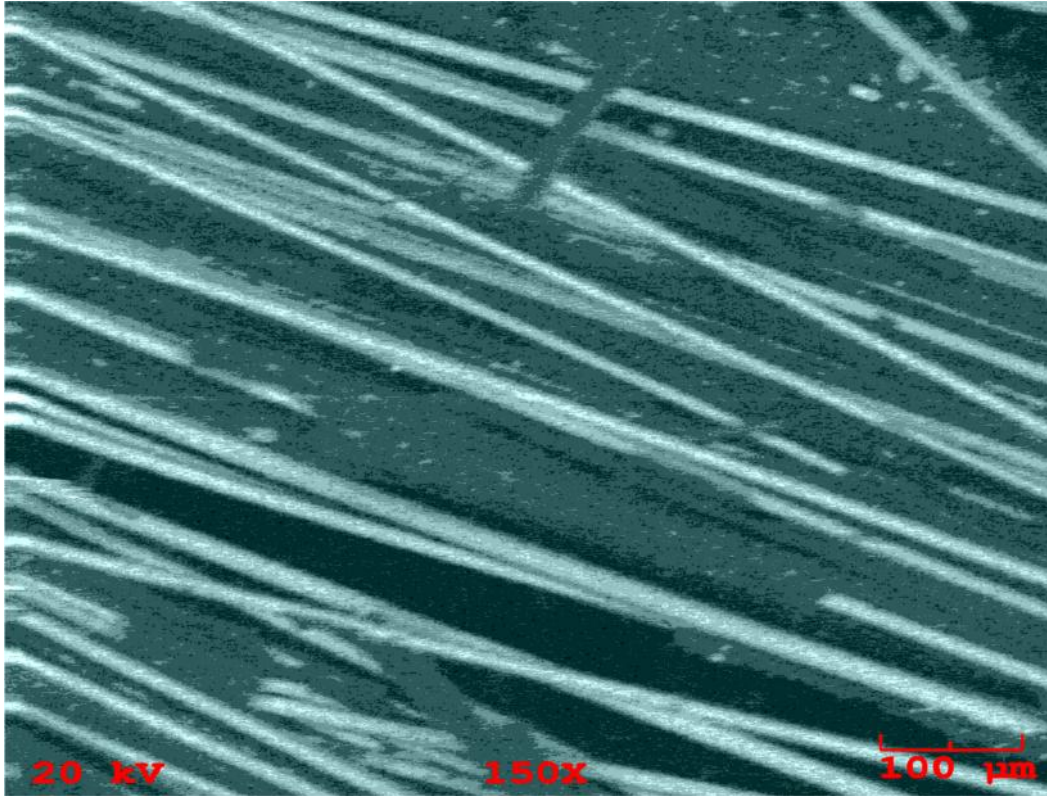
Şekil 5. 13 E-camı fiber epoksi kompozitin kopma alanı SEM görüntüsü



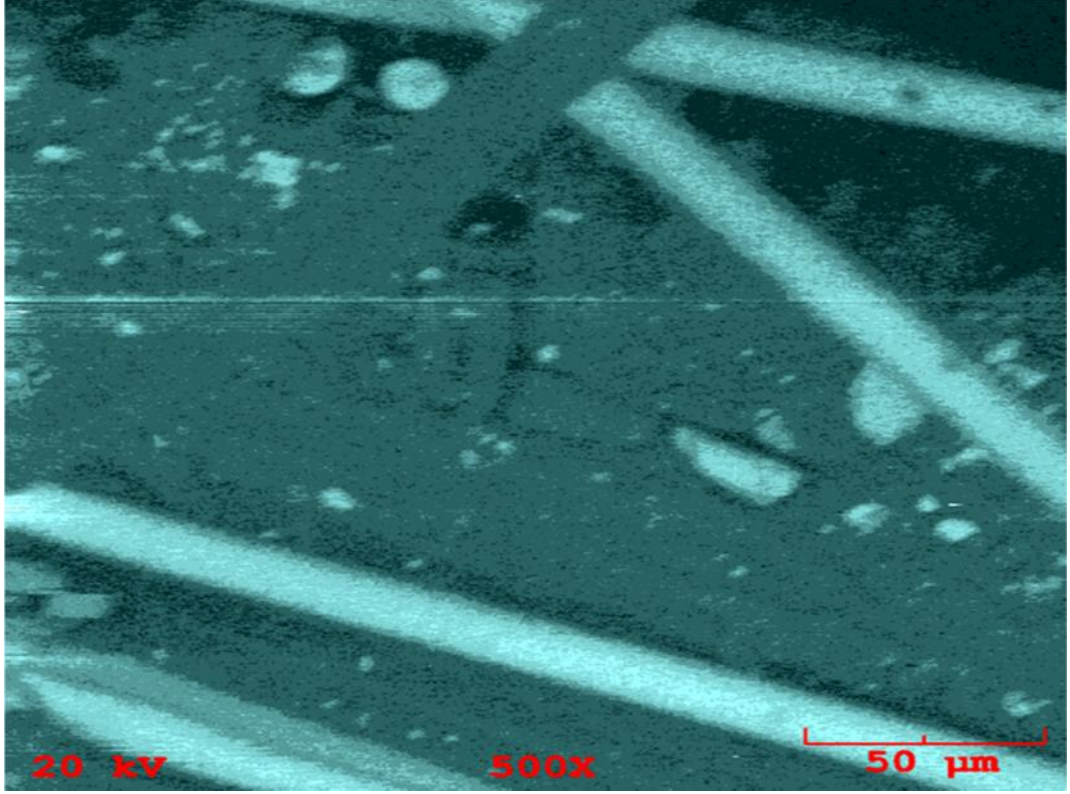
Şekil 5. 14 % 5 kalsit dolgulu e-camı fiber epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü



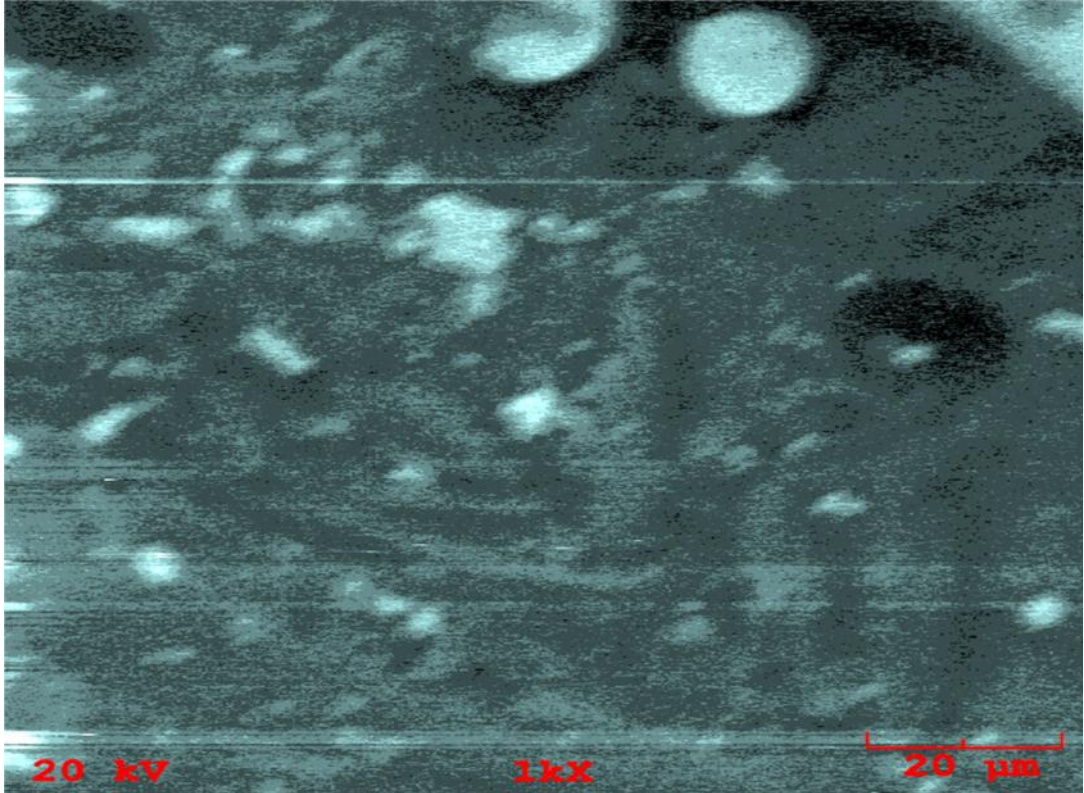
Şekil 5. 15 % 5 kalsit dolgulu e-cami fiber epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü



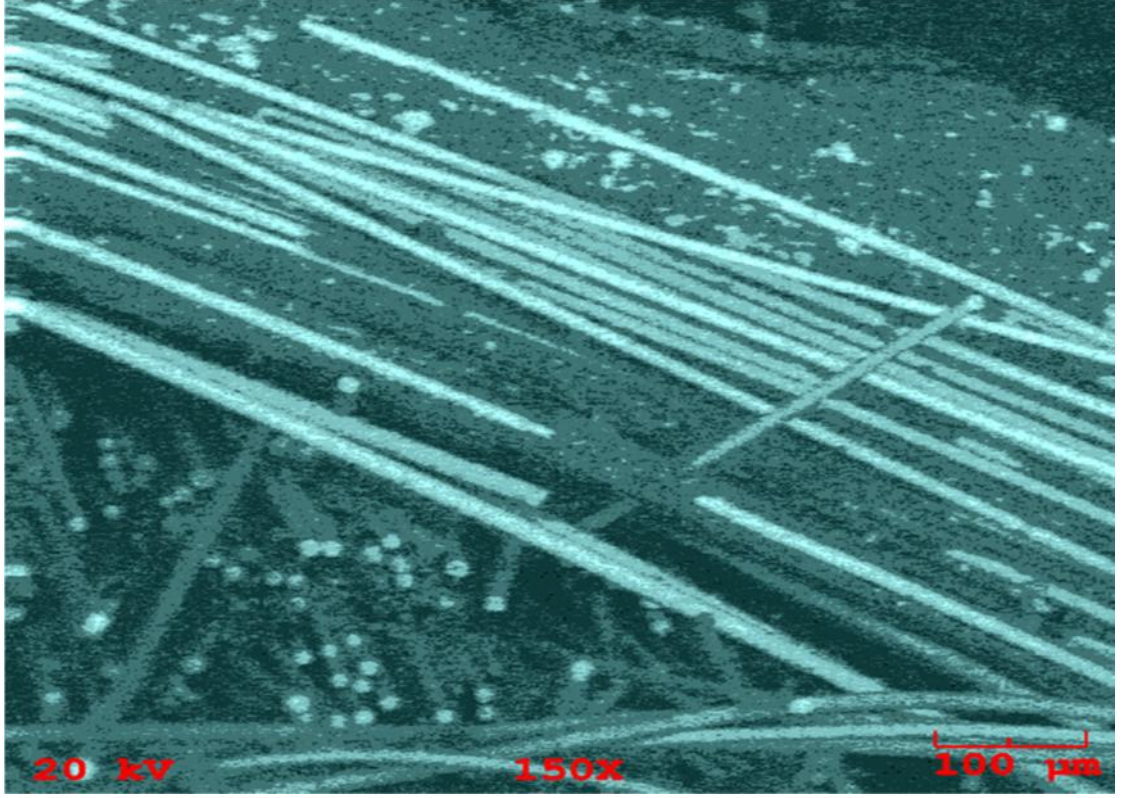
Şekil 5. 16 % 10 kalsit dolgulu e-cami fiber epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü



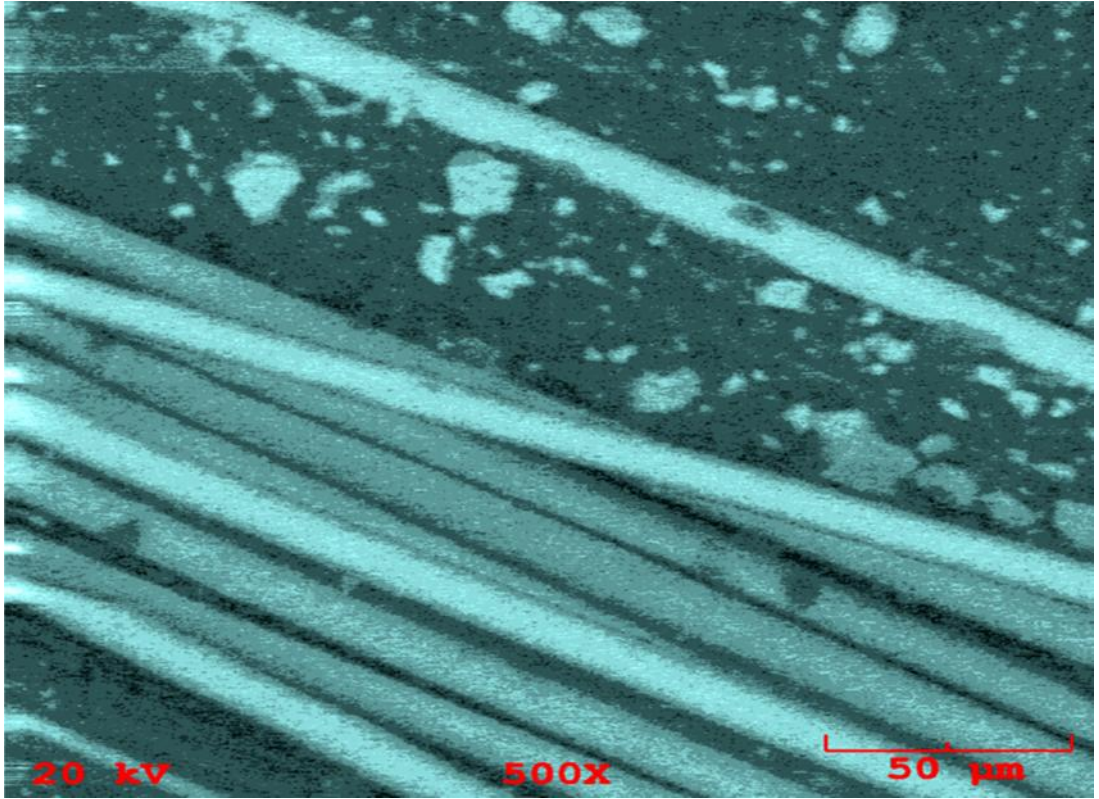
Şekil 5. 17 % 10 kalsit dolgulu e-camı fiber epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü



Şekil 5. 18 % 10 kalsit dolgulu e-camı fiber epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü



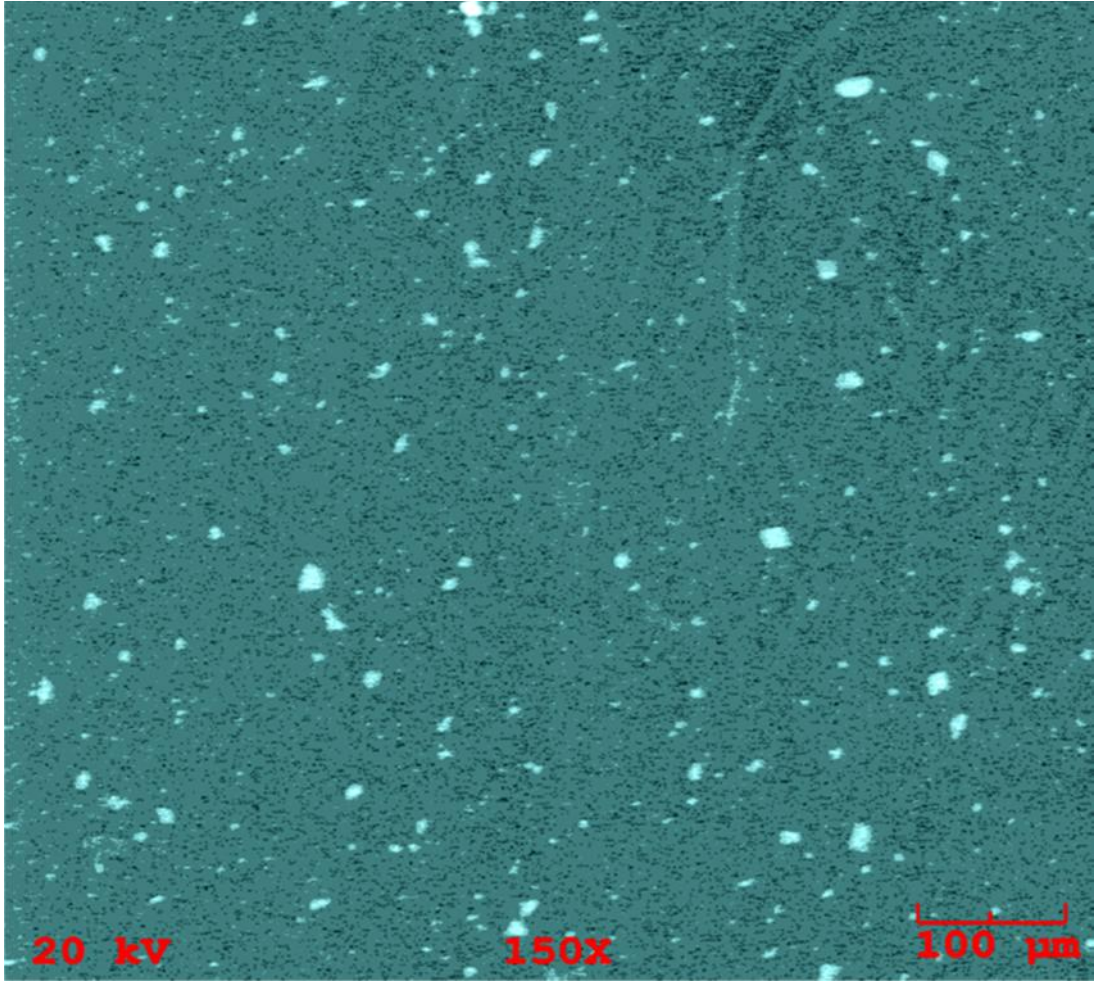
Şekil 5. 19 % 15 kalsit dolgulu e-camı fiber epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü



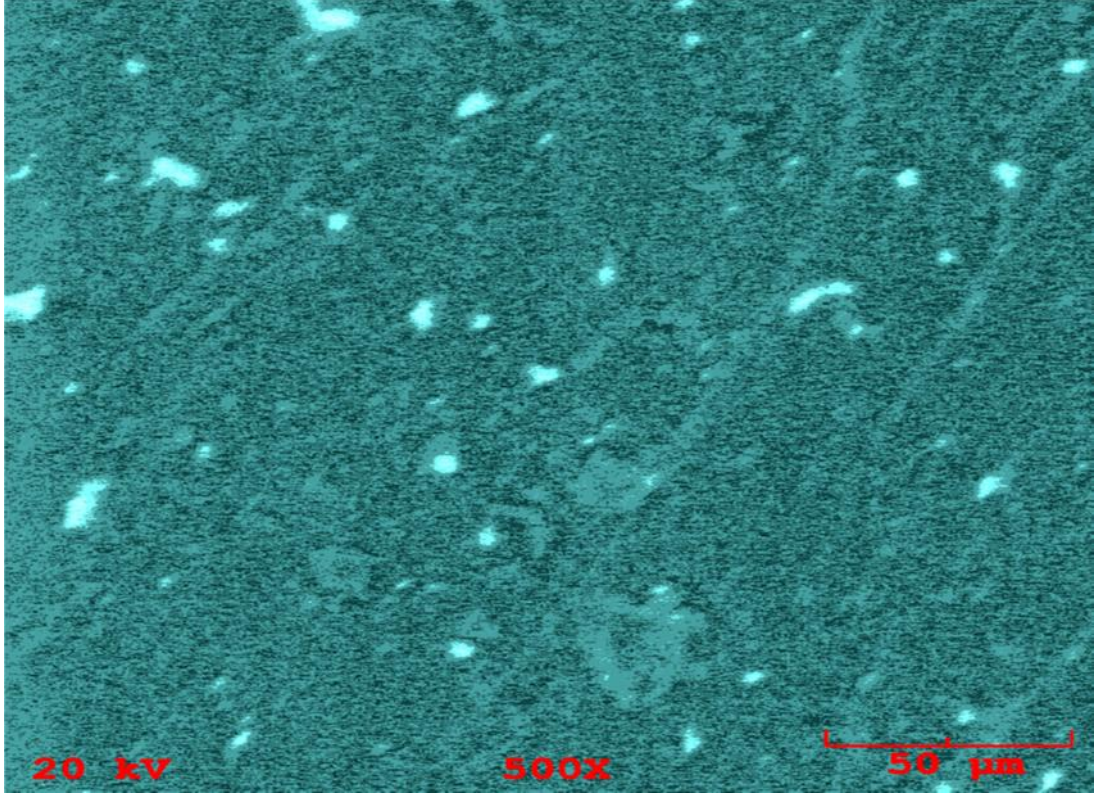
Şekil 5. 20 % 15 kalsit dolgulu e-camı fiber epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü

Şekil 5.20’de % 15 kalsit içeren epoksi kompozitte, yapı içerisinde kalsit malzemesinin homojen dağılmadığı ve yapıdaki süreksizliği arttırarak mekanik değerleri düşürdüğü gözlenmektedir.

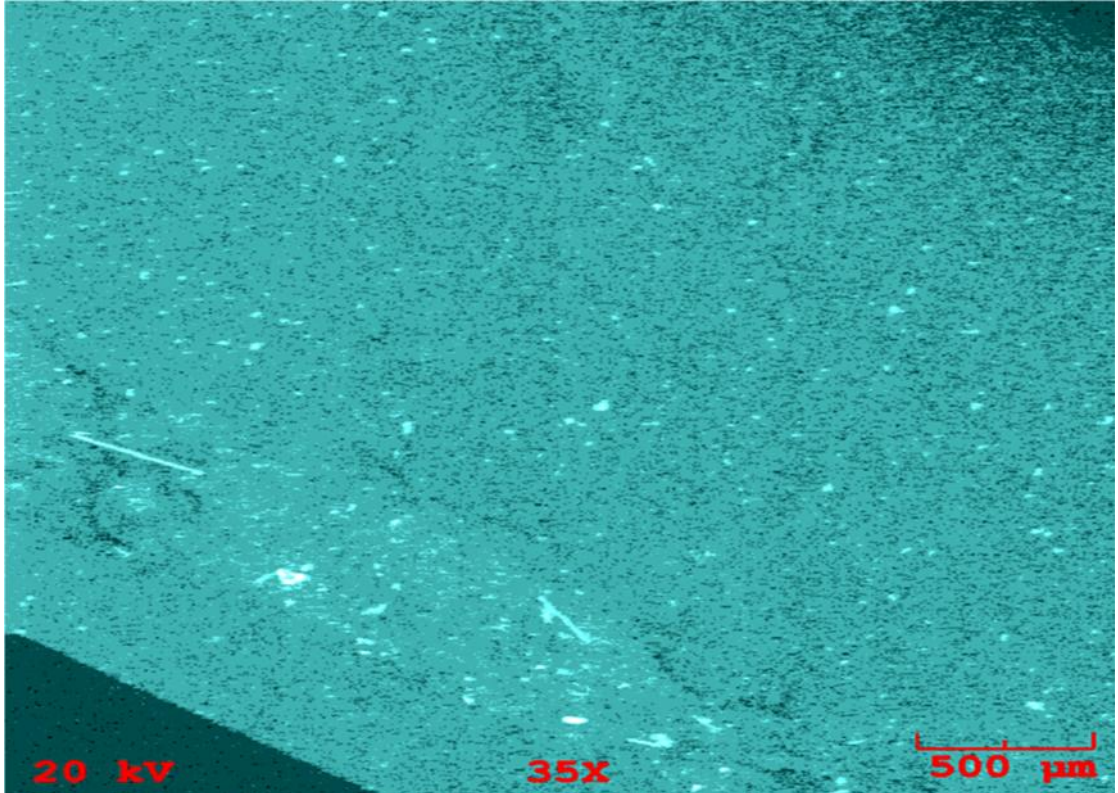
Şekil 5.16’te görüldüğü gibi cam fiber-reçine uyumsuzluğu yok denebilecek kadar azdır ve ıslanma neredeyse tamamen sağlanmıştır. Fakat Şekil 5.19’da kısmi olarak ıslanma problemi vardır. Şekil 5.15’te ise matriste çatlama, delaminasyon görülmüştür. Bu, katlar arasında hava kabarcıkları kalmasından dolayı olabilir. Ayrıca resimlerde görülmemekle birlikte kalsit taneleri fiberlerin arasına girip iyi ıslanmayı engellemiş, böylece reçinenin sürekliliğini azaltmış olabilir. Bu da yükün fibere ulaşmasını engeller ve çatlak görülmesine neden olur.



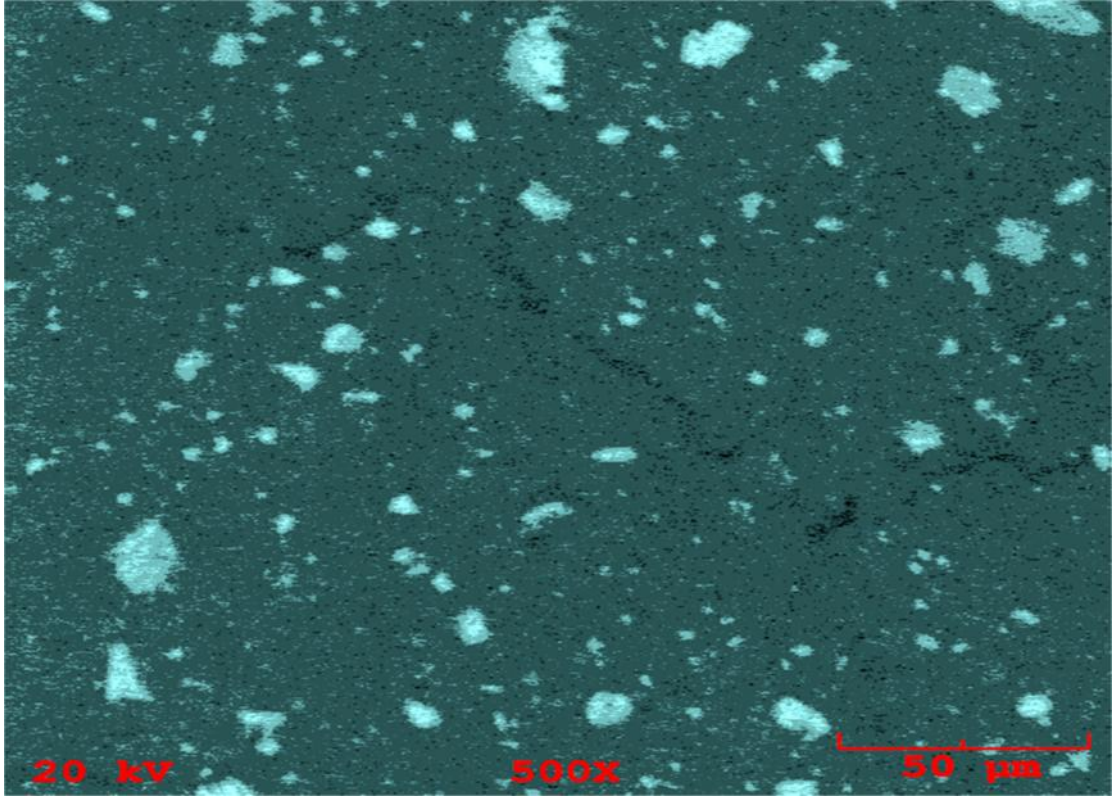
Şekil 5. 21 % 5 kalsit dolgulu epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü



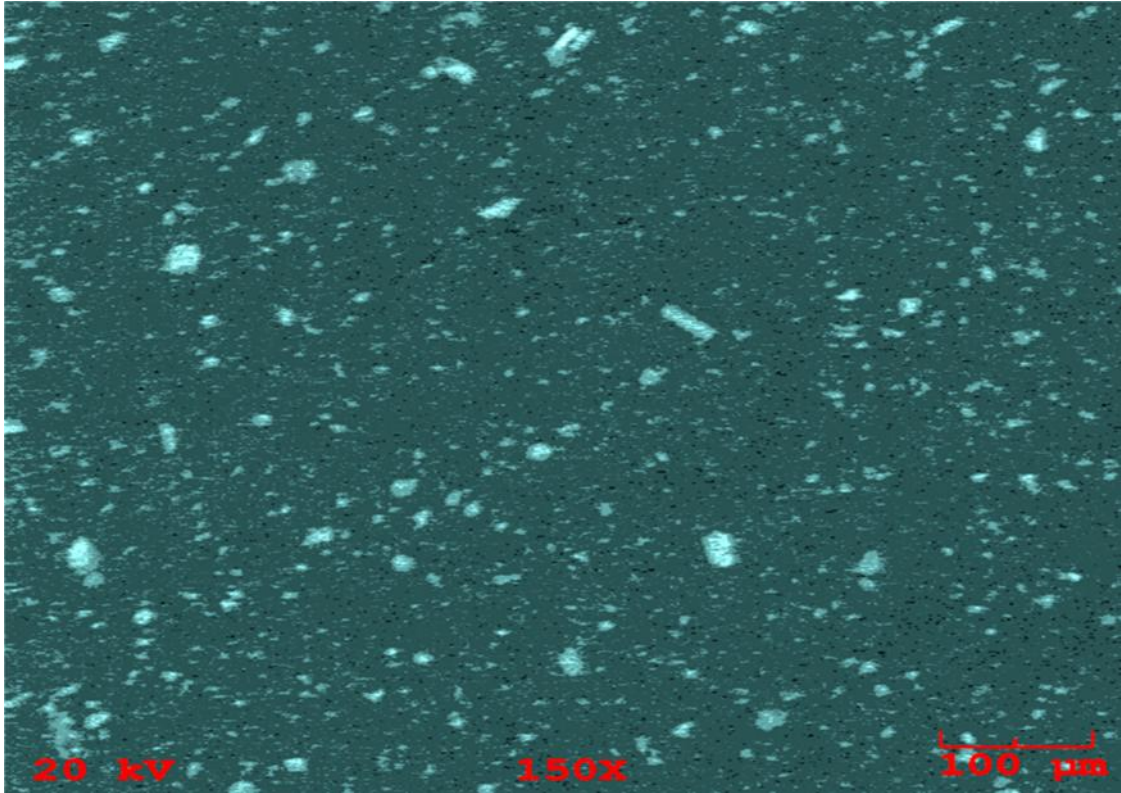
Şekil 5. 22 % 5 kalsit dolgulu epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü



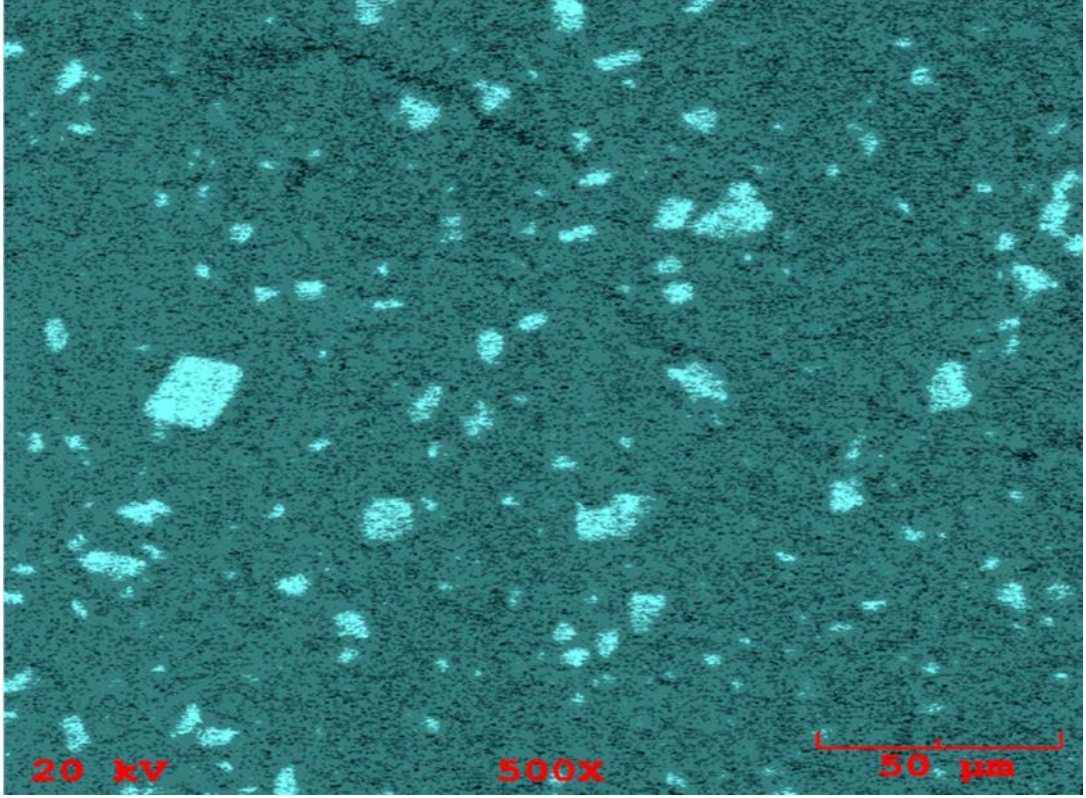
Şekil 5. 23 % 5 kalsit dolgulu epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü



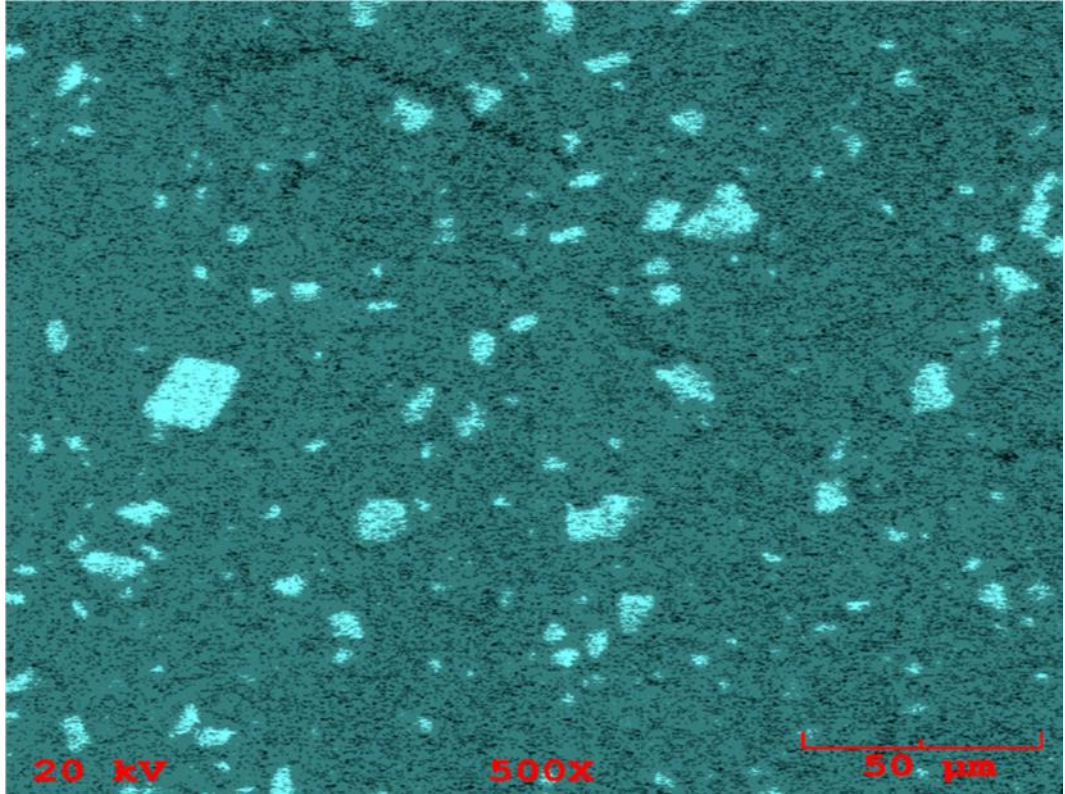
Şekil 5. 24 % 10 kalsit dolgulu epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü



Şekil 5. 25 % 10 kalsit dolgulu epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü



Şekil 5. 26 % 15 kalsit dolgulu epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü



Şekil 5. 27 % 15 kalsit dolgulu epoksinin kopma alanı SEM görüntüsü

SEM fotoğraflarından anlaşılacağı üzere kalsit dolgu ıslanmayı zorlaştırmış, delaminasyona neden olmuş ve boşluk sayısının artmasına sebebiyet vermiştir. Bu nedenle dolgu maddesi kullanılmayan e-camı fiber takviyeli epoksi numunenin mekanik değerleri en yüksek çıkmıştır ve fotoğraflarda da daha az boşluk görülmektedir.

Test edilen kompozitlerin farklı numunelerinde farklı mekanik değerler elde edilmesinin nedeni farklı bölgelerde farklı ıslama değerleri görülmesidir. Eğer numuneler farklı ıslanma değerlerine sahip bölgelerden alınıyorsa mukavemet değerleri de farklı olacaktır. Veya kompozitler üretilirken bölgesel olarak hava kabarcıkları kalabilmektedir, ayrıca fırça ile reçinelerin fiberlere emdirilmesi esnasında fiberler az da olsa kaydırılıp farklı yönlenmeye maruz kalabilmektedir.

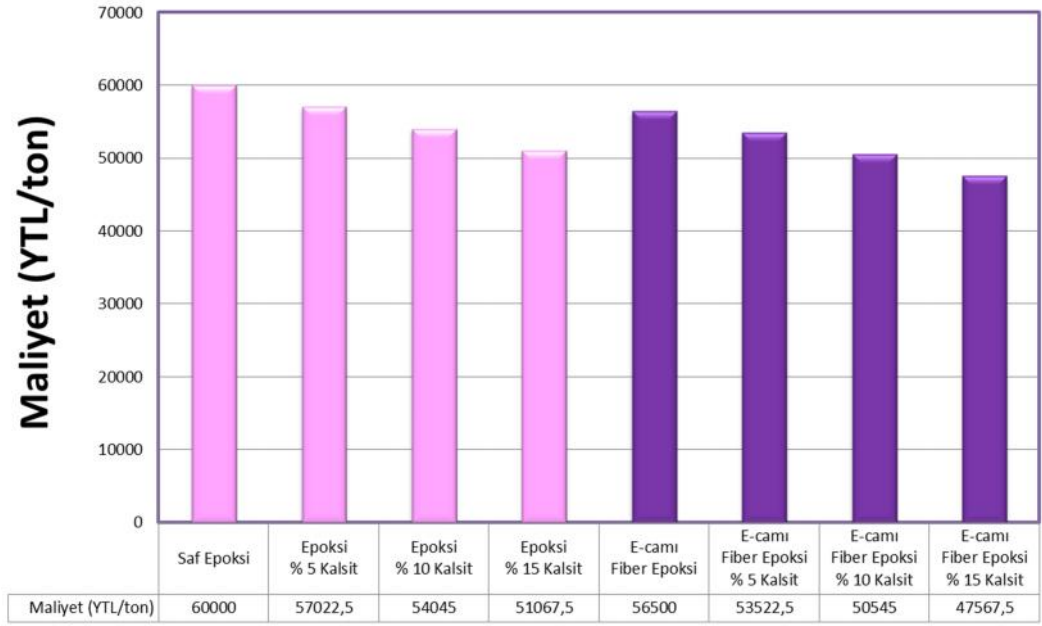
5.4 Maliyet Açısından İrdeleme

Bu çalışmada mekanik özellikler açısından test edilen 4 farklı % 35 cam fiber takviyeli epoksi kompozitler (biri dolgusuz, diğer üçü kompozitin % 5, % 10 ve % 15’u oranında kalsit dolgu ilaveli) ile 4 farklı epoksi polimerler (biri dolgusuz, diğer üçü kompozit yapının % 5, % 10 ve % 15’u oranında kalsit dolgu ilaveli) aynı zamanda maliyet açısından değerlendirilmiştir.

Çizelge 5. 11 Malzeme fiyatları

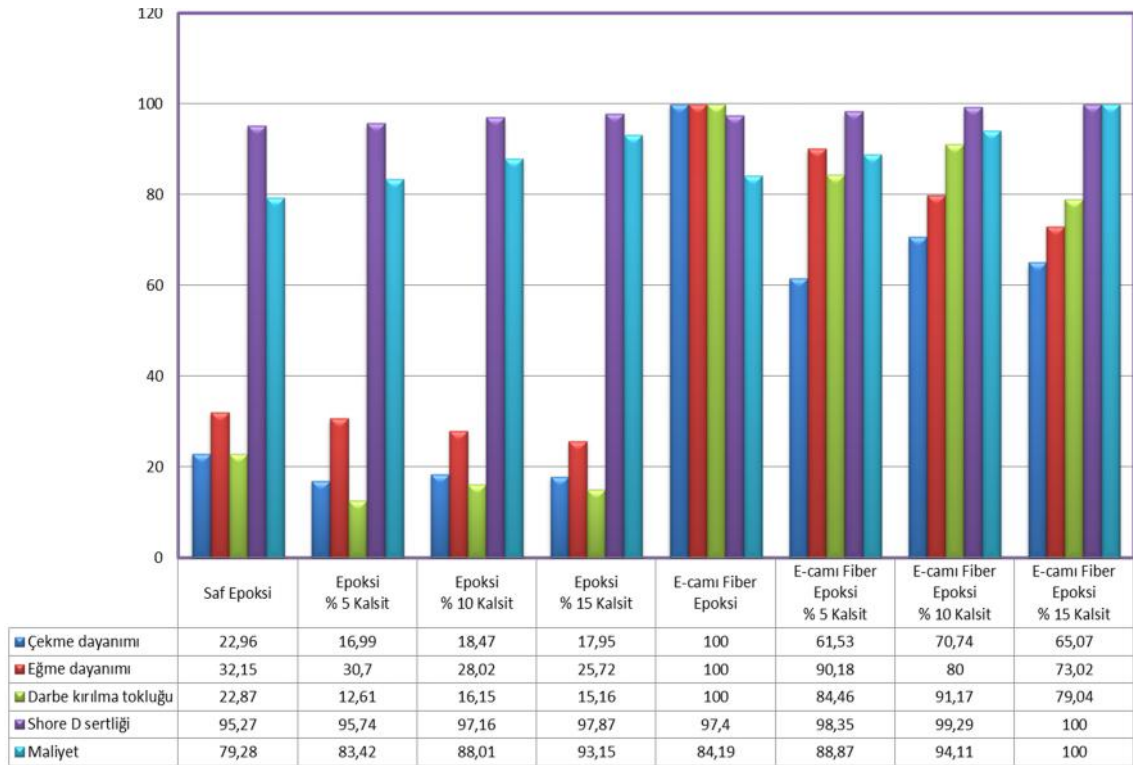
	Fiyat(tl/kg)
Epoksi	60
E-camı fiber	50
Kalsit (CaCO ₃)	0.45

Malzeme fiyatları ve üretilen kompozitlerin maliyet hesapları sırasıyla Çizelge 5.11 ve Şekil 5.28’de gösterilmiştir. (1 ton kompozit malzeme baz alınarak hesaplama yapılmıştır.)



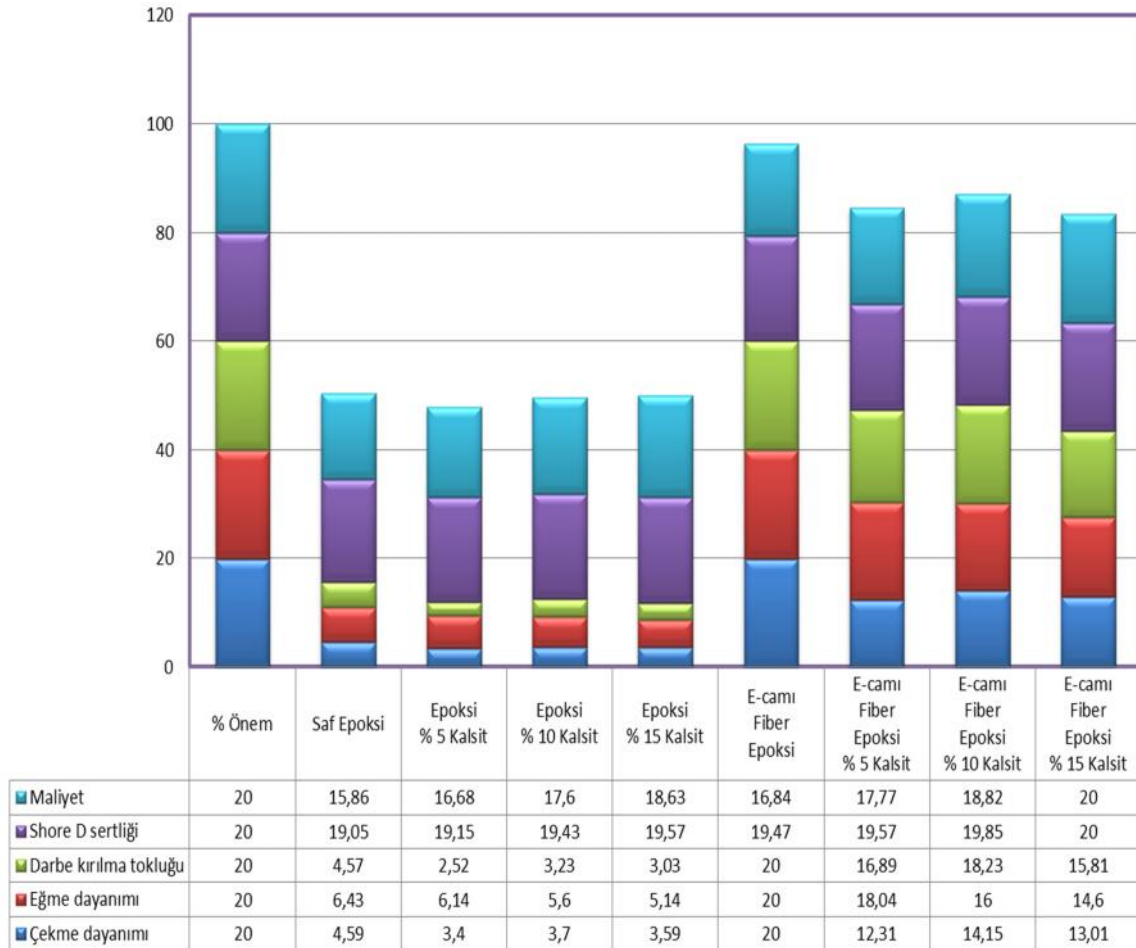
Şekil 5. 28 Malzemelerin maliyet grafiği

Görüldüğü üzere dolgu maddeleri kullanma maliyeti önemli bir şekilde düşürmüştür. Hem mekanik değerler hem de maliyet üretimin önemli parametreleri olduğu için karşılaştırdığımız kompozitlere her bir parametre için 100 üstünden puan verilmiştir, puanlar Şekil 5.29'da görülmektedir.



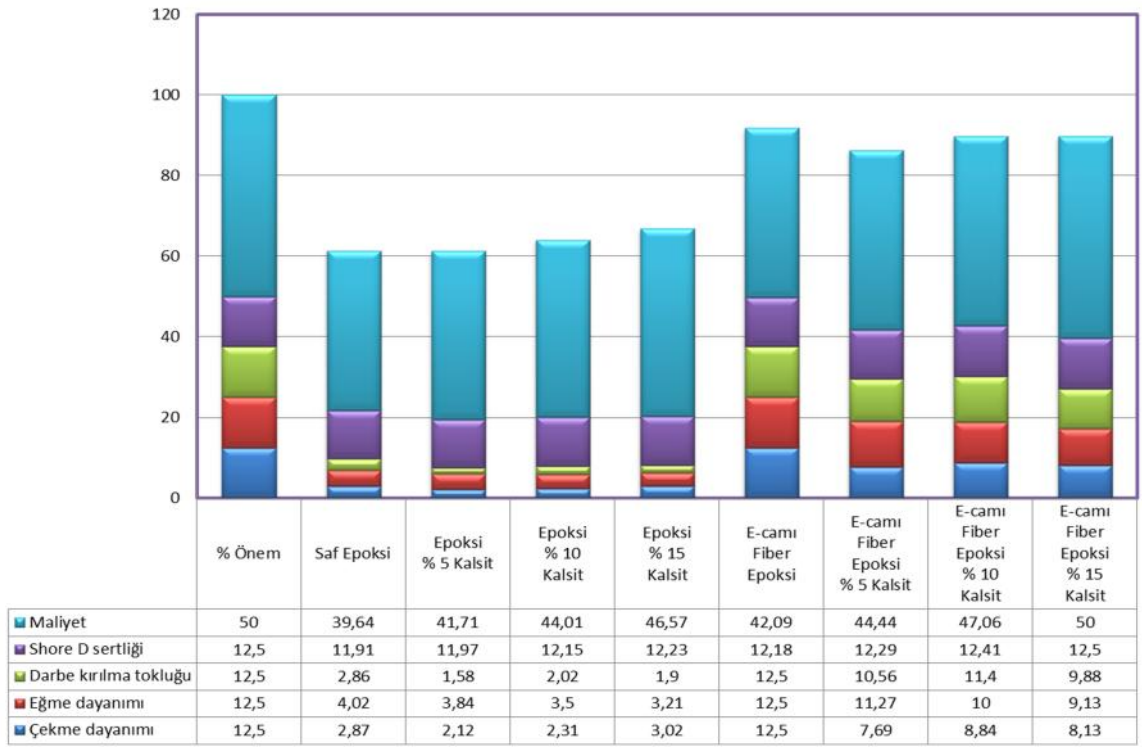
Şekil 5. 29 Kompozitlerin mekanik değerlere ve maliyete göre puanlandırılması

Bu parametrelerin önemi farklı amaçlar doğrultusunda değişkenlik gösterebilmektedir. Şekil 5.30-32’de bu parametrelerin 3 farklı önem dağılımına göre, her kompozitin her bir parametre için aldığı puanlar verilmiştir. Şekil 5.30’da ölçeklendirme yapılırken maliyete % 20, mekanik değere % 80 önem verilmiştir.

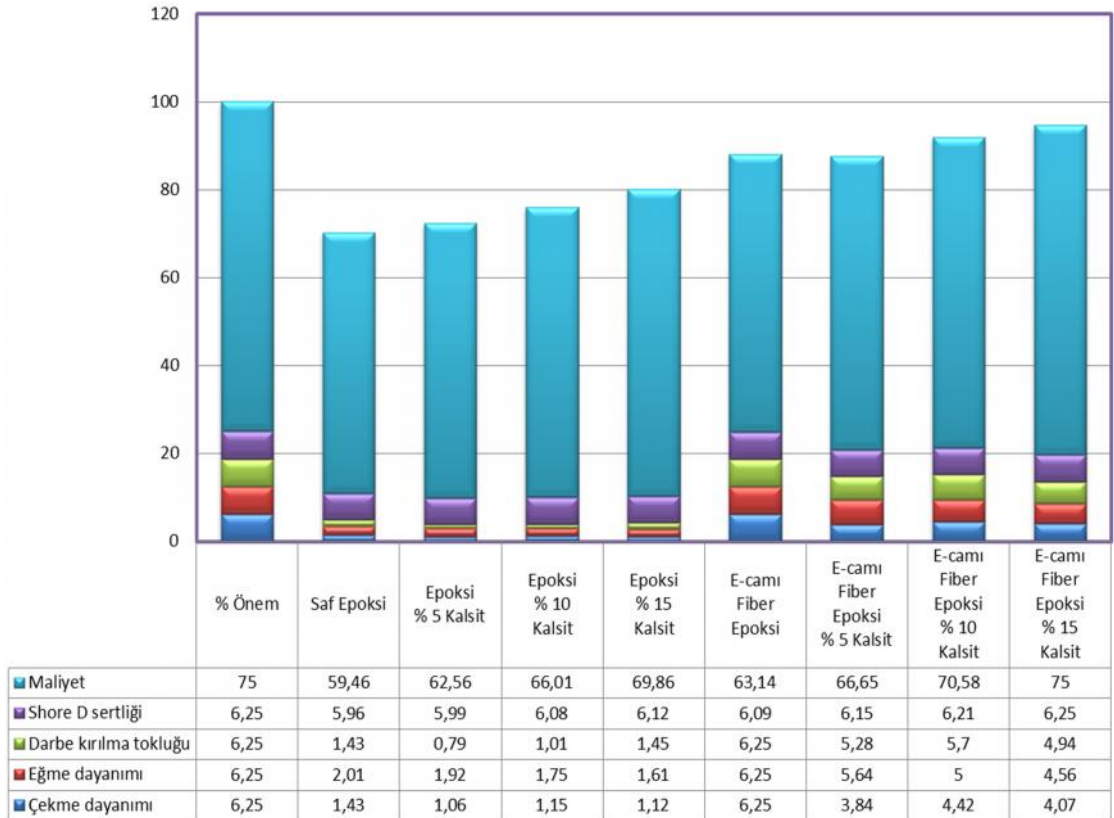


Şekil 5. 30 Maliyetin % 20, mekanik değerin % 80 önemli olduğu puanlama

Şekil 5.31’de maliyet ile mekanik değere eşit önem verilmiştir. Şekil 5.32’de ise ölçeklendirme yapılırken maliyete % 75, mekanik değere % 25 önem verilmiştir. Mekanik değerin önemi her seferinde çekme, eğme, darbe dayanımı ve sertlik değerlerine eşit olarak dağıtılmıştır.



Şekil 5. 31 Maliyetin % 50, mekanik değerin % 50 önemli olduğu puanlama



Şekil 5. 32 Maliyetin % 75, mekanik değerin % 25 önemli olduğu puanlama

Şekil 5.30-32’de belirtilen 3 farklı önem oranlarına göre her kompozite her bir parametre için puan verilmiştir. Her bir şekilde toplamda en yüksek puana sahip olan kompozit tercih edilmelidir. Maliyetin % 25 önemli olduğu bir uygulamada Şekil 5.30’da gösterildiği gibi en yüksek puana sahip olan dolgu maddesi kullanılmayan (dolgusuz) kompozit tercih edilmelidir. Şekil 5.28’de görüldüğü gibi dolgusuz kompozitin maliyeti en yüksek olandır ve maliyetin öneminin iyice arttığı bir uygulamada Şekil 5.32’de gösterildiği gibi kalsit dolgulu kompozitler tercih edilmelidir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, epoksi matris e-camı dokumalı (0-90⁰) kompozitte üçüncü bileşen kalsitin özelliklere etkisi araştırılmıştır. Öncelikle yapılan tüm deneylerde (çekme, eğme, darbe, sertlik, kalsinasyon, su absorpsiyon deneyleri ve SEM görüntüleri) cam hacim oranı $V_f = 0.35$ sabit seçilmiştir. Toz kalsit ilavesi ağırlıkça % 5, % 10, % 15 olacak şekilde deney grubu oluşturulmuştur. İmalat yöntemi olarak güncel yöntemlerden en önemlisi olan vakum torbalama yöntemi seçilmiştir. Malzeme ve yöntem olarak Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Kompozit Malzeme Laboratuvarından yararlanılmıştır. Üretilen deney numunelerine, çekme, 3 noktalı eğme, Charpy darbe, Shore-D sertlik, kalsinasyon ve su absorpsiyonu deneyleri uygulanmıştır. Daha sonra kırık yüzey resimleri SEM görüntüleri şeklinde alınmıştır.

Öncelikle kontrol grubu olarak cam dokuma desteksiz epoksi matris deneyleri yapılmıştır. Daha sonra dokuya ilave edilen üçüncü bileşenin (kalsit) etkileri incelenmiştir. Bu çalışma planı sonucu aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

1. Çekme deneyi olarak dolgusuz yani kontrol grubunda en yüksek dayanç değerleri gözlenmiştir. Kalsit miktarı artmasıyla dayançta düşüş görülmektedir. Aynı durum elastisite modülünde de görülmektedir. Dayancın değişimi % 15 kalsit ilaveli için % 35 dolayındadır. Buna karşılık maliyet azalması ise % 15 dolayındadır.

2. Eğme deneyi ise 3 noktalı eğme şeklinde yapılmıştır. Artan kalsit miktarı ile eğme dayancındaki azalış % 25 dolayındadır. Benzer değişim elastisite modülünde de gözlenmiştir.

3. Sertlikler, Shore-D yöntemi ile ölçülmüştür. Kalsit miktarının artışı ile sertlikte doğal olarak artışlar gözlenmiştir. Bu artış, % 15 kalsit oranı için % 3 dolayındadır ki, bu da kırılganlığa bir ölçüt olarak kullanılmayabilir.

4. Kalsinasyon deneyleri sadece sonuçların doğrulanması, kalsit ve cam hacim oranlarının doğru olarak saptanması amacıyla yapılmıştır. Deney sonuçları, çalışmaları doğrular biçimde deney sistematığıne uygun olarak elde edilmiştir.

5. Su absorpsiyonu, su emici (hidrofilik özellik gösteren) kalsitin etkisini araştırmak amacı ile yapılmıştır. Kalsit miktarının artışı ile absorpsiyon miktarı da artmaktadır. Bu artış % 15 kalsit oranı için % 20'dir.

6. Çekme deneyinden elde edilmiş kırık yüzeylerin SEM fotoğraflarından elde edilen görüntülere göre epoksi-cam ara yüzeyinde iyi yapışma sağlandığı belirlenmiştir. Kalsit ilavesi ile dokunun gevrekleştiği ve kalsit miktarının artması ile de topaklaşmaların olduğu gözlenmiştir.

Bu çalışma bir projenin belirli bir kısmına katkı sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar otomotiv sanayi için uygulanabilir niteliktedir. Çalışmaların üçüncü bileşeni değiştirerek daha sistematik hale getirilmesi ile doğrudan endüstriye uygulanabilirliği artacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Srivastava, V.K., Wahne, S., (2007). "Wear and Friction Behaviour of Soft Particles Filled Random Direction Short GFRP Composites", *Materials Science and Engineering*, 458:25-33.
- [2] Wang, Y., Li, J., Zhao, D., (1994). "Mechanical Properties of Fiber Glass and Kevlar Woven Fabric Reinforced Composites", 1159-1175.
- [3] Khristova, Y., Aniskevich, K., (1994). "Prediction of Creep of the Epoxy Resin Filled with Marble Inclusions", *Mechanic Composite Material*, 30:590-599.
- [4] Paliwal, M.K., Chaturvedi, S.K., (2012). "An Experimental Investigation of Tensile Strength of Glass Composite Materials with Calcium Carbonate(CaCO₃) Filler", *International Journal of Emerging trends in Engineering and Development*, 2:6.
- [5] Biswas, S., Satapathy A., (2010). *Materials and Design*, 31:1752.
- [6] Fernandes, L.J., Vinay, B.U., Prakasha, A.K., Ajagol, P., (2014). "Shellfish Shell as a Bio-filler: Preparation, Characterization and Its Effect on the Mechanical Properties on Glass Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites", *The International Journal of Engineering and Science*, 3:23-26.
- [7] Saleh, N.A., Al-Maamori, M.H., Al-jebory, M.B., (2014). "Evaluating the Mechanical Properties of Epoxy Resin with Fly Ash and Silica Fume as Fillers", *Advances in Physics Theories and Applications*.
- [8] Dhawan, V., Singh, S., Singh, I., (2013). "Effect of Natural Fillers on Mechanical Properties of GFRP Composites", *Hindawi Publishing Corporation Journal of Composites*, 8.
- [9] Cerbu, C., Teodorescu H., Scutaru, L., (2011). "Adding Fillers to Change the Mechanical Behaviour of the Glass Composite Materials", *Proceedings of the World Congress on Engineering, WCE 2011, July 6 - 8, 2011, London*.
- [10] Hull, D., (2002). "An Introduction to Composite Materials", *Cambridge University Press, Cambridge*.
- [11] Peters, S.T., (2008). *Handbook of Composites, Second Edition*, Chapman & Hall, London.

- [12] ASM Handbook, (2001). Composites, ASM International, USA.
- [13] Kaw, A.K., (2006). Mechanics of Composite Materials, Second Edition, CRC Press, Florida.
- [14] Department of Defense United States of America, (2002). Composite Materials Handbook, Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization of Structural Materials, USA.
- [15] Kulshreshta, A.K., Vasile, C., (2002). Handbook of Polymer Blends and Composites, First Edition, Rapra Technology Limited, Shawbury, UK.
- [16] Wallenberger, F.T., Watson, J.C., Li, H., (2001). Composites, ASM Handbook, PPG Industries Inc., Pittsburg.
- [17] Hollaway, L.C., Chryssanthopoulos, M.K., Moy, S. S. J., (2004). "Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction", Proceedings of the Second International Conference, held at the University of Surrey, Guildford, 20-22 April 2004, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [18] Kutz, M., (2015). Materials and Engineering Mechanics, Mechanical Engineers' Handbook, John Wiles and Sons Inc., New Jersey.
- [19] Crawford, R.J., (2002). Plastics Engineering, Third Edition, St Edmundsbury Press Ltd., London.
- [20] Rudin, A., (1999). The Elements of Polymer Science and Engineering, Second Edition, Academic Press, San Diego.
- [21] Dodiuk, H., Goodman, S.H., Handbook of Thermoset Plastics, Third Edition, San Diego.
- [22] Herman, F.M., (2004). Encyclopedia of Polymer Science and Technology, John Wiley & Sons Inc., 2:307-328.
- [23] Augustsson, C., (2004). Nm Epoxy Handbook, Third Edition, Nils Malmgren Ab.
- [24] Ratna, D., (2009). Handbook of Thermoset Resins, Smithers Rapra, Shrewsbury.
- [25] Dow Plastics, (1999). Liquid Epoxy Resins, Dow, Midland.
- [26] Devendra, K., Rangaswamy T., (2013). "Strength Characterization of E-glass Fiber Reinforced Epoxy Composites with Filler Materials", Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 1:353-357.
- [27] Circiumaru, A., Bria, V., Roman, I., Andrei, G., Dima, D., Birsan, I.G., (2011). "Physical Properties of Filled Epoxy Composite", Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium, 22:4, Vienna.
- [28] Kinsella M., Murray D., Crane D., Mancinelli J., Kranjc M., (2001). "Mechanical Properties of Polymeric Composites Reinforced with High Strength Glass Fibres", Advanced Glass Fiber Yarns LLC, South Carolina.
- [29] Ebewele, R., (2000). Polymer Science and Technology, CRC Press, New York.

- [30] Namie, I., Ibrahim, A.A., Hassan, M.F., (2011). "Study the Mechanical Properties of Epoxy Resin Reinforced with Silica (Quartz) and Alumina Particles", The Iraqi Journal for Mechanical and Material Engineering, 11:3.
- [31] Fu, S.Y., Feng, X.Q., Lauke, B., Mai, Y.W., (2008). "Effects of Particle Size, Particle/Matrix Interface Adhesion and Particle Loading on Mechanical Properties of Particulate – Polymer Composites", Science Direct: Composites, 39:933-961.
- [32] Majeed, A.H., Hamza, M.S., Kareem, H.R., (2014). "Effect of Adding Nanocarbon Black on the Mechanical Properties of Epoxy", Diyala Journal of Engineering Sciences, 7:94-108.
- [33] Cerbu, C., Curtutse, I., (2011). "Mechanical Characterization of the Glass Fibres/Rubber/Resin Composite Material", Materiale Plastice, 48:1.
- [34] Al-Zubaidi, B.A., Al-Tabbakh, A.A., Al-Qaessy, H.A., Al-Kaseey, R.N., (2014). "Mechanical, Thermal and Wear Characteristics of Polymer Composite Material Reinforced with Calcium Carbonate Powder", Eng. & Tech. Journal, 32:3.
- [35] Valasek, P., Chocholous, P., (2013). "Mechanical Properties of Epoxy Resins with Organic Filler – Wood Flour", Engineering for Rural Development, 23-24 May 2013, Jelgava.
- [36] Channapagoudra, M.N., Ajith, G.J., Thaned, S., Patil, M., (2013). "Effect of Hematite Filler on Mechanical Properties of Glass/Epoxy Composites", International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2:11.
- [37] Sapuan, S.M., Harimi, M., Maleque, M.A., (2013). "Mechanical Properties of Epoxy/Coconut Shell Filler Particle Composites", The Arabian Journal for Science and Engineering, 28:2.
- [38] Avinash, N.V., Pramod, K.N., Sudheer, K.V., Umashankar, K.S., (2014). "Effect of Recycled Rubber Filler on the Mechanical Characteristics of E-Glass/Epoxy Hybrid Composites", International Journal of Research, 1:5.
- [39] Gupta, N., Brar, B.S., Woldesenbet, E., (2001). "Effect of Filler Addition on the Compressive and Impact Properties of Glass Fibre Reinforced Epoxy", Indian Academy of Sciences, 24:219-223.
- [40] Ameen, H.A., (2008). "Mechanical Properties of Composite Material Using Natural Rubber with Epoxy Resin", Eng. and Tech., 26:2.
- [41] Bhatnagar, M.S., (1996). The Polymeric Materials Encyclopedia, CRC Press Inc.
- [42] Bhagat, S., Verma, P.K., (2013). "Effect of Graphite Filler on Mechanical Behavior of Epoxy Composites", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 3:2.
- [43] Puvanasvaran, A.P., Hisham, S., Kamil Sued, M., (2011). "Investigation on the Mechanical Characteristics of Sawdust and Chipwood Filled Epoxy", Journal of Mechanical Engineering and Technology, 3:1.

- [44] Gao, J., Juntang, L., Benicewicz B.C., Zhao, S., Hillborg, H., Schadler, L.S., (2012), "The Mechanical Properties of Epoxy Composites Filled with Rubbery Copolymer Grafted SiO₂", *Polymers*, 4:187-210.
- [45] Betti, A., Carvelli, V., Fujii, T., Okubo, K., (2013). "Effect of Micro-Fibrillated Cellulose and Rubber Nanoparticle on Mechanical Properties of Carbon Plain-Weave Textile Reinforced Epoxy", 9th International Conference on Fracture & Strength of Solids, 9-13 June 2013, Jeju, Korea.
- [46] Deogonda, P., Chalwa, V.N., (2013). "Mechanical Property of Glass Fiber Reinforcement Epoxy Composites", *International Journal of Scientific Engineering and Research*, 1:4.
- [47] Tenebe, O.G., Ayo, M.D., Ichetaonye, S.I., Igbonazobi, L.C., Eguare, K.O., (2013). "Effect of Filler loading on the Mechanical Properties of Natural Rubber filled with Guinea Corn Husk (*Holcus sorghum*) as Fillers", *International Journal of Life Sciences*, 2:156-161.
- [48] Sabu, T., Kuruvilla J., Kumar M.S., Koichi, G., Meyyarappallil, S.S., (2012). *Polymer Composites*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [49] Katz, H.S., Mileski, J.V., (1987). *Handbook of Fillers of Plastics*, Van Nostrand Reinhold International Company, New York.
- [50] Goodman, S.W., (1998). *Handbook of Thermoset Plastics*, Second Edition, Noyes Publication, New Jersey, United States.
- [51] Singla, M., Chawla, V., (2010). "Mechanical Properties of Epoxy Resin – Fly Ash Composite", *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 9:199-210.
- [52] Masuelli, M.A., (2013). *Introduction of Fibre-Reinforced Polymers – Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes*, Intech, San Luis.
- [53] May, C.A., (1988). *Epoxy Resins, Chemistry and Technology*, Second Edition, Marcel Dekker Inc., New York.
- [54] Li, L., Zou H., Shao, L., Wang, G., Chen, J., (2005). "Study on Mechanical Property of Epoxy Composite Filled with Nano-Sized Calcium Carbonate Particles", *Journal of Materials Science*, 40:1297-1299.
- [55] Mazumdar, S.K., (2001). "Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering", CRC Press, Massachusetts. *Plastics Design Library*, Pennsylvania.
- [56] Goren, A., Atas, C., (2008). "Manufacturing of Polymer Matrix Composites Using Vacuum Assisted Resin Infusion Molding", *International Scientific Journal published monthly by the World Academy of Materials and Manufacturing Engineering*, December 2008, 34:2:117-120.
- [57] Durgun, İ., Vatansever, O., Ertan, R., Yavuz, N., (2014). "Otomotiv Sektöründe Kullanılan Kompozit Parça İmalat Yöntemlerinin Deneyisel Olarak Karşılaştırılması", *Mühendis ve Makina*, 55:58-63.
- [58] TSE 527, (2007). *Plastikler – Çekme Özelliklerinin Tayini*, TSE, Ankara.

- [59] TSE 14125, (1999). Plastik Kompozitler – Elyaf Takviyeli- Eğilme Özelliklerinin Tayini, TSE, Ankara.
- [60] BSI 178, (2010). Plastics - Determination of Flexural Properties, BSI, Brussels.
- [61] TSE 179, (2006). Plastikler - Charpy Darbe Özelliklerinin Tayini, TSE, Ankara.
- [62] TS 1177 EN ISO 11722, (2004). Tekstil - Cam Takviyeli Plâstikler – Prepregler, Kalıplama Hamurları Ve Lâminatlar – Tekstil - Cam Ve Mineral Dolgu Muhtevasının Tayini – Kalsinasyon Metotları, TSE, Ankara.
- [63] ASTM D 570-98, (2010). Standard Test Method for Water Absorption of Plastics, ASTM, United States.
- [64] Bhaskar, J., Singh, V.K., (2013). “Water Absorption and Compressive Properties of Coconut Shell Particle Reinforced Epoxy Composite”, Journal Material Environment Science, 1:113-118.
- [65] Anter, F.H., Hasan, H.S., (2011). “Effect of Water Absorption on Hardness Property for Epoxy Reinforced by Glass Fibers”, Journal of University of Anbar for Pure Science, 5:3.
- [66] Chow, W.S., (2007). “Water Absorption of Epoxy/Glass Fiber/Organo Montmorillonite Nanocomposites”, eXPRESS Polymer Letters, 1:104-108.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Cevriye İlkay ÜN
Doğum Tarihi ve Yeri : 03.01.1989 Ceyhan
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ilkayun@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lise	Fen Bilimleri	Mersin 75. Yıl Anadolu Öğretmen Lisesi	2006

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010	İsdemir	Stajyer
2013	Montanuniversitat Leoben	Araştırmacı Mühendis

YAYINLAR

Bildiri

1. UN, C.İ., KAHRAMAN, B., ALTINBAY, A., DOĞU, M., UNAL, A., (2015). "The Effect of Calcite Filler on E-glass Woven Fabric Reinforced Epoxy Composites", International Conference on Advances in Composite Materials and Structures (CACMSİstanbul2015), 13-15 April 2015, İstanbul.