

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

**EPOKSİ VE VİNİLESTER MATRİS, E-CAMI DOKUMA VE KEÇE DESTEKLİ
KOMPOZİT MALZEMELERDE ÜÇÜNCÜ BİLEŞEN DOLGU MADDELERİNİN
KÜRLEME VE PROSES KOŞULLARINA ETKİSİ**

NESLİHAN TOPALÖMER

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

**DANIŞMAN
PROF. DR. AHMET ÜNAL**

İSTANBUL, 2016

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EPOKSİ VE VİNİLESTER MATRİS, E-CAMI DOKUMA VE KEÇE DESTEKLİ
KOMPOZİT MALZEMELERDE ÜÇÜNCÜ BİLEŞEN DOLGU MADDELERİNİN
KÜRLEME VE PROSES KOŞULLARINA ETKİSİ**

Neslihan TOPALÖMER tarafından hazırlanan tez çalışması 19.07.2016 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

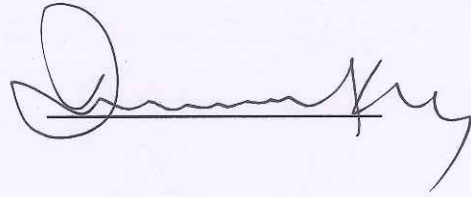
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Erdem DEMİRKESEN

İstanbul Teknik Üniversitesi









Bu alışma, 2210-D Sanayiye Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı (2015-2) kapsamında Tübitak ve Mir Ar-ge tarafından desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı Üretim Programı'na bağlı olarak yürütülen tez çalışmasında termoset matrisli malzemeler üzerinde çalışılmıştır. Çalışmada epoksi ve vinilester matris malzemesi kullanılarak matris içerisine çeşitli dolgu malzemeleri eklenerek üretim gerçekleştirilmiş ve çeşitli testler yardımı ile üretim sonrası karakterizasyon işlemi başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca engin bilgi ve tecrübeleriyle beni her zaman destekleyen, yol gösteren, lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince her zaman yanımda olan yardımlarını esirgemeyen çok saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet ÜNAL' a en derin teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında benden yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen saygıdeğer hocam Arş. Gör. Dr. Aylin ALTINBAY BEKEM' e çok teşekkür ederim. Ayrıca eğitim hayatım boyunca üzerimde hakkı olan bütün hocalarıma emekleri için çok teşekkür ederim.

Tez çalışması boyunca gerekli hammadde teminlerini sağlayan, her türlü makine, teçhizat kullanımına müsaade eden, başta bu imkanı bana sağlayan Mir Holding Yönetim Kurulu Başkanı Sayın İbrahim MİRMAHMUTOĞULLARI, Mir Ar-ge Müdürü Sayın Dr. Zafer GEMİCİ, Mir Ar-ge Malzeme ve Kimya Araştırmaları Müdürü Sayın Dr. Mustafa Doğu ve Malzeme Geliştirme Birimi Ekip Lideri Yüksek Mühendis Duygu Gülfem BAYDAR olmak üzere Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş.' ye ve tüm çalışanlarına teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmamızı "2210-D Sanayiye Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı" kapsamında destekleyen Tübitak' a en derin teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim hayatım boyunca yanımda olan beni her zaman destekleyen, güç veren sevgili annem Saliha TOPALÖMER, ablam Melike TOPALÖMER ve kardeşim Ömercan TOPALÖMER' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmam kıymetli babam Hüseyin TOPALÖMER' e adanmıştır.

Haziran, 2016

Neslihan TOPALÖMER

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
ABSTRACT.....	xvii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez.....	3
BÖLÜM 2	
KOMPOZİT MALZEMELERE GİRİŞ	5
2.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	6
2.1.1 Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler.....	7
2.1.1.1 Metal Matrisli Kompozit Malzemeler	7
2.1.1.2 Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler.....	8
2.1.1.3 Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler	8
2.1.2 Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler	9
2.1.2.1 Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	9
2.1.2.2 Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	10
2.1.3 Makro Görünümüne Göre Kompozit Malzemeler	10
2.2 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	11

BÖLÜM 3

POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER	15
3.1 Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	16
3.1.1 Termoplastik Matrisli Malzemeler	16
3.1.2 Termoset Matrisli Malzemeler	18
3.1.2.1 Polyester	19
3.1.2.2 Epoksi	20
3.1.2.3 Vinilester	21
3.2 Fiber Malzemeleri	22
3.2.1 Cam Fiberler	23
3.2.2 Karbon Fiber	25
3.3 Kompozit Malzemelerde Dolgu Maddesi Kullanımı	25
3.3.1 Dolgu Maddelerinin Genel Özellikleri	26
3.3.2 Dolgu Maddesi Seçimi	27
3.3.2.1 Kalsiyum Karbonat	27
3.3.2.2 Alüminyum Hidroksit	28
3.3.2.3 Kaolen.....	28
3.3.2.4 Talk	29
3.3.2.5 Huntit	29

BÖLÜM 4

KOMPOZİT MALZEMELER TEORİSİ.....	29
4.1 Kompozit Malzemelerin Mikromekaniği.....	30
4.1.1 Karışımlar Kuralı.....	31
4.1.2 Mekanik Özelliklerin İncelenmesi.....	32
4.1.2.1 Elastik Özelliklerin Analizi.....	32
4.1.2.2 Halpin-Tsai Eşitlikleri	38
4.1.3 Yöne Bağlı Özelliklerin Analizi.....	41
4.1.4 Fiberlerin Dokuda Dağılımının Analizi	41
4.1.5 Isıl Özellikler.....	42
4.1.5.1 Isıl Genleşme Katsayısı	42
4.1.5.2 Isıl İletkenlik Katsayısı.....	43
4.2 Kompozitlerin Makromekaniği	44

BÖLÜM 5

KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	51
5.1 El Yatırması Yöntemi	52
5.2 Profil Çekme Yöntemi	52
5.3 Elyaf Sarma Yöntemi	53
5.4 reçine Transfer Yöntemi.....	54
5.5 Otoklav Yöntemi	55
5.6 Vakum Torbalama Yöntemi	56
5.7 Vakum İnfüzyon Yöntemi.....	57

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	59
6.1 Kullanılan Malzemeler	59
6.1.1 Fiber Malzemeleri.....	59
6.1.2 Matris Malzemeleri	60
6.1.3 Dolgu Malzemeleri	61
6.2 Numunelerin Hazırlanması	62
6.2.1 Test Numunelerinin Kodlandırılması	62
6.3 Plaka Üretimi.....	64
6.4 Mekanik Deneyler	68
6.4.1 Çekme Deneyi.....	68
6.4.2 Eğme Deneyi	70
6.4.3 Darbe Deneyi	71
6.4.4 D Sertlik Deneyi	73
6.5 Fiziksel Deneyler	74
6.5.1 Kalsinasyon Deneyi.....	74
6.5.2 Yoğunluk Deneyi	75
6.6 Mikroskobik Görüntüleme	76

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE BULGULAR.....	79
7.1 Epoksi Matris İçin Deney Sonuçları.....	79
7.1.1 Çekme Deneyi.....	79
7.1.2 Eğme Deneyi	83
7.1.3 Darbe Deneyi	88
7.1.4 Shore D Sertlik Deneyi	91
7.1.5 Kalsinasyon Deneyi	95
7.1.6 Yoğunluk	96
7.2 Vinilester Matris İçin Uygulanan Deney Sonuçlarının İrdelenmesi	98
7.2.1 Çekme Deneyi.....	98
7.2.2 Eğme Deneyi	102
7.2.3 Darbe Deneyi	106
7.2.4 Shore D Sertlik Deneyi	110
7.2.5 Kalsinasyon	113
7.2.6 Yoğunluk	114
7.3 Mikroskobik Görüntüleme Sonuçlarının İrdelenmesi.....	115
7.4 Maliyet Açısından İrdeleme	120
7.4.1 Epoksi Matris İçin İrdeleme	120
7.4.2 Vinilester Matris İçin İrdeleme	122

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	124
KAYNAKLAR.....	127

ÖZGEÇMİŞ.....	132
---------------	-----



SİMGE LİSTESİ

σ	Gerilim
τ	Kayma gerilmesi
ν	Poisson oranı
V_f	Fiber hacim oranı
V_v	Boşluk Hacmi
CH_3	Metil
d_t	Teorik yoğunluk
d_d	Deneysel Yoğunluk
E	Elastiklik Modülü
ε	Gerinim
G	Kayma modülü
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
LDPE	Alçak yoğunluklu polietilen
l_c	Kritik boy
ρ	Yoğunluk

KISALTMA LİSTESİ

ABS	Akrilonitril bütadiyen sitiren
BMC	Bulk Mould Compound
CTP	Cam Takviyeli Plastik
HEMA	Hidroksil Metakrilat Poliüretan
HDPE	High Density Polyethylene
LDPE	Low Density Polyethylene
LPA	Düşük orantılı katkı malzemesi
MEK	Metil Etil Keton
MEK-P	Mekperoksit
MMK	Metal Matrisli kompozit
PA	Poliamid
PAN	Poliakrilonitril (Polyacrylonitrile)
PC	Policarbonate (Polikarbonat)
PE	Polietilen
PEEK	Polietereterketon
PET	Polietilenteraftalat (Polyethylene teraphthalate)
PMMA	Polimetilmetakrilat (Polymethylmethacrylate)
PMK	Polimer Matrisli Kompozit
PP	Polipropilen
PS	Polisitiren
PVC	Poly Vinyl Chloride
RTM	Resin Transfere Method
SMK	Seramik Matrisli Kompozit
SMC	Sheet Molding Compound
TY	Teorik Yoğunluk

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Kompozit malzemelerde takviye ve matris elemanının gösterimi	5
Şekil 2. 2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	7
Şekil 2. 3 Takviye elemanına göre kompozit malzemeler	9
Şekil 2. 4 Alüminyum alaşımından üretilmiş sandviç yapı	10
Şekil 3. 1 Termoset matrisli malzemelerde çapraz bağ yapısı.....	18
Şekil 3. 2 Bazı termoset matrisli malzemelerin kimyasal yapısı: a) Epoksi, b) Doymamış Polyester, c) Fenolik Reçine, d) Vinilester.....	19
Şekil 3. 3 Polyester kimyasal yapısı.....	20
Şekil 3. 4 Epoksi kimyasal yapısı.....	21
Şekil 3. 5 Vinilester kimyasal yapısı.....	21
Şekil 3. 6: Fiber dokuma türleri.....	22
Şekil 4. 1 Fiberlerin matris içindeki dizilimi a.kare b.altıgen c.rastgele.....	36
Şekil 4. 2 Enine izotropik fiberli kompozit yapısı	37
Şekil 4. 3 a.Eş yönlü sürekli fiberli plaka kesiti b. Bu plakada altıgen ve kare görünüm.	40
Şekil 4. 4 Asal yönlerin şematik gösterimi	45
Şekil 4. 5 İç basınca maruz kapların şematik gösterimi	50
Şekil 5. 1 Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri.....	51
Şekil 5. 2 El yatırması yöntemi	52
Şekil 5. 3 Profil çekme yöntemi.....	53
Şekil 5. 4 Elyaf sarma yöntemi	54
Şekil 5. 5 Reçine transfer yöntemi	55
Şekil 5. 6 Otoklav yönteminin şematik gösterimi	56
Şekil 5. 7 Vakum torbalama yöntemi.....	57
Şekil 5. 8 Vakum infüzyon yöntemi.....	58
Şekil 6. 1 Vakum infüzyon için gerekli sarf malzemeleri ve donanımlar.....	65
Şekil 6. 2 Vakum infüzyon hazırlık aşaması.....	66
Şekil 6. 3 Vakum infüzyon sistemi	66
Şekil 6. 4 Vinilester matrisli kompozit plaka	67
Şekil 6. 5 Test numunelerinin kesiminde kullanılan testere	69
Şekil 6. 6 Çekme başlıkları takılı Instron 3369 model	69
Şekil 6. 7 Çekme deneyi sırasında kopma gerçekleşen numune	70
Şekil 6. 8 Eğme deneyi için eğme aparatları takılı Instron 3369 model test cihazı.....	71
Şekil 6. 9 Eğme deneyi sırasında baskıya maruz kalarak eğilen numune	71

Şekil 6. 10 Darbe deneyi sırasında kullanılan darbe cihazı	73
Şekil 6. 11 Shore D sertlik ölçümü için kullanılan "Barcoll" sertlik cihazı	73
Şekil 6. 12 Kalsinasyon işlemi için kullanılan "Protherm" marka kül fırını.....	75
Şekil 6. 13 Dardırma yöntemi ile yoğunluk ölçümü için kullanılan cihaz.....	76
Şekil 6. 14 Phenom marka "Pro" model taramalı elektron mikroskobu	76
Şekil 6. 15 Görüntülenecek numunelerin kaplama öncesinde kalıba yerleştirilmesi.....	77
Şekil 6. 16 Sem numuneleri için altın kaplama cihazı	77
Şekil 6. 17 Altın kaplama işlemi parametreleri	78
Şekil 7. 1 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin çekme dayanımı grafiği.....	81
Şekil 7. 2 Epoksi matrisli fiber takviyeli numunelerin çekme dayanımı grafiği.....	82
Şekil 7. 3 Epoksi matrisli numunelerin çekme dayanımı grafiği	83
Şekil 7. 4 Epoksi matrisli fiber takviyeiz numunelerin eğme dayanımı grafiği.....	85
Şekil 7. 5 Epoksi matrisli E-camı takviyeli numunelerin eğme dayanımı grafiği.....	87
Şekil 7. 6 Epoksi matrisli numunelerin eğme dayanımı grafiği	87
Şekil 7. 7 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numuneler için darbe kırılma tokluğu grafiği.	89
Şekil 7. 8 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin darbe kırılma tokluğu grafiği	91
Şekil 7. 9 Epoksi matrisli numuneler için elde edilen darbe kırılma tokluğu grafiği.....	91
Şekil 7. 10 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin Shore D sertlik değerlerinden elde edile grafik.....	93
Şekil 7. 11 Epoksi matrisli E-camı takviyeli numunelerin sertlik grafiği.....	94
Şekil 7. 12 Epoksi matrisli numuneler için elde edilen Shore D sertlik grafiği.....	95
Şekil 7. 13 Epoksi matrisli numunelerin yoğunluk grafiği	98
Şekil 7. 14 Vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin çekme dayanımı grafiği ...	100
Şekil 7. 15 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin çekme dayanımı grafiği ..	101
Şekil 7. 16 Vinilester matrisli numunelerin çekme dayanımı grafiği	102
Şekil 7. 17 Vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin eğme dayanımı grafiği.....	104
Şekil 7. 18 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin eğme dayanımı grafiği	105
Şekil 7. 19 Vinilester matrisli numunelerin eğme dayanımı grafiği	106
Şekil 7. 20 Vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin darbe kırılma tokluğu grafiği	108
Şekil 7. 21 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin darbe kırılma tokluğu grafiği	109
Şekil 7. 22 Vinilester matrisli numunelerin darbe kırılma tokluğu grafiği	110
Şekil 7. 23 Vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin Shore D sertlik grafiği	111
Şekil 7. 24 Vinilester matrisli fiber takviyeli numunelerin Shore D sertlik değerleri	113
Şekil 7. 25 Vinilester matrisli numunelerin Shore D sertlik grafiği	113
Şekil 7. 26 Vinilester matrisli numunelerin yoğunluk grafiği	115
Şekil 7. 27 Epoksi matrisli E-camı takviyeli %10 kalsit dolgulu numunenin sem görüntüsü.....	116
Şekil 7. 28 Epoksi matrisli fiber takviyesiz %10 kalsit dolgulu numunenin sem görüntüsü	116
Şekil 7. 29 Epoksi matrisli E-camı fiber takviyeli %10 alüminyum hidroksit dolgulu yapının sem görüntüsü	117
Şekil 7. 30 Epoksi matrisli fiber takviyesiz %10 alüminyum hidroksit dolgulu yapının sem görüntüsü.....	117

Şekil 7. 31 Vinilester matrisli E-camı fiber takviyeli %10 kalsit dolgulu numune	118
Şekil 7. 32 Vinilester matrisli fiber takviyesiz %10 kalsit dolgulu numuneden alınan sem görüntüsü.....	119
Şekil 7. 33 Vinilester matrisli E-camı fiber takviyeli %10 alüminyum hidroksit dolgulu numuneden elde edilen sem görüntüsü.....	119
Şekil 7. 34 Vinilester matrisli fiber takviyesiz %10 alüminyum hidroksit dolgulu numunenin sem görüntüsü	120



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1 Kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları	6
Çizelge 2. 2 Bazı seramik matrisli kompozitlerin yanma sıcaklıkları	8
Çizelge 2. 3 ABD'nin 1993-2000 yılları arasında “milyon kg” kompozit malzeme ithalatı	11
Çizelge 3. 1 Belli başlı termoplastik esaslı polimerler ve özellikleri.....	17
Çizelge 3. 2 Cam fiber türlerinin içerikleri.....	23
Çizelge 3. 3 Belli başlı cam fiber türlerinin mekanik özellikleri.....	24
Çizelge 3. 4 Plastikler için kullanılan dolgu malzemelerinin sınıflandırılması.....	26
Çizelge 6. 1 Kullanılan fiber malzemelerin özellikleri.....	60
Çizelge 6. 2 Polires 188 epoksi reçine özellikleri.....	60
Çizelge 6. 3 Polives 701 epoksi reçine özellikleri	61
Çizelge 6. 4 Test numunelerinin kodlandırılması.....	62
Çizelge 6. 5 Üretilen kompozit plakalara uygulanan testler ve standartları.....	68
Çizelge 7. 1 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin çekme deneyi sonuçları.....	79
Çizelge 7. 2 Epoksi matrisli fiber takviyeli numunelerin çekme deneyi sonuçları.....	81
Çizelge 7. 3 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin eğme deneyi sonucu	83
Çizelge 7. 4 Epoksi matrisli E-camı takviyeli numunelerin eğme deneyi sonucu.....	86
Çizelge 7. 5 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin darbe deneyi sonucu	88
Çizelge 7. 6 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin darbe deneyi sonucu elde edilen veriler	90
Çizelge 7. 7 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin sertlik değerleri	92
Çizelge 7. 8 Epoksi matrisli E-camı takviyeli numunelerin Shore D sertlik değerleri.....	93
Çizelge 7. 9 Kalsinasyon öncesi ve sonrası tartım sonuçları	96
Çizelge 7. 10 Epoksi matrisli numuneler için elde edilen yoğunluk değerleri	97
Çizelge 7. 11 Vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin çekme deneyi sonucu....	99
Çizelge 7. 12 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin çekme deneyi sonucu .	100
Çizelge 7. 13 Vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin eğme deneyi sonucu....	103
Çizelge 7. 14 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin eğme deneyi sonucu ..	104
Çizelge 7. 15 Vinilester matrisli fiber takviyeli numunelerin darbe deneyi sonucu	106
Çizelge 7. 16 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin darbe deneyi sonucu ..	108
Çizelge 7. 17 Vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin Shore D sertlik değerleri	110

Çizelge 7. 18 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin Shore D sertlik değerleri	112
Çizelge 7. 19 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin kalsinasyon öncesi ve sonrası tartım sonuçları	114
Çizelge 7. 20 Vinilester matrisli numuneler için elde edilen yoğunluk değerleri.....	114
Çizelge 7. 21 Epoksi matrisli kompozit malzeme üretiminde kullanılan sarf malzeme fiyatları	121
Çizelge 7. 22 Vinilester matrisli kompozit malzeme üretiminde kullanılan sarf malzeme fiyatları	122



EPOKSİ VE VİNİLESTER MATRİSLİ, E-CAMI DOKUMA VE KEÇE DESTEKLİ KOMPOZİTLERDE ÜÇÜNCÜ BİLEŞEN DOLGU MADDELERİNİN KÜRLEME VE PROSES KOŞULLARINA ETKİSİ

Neslihan TOPALÖMER

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet ÜNAL

Günümüzde termoset matrisli kompozit malzemelerin gelişimi dokuya üçüncü bileşenin ilavesi ile olmaktadır. Bu çalışmada belirtilen ana fikirden yola çıkarak epoksi ve vinilester reçineli, E- camı (dokuma ve keçe) destekli kompozitler de üçüncü bileşen olarak kalsit ve alüminyum hidroksit etkisi incelenmiştir.

Çalışmada matris malzemesi olarak epoksi ve vinilester, dolgu malzemesi olarak ise kalsit ve alüminyum hidroksit kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak ise E-camı tercih edilmiştir. Ayrıca üretim aşamasında yapıya katılacak dolgu maddeleri kalsit ve alüminyum hidroksit oranları ise %5, %10 ve %15 olarak belirlenmiştir. Üretim yöntemi olarak ise vakum infüzyon yöntemi uygulanmıştır.

Plaka üretimi E-camı takviyeli ve E-camı takviyesiz olmak üzere 2 ana grupta gerçekleştirilmiştir. Üretilen plakalar; %5, %10, %15 kalsit içeren epoksi matrisli ve E-camı takviyeli kompozit malzeme, %5, %10, %15 alüminyum hidroksit içeren epoksi matrisli ve E-camı takviyeli kompozit malzeme, %5, %10, %15 kalsit içeren vinilester matrisli ve E-camı takviyeli kompozit malzeme, %5, %10, %15 alüminyum hidroksit içeren vinilester matrisli ve E-camı takviyeli kompozit malzeme, dolgu maddesi içermeyen epoksi matrisli E-camı takviyeli kompozit malzeme, dolgu maddesi içermeyen vinilester matrisli kompozit malzeme, %5, %10, %15 kalsit içeren epoksi

matrisli kompozit, %5, %10, %15 alüminyum hidroksit içeren epoksi matrisli kompozit malzeme, %5, %10, %15 kalsit içeren vinilester matrisli kompozit malzeme, %5, %10, %15 alüminyum hidroksit içeren vinilester matrisli kompozit malzeme, dolgu maddesi içermeyen epoksi matrisli kompozit ve dolgu maddesi içermeyen vinilester matrisli kompozit olmak üzere toplam 28 adet plaka üretimi yapılmıştır.

Üretim tamamlandıktan sonra numunelere uygulanan mekanik testler; çekme dayanımı, eğme dayanımı, darbe dayanımı ve sertlik, fiziksel testler ise, kalsinasyon ve yoğunluk testleridir. Bunlara ek olarak numunelerin kırık yüzey görüntüleri taramalı elektron mikroskobu (sem) kullanılarak incelenmiştir. Bu deneyler ISO standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Uygulanan mekanik, fiziksel ve analitik testlerin ardından çalışmanın sonucunda hangi durumlarda hangi dolgu maddelerinin kullanılabileceği tespit edilmiş ve proses koşulları değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Plastik matrisli kompozit, epoksi ve vinilester matris, dolgu malzemesi, vakum infüzyon yöntemi.

**THE EFFECT OF THIRD COMPONENT FILLER ON PROCESS AND CURING
CONDITIONS OF E GLASS REINFORCED EPOXY AND VINYL ESTER MATRIX
COMPOSITES**

Neslihan TOPALÖMER

Department of Metallurgical and Material Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Ahmet ÜNAL

In recent days, development of the thermoset matrix composite has been added to structure of third component. Based on this main idea of our study, on epoxy and vinyl ester resin with woven and felt reinforced composites in the third component as calcite and aluminum hydroxide effect will be examined.

In this study, epoxy and vinyl ester was used as matrix materials, calcite and aluminum hydroxide was used as filler, E-glass was used reinforcement material. Also, production method was determined as vacuum infusion and the result of the first practice, prescriptions were prepared for the vacuum infusion and were started to produce the composite plates. In addition, the filler ratio is %5, %10, %15 which was added to structure.

Production was done two main materials group. These plates were E-glass reinforcement composite plates and non E-glass reinforcement composite plates. All the plates; %5, %10, %15 calcite added epoxy matrix E-glass reinforced composite materials, %5, %10, %15 aluminum hydroxide added epoxy matrix E-glass reinforced composite materials, %5, %10, %15 calcite added vinyl ester matrix E-glass reinforced composite materials, %5, %10, %15 aluminum hydroxide added vinyl ester matrix E-

glass reinforced composite materials, %5, %10, %15 calcite added epoxy matrix composite plates, %5, %10, %15 aluminum hydroxide added epoxy matrix composite plates, %5, %10, %15 calcite added vinyl ester matrix composite plates, %5, %10, %15 aluminum hydroxide added vinyl ester matrix composite plates, only epoxy matrix and only vinyl ester matrix plates. Totally, 28 plates were produced.

After the composite plates manufacture was completed some tests were applied to samples. These tests; mechanical (tensile strength, impact strength and hardness values), physical (water absorption, density and fiber volume ratio) and analytic tests (scanning electron microscopy for the surface images of the samples). These tests were applied according to ISO standards

After the production and tests at the end of our study we were determined which cases which filler ratios should be used for production and the process conditions were considered.

Keywords: Thermoset matrix, epoxy and vinyl ester matrix, filler, vacuum infusion method.

1.1 Literatür Özeti

Günümüzde kompozit malzemeler ile ilgili çalışmalar her geçen gün yeni bir boyut kazanmakta olup araştırmacılar için yeni çalışma alanları doğurmaktadır. Havacılık sanayii, savunma sanayii ve otomotiv sanayii başta olmak üzere birçok alanda kompozit malzemelerin kullanımına rastlamak mümkündür.

Kompozit malzemeler kendi içerisinde alt başlıklara ayrılarak sınıflandırılmakla birlikte kompozit kullanımının %90'a yakın bir kısmını sahip olduğu yüksek modül, yüksek dayanım ve yüksek tokluk gibi mekanik özelliklerinden ötürü polimer (plastik) matrisli kompozit malzemeler oluşturmaktadır [1], [2].

Öte yandan kompozit malzemeler fiber malzemeler adı verilen takviye elemanları ile takviyelendirilmektedirler. Fiber malzemeler ile takviye edilen kompozit malzemeler ise fiber takviyesiz olan malzemelere göre çok daha yüksek dayanıma sahip olmaktadır. Bu sebepten ötürü mekanik özelliklerin önemsendiği birçok alanda kompozit yapılar fiber malzemeler ile desteklenmektedir. Fiber malzemelerin içerisinde sahip olduğu özellikler ve ulaşılabilirlik açısından araştırmalarda en sık karşımıza çıkan malzeme türü E-camı olmaktadır.

Polimer malzemelerin bir grubu olan termoset matrisli malzemelerin keşfi 1839 yılında Goodyear' ın doğal plastiğin işlenmesini keşfetmesi ile olmuştur. Daha sonra ise 1909 yılında Leo Baekeland tarafından fenolik reçineler ile ilgili bir çalışma yapılmış ve

beraberinde termoset reçineler ile ilgili çalışmalar hız kazanmış ve 1920'lerin sonu, 1930'ların başında termoset matrisli polimerler ticari ürün boyutuna ulaşmıştır [2].

Bugün gelinen noktada termoset polimerler ile ilgili çalışmalar yapının mekanik özelliklerini iyileştirme amacına yönelik olarak yapı içerisine dolgu maddesi ilavesi olarak devam etmektedir.

Yapıya dolgu maddesi eklenerek özelliklerin incelenmesi ile ilgili öncü çalışmalardan biri Heinold tarafından gerçekleştirilmiştir. Heinold araştırmasında polipropilen (PP) matris içerisine talk eklemiş ve ısı direnci, sertlik değerlerindeki değişimleri gözlemlemiştir. Çalışmanın bir sonraki aşamasında ise yapıya kalsiyum karbonat ve mika eklenmiş ve mikanın ısı direnci ve sertlik değerleri üzerinde talk dolgusundan daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Heinold bu durumu yüzey modifikasyonu ile açıklanmıştır [3].

Subramanion ve çalışma arkadaşlarının dolgu maddesi ile ilgili çalışması ise epoksi reçine içerisinde grafitin sürünme ve aşınma dayanımı üzerine olan etkisinin gözlemlenmesi üzerine olmuştur. Çalışma sonucunda ise grafit etkisiyle kompozit yapının sürtünme katsayısında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca yapı içerisindeki grafit oranının %3 ve üzeri olduğu durumlarda ise aşınma dayancında önemli derecede düşüşler gözlemlenmiştir [4].

Ray Dipa ve çalışma arkadaşları tarafından yürütülen çalışma ise vinilester matrisli kompozit malzeme içerisine %30, %40, %50, %60 oranlarında uçucu küller eklenmesi ve kompozit yapının mekanik özelliklerinin incelenmesi üzerine olmuştur. Sonuç olarak yapıya katılan dolgu maddesi oranı ile başta eğme modülü olmak üzere mekanik özelliklerde düşüşler gözlemlenmiştir [5].

Saleh ve çalışma arkadaşları tarafından ise epoksi matrise ağırlıkça farklı oranlarda dolomit, kuvars ve kalsit içeren uçucu kül ilavesi yapılmış ve bu ilavenin yapının mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Araştırmanın sonucunda ise ağırlıkça artan dolgu maddesi ile birlikte sertlik ve çekme mukavemetinde artış, darbe dayanımında ise azalma tespit edilmiştir [6].

Paiwal tarafından yürütülen çalışma ise cam fiber takviyeli ve kalsit dolgulu kompozit malzemelerde kalsit dolgunun etkisini araştırmak üzerine olmuştur. Çalışma sonucunda

cam fiber oranının artmasıyla mukavemetin arttığı, dolgu maddesi oranının artmasıyla ise mukavemette düşüşler olduğunu tespit edilmiştir [7].

1.2 Tezin Amacı

Çalışmada epoksi ve vinilester termoset matris içerisine üçüncü bileşen yani hibrit dolguların katılımının nihai ürüne etkisi araştırılmak istenmiştir. Kontrol grubunun oluşturulmasından sonra ilk aşamada matris özelliklerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Matris optimizasyonundan sonra 4 kat E-camı dokuma ortada keçe olacak şekilde toplamda 5 katlı (tabakalı) sandviç yapı vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Malzeme üretimi elyaf destekli ve elyaf desteksiz olmak üzere 2 ana grup altında yapılmıştır. Ayrıca 2 farklı matris (epoksi, vinilester) ve değişen oranlarda (%5, %10, %15) yapıya katılan 2 farklı dolgu maddesi (alüminyum hidroksit, kalsit) kullanılmıştır. Kompozit malzeme üretimi tamamlandıktan sonra ise çeşitli karakterizasyon ve mekanik testler yapılarak dolgu maddesinin ve matrisin yapıya olan etkisi incelenmiştir. Bu tür parçaların uygulaması özellikle otomotiv endüstrisinde kullanıldığından hafiflik elde etme yani düşük CO₂ salınımı için önemli adımlar atılması hedeflenmiştir.

Çalışmalar bu hedef doğrultusunda yapılmış, deney kurgulamaları hedef sonuçlarını doğrular mahiyette ede edilmek amacıyla seçilmiştir.

1.3 Hipotez

Termoset matrisli kompozit malzemeler ile ilgili çalışmalar da en büyük sıkıntılardan biri fiber malzemeye reçine emdirme olup, bu sorunun önüne üretim yöntemi olarak vakum infüzyon yönteminin tercih edilmesiyle geçilebilmektedir. Ayrıca vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilen son ürün daha kaliteli olup, mekanik özellikleri de daha iyi olmaktadır. Bu gerçekten yola çıkarak söz konusu sorunların giderilmesi hipotezin 1. aşamasını oluşturmaktadır.

Matris içerisine dolgu maddelerinin ilavesi öncelikle seri üretimlerde maliyeti düşürücü etki göstermektedir. Diğer taraftan dolgu ilavesinin mekanik özellikleri, orijinal malzemeye göre olumsuz yönde etkilediği de bir gerçektir. Çalışmanın hipotez

kurgusunun ikinci amacı söz konusu çapraz etkiden yola çıkarak optimizasyon koşullarının saptanmasıdır.

Kontrol grubunu oluşturan matrisin mikromekanik özelliklerinin saptanmasından sonra; tabaka yapısının etkisi yani makromekanik özelliklerin belirlenmesi hipotezin son aşamasını oluşturmaktadır. Çok katlı yapıların mekanik özellikleri önemli ölçüde arttırmasının yanında, darbe dayancı gibi tabaka ayrılmasına neden olacak etkilerin belirlenmesi hedefi ile çalışılmıştır.



Kompozit malzemeler fiziksel ve kimyasal özellikleri birbirinden farklı, birbiri içerisinde çözünmeyen 2 veya daha fazla bileşenin bir araya gelmesiyle oluşan malzemelerdir. Kompozit malzemelerin en büyük avantajı kendisini meydana getiren bileşenlerden daha üstün özelliklere sahip olmasıdır.



Kompozit malzemeler belirtilen takviye ve matris elemanının bir araya gelmesiyle çok önemli özelliklere sahip olmaktadır. Sahip oldukları özellikler dolayısı ile de fazlasıyla ön plana çıkmaktadırlar. Bahsi geçen bu özelliklerden birkaçı hafiflik, yüksek tokluk ve yüksek modül olarak sıralanabilmektedir. Kompozit malzemeler her ne kadar çoğunlukla üstün özellikleri ise anılsalar da yüksek maliyeti, üretimde zorluk ve üstün işçilik gerektiren üretim yöntemlerine sahip olması ile de daha geniş alanlarda kullanımı kısıtlanmaktadır. Çizelge 2. 1’de kompozit malzemelerin belli başlı avantajları ve dezavantajları belirtilmiştir.

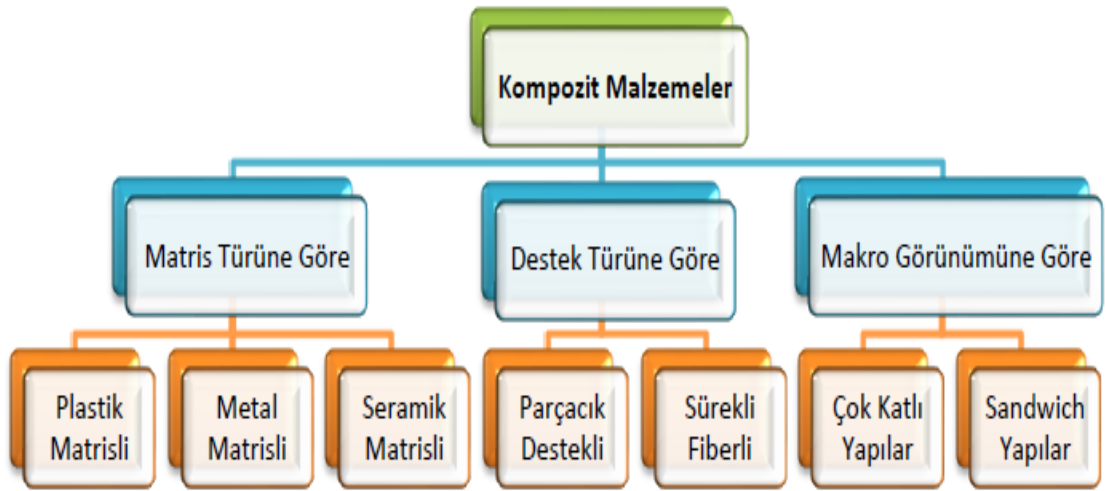
Çizelge 2. 1 Kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları [8], [10]

Avantajlar	Dezavantajlar
Yüksek dayanım	Üretimde göreceli zorluk
Yüksek tokluk	Zarar gören yapının onarımında göreceli zorluk
Hafiflik	Yüksek hammadde fiyatı
Kimyasallara ve korozyona dayanım	Hammaddelerin sınırlı raf ömrü
Düşük termal genleşme	

2.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler elde edilmek istenilen özellikler doğrultusunda matris ve takviye elemanının bir araya gelmesiyle meydana gelmektedirler. Bu bağlamda matris ve takviye elemanı göz önünde bulundurularak; matris türüne, destek türüne ve makro görünümüne göre olmak üzere 3 ana başlık altında sınıflandırılmaktadır. Şekil 2. 2’de Kompozit malzemelerin en genel hali ile sınıflandırılması görülmektedir [11], [12].

Bu sınıflandırma dikkate alınarak bir değerlendirme yapılacak olursa ise; araştırmalarda çoğunlukla karşımıza çıkan sınıflandırma matris türüne göre yapılmaktadır.



Şekil 2. 2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [11]

2.1.1 Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler

Matris elemanı kompozit malzemenin sürekli fazını oluşturmakta ve yapıya rijitlik kazandırmaktadır. Ayrıca matris malzemesinin ana görevi kompozit malzemeye bir form vermektir. Matris elemanının en önemli işlevlerinden biri fiberlerin etrafını sararak bir arada tutmaktır. Kompozit yapıda matris elemanının diğer önemli işlevi ise, malzemeye herhangi bir yük gelmesi durumunda gelen yükü fiberlere aktararak oluşabilecek herhangi bir çatlakın ilerlemesini yavaşlatmaktır. Bunun dışında matris malzemesi fiberleri kimyasal saldırılardan, mekanik aşınmadan ve çevresel faktörlerden korur. Ayrıca matris elemanı kompozit malzemenin tokluk, süneklik, darbe dayanımı gibi performans özellikleri üzerinde oldukça etkilidir [8], [13].

Matris malzemesine göre kompozitler; polimer matrisli, metal matrisli ve seramik matrisli kompozitler olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

2.1.1.1 Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Metal matrisli kompozit malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılan ve tercih edilen matris malzemesi, hafif metaller ve alaşımlar olmaktadır. Genellikle alüminyum, magnezyum, nikel, bakır ve çinko metal matrisli kompozit yapılarda matris malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Hafif metal alaşımları sahip olduğu yüksek dayanım ve

özgül ağırlık oranı sebebiyle özellikle hafif yapı konstrüksiyonlarda tercih edilmektedirler [8], [12], [14].

Metal matrisli kompozitlerin üretiminde matris malzemesi ile birlikte yaygın olarak kullanılan takviye malzemeleri ise silisyum karbür, bor karbür ve alümina olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kompozit yapılar çoğunlukla otomotiv, havacılık ve savunma sanayiinde kullanılmaktadırlar.

2.1.1.2 Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

Seramik malzemeler; yüksek sıcaklık dayanımı, göreceli düşük yoğunluk, ısıl şok direnci, düşük tokluk gibi özelliklere sahip malzemelerdir. Bu bağlamda seramik malzemenin kompozit yapıda matris olarak kullanıldığı durumlarda belirtilen özellikler kompozit içinde geçerli olmaktadır. Seramik matrisler, seramik malzemenin sahip olduğu yüksek sıcaklık dayanımı sebebi ile özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmektedirler. Çizelge 2. 3’de bazı seramik matrisli kompozitlerin yanma sıcaklıkları belirtilmiştir. Çizelge 2. 2’de belirtilen seramik matrislerden en sık kullanılanları ise silisyum ve alüminyum hidroksittir [12].

Seramik matrisli kompozit malzemelerin çoğunluklu kullanıldığı alanlar ise uzay araçları yapımı ve askeri araç, zırh yapımı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çizelge 2. 2 Bazı seramik matrisli kompozitlerin yanma sıcaklıkları [12]

Kompozit	Sıcaklık, °C	Kompozit	Sıcaklık, °C
$\text{MoSe}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$	3300	$\text{MoB} + \text{Al}_2\text{O}_3$	4000
$\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$	6000	$6\text{VN} + \text{Al}_2\text{O}_3$	4800

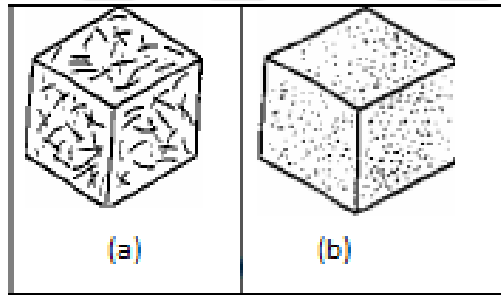
2.1.1.3 Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler

Polimer matris kompozit yapılarda matris malzemesi olarak en çok karşımıza çıkan malzeme grubudur. Polimerler, genel olarak termoplastik ve termoset olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadırlar. Yüksek oranda çapraz bağ içeren termoset polimerler

yüksek sıcaklıklara dayanım sağlamakta, kompozit malzeme üretiminde matris malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Termoset reçinelere örnek verecek olursak ise epoksi, polyester ve vinilester sıklıkla karşımıza çıkan belirtilen malzeme grubuna ait matris malzemelerindendir. Termoplastik polimerler ise yapılarında çapraz bağ bulundurmazlar ve sıcaklık uygulaması ile birlikte yumuşamakta, düşük sıcaklıklarda katılaşmaktadırlar. Sıklıkla karşımıza çıkan termoplastik matrisli malzemelere polipropilen ve polietilen örnek olarak verilebilir [1], [15], [16].

2.1.2 Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerin temel özelliklerinin büyük çoğunluğu kompoziti meydana getiren temel elemanların özelliklerine bağlı olmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında kompozit malzeme üretiminde kullanılan takviye elemanı büyük önem taşımaktadır. Kompozit yapılarda takviye elemanı olarak genellikle fiber adı verilen malzeme grubu kullanılırken, bazen de küresel ya da parçacık formunda olan partiküllerde takviye elemanı olarak kullanılabilir. Şekil 2. 3’de takviye elemanına göre kompozitler şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2. 3 Takviye elemanına göre kompozit malzemeler [8]
(a) Fiber takviyeli kompozit yapısı (b) Partikül takviyeli kompozit yapısı

2.1.2.1 Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

Fiber takviyeli kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanı “ fiber malzemeler” olarak adlandırılmaktadır. Kompozit yapıda takviye görevi yapan fiberler yapıda sürekli, uzun/kısa, gelişigüzel gibi farklı konfigürasyonlarda bulunabilmektedirler. Ayrıca belirtilen bu farklı konfigürasyonlardaki dağılım ile fiberlerin yoğunluğu, türü kompozit malzemede son ürün özelliklerini doğrudan etkilemektedirler [8], [16].

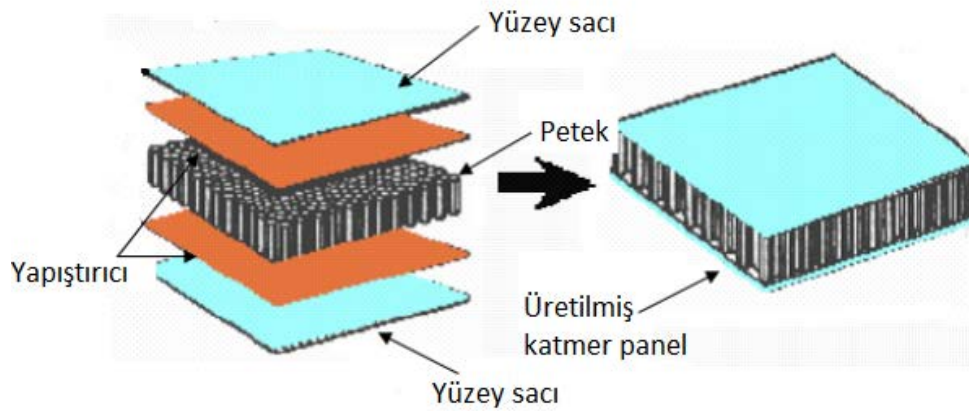
2.1.2.2 Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler

Partikül takviyeli kompozitler malzemeler farklı boyutlardaki partiküllerin matris malzemesi içerisine rastgele dağılması ile meydana gelmektedirler. Partiküllerin rastgele dağılımı dolayısıyla bu kompozit malzemelerin homojen özelliklere sahip olduğu kabul edilmektedir [12].

2.1.3 Makro Görünümüne Göre Kompozit Malzemeler

Makro görünümüne göre kompozit malzemeler çok katlı (tabaka yapılı) kompozitler ve sandviç yapılı kompozitler olmak üzere 2 başlık altında incelenmektedir.

Tabaka yapılı kompozit malzemeler birbirinden farklı özellikler barındıran en az 2 tabakanın bir araya gelmesiyle oluşurlar. Sandviç yapılar genellikle “honeycomb (bal peteği)” olarak anılmaktadırlar Sandviç yapılı kompozitler ise matris malzemesi ile bir dolgu malzemesinin bir araya gelmesi sonucu oluşmaktadır. Şekil 2. 4’de alüminyum alaşımından üretilen sandviç yapıda da görüldüğü üzere peteğin alt ve üst tabakasının yapıştırıcı ile petek ile birleşmesi sağlanır. Şekil 2. 4’de yüzey sacı olarak belirtilen peteğin alt ve üst tabakaları her ikisi de metal olabileceği gibi biri metal diğeri farklı bir malzeme olabilir. Petek yapının özellikleri çok yüksek oranda bir arada bulunduğu yüzey sacının özelliklerine bağlı olmaktadır. Sıklıkla karşımıza çıkan petek yapılar ise alüminyum petekler ve aramid fiber peteklerdir. Petek yapılar sahip olduğu yüksek dayanım, düşük yoğunluk, hafiflik sebebi ile özellikle havacılık sektöründe ki kullanımı çok büyük bir paya sahiptir [8], [11].



Şekil 2. 4 Alüminyum alaşımından üretilmiş sandviç yapı [10]

2.2 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemelerin kullanım alanı her geçen yıl genişlemekle beraber buna bağlı olarak kullanım oranında da artışlar olmaktadır. Çizelge 2. 3’de 1993-2000 yılları arasındaki kompozit malzeme ithalatı “milyon/kg” cinsinden gösterilmektedir.

Çizelge 2. 3 ABD'nin 1993-2000 yılları arasında “milyon kg” kompozit malzeme ithalatı [18]

Pazar	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Uçak-Uzay Sanayi	11.5	11.0	10.8	10.5	9.8	9.3	8.0	7.3
İnşaat	240.4	270.7	300.5	340.2	370	410.8	440	470.2
Korozyona Dayanıklı Ürünler	159.7	170.7	180.3	192	200.5	210.3	220	231.4
Ulaşım	372.9	428.9	470	510.3	564.7	613.4	650.2	712
Diğer	40.5	46.2	50.3	56.2	62.5	66.7	71.8	76.3
Toplam	1236.6	1380.4	1494.2	1618.6	1740.3	1872.4	1983.5	2130.4

Havacılık Sanayi;

Özellikle ileri kompozit malzemeler havacılık sanayinde çok geniş uygulama alanları bulmaktadır. Kompozit malzemelerin sahip olduğu hafiflik ve üstün mekanik özellikler, havacılık sektöründe birçok ihtiyaca cevap vermekte ve yüksek oranda kullanılmaktadır. Aşağıdaki kısımda havacılık sanayiinde yapımında kompozit malzeme kullanılan kısımlar belirtilmiştir [19].

- ✓ B2 bombardıman uçağı gövde panelleri,
- ✓ A380 yolcu uçağı kanat panelleri ve flapler,

- ✓ A380 yolcu uçağı burun bölümü,
- ✓ A380 yolcu uçağı dikey stabilizeri,
- ✓ Uçak EAPS kapağı.

Denizcilik Sanayi;

Denizcilik sanayisinde karşımıza çıkan kompozit yapılardan bir kısmı aşağıdaki gibi sıralanmaktadır;

- ✓ Yelkenli Gövdesi,
- ✓ Yat, Tekne Arkası Platformu,
- ✓ Tekne basamakları,
- ✓ Yelken Direğı.

Spor Araçları;

Kompozit malzemelerin popüler olduğı yeni sektörler arasında spor araç ve gereçleri her geçen gün daha da öne çıkmaktadır. Spor araç ve gereçlerinde kompozit malzemelerin kullanılması özellikle ağırlığın azalmasında etkili olmaktadır. Aşağıda kompozit malzemelerin kullanıldığı spor araç gereçlerine bazı örnekler verilmiştir [8].

- ✓ Su kayağı,
- ✓ Kar kayağı,
- ✓ Kano küreğı,
- ✓ Su kaydırakları,
- ✓ Sörf Tahtaları,
- ✓ Bisiklet,
- ✓ Golf Sopası,
- ✓ Tenis Raketi,
- ✓ Zıpkın Gövdesi.

Sağlık;

Sağlık sekt6r6 de hemen hemen t6m end6striyel alanlarda olduğu kompozit malzemelerin 6st6n 6zelliklerinden faydalanmaktadır. Sağlık alanında karşımıza çıkan kompozit yapılar;

- ✓ Tekerlekli sandalye,
- ✓ Tıbbi tetkik cihazları.

Ulaşım;

Ulaşım sekt6r6nde kompozit yapılar oldukça sık tercih edilmektedir. 6zellikle bu alanda karşımıza çıkan son 6rneklerden biri g6vde kısmı cam elyaf takviyeli sandviç yapıdan oluşan otob6s imali olmuştur. Kompozit yapı kullanılarak 6retilen bu toplu taşıma aracının en b6y6k avantajı; kompozit sayesinde g6vde kısmının çok hafif olması ve bu sayede daha d6ř6k yakıt t6ketime sahip olmasıdır. Ayrıca belirtilen bu 6zellik d6ř6k emisyonu sahip olma 6zelliğini de beraberinde getirmektedir. Ulaşım sekt6r6nde kompozit yapıların kullanıldığı daha 6zel 6rnekler ise şu şekilde sıralanabilir;

- ✓ Trakt6r kaporta,
- ✓ Kabin,
- ✓ Toplu taşıma araç koltukları,
- ✓ Açık alan servis araçları kaportası, tavan.

Otomotiv;

Otomotiv sekt6r6nde daha hafif otomobiller 6retmek amacıyla kompozit malzemeler ile ilgili çalışmalar g6n geçtikçe artmaktadır. Hafif otomobiller daha çabuk hızlanabilen, daha çabuk durabilen ilerlemek için daha k66k bir motora ve daha az benzine ihtiyaç duyan araç anlamına gelmektedir. Aşağıda otomotiv sekt6r6nde kullanılan kompozit yapılara 6rnek verilmiştir [19].

- ✓ Cam sileceği,
- ✓ Pedallar,
- ✓ Dikiz aynası,

- ✓ Far gövdesi,
- ✓ Otomobil gösterge paneli,
- ✓ Otomobil yan gövde iskeleti,
- ✓ Otomobil kaporta.

Yapı sektörü;

- ✓ Köprü tabanı,
- ✓ Yürüme yolları,
- ✓ Kapı,
- ✓ Yer karoları,
- ✓ Bina kaplama panelleri,
- ✓ Bina iç aksamı.

POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

Polimerler en genel tanımıyla, mer adı verilen küçük moleküllerin bir araya gelmesi ile oluşan uzun zincir yapısına ve yüksek molekül ağırlığına sahip bileşiklerdir. Polimer malzemeler sahip olduğu düşük üretim maliyeti ve kolay şekil alabilme gibi özelliklerinden birçok alanda karşımıza çıkmaktadırlar. PVC (Polyvinylchloride) ve Teflon (Politetrafloroetilen-PTFE) sıklıkla kullanılan polimer malzemelere örnek olarak verilebilir [9], [20].

Polimer malzemeler kompozit malzeme üretiminde matris malzemesi olarak kullanılmakta ve polimerin matris malzemesi olarak kullanıldığı kompozit yapılar “Polimer matrisli kompozit malzemeler” olarak anılmaktadır. Polimer kompozit malzemelerde en çok kullanılan matris malzemesidir. Polimerlerin sahip olduğu darbe dayanımı, süneklik, hafiflik gibi önemli özelliklerden ötürü polimer matrisli kompozit malzemeler son yıllarda birçok alanda kullanım yeri bulmaktadır.

Polimer ve polimer kompozitlerin kullanıldıkları yapılarda kullanım amacı; en az çelik kadar sağlam, olabildiğince hafif, yüksek sıcaklıklara dayanıklı, yüksek tokluk gibi özelliklere sahip ve ekonomik malzeme üretimidir. Bu amaca yönelik malzeme kullanımına olan ihtiyacın son yıllarda artış göstermesiyle birlikte polimer matrisli kompozitlerin kullanımı da yaygınlaşmıştır [9].

Polimerin matris olarak kullanıldığı yapılara kazandırdığı belli başlı özellikler şu şekilde sıralanabilir;

- ✓ Düşük yoğunluk,
- ✓ Düşük elektriksel direnç,
- ✓ Kimyasal ve korozyon dayanımı,
- ✓ Kolay işlenebilirlik,
- ✓ Yüksek mukavemet,
- ✓ Yüksek rijitlik,
- ✓ Düşük sürtünme katsayısı,
- ✓ Yüksek aşınma dayancı.

3.1 Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Polimer matrisli kompozit malzemeler, kendi içerisinde termoset matrisli kompozit malzemeler ve termoplastik matrisli kompozit malzemeler olarak ayrılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan termoset matrisli malzemeler; epoksi, polyester ve vinilester örnek olarak verilebilir. Polietilen, polipropilen ve poliamid ise yaygın olarak kullanılan termoplastik matrisli malzeme örnekleridir [11].

3.1.1 Termoplastik Matrisli Malzemeler

Termoplastik matrisli malzemeler içerisinde zayıf van der waals bağlarını barındıran, uzun molekül zincirlerinin bir araya getirdiği malzemelerdir. Bu malzemeler karakteristik olarak ısı ile beraber şekil değiştirebilme yani proses edilebilme özelliğine sahiptir. Ayrıca termoplastik malzemelerin ısı ile şekil değiştirme özelliği bir defaya mahsus değil tekrarlanabilen bir prosestir. Bu özelliği termoplastik matrisli malzemelerin en büyük avantajını yani geri dönüşüm özelliğini mümkün kılmaktadır. Çizelge 3. 1’de belli başlı termoplastik esaslı polimerler ve özellikleri belirtilmiştir [9], [21], [22].

Termoplastik malzemelerin sahip olması istenen belli başlı özellikler;

- ✓ Yüksek direnç,
- ✓ Yüksek ısı dayanımı,
- ✓ Kolay işlenebilir.

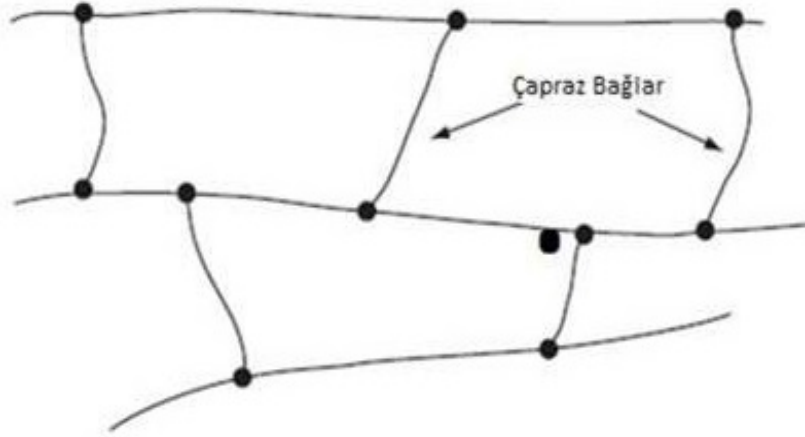
Çizelge 3. 1 Belli başlı termoplastik esaslı polimerler ve özellikleri [22]

Polimer Adı	Molekül Yapısı ve Üstünlükleri	Kullanıldığı Yerlere Örnekler	Önemli Özellikleri
PP Polipropilen	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array}$ -Isıda deforme olmama -Elektrik yalıtkanlığı iyi -Yorulma dayanım iyi	-Radyo ve TV kasaları -Bavul, çanta -Mobilya döşemesi -Ambalaj	$T_g=70 \text{ }^\circ\text{C}$ $R_m=34\text{N/mm}^2$ $A=\%100$ $\sigma_b=45 \text{ N/mm}^2$
PS Polistren	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$ -Parlak görünüm -Termal ve boyutsal kararlılığı iyi	-Oyuncak ve ev aletleri -Akü kasaları -Mutfak eşyaları -Çay bardağı -Pinpon topu	$T_g=65-75 \text{ }^\circ\text{C}$ $R_e=41-52\text{N/mm}^2$ $A=\%40-80$ $\sigma_b=55-90 \text{ N/mm}^2$
PVC Polivinil Klorür	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{Cl} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{Cl} \end{array}$ -Fiyatları ucuz -Isıtılarak şekil vermeye uygun	-Borular -Elektrik kablosu izolasyonu -Döşeme kapmalası -Pencere profilleri	$T_g=70 \text{ }^\circ\text{C}$ $R_m=34\text{N/mm}^2$ $A=\%100$ $\sigma_b=45 \text{ N/mm}^2$

Termoplastik malzemeler termosetler ile kıyaslandığında ise termosetlere göre daha sünek ve tok malzemelerdir. Bu sebepten termoplastik malzemeler herhangi bir dolgu maddesi ihtiyacı olmadan da kullanılabilirler. Boyutsal ve ısı kararlılık özellikleri ise termosetlere göre daha zayıf kalmaktadır [8],[9], [11].

3.1.2 Termoset Matrisli Malzemeler

Termoset matrisli malzemeler, oda sıcaklığında sıvı halde bulunan, bir ya da birden fazla bileşen içeren malzemelerdir. Termoset matrisli malzemelerin yapısında bulunan çapraz bağlar, bu malzeme türüne rijitlik gibi önemli bir özelliği kazandırmaktadır. Termoset matrisli malzeme yapısı içerisinde yer alan çapraz bağ sayısının artmasıyla moleküllerin hareketleri kısıtlanmakta ve buna bağlı olarak sertlik, darbe dayanımı gibi özellikleri iyileşmektedir. Şekil 3. 1’de termoset matrisli malzemenin sahip olduğu çapraz bağ yapısı şematik olarak gösterilmektedir [1], [23].



Şekil 3. 1 Termoset matrisli malzemelerde çapraz bağ yapısı [23]

Termoset matrisli malzemenin sahip olduğu belli başlı önemli özellikler şu şekilde sıralanmaktadır;

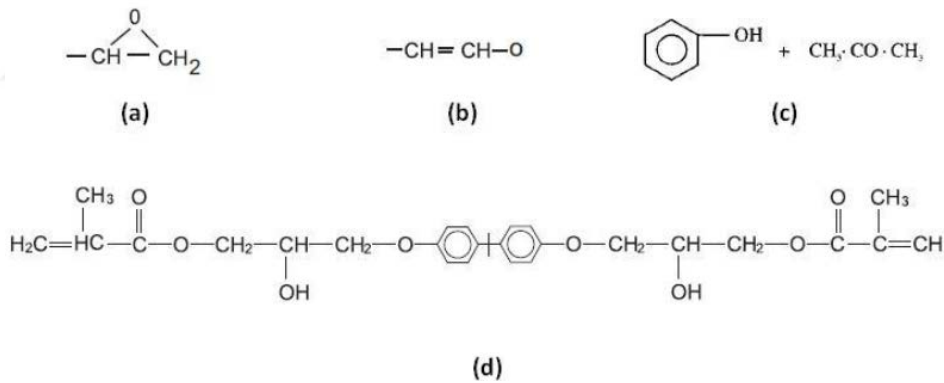
- ✓ Yoğun çapraz bağlı,
- ✓ Yüksek ısı ve boyutsal kararlılık,
- ✓ Yük altında sürünme ve şekil değiştirmeye direnç,
- ✓ Yüksek elektrik ve ısı yalıtım,

- ✓ Tekrar proses edilememe,
- ✓ Isıtma sonrası bozunum.

Termoset matrisli malzemeler “Termoset reçine” olarak da anılmaktadırlar. Termoset reçinelerin en büyük avantajı ise sıvı halde olmaları ve bundan ötürü elyafı tam anlamıyla ıslatabilme kabiliyetine sahip olmalarıdır. Elyafın tam anlamıyla reçine emdirilmesi sonucu ise yüksek nitelikli son ürün elde edilmiş olmaktadır. Bu durum kompozit malzemenin kullanıldığı birçok endüstride yüksek önem arz etmektedir.

Termoset reçinelerin en büyük dezavantajı ise üretim sonrası “post-kür” adı verilen ileri kürleme işlemine ihtiyaç duyması ve post-kür işlemi sonrasında tekrar şekil verilemez, geri dönüştürülemez olmalarıdır.

Termoset matrisli malzemeler arasında endüstriyel uygulamalarda sıkça karşımıza çıkanlar ise polyester, epoksi ve vinilester olmaktadır. Şekil 3. 2’de başlıca termoset matrisli malzemelerin kimyasal yapıları verilmiştir.

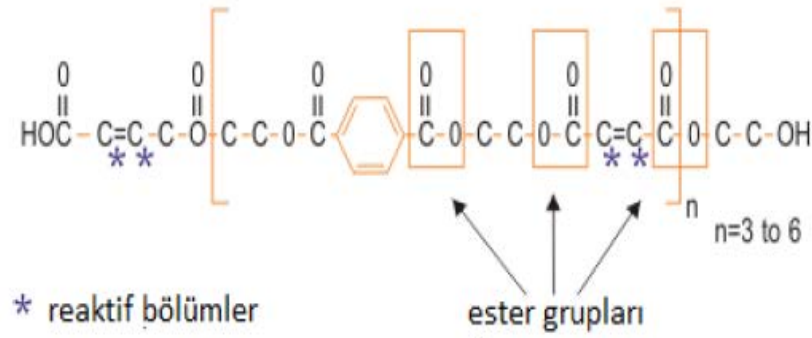


Şekil 3. 2 Bazı termoset matrisli malzemelerin kimyasal yapısı: a) Epoksi, b) Doymamış Polyester, c) Fenolik Reçine, d) Vinilester [1]

3.1.2.1 Polyester

Polyester reçineler, termoset reçineler arasında sıkça karşımıza çıkan reçinelerdendir. Polyester reçinenin maliyeti diğer reçineler ile kıyaslandığında oldukça düşüktür. Mekanik özellikleri diğer termoset reçinelere kıyasla orta değerlerdedir. En büyük dezavantajlarından biri sertleşme sırasında yüksek oranda çekme göstermesidir. Bu durumun önüne geçmek için çeşitli çalışmalar yürütülmekte olup elde edilen son

bilgiler, hidroksil metakrilat-poliüretan (HEMA) adı verilen malzemenin polyester ile birlikte kullanımının büzülmeyi azalttığı yönündedir. Polyesterin bir diğer dezavantajı ise zehirli stiren gazı yaymasıdır. Ayrıca polyester diğer termoset reçinelere kıyasla daha kısa raf ömrüne sahiptir. Özellikle denizcilik ve inşaat alanında kullanılmaktadır. Şekil 3. 3 'de Polyester kimyasal yapısı verilmiştir [1], [23].



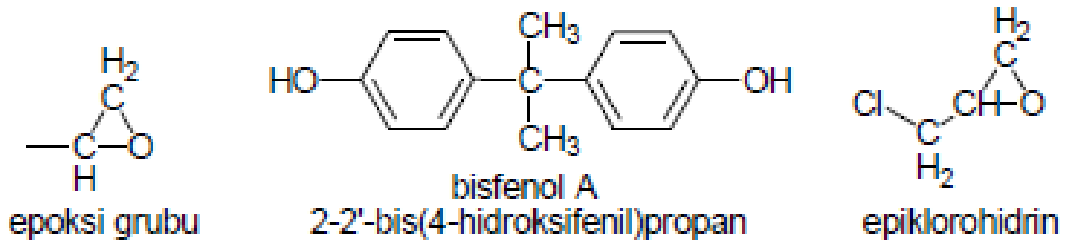
Şekil 3. 3 Polyester kimyasal yapısı [1]

3.1.2.2 Epoksi

Epoksi reçine termoset reçineler arasında en çok kullanılan reçinedir. Sahip olduğu aşınmaya karşı direnç, yüksek tokluk, darbeye direnç ve kimyasal etkilere karşı direnç gibi özellikleri dolayısı ile endüstriyel uygulamalarda çok geniş yer bulmaktadır. Ayrıca epoksi reçine birçok yüzey ile uyumlu ve birçok yüzeyi ıslatma eğiliminde ve işlenebilirliği yüksektir. Bu özelliği de yine tercih edilme oranını yükseltmekte kullanım alanını arttırmaktadır. Şekil 3. 4'de epoksi kimyasal yapısı gösterilmektedir [24].

Epoksi reçineler de polyester reçinelerde de olduğu gibi sertleşme sırasında düşük oranda çekme gözlenmektedir. Fakat bu durum polyester reçinelerdeki gibi bir sorun teşkil etmemekte, göz ardı edilebilmektedir. Epoksi reçinenin maliyeti polyester ve vinilester reçineye göre daha yüksektir. Ayrıca epoksi reçinenin cilde teması diğer birçok reçine türünde de olduğu gibi çok zararlıdır [24].

Epoksi reçine başta havacılık, uzay, spor aletleri yapımı, denizcilik, otomotiv olmak üzere birçok endüstriyel alanda kullanım yeri bulmaktadır.



Şekil 3. 4 Epoksi kimyasal yapısı [24]

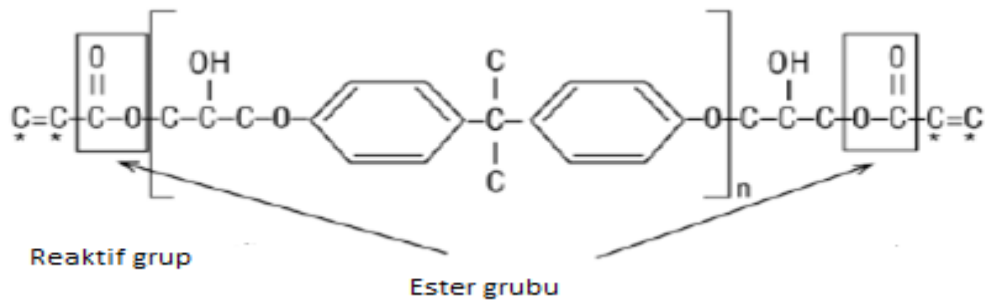
3.1.2.3 Vinilester

Vinilester, bisfenol A gibi bir epoksi reçine ile doymamış karboksilik asitlerin reaksiyonu sonucu oluşan, termoset reçinelerdendir. Vinilester kimyasal yapısı Şekil 3. 5'de verilmiştir. Vinilester reçineleri önemli kılan özelliklerin başında temel zincir yapısında yüksek molekül ağırlıklı epoksi reçinenin varlığı gelmektedir. Yapıdaki epoksi, tokluk ve esneklik ile birlikte mükemmel mekanik özellikler sağlar [1], [25].

Vinilester 'in sahip olduğu başlıca özellikler ise;

- ✓ Molekül yapısı poliestere benzer, reaktif bölgelerde farklılıklar vardır,
- ✓ Tok ve esnektir,
- ✓ Başta su olmak üzere pek çok kimyasala karşı dayanıklıdır.

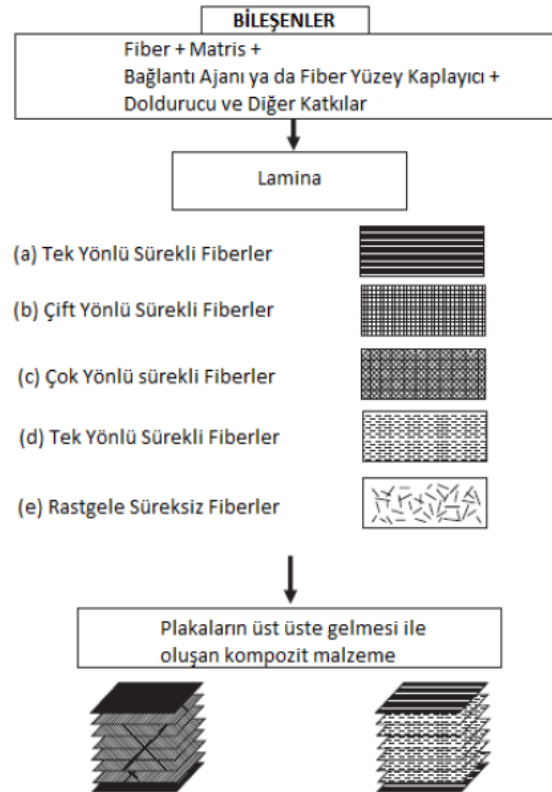
Vinilester reçinelerin kullanım alanlarına ise yat endüstrisi ve inşaat endüstrisi örnek olarak verilebilir.



Şekil 3. 5 Vinilester kimyasal yapısı

3.2 Fiber Malzemeleri

Matris malzeme içinde yer alan takviye elemanı olarak kullanılan fiber malzemeleri kompozit yapının mukavemetini etkileyen ana elemanlardan biridir. Fiberlerin yapıdaki dağılımları, boyutu, yoğunluğu ve daha birçok özelliği kompozit yapıda son ürünün özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Fiber malzemeler kompozit yapı içerisinde parçacık halinde, sürekli elyaf halinde ve süreksiz elyaf halinde olmak üzere 3 farklı biçimde bulunabilmektedirler. Parçacık takviyeler çoğunlukla küresel formda olmadıkları için yapı içerisindeki homojen dağılımına dikkat edilmesi gerekmektedir. Süreksiz fiberler, birkaç milimetreden birkaç santimetreye kadar değişen ölçülerde olabilmektedir. Genellikle birçok lifin çapı birkaç mikrometreyi geçmemektedir. Bu nedenle fiberlerin parçacık halden lif haline geçişi için çok fazla bir uzunluğa gerek yoktur. Sürekli fiberler genellikle dokuma şeklinde olup farklı konfigürasyonları bulunmaktadır. Şekil 3. 6'da çeşitli fiber takviyeli kompozit malzemelerin şematik gösterimi yer almaktadır [16], [26], [29].



Şekil 3. 6: Fiber dokuma türleri [29]

Kompozit malzemelerle birlikte takviye malzemesi olarak en sık kullanılan fiber türü cam fiber olarak karşımıza çıkmaktadır. Cam fiberin hem maliyet hem mekanik özellikleri dikkate alındığında bu durum gayet olağan karşılanmaktadır. Cam fiber dışında sıkça karşımıza çıkan diğer bir fiber malzemesi ise karbon fiberdir. Karbon fiber çok yüksek mekanik özelliklere sahip bir malzeme türüdür. Fakat diğer fiber malzemelere kıyasla maliyeti yüksektir. Her ne kadar yüksek maliyete sahip olsa da mekanik özelliklerin oldukça önemsendiği havacılık sektöründe en çok karşılaştığımız malzemedir.

3.2.1 Cam Fiberler

Cam fiberler (elyaflar) hali hazırda en sık kullanılan fiber tipleridir. Cam fiberlerin yapımında cam kullanılmaktadır. Kullanılan cam türleri soda kireç silikatları ve boraks silikatlarıdır [27].

Cam fiberler, kendisini meydana getiren cam bileşenlerinin türüne ve oranına göre farklı isimlerle anılmaktadır. Çizelge 3. 2’de belirtilen cam fiber türlerinin karışım içeriklerine bakılacak olursa her bir cam türünün içerdiği oksit çeşidi ve miktarı farklılık göstermektedir. Bu bileşenler ve oranları elde edilmek istene özellikler doğrultusunda bir araya getirilmektedir. Nitekim Çizelge 3. 3’de belirtilen belli başlı cam elyaf türlerinin mekanik özellikleri incelenecek olursa her bir cam elyaf türü farklı mekanik özelliklere sahiptir.

Çizelge 3. 2 Cam fiber türlerinin içerikleri [27]

Cam türleri	A-Camı	C –Camı	D-Camı	E-Camı	R-Camı	S- Camı
Oksit (%)	%	%	%	%	%	%
SiO ₂	63-72	64-68	72-75	52-56	56-60	64-66
Al ₂ O ₃	0-6	3-5	0-1	12-16	23-26	24-26
B ₂ O ₃	0-6	4-6	21-24	5-10	0-0.3	<0.05

Çizelge 3. 2 Cam fiber türlerinin içerikleri (devamı)

Cam türleri	A-Camı	C-Camı	D-Camı	E-camı	R-Camı	S-Camı
CaO	6-10	11-15	0-1	16-25	8-15	0-0.2
MgO	0-4	2-4	-	0-5	4-7	9.5-10.3
ZnO	-	-	-	-	-	-
BaO	-	0-1	-	-	0-0.1	-
Na ₂ O+K ₂ O	14-16	7-10	0-4	0-2	0-1	<0.3
TiO ₂	0-0.6	-	-	0-0.8	0-0.25	-
Fe ₂ O ₃	0-0.5	0.8	0-0.3	0-0.4	0-0.5	0-0.1
Fe ₂	0-0.4	-	-	0-1	0-0.1	-

Çizelge 3. 3 Belli başlı cam fiber türlerinin mekanik özellikleri [28]

Cam Fiber	Çekme Dayanımı (Mpa)	Çekme Modülü (Gpa)	Kopma Uzaması (%)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Azami Uygulama Sıcaklığı(°C)
E camı	3.100-3800	72.5-75.5	4.7	2.50-2.62	~380
S camı	4.020-4.650	83-86	5.3	2.46	~500
Bazalt	3.000-4.840	93-110	3.1-6	2.65-2.8	~650
Karbon	3.500-4.400	230-800	0.5-1.5	1.75-1.95	~400
Aramid	2.900-3.450	70-179	2.40-3.60	1.44	~250

3.2.2 Karbon Fiber

Karbon fiberler özellikle havacılık endüstrisinde kullanımı yaygın olan yüksek dayanım özelliğine sahip olan bir malzeme türüdür. Karbon fiber ile takviyelendirilmiş kompozit malzemelerin yorulma dayanımı diğer birçok malzeme ile kıyaslandığı birçoğundan daha üstündür. Karbon fiberlerin bir diğer önemli özelliği ise uygun matris malzemesi ile birleştirildikleri zaman karbon fiber ile takviyelendiren yapı korozyon dayanımına sahip olmaktadır [30], [31].

Karbon fiberlerin en büyük dezavantajlarından biri ise yüksek elektrik iletkenliği özelliğine sahip olmasıdır. Bazı zift bazlı karbon fiberlerin elektrik iletkenliği bakır ile kıyas edildiğinde dahi bakıra göre 3 kat daha iyi termal iletkenliğe sahip olmaktadır. Karbon fiberlerde belirtilen bu özelliğin önüne geçmek için hammadde olarak PAN (Polyacrylonitrile) kullanılmaktadır. PAN esaslı karbon fiberlerin termal iletkenliği zift bazlı karbon fiberlere kıyasla nitekim daha düşük olmaktadır [30], [31].

Karbon fiberli kompozit malzemelerin kullanım alanları ise; uzay-havacılık endüstrisi, otomotiv sektörü ve inşaat endüstrisidir.

3.3 Kompozit Malzemelerde Dolgu Maddesi Kullanımı

Plastik matrisli kompozit malzemelerde mekanik özellikleri iyileştirmek, maliyeti düşürmek için çeşitli dolgu maddeleri kullanılmaktadır. Kullanılan dolgu malzemeleri ait olduğu kimyasal gruba göre inorganikler ve organikler olmak üzere 2 ana grupta incelenmektedir. Çizelge 3. 4'de plastikler için kullanılan dolgu malzemeleri belirtilmiştir. Literatüre bakıldığı zaman belirtilen bu dolgu malzemeleri içerisinde en sık talk, mika, kalsit ve uçucu küller ile karşılaşmaktayız. Bu dolgulardan kalsit özellikle maliyet düşürmede, uçucu küller ise mekanik özellikler üzerinde çok etkili olmaktadır. Kullanım oranlarının yüksek olması bulunabilirlikleri ile de doğru orantılı olmaktadır.

Çizelge 3. 4 Plastikler için kullanılan dolgu malzemelerinin sınıflandırılması [32]

Kimyasal Grubu	Örnek
İnorganikler	
Oksitler	Cam, MgO, SiO ₂ , Sb ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃
Hidroksitler	Al(OH) ₃ , Mg(OH) ₂
Tuzlar	CaCO ₃ , BaSO ₄ , CaSO ₄ , Fosfatlar
Silikatlar	Talk, Mika, Kaolin, Asbestos
Metaller	Boron, Çelik
Organikler	
Doğal Polimerler	Selüloz fiberler, Öğütülmüş ahşap, Nişasta
Sentetik Polimerler	Poliamid, Polyester, Aramid

3.3.1 Dolgu Maddelerinin Genel Özellikleri

Dolgu malzemeleri özellikle termoset matris ile birlikte kullanılan Çizelge 3. 4’de de belirtildiği üzere birçok türü olan malzeme grubudur. Dolgu malzemeleri fiber takviyeli kompozit yapılar ile birlikte kullanıldıklarında “ikinci takviye elemanı” olarak veya “üçüncü bileşen” olarak anılmaktadırlar. Dolgu malzemelerinin kullanıldığı kompozit yapılarda en büyük avantajı maliyet üzerine olmaktadır. Matris malzemesi içerisine karıştırılarak kullanılan dolgu malzemesi ayrıca son ürün özelliklerini de doğrudan etkilediği için seçimi çok önemlidir. Ayrıca dolgu malzemesi kullanılan yapılarda matris malzemesi ile dolgu malzemesinin çok iyi karıştırılmalıdır. Karışımın tam anlamıyla homojen bir şekilde yapılmaması durumunda dolgu malzemesi yapı içerisinde topak şeklinde kalmakta ve bu da mekanik özellikler için büyük dezavantaj olmaktadır. Dolgu malzemesi ile matrisin tam anlamıyla karışmasının sağlanması için muhakkak özel karıştırıcılar kullanılması gerekmektedir [32], [33], [34].

3.3.2 Dolgu Maddesi Seçimi

Bir önceki kısımda da belirtildiği gibi dolgu malzemeleri kullanıldıkları yapılarda son ürün özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Özellikle mekanik özellikler üzerindeki etkisi göz ardı edilemeyecek kadar büyüktür. Çoğu dolgu malzemesi başta çekme dayanımı olmak üzere mekanik özelliklerin birçoğunu olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durumu olabildiğince minimuma indiregeyebilmek için doğru dolgu malzemesi seçimi yapmak gerekmektedir. Dolgu maddesi seçiminde dikkat edilmesi gereken belli başlı noktalar vardır ve bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir;

- ✓ Tanecik büyüklüğü matris ile uyumlu olmalı,
- ✓ Matris içerisinde kolay dağılabilir olmalı,
- ✓ Bulunduğu yapı ile kimyasal reaksiyona girmemeli,
- ✓ İçinde bulunduğu yapıda gözenek oluşumuna mahal vermemeli,
- ✓ Yoğunluğu matris malzemesi ile uyumlu olmalı,
- ✓ Sertliği matristen daha düşük olmamalı,
- ✓ Maliyeti düşük olmalı.

3.3.2.1 Kalsiyum Karbonat

Kalsit, kimyasal formülü CaCO_3 olan kristalleşmiş kalsiyum karbonat yapısıdır. Saydan veya farklı renklerde bulunabilir. Sertliği 3, özgül ağırlığı 2.71 g/cm^3 'dür.

Kalsiyum karbonat plastik matrisli reçinelerle sıklıkla kullanılmaktadır. Termoset reçineler içerisinde en çok epoksi ve polyeşter reçine sistemleriyle birlikte kullanılırken termoplastik reçineler içerisinde en çok PVC ile birlikte kullanılır. Kullanıldığı yapılarda maliyet düşürülmesinde etkili olur. Ayrıca mekanik özellikleri de etkilemektedir [32],[33], [35].

Yüksek kalitede bir kalsiyum karbonat dolgudan beklenenler şunlardır;

- ✓ Matris malzemesi ile farklı kimyasal reaksiyonlara girmemesi,
- ✓ Kolay karıştırılır olması, dolayısıyla son ürün özelliklerini fazlaca etkilememesi,

- ✓ Son ürünün sertliğini arttırması,
- ✓ Malzeme yaşlanmasının yavaşlaması ve dış etkilere dayanıklılığının iyileşmesi,
- ✓ Uygun maliyetli olması gerekmektedir.

3.3.2.2 Alüminyum Hidroksit

Kimyasal formülü $\text{Al}(\text{OH})_3$ 'dür. Fiziksel görünümü beyaz toz şeklindedir. Yoğunluğu $2,42 \text{ g/cm}^3$ olan, amfoter özelliğe sahip, biz baz ile reaksiyona girdiği zaman tuz oluşturan, suda çözünmeyen bir maddedir. Alüminyumun normal hidroksitinden başka tam olmayan hidroksitleri de bilinmektedir. $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$ (disapor), yoğunluğu $3,3\text{-}3,5 \text{ g/mL}$, 350°C 'ye kadar kararlıdır, $350\text{-}420^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'e dönüşür, $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$, yoğunluğu $3,01 \text{ g/cm}^3$, 600°C 'den sonra $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'e dönüşmektedir [32], [36], [37].

Alüminyum hidroksit plastik matrisli kompozit yapılarda genellikle alev geciktirici olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında mekanik özelliklere etkisi de kullanıldığı matris malzemesine göre farklılık göstermektedir. Bu bağlamda dolgu malzemesi etkisi üzerine yapılacak en doğru yorum deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmektedir.

3.3.2.3 Kaolen

Kaolen, asidik kayalarda feldspat ve granitin bozunmasıyla elde edilen bir yapıdır. Oluşmuştur. Asidik kayalarda bulunan kaolinit minerali, kaolen 'e özelliğini veren malzemedir. Kaolen yaygın olarak var olan ve kolay elde edilebilen bir malzemedir. Fakat %100 saflıkta kaolen bulmak oldukça zordur [32].

Kaolen 'in en önemli özelliklerinden biri kimyasallara dayanıklılığı bir diğeri ise iletken olmasıdır. Bu özellikleri dikkate alındığında kaolen dolgusunun özellikle kimyasal etkilere dayanım gerektiren ve elektrik iletkenliğinin istendiği yapılarda kullanımına sıkça rastlamak mümkündür. Ayrıca kaolen kullanıldığı yapılarda darbe dayanımı üzerinde de olumlu etkiler yapar [32], [34].

Kaolinin kalsine edilmiş veya yüzeyi kaplanmış olarak anılan farklı türleri vardır. Yüzeyi kaplı kaolen 'in matris ile daha kolay bağ kurduğu bilinmektedir. Bu durum sonucunda

kaolen matris içinde çok rahat bir şekilde dağılabilmekte ve dolgu malzemesi kullanılarak elde edilmek istenilen özelliklere daha kolay ulaşılabilir [38], [39] .

3.3.2.4 Talk

Talk magnezyum silika adı verilen yapıdan meydana gelen, $H_2Mg_3(SiO_3)_4$ veya $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ gibi iki farklı formül ile anılan bir mineraldir. Talk neredeyse diğer tüm dolgularda olduğu gibi plastikler ile beraber kullanılmaktadır. Talkın dolgu malzemesi olarak kullanıldığı termoplastik matrise polipropilen, termoset matrise ise polyester ve epoksi örnek olarak verilebilir. Talkın dolgu malzemesi olarak kullanılmak istendiği durumlarda dikkat edilmesi gereken en önemli husus belirtilen dolgu malzemesinin tanecik boyutu olmaktadır. Bu durum bütün dolgu malzemeleri için geçerlidir fakat talkın öğütülmesi diğer dolgulara kıyasla daha zor olduğu için talkın kullanıldığı yapılarda bu durum daha büyük önem arz etmektedir. Talkın ilavesi diğer dolgularda olduğu gibi sertliğin artmasına ve sebep olur [32].

3.3.2.5 Huntit

Huntit kimyasal formülü $Mg_3(Ca)(CO_3)_4$ olarak bilinen alev geciktirici özelliğe sahip dolgu maddelerindendir.

Huntit alev geciktirici özelliği ile son derece kıymetli bir malzemedir. Plastik matrisli malzemelerin pek çoğu hidrokarbon esaslıdır ve yanma özelliğine sahiptir. Aynı zamanda plastik matrisli malzemeler günümüzde hemen her alanda karşımıza çıkmaktadırlar. Bu sebeple inşaat, tekstil, elektronik, otomotiv gibi güvenliğin önemli olduğu alanlarda bu tür dolgu maddelerinin kullanımının yaygınlaşması son derece önemlidir [35], [40] .

KOMPOZİT MALZEMELER TEORİSİ

Kompozit malzemelerin mekaniği mikromekanik ve makromekanik olmak üzere iki seviyede incelenmektedir.

4.1 Kompozit Malzemelerin Mikromekanığı

Kompozit yapılarda bileşenlerin özellikleri ve geometrik dizilimleri kullanılarak kompozit malzemenin özelliklerini saptayabilmek büyük önem taşımaktadır. Matris olarak isimlendirilen ana dokuda, fiber veya dolguların dağılımı ve özelliklere etkisi göz önüne alındığında mikromekanik yaklaşım konusu ortaya çıkmaktadır. Bunun en basit uygulaması “karışımlar kuralı” olarak bilinen, kompozit malzemenin özelliklerinin, bileşenlerin ortalama hacim veya ağırlık dağılımından faydalanılarak hesaplanmasıdır. Kompozit yapılara mikromekanik yaklaşım, yapıda oluşabilecek temel ölçekli bir hata ya da deformasyonun tespitine olanak tanınması ve hesaplamalarda basit izotropik modeller kullanılabilirliği en büyük avantajlarından biridir. Ayrıca mikromekanik yaklaşımda temel parametrelerin göz önünde bulundurularak gerekli hesaplamaların yapılması da yine önemli noktalardan biri olmaktadır [8], [12].

Kompozit yapılarda bileşenlerin özellikleri ve geometrik dizilimleri mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilemektedir. Matris olarak isimlendirilen ana dokuda, fiber veya dolguların dağılımı ve özelliklere etkisi göz önüne alındığında mikro-mekanik yaklaşım konusu ortaya çıkmaktadır. Bunun en basit uygulaması “karışımlar kuralı” olarak

bilinen, kompozit malzemenin özelliklerinin, bileşenlerin ortalama hacim veya ağırlık dağılımından faydalanılarak hesaplanmasıdır [8], [12].

Karışımlar kuralı, yoğunluk hesaplama ve/veya eş yönlü sürekli fiberler ile takviye edilmiş bir kompozitin (tek yönlü yükleme koşullarında) özelliklerinin tespit edilmesinde kullanılmaktadırlar [8].

4.1.1 Karışımlar Kuralı

Karışımlar kuralı sadece fiber-matris ara yüzeyinin mükemmel düzeyde yapışmış olduğu ve fiberlerin eş yönlü, hatasız dizildiği öngörüldüğünde doğru sonuçlar vermektedir. Ancak fiber-matris ara yüzeyinde yapışmanın yeterliliği veya fiberlerin diziliminde oluşabilecek hataların varlığı göz ardı edildiği taktirde, karışımlar kuralı ile kompozit malzemelerde yoğunluk hesaplamak mümkündür [44].

Yoğunluk hesabı için öncelikle kompozit malzemenin ağırlık ve hacmi belirlenmelidir. Bir matris içerisinde sürekli, eş yönlü fiberler ile desteklenmiş bir kompozit malzemenin ağırlığı, kendisini oluşturan bileşenlerin ağırlıkları toplamına eşittir. Buna göre kompozit malzemenin ağırlığı m_c , fiberlerin ağırlığı m_f , matris ağırlığı m_m ile gösterildiğinde;

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

dir. (4.1) eşitliği kompozit yapı içerisinde herhangi bir boşluk olmadığı durumlarda geçerlidir. Bununla birlikte kompozit malzemenin hacminden bahsederken yapıdaki boşluklar da hesaba katılmalıdır. Kompozit malzemenin hacmi v_c , fiberlerin hacmi v_f , matris hacmi v_m , boşluk hacmi v_v ile belirtildiğinde;

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

dir. (4.1) eşitliği m_c , (4.2) eşitliği v_c 'ye bölüldüğünde, bileşenlerin hacim ve ağırlık oranları sırasıyla v_f , v_m , v_v ve m_f , m_m olarak gösterildiğinde;

$$m_f + m_m = 1 \quad (4.3)$$

$$v_f + v_m + v_v = 1 \quad (4.4)$$

eşitlikleri elde edilmektedir. Kompozit yoğunluğu $\rho_c (= m_c/v_c)$ ile verildiğinde,

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

ya da

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (4.6)$$

dir. Kompozit yoğunluğunu (ρ_c) ağırlık oranlarından faydalanarak yazılırsa,

$$\rho_c = \frac{m_c}{v_c} = \frac{m_c}{v_f + v_m + v_v} = \frac{m_c}{v_f/\rho_f + v_f/\rho_f + v_v} \quad (4.7)$$

olur. Buna göre boşluk hacmi,

$$v_v = 1 - \rho_c \left(\frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m} \right) \quad (4.8)$$

eşitliği ile bulunmaktadır [8].

4.1.2 Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

Mikro-mekanik yaklaşımın temeli, eş yönlü sürekli fiberler ile takviye edilmiş bir kompozit plakada elastik özelliklerin analizi olarak tanımlanmaktadır. Bu tip bir kompozit yapıda özelliklerin analizinde fiberlere paralel (1, //, L) ve dik yönde (2, $\perp$, T) uygulanan yükleme durumlarından bahsedilmektedir [45].

4.1.2.1 Elastik Özelliklerin Analizi

Kompozit yapıya sürekli eş yönlü fiberlere paralel yönde bir çekme gerilmesi uygulandığında, kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler birbirine çok iyi yapışmış olması ve aynı poisson oranına sahip olması durumunda, her iki bileşen eşit boyca uzamaya maruz kalmakta ve bu uzama Δl ile ifade edilmektedir. Böylece gerinim miktarı;

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_{cl} = \frac{\Delta l}{l} \quad (4.9)$$

formülü ile ifade edilebilmektedir. Buradaki ε_{cl} kompozit malzemenin uzama doğrultusundaki gerinimini ifade eder ve bu “eşit gerinim koşulu” olarak adlandırılmaktadır [8].

Fiber ve matrisin her ikisinin de elastik davranış gösterdiği durumda ise fiberlere paralel yönde gerilme (σ), (4.10) ve (4.11) de belirtilen formüller ile hesaplanmaktadır [8].

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_{cl} \quad (4.10)$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_{cl} \quad (4.11)$$

Kompozit malzemeye P_c gibi bir yük uygulandığı takdirde bu yük, fiberler ve matris tarafından paylaşılmaktadır. Bu durumda;

$$P_c = P_f + P_m \quad (4.12)$$

dir. Sırasıyla A_c , A_f , A_m sırasıyla kompozit, fiber ve matrisin enine kesit alanı olarak kabul edildiğinde,

$$\sigma_{cl} A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (4.13)$$

eşitliği elde edilmektedir. (4.8) ve (4.12) numaralı formüller göz önüne alınarak denklem kurulduğunda;

$$\sigma_{cl} A_c = [E_f A_f + E_m A_m] \varepsilon_f \quad (4.14)$$

ya da

$$E_{cl} = \frac{\sigma_{cl}}{\varepsilon_{cl}} = E_f \frac{A_f}{A_c} + E_m \frac{A_m}{A_c} \quad (4.15)$$

E_{cl} olarak belirtilen kompozit malzemelerde young modülü bu şekilde elde edilmektedir [12].

Buna göre belirli bir uzunlukta $A_f/A_c = V_f$ ve $A_m/A_c = V_m$ olur ve (4.15)'de verilen eşitlik sade bir şekilde,

$$E_{cl} = E_f V_f + E_m V_m = E_{11} \quad (4.16)$$

şeklinde yazılabilir. Benzer bir ifade ile kompozit malzemenin boyca çekme dayanımı,

$$\sigma_{cl} = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (4.17)$$

eşitliği ile ifade edilir.

Enine özellikler için tek yönlü kompozit malzeme Şekil 4.1b' deki gibi modellenmektedir. Bu durumda fiberler sürekli faz olarak gerilmeye dik biçimde gruplanmaktadır Her bir bileşenin eşit gerilmeye maruz kaldığı bu durum ilk olarak Reuss tarafından ele alınmıştır ve "eşit gerilme koşulu" olarak adlandırılan (4.18) numaralı formül elde edilmiştir.

$$\sigma_{ct} = \sigma_f = \sigma_m \quad (4.18)$$

Bu durumda kompozitin kalınlığı boyunca yer değiştirme miktarı (Δt_c), fiber ve matrisin yer değiştirme miktarları toplamına eşit olmaktadır [12].

$$\Delta t_c = \Delta t_f + \Delta t_m \quad (4.19)$$

(4.19) eşitliği t_c 'ye bölündüğünde;

$$\frac{\Delta t_c}{t_c} = \frac{\Delta t_f}{t_c} + \frac{\Delta t_m}{t_m} \quad (4.20)$$

$\Delta t_c/t_c = \varepsilon_{cl}$, kompozitin enine yöndeki gerinimi olurken; Δt_f ve Δt_m , sırasıyla, fiberlerin ve matrisin gerinim miktarının ölçü boyu ile çarpımına eşit olmaktadır. Bu durumda ;

$$\varepsilon_{ct} = \varepsilon_f \frac{t_f}{t_c} + \varepsilon_m \frac{t_m}{t_c} \quad (4.21)$$

olur. Belirli bir enine kesit alanına sahip, yük altındaki bir kompozit için fiber ve matris hacim oranları sırasıyla $V_f = \frac{t_f}{t_c}$ ve $V_m = \frac{t_m}{t_c}$ şeklinde yazılabilir. Bu durumda (4.21) tekrar düzenlendiğinde;

$$E_{ct} = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m V_m \quad (4.22)$$

eşitliği elde edilmektedir. Her iki bileşeninde elastik davranış gösterme durumu ve $\sigma_{ct} = \sigma_f = \sigma_m$ koşulu (eşit gerilim koşulu) dikkate alınıp dikkate alındığında;

$$E_{22} = \frac{E_f E_m}{E_f(1-V_f) + E_m V_f} \quad (4.23)$$

Eşitliği elde edilmektedir. Eşitlikte $V_f = 0$ olarak alındığı durumda $E_{22} = E_m$ bulunur ki bu da eşitliğin doğruluğunu kanıtlamaktadır.

Kompozit yapılarda dik yönde zorlamalar yapısal açıdan arzulanmaz. Ancak çok katlı yapılarda ve farklı yönlenmiş tabakalarda (lamine) bilinmesi gereken, önemli bir husustur. Eğer fibere göre aşırı plastik olan kalın cidarlı bir uygulama söz konusu ise; (4.23) eşitliği E'_m gibi bir düzeltme faktörü kullanılarak daha iyi sonuçlar veren eşitlikler elde edilmektedir. Bu eşitlikte matrisin poisson oranı etkin olmaktadır. Uygulamaları göreceli olarak yüksek sıcaklık ve sürekli yük altında çalışan termoplastik matrisli kompozitlerde görülmektedir. Buna göre;

$$E_{22} = \frac{E_f E'_m}{E_f(1-V_f) + E'_m V_f} \quad (4.24)$$

dir. Burada E'_m ;

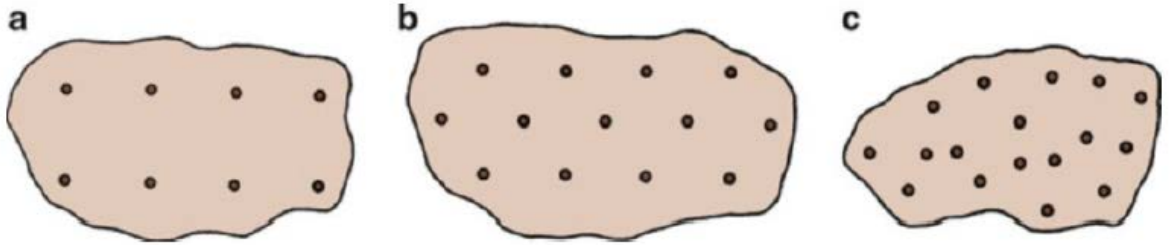
$$E'_m = \frac{E_m}{1-\nu^2} \quad (4.25)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır [8].

Malzemelerin mukavemeti pratik olarak yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanabilmektedir. Daha kapsamlı mikro-mekanik modeller elastisite teorisine dayanmaktadır ki bu durumda fiberler ile güçlendirilmiş kompozit malzemelerin elastik sabitleri ele alınmalıdır.

Gerilim ve gerinim durumlarının her biri 6 bileşen ile ifade edilebilir. Simetrik unsurlar bulunmayan anizotropik bir yapı, gerilim ve gerinim ile ilişkili 21 bağımsız elastik sabit içermektedir. Bu elastik anizotropi durumunun en genel biçimidir. Diğer taraftan elastik olarak izotropik özellik gösteren bir yapıda ise sadece 2 bağımsız elastik sabite ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tip bir yapıda z eksenini boyunca bir çekme gerilimi (σ_z) uygulandığında, çekme uzaması yine bu doğrultuda ve ϵ_z olmaktadır. Bu çekme uzamasına ek olarak x ve y doğrultularında 2 eşit basma uzaması ($\epsilon_x = \epsilon_y$) meydana gelmektedir. Anizotropik bir yapıda oluşan 2 enine gerinim bileşenleri eşit değildir. Bu nedenle çekme zorlamasına maruz kalan bu tip bir yapıda sonuç çekme ve kayma gerinimleri ile ifade edilmektedir [8].

Eş yönlü dizilmiş fiberlerden meydana gelen bir kompozit, fiberlere dik yönde bir simetri düzlemine sahiptir (yani malzemenin bir tarafı diğer tarafının aynı görüntüsünü oluşturur.). Şekil 4. 1’de fiberlerin matris içinde kare, altıgen ve rasgele dağılımları şematik olarak gösterilmiştir.

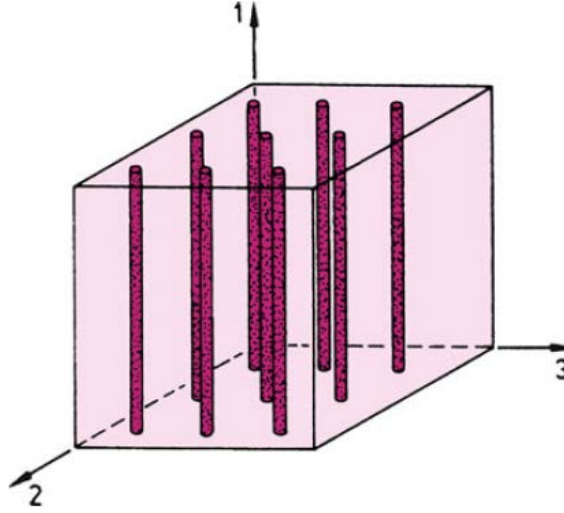


Şekil 4. 1 Fiberlerin matris içindeki dizilimi a.kare b.altıgen c.rastgele [8]

Örneğin fiberlerin kare şeklinde dizildiği sistemde simetri düzlemi fiberlere hem dik hem de paraleldir. Bu gibi malzemeler “ortotropik malzeme” olarak adlandırılırlar ve dokuz bağımsız elastik sabite sahiptirler. Altıgen ve rasgele dizilmiş fiberlerden oluşan kompozitler enine izotropiktirler ve 5 bağımsız elastik sabite sahiptirler.

Fiber dizilimine göre poisson oranı ele alındığında iki poisson oranı karşımıza çıkar: biri eksenel olarak uygulanan gerilim sebebiyle meydana gelen enine gerinimi; diğeri ise enine uygulanan gerilim sebebiyle oluşan eksenel gerinimi verir. Bu iki değer bağımsız değil, aksine birbirini ile ilişkilidir. Buna göre tabloda da açıkça görüldüğü üzere, enine izotropik özellik gösteren kompozitlerin bağımsız elastik sabitlerinin sayısı beştir [8].

Gerçek durumda, matris içerisindeki fiberler hiçbir zaman idealize edildiği şekilde dağılmazlar. Dağılımda saçılmalar kaçınılmazdır. Daha kesin sonuçlara ulaşılmak istenildiği taktirde bu durumda hesaba katılması gerekmektedir.



Şekil 4. 2 Enine izotropik fiberli kompozit yapısı [8]

Şekil 4. 2’de 2 ve 3 düzlemleri izotropiktir, bu sebeple bu doğrultularda malzeme özellikleri özdeş olmaktadır.

Genellikle kompozit yapılar “plaka” adı verilen tek yönlü ince levhaların, elastisite teorisi ile belirlenen uygun doğrultularda, belirli bir dizimde üst üste istiflenmesiyle üretilmektedir. Elastisite teorisi bu plakaların dayanım özellikleri ve elastik sabitleri gibi çeşitli özelliklerinin analizi ile ilgilenir. Her bir bileşenin özelliklerinden başlayarak plaka özelliklerinin öngörülebilmesi, elastisite teorisini değerli kılmaktadır. Bu çalışmada yer alan makro-mekanik analiz kısmında da, plakalar homojen ince ortotropik malzeme olarak ele alınmıştır. Bu gibi tabakalı yapılarda kalınlık doğrultusundaki elastik sabitler yok sayılabilmektedir [8].

Chamis ve Sendecky tarafından geliştirilen “istikrarlı alan metotları” faz geometrisi yaklaşımları oluşturmakta ve etki alanının basit gösterimini sağlamaktadır. Faz geometrisi silindirik matris içerisine gömülmüş tek bir fiber tarafından gösterilmektedir. Bu dış silindir, özellikleri kompozit ile eşdeğer olan, sonsuz homojen malzeme içerisine gömülmüştür. Matris sonsuz üniform bir yük altında iken, fiberlerde üniform gerinim alanı ortaya çıkmaktadır. Elastik sabitler bu gerinim alanından elde edilmektedir. Elde edilen sonuçlar matris içerisindeki fiber yerleşiminden bağımsızdır ve düşük fiber hacim dağılımında (V_f) güvenilir, orta dereceli fiber hacim dağılımında

kabul edilebilir ve yüksek fiber hacim dağılımında ise güvenilir olarak tanımlanmaktadır [8].

“Sınırlayıcı ve değişken metotlar”, elastik sabitlerin üst ve alt sınırlarına odaklanmaktadır. Üst ve alt sınırlar örtüştüğünde, özellik tam anlamıyla belirlenebilmektedir. Genellikle üst ve alt sınırlar ise birbirlerinden çok ayrı olmaktadır. Bu sınırlar yeterli yakınlıkta olduğunda, bu göstergeler malzeme özellikleri olarak kabul edilebilmektedir. Bu şekilde tek yönlü tabaka kompozitin boyuna özellikleri tespit edilmektedir. Hill’ in 1965 yılında bu yöntem ile katmanların elastik sabitler için belirlediği sınırlar, Hashin ve Rosen adlı araştırmacılar tarafından türetilen eşitlikler ile benzerlik göstermektedir. Hill, kütsel modüller cinsinden (düzlem gerinimi (k_p), poisson oranı ve iki fazın kayma modüllerini gibi) fiberlere paralel yöndeki young modülüne (E_{11}) kesin sınırlar koymuş ve fiberlerin şekil veya paketlenmesi ile alakalı herhangi bir kısıtlama yapmamaktadır. Burada k_p boyca uzamanın sıfır olduğu yanal genişleme modülünü temsil eder ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$k_p = \frac{E}{2(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (4.26)$$

Fiberlere paralel yöndeki modülde (E_{11}) sınırlamalar aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\frac{4V_f V_m (v_f - v_m)^2}{(V_f/k_{pm}) + (V_m/k_{pf}) + 1/G_m} \leq E_{11} - E_f V_f - E_m V_m \leq \frac{4V_f V_m (v_f - v_m)^2}{(V_f/k_{pm}) + (V_m/k_{pf}) + 1/G_f} \quad (4.27)$$

4.1.2.2 Halpin-Tsai Eşitlikleri

Halpin, Tsai ve Kardos karmaşık tanımlamalar ile karşılaştırıldığında memnun edici sonuçlar veren, deneysel bazı eşiklikler geliştirmişlerdir. Bu eşitlikler aynı zamanda sürekli ya da kısa fiberler şeklinde yönelmiş kompozitlerin yükleme altındaki özelliklerinin tespitinde de kullanılabilmektedirler.

$$\frac{M}{M_m} = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad (4.28)$$

olup,

$$\eta = \frac{M_f/M_m - 1}{M/M_m + \xi} \quad (4.29)$$

dir. (4.28) ve (4.29) eşitliklerinde, M kompozit malzemenin özelliklerini tanımlamakta ve

1. $M \rightarrow E_2, G_2, \nu_2$
2. $M_f \rightarrow E_f, G_f, \nu_f$
3. $M_m \rightarrow E_m, G_m, \nu_m$

dır ve yukarıda belirtilen özelliklerin bulunmasında kullanılmaktadır. Burada en önemli parametre ξ olup, sınır koşullarına bağlı olarak (fiber geometrisi, fiber dağılımı ve yükleme koşulları) takviye ölçüsünü veren deneysel verilere dayanan bir terim olmaktadır [8].

(4.28) numaralı eşitlikte yer alan η , $V_f = 0$, $M = M_m$ ve $V_f = 1$, $M = M_f$ gibi çeşitli yollarla elde edilmekte ve böylece Halpin-Tsai eşitliğini modüller cinsinden düzenlenir ise;

$$\frac{E_{22}}{E_m} = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \text{ ve } \eta = \frac{E_f/E_m - 1}{E_f/E_m + \xi} \quad (4.30)$$

eşitlikleri ortaya çıkmaktadır. Bu açıklamalar elastisite temelli çözümler ile karşılaştırıldığında ξ değeri elde edilebilmektedir.

Nielsen ise, Halpin-Tsai eşitliğine takviye elemanın paketlenme faktörünü ($\phi_{\max}$) ilave ederek eşitliği değiştirmiştir. Buna göre;

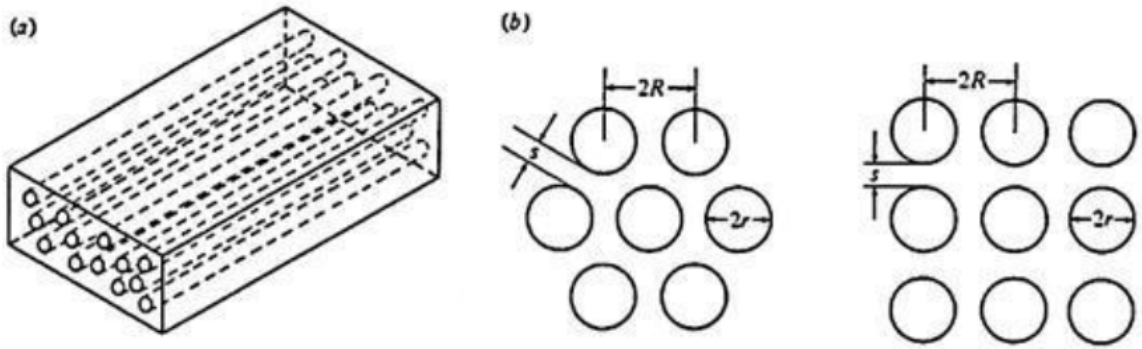
$$\frac{M}{M_m} = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta \psi V_f}, \quad (4.31)$$

$$\eta = \frac{M_f/M_m - 1}{M_f/M_m + \xi}, \quad (4.32)$$

$$\psi \cong 1 + \left(\frac{1 - \phi_{\max}}{\phi_{\max}^2} \right) V_f \quad (4.33)$$

eşitlikte $\phi_{\max}$ maksimum paketlenme faktörünü ifade etmektedir. Fiberlerin kare şeklinde dizildiği durumda $\phi_{\max} = 0.785$ iken, altıgen düzende $\phi_{\max} = 0.907$ 'dir. Genel olarak $\phi_{\max}$ bu iki sınır değer arasında ve aşağı yukarı $\phi_{\max} = 0.82$ 'dir. [5]

Paketlenme faktörü olarak ifade edilen bu durum “maksimum hacim oranı ve geometrik dizilim” göz önüne alınarak açıklanmaktadır. Sürekli fiberlerin kesitine dik yönde inceleme yapıldığında, doğanın temel kurallarından biri olan temel dizilim (ya da paketlenme) prensibi ortaya çıkmaktadır. Şekil 4. 3’de fiberlerin altıgen ve kare biçiminde dizildikleri görülmektedir. [31]



Şekil 4. 3 a.Eş yönlü sürekli fiberli plaka kesiti b. Bu plakada altıgen ve kaare görünüm

Şekil 4. 3’de belirtilen $2R$ fiber merkezleri arası uzaklık, $2r$ fiber çapı, s fiberler arası uzaklık olduğunda bu geometrik oranlar cinsinden hacim oranları;

$$\text{Altıgen: } V_f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (4.34)$$

$$\text{Kare: } V_f = \frac{\pi}{4} \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (4.35)$$

şeklinde elde edilmektedir. Benzer şekilde fiberler arası uzaklık;

$$\text{Altıgen: } s = 2 \left[\left(\frac{\pi}{2\sqrt{3}V} \right)^{1/2} - 1 \right] \cdot r \quad (4.36)$$

$$\text{Kare: } s = 2 \left[\left(\frac{\pi}{4} \right)^{1/2} - 1 \right] \cdot r \quad (4.37)$$

Eşitliklerde $r = R$ olması durumunda maksimum hacim oranı elde edilmekte ve buna göre yukarıda verilen maksimum paketlenme faktörü değerleri elde edilmektedir.

$$\text{Altıgen: } V_f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0,907 \quad (4.38)$$

$$\text{Kare: } V_f = \frac{\pi}{4} = 0.786 \quad (4.39)$$

Maksimum hacim oranı için bu değerlerin üzerindeki çaplarda fiber dizilim mümkün olmamaktadır [45].

4.1.3 Yöne Bağlı Özelliklerin Analizi

Eş yönlü fiberlerde, fiberlere paralel yönde yapılan zorlama (4.16), dik yönde yapılan zorlama (4.23) eşitlikleri ile verilirken; paralel yön ile θ açısı yapan yöndeki elastik özellikler de bulunmak istendiği durumlar olabilmektedir. Bu bağlamda yapılması gereken sürekli fakat düzlemsel gelişigüzel dağılmış plakaların ortalama elastik özelliklerinin bulunmasıdır. Nielsen ve Chen bu iki durumu;

$$\bar{E} = 2\pi \int_0^{\pi/2} E(\theta).d\theta \quad (4.40)$$

eşitliği ile kuramsal olarak tanımlamışlardır. Eşitlikte $\bar{E}$ düzlemsel gelişigüzel plakadaki ortalama elastik modülü, $E(\theta)$ asal eksenle θ açısı yönündeki elastik modülü göstermektedir. Laminasyon teorisinden hareketle $E(\theta)$;

$$\frac{1}{E(\theta)} = \frac{1}{E_1} c^4 + \left(\frac{1}{G_1} - \frac{\nu_1}{E_1} \right) c^2 s^2 + \frac{1}{E_2} s^4 \quad (4.41)$$

eşitliği ile verilmiştir. Burada $c = \cos\theta$, $s = \sin\theta$ 'dir. Düzlemsel plakada ortalama elastik modülünü, kayma modülü ve poisson oranını aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [45].

$$\bar{E} = \left[\frac{E_1 + E_2 + 2\nu_1 E_2}{1 - \nu_1 \nu_2} \right] \cdot \left[\frac{E_1 + E_2 - 2\nu_1 E_2 + 4(1 - \nu_1 \nu_2)G}{3(E_1 + E_2) + 2\nu_1 \nu_2 + 4(1 - \nu_1 \nu_2)} \right] \quad (4.42)$$

$$\bar{G} = \frac{E_1 + E_2 - 2\nu_1 E_2}{8(1 - \nu_1 \nu_2)} + \frac{1}{2} G_1 \quad (4.43)$$

$$\nu = \frac{\bar{E}}{2\bar{G}} - 1 \quad (4.44)$$

4.1.4 Fiberlerin Dokuda Dağılımının Analizi

Fiberlerin dokuda dağılışı biçimlerinin karışımlar kuralını doğrudan etkileyeceği görüşünden hareketle eşitliğinin fiber bileşeni modifiye edilerek daha gerçekçi yaklaşımlar geliştirilmiştir ve;

$$E_c = \eta_0 E_f V_f + E_m V_m \quad (4.45)$$

eşitliği elde edilmiştir. Eşitlikte η_0 , “yön etki faktörü” olarak tanımlanmaktadır.

4.1.5 Isıl Özellikler

Bu başlık altında kompozit malzemelerin imalat ve kullanım koşullarında önemli etkiye sahip ısı genleşme ve ısı iletkenlik katsayıları incelenmiştir.

4.1.5.1 Isıl Genleşme Katsayısı

Isı enerjisi bir malzemede atomik veya moleküler düzeydeki titreşimin göstergesidir. Bir malzemenin sıcaklığı arttırılırsa, ısı enerjinin büyüklüğü titreşimlerin artışı tetikler ve atomlar ve/veya moleküller arası boşluklar artar, yani malzemede hacimce bir genişleme görülmektedir. Çoğu endüstriyel malzeme, artan sıcaklıklar ile birlikte bu tipte genleşme göstermektedir. Malzemelerde artan sıcaklıkla meydana gelen bu genleşme miktarı “ ısı genleşme katsayısı” denilen bir malzeme sabiti ile tanımlanmaktadır. Bir malzemede sıcaklık farkından ötürü meydana gelen genleşme;

$$\varepsilon_{ij} = a_{ij}\Delta T \quad (4.46)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada ΔT sıcaklık farkını, a_{ij} malzemenin ısı genleşme katsayısını ve ε_{ij} sıcaklık değişimi neticesinde malzemede meydana gelen gerinim (boyca uzama) durumunu ifade etmektedir. Düzlemsel gerinim durumunda, düzlemsel ısı genleşme katsayısı (a_{ij}) ikinci dereceden simetrik tensordür ve gerinim tensorü ile de ilişkili olmaktadır. Isı genleşme katsayısı (a) geniş sıcaklık farklarında sabit bir değere sahip değildir ve bu sebeple genel olarak;

$$a_{ij} = \delta\varepsilon_{ij}/\delta T \quad (4.47)$$

şeklinde yazılmaktadır. Fiberler ile matris arasında farklı ısı genleşme katsayıları nedeniyle, imalat ve uygulama aşamalarında ara yüzeyde ısı gerilmeler oluşmaktadır. Bu gerilmeler matristen fibere doğru basma gerilmesi şeklinde oluşursa genelde sorun oluşturmaz fakat fiberden matrise çekme gerilmesi oluştursa, fiber matris arasında ara yüzey ayrılması gerçekleşebilmektedir [8], [12].

Fiberler genellikle matrise nazaran daha küçük ısı genleşme katsayısına sahiptirler ve böylece matrisi mekanik olarak baskı altında tutabilirler. Bu baskı fiberlerin radyal eksenini ile karşılaştırıldığında, fiberlere paralel yönde daha fazladır. Bunun sonucu

olarak fiberlere paralel yöndeki ısı genleşme katsayısı a_{cl} dik yöndeki ısı genleşme katsayısından a_{ct} daha düşük olur. Düşük fiber oranlarında fiberlere dik yöndeki ısı genleşmeyi, matrisinkinden daha büyük bulmak alışagelmış bir durumdur. Bu sayede uzun, sağlam ve düşük ısı genleşmeye sahip olan fiberler, matrisin boyca uzamasını engelleyerek matrisi fiberlere dik yönde genişlemeye zorlamaktadırlar [8].

Malzemelerin poisson oranları arasındaki farkın çok fazla olmadığı durumlarda ise fiberlere paralel yönde ısı genleşme katsayısı;

$$a_1 = \frac{a_m E_m V_m + a_f E_f V_f}{E_m V_m + E_f V_f} \quad (4.48)$$

ve fiberlere dik yöndeki ısı genleşme katsayısını;

$$a_2 = (1 + v_m)a_m \cdot (1 - V_f) + (1 + v_m)a_f V_f - a_1[v_f V_f + v_m(1 - V_f)] \quad (4.49)$$

şeklinde verilmektedir. Eşitliklerde a_f ve a_m sırasıyla fiber ve matrisin ısı genleşme katsayılarıdır. Halpin ise gelişigüzel dağılımlı bir plakada ortalama ısı genleşme katsayısını aşağıdaki gibi açıklamıştır [45].

$$\bar{a} = \frac{1}{2}(a_1 + a_2) + \frac{\frac{1}{2}(E_1 - E_2)}{E_1 + (1 + 2v_1)E_2}(a_1 - a_2) \quad (4.50)$$

4.1.5.2 Isıl İletkenlik Katsayısı

Isı transferi yüksek sıcaklık plastik matrisli yapılar için en önemli parametrelerinden biridir. Isı dağılımı ile kontrol edilen ergime ya da kristalleşme gibi durumlar, direkt olarak son ürünün kalitesini etkilemektedir [8].

Pek çok ticari plastik matrisli malzemenin üretim sürecinde kimyasal reaksiyon görülmemekte, toplam kristalizasyon ısısı, presin plakalarından salınan enerji ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir düzeyde kabul edilmektedir. Buna ek olarak, kompozitin kalınlığı boy ve genişliğe nazaran çok küçük olduğundan, konveksiyon ve radyasyon ile kalınlık boyunca kazanılan ya da kaybedilen ısıda çok küçük olarak varsayılmaktadır. Bu varsayımlar neticesinde kompozitin kalınlığı boyunca ısı iletimi tek yönlü olarak;

$$\Delta^2 T = 1/a (\partial T / \partial t) \quad (4.51)$$

eşitliği ile hesaplanabilmektedir. Burada k ısı iletkenliği, ρ yoğunluğu, C_p ısı kapasitesini, $a (= k/\rho C_p)$ ısı yayılımı, T sıcaklığı ve t süreyi göstermektedir [8].

Kompozit malzemenin ısı yayılım miktarı (a), ısı iletkenlik, yoğunluk ve ısı kapasitesi gibi sıcaklığa bağlı bazı değerler ile hesaplanabilmektedir. Ancak yine de, hesaplamalardaki kolaylıklar için bu değerler sabit kabul edilmekte ve böylece kompozitin ısı yayılımı sabit bir değer olarak farz edilmektedir [8].

Bu bağlamda kompozit malzemede ısı iletkenlik değeri;

$$k_c = 1/(V_m/k_m + V_f/k_f) \quad (4.52)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada k_c, k_m, k_f sırasıyla kompozit, matris ve fiberin ısı iletkenliğini, V_m ve V_f ise matris ve fiber hacim oranlarını göstermektedir. Benzer bir şekilde kompozit malzemenin ısı kapasitesi;

$$C_{pc} = M_m C_{pm} + M_f C_{pf} \quad (4.53)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada C_{pc}, C_{pm}, C_{pf} sırasıyla kompozit, matris ve fiberin ısı kapasitesini, M_m ve M_f de matriste ve fiberin ağırlık oranlarını göstermektedir.

Buna göre ısı iletkenlik, ısı kapasitesi ve yoğunluk kullanılarak kompozit malzemenin ısı yayılımı;

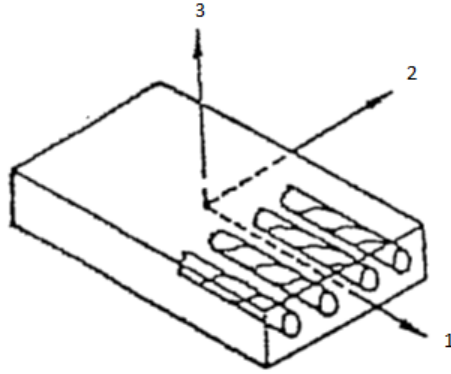
$$a_c = k_c / (\rho_c C_{pc}) \quad (4.54)$$

eşitliği ile hesaplanır [8].

4.2 Kompozitlerin Makromekaniği

Eş yönlü kompozit malzemelerin mekanik özellikleri geleneksel metalik malzemelerinkinden farklılık göstermektedir. Bu malzemeler fiberlere paralel yönde gelen yüklemelere karşı yüksek mekanik özellikler gösterirken, fiberlere dik yöndeki yüklemelerde zayıf veya vasat özellikler göstermektedir. Bu özelliklerinden dolayı fiberlere dik yöndeki yüklemelere maruz kalan kompozit malzemeler, geleneksel

malzemelerden (metallerden) daha zayıf kalmaktadır. Kompozit malzeme üretimindeki temel problem ise; fiber oryantasyonunun optimize edilerek her yönde maksimum mekanik dayanımı sağlamaktır. Malzemelere uygulanan tek eksenli kuvvetler Hooke kanunuyla ifade edilir:



Şekil 4. 4 Asal yönlerin şematik gösterimi

$$\sigma = E.\varepsilon$$

$$\tau = G.\gamma$$

(4.55)

σ : Çekme gerilmesi

E: Elastiklik modülü

ε : Çekme gerinimi

τ : Kayma gerilmesi

G: Kayma modülü

γ : Kayma gerinimi

Mühendislik malzemeleri; elastik özelliklerine göre; izotropik malzemeler ve ortotropik malzemeler olarak iki alt başlıkta incelenir. İzotropik malzemeler; her yönde aynı elastik özellikleri gösteren malzemelerdir. Ortotropik malzemeler ise farklı yönde farklı özellikler gösteren malzemelerdir. Kompozitler, özellikle tabaka yapılı kompozitler ortotropik plakalara tipik birer örnektir. Bu malzemelerin özellikleri yöne, yani fiberlerin oryantasyonuna bağlıdır. Tabaka yapılı kompozitlerde gerilme-gerinim

ilişkileri matris formunda ifade edilmektedir. Gerilme ile deformasyon arasındaki ilişkiyi tanımlayan Hooke kanunu;

$$\sigma_i = \sum_{j=1}^G C_{ij} \cdot \varepsilon_j \quad (4.56)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu eşitlikte;

σ_i : Gerilme bileşeni

ε_j : Deformasyon bileşeni

C_{ij} : Stiffness matrisi olarak tanımlanır.

Eşitlik matris formuna sokulursa;

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{43} & C_{53} & C_{63} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{54} & C_{64} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{65} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

matrisi elde edilmektedir.

İzotropik bir malzemede stiffness matris ve elastik özelliklerin her yönde aynı olması nedeniyle matris basitleştirilirse;

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11}-C_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11}-C_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11}-C_{12}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

matrisi elde edilmektedir.

Gerilme-gerinim bağıntısının tersi kompiyans matrisi S_{ij} ile ifade edilir ve gerinim-gerilme ilişkisi;

$$\varepsilon_i = \sum_{j=1}^G S_{ij} \cdot \sigma_j \quad (4.59)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitliğin matrisle uyarlanması durumunda ise;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(S_{11} - S_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(S_{11} - S_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

matrisi elde edilmektedir. Kompiyans matrisi mühendislik birimlerini içeren bir kavram olup, aşağıdaki formda yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (4.61)$$

Eşitliklerden görülebileceği üzere izotropik malzemelerden S_{11} ve S_{12} kompiyansları; E , ν ve G 'ye karşılık gelir. Örneğin tek eksenli bir gerilmede;

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \tau_{23} = \tau_{31} = \tau_{12} = 0 \quad (4.62)$$

İnce cidarlı plakalarda $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = 0$ olduğundan matrisi;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & 0 \\ -\nu/E & 1/E & 0 \\ 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (4.63)$$

şeklinde yazılmaktadır. Gerilme eşitliği ise;

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E/(1-\nu^2) & \nu E/(1-\nu^2) & 0 \\ \nu E/(1-\nu^2) & E/(1-\nu^2) & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (4.64)$$

olarak ifade edilmektedir.

Ortotropik bir yapıda her yönde özellikler farklı olacağından (4.64) eşitliği;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (4.65)$$

halini almaktadır. Bu ifadede; $S_{11} = 1/E_1$, $S_{22} = 1/E_2$, $S_{66} = 1/G_{12}$ ve $S_{12} = -\nu_{12}/E_2$ ' dir.

Gerilme eşitliği;

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (4.66)$$

Fiberlerin dizildiği bir x-y düzlemi ile bir θ açısı yapan gerilmeler;

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.67)$$

eşitliğiyle tanımlanmaktadır. $\overline{Q_{xy}}$ dönüştürülmüş ters stiffness matrisidir.

Bu şekilde x yönündeki gerilme; $\sigma_x \cdot \cos^2 \theta$ ve bu yöndeki kayma gerilmesi de; $\sigma_x \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta$ olmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \tau_{x'y'} \end{bmatrix} \quad (4.68)$$

Çekme ve kayma gerilmeleri ise;

$$\sigma_1 = \sigma_\theta \cdot \cos^2 \theta \quad (4.69)$$

$$\sigma_2 = \sigma_\theta \cdot \sin^2 \theta \quad (4.70)$$

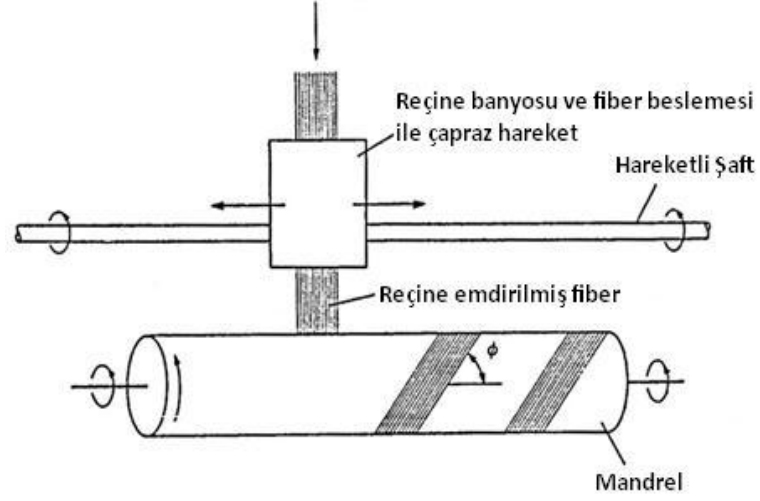
$$\tau_{12} = -\sigma_\theta \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (4.71)$$

Buradan açılı dokunmuş kumaşlı ya da eş yönlü fiber takviyeli iç basınca maruz yapılara geçiş yapılabilir. Genel anlamada iç basınç altındaki borular ve basınçlı kaplarda; boru veya kap eksenine θ açısı yapan fiber oryantasyonunun dayanıma etkisi konusu ortaya çıkmaktadır. $2r$ çap ve t kalınlığındaki bu kapta oluşan σ_H , çevresel gerilmeler; σ_A , eksenel gerilmeler olmak üzere;

$$\sigma_H = P \left(\frac{2r+t}{2t} \right) \approx \frac{P \cdot r}{2t} \quad (4.72)$$

$$\sigma_A = P \left(\frac{\pi r^2}{2\pi r t} \right) \approx \frac{P \cdot r}{2t} \quad (4.73)$$

olup, burada P iç basınçtır. (4.72) ve (4.73) eşitliklerinden $\sigma_H / \sigma_A = 2$ olduğu görülmektedir. Şekil 4. 5'de θ açısı ile sarmal dokunmuş iç basınca maruz kabın yapımı şematik olarak gösterilmiştir.



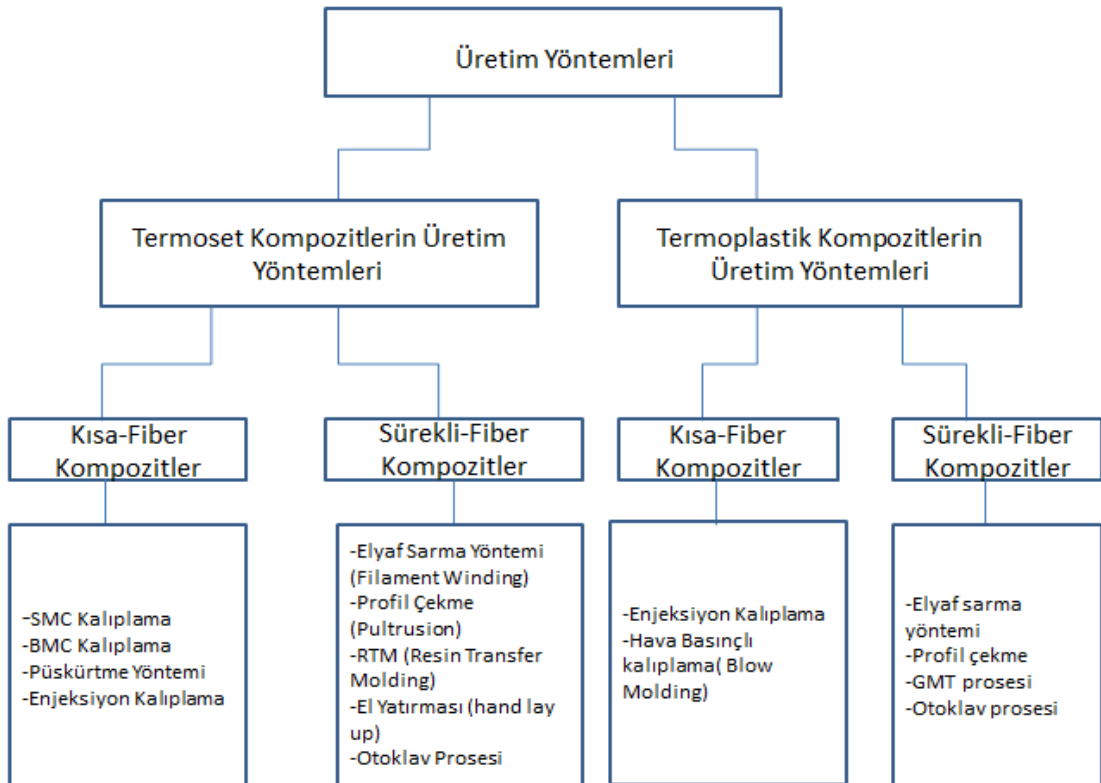
Şekil 4. 5 İç basınca maruz kapların şematik gösterimi

$$\frac{\sigma_1 \cdot \sin^2 \theta}{\sigma_1 \cdot \cos^2 \theta} = 2 \quad (4.74)$$

Eşitliğinden $\tan^2 \theta = 2$ ve buradan da; $\theta = 55^\circ$ bulunur ve bu değer de ideal açı olarak adlandırılmaktadır.

KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri polimer matrisli kompozitler ele alınarak incelenmiştir. Bu doğrultuda üretim yöntemleri termoplastik matrisli kompozitler ve termoset matrisli kompozitler olmak üzere 2 ana başlık altında Şekil 5. 1’de belirtilmiştir



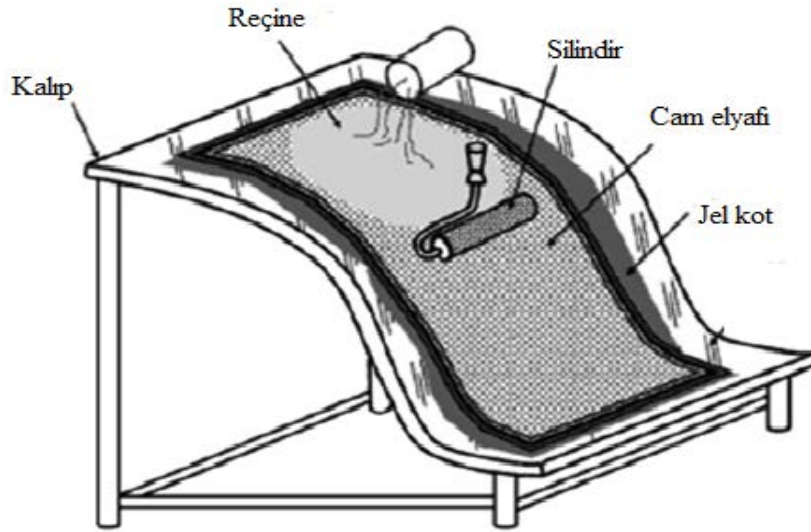
Şekil 5. 1 Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri [46]

5.1 El Yatırması Yöntemi

El yatırması yöntemi, kompozit malzeme üretimi için kullanılan ve bilinen en eski yöntemlerden biri olup Şekil 5. 2’de görüldüğü gibi silindir bir rulo yardımı ile reçinenin elyafa yedirilmesi işlemidir [13].

El yatırması yönteminin işlem basamakları aşağıdaki gibidir;

- ✓ Uygun kalıp seçimi yapılır (Kalıplar genellikle metal olmaktadır),
- ✓ Kalıp üzerine 10’ar dakika ara ile 2 kat kalıp ayırıcı sürülür,
- ✓ Daha sonra kalıp üzerine kalıp ile uygun boyutlardaki elyaf yerleştirilir,
- ✓ Her elyaf yerleştirme işleminden sonra, reçine emdirme işlemi hızlı bir şekilde gerçekleştirilmelidir,
- ✓ İstenilen elyaf kalınlığına ulaşılmasının ardından kalıp üzerinde reçine emdirilmiş elyaflar kürlenmeye bırakılır ve işlem sonlanır.

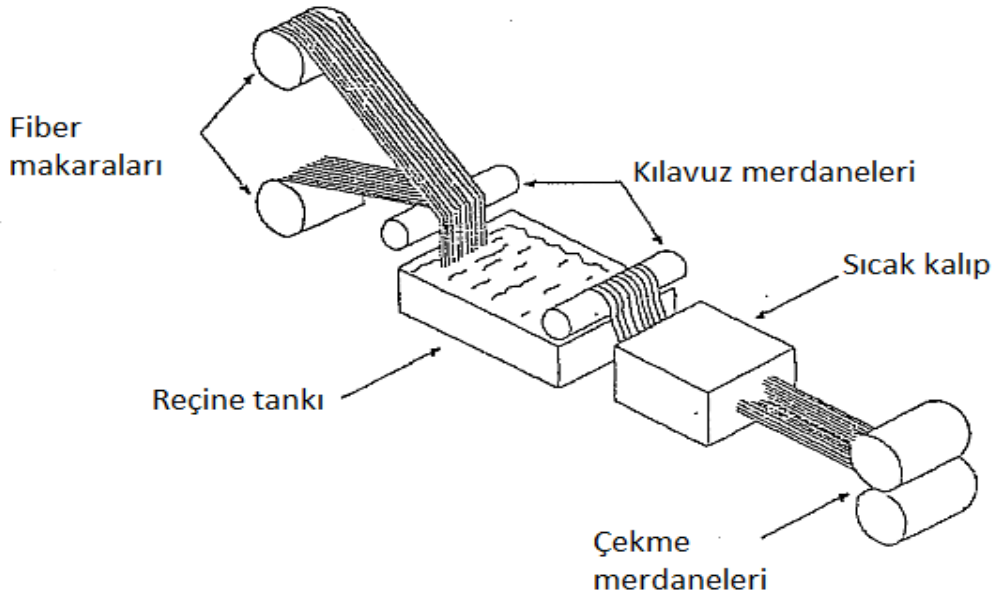


Şekil 5. 2 El yatırması yöntemi [18]

5.2 Profil Çekme Yöntemi

Profil çekme yöntemi, pultrüzyon olarak da anılan sabit kesitli kompozit profillerin üretilbildiği düşük maliyetli seri üretimin yapıldığı bir yöntemdir. Sisteme beslenen

sürekli takviye malzemesi reçine banyosundan geçirildikten sonra 120-150 °C'ye ısıtılmış şekillendirme kalıbından geçilerek sertleşmesi sağlanır. Kalıplar genellikle krom kaplanmış parlak çelikten yapılmaktadır. Üretim sırasında sürekli elyaf kullanılmasından dolayı, üretim sonucunda takviye yönünde çok yüksek mekanik mukavemet elde edilmektedir. Şekil 5. 3'de profil çekme yöntemi şematik olarak gösterilmektedir [47] .

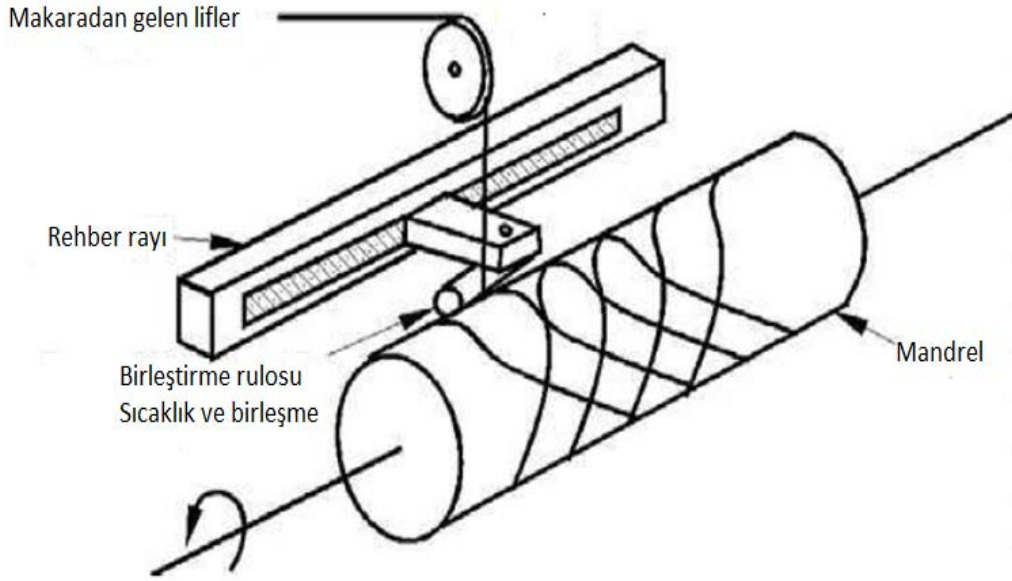


Şekil 5. 3 Profil çekme yöntemi [47]

5.3 Elyaf Sarma Yöntemi

Elyaf sarma yöntemi sürekli elyaf liflerinin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılması işlemidir. Şekil 5. 4'de elyaf sarma yönteminin şematik olarak gösterimi verilmiştir. Elyaf sarma işleminin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle bu işlem için gerekli sistemin kurulması gerekmektedir.

Elyaf sarma işleminde hem fiberlerin reçine banyosundan geçirilerek mandrele sarımı mümkün olurken hem de termoplastik esaslı cam liflerin ısıtma sonucunda ergitilerek mandrele sarımı da mümkündür. Sarım düz veya açılı yapılabilir. Yüksek mukavemet istenilen üretimlerde açılı sarım yapıldığı ise deneysel çalışmalar sonucunda saptanmış bir olgudur.



Şekil 5. 4 Elyaf sarma yöntemi [48]

Yöntemin uygulama alanları ise; kimyasal depolama tankları, borular, gaz silindirleri olarak sıralanabilir.

5.4 Reçine Transfer Yöntemi

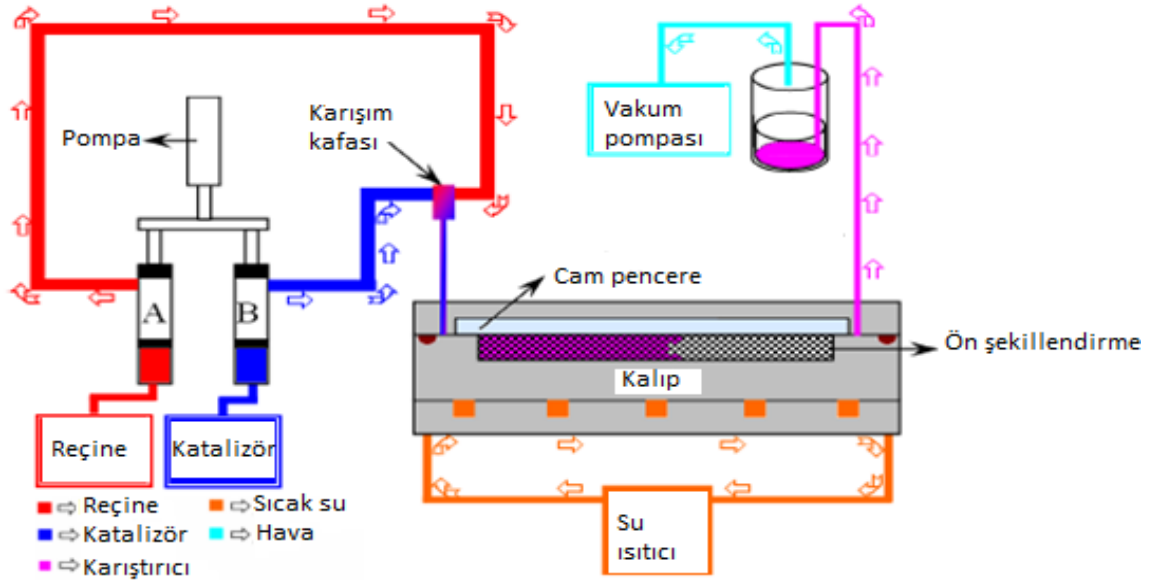
Reçine transfer yöntemi, kompozit malzeme üretim yöntemleri arasında hızlı ve uzun ömürlü son ürün eldesine imkan tanıyan bir yöntemdir. RTM yönteminde diğer yöntemlerden farklı olarak iki farklı kalıp kullanmak gerekmektedir. Bu yöntemde takviye olarak çoğunlukla E-camı (dokuma veya keçe) kullanılmaktadır. İşlem basamakları aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir;

- ✓ Öncelikle kullanılacak takviye malzemesi kalıp boşluğunu dolduracak şekilde dikkatli bir şekilde doldurulur,
- ✓ Ardından reçine ve ön kalıp ısıtılır,
- ✓ Isıtma işleminin ardından sisteme verilmek üzere hazırlanan reçine basınç yardımı ile kalıba aktarılır.

Reçine transferi sırasında reçine akışını hızlandırmak ve sistem içerisindeki fazla havayı almak amacıyla vakum da kullanılabilir. Bu durumda yöntem VARTM (Vacuum Assisted

Resine Transfer Molding) ismini alır. Sistemin kürlenmesi 6-30 dakikalık bir sürede tamamlanır [49].

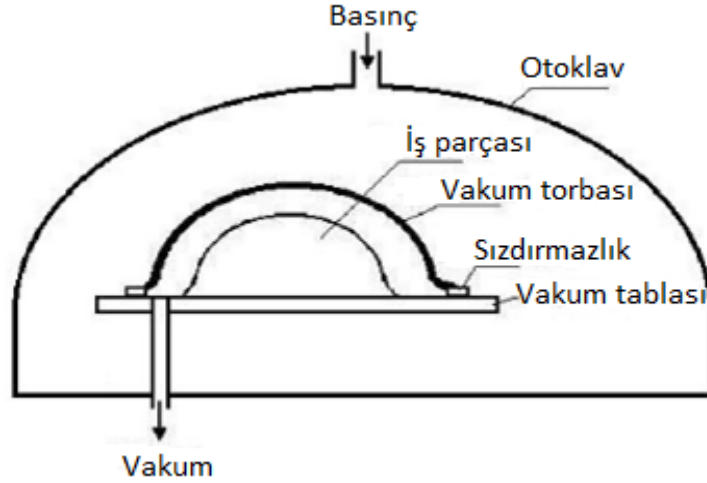
Elyafın kalıba yerleştirilmesini gerektirmesinden dolayı uzun sayılabilecek bir işçilik gerektirir. Kalıp kapalı olduğu için ise zararlı gazlar azalır ve gözeneksiz bir ürün elde edilebilir. Ayrıca karmaşık şekli parçalar  retilenmektedir. şekil 5. 5’de sistem şematik olarak gösterilmiştir.



şekil 5. 5 Reçine transfer yöntemi [49]

5.5 Otoklav Yöntemi

Otoklav yöntemi vak m torbalama yöntemine benzer bir şekilde hazırlanan kalıbın, otoklav adı verilen fırına yerleştirilmesi ile gerçekleşmektedir. Otoklav içerisindeki işlem üç aşamalı olarak gerçekleşir. Öncelikle ısıtma yapılır, ardından parçanın kürlenmesi için bir bekleme süresi olur, son olarak ise soğutma yapılır. Soğutma işlemi su ile yapılmaktadır şekil 5. 6’da otoklav yöntemi ile kompozit malzeme üretimi şematik olarak gösterilmiştir.



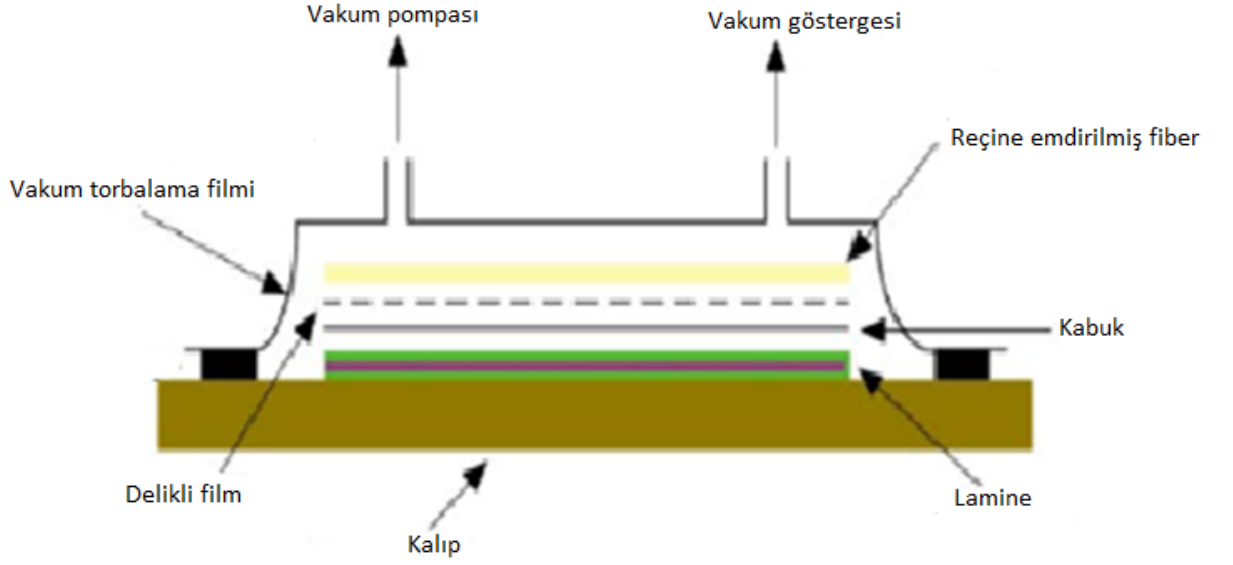
Şekil 5. 6 Otoklav yönteminin şematik gösterimi [50]

Otoklav yöntemi ile kompozit malzeme üretimi sırasında kontrol edilmesi gereken 4 önemli parametre vardır. Bunlar; vakum, basınç, sıcaklık ve zamandır. Otoklav içerisindeki basınçlandırma N (Azot) ile birlikte yapılmalıdır. Bunun sebebi azot un oksijen ile tutuşma özelliğinin olmamasıdır.

Otoklav yöntemi, diğer üretim yöntemleri ile kıyaslandığı zaman maliyet olarak daha yüksek olmak ile birlikte kontrol edilebilir parametrelerin doğurduğu bir sonuç olarak elde edilen yüksek nitelikli ürün otoklav yönteminin önemini arttırmaktadır.

5.6 Vakum Torbalama Yöntemi

Vakum torbalama yöntemi ile kompozit malzeme üretimi temel olarak el yatırma yöntemi ile benzerlik göstermekte olup, en önemli farkı elle reçine sürülmüş yapının sonrasında vakum ortamına alınmasıdır. Bu şekilde reçinenin elyafa tam olarak emdirilmesi, fazla reçinenin taşıma tankı vasıtası ile çekilmesi ve vakum altında kürlenmesi sağlanarak boşluksuz bir yapı elde edilebilmektedir. Şekil 5. 7’de vakum torbalama yöntemi şematik olarak gösterilmektedir [51].



Şekil 5. 7 Vakum torbalama yöntemi [51]

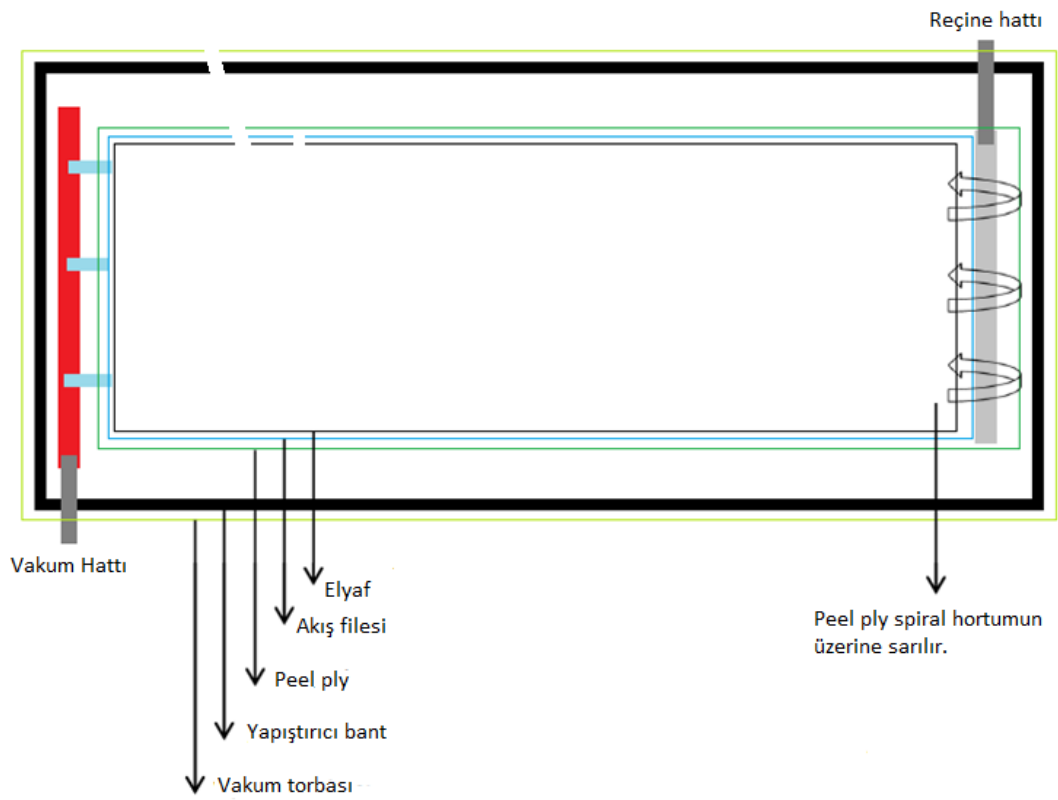
5.7 Vakum İnfüzyon Yöntemi

Vakum infüzyon yöntemi, yüksek kaliteli ve büyük boyutlu parçaların üretilmesine imkan tanıyan bir yöntemdir. Vakum infüzyon yönteminde temel prensip; kalıp üzerine yerleştirilen takviye malzemesinin basınç farkından yararlanılarak reçine emdirilmesidir. Yöntemin işlem basamakları aşağıdaki gibidir;

- ✓ Üretim için kullanılacak kalıp vakslanır,
- ✓ Sonrasında kalıp üzerine takviye elemanı (elyaflar) yerleştirilir,
- ✓ Elyafların üzerine reçine ilerlemesine yardımcı olan tabaka yerleştirilir,
- ✓ Sonrasında ise peel ply adı verilen tabaka ayırıcı yerleştirilir,
- ✓ En üst kısma ise vakum torbası yerleştirilir,
- ✓ Vakum torbasının alt kısmına ise reçine ilerlemesini sağlayacak ve vakum hattı ile bağlantı sağlayacak borular yerleştirilir,

- ✓ Vakum yardımı ile reçinenin elyaflara emdirilmesi, negatif basınç ile havanın sistemden çekilmesi ve taşma tankı kullanılarak fazla reçinenin sistemden tanka transferi sağlanır.

Vakum infüzyon yönteminde elyaf boyutları ve kalıp arasındaki ilişkiye dikkat edilmelidir. Elyaf boyutları istenilen ölçülere uygun olmazsa ıslanma işlemi başarısız olur. Ayrıca üretim sırasında kullanılan reçinenin infüzyon sırasında kullanıma uygun olması gereklidir. Vakum infüzyon sistemi Şekil 5. 8’ de şematik olarak gösterilmiştir [52].



Şekil 5. 8 Vakum infüzyon yöntemi [52]

Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit malzeme üretimi; tekne ve bot gövdeleri üretiminde, rüzgar türbin kanatları üretiminde ve otomotiv dış gövde panelleri başta olmak üzere birçok alanda kullanılan ve tercih edilen bir yöntemdir.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Kullanılan Malzemeler

Kompozit malzeme üretiminde epoksi ve vinilester olmak üzere 2 farklı ana matris malzemesi kullanılmıştır. Matris malzemesiyle birlikte kullanılan fiber malzemesi ise dokuma ve keçe E-camı 'dır. Belirtilen matris ve fiber malzemelerine ek olarak yapıya ayrı ayrı katılarak etkileri gözlemlenen dolgu maddeleri ise alüminyum hidroksit ve kalsit 'tir.

6.1.1 Fiber Malzemeleri

Kompozit malzeme üretiminde kullanılacak takviye elemanı seçiminde başlıca önemli faktörler; takviyenin şekli, uzunluğu, yönlenmesi ve malzemesidir. Bu faktörler göz önünde bulundurularak kullanılacak takviye elemanı E-camı olarak belirlenmiş ve E-camının dokuma ve keçe olmak üzere adlandırılan 2 türünün de kullanılmasına karar verilmiştir. Bunun sebebi kompozit malzemeye uygulanacak yükün tüm malzeme tarafından taşınmasını sağlamaktır. Belirtilen takviye elemanları Cam Elyaf A.Ş. den temin edilmiştir. Kullanılan dokuma ve keçe E-camı özellikleri Çizelge 6. 1'de belirtilmiştir.

Çizelge 6. 1 Kullanılan fiber malzemeleri ve özellikleri

Fiber Malzemesi	Kod	Ağırlık (gr/m ²)	Yoğunluk (gr/cm ³)
Dokuma e-camı	CD 125-300	300	2.55
Keçe e-camı	E MAT8(01)-450	450	2.45

6.1.2 Matris Malzemeleri

Çalışmada epoksi ve vinilester olmak üzere 2 ana matris malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan epoksi reçine Polikem firmasından temin edilen modifiye edilmemiş bisfenol A epiklorohidrin esaslı Polires 188 kodlu reçinedir. Belirtilen epoksi reçine 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 6. 2’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.

Çizelge 6. 2 Polires 188 epoksi reçine özellikleri

Viskozite 25 °C	11,000–15,000 (cps)
Özgül ağırlık	1,15–1,18 (gr/cm ³)

Belirtilen epoksi reçine ile birlikte kullanılan epoksi reçine sertleştirici ise Polikem firmasından temin edilen Polires 188 reçine ile uyumlu Cetapox 1588 LH sertleştiricidir. Epoksi reçine ile birlikte kullanılan sertleştiriciler kullanılan epoksi reçineye göre farklılık göstermekte olup, reçinenin temin edildiği yerden, reçine ile uyumlu sertleştirici temin edilmesi gerekmektedir.

Çalışmada kullanılan vinilester reçine ise Poliya firmasından temin edilen Polives 701 Bisfenol-A epoksi bazlı, orta-yüksek reaktiviteli vinilester reçinedir. Polives 701 vinilester reçine uzun süre yüksek ısı dayanımı, yüksek korozyon direnci ve mükemmel

yapışma özelliklerine sahiptir. Çizelge 6. 3' te Polives 701 vinilester reçinenin özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 6. 3 Polives 701 vinilester reçine özellikleri

Viskozite 23 °C	400 (cp)
Özgül ağırlık	1,044 (gr/cm ³)

Polives 701 vinilester reçine yüksek dayanımla beraber esneklik özelliğini de beraberinde bulundurmakta olup, yüksek mekanik özellikleri sebebi ile statik ve dinamik yük dayanımı gerektiren proses, ekipman, yapı sektöründe, yarış ve sürat tekneleri yapımında kullanılmaktadırlar. Ayrıca sıcak su ve güneş kollektör yapımı ve büyük boyutlu tekne yapımında kullanılmaktadırlar. Polives 701 reçine uygun koşullarda muhafaza edildiği takdirde 6 ay raf ömrüne sahiptir.

Polives 701 reçine ile yine Polikem firmasından temin edilen sertleştirici ve hızlandırıcı olmak üzere 2 ayrı kimyasal malzeme kullanılmıştır. Bunlardan biri metil etil keton (MEK) peroksit adı verilen sertleştirici, bir diğeri ise kobalt naftenat ve kobalt oktoat'ın çözeltisine verilen kısa isim olan %6' lık kobalt olarak adlandırılan hızlandırıcıdır. Sertleştiriciler vinilesterlerin içindeki hızlandırıcılar ile reaksiyona girerek veya ısı ile ürünün sertleşmesini-kürlenmesini gerçekleştirirler. Bu reçine ve monomerin (reçine içinde bulunan stiren gibi) sertleşmesi için çapraz-bağ ile sonuçlanan kimyasal reaksiyonu başlatırlar.

6.1.3 Dolgu Malzemeleri

Çalışmada dolgu malzemesi olarak kalsit ve alüminyum hidroksit olmak üzere 2 ayrı dolgu malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan kalsit 5 mikron metre boyutuna ve 2,75 g/cm³ yoğunluğa sahiptir. Alüminyum hidroksit, boyut olarak kalsit ile aynı boyuttadır. Yoğunluğu ise 2,4 g/cm³ dür.

6.2 Numunelerin Hazırlanması

Bu bölümde yürütülen çalışmalar plaka üretimi ve üretilen plakalardan elde edilen numunelerin kodlandırılması şeklinde 2 başlık altında incelenmiştir.

6.2.1 Test Numunelerinin Kodlandırılması

Çalışmada epoksi ve vinilester olmak üzere 2 ayrı matris, kalsit ve alüminyum hidroksit olmak üzere 2 ayrı dolgu malzemesi kullanılmıştır. Ayrıca matris malzemesi içerisine katılan dolgu malzemesi oranları da % 5, % 10 ve % 15 olacak şekilde hazırlanmıştır. Test numunelerinin kodlandırılması ve içerikleri Çizelge 6. 4' de belirtilmiştir.

Çizelge 6. 4 Test numunelerinin kodlandırılması

Kısa Kod	Açıklaması
E	Dolgusuz ve takviyesiz epoksi
E5Ca	Ağırlıkça % 5 kalsit içeren takviyesiz epoksi
E10Ca	Ağırlıkça % 10 kalsit içeren takviyesiz epoksi
E15Ca	Ağırlıkça % 15 kalsit içeren takviyesiz epoksi
E5Al	Ağırlıkça % 5 alüminyum hidroksit içeren takviyesiz epoksi
E10Al	Ağırlıkça % 10 alüminyum hidroksit içeren takviyesiz epoksi
E15Al	Ağırlıkça % 15 alüminyum hidroksit içeren takviyesiz epoksi
EC	E-camı takviyeli dolgusuz epoksi
EC5Ca	E-camı takviyeli ağırlıkça % 5 kalsit içeren epoksi
EC10Ca	E-camı takviyeli ağırlıkça % 10 kalsit içeren epoksi
EC15Ca	E-camı takviyeli ağırlıkça % 15 kalsit içeren epoksi
EC5Al	E-camı takviyeli ağırlıkça % 5 alüminyum hidroksit içeren epoksi

Çizelge 6. 4 Test numunelerinin kodlandırılması (devamı)

Kısa Kod	Açıklaması
EC10Al	E-camı takviyeli ağırlıkça % 10 alüminyum hidroksit içeren epoksi
EC15Al	E-camı takviyeli ağırlıkça % 15 alüminyum hidroksit içeren epoksi
V	Dolgusuz ve takviyesiz vinilester
V5Ca	Ağırlıkça % 5 kalsit içeren takviyesiz vinilester
V10Ca	Ağırlıkça % 10 kalsit içeren takviyesiz vinilester
V15Ca	Ağırlıkça % 15 kalsit içeren takviyesiz vinilester
V5Al	Ağırlıkça % 5 alüminyum hidroksit içeren takviyesiz vinilester
V10Al	Ağırlıkça % 10 alüminyum hidroksit içeren takviyesiz vinilester
V15Al	Ağırlıkça % 15 alüminyum hidroksit içeren takviyesiz vinilester
VC	E-camı takviyeli dolgusuz vinilester
VC5Ca	E-camı takviyeli ağırlıkça % 5 kalsit içeren vinilester
VC10Ca	E-camı takviyeli ağırlıkça % 10 kalsit içeren vinilester
VC15Ca	E-camı takviyeli ağırlıkça % 15 kalsit içeren vinilester
VC5Al	E-camı takviyeli ağırlıkça % 5 alüminyum hidroksit içeren vinilester
VC10Al	E-camı takviyeli ağırlıkça % 10 alüminyum hidroksit içeren vinilester
VC15Al	E-camı takviyeli ağırlıkça % 15 kalsit içeren vinilester

6.3 Plaka Üretimi

Elyaf takviyesiz malzemelerin üretimi için 250X300 mm boyutlarında teflon kalıp kullanılmıştır. Kalıp içerisine 100/50 oranında epoksi reçine/sertleştirici karıştırılarak elde edilen epoksi karışımı dökülmüştür. 24 saat boyunca plakanın kürleşmesi için beklendikten sonra 4 saat 70°C ileri kürleme için beklenmiş ve plakalar optimizasyon için hazır hale gelmiştir. Dolgu maddesi katkılı plakalarda reçineye dolgu maddesinin eklenmesinin ardından mikser ile karıştırma işlemi uygulanmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli kısım; reçine ve dolgu maddesinin tam anlamıyla karışmasını sağlamaktır [53].

Elyaf takviyeli plaka üretimleri için ise 300X300 mm boyutlarında metal plaka kullanılmıştır. Vakum infüzyon için yapılan ön hazırlık şu şekildedir;

- ✓ Kalıp yüzeyi vakslanır,
- ✓ Kalıbın kenarlarında bantlar çekilir,
- ✓ Peel ply ayırıcı konur,
- ✓ 4 kat cam dokuma ve araya 1 kat keçe üst üste yerleştirilir,
- ✓ 2. kat Peel ply konur,
- ✓ Köşelere vakum battaniyesi yerleştirilir,
- ✓ Yüzey vakum torbasıyla kapatılır.

Şekil 6. 1’de belirtilen sarf malzemesi ve donanımlar kullanılarak yukarıdaki adımlar takip edilerek kalıp hazırlama işlemi tamamlanır. Kalıbın hazır hale gelmesinin ardından ise sisteme verilecek reçine hazırlanır. Hazırlanan reçinede kür işleminin gerçekleşmemesi için kalıp hazırlandıktan sonra reçine hazırlanmaya dikkat edilmelidir. Aksi takdirde reçinenin kür işlemi başladıktan sonra emdirme işlemi başlamış olur ve tam anlamıyla ıslatma gerçekleşmemiş olur [52], [54].

Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit plaka üretimi için kullanılan sarf malzemeleri ve donanımlar Şekil 6. 1’de belirtilmiştir.



a) E-camı dokuma



b) Vakum torbası



c) Vakum bağlantı elemanı



d) Flow mesh



e) Spiral hortum



f) E-camı keçe



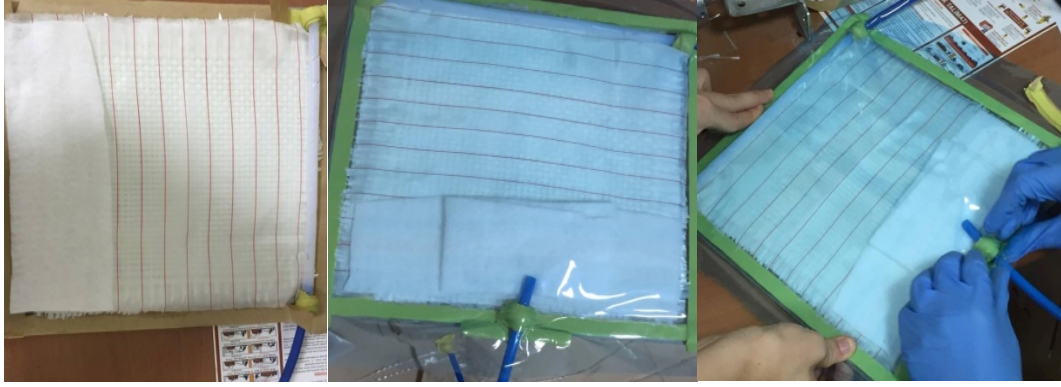
g) Metal plaka



h) Soyma kumaşı (Peel ply)

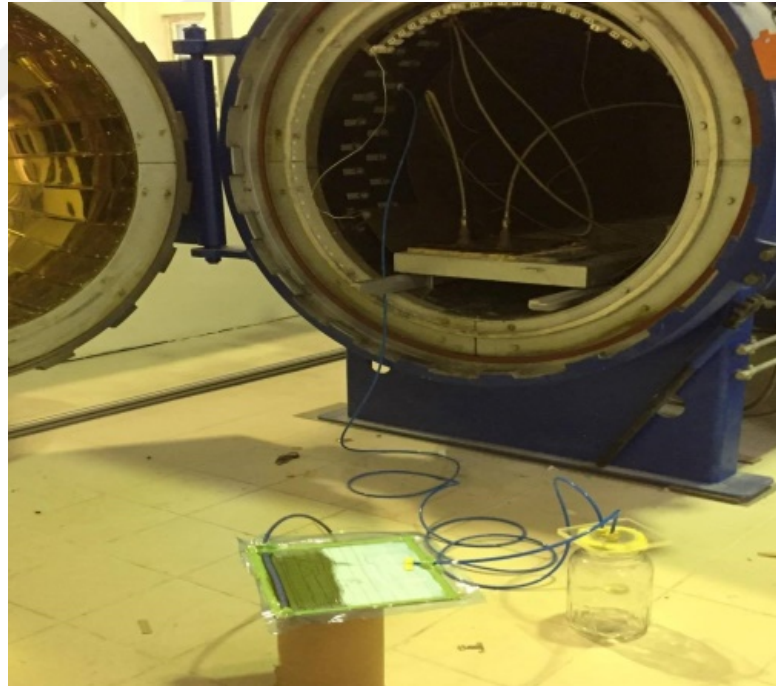
Şekil 6. 1 Vakum infüzyon için gerekli sarf malzemeleri ve donanımlar

Plaka üretiminde vakum kaynağı olarak -900 milibarlık otoklav kullanılmıştır. Kalıp hazırlandıktan sonra reçine emilimi için kalıbın bir tarafına reçinenin içinden geçen boru, diğer tarafa ise otoklavdan vakum sağlayan boru takılır. Vakum infüzyon öncesinde yapılan hazırlık Şekil 6. 2’de görülmektedir.



Şekil 6. 2 Vakum infüzyon hazırlık aşaması

Otoklav yardımı ile fazla havanın sistemden alınması ve sisteme reçine verilmesi sağlanırken, taşma tankı ile de sistemden fazla reçinenin alınması sağlanmıştır. Üretim için oluşturulan sistem Şekil 6. 3’de gösterilmektedir. Her iki matris için de üretim koşulları ve sistemi sabit tutulmuştur. Öncelikle epoksi matrisli kompozit malzeme üretimi tamamlanmış, ardından ise vinilester matrisli kompozit malzeme üretimi yapılmıştır.



Şekil 6. 3 Vakum infüzyon sistemi

Epoksi için belirtilen üretim adımları aynı koşullar ve aynı sistem kullanılarak vinilester matris için kullanılmıştır. Vinilester matris içinde elyaf takviyesiz ve elyaf takviyeli olmak üzere 2 ana malzeme grubu üretilmiş ve 2 ayrı dolgu malzemesi kullanılmıştır.

Belirtilen matris malzemesi ile birlikte kullanılan takviye malzemesi de yine epoksi matriste olduğu gibi 4 kat dokuma e camı ve arada bir kat keçe e camı olmak üzere aynı konfigürasyon kullanılmıştır. Her bir vinilester matrisli plaka üretimi için 300 gr vinilester reçine ve %1 m-per, %0.05 oranında %6'lık kobalt kullanılarak hazırlanmıştır. Burada önemli olan husus reçine tartımının ardından kobalt ve m-per 'in yapıya katılma sırasıdır. Öncelikle reçineye %6'lık kobalt katılmalı ve hızlı bir şekilde karıştırılmalıdır. %6'lık kobalt 'in ardından ise m-per katılmalı ve karışım bal rengi alana kadar karıştırılmaya devam edilmelidir. %6'lık kobalt ve m-per 'in aynı anda yapıya katılmaması çok önemlidir. %6'lık kobalt ve m-per 'in birbiri ile teması alevlenmeye sebep olmaktadır. Şekil 6. 4'de vakum infüzyon yöntemi ile üretilen vinilester matrisli kompozit plaka yer almaktadır.



Şekil 6. 4 Vinilester matrsili kompozit plaka

Sonuç olarak 14 adet epoksi matrisli, 14 adet vinilester matrisli olmak üzere toplamda 28 adet kompozit plaka üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim tamamlandıktan ve standartlar kapsamında deney numuneleri kesildikten sonra karakterizasyon için çeşitli mekanik ve fiziksel deneyler uygulanmıştır. Çizelge 6. 5'de kompozit malzemelere uygulanan deneyler ve standartları belirtilmiştir.

Çizelge 6. 5 Üretilen kompozit plakalara uygulanan testler ve standartları

TEST	STANDART
Çekme Testi	TS EN ISO 527-4/5
Eğme Testi	TS EN ISO 178 2010:A1 2013
Darbe Testi	TS EN ISO 179-1
Shore D Sertlik Testi	TSEN ISO 868
Kalsinasyon Testi	TS EN ISO 1172
Yoğunluk Testi	TS EN ISO 1183-1

6.4 Mekanik Deneyler

Kompozit malzemelere mekanik deneyler kapsamında çekme deneyi, eğme deneyi, darbe deneyi ve Shore D sertlik deneyi uygulanmıştır.

6.4.1 Çekme Deneyi

Kompozit malzemelere en sık uygulanan mekanik testlerden biri çekme testidir. Çekme testi sonucunda malzemenin çekme dayanımı, young modülü ve çekme modülü bulunabilmektedir. Kompozit malzemelere uygulanan çekme testi iki farklı standarttan yararlanılarak yapılabilir. Bunlar; TS EN ISO 527-5 ve ASTM D 3039/D3039M-00 standartlarıdır. Standartlar doğrultusunda plastik matrisli kompozit malzemeler için deney numunesi boyutları 250 mmx25 mm olmaktadır.

Bu çalışma için test numuneleri belirtilen standartlar doğrultusunda Şekil 6. 5’de verilen testere ile sulu kesim ile kesilerek hazırlanmıştır.



Şekil 6. 5 Test numunelerinin kesiminde kullanılan testere

Çekme testleri, Şekil 6. 6 'da belirtilen testleri INSTRON marka 3369 model " 50 kN Elektromekanik Çekme Eğme Basma Test Cihazı " kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Belirtilen cihaz bir bilgisayar programına bağlı olup, numunenin çeneye yerleştirilme işleminin ardından program açılır ve test numunesinin genişlik ve kalınlık değerleri girilir. Ardından numunelere uygulanacak çekme hızı girilir. Bu çalışmada standartlar baz alınarak 50 kN yük altında 5mm/dk hızla deney gerçekleştirilmiştir. Çekme hızının da sisteme girilmesinin ardından tez başlatılır ve kısa sürede tamamlanmaktadır.



Şekil 6. 6 Çekme başlıkları takılı Instron 3369 model

Şekil 6. 7 de ise çekme deneyi sırasında elde edilen test numunesinin kopma anındaki görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 6. 7 Çekme deneyi sırasında kopma gerçekleşen numune

6.4.2 Eğme Deneyi

Eğme deneyi özellikle plastik matrisli kompozitler de mekanik değerlendirme için kullanılmaktadır. Deney sonucunda deney numunesinin eğme dayanımı ve eğme modülü değerleri elde edilebilmektedir. Plastik matrisli kompozit malzemeler için eğme deneyi TS EN ISO 178 2010:A1 2013 standartları doğrultusunda gerçekleştirilmektedir. Belirtilen standart doğrultusunda numune ebatları 80 mmx 15 mm, mesnetler arası mesafe ise 64 mm olmalıdır[56].

Çekme numunelerinde olduğu gibi eğme numuneleri de Şekil 6. 5’de belirtilen testere ile sulu kesilmiş ve numuneler teste hazır hale gelmiştir. Test INSTRON marka 3369 model “ 50 kN Elektromekanik Çekme Eğme Basma Test Cihazı ” için uygun eğme başlığı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yine çekme testinde olduğu gibi eğme testinde de sistem bilgisayar programına bağlıdır. Numunenin cihaza yerleştirilmesi işleminin ardından program açılır, test numunesi ile ilgili genişlik, kalınlık değerleri sisteme girilmektedir. Bu çalışmada belirtilen standartlar baz alınarak deney 10 kN yük altında 5 mm/dk hızla gerçekleştirilmiştir. Şekil 6. 8’de eğme başlığı takılmış test cihazı gösterilmektedir.



Şekil 6. 8 Eğme deneyi için eğme aparatları takılı Instron 3369 model test cihazı

Şekil 6. 9'da ise eğme deneyi sırasında baskıya maruz kalarak eğilme gerçekleşen numune gösterilmektedir.



Şekil 6. 9 Eğme deneyi sırasında baskıya maruz kalarak eğilen numune

6.4.3 Darbe Deneyi

Plastik matrisli kompozit malzemelerde darbe deneyi TSE 179 olarak belirtilen plastikler için charpy deney standardına göre yapılmaktadır. Darbe deneyi, bazı numuneler için deney öncesinde numunenin orta noktasından ~2 mm çentik açmayı

gerektirmektedir. Bu durum daha çok termoplastik matrisli kompozit malzemeler için geçerli olup, gerekli hesaplamalar yapılırken çentik boyutunun göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

Darbe deneyinde yukarıda belirtilen standart göz önüne alındığında deney numunelerinin ebatları 80 mmx10 mm olmaktadır. Uygun boyutlarda hazırlanan numune orta noktasından işaretlenerek, uygun kırma yükü takılı darbe cihazına yerleştirilmekte ve cihaz üzerinde okunan değer kırma yükü olarak kaydedilmektedir. Elde edilen kırma yükü değerinin (6.1) numaralı formülde yerine konması ile ise malzemenin darbe kırılma tokluğu değeri elde edilmektedir[57].

Çentiksiz deney numunelerinin Charpy darbe mukavemeti, a_{cU} , kJ/m² cinsinden aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

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

Burada;

E_c : Deney numunesi kırılırken absorplanan ve düzeltilen enerji, (J)

h : Deney numunesinin kalınlığı, (mm)

b : Deney numunesinin genişliği, (mm)

Darbe testleri yukarıda belirtilen standartlar kapsamında Şekil 6.10'da gösterilen cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Her bir malzeme grubu için Şekil 6.10'da belirtilen testere ile sulu kesim yapılmış ve her bir malzeme grubu için 3 test numunesi elde edilmiştir. Darbe testi için kullanılan test cihazı Şekil 6. 10' da gösterilmiştir.



Şekil 6. 10 Darbe deneyi sırasında kullanılan darbe cihazı

6.4.4 Shore D Sertlik Deneyi

Malzemelerin sertlik ölçümleri, Durotech marka Shore D sertlik cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sertlik değerleri, EN ISO 868 standardına uygun olarak Shore D cinsinden ölçülmüştür. Bu çalışmada sertlik ölçümü Şekil 6. 11’de “Barcoll sertlik cihazı” kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 6. 11 Shore D sertlik ölçümü için kullanılan "Barcoll" sertlik cihazı

Üretilmiş olan kompozit plakalarda üretim aşamasında veya kullanılan malzemelerden ötürü oluşabilecek farklılıklar nedeniyle ölçüm 3 farklı bölgeden yapılmış ve ortalama değer sertlik değeri olarak alınmıştır.

6.5 Fiziksel Deneyler

Fiziksel deneyler kapsamında ise kalsinasyon ve yoğunluk testleri uygulanmıştır.

6.5.1 Kalsinasyon Deneyi

Bu deney kompozit malzemenin içerik olarak nelere sahip olduğunu belirlemek ve bunların malzeme içindeki yüzdelerini hesaplamak için yapılır. Plastik matrisli kompozit malzemeler için kalsinasyon deneyi TS 1177 EN ISO 1172 'ye göre yapılmaktadır [58].

Plastik matrisli kompozit malzemeler dışında bu standart aşağıda belirtilen malzemelere de uygulanmaktadır;

- a) Tekstil camı ile takviye edilmiş termoplastik kalıp döküm kompozitler ve granülleri,
- b) Termoset ya da termoplastik reçine ile yapışmış fiberli ya da fibersiz kompozitler.

Kalsinasyon deneyi sırasında izlenen işlem basamakları ise şu şekilde sıralanmaktadır;

- ✓ Öncelikle deney numuneleri tartılır,
- ✓ Ardından deney numunesi için uygun standart baz alınarak kül fırınında kalsine işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem fiber takviyeli plastik matrisli kompozitler için 1 saat 600°C olarak gerçekleştirilmektedir,
- ✓ Son adımda ise kül fırınından çıkan numunelerin tartımı yapılmaktadır.

Yukarıda belirtilen adımların gerçekleştirilmesinin ardından her numune için cam yüzdesi M_{cam} , başlangıç kütlesinin yüzdesi olarak aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$M_{cam} = \frac{m_3 - m_2}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (6.2)$$

Burada;

m_1 : Kuru kayıkçık veya krozenin başlangıç kütlesi, g

m_2 : Kuru kayıkçık veya krozenin ve kurutulmuş numunenin başlangıç kütlesi, g

m_3 : Kayıkçık veya kroze ve kalsinasyon işleminden sonraki kalıntının son kütlesi, g'dır.

Bu çalışmada kalsinasyon deneyleri Şekil 6. 12’de belirtilen Protherm marka PLF 120/5 model kül fırını kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6. 12 Kalsinasyon işlemi için kullanılan "Protherm" marka kül fırını

6.5.2 Yoğunluk Deneyi

Kompozit numunelerin yoğunluklarını belirlemek amacıyla TS EN ISO 1183-1 göre yoğunluk tespiti daldırma metodu ile yapılmaktadır [58].

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

$$\rho_s = \frac{m_{s,A} \times \rho_{IL}}{m_w - m_{s,IL}} \quad (6.4)$$

Burada;

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

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

ρ_{IL} : daldırma sıvısının yoğunluğu, g/cm³'tür.

Çalışmada yoğunluk ölçümü için kullanılan cihaz Şekil 6. 13'de belirtilmiştir. Belirtilen terazi "Precisa" markadır. Gerekli teçhizatın kullanılması ve yoğunluk moduna geçilmesi ile beraber cihaz; havadaki ağırlığı ve sıvıdaki ağırlığı ölçerek sonuç olarak yoğunluk değerini otomatik olarak almamızı sağlamaktadır. Ayrıca yoğunluk ölçümü sırasında daldırma sıvısı olarak etil alkol kullanılmıştır.



Şekil 6. 13 Daldırma yöntemi ile yoğunluk ölçümü için kullanılan cihaz

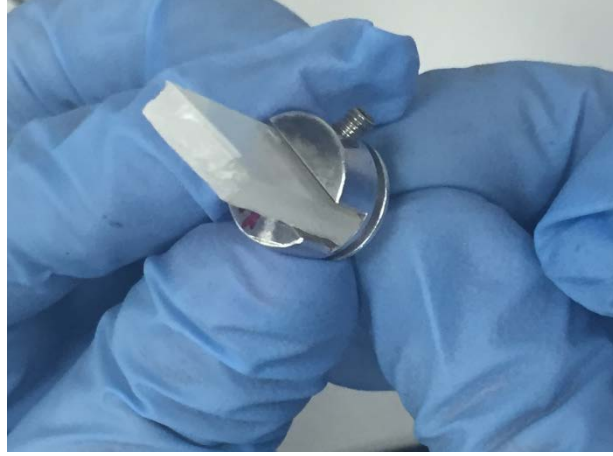
6.6 Mikroskopik Görüntüleme

Mikroskopik görüntüleme taramalı elektron mikroskobu ile yapılmıştır. Şekil 6. 14'de belirtilen Phenom marka "Pro" model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.



Şekil 6. 14 Phenom marka "Pro" model taramalı elektron mikroskobu

Görüntüleme yapılmadan önce numuneler kırık yüzeyli bölgelerinden kesilir ve ardından altın kaplama işlem için Şekil 6. 15’de belirtilen aparata yerleştirilir.

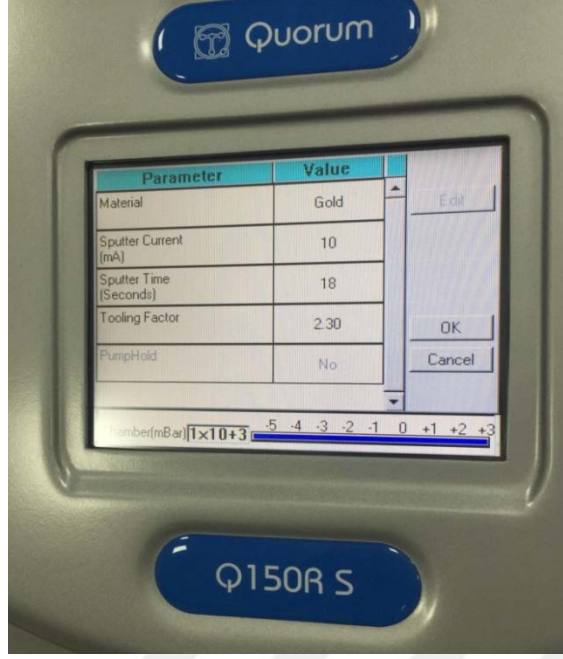


Şekil 6. 15 Görüntülenecek numunelerin kaplama öncesinde kalıba yerleştirilmesi

Bu işleminde ardından şekilde görülen aparata yerleştirilmiş numune altın kaplama için Şekil 6. 16’da belirtilen cihaza yerleştirilir ve Şekil 6. 17’de belirtilen parametreler doğrultusunda kaplama işlemi gerçekleştirilir.



Şekil 6. 16 Sem numuneleri için altın kaplama cihazı



Şekil 6. 17 Altın kaplama işlemi parametreleri

Kaplama işleminin ardından numuneler Şekil 6. 14'de belirtilen taramalı elektron mikroskobu cihazına yerleştirilerek görüntüler alınmıştır.

SONUÇLAR VE BULGULAR**7.1 Epoksi Matris İçin Deney Sonuçları**

Epoksi matrisli kompozit malzeme üretiminin tamamlanmasının ardından numuneye çeşitli fiziksel, mekanik testler yapılmış ve kırık yüzey görüntüleri incelenmiştir. Mekanik deneyler kapsamında çekme, eğme, darbe sertlik deneyi, fiziksel deneyler kapsamında ise yoğunluk ve kalsinasyon deneyi yapılmıştır. Kırık yüzey görüntüleri ise taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir.

7.1.1 Çekme Deneyi

Bölüm 6 'da belirtilen standartlara göre uygulanan çekme deneyi sonuçları E-camı desteksiz ve E-camı destekli olmak üzere 2 ayrı çizelge halinde Çizelge 7. 1 ve Çizelge 7. 2' de belirtilmiştir.

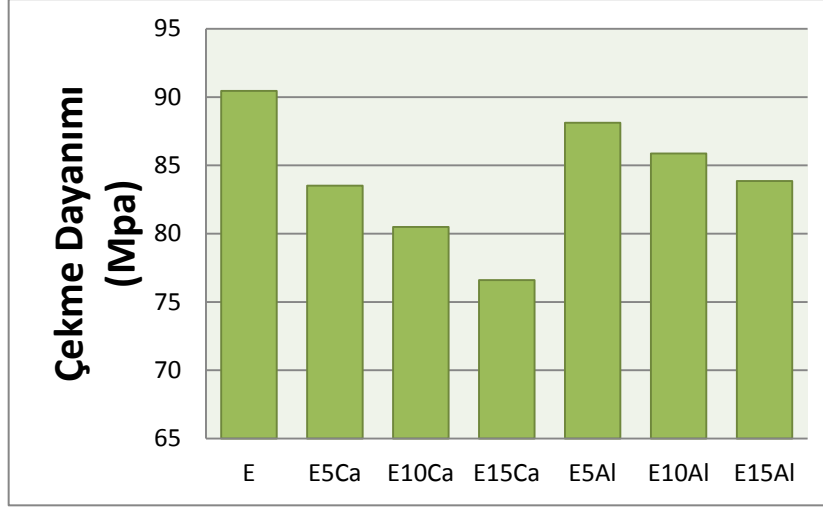
Çizelge 7. 1 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin çekme deneyi sonuçları

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Yük (N)	Çekme Modülü (Mpa)
E1	24,53	3,66	89,52	3151,37	3693,54
E2	24,44	3,69	91,47	4533,28	3564,29
E3	24,48	3,57	90,36	3147,62	3612,47

Çizelge 7. 1 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin çekme deneyi sonuçları
(devamı)

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Yük (N)	Çekme Modülü (Mpa)
E5Ca1	24,59	3,46	83,65	3135,24	3560,79
E5Ca2	24,73	3,51	82,57	4139,03	3597,86
E5Ca3	24,4	3,48	84,34	3321,27	3486,3
E10Ca1	24,37	3,03	79,59	3086,05	3517,85
E10Ca2	25,14	3,1	78,24	3103,9	3604,29
E10Ca3	24,59	3,46	83,65	3435,24	3693,45
E15Ca1	24,43	3,22	75,19	3109,74	3397,45
E15Ca2	24,59	3,26	78,42	3119,46	3497,29
E15Ca3	24,45	3,31	76,21	3014,77	3473,56
E5Al1	25,23	3,36	88,63	4529,85	3413,41
E5Al2	24,69	3,3	88,21	4038,6	3398,75
E5Al3	23,74	3,39	87,54	3642,62	3596,74
E10Al1	24,61	3,34	84,27	4532,01	3596,74
E10Al2	24,54	3,41	85,96	3835,68	3680,23
E10Al3	24,31	3,22	87,39	4024,63	3580,12
E15Al1	24,69	3,68	81,57	3942,92	3863,11
E15Al2	24,25	3,61	83,56	4132,05	3875,24
E15Al3	25,08	3,79	86,42	4938,66	3846,8

Çizelge 7. 1 epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin çekme deneyi sonucunda elde edilen verileri içermektedir. Üretilen her plakadan 3'er adet test numunesi hazırlanmış ve çekme deneyi de dahil olmak üzere tüm deneyler 3'er kez tekrarlanmıştır. Belirtilen çizelgede bulunan çekme dayanımı değerlerinin ortalaması alınarak hazırlanan grafik ise Şekil 7. 1'de yer almaktadır. Bu grafikten yola çıkarak dolgu malzemelerinin çekme dayanımı değeri üzerindeki etkisini tespit etmek mümkün olmaktadır.



Şekil 7. 1 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin çekme dayanımı grafiği

Şekil 7. 1’de yer alan çekme dayanımı değerleri göz önünde bulundurulduğu takdirde her iki dolgu malzemesi katkısının etkisi ile de çekme dayanımı değerlerinde düşüşler olduğu görülmektedir. Bu durum dolgu malzemesinin matris içinde oluşturduğu süreksizlik ile açıklanabilmektedir.

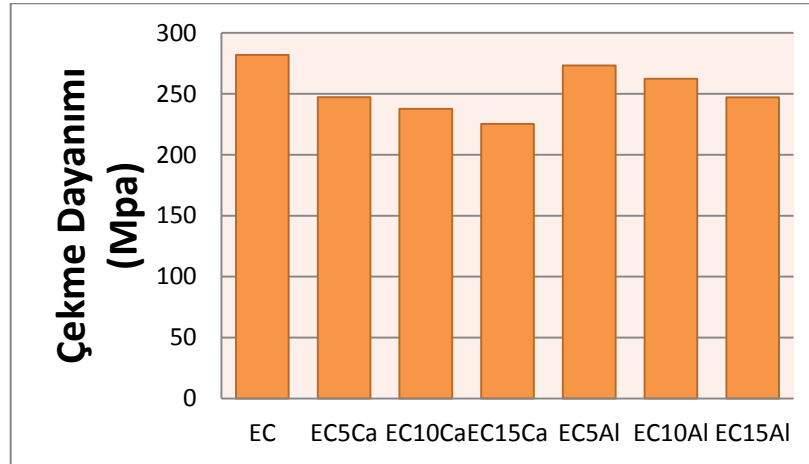
Çizelge 7. 2 Epoksi matrisli E-camı takviyeli numunelerin çekme deneyi sonucu

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Yük (N)	Çekme Modülü (Mpa)
EC1	24,81	3,17	280,21	16329,49	11823,65
EC2	24,32	3,32	278,45	14170,23	12204,63
EC3	24,55	3,28	286,94	16436,47	12645,07
EC5Ca1	24,41	3,21	242,63	13514,67	11742,23
EC5Ca2	25,56	3,35	268,12	14176,34	12324,51
EC5Ca3	24,69	3,32	231,06	13651,26	10525,46
EC10Ca1	24,45	3,56	234,23	13794,41	10663,54
EC10Ca2	24,57	3,5	221,27	12360,52	13896,45
EC10Ca3	24,32	3,49	257,58	12368,09	10712,04
EC15Ca1	24,63	3,4	232,36	13712,95	10935,86
EC15Ca2	25,14	3,47	225,3	13342,93	10756,49

Çizelge 7. 2 Epoksi matrisli E-camı takviyeli numunelerin çekme deneyi sonucu (devamı)

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Yük (N)	Çekme Modülü (Mpa)
EC15Ca3	24,32	3,44	218,34	14333,3	10412,95
EC5Al1	24,65	3,64	275,83	14245,49	12013,41
EC5Al2	24,72	3,52	269,54	148234,3	12365,41
EC5Al3	23,8	3,49	274,21	15425,09	12973,12
EC10Al1	25,27	3,35	269,18	14396,29	11675,4
EC10Al2	24,45	3,38	252,03	14287,6	12037,52
EC10Al3	24,52	3,36	265,87	15411,93	13650,27
EC15Al1	24,84	3,32	246,14	14901,09	14921,39
EC15Al2	24,73	3,3	237,98	13769,74	11214,35
EC15Al3	24,51	3,29	257,21	14893,47	14876,21

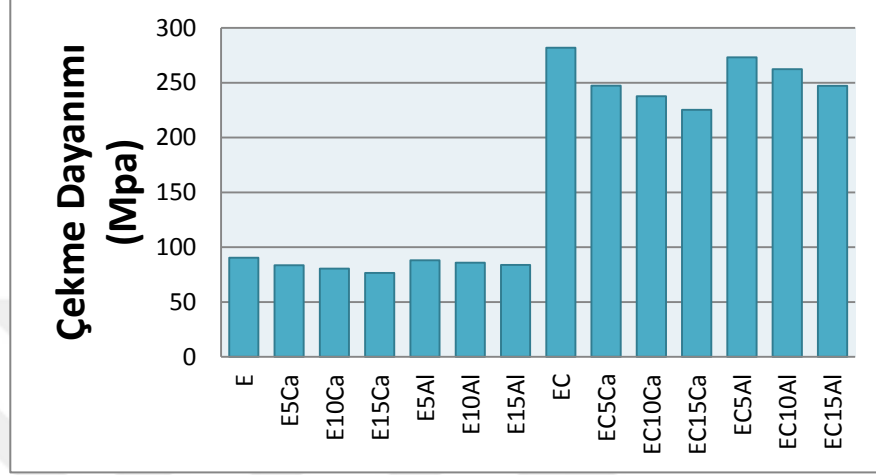
Çizelge 7. 2’de belirtilen epoksi matrisli E-camı takviyeli numunelerin eğme deneyi sonucunda elde edilen eğme dayancı değerlerinin ortalaması alınarak hazırlanan grafik ise Şekil 7. 2’de belirtilmiştir.



Şekil 7. 2 Epoksi matrsli E-camı takviyeli numunelerin çekme dayanımı grafiği

Şekil 7. 1 ve 7. 2’de fiber takviyesiz ve fiber takviyeli numunelerin çekme dayancı değerlerinin kendi aralarında değerlendirilmesi için verilirken, Şekil 7. 3’de tüm epoksi

matrisli numunelerin çekme dayancı sonuçlarından elde edilen çekme dayancı değerleri kullanılarak hazırlanan çekme dayanımı grafiği verilmiştir. Şekil 7. 3'e göre fiber takviyeli numunelerin çekme dayanımı değerleri fiber takviyesiz numunelere göre oldukça yüksektir. Fakat yine dolgu malzemesinin yapı içerisinde süreksizlik oluşturması ile etkisi ile düşüşler olmuştur.



Şekil 7. 3 Epoksi matrisli numunelerin çekme dayanımı grafiği

7.1.2 Eğme Deneyi

Bölüm 6'da belirtilen TS EN ISO 178 2010: A1 2013 standardına uygun olarak kesilen ve test edilen epoksi matrisli numunelerin fiber takviyesiz numunelerden elde edilen sonuçları eğme deneyi sonuçları Çizelge 7. 3 'de belirtilmiştir.

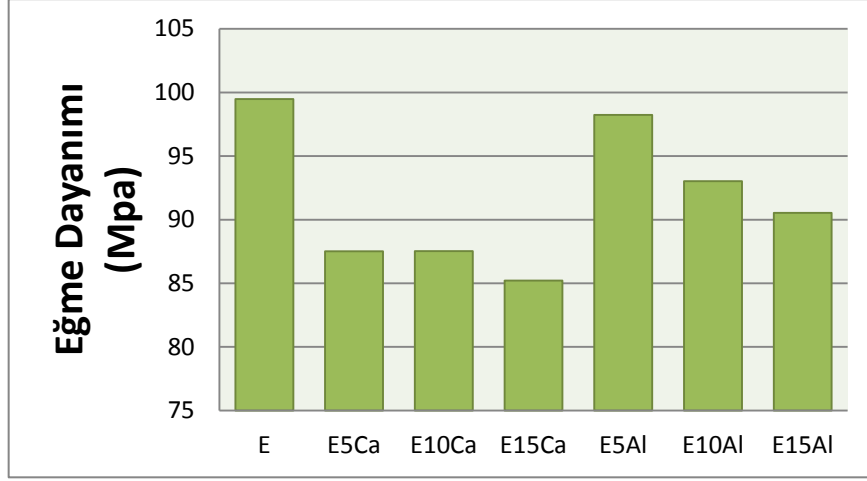
Çizelge 7. 3 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin eğme deneyi sonucu

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Eğme Dayanımı (Mpa)	Yük (N)	Eğme Modülü (Mpa)
E1	15,21	3,79	90,52	159,0129	3386,63
E2	14,8	3,75	100,68	183,4893	3279,21
E3	15,47	3,67	107,24	179,7649	3358,6
E5Ca1	15,15	3,38	89,4	129,7105	2863,21
E5Ca2	14,97	3,31	85,54	141,9709	3007,36
E5Ca3	15,63	3,44	87,63	141,9275	2942,91

Çizelge 7. 3 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin eğme deneyi sonucu (devamı)

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Eğme Dayanımı (Mpa)	Yük (N)	Eğme Modülü (Mpa)
E10Ca1	14,86	3,92	88,91	171,2715	3152,35
E10Ca2	15,45	3,76	86,58	148,1245	3206,83
E10Ca3	15,51	3,73	87,12	149,5619	3164,2
E15Ca1	15,8	3,32	84,87	136,9394	3026,53
E15Ca2	14,37	3,49	80,65	242,1766	2975,61
E15Ca3	14,74	3,37	90,15	275,0295	2986,34
E5Al1	14,34	3,74	98,58	175,656	3291,16
E5Al2	15,4	3,68	98,49	172,0368	3164,27
E5Al3	14,71	3,73	97,63	165,8074	3258,6
E10Al1	15,58	3,39	92,27	165,6843	3151,76
E10Al2	14,47	3,42	93,54	175,9023	3145,28
E10Al3	15,5	3,52	93,26	155,9535	3296,81
E15Al1	14,67	3,81	89,4	161,5772	2965,47
E15Al2	15,3	3,8	92,65	155,6296	2893,62
E15Al3	14,95	3,76	89,57	168,2548	3062,51

Çizelge 7. 3 epoksi matrisli fiber takviyesiz plakalardan hazırlana numunelerin eğme deneyine tabii tutulması sonucunda elde edilen verileri içermektedir. Çekme deneyinde olduğu gibi burada da her grup için test 3 kez tekrarlanmıştır. Deney sonucunda dayanım değeri üzerinden yorum yapılacağı için ise eğme dayanımı değerlerinin ortalaması alınarak Şekil 7. 4’de belirtilen grafik elde edilmiştir.



Şekil 7. 4 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin eğme dayanımı grafiği

Şekil 7. 4'e göre epoksi matrisli fiber takviyesiz numunenin eğme dayanımı değeri, fiber takviyesiz dolgu malzemesi katkılı epoksi matrisli numunelere göre daha yüksektir. Bu durum bir önceki kısımda da bahsedildiği üzere dolgunun matris içerisinde süreksizlik oluşturmasından kaynaklanıştır.

Yine Şekil 7. 4 incelendiğinde takdirde kalsit dolgusunun kompozit yapı üzerindeki olumsuz etkisinin alüminyum hidroksit dolgusunun dayanım düşürücü etkisinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Epoksi matrisli numunelerden elde edilen ortalama eğme dayanımı değeri ~100 mpa iken, %5 kalsit dolgulu epoksi matrisli numunelerde bu değer ~87 mpa, %5 alüminyum hidroksit numunelerde ise ~97 mpa olmaktadır. Alümin hidroksit dolgusunun katıldığı numunelerde dayanım değerlerinin kalsit dolgusunun katıldığı numunelere göre daha yüksek elde edilmesi ise alüminyum hidroksit 'in dolgusunun kimyasal yapısı ile açıklanmaktadır.

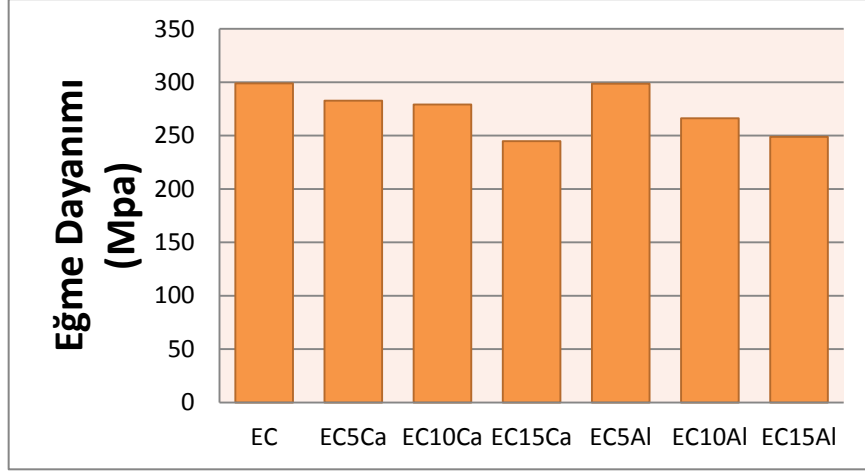
Alüminyum hidroksit ($Al(OH)_3$), (+3) değerliklidir ve bu sebeple kalsit dolgusuna göre matris ile daha kuvvetli bağ yaparak, matris içerisinde daha uniform bir şekilde bulunmaktadır.

Çizelge 7. 4 ise epoksi matrisli E-camı takviyeli numunelere uygulanan eğme deneyi sonucunda elde edilen verileri içermektedir.

Çizelge 7. 4 Epoksi matrisli E-camı takviyeli numunelerin eğme deneyi sonucu

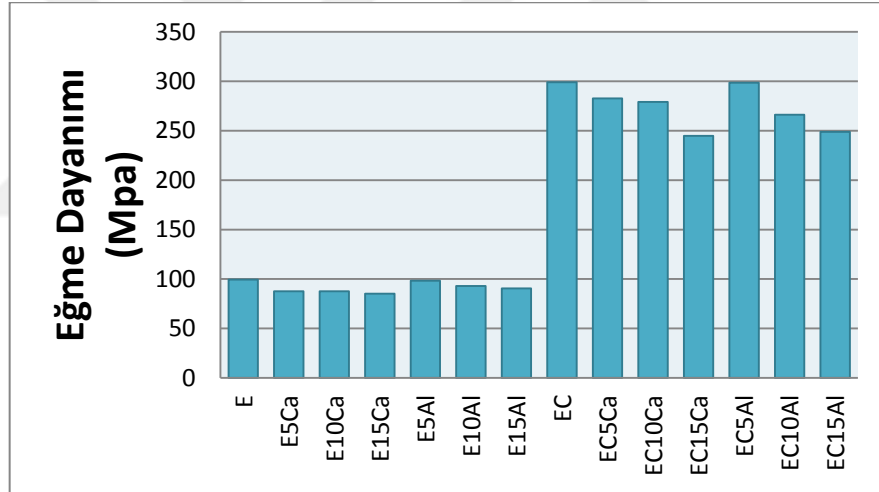
Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Eğme Dayanımı (Mpa)	Yük (N)	Eğme Modülü (Mpa)
EC1	15,63	3,88	310,82	491,438	16984,25
EC2	15,41	3,71	296,72	463,5057	16763,46
EC3	15,36	3,8	289,31	467,8143	17085,62
EC5Ca1	15,6	3,85	285,91	505,3402	12598,44
EC5Ca2	14,86	3,8	279,11	502,2241	12365,01
EC5Ca3	15,57	3,8	282,96	923,5992	12731,56
EC10Ca1	15,85	3,74	280,47	512,3579	14525,62
EC10Ca2	15,59	3,79	283,67	475,2012	13986,87
EC10Ca3	14,83	3,8	273,06	464,0342	14533,95
EC15Ca1	14,84	3,61	240,78	401,1639	11463,28
EC15Ca2	15,76	3,73	235,19	390,0516	12654,37
EC15Ca3	15,63	3,66	258,55	460,9152	11055,4
EC5Al1	15,78	3,68	299,21	518,5703	15612,78
EC5Al2	15,63	3,71	298,15	560,0768	15963,34
EC5Al3	14,51	3,69	298,46	560,0967	16025,46
EC10Al1	15,58	3,85	270,23	487,0738	14960,55
EC10Al2	15,73	3,92	262,45	490,0931	14963,72
EC10Al3	15,25	3,82	265,87	470,3181	13982,15
EC15Al1	15,49	3,78	251,35	461,1038	12441,52
EC15Al2	15,67	3,96	249,52	441,9013	12963,74
EC15Al3	14,83	3,84	245,85	456,5617	12572,15

Eğme dayanımı sonuçlarına göre E-camı takviyeli malzeme grubunda daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar çekme dayanımı sonuçları ile benzerlik göstermekte olup dolgu maddesi ilavesi ile dayanım değerlerinde yer düşüşler meydana geldiği tespit edilmiştir. Çizelge 7. 4’de belirtilen verilerden yararlanılarak elde edilen, eğme dayanımı grafiği ise Şekil 7. 5’ de yer almaktadır.



Şekil 7. 5 Epoksi matrisli E-camı takviyeli numunelerin eğme dayanımı grafiği

E- camı takviyeli ve E- camı takviyesiz numuneler için 2 ayrı grafik halinde belirtilen eğme dayanımı grafiklerinin bir araya gelmesiyle oluşan tüm epoksi matrisli numuneler için elde edilen eğme dayanımı grafiği Şekil 7. 6’da yer almaktadır.



Şekil 7. 6 Epoksi matrisli numunelerin eğme dayanımı grafiği

Epoksi matrisli tüm numunelerin eğme dayanımı sonuçlarını içeren Şekil 7. 6’ya bakıldığı zaman yapılan tüm mekanik deneylerde olduğu gibi E-camı takviyeli yani fiber takviyeli numunelerden elde edilen tüm değerler fiber takviyesiz numunelere kıyasla çok daha yüksektir. Dolgu malzemeleri ise fiber takviyeli numunelerde de aynı etkiyi göstermiş, yapı içerisinde oluşturduğu süreksizlik sebebi ile düşüşlere yol açmıştır.

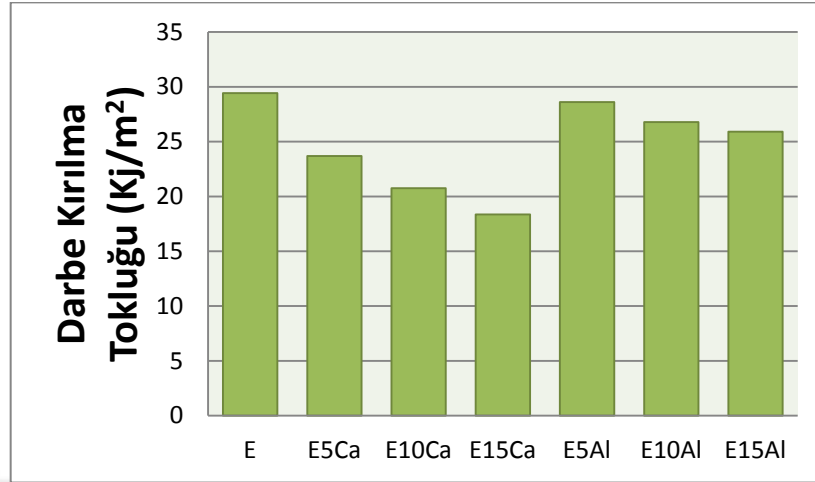
7.1.3 Darbe Deneyi

Darbe deneyi 6. Bölüm 'de belirtilen TS EN ISO 179-1 standardı baz alınarak uygulanmıştır. Darbe deneyi sonucunda epoksi matrisli fiber takviyesiz numuneler için elde edilen veriler Çizelge 7. 5'deki gibidir.

Çizelge 7. 5 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin darbe deneyi sonucu

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Yük (N)	Darbe kırılma tokluğu (Kj/m ²)
E1	9,91	3,76	1,04	28,06
E2	9,23	3,78	1,1	31,54
E3	9,59	3,7	1,01	28,69
E5Ca1	9,5	3,87	0,92	25,27
E5Ca2	9,69	3,79	0,88	24,14
E5Ca3	9,29	3,84	0,84	23,69
E10Ca1	9,88	3,42	0,72	21,55
E10Ca2	9,96	3,36	0,66	19,87
E10Ca3	9,39	3,48	0,68	20,83
E15Ca1	9,68	3,42	0,61	18,47
E15Ca2	9,91	3,38	0,52	15,78
E15Ca3	9,44	3,47	0,76	23,26
E5Al1	9,87	3,72	1,19	32,47
E5Al2	9,75	3,68	0,9	25,19
E5Al3	9,69	3,65	0,99	28,19
E10Al1	9,21	3,4	0,92	29,41
E10Al2	9,47	3,35	0,76	24,11
E10Al3	9,63	3,46	0,89	26,84
E15Al1	9,71	3,84	1,07	28,75
E15Al2	9,83	3,76	0,97	26,41
E15Al3	9,74	3,81	0,83	22,54

Çizelge 7. 5’de yer alan darbe kırılma tokluğu verileri kullanılarak hazırlanan, epoksi matrisli numuneler için darbe kırılma tokluğu grafiği Şekil 7. 7’de yer almaktadır.



Şekil 7. 7 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numuneler için darbe kırılma tokluğu grafiği

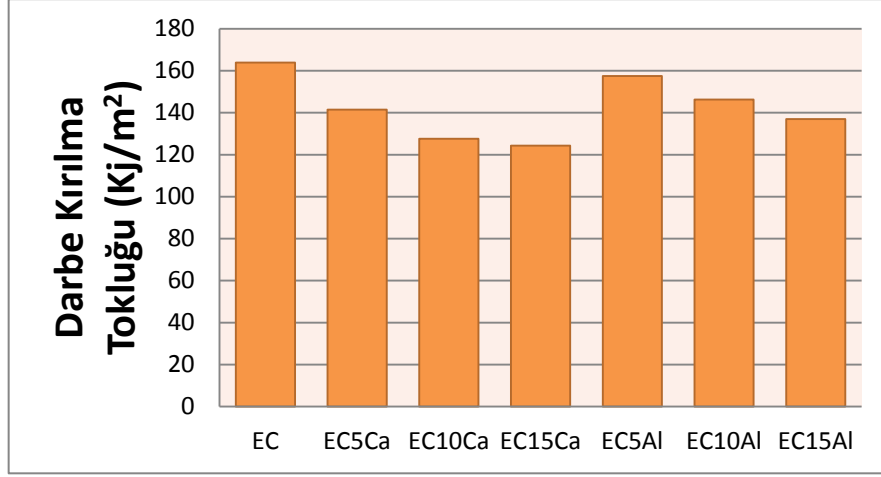
Şekil 7. 7’de ise Çizelge 7. 5’de verilen darbe deneyi sonucunda elde edilen darbe dayanımı değerlerinden yola çıkarak hesaplanan ortalama darbe kırılma tokluğu değeri yer almaktadır. Grafikten de anlaşılabileceği üzere dolgu malzemesi etkisi ile darbe kırılma tokluğu değerlerinde düşüşler olmuştur. Epoksi matrisli numunelerin ortalama kırılma tokluğu değeri $\sim 30 \text{ kJ/m}^2$ iken %5 kalsit dolgulu numunede bu değer %18’lik bir düşüşe uğrayarak $\sim 24 \text{ kJ/m}^2$ değerine ulaşmıştır. Ağırlıkça %5 oranında alüminyum hidroksit dolgusunun yapıya katılması ile ise bu değer epoksi matrisli numunenin darbe kırılma tokluğu değerine göre %6’lık bir azalmayla $\sim 28 \text{ kJ/m}^2$ değerine ulaşmıştır.

Darbe kırılma tokluğu değerlerinde de görüldüğü üzere kalsit dolgusunun yapının darbe dayanımı üzerindeki etkisi alüminyum hidroksit dolgusuna kıyasla olumsuz yöndeki etkisi daha fazla olmuştur. Bu durumun daha önceki bölümlerde de değinildiği üzere alüminyum hidroksitin kimyasal yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Fakat bu düşüşün, çalışmalar sırasında dolgu malzemesi ile matris malzemesinin homojen bir şekilde karıştırılamama yani çalışma koşullarından da kaynaklanabileceği ihtimali de vardır. Bu durumun önüne geçebilmek için mutlaka ek karıştırma donanımları kullanılmalıdır. Ayrıca nihai sonuca varabilmek adına elde edilen numunelere mutlaka çeşitli kimyasal testler uygulanmalıdır.

Çizelge 7. 6 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin darbe deneyi sonucu elde edilen veriler

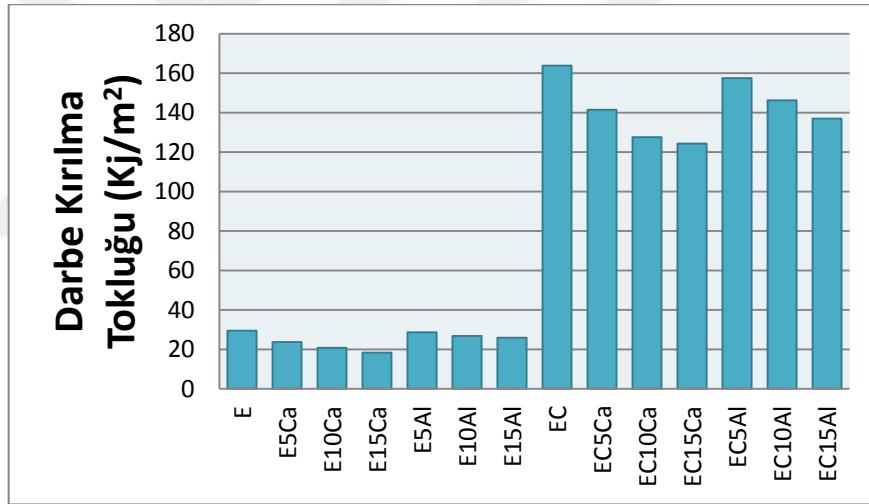
Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Yük	Darbe kırılma tokluğu (Kj/m ²)
EC1	9,84	3,86	6,12	161,33
EC2	9,53	3,75	5,92	165,85
EC3	9,85	3,79	6,13	164,47
EC5Ca1	9,86	3,78	5,43	145,79
EC5Ca2	9,25	3,74	4,9	141,65
EC5Ca3	9,44	3,82	4,93	136,91
EC10Ca1	9,89	3,86	4,8	125,87
EC10Ca2	9,26	3,91	4,79	132,42
EC10Ca3	9,57	3,87	4,61	124,48
EC15Ca1	9,9	3,68	4,83	132,81
EC15Ca2	9,42	3,71	4,17	119,42
EC15Ca3	9,56	3,76	4,34	120,74
EC5Al1	9,34	3,68	5,62	163,56
EC5Al2	9,55	3,65	5,49	157,61
EC5Al3	9,68	3,72	5,45	151,42
EC10Al1	9,79	3,83	5,59	149,28
EC10Al2	9,67	3,89	5,69	151,43
EC10Al3	9,2	3,77	4,79	138,14
EC15Al1	9,78	3,66	5,24	146,64
EC15Al2	9,39	3,74	4,74	135,08
EC15Al3	9,58	3,68	4,55	129,17

Çizelge 7. 6'da belirtilen verilerden darbe kırılma tokluğu değeri kullanılarak hazırlanan epoksi matrisli E-camı takviyeli numunelere ait darbe kırılma tokluğu grafiği ise Şekil 7. 8' de gösterilmektedir.



Şekil 7. 8 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin darbe kırılma tokluğu grafiği

Şekil 7. 9 ise tüm epoksi matrisli numunelere uygulanan darbe deneyi sonucunda elde edilen darbe kırılma tokluğu değerleri yer almaktadır.



Şekil 7. 9 Epoksi matrisli numuneler için elde edilen darbe kırılma tokluğu grafiği

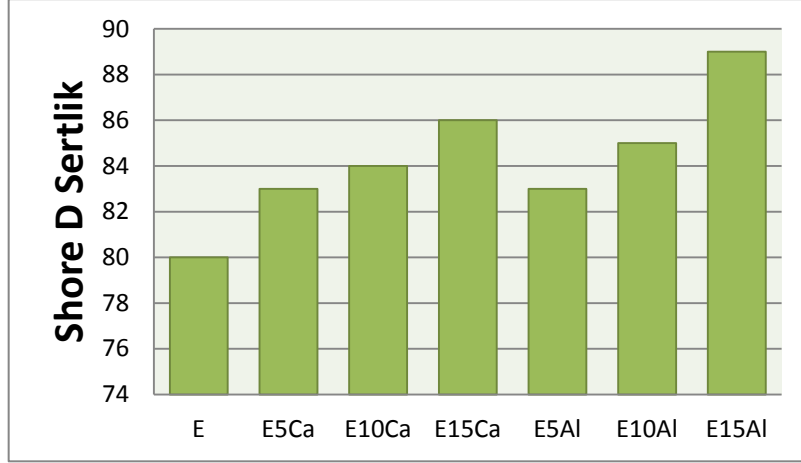
7.1.4 Shore D Sertlik Deneyi

Shore D sertlik deneyi TS EN ISO 868 standardına uygun şekilde, “Barcoll” sertlik cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir plaka için 3 farklı ölçüm değeri alınmış olup sertlik değerleri Çizelge 7. 7’de belirtilmiştir.

Çizelge 7. 7 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin Shore D sertlik değerleri

Numune	Shore D Sertlik	Ortalama Sertlik Değeri
E1	80	80
E2	80	
E3	79	
E5Ca1	84	83
E5Ca2	83	
E5Ca3	83	
E10Ca1	84	84
E10Ca2	84	
E10Ca3	85	
E15Ca1	87	86
E15Ca2	86	
E15Ca3	86	
E5Al1	83	83
E5Al2	83	
E5Al3	84	
E10Al1	85	85
E10Al2	86	
E10Al3	85	
E15Al1	88	89
E15Al2	90	
E15Al3	88	

Çizelge 7. 7' de fiber takviyesiz numunelerin 3 farklı bölgeden alınan sertlik değerleri ve bu değerlerin ortalaması belirtilmiştir. Belirtilen çizelgeye göre dolgu malzemelerinin etkisi ile sertlik değerlerinde bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum beklenen bir durumdur, genel olarak tüm dolgulara özgü bir özelliktir. Fakat burada da yine alüminyum hidroksit dolgusunun etkisi kalsit dolgusuna göre daha olumlu bir yönde olarak sertlik arttırmada kalsit dolgusuna oranla daha etkili olmuştur.



Şekil 7. 10 Epoksi matrisli fiber takviyesiz numunelerin Shore D sertlik değerlerinden elde edile grafik

Epoksi matrisli E-camı takviyeli numunelerin “Barcoll” sertlik ölçüm cihazı ile alınan Shore D Sertlik değerleri Çizelge 7. 8’de yer almaktadır. Ölçüm sırasında elde edilen plakanın 3 farklı bölgesinden ölçüm alındığı için 3 farklı sertlik değeri alınmıştır. Ardından bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Ortalama sertlik değerleri kullanılarak elde edilen Shore D Sertlik grafiği Şekil 7. 10’da yer almaktadır.

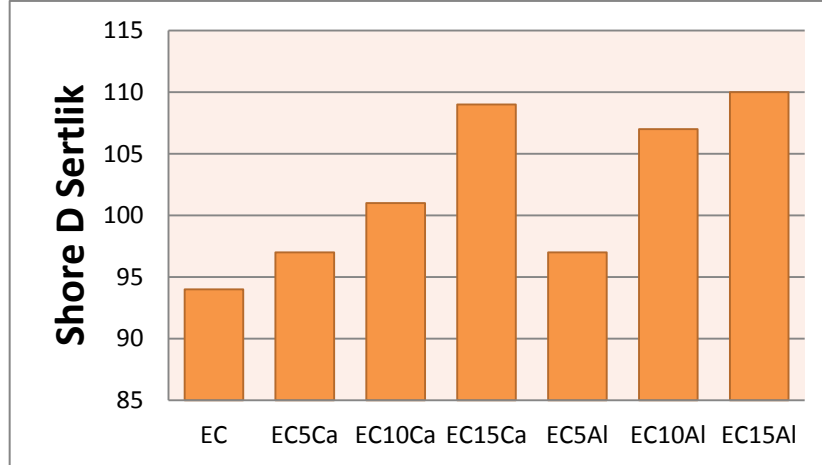
Çizelge 7. 8 Epoksi matrisli E-camı takviyeli numunelerin Shore D sertlik değerleri

Numune	Shore D Sertlik	Ortalama Sertlik Değeri
EC1	94	94
EC2	94	
EC3	94	
EC5Ca1	96	97
EC5Ca2	98	
EC5Ca3	98	
EC10Ca1	102	101
EC10Ca2	100	
EC10Ca3	102	
EC15Ca1	109	109
EC15Ca2	109	
EC15Ca3	109	

Çizelge 7. 8 Epoksi matrisli E-camı takviyeli numunelerin Shore D sertlik değerleri (devamı)

Numune	Shore D Sertlik	Ortalama Sertlik Değeri
EC5Al1	97	97
EC5Al2	97	
EC5Al3	97	
EC10Al1	105	107
EC10Al2	108	
EC10Al3	108	
EC15Al1	112	110
EC15Al2	110	
EC5Al3	110	

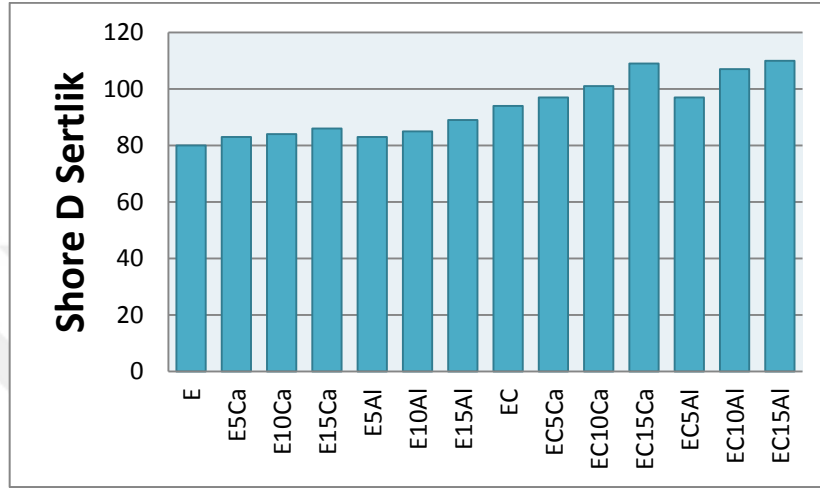
Çizelge 7. 7’de belirtilen sertlik değerleri incelenecek olursa ise; epoksi matrisli E-camı takviyeli dolgu maddesi katkısız numunelerin ortalama sertlik değeri 94 iken, ağırlıkça %5 kalsit etkisi ile bu değer 97 olmuş ve ağırlıkça artan oranlarda kalsit ile bu değerde de artışlar gözlenmiştir. Alüminyum hidroksit dolgusu da kalsit dolgusu gibi sertlik değerlerinde artışa sebebiyet vermiştir.



Şekil 7. 11 Epoksi matrisli E-camı takviyeli numunelerin sertlik grafiği

Şekil 7. 10 ve Şekil 7. 11’de sırası ile epoksi matrisli fiber takviyesiz ve epoksi matrisli E-camı takviyeli numunelerin sertlik değerleri kullanılarak elde edilen grafikler yer almaktadır. Bu grafikler fiber takviyeli ve fiber takviyesiz numuneleri rahatlıkla kendi

aralarında kıyas etmemize imkân tanımaktadır. Elde edilen sonuçları tüm epoksi matrisli numuneleri kendi arasında değerlendirebilmek amacı ile ise Şekil 7. 12’de epoksi matrisli tüm numuneler için elde edilen sertlik değerleri kullanılarak oluşturulan grafik yer almaktadır. Şekil 7. 12’ye göre E-camı takviyeli numunelerin sertlik değerlerinde takviyesiz numunelere göre ~% 12’lik artış olduğu ve yine dolgu malzemesi etkisi ile de sertlik değerlerinde artışlar olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7. 12 Epoksi matrisli numuneler için elde edilen Shore D sertlik grafiği

7.1.5 Kalsinasyon Deneyi

Kalsinasyon deneyi ise kompozit malzeme içerisindeki fiber hacim oranlarını tespit etmek amacı ile yapılmıştır. Kalsinasyon testi önceki bölümlerde de belirtilen TS EN ISO 1172 standardı doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Kalsinasyon testi fiber takviyesiz katkısız numuneye fiber hacim oranını doğrulamak amacıyla yapılmıştır. Test sırasında öncelikle boş kroze ağırlıkları, sonrasında ise test numuneleri krezelere yerleştirilmiş ve ardından içinde test numuneleri bulunan krezeler tartılmıştır. Tartım işlemleri tamamlandıktan sonra içi dolu krezeler sıcaklığı ~650°C olan kül fırınında 1 saat boyunca kalsine edilmiş ve tartılmıştır. Kalsinasyon işlemi epoksi matrisli E-camı takviyeli katkısız plakadan elde edilen 3 adet deney numunesi ile gerçekleştirilmiştir. Tartım sonuçları Çizelge 7. 9’de belirtilmiştir.

Çizelge 7. 9 Kalsinasyon öncesi ve sonrası tartım sonuçları

Numune	Boş kroze ağırlığı (g)	Dolu kroze ağırlığı (g)	Kalsinasyon sonrası ağırlık (g)
EC1	25,46	27,53	26,13
EC2	25,81	28,02	26,95
EC3	24,17	26,91	25,87

Çizelge 7. 9’da belirtilen tartım sonuçları kullanılarak;

$$M_{cam} = \frac{m_3 - m_2}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (7.1)$$

$$\%V_{cam} = \frac{m_f / \rho_f}{m_f / \rho_f + m_m / \rho_m} \times 100 \quad (7.2)$$

(7.1) ve (7.2) numaralı verilen formüllerden faydalanılarak fiber hacim oranı ve fiber ağırlık oranı hesaplanmış ve ortalama fiber hacim oranı ~%35 olarak bulunmuştur.

Daha önceki kısımlarda da bahsedildiği üzere kalsinasyon deneyi fiber hacim oranını doğrulamak amacı ile yapılmış olup, bulunan sonuç bu çalışma için beklenen bir değerdir.

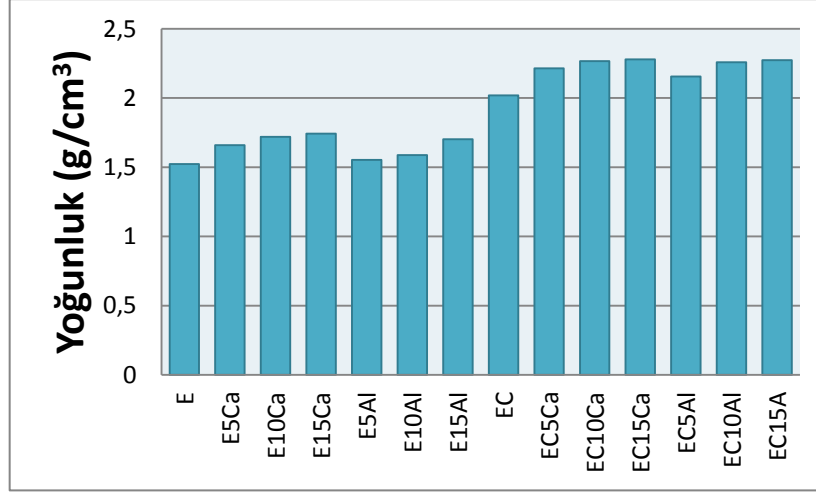
7.1.6 Yoğunluk

Yoğunluk ölçümü TS EN ISO 1183-1 standardı doğrultusunda gerçekleştirilmiş. Ölçüm sırasında Şekil 6.14 da belirtilen yoğunluk ölçüm cihazı kullanılmış olup, daldırma sıvısı olarak etil alkol kullanılmıştır. Çizelge 7. 10 epoksi matrisli tüm numunelerin yoğunluk ölçüm sonuçlarını içermektedir. Yoğunluk değerleri kullanılarak hazırlanan epoksi matrisli numunelerin yoğunluk grafiği ise Şekil 7. 13’de yer almaktadır.

Çizelge 7. 10 Epoksi matrisli numuneler için elde edilen yoğunluk değerleri

Numune	Yoğunluk (g\cm ³)
E	1,523
E5Ca	1,659
E10Ca	1,719
E15Ca	1,743
E5Al	1,553
E10Al	1,588
E15Al	1,702
EC	2,019
EC5Ca	2,215
EC10CaI	2,267
EC15Ca	2,279
EC5Al	2,156
EC10Al	2,258
EC15Al	2,273

Çizelge 7. 10'da belirtilen yoğunluk değerlerine göre dolgu malzemesi katkısı ile yoğunluk değerlerinde artış olduğu tespit edilmiştir. Yoğunluk değerlerini etkileyen en önemli parametre ise dolgu malzemesinin yoğunluğu olmaktadır. Bu bağlamda kalsit dolgusunun yoğunluğu daha yüksek olduğu için kalsit dolgulu numunelerde daha yüksek değerler elde edilmiştir.



Şekil 7. 13 Epoksi matrisli numunelerin yoğunluk grafiği

7.2 Vinilester Matris İçin Uygulanan Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

Vinilester matris için uygulanan deneyler epoksi matris için uygulanan deneyler ile tamamen aynıdır. Bu doğrultuda bir önceki kısımda da bahsedilen çekme deneyi, eğme deneyi, darbe deneyi, Shore D sertlik deneyi, kalsinasyon ve yoğunluk deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca çekme deneyi sonucunda elde edilen kırık yüzeyli numunelerin taramalı elektron mikroskobu ile görüntülemeleri yapılmıştır.

7.2.1 Çekme Deneyi

Vinilester matrisli malzemeler için çekme deneyi epoksi matrisli numunelere uygulanan deney ile tamamen aynı şekilde ve aynı standartta (TS EN ISO 527-4/5) gerçekleştirilmiştir.

Vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelere uygulanan çekme deneyi sonucunda elde edilen veriler Çizelge 7. 11’de belirtilmiştir. Belirtilen çizelgeden de anlaşılağı üzere çekme deneyi her bir grup için 3 kez tekrarlanmıştır. Deney sonucunda elde edilen çekme dayanımı değerin ortalama alınmış ve ortalama çekme dayanımı değerlerini içeren grafik ise Şekil 7. 14’de belirtilmiştir.

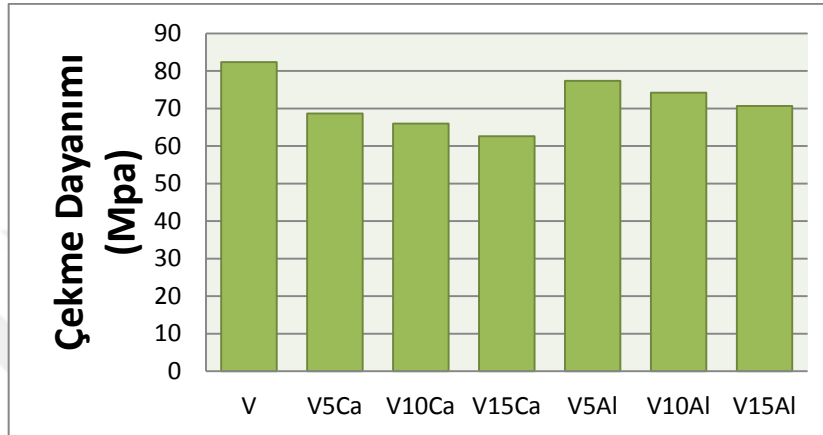
Çizelge 7. 11 Vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin çekme deneyi sonucu

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Yük (N)	Çekme Modülü (Mpa)
V1	24,99	3,81	84,56	4051,11	3448,95
V2	24,56	3,76	83,25	3687,77	3412,35
V2	24,38	3,68	79,28	4112,87	3481,4
V5Ca1	24,8	3,86	70,21	4721,06	3583,71
V5Ca2	24,44	3,74	66,57	4084,87	3821,05
V5Ca3	24,52	3,69	69,23	4263,84	3359,36
V10Ca1	24,56	3,29	67,25	4433,96	3695,8
V10Ca2	24,63	3,54	62,54	4452,87	3579,46
V10Ca3	24,72	3,47	68,14	4844,94	3783,62
V15Ca1	24,39	3,36	60,25	3937,51	3287,05
V15Ca2	24,87	3,34	59,47	3939,92	3629,52
V15Ca3	24,72	3,48	65,36	5622,63	3424,65
V5Al1	24,32	3,8	77,86	4944,2	3018,73
V5Al2	24,84	3,74	76,39	4200,93	3368,11
V5Al3	24,62	3,68	77,93	4448,23	3279,63
V10Al1	24,53	3,48	74,06	4420,19	3664,58
V10Al2	24,58	3,36	75,02	4936,57	3563,27
V10Al3	24,67	3,53	73,58	4893,3	3528,95
V15Al1	24,7	3,81	72,19	4793,58	3753,48
V15Al2	24,85	3,87	66,18	4364,49	3785,19
V15Al3	24,62	3,74	73,65	4781,6	3691,27

Çekme deneyi sonucunda elde edilen, Çizelge 7. 11’de belirtilen verilere göre dolgu malzemesi etkisi ile dayanım değerlerinde düşüşler gözlenmiştir. Bu durum dolgu malzemesinin yapı içerisinde oluşturduğu süreksizlikten kaynaklanmaktadır. Vinilester matrisli numunelerden elde edilen ortalama çekme dayanımı değeri 82 mpa iken,

ağırlıkça %5 oranında kalsit dolgusu etkisi ile bu değer 68 mpa, ağırlıkça %5 alüminyum hidroksit etkisi ile bu değer 77 mpa olmaktadır.

Epoksi matrisli numunelerde olduğu gibi vinilester matrisli numunelerde de kalsit dolgusunun düşürücü etkisi alüminyum hidroksit dolgusunun düşürücü etkisinden daha fazladır. Bu durum alüminyum hidroksit dolgusunun kimyasal yapısından kaynaklanmaktadır.



Şekil 7. 14 Vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin çekme dayanımı grafiği

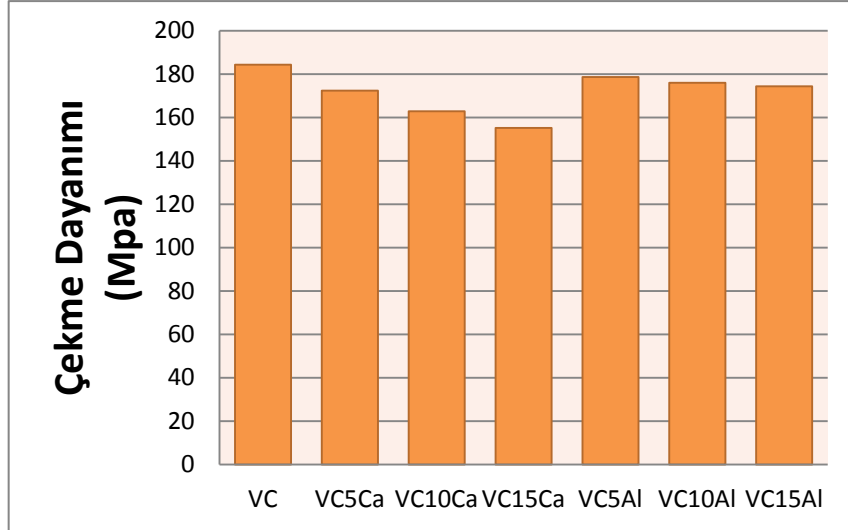
Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelere uygulanan çekme deneyi sonrasında elde edilen veriler Çizelge 7. 12’de belirtilmiştir. Belirtilen bu çizelgedeki çekme dayanımı değerlerinin ortalaması alınarak hazırlanan vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelere ait çekme dayanımı grafiği ise Şekil 7. 15’de yer almaktadır.

Çizelge 7. 12 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin çekme deneyi sonucu

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Yük (N)	Çekme Modülü (Mpa)
VC1	24,12	3,86	177,35	12035,56	11987,12
VC2	24,54	3,74	192,25	13614,63	11635,5
VC3	24,69	3,82	183,54	12573,84	11062,21
VC5Ca1	24,56	3,64	170,25	11809,75	10893,62
VC5Ca2	24,69	3,72	168,53	11792,03	10467,13
VC5Ca3	24,81	3,68	178,36	12683,29	11652,46

Çizelge 7. 12 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin çekme dayanımı grafiği (devamı)

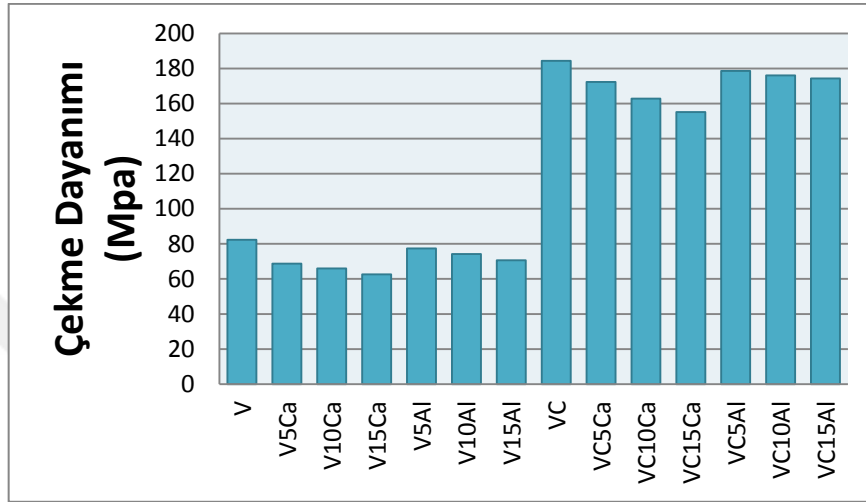
Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Yük (N)	Çekme Modülü (Mpa)
VC10Ca2	24,39	3,81	150,62	10996,49	9975,28
VC10Ca3	24,36	3,88	169,37	12008,31	10265,47
VC15Ca1	24,12	3,85	150,42	10447,3	9911,52
VC15Ca2	24,53	3,82	159,35	11635,78	9265,24
VC15Ca3	24,68	3,79	155,84	11228,66	9036,23
VC5Al1	24,57	3,68	170,25	12035,56	9146,57
VC5Al2	24,63	3,72	182,25	13614,63	9965,26
VC5Al3	24,74	3,65	183,54	13573,84	11254,31
VC10Al1	24,12	3,85	170,25	11809,75	10827,15
VC10Al2	24,53	3,82	179,53	12792,03	11264,82
VC10Al3	24,68	3,79	178,36	12683,29	9874,15
VC15Al1	24,57	3,68	177,35	12035,56	9892,21
VC15Al2	24,63	3,72	172,25	12614,63	12263,46
VC15Al3	24,74	3,65	173,54	12573,84	11497,15



Şekil 7. 15 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin çekme dayanımı grafiği

Çizelge 7. 12'ye göre E-camı takviyeli numunelerin çekme dayanımı değerlerinde fiber takviyesiz numunelerde de gözlemlendiği gibi düşüşler olduğu tespit edilmiştir. Fakat E-camı takviyeli numunelerin dayanım değerleri takviyesiz numunelere göre daha yüksektir.

Çizelge 7.11 ve Çizelge 7.12'deki verilerden yararlanarak tüm vinilester matrisli numunelerin çekme dayanımı değerlerinin yer aldığı grafik ise Şekil 7.16' belirtilmiştir.



Şekil 7. 16 Vinilester matrisli numunelerin çekme dayanımı grafiği

7.2.2 Eğme Deneyi

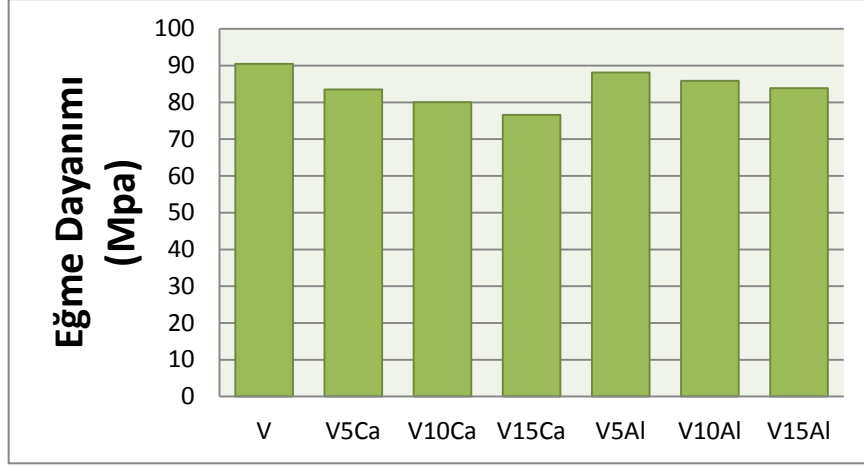
Vinilester matrisli malzemeler için eğme deneyi TS EN ISO 178 2010;A1 2013 standardı doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Uygulanan deney standardı ve koşulları epoksi matris için uygulanan eğme deneyi ile aynıdır.

Vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin eğme deneyi sonucunda elde edilen veriler Çizelge 7.13'de belirtilmiştir. Çekme deneyinde olduğu gibi burada da her bir grup numune için 3 tekrar yapılmış ve sonuçları verilmiştir. Çizelge 7. 13'de belirtilen eğme dayanımı sonuçlarının ortalaması alınarak hazırlanan vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin eğme dayanımı grafiği ise Şekil 7. 15'de yer almaktadır.

Çizelge 7. 13 Vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin eğme deneyi sonucu

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Eğme Dayanımı (Mpa)	Yük (N)	Eğme Modülü (Mpa)
V1	15,53	3,66	89,52	151,3724	3254,78
V2	15,44	3,69	91,47	153,2833	3421,69
V3	15,48	3,57	90,36	147,6236	3340,55
V5Ca1	15,59	3,46	83,65	135,2455	3156,42
V5Ca2	14,73	3,51	82,57	139,0329	3214,29
V5Ca3	15,4	3,48	84,34	132,2721	3127,06
V10Ca1	15,04	3,12	82,31	107,8607	3127,81
V10Ca2	15,37	3,03	79,59	108,0556	3196,87
V10Ca3	15,14	3,1	78,24	103,9095	3014,39
V15Ca1	15,43	3,22	75,19	109,7421	3074,58
V15Ca2	15,59	3,26	78,42	119,4607	3107,54
V15Ca3	15,45	3,31	76,21	114,7787	3078-2,54
V5Al1	15,23	3,36	88,63	129,8554	3196,54
V5Al2	15,69	3,3	88,21	138,6041	3197,46
V5Al3	14,74	3,39	87,54	142,6276	3219,85
V10Al1	14,61	3,34	84,27	132,0198	3170,89
V10Al2	15,54	3,41	85,96	135,6815	3152,1
V10Al3	15,31	3,22	87,39	124,6303	3163,31
V15Al1	15,69	3,68	81,57	142,9297	3296,76
V15Al2	15,25	3,61	83,56	132,0511	3178,24
V15Al3	15,08	3,79	86,42	138,6639	3189,55

Çizelge 7.13’de vinilester matrisli numunelerin eğme deneyi sonucunda elde edilen veriler belirtilmiştir. Vinilester matrisli numunelerin ortalama eğme dayanımı değeri 90 mpa iken, ağırlıkça %5 kalsit dolgusu etkisi ile %8’lik , %5 alüminyum hidroksit dolgusu ile de %3’lük bir düşüş olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7. 17 Vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin eğme dayanımı grafiği

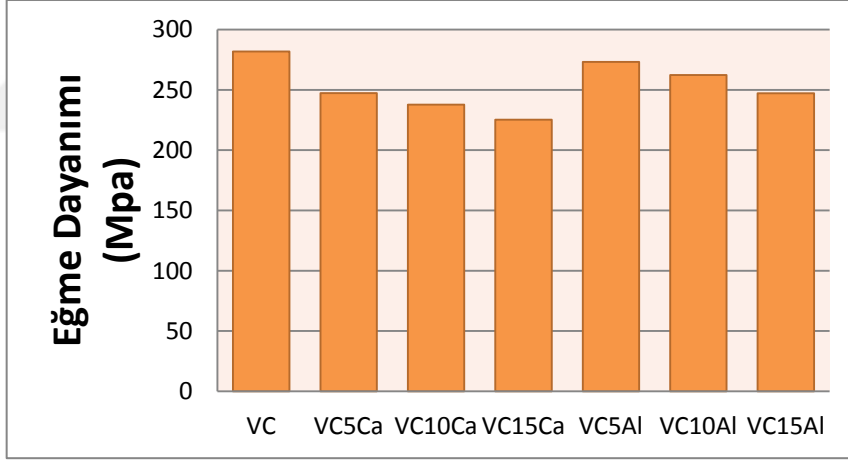
Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelere uygulanan eğme deneyi sonucunda elde edilen veriler Çizelge 7. 14’de verilmiştir. Çizelge 7. 14’de belirtilen eğme dayanımı değerleri kullanılarak hazırlanan grafik ise Şekil 7.18’ de belirtilmektedir. Çizelge 7. 14’de belirtilen verilere göre dolgu malzemesi etkisi ile eğme dayanımı değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir.

Çizelge 7. 14 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin eğme deneyi sonucu

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Eğme Dayanımı (Mpa)	Yük (N)	Eğme Modülü (Mpa)
VC1	14,81	3,17	280,21	432,4969	13619,35
VC2	15,32	3,32	278,45	410,2357	12203,48
VC3	15,55	3,28	286,94	436,4742	13981,24
VC5Ca1	15,41	3,21	242,63	351,6736	11297,76
VC5Ca2	14,56	3,35	268,12	417,3406	12630,47
VC5Ca3	14,69	3,32	231,06	365,2641	10861,52
VC10Ca1	14,45	3,56	234,23	379,4144	11039,3
VC10Ca2	15,57	3,5	221,27	360,52	10827,63
VC10Ca3	15,32	3,49	257,58	368,0904	10962,49
VC15Ca1	14,63	3,4	232,36	371,9594	11351,69
VC15Ca2	15,14	3,47	225,3	334,931	10476,78

Çizelge 7. 14 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin eğme deneyi sonucu (devamı)

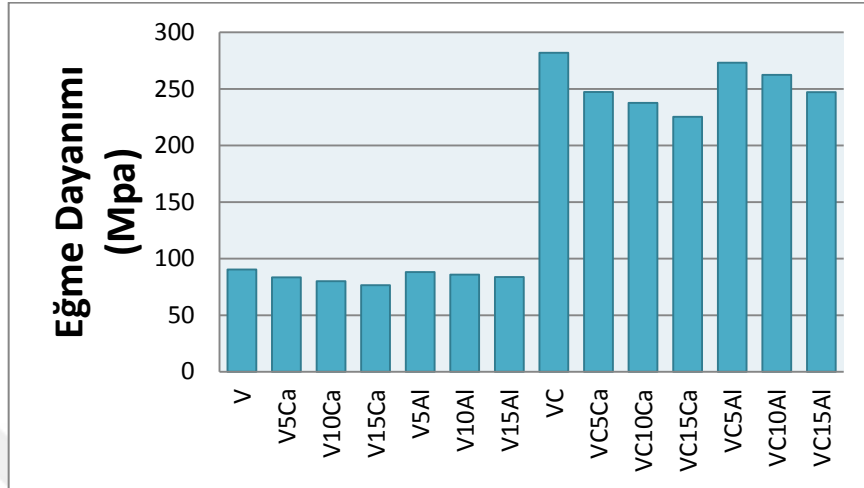
Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Eğme Dayanımı (Mpa)	Yük (N)	Eğme Modülü (Mpa)
VC5Al1	14,65	3,64	275,83	424,4941	12098,47
VC5Al2	14,72	3,52	269,54	434,3015	13271,2
VC5Al3	14,8	3,49	274,21	425,0985	12347,65
VC10Al1	15,27	3,35	269,18	396,2938	12036,61
VC10Al2	14,45	3,38	252,03	387,6058	11654,16
VC10Al3	15,52	3,36	265,87	411,9351	12074,32
VC15Al1	14,84	3,32	246,14	400,0991	12996,34
VC15Al2	15,73	3,3	237,98	376,7408	11204,28
VC15Al3	14,51	3,29	257,21	389,4735	11967,69



Şekil 7. 18 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin eğme dayanımı grafiği

Çizelge 7. 13 ve Çizelge 7. 14’de verilen eğme dayanımı değerlerinin tümünden faydalanılarak hazırlanan vinilester matrisli numuneler için eğme dayanımı grafiği Şekil 7. 19’da yer almaktadır. Şekil 7. 19’da belirtilen verilere göre E-camı takviyeli vinilester matrisli numunelerin eğme dayanımı değerleri fiber takviyesiz numunelerin eğme dayanımı değerlerine göre daha yüksektir. Dolgu malzemesi etkisi ile ise diğer bölümlerde de bahsedildiği üzere yer yer düşüşler meydana gelmiştir. Ayrıca kalsit

dolgununun düşürücü etkisi alüminyum hidroksit dolgunun düşürücü etkisinden daha yüksektir. Bu durum alüminyum hidroksit dolgunun kimyasal yapısı ile ilgilidir. Alüminyum hidroksit dolgu matris ile daha homojen karışarak yapı içerisinde uniform bir dağılım sergilemektedir.



Şekil 7. 19 Vinilester matrisli numunelerin eğme dayanımı grafiği

7.2.3 Darbe Deneyi

Darbe deneyi TS EN ISO 179-1 standardı doğrultusunda gerçekleştirilmiş olup, diğer deneylerde de olduğu kullanılan test cihazı, ekipman, standart epoksi matris için uygulanan darbe deneyi ile birebir aynıdır.

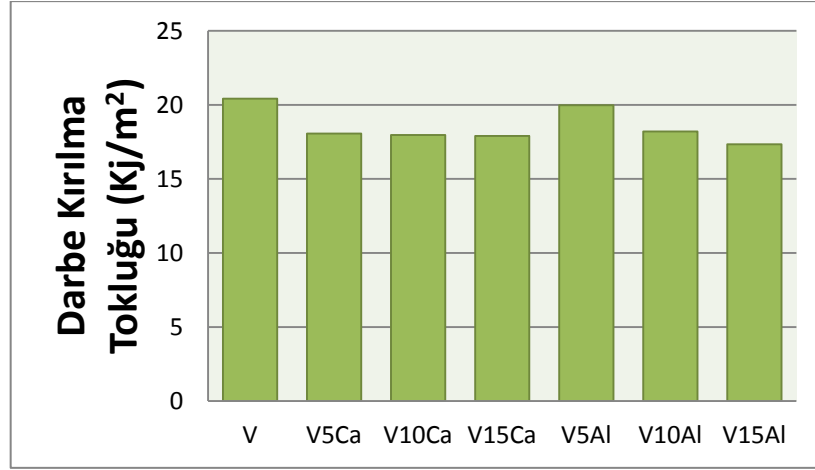
Darbe deneyi sonucunda vinilester matrisli fiber takviyesiz numuneler için elde edilen veriler Çizelge 7. 15’de belirtilmiştir. Bu çizelgede belirtilen darbe kırılma tokluğu değerlerinin ortalamasının alınması ile de Şekil 7. 20’de belirtilen vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin darbe kırılma tokluğu grafiği elde edilmiştir. Belirtilen grafik Şekil 7. 20’de yer almaktadır.

Çizelge 7. 15 Vinilester matrisli fiber takviyeli numunelerin darbe deneyi sonucu

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Yük (N)	Darbe kırılma tokluğu (Kj/m ²)
V1	9,86	3,62	0,72	20,17

Çizelge 7. 15 Vinilester matrisli fiber takviyeli numunelerin darbe deneyi sonucu
(devamı)

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Yük (N)	Darbe kırılma tokluğu (Kj/m ²)
V2	9,42	3,59	0,65	19,22
V3	9,65	3,6	0,76	21,87
V5Ca1	9,54	3,29	0,58	18,47
V5Ca2	9,63	3,26	0,59	18,79
V5Ca3	9,79	3,38	0,56	16,92
V10Ca1	9,78	3,52	0,59	17,13
V10Ca2	9,62	3,43	0,61	18,48
V10Ca3	9,81	3,68	0,66	18,28
V15Ca1	9,62	3,21	0,57	18,45
V15Ca2	9,45	3,15	0,54	18,14
V15Ca3	9,78	3,52	0,59	17,13
V5Al1	9,61	3,29	0,61	19,29
V5Al2	9,86	3,41	0,69	20,52
V5Al3	9,79	3,35	0,66	20,12
V10Al1	9,58	3,36	0,56	17,39
V10Al2	9,34	3,42	0,63	19,72
V10Al3	9,83	3,31	0,57	17,51
V15Al1	9,35	3,72	0,58	16,67
V15Al2	9,76	3,69	0,63	17,49
V15Al3	9,42	3,62	0,61	17,88



Şekil 7. 20 Vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin darbe kırılma tokluğu grafiği

Çizelge 7. 16'da vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelere ait darbe deneyi sonrasında elde edilen veriler yer almaktadır. Belirtilen verilerden darbe kırılma tokluğu değeri kullanılarak hazırlanan vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin darbe kırılma tokluğu grafiği ise Şekil 7. 21'de gösterilmektedir.

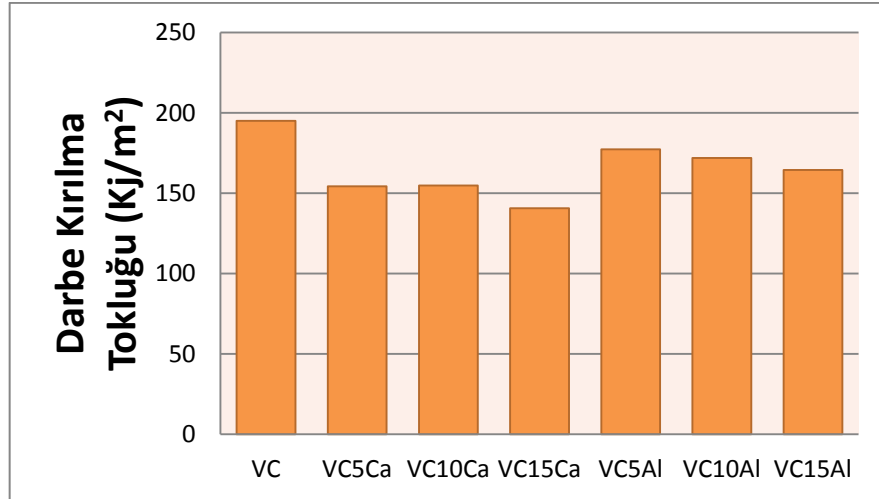
Çizelge 7. 16 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin darbe deneyi sonucu

Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Yük	Darbe kırılma tokluğu (Kj/m ²)
VC1	9,52	3,24	5,83	189,01
VC2	9,61	3,35	6,15	191,03
VC3	9,83	3,31	6,67	204,99
VC5Ca1	9,45	3,26	4,87	158,08
VC5Ca2	9,51	3,38	5,11	158,97
VC5Ca3	9,86	3,35	4,82	145,92
VC10Ca1	9,17	3,6	4,57	138,43
VC10Ca2	9,64	3,54	5,7	167,03
VC10Ca3	9,79	3,59	5,58	158,76
VC15Ca1	9,41	3,45	4,31	132,76
VC15Ca2	9,54	3,42	4,95	151,71
VC15Ca3	9,62	3,57	4,72	137,43

Çizelge 7. 16 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin darbe deneyi sonucu (devamı)

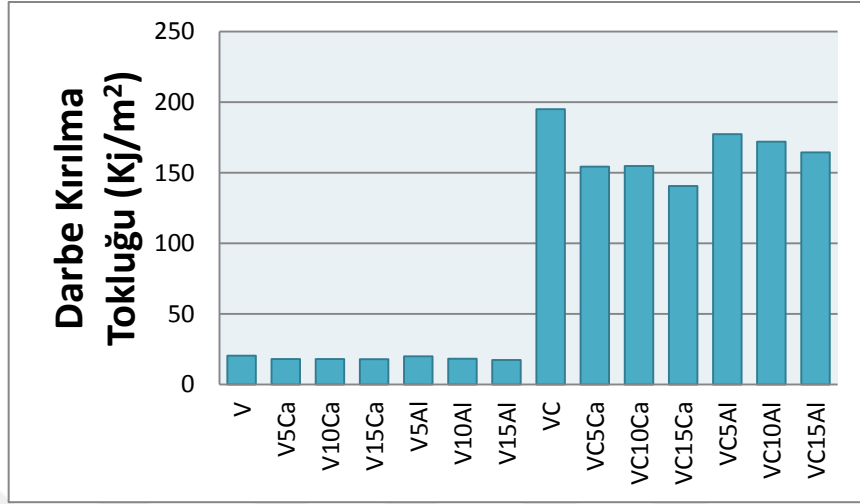
Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Yük	Darbe kırılma tokluğu (Kj/m ²)
VC5Al1	9,58	3,6	5,89	170,78
VC5Al2	9,42	3,53	6,1	183,44
VC5Al3	9,63	3,49	5,64	167,81
VC10Al1	9,34	3,32	5,52	178,01
VC10Al2	9,25	3,24	5,63	187,85
VC10Al3	9,67	3,35	4,86	150,02
VC15Al1	9,43	3,38	5,17	162,2
VC15Al2	9,68	3,42	4,86	146,8
VC15Al3	9,25	3,35	5,71	184,26

Çizelge 7. 16'da vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin darbe deneyi sonucunda elde edilen veriler belirtilmiştir. Darbe deneyi sonucunda elde edilen darbe kırılma tokluğu değerinde ise dolgu malzemesi etkisi ile azalmıştır.



Şekil 7. 21 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin darbe kırılma tokluğu grafiği

Çizelge 7. 14 ve Çizelge 7. 15’de belirtilen tüm darbe kırılma tokluğu değerleri kullanılarak hazırlanan vinilester matrisli numunelerin darbe kırılma tokluğu grafiği Şekil 7. 22’de yer almaktadır.



Şekil 7. 22 Vinilester matrisli numunelerin darbe kırılma tokluğu grafiği

7.2.4 Shore D Sertlik Deneyi

Sertlik ölçümü daha önceki kısımlarda da bahsedildiği üzere “Barcoll” sertlik cihazı ile yapılmıştır. Elde edilen her vinilester matrisli numune için 3 farklı bölgeden 3 farklı sonuç alınmıştır. Ölçüm sonucunda elde edilen her bir numune grubu için alınan sertlik ölçümleri ve ortalama sertlik değerleri Çizelge 7. 17’de belirtilmiştir. Belirtilen çizelgede yer alan ortalama sertlik değerleri kullanılarak elde edilen vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin Shore D sertlik grafiği ise Şekil 7. 17’de yer almaktadır.

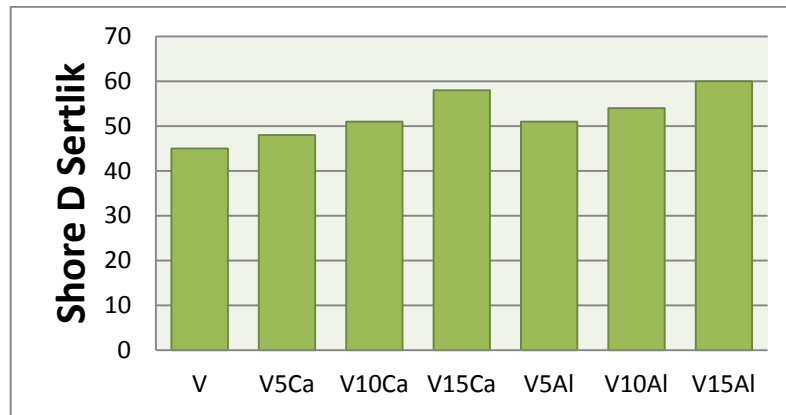
Çizelge 7. 17 Vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin Shore D sertlik değerleri

Numune	Shore D Sertlik	Ortalama Sertlik Değeri
V1	45	45
V2	46	
V3	45	
V5Ca1	49	48
V5Ca2	48	
V5Ca3	49	

Çizelge 7. 17 Vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin Shore D sertlik değerleri (devamı)

Numune	Shore D Sertlik	Ortalama Sertlik Değeri
V10Ca1	51	51
V10Ca2	51	
V10Ca3	51	
V15Ca1	57	58
V15Ca2	59	
V15Ca3	59	
V5Al1	52	51
V5Al2	51	
V5Al3	51	
V10Al1	54	54
V10Al2	53	
V10Al3	56	
V15Al1	60	60
V15Al2	60	
V15Al3	60	

Çizelge 7. 17’de belirtilen sertlik değerlerine göre ise dolgu malzemesi etkisi ile sertlik değerlerinde artışlar olmuştur. Vinilester matrisli numunelerin ortalama sertlik değeri 45 iken, ağırlıkça %5 kalsit dolgusu etkisi ile bu değer 48, ağırlıkça %5 alüminyum hidroksit dolgusu etkisi ile de 51 olmaktadır.

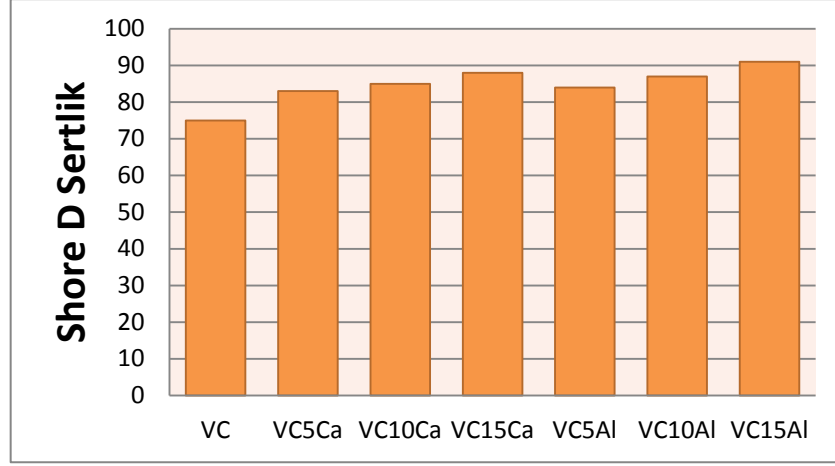


Şekil 7. 23 Vinilester matrisli fiber takviyesiz numunelerin Shore D sertlik grafiği

Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin “Barcoll” sertlik cihazı ile ölçülen Shore D sertlik değerleri Çizelge 7. 18’de verilmiştir. Çizelge 7. 18’de belirtilen veriler kullanılarak hazırlanan vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin Shore D sertlik grafiği ise Şekil 7. 24’de belirtilmiştir.

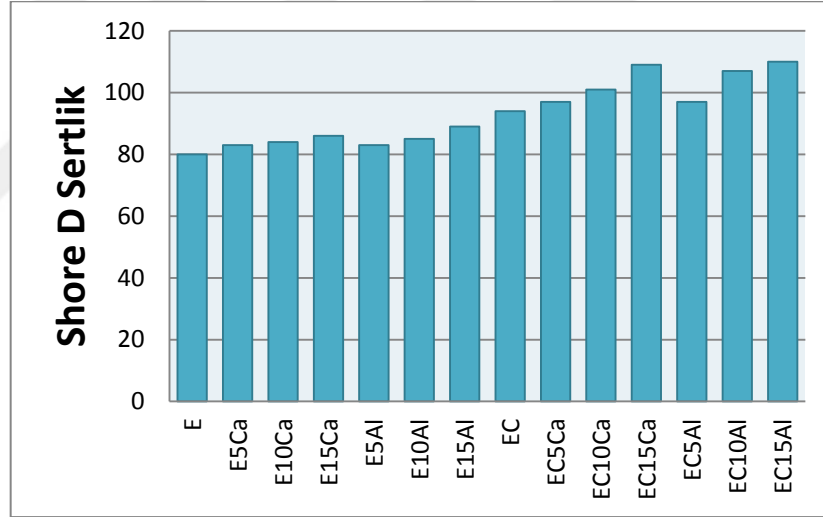
Çizelge 7. 18 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin Shore D sertlik değerleri

Numune	Shore D Sertlik	Ortalama Sertlik Değeri
VC1	76	75
VC2	76	
VC3	75	
VC5Ca1	83	83
VC5Ca2	82	
VC5Ca3	85	
VC10Ca1	87	85
VC10Ca2	85	
VC10Ca3	85	
VC15Ca1	88	88
VC15Ca2	88	
VC15Ca3	88	
VC5Al1	84	84
VC5Al2	85	
VC5Al3	85	
VC10Al1	87	87
VC10Al2	88	
VC10Al3	88	
VC15Al1	91	91
VC15Al2	91	
VC5Al3	91	



Şekil 7. 24 Vinilester matrisli fiber takviyeli numunelerin Shore D sertlik değerleri

Şekil 7. 23 de ve Şekil 7. 24 de fiber takviyesiz ve E-camı takviyeli numunelere ait Shore D sertlik grafiklerinde yer alan verilerin tümünün kullanılması ile elde edilen Vinilester matrisli numunelere ait Shore D sertlik grafiği Şekil 7. 25 'de yer almaktadır.



Şekil 7. 25 Vinilester matrisli numunelerin Shore D sertlik grafiği

7.2.5 Kalsinasyon

Vinilester matrisli kompozit malzemeler için uygulanan kalsinasyon testi epoksi matris için uygulanan test ile birebir aynıdır. Çizelge 7. 19'da vinilester matrisli E-camı takviyeli katkısız numuneler için kalsinasyon öncesi ve sonrası tartım sonuçları yer almaktadır.

Çizelge 7. 19 Vinilester matrisli E-camı takviyeli numunelerin kalsinasyon öncesi ve sonrası tartım sonuçları

Numune	Boş kröze ağırlığı (g)	Dolu kröze ağırlığı (g)	Kalsinasyon sonrası ağırlık (g)
VC1	25,70	27,02	26,45
VC2	24,41	26,24	25,79
VC3	27,12	28,99	28,48

(7.1) ve (7.2) no'lu formüllerden faydalanılarak fiber hacim oranı ve fiber ağırlık oranı hesaplanmış ve ortalama fiber hacim oranı ~%35 olarak bulunmuştur.

7.2.6 Yoğunluk

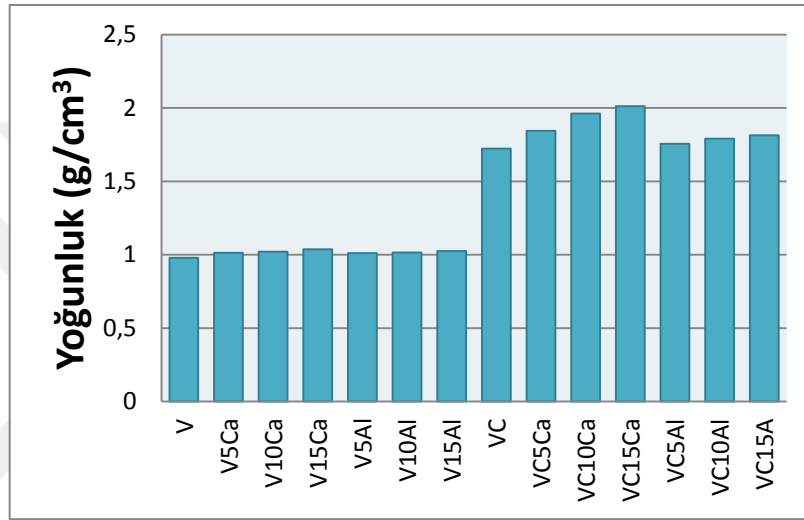
Vinilester matris için uygulanan yoğunluk deneyi, uygulanan diğer tüm deneylerde de bahsedildiği gibi epoksi matris için uygulanan deney koşulları ile aynıdır. Yoğunluk deneyi sonucunda elde edilen vinilester matrisli numunelere ait yoğunluk değerleri Çizelge 7. 20'de, belirtilen yoğunluk değerleri kullanılarak elde edilen vinilester matrisli numunelere ait yoğunluk grafiği Şekil 7. 26'da yer almaktadır.

Çizelge 7. 20 Vinilester matrisli numuneler için elde edilen yoğunluk değerleri

Numune	Yoğunluk (g\cm ³)
V	0,98
V5Ca	1,013
V10Ca	1,021
V15Ca	1,038
V5Al	1,011
V10Al	1,016
V15Al	1,025
VC	1,723
VC5Ca	1,845

Çizelge 7. 20 Vinilester matrisli numuneler için elde edilen yoğunluk değerleri (devamı)

Numune	Yoğunluk (g\cm ³)
VC10CaI	1,962
VC15Ca	2,013
VC5Al	1,756
VC10Al	1,791
VC15Al	1,814



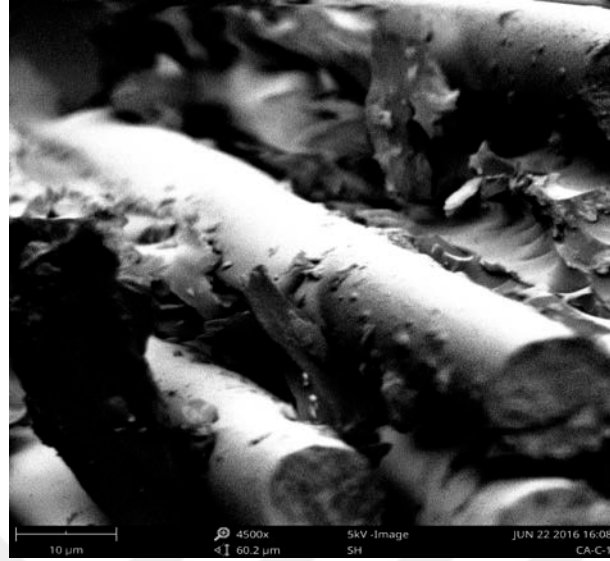
Şekil 7. 26 Vinilester matrisli numunelerin yoğunluk grafiği

7.3 Mikroskopik Görüntüleme Sonuçlarının İrdelenmesi

Çalışmada mikroskopik görüntüleme Şekil 6. 14’de belirtilen taramalı elektron mikroskobu cihazından faydalanılarak yapılmıştır. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi görüntüleme kırık yüzeyler üzerinden yapılmıştır. Bu sebeple görüntüleme için çekme deneyinin ardından elde ettiğimiz kırık yüzeye sahip deney numuneleri tercih edilmiştir. Görüntülemeler ortalama bir değere sahip olduğu için % 10 dolgu malzemesi katkı numuneler üzerinden yapılmıştır. Görüntüleme sonucu elde edilen veriler aşağıda belirtilmiştir.

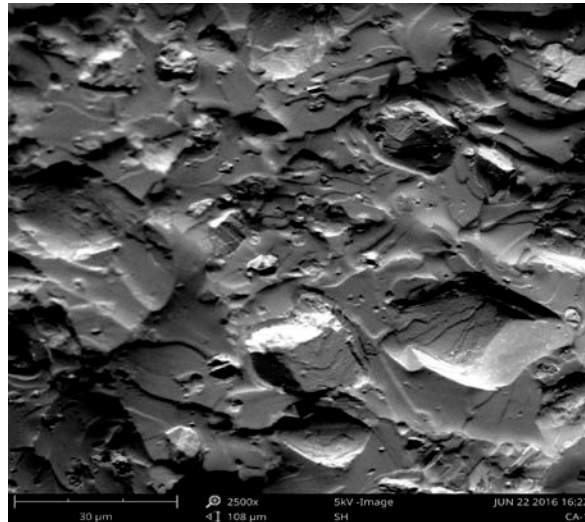
Şekil 7. 27’de epoksi matrisli E-camı takviyeli %10 kalsit katkı numunenin sem görüntüsüne yer verilmiştir. Belirtilen şekilden de anlaşılacağı üzere dolgu malzemesi olarak kalsit fiber malzemenin üzerinde topaklar halinde bulunmaktadır. Bu durum

dolgu malzemesinin matris ile tam anlamıyla homojen bir şekilde karışmaması sonucu ortaya çıkmış olup, mekanik özellikler üzerinde de olumsuz yönde bir etki yapmaktadır.



Şekil 7. 27 Epoksi matrisli E-camı takviyeli %10 kalsit dolgulu numunenin sem görüntüsü

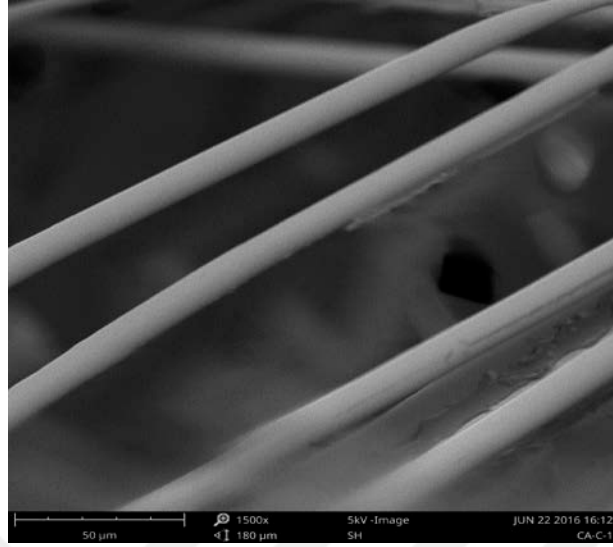
Şekil 7. 28'de ise fiber takviyesiz %10 kalsit dolgusu eklenmiş epoksi matris yapısı verilmiştir. Yine burada da en büyük sorun, bir önceki bölümde olduğu gibi matris ile dolgu malzemesinin ara yüzey bağlantısı olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 7. 28 Epoksi matrisli fiber takviyesiz %10 kalsit dolgulu numunenin sem görüntüsü

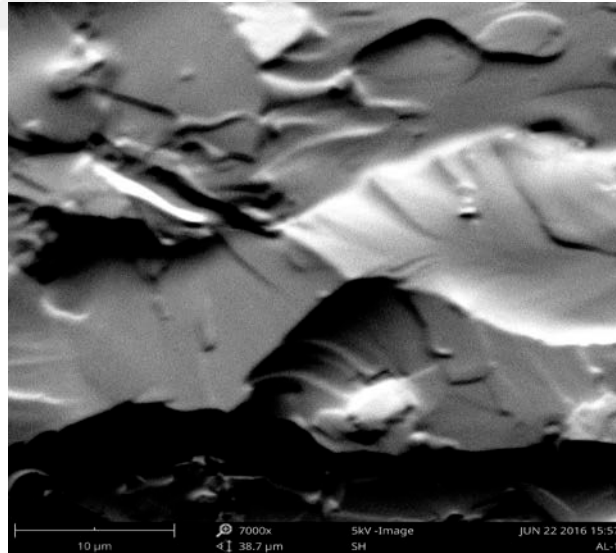
Şekil 7. 29'da ise epoksi matrisli E-camı fiber takviyeli alüminyum hidroksit dolgulu numunenin sem görüntüsü verilmiştir. Bu görüntüden de anlaşılacağı üzere bu yapıda

dolgu malzemesi yukarıdaki kısımlarda verilen görüntülemelere kıyasla daha homojen bir şekilde karışmış, matris ile ara yüzey bağlantısı daha kuvvetli olmuştur.



Şekil 7. 29 Epoksi matrisli E-camı fiber takviyeli %10 alüminyum hidroksit dolgulu yapının sem görüntüsü

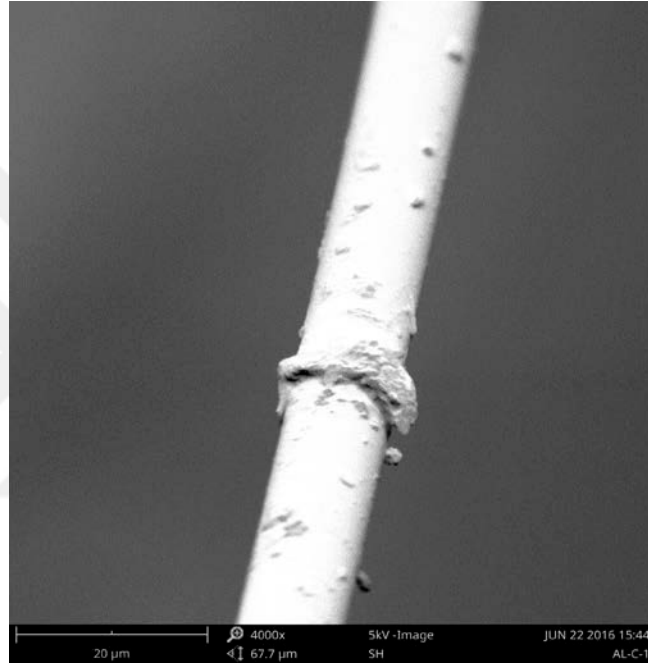
Yalnızca epoksi matris ve alüminyum hidroksit dolgusundan oluşan yapının taramalı elektron mikroskobu (sem) ile alınan görüntüsü ise Şekil 7. 30'da verilmiştir.



Şekil 7. 30 Epoksi matrisli fiber takviyesiz %10 alüminyum hidroksit dolgulu yapının sem görüntüsü

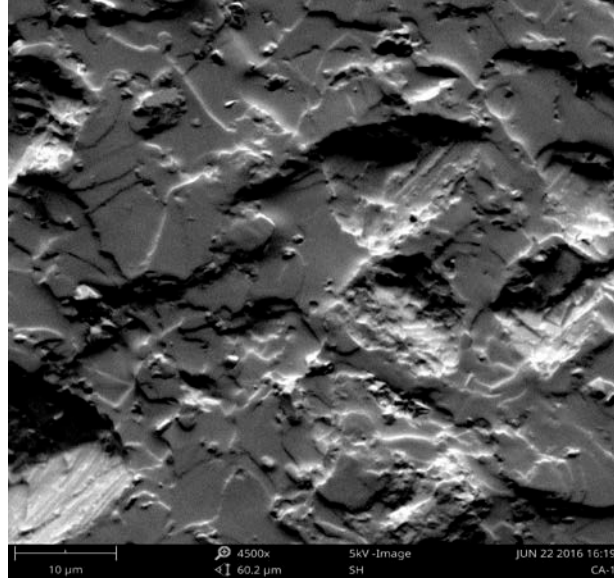
Matris malzemesi olarak vinilesterin kullanıldığı yapılardan elde edilen görüntülere ilk örnek Şekil 7. 31'de E-camı fiber destekli ve %10 kalsit dolgulu yapıdan alınan sem

görüntüsü verilmiştir. Belirtilen görüntüde fiber üzerine tutunmuş dolgu malzemesini kolaylıkla görebilmekteyiz. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi bu durum dolgu malzemesinin kullanıldığı yapılarda istenmeyen bir durumdur. Bu şekilde harmanlanan yapıda mekanik özelliklerin dolgu etkisiyle düşmesi kaçınılmaz olmaktadır. Bu durum çalışma sırasında karıştırmanın yetersiz olmasından kaynaklanabileceği gibi, dolgu malzemesi ile matris arasında meydana gelen herhangi bir kimyasal reaksiyon sonucunda da oluşmuş olabilir. Bu durumun yorumu gerekli kimyasal testlerin (çapraz bağ testi vb.) yapılmasının ardından daha kolay yapılabilir.



Şekil 7. 31 Vinilester matrisli E-camı fiber takviyeli %10 kalsit dolgulu numune

Şekil 7. 32’de ise vinilester matrisli fiber takviyesiz %10 kalsit dolgulu numuneden elde edilen sem görüntüsüne yer verilmiştir.



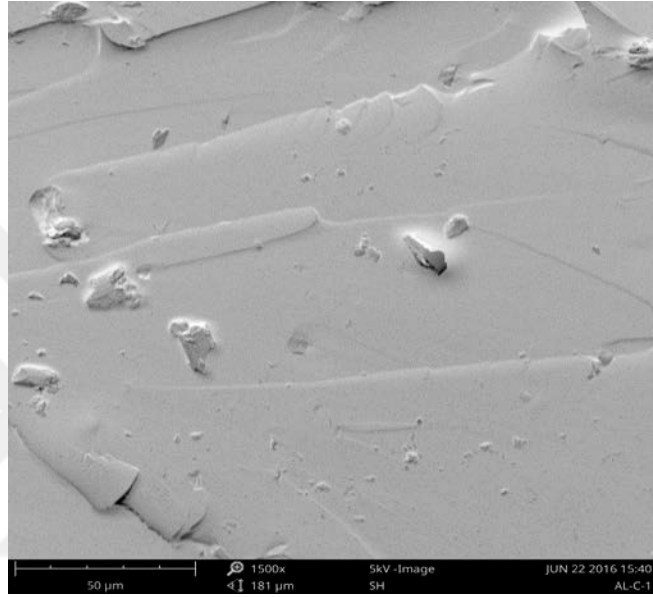
Şekil 7. 32 Vinilester matrisli fiber takviyesiz %10 kalsit dolgulu numuneden alınan sem görüntüsü

Şekil 7. 33’de ise vinilester matris E camı fiber destekli %10 alüminyum hidroksit dolgulu kompozit yapıdan elde edilen sem görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 7. 33 Vinilester matrisli E-camı fiber takviyeli %10 alüminyum hidroksit dolgulu numuneden elde edilen sem görüntüsü

Şekil 7. 34 'de belirtilen görüntü ise vinilester matris içine alüminyum hidroksit dolgusunun katıldığı elyaf takviyesiz yapıdan alınmıştır. Bu görüntüden de anlaşılacağı üzere vinilester matrisin kullanıldığı yapılarda da yer yer matris ile dolgu malzemesi arasındaki bağlantının homojen olmadığı görülmektedir. Fakat alüminyum hidroksit dolgulu numunelerin sem görüntüleri ile kalsit dolgulu numunelerin sem görüntüleri incelendiğinde; alüminyum hidroksit dolgusunun kalsite göre matris ile daha iyi bağlandığı yorumu yapılabilmektedir.



Şekil 7. 34 Vinilester matrisli fiber takviyesiz %10 alüminyum hidroksit dolgulu numunenin sem görüntüsü

7.4 Maliyet Açısından İrdeleme

Maliyet açısından irdeleme 2 ayrı matris malzemesi ile çalışıldığı için epoksi ve vinilester matris için 2 ayrı başlık altında yapılmıştır.

7.4.1 Epoksi Matris İçin İrdeleme

Epoksi 'nin matris malzemesi, E-camı 'nın fiber malzemesi olarak kullanıldığı, kalsit ve alüminyum hidroksitin dolgu malzemesi olarak kullanıldığı kompozit malzeme üretiminde, belirtilen malzeme fiyatları Çizelge 7.21'de belirtilmiştir.

Çizelge 7. 21 Epoksi matrisli kompozit malzeme üretiminde kullanılan sarf malzeme fiyatları

Malzeme	Fiyat (TL/Kg)
Epoksi	60
E-camı dokuma	50
E-camı keçe	13
Al(OH) ₃	25
CaCO ₃	0.45

Çalışmalarda ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında dolgu malzemesi kullanılmış olup, 4 kat E-camı dokuma, 1 kat E-camı keçe kullanılmıştır. Her bir plaka üretiminde kullanılan sarf malzeme miktarlarının yaklaşık değerleri ise şu şekildedir; 600 g epoksi, 200 g E-camı dokuma, 50 g E-camı keçe, dolgu malzemelerinin kullanıldığı durumlarda ise reçinenin ağırlıkça yüzdesi baz alınmıştır. Gerekli hesaplamalar yapıldığı taktirde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- ✓ Epoksi matrisli ve fiber takviyesiz numunelerin maliyeti epoksi matrisli E-camı takviyeli numunelerin maliyetinden ~%10 daha azdır.
- ✓ Epoksi matrisli numunelerde kalsit dolgusunun %5 oranında kullanılmasıyla beraber maliyet ~%6 azalmaktadır. Dolgu malzemesinin oranı %10' a çıkmasıyla bu oran ~%12 ye, %15'e çıkması ile de ~%20'ye çıkmaktadır.
- ✓ Alüminyum hidroksitin dolgu malzemesi olarak kullanıldığı durumlarda %5 alüminyum hidroksit dolgusu ile ~% 2 lik bir düşüş olmaktadır. Bu oranın %10 a çıkması ile ~% 4, %15 e çıkması ile de ~% 8 lik bir düşüş olmaktadır.
- ✓ Dolgu malzemesi olarak %5 kalsit dolgu yerine %5 alüminyum hidroksit kullanılması durumunda ise maliyet ~% 55 daha fazla olmaktadır. Bu durum diğer oranlar içinde geçerliliğini korumaktadır.

7.4.2 Vinilester Matris İçin İrdeleme

Epoksi matris için kurgulanan üretim planı vinilester matris için de geçerlidir. Bu bağlamda vinilester 'in matris malzemesi olarak kullanıldığı yapıda, E-camı fiber malzemesi, kalsit ve alüminyum hidroksit dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Belirtilen malzeme fiyatları Çizelge 7. 22'de belirtilmiştir.

Çizelge 7. 22 Vinilester matrisli kompozit malzeme üretiminde kullanılan sarf malzeme fiyatları

Malzeme	Fiyat (TL/Kg)
Vinilester	30
E-camı dokuma	50
E-camı keçe	13
Al(OH) ₃	25
CaCO ₃	0.45

Her bir plaka üretiminde kullanılan sarf malzeme miktarları yaklaşık olarak ele alındığında; 600 g vinilester, 200 g E-camı dokuma, 50 g E-camı keçe şeklindedir. Dolgu malzemesinin kullanıldığı plaka üretiminde ise matris malzemesinin ağırlıkça yüzdesi baz alınmış, %5, %10 ve %15 olacak şekilde 3 farklı oranda dolgu malzemesinin kullanıldığı plakalar üretilmiş. Çizelge 7. 22'de verilen bilgiler göz önüne alınarak yapılan maliyet analizi sonucunda elde edilen veriler ise aşağıdaki gibidir.

- ✓ Vinilester matrisli fiber takviyesiz malzemelerin üretim maliyeti fiber takviyeli malzeme üretim maliyetinden ~%10 daha azdır.
- ✓ Dolgu malzemesi olarak kalsit dolgunun kullanıldığı durumlarda dolgu malzemesi miktarı ile maliyette azalmalar olduğu saptanmış. Bu azalmanın %5 dolgu malzemesinin kullanıldığı durum ele alındığında; %5 kalsit dolgusu için

~% 6 dolaylarında, %5 alüminyum hidroksit dolgusu için ise ~% 2 dolaylarında olduğu tespit edilmiştir.



SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada termoset reçinelerden vinilester ve epoksi matrisli, CaCO_3 ve Al(OH)_3 dolgu malzemesi katkılı ve E-camı destekli kompozitler üretilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1) Matris malzemesi epoksi reçinenin özellikleri tüm deneylerde vinilester reçineye göre daha yüksek ($\sim\%10$) elde edilmiştir. Bu da kullanılan reçinenin formülasyonundan kaynaklanmaktadır. Zaten günümüzde de yüksek performanslı fiberlerin kullanımı (örneğin; karbon fiber) gündeme geldiğinde tercih edilen tek reçine epoksi olmaktadır.

2) Deneylerde vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır. Bu da son yıllarda plaka gibi düzlemsel parçaların imalatında özellikle yüksek stabilite ve hatasız üretim istenen yerlerde önerilen ve tercih edilen bir yöntemdir. Vakum infüzyon yöntemi ile üretilen parçaların deneylerinde özellikle kırık yüzey analizlerinde konvansiyonel yöntemlerle üretilmiş parçalara göre çok daha az boşluk gözlenmiştir. Bu gözlem çekme ve eğme dayancı artışları ile de doğrulanmıştır.

3) Matris içerisine dolgu malzemesi ilavesi %5, %10 ve %15 oranında CaCO_3 ve Al(OH)_3 olarak seçilmiştir. Her iki türde de artan dolgu malzemesi miktarı ile dayançta düşüşler olduğu gözlenmiştir. Bunlar dokuda süreksizlik oluşturduğundan beklenen sonuçlardır. Beklenen düşüşler CaCO_3 ilavesi ile %10 dolayında olurken Al(OH)_3 ilavesinde %5 dolayında olmuştur. Ayrıca tüm deney sonuçları için CaCO_3 yerine Al(OH)_3 ilavesinin

değerleri yükselttiği gözlenmiştir. Bu da Al' nin +3 değerlikli olarak matrisli daha kuvvetli bağ oluşturmaya modeliyle açıklanabilir.

4) Çekme ve eğme dayancındaki düşüşe karşılık sertlikte artan dolgu malzemesi miktarı ile birlikte artışlar gözlenmiştir. Bu artışlar dokuya ilave edilen inorganik fazların matrise göre daha sert olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca her iki matris malzemesi türüne göre de artışların benzer biçimde olduğu görülmüştür.

5) Dinamik yöntemlerden darbe deneyinde ise dolgu malzemelerinin dokusal süreksizlik oluşturmaya nedeniyle azalmalar izlenmiştir. Bu düşüş artan dolgu malzemesi oranı ile de daha fazla olmaktadır.

6) Sözü edilen kontrol grubu ve dolgu malzemesi ilaveli matrise; (2 kat dokuma + keçe + 2 kat dokuma) konfigürasyonunda fiberler katılarak nihai üretime geçilmiştir. Söz konusu konfigürasyon seçimindeki temel neden; ortotropinin en aza indirilerek, izotropik plaka elde edilmek istenmesidir. Bu seçim genelde tüm kompozit imalatlarında seçilen geleneksel bir diziliştir. Tabaka yapısı veya diziliş özelliklerinin etkisi veya optimizasyon çalışmaları için değişik konfigürasyon çalışmalarına gereksinim olduğu da açıktır.

7) Fiber konfigürasyonu ile tüm deneylerde cam oranı %35 sabit tutulmuştur. Kontrol grubuna göre fiber ilavesi çekme ve eğme dayancında %100' ü geçen artışlar gözlenmiştir. Burada artan dolgu malzemesi miktarı ile birlikte azalmalar elde edilmiştir. Bu durum yine dolgu malzemelerinin dokuda süreksizlik oluşturmaya ile açıklanabilir.

8) Al(OH)₃ dolgu malzemesinin ilave edildiği yapılarda azalışların görece olarak daha az ve CaCO₃' e göre daha yüksek değerde olduğu da saptanan ayrı bir husustur.

9) Yapılan maliyet analizi sonucunda; dolgu malzemesi olarak kalsit dolgunun kullanımı, alüminyum hidroksit dolguya kıyasla maliyet azaltmada daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca matris malzemesi olarak epoksi yerine vinilester matrisin kullanımı ~%50 maliyeti azaltmaktadır.

10) Son olarak çekme deneyi sonucunda elde edilen numunelerin kırık yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu ile incelenmesi sonucunda da elde edilen görüntüler tüm

deneysel çalışmaları doğrular niteliktedir. Daha nceki kısımlarda da belirtildiği gibi dolgu malzemesi ile gerçekleştirilen üretimlerde en büyük sorun dolgu malzemesinin matris içerisinde uniform olarak dağılımının zorluğu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sorun beraberinde mekanik özelliklerde düşüş özelliğini de beraberinde getirmektedir. Fakat bu durum dolguların nerdeyse çoğunda karşımıza çıkmaktadır. Çünkü dolgu malzemesi yapıda süreksizlik oluşturmaktadır. Bu durum tam anlamıyla engellenemese de gerekli teçhizatlar ve uygun dolgu malzemesi seçimi ile en aza indirilmelidir.



KAYNAKLAR

- [1] Dodiuk, H. ve Goodman, S.H., (2013). Handbook of Thermoset Plastics, Third Edition, San Diego.
- [2] Herman, F.M., (2004). Encyclopedia of Polymer Science and Technology, John Wiley & Sons Inc., 2:307-328.
- [3] Heinold, R., (1995). "Broadening Polypropylene Capabilities with Functional Filler" Intertech Corp., Houston, Tx, Dec.
- [4] Subramanion, C. ve Asaithambi P., (1986). "Friction and Wear of Epoxy Resin Containing Graphite". J Reinf Plast Composite, 200-8.
- [5] Dipa, R. ve Sarkar, B. K. ve Rana, A.K., (2002). "Fracture Behavior of Vinylester Resin Matrix Composites Reinforced with Alkali Treated Jute Fibers, Journal of Applied Polymer Science, 85:2588-2593.
- [6] Mazumdar, S.K. (2002). Composite Manufacturing Materials, Product and Processing Engineering, CRC Press, Boca Raton.
- [7] Paliwal, M.K. ve 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.
- [8] Mazumdar, S.K. (2002). Composite Manufacturing Materials, Product and Processing Engineering, CRC Press, Boca Raton.
- [9] Akay, M., (2015). "An Introduction Polymer Matrix Composites 1st Edition".
- [10] Chung, D. L. L.,(2010). Composite Materials Science and Applications Second Edition, Springer, New York.
- [11] Baydar, D. G., (2011). Sürekli Cam Fiber Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [12] Chawla, K.K. (2011). Composite Materials Science and Engineering, Third Edition, Springer, New York.

- [13] Gümölcine, T., (2014). “ İzofталitik Polyester Reçine Matrisli Sürekli E-camı ve Bazalt Fiber Destekli Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [14] Demirkese, E., (1995). “Kompozit Malzemeler” İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [15] Crawford, R.J., (1998). Plastics Engineering, 3rd Edition, Butterworth-Heinemann Elsevier Science Linacre House Inc. Oxford, UK
- [16] Newaz, G.M. (1989). Advances in Thermoplastic Matrix Composite Materials, ASTM, Philadelphia.
- [17] Mallic, P.K., (2007). Fiber Reinforced Composite Materials, Manufacturing and Design, Third Edition, CRC Press.
- [18] Kompozit Malzemeler, www.muhendisce.com.tr, 12 Nisan 2016.
- [19] ASM Handbook, (2001). Composites, ASM International, USA.
- [20] Rudin, A., (1999). The Elements of Polymer Science and Engineering, Second Edition, Academic Press, San Diego.
- [21] Ebevele, R.O. (2000). Polymer Science and Technology, CRC Press, Boca Raton.
- [22] Derek, H., (1991). An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [23] Sidney H. Goodman, (1998). Handbook of Thermoset Plastics Second Edition, Raytheon System Company, California, USA.
- [24] Augustsson, C., (2004). Nm Epoxy Handbook, Third Edition, Nils Malmgren Ab.
- [25] Ratna, D., (2009). Handbook of Thermoset Resins, Smithers Rapra, Shrewsbury.
- [26] CTP Kalıplama Metotları, www.camelyaf.com.tr, 20 Mayıs 2016.
- [27] Circiumaru, A. ve Bria, V. ve Roman, I. ve Andrei, G. ve Dima, D. ve 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] Deogonda, P. ve Chalwa, V.N., (2013). “Mechanical Property of Glass Fiber Reinforcement Epoxy Composites”, International Journal of Scientific Engineering and Research, 1:4.
- [29] Wallenberg, F.T. ve Bingham A.A., (2010). Fiberglass and Glass Technology Energy-Friendly Compositions and Applications, Springer Science, LLC.
- [30] Bingöl, Y.C., (2008). Karbon-Fiber Takviyeli Polimer Matrisli Kompozit Bisiklet Kadrosu Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [31] Mallic, P.K., (2007). Fiber Reinforced Composite Materials, Manufacturing and Design, Third Edition, CRC Press.

- [32] Wypc, G., (2000). Handbook of fillers, Chemtec Publ., Toronto, Ont, Canada.
- [33] Cerbu, C. ve Curtutse, I., (2011). "Mechanical Characterization of the Glass Fibres/Rubber/Resin Composite Material", Materiale Plastice, 48:1.
- [34] Fu, S.Y. ve Feng, X.Q. ve Lauke, B. ve 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.
- [35] Valasek, P. ve 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. ve Ajith, G.J. ve Thaned, S. ve 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. ve Harimi, M. ve Maleque, M.A., (2013). "Mechanical Properties of Epoxy/Coconut Shell Filler Particle Composites", The Arabian Journal for Science and Engineering, 28:2.
- [38] Gupta, N. ve Brar, B.S. ve 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.
- [39] Bhagat, S. ve Verma, P.K. ve (2013). "Effect of Graphite Filler on Mechanical Behavior of Epoxy Composites", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 3:2.
- [40] Ameen, H.A., (2008). "Mechanical Properties of Composite Material Using Natural Rubber with Epoxy Resin", Eng. and Tech., 26:2.
- [41] Li, L. ve Zou H. ve Shao, L. Ve Wang, G. ve Chen, J., (2005). "Study on Mechanical Property of Epoxy Composite Filled with Nano-Sized Calcium Carbonate Particles", Journal of Materials Science, 40:1297-1299.
- [42] Saiyad, M. ve Devasshrayee, N. ve Mevada, R., (2014). "Study the Effect of Dispersion of Filler in Polymer Composite for Ratiation Shielding., Polymer Composites.
- [43] Ultracarb Product Brochure of Huntite., LKAB Minerals., (2016)
- [44] Jones, R. M., (1993). Mechanic of Composite Materials, 2nd Edition, Taylor & Francis Inc., USA.
- [45] Kaw, A.K., (2006). Mechanics of Composite Materials, 2nd Edition, Taylor& Francis Gruop, USA.
- [46] Öktem T., Seventekin N. Ve Yaman N., (2006). Karbon Liflerinin Üretimi, Tekstil ve Konfeksiyon, 3:164-173.

- [47] Dave, R. S. ve Loos, A. C., (1999). "Processing of Composites, Hanser Publishers, Almanya.
- [48] Karian, H.G., (2003). Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites, Second Edition, Marcel Dekker, New York.
- [49] RTM Enjeksiyon, www.epol.com.tr, 18 Mayıs 2016.
- [50] Effects of Vacuum and Pressure In Autoclave, (1990). Journal of Materials Processing Technology.
- [51] WEST System, (2010). Vacuum Bagging Techniques, USA.
- [52] Goren, A. ve 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.
- [53] Singla, M. ve Chawla, V., (2010). "Mechanical Properties of Epoxy Resin – Fly Ash Composite", Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, 9:199-210.
- [54] Goodman, S.W., (1998). Handbook of Thermoset Plastics, Second Edition, Noyes Publication, New Jersey, United States.
- [55] TSE 527, (2007). Plastikler – Çekme Özelliklerinin Tayini, TSE, Ankara.
- [56] TSE 14125, (1999). Plastik Kompozitler – Elyaf Takviyeli- Eğilme Özelliklerinin Tayini, TSE, Ankara. [57] Goodman, S.W., (1998). Handbook of Thermoset Plastics, Second Edition, Noyes Publication, New Jersey, United States.
- [57] TSE 179, (2006). Plastikler - Charpy Darbe Özelliklerinin Tayini, TSE, Ankara.
- [58] 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.
- [59] Plastikler-Gözeneksiz Plastikler-Yoğunluk Tayin Metodları- Bölüm 1: Daldırma Metodu, Sıvı Piknometre Metodu Ve Titrasyon Metodu, TS EN ISO 1183-1, Aralık 2006.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Neslihan TOPALÖMER
Doğum Tarihi ve Yeri : 11.08.1991/Kilis
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : neslihan.topalomer@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lise	Fen Bilimleri	Fatih Vatan Lisesi	2009

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2015-	Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş.	Asistan Mühendis
2013	Supsan Motor Supapları A.Ş.	Stajyer
2012	THY Teknik A.Ş.	Stajyer

YAYINLARI

Bildiri

1. TOPALÖMER N. ve ÜN İ., C., ve BEKEM A., ve ÜNAL A. “RS Camı Dokuma Elyaf Takviyeli Kompozitlerde Kalsit Dolgusunun Etkisi”, International Conference on Natural Science and Engineering (ICNASE’16), 19-20 March, Kilis.

ÖDÜLLERİ

1. Tübitak 2210-D Sanayiye Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı (2015-2)

