



T. C.

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜREKLİ CAM ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİT  
MALZEMELERİN GELİŞTİRİLMESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Hakkı ÖZER

Doç. Dr. Murat YAZICI

(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bursa- 2015

**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Hakkı ÖZER tarafından hazırlanan ‘Sürekli cam elyaf takviyeli PE, PP, ve PA termoplastik kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi ve sonlu elemanlar analizi’’ adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Doç. Dr. Murat YAZICI

**Üye:** Doç. Dr. Murat YAZICI

Uludağ Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Otomotiv Mühendisliği

imza

**Üye:** Yrd. Doç. Dr. İdris KAREN

Bursa Orhangazi Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Makine Mühendisliği

imza

**Üye:** Yrd. Doç. Dr. Behiye KORKMAZ

Uludağ Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Makine Mühendisliği

imza

**Yukarıdaki Sonucu Onaylarım**

**Prof. Dr. Ali Osman DEMİR**

**Enstitü Müdürü**

**.././....(Tarih)**

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

../../....

**Hakkı ÖZER**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### SÜREKLİ CAM ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİT MALZEMELERİN GELİŞTİRİLMESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Hakkı ÖZER

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç. Dr. Murat YAZICI

Son yıllarda otomotiv endüstrisi için getirilen CO<sub>2</sub> emisyon sınırlamaları nedeniyle hafif yapılı araçlara olan ilginin artmasıyla, ağırlık azaltmaya dönük çalışmalar hız kazanmıştır. Termoplastik matrisli kompozit malzemeler bu anlamda özellikle özgül mukavemetinin yüksek oluşu, form verilebilirliği ve geri dönüşüm kabiliyeti nedeniyle önemli alternatif malzemelerdir. Bu tez çalışmasında termoplastik kompozit malzemeler laminasyon tekniği ile üretilerek elde edilmiştir. Kompozit üretimi, kompozit yapının sıcak preste belirli süre bekletilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu yapı, arasına uygun şekilde ve açıda cam elyaf dizilmiş levhalardan oluşturulmuştur. Sonrasında, üretilen malzemelerden; çekme, basma, kayma, üç nokta eğilme ve çentik darbe numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler uygun şartlarda test edilip mekanik özellikler belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Termoplastik kompozit malzemeler, Cam elyaf, Mekanik özellikler,

**2015, xv + 106 sayfa.**

## ABSTRACT

Msc Thesis

### IMPROVING OF CONTINUOUS GLASS FİBER REİNFORCED THERMOPLASTİC COMPOSİTE MATERİALS AND EXAMİNE OF MECHANİCAL PROPERTİES BY EXPERİMENTAL METHOD

Hakkı ÖZER

Uludağ University

Graduate School Of Natural And Applied Sciences

Department Of Automotive Engineering

**Supervisor:** Doç. Dr. Murat YAZICI

In recent years, in connection with the CO<sub>2</sub> emission regulations set for the automotive industry, the attention to lightweight vehicles has risen. As a consequence, weight reduction studies have gained momentum. In this context, thermoplastic matrix composites are considerable alternative materials, especially for their high specific strength, formability, and recyclability. In this thesis, firstly, thermoplastic composite materials were produced using lamination technique. Composite production was achieved by keeping the composite structure in a hot press machine for a certain time. This structure was consisted of sheets with glass fibers aligned between them in a proper form and at a proper angle. Next, specimens for tensile, compression, shear, 3-point bending and notch impact tests were prepared using these composites produced. Mechanical properties were determined by testing the specimens in appropriate conditions.

**Key Words:** Thermoplastic Composite Materials, Glass Fiber, Mechanical Properties

**2015, xv + 106 Pages.**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Hayatım boyunca hiçbir zaman maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme, yüksek lisans eğitimim süresince hem akademik anlamda hem de hayata yaklaşımıyla bizlere örnek olan, bilgisini ve deneyimlerini her zaman çok cömertçe bizlerle paylaşan danışman hocam Doç. Dr. Murat YAZICI' ya ve içinde bulunduğum araştırma grubunda yer alan tüm hocalarıma ve ekip arkadaşlarıma, tez öncesi ve tez süresince yardımlarını esirgemeyen Durfoam A.Ş.'den Genel Müdür Sn. Kadir Üsküp ve ekibine , malzeme deneylerini gerçekleştirdiğimiz BOÜ Uygulamalı Mekanik Laboratuvarı yetkililerine ve U. Ü. Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme laboratuvarı imkânlarını sunan hocalarıma katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışma Doç. Dr. Murat YAZICI tarafından yürütülen ve TOFAŞ TÜRK OTOMOBİL FABRİKALARI A.Ş.'nin proje müşteri kuruluşu olarak katkı koyduğu TÜBİTAK-TEYDEB 1505 5140018 nolu proje çalışmaları kapsamında gerçekleşmiştir. Desteğinden dolayı TÜBİTAK TEYDEB'e ve TOFAŞ TÜRK OTOMOBİL FABRİKALARI A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Hakkı ÖZER

.././...

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
Çizelgeler Dizini.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	8
3.1. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları.....	8
3.2. Uygulama Alanları.....	10
3.2.1. Havacılık Sanayi.....	11
3.2.2 Otomotiv Endüstrisi.....	11
3.2.3. İnşaat Sektörü.....	12
3.2.4 Deniz Endüstrisi.....	12
3.2.5. Elektrik-Elektronik Sanayi.....	12
3.2.6. Spor Aletleri.....	12
3.2.7. Ev Aletleri.....	13
3.3. Üretim Yöntemleri.....	13
3.3.1 Elyaf Takviyeli Kompozit Üretim Yöntemleri.....	13
3.3.1.1. El yatırma.....	13
3.3.1.2. Püskürtme Yöntemi (Spray-Up).....	14
3.3.1.3. Profil Çekme / Pultruzyon.....	15

3.3.1.4. Elyaf Sarma Yöntemi (Filament Winding).....	16
3.3.1.5. Reçine Transfer Kalıplama (RTM / Reçine Enjeksiyonu).....	16
3.3.1.6. Basınçla Kalıplama (Compression Molding).....	17
3.3.2. Metal Matrisli Kompozit Üretim Yöntemleri.....	17
3.3.2.1. Sıcak presleme yöntemi .....	17
3.3.2.2. Toz metalürjisi yöntemi .....	18
3.3.2.3. Sıvı metal emdirme yöntemi .....	18
3.3.2.4. Elektroliz yöntemi .....	18
3.3.2.5. Buhar çökeltme yöntemi .....	19
3.3.2.6. Haddelme yöntemi .....	19
3.3.3. Yüksek Performanslı Kompozit Üretimi.....	19
3.4. Kompozit Malzemelerin Temel Bileşenleri .....	21
3.4.1. Matris Malzemeleri .....	21
3.4.1.1. Termoset Matrisler .....	22
3.4.1.2. Termoplastik Matrisler.....	22
3.4.2. Kompozit Malzemelerde Takviye Elemanları .....	23
3.4.2.1. Cam Elyaf lar .....	23
3.4.2.2. Bor Elyaf lar.....	24
3.4.2.3. Karbon Elyaf lar .....	24
3.4.2.4. Aramid Elyaf lar.....	25
3.4.2.5. Yüksek Sıcaklık Elyaf ları .....	25
4. TERMOPLASTİK KOMPOZİTLER .....	26
4.1. Termoplastik Kompozitlerin Mekanik Özellikleri.....	26
4.2. Termoplastik Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları .....	28
4.3. Termoplastik Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	29
4.3.1. Fiberlerin İşlenmesi .....	30



4.3.2. Fiber ile Matrisin Birleşimi .....	30
4.3.2.1. Eriterek Kaplama .....	31
4.3.2.2. Toz Kaplama .....	31
4.3.2.3. Film Yığılma .....	32
4.2.2.4. Fiber Hibritleştirme .....	32
4.3.3. Şekillendirme Teknikleri .....	33
4.3.3.1. Enjeksiyon Kalıplama .....	33
4.3.3.2. Reaksiyon Enjeksiyon kalıplama .....	34
4.3.3.3. Kaplama .....	34
4.3.3.4. Ekstrüzyon .....	35
4.3.3.5. Şişirme .....	35
4.3.3.6. Termoforming-Vakum veya Basınç Şekillendirme .....	36
4.3.3.7. Hidro Şekillendirme .....	36
4.3.3.8. Pultrüzyon .....	37
4.3.3.9. Diğer Şekillendirme Teknikleri .....	37
4.3.4. Termoplastik Kompozitlerin Tezgâh ile İşlenmesi .....	37
4.3.5. Yeniden İşlenebilirlik .....	37
5. KOMPOZİT MEKANİĞİ VE LAMİNASYON TEORİSİ .....	39
5.1. Hacim ve Kütler Oranları, Yoğunluk ve Boşluk Miktarları .....	39
5.1.1. Hacim Oranları .....	39
5.1.2. Kütle Oranları .....	40
5.1.3. Yoğunluk .....	41
5.1.4. Boşluk Miktarı .....	42
5.2. Kompozit Malzemeler Mikro Mekanik .....	44
5.2.1. Ortotropik Kompozit Malzemeler .....	44
5.2.2. Kompozit Malzeme Mekanik Özelliklerinin ( $E_1$ , $E_2$ , $\nu_{12}$ , $G_{12}$ ) Hesaplanması ..	44

5.2.2.1. Elastiklik Modülü E1' in Hesaplanması .....	45
5.2.2.2. Elastiklik Modülü E2' nin Hesaplanması .....	46
5.2.2.3. Poisson Oranı $\nu_{12}$ 'nin Hesaplanması .....	47
5.2.2.4. Kayma Modülü G12' nin Hesaplanması.....	48
5.3. Kompozit Tabakaların Makromekanik Analizi .....	50
5.3.1. Ortotropik Tabakaların Makromekanik Analizi.....	51
5.3.1.1. Ortotropik tabakada keyfi doğrultu.....	52
5.3.2.3. Gerilim Bağlıntıları .....	53
5.3.2.3. Uzama Bağlıntıları .....	54
5.3.1.4. Gerilme-Uzama Bağlıntıları.....	54
6. HASAR TEORİLERİ .....	58
6.1. Maksimum Gerilme Hasar Teorisi.....	58
6.2. Mukavemet Oranı.....	59
6.3. Maksimum Şekil Değiştirme Hasar Teorisi .....	60
6.4. Tsai-Hill Hasar Teorisi.....	61
6.5.Tsai-Wu Hasar Teorisi .....	62
7. MATERYAL VE METHOD .....	67
7.1. Deneylerde Kullanılan Matris ve Takviye Malzemeleri.....	68
7.1.2. Deneylerde Kullanılan Matris Malzemeleri .....	68
7.1.2.1. Poliamid .....	69
7.1.2.2. Polietilen .....	70
7.1.2.3. Polipropilen.....	71
7.1.3. Deneylerde Kullanılan Takviye Malzemeleri .....	72
7.1.3.4 Cam Elyaf.....	72
7.2. Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Laminasyon Yöntemi ile Üretimi.....	73
7.3. Deneyler .....	75

7.3.1. Çekme Deneyleri.....	75
7.3.2. Basma Deneyleri .....	77
7.3.3. Çentik Darbe Deneyleri.....	80
7.3.4. Üç Nokta Eğilme Deneyleri .....	81
7.3.5. Kayma Deneyleri.....	82
8. SONUÇLAR .....	85
8.1. Deneysel Sonuçlar.....	85
8.1.1. Çekme Deney Sonuçları .....	85
8.1.2. Basma Deney Sonuçları .....	89
8.1.3. Çentik Darbe Deney Sonuçları.....	92
8.1.4. Üç Nokta Eğilme Deney Sonuçları .....	95
8.1.5. Kayma Deney Sonuçları.....	97
9. TARTIŞMA .....	101
KAYNAKLAR .....	103
ÖZGEÇMİŞ .....	106

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklamalar
$\gamma$	Kayma şekil değiştirmesi
$\Delta h$	Kompozit enlemesine uzama miktarı
$\Delta L$	Kompozit boylamasına uzama miktarı
$\epsilon_1$	Boyuna şekil değiştirme miktarı
$\epsilon_2$	Enine şekil değiştirme miktarı
$\nu_{12}$	Major Poisson oranı
$\rho_{ce}$	Kompozit malzeme deneysel yoğunluğu
$\rho_{ct}$	Kompozit malzeme teorik yoğunluğu
$\sigma$	Gerilme
$\tau_c$	Kompozit kayma gerilmesi
$\delta$	Kayma deformasyonu
$(\epsilon_1^T)_{ult}$	Boylamasına maksimum çekme şekil değiştirmesi (1 yönünde)
$(\epsilon_1^C)_{ult}$	Boylamasına maksimum basma şekil değiştirmesi (1 yönünde)
$(\epsilon_2^T)_{ult}$	Enine doğrultuda maksimum çekme şekil değiştirmesi (2 yönünde)
$(\epsilon_2^C)_{ult}$	Enine doğrultuda maksimum basma şekil değiştirmesi (2 yönünde)
$(\gamma_{12})_{ult}$	Maksimum düzlem kayma şekil değiştirmesi (1-2 düzleminde)
$(\sigma_1^T)_{ult}$	Maksimum boylamasına çekme mukavemeti (1 yönünde)
$(\sigma_1^C)_{ult}$	Maksimum boylamasına basma mukavemeti (1 yönünde)
$(\sigma_2^T)_{ult}$	Maksimum enine çekme mukavemeti (2 yönünde)
$(\sigma_2^C)_{ult}$	Maksimum enine basma mukavemeti (2 yönünde)
$(\tau_{12})_{ult}$	Maksimum kayma mukavemeti (1-2 düzleminde)
A	Kompozit malzemenin kesit alanı
$E_1$	Boylamasına elastisite modülü
$E_2$	Enine elastisite modülü
F	Kompozit malzemeye etki eden kuvvet
$G_{12}$	Düzlem kayma modülü
$G_{1,2,3,4,5,6}$	Mukavemet rijitlik elemanları
h	Kompozit eni
$H_{1,2,6,11,22,66}$	Hasar teorisi sabitleri

L	Kompozit boyu
P	Yoğunluk
R	Reuter matrisi
S	Esneklik matrisi elamanı
$t$	Kalınlık
SR	Mukavemet oranı
T	Matris dönüşümü
TPC	Termoplastik kompozit malzeme
$v$	Hacim
V	Hacim oranı
Q	Esneklik katsayısı
$w$	Kütle
W	Kütle oranı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.1. Farklı malzemelerin çeşitli özelliklerinin karşılaştırılması.....	9
Şekil 3.2. El yatırma yöntemi .....	14
Şekil 3.3. Püskürtme Yöntemi.....	15
Şekil 3.4. Profil çekme yöntemi üretim şeması .....	15
Şekil 3.5. Elyaf Sarma yöntemi .....	16
Şekil 3.6. RTM yöntemi .....	17
Şekil 3.7. Toz metalürjisi yöntemi üretim şeması.....	18
Şekil 3.8. Yüksek Performanslı kompozit üretim şeması.....	19
Şekil 4.1. Plastik kompozit malzemelerin işleme tekniklerini sınıflandırılması.....	29
Şekil 4.2. Toz kaplama yöntemi.....	32
Şekil 4.3. Enjeksiyon Kalıplama Sistemleri: A.Plunger (dalma pistonlu) tip, B. Reciprotating (ileri-geri çalışmalı) vidalı tip.....	33
Şekil 4.4. Reaksiyon Enjeksiyon Kalıplama Prosesi (RIM) .....	34
Şekil 4.5. Ekstruder şema.....	35
Şekil 4.6. Plastik şişe üretiminde kullanılan üç kısımlı enjeksiyon kalıplama makinesi.....	36
Şekil 5.1. Boşluklu laminanın kesit fotomikrografisi.....	42

Şekil 5.2.	Kompozit malzemede gerilmenin takviye doğrultusunda uygulanması.....	45
Şekil 5.3.	Kompozit malzemede gerilmenin takviye doğrultusuna dik doğrultuda uygulanması.....	46
Şekil 5.4.	Tek yönlü bir laminaya ait düzlem kayma modülünü hesaplamak için kullanılan temsili hacim elamanı üzerindeki düzlem kayma gerilmesi.	49
Şekil 5.5.	Tek yönlü kompozit tabakalarda 1-2 lif koordinat sistemleri ve global x-y koordinatı.....	51
Şekil 5.6.	Malzeme esas eksenleri ve esas eksenlerde gerilmeler.....	53
Şekil 6.1.	Açılı bir laminadaki global ve lokal eksenler.....	59
Şekil 7.1.	Çekme ve basma deney tablaları için kullanılan yapıştırıcılar.....	67
Şekil 7.2.	Deney sonrası numunelerin incelendiği dijital mikroskop.....	68
Şekil 7.3.	Isıtma sistemli vidalı pres ve hidrolik pres.....	73
Şekil 7.4.	Çentik darbe, çekme ve basma test numuneleri.....	74
Şekil 7.5.	Kayma ve üç nokta eğilme test numuneleri.....	75
Şekil 7.6.	Çekme deney numunelerinin 0/90 doğrultulu 8 katmanlı lamina düzeni.....	76
Şekil 7.7.	Çekme Numuneleri.....	76
Şekil 7.8.	Çekme deney düzeneği.....	77
Şekil 7.9.	Basma deney numunelerinin 0/90 doğrultulu 8 katmanlı lamina düzeni .....	78
Şekil 7.10.	Basma numuneleri en-tab hazırlanması.....	78

Şekil 7.11.	Basma çeneleri.....	79
Şekil 7.12.	Basma numuneleri sıkıştırma çenesi.....	79
Şekil 7.13.	Çentik darbe deney numunelerinin 0/90 doğrultulu 14 katmanlı lamina düzeni .....	80
Şekil 7.14.	Çentik darbe deney cihazı.....	81
Şekil 7.15.	Üç Nokta Eğilme deney numunelerinin 0/90 doğrultulu 14 katmanlı lamina düzeni .....	82
Şekil 7.16.	Üç Nokta Eğilme deney düzeneği.....	82
Şekil 7.17.	Kayma deney numunelerinin 0/90 doğrultulu lamina düzeni.....	83
Şekil 7.18.	Kayma deneyleri için üretilen kayma deney aparatı.....	84
Şekil 8.1.	PA matrisli termoplastik kompozit malzeme çekme deneyi kopma bölgesi.....	86
Şekil 8.2.	PE matrisli termoplastik kompozit malzeme çekme deneyi kopma bölgesi.....	86
Şekil 8.3.	PP matrisli termoplastik kompozit malzeme çekme deneyi kopma bölgesi.....	87
Şekil 8.4.	PA matrisli termoplastik kompozit malzeme çekme deneyi esnasında oluşan şekil değişimleri.....	88
Şekil 8.5.	PA, PE, PP matrisli termoplastik kompozit malzemelerin çekme deney sonuçları.....	89
Şekil 8.6.	PA matrisli termoplastik kompozit malzeme basma deneyi kopma bölgesi.....	90
Şekil 8.7.	PE matrisli termoplastik kompozit malzeme basma deneyi kopma bölgesi.....	90



Şekil 8.8.	PP matrisli termoplastik kompozit malzeme basma deneyi kopma bölgesi.....	91
Şekil 8.9.	PA, PE, PP matrisli termoplastik kompozit malzemelerin basma deney sonuçları.....	92
Şekil 8.10.	PA matrisli termoplastik kompozit malzeme kırılma yüzeyleri.....	93
Şekil 8.11.	PE matrisli termoplastik kompozit malzeme kırılma yüzeyleri.....	93
Şekil 8.12.	PE matrisli termoplastik kompozit malzeme kırılma yüzeyleri.....	94
Şekil 8.13.	PA, PE, PP matrisli termoplastik kompozit malzemelerin charpy çentik darbe enerjileri.....	94
Şekil 8.14.	PA matrisli termoplastik kompozit malzeme üç nokta eğilme deneyleri deformasyon bölgeleri .....	95
Şekil 8.15.	PE matrisli termoplastik kompozit malzeme üç nokta eğilme deneyleri deformasyon bölgeleri .....	96
Şekil 8.16.	PP matrisli termoplastik kompozit malzeme üç nokta eğilme deneyleri deformasyon bölgeleri .....	96
Şekil 8.17.	PA, PE, PP matrisli termoplastik kompozit malzemelerin üç nokta eğilme deney sonuçları.....	97
Şekil 8.18.	Deney sonrası kayma numuneleri.....	98
Şekil 8.19.	PP matrisli termoplastik kompozit malzemelerin kayma deneyi esnasında şekil değişimi.....	98
Şekil 8.20.	Kayma kuvvetinin etkisi ile tabakalar arasında meydana gelen delaminasyonlar.....	99
Şekil 8.21.	PA, PE, PP matrisli termoplastik kompozit malzemelerin kayma deney sonuçları.....	99

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Kompozit ve klasik malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması .....	9
Çizelge 3.2. Kompozit malzemelerin uygulama alanları .....	11
Çizelge 3.3. Kompozit üretim yöntemlerinin bazı açılardan karşılaştırılması (10: en büyük değer, 1: en küçük değer).....	20
Çizelge 4.1. Genel Amaçlı Plastiklerin Bazı Özellikleri.....	27
Çizelge 4.2. Mühendislik Amaçlı Plastiklerin Bazı Özellikleri.....	27
Çizelge 4.3. Termoplastik reçineler erime ve işlem sıcaklıkları.....	28
Çizelge 7.1. PA, PE, PP malzemelerin mekanik özellikleri.....	69
Çizelge 8.1. Kompozit boyuna çekme mukavemet değerleri.....	85
Çizelge 8.2. Deneysel Sonuçlar .....	100

## 1. GİRİŞ

İnsanlık tarihinde en fazla kullanılan yapı elemanları metaller, polimerler, kompozitler ve seramikler olmak üzere dört gruba ayrılır. Bu yapı elemanları arasında son yıllarda kompozit malzemelere olan ilgi giderek artmaktadır. Bunun sebebi olarak özgül mukavemetin yüksek oluşu, üstün fiziksel ve kimyasal özellikler ve oldukça hafif olmaları gösterilebilir. Kompozit malzeme iki ya da daha fazla malzemenin, istenilen özellikler doğrultusunda, belli şartlar ve oranda malzemelerin makro yapıda birleştirilmesiyle elde edilir.

Kompozit malzemeler, matris adı verilen ana faz ile fiber olarak adlandırılan ikinci bir fazın istenilen malzeme özellikleri dikkate alınarak belirli oran ve düzende fiziki karışımı ile üretilirler. Tek fazlı yapıların dışında bütün yapılar kompleks fazlı yapılar olarak adlandırılırlar. O halde tek fazlı malzemeler dışında bütün malzemeler kompozit grubuna girerler (Güleşen 2005).

Fiber malzeme, kompozit malzemenin mukavemet özelliğini belirlemektedir. Matris malzeme ile belirli sıcaklıkta belirli şartlarda bir araya getirilen fiberler çeşitli düzenlerde ve çeşitli yapılarda bulunabilirler. Matris malzemeler fiberlerin bir arada fiziki olarak bir arada tutmakta ve kompozit yapı üzerine gelen dinamik ve statik yükleri fiberler üzerine homojen bir şekilde dağıtmaktadır. Böylelikle fiber malzeme plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemeni kopmasını geciktirmektedir.

Son yıllarda otomotiv endüstrisi alanında mevcut yapıların mukavemet değerleri korunarak hafif araçların üretilmesi ve buna bağlı olarak CO<sub>2</sub> salınımı, yakıt tüketimi gibi sektörel hedefler amacıyla bu yapıların üretilmesi ve geliştirilmesi adına önemli çalışmalar yapılmıştır (Engels ve ark. 2012, Boria ve ark. 2015).

Mevcut kompozit yapılar arasında, sürekli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemeler otomotiv sektörü ihtiyaçları doğrultusunda önem arz etmektedir. Bunun sebebi olarak özgül mukavemetin yüksek oluşu, form verilebilirliği ve geri dönüşüm kabiliyeti gösterilebilir.

Bu çalışmada laminasyon tekniği kullanılarak sürekli cam elyaf takviyeli poliamid, polipropilen ve polietilen matrisli termoplastik kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen malzemeler standartlara uygun kalınlıklarda olup 8 ile 14 arası katmana sahiptir. Bu malzemelerin mekanik özelliklerini belirleme amacıyla çekme, basma, kayma, üç nokta eğilme ve çentik darbe numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler uygun şartlarda test edilip termoplastik kompozit malzemelerin mekanik özellikleri tespit edilmiştir.



## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Termoplastik kompozit malzemeler diğer kompozit malzemeler ile karşılaştırıldıklarında nispeten daha yeni malzemelerdir. Birçok avantaja sahip olan termoplastik kompozit malzemeler ile ilgili araştırmacılar son yıllarda bu alanda çalışmalarına yoğunluk vermişlerdir.

Termoplastik kompozit malzemelerin üretimi ve endüstriyel alanda kullanımının ilk yıllarda yaygın olmadığı görülmektedir. Buna neden olarak matris malzemesi ile elyaf malzemesinin aralarında meydana gelen ıslanma sorunu olduğu yapılan çalışmalar incelendiğinde görülmektedir. Bu sorunun çözülmesi adına 2000'li yılların başında çalışmalar yapılmıştır. Hamada ve ark. (2000) tarafından laminasyon tekniği kullanılarak polipropilen matrisli sürekli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzeme üretim çalışması yapılmıştır. Çalışmada doküma konfigürasyonlarının gerekli performansını iyileştirmek amacıyla iki farklı bağlayıcı madde belirli oranlarda kullanılmıştır. Bu PP bağlayıcı maddeler maleik-anhidrid ile iyileştirilmiştir. Yapılan iyileştirme çalışmalar onucunda tabakalar arasında oluşan bağ kuvvetlerini incelemek amacıyla eğilme testi yapılmıştır. Sonuç olarak düşük oranda kullanılan PP bağlayıcısı yüksek kırılma dayanımı için uygun olduğu bulunmuştur. Sürekli cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin kırılma özellikleri PP bağlayıcısının molekül ağırlığına bağlı olduğu düşünülebilir. Yüksek kırılma özelliklerini elde etmek için PP bağlayıcısının optimum bir değere sahip olması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu optimum değer de PP matrisinin kimyasal koşuluna bağlıdır. Ayrıca Seo ve ark. (2000) polipropilen matrisli termoplastik kompozit malzemelerin elyaf malzemeleri ile arasında oluşan bağ güçlendirmek amacıyla çalışma yapmıştır. Çalışmada izotaktik polipropilen İPP ve maleik anhidrid ile güçlendirilmiş polipropilen MA-PP hidrojen bağlanması açısından karşılaştırılmıştır. İPP malzemesi ile az miktarda karıştırılmış MA-PP iki malzemenin yapısal farklılıklardan dolayı etkileşim zincirine sebep olmaktadır. İPP eriyiği içerisine (%0,2) oranında MA-PP eklenmesi sonucunda homojen çekirdeklenmesinin azalmasına yol açmakta ve etkili çekirdeklerin sayısını arttığı görülmektedir. İPP fazında MA-PP nin bir çekirdeklendirici bağlantı gibi hareket ettiği anlamına gelmektedir.

Moussavi-Torshizi ve ark. (2010) yeni geliştirdikleri lamina düzene sahip kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Üretilen laminalar 3 katmanlı olup

katmanlar dışında alüminyum tabaka kullanılmıştır. Bu katmanlar sırasıyla glass/epoksi, karbon/epoksi ve glass/epoksi tabakalardan oluşmaktadır. Çalışmada tabakalar içerisinde bulunan fiberlerin doğrultuları değiştirilerek birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada Srinivasa ve ark. (2011) fiber yüzey modifikasyonu yoluyla farklı fiber takviyeli kompozitlerin özelliklerinin artırılması mümkün olduğu gözlemlenmiştir. Areca-urea formaldehid, areca melamin urea formhaldehid ve areca epoksi malzemelerinin kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde etkileri incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda areca-epoksi kompozit malzemenin en yüksek eğilme gerilmesine ve en yüksek darbe enerjisine sahip olduğu görülmüştür.

Baydar ve ark. (2012) tarafından polipropilen matrisli sürekli cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler üretilip, üretilen malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirleme amacıyla çekme testi uygulanmıştır. Bu çalışmada cam elyaf ile PP matris arasındaki uyumu iyileştirmek amacıyla akış ve mukavemet özellikleri birbirinden farklı iki farklı maleik anhidrit kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda uyumlaştırıcı kullanılan kompozit malzeme mukavemetinin uyumlaştırıcı kullanılmayan kompozit malzeme mukavemetine göre % 65 daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca kullanılan maleik anhidrit özelliklerinin kompozit malzeme mukavemetine etki ettiği sonucuna ulaşılmıştır.

P. Russo ve ark. (2013) tarafından bu çalışmada 0/90 cam fiber doğrultulu polipropilen matrisli termoplastik kompozit malzemelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Literatürde aynı matris ve fibere sahip kompozit malzemelerden farklı olarak bu çalışmada fiber ile matris arasındaki uyumu artırıcı polybond 3200 (Maleik Anhidrid) malzemesinin yanı sıra fiberlere aminosilan kaplanmış. Çalışmada aminosilan içerikli kompozit malzeme ile aminosilan içermeyen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemek amacıyla eğilme ve düşük hızda çarpışma testleri yapılmıştır. Eğilme ve düşük hızda darbe deneyleri sonucunda aminosilan içerikli polipropilen termoplastik kompozit malzemelerin en yüksek gerilme ve en iyi darbe direncine sahip malzeme olduğu görülmüştür.

Simeoli ve ark. (2014) tarafından 0/90 cam fiber doğrultulu polipropilen matrisli termoplastik kompozit malzemeler üretilmiştir. Bu çalışmada fiber ile matris malzeme

arasındaki uyumu artırma özelliklerine sahip polybond 3200 (maleik anhidrid) malzemenin yanı sıra aminosilan kaplı fiberler kullanılmıştır. Film istifleme tekniği ile 0/90 fiber doğrultulu üretilen lamina kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla eğilme ve düşük hızda çarpma deneyleri yapılmıştır. Deneysel olarak daha yüksek mekanik özelliklere sahip aminosilan ile birlikte kullanılan farklı özelliklere sahip termoplastik kompozit malzemeler karşılaştırılmış ve aminosilan içerikli kompozit malzemelerin içerisine maleik anhidrid ilavesi sonucunda yüksek absorpsiyon enerjisi ve yüksek eğilme gerilmesi elde edilmiştir.

Suresh ve ark. (2014) tarafından cam elyaf takviyeli polipropilen matrisli termoplastik kompozit malzemelerin üretim parametreleri deneysel tasarım yöntemi yardımıyla belirlendi ve mekanik özellikleri çekme ve eğilme deneyleri ile belirlendi. Üretim parametreleri olarak 4-9 MPa arası basınç değerleri ve % 5 - %10 arası bağlayıcı konsantrasyonu belirlendi. 7 MPa basınç değeri ve % 8 bağlayıcı konsantrasyon yüzdesi ile üretilen kompozit malzemelerin en yüksek çekme ve eğilme gerilmesine sahip oldukları görüldü.

Parbharakan ve ark. (2014) tarafından pre-preg yöntemi ile hazırlanmış kompozit malzemelerin mekanik karakterizasyonu incelenmiştir. Bu çalışmada 3 farklı gruba ait pre-preg ve commingled-yarns yöntemi kullanılmıştır. Mekanik özellikleri basma deneyi, üç nokta eğilme deneyi ve kısa kiriş kayma deneyi sonucu belirlenmiştir. Kayma deneyleri ve eğilme deneyleri sonucunda commingled yarns yöntemi ile üretilen kompozit malzemelerde maksimum dayanım gözlenirken, basma deneyleri sonucunda pre-preg yönteminin daha yüksek gerilme değerleri verdiği görülmüştür. Ayrıca üretim çalışmaları sonucunda her malzeme grubu için optimum üretim sıcaklıkları elde edilmiştir.

Sorrentino ve ark. (2015) bu çalışmalarında tabakalar arası ara yüz dayanımının derecelendirilmesi/ gradation of the interlaminar interface strength (IGIS) isimli yeni bir lamina sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistemin amacı yüksek statik özellikler ile birlikte yüksek çarpışma dayanımı elde etmektir. Bu çalışmada PP matrisli cam elyaf takviyeli kompozit plakalar üretilmiştir. Cam elyaf ile uyumlu PP kompozitler ile uyumlu olmayan kompozitler farklı sıralar ile farklı kalınlık oranlarında tabakalandırılmıştır. Ayrıca karşılaştırma yapma amacıyla saf PP kompozitler ile tamamen uyumlu

kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemeler eğilme ve düşük hıza çarpma deneyine tabi tutulmuşlardır. Çarpma deneyleri 6J ve 25J enerji seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Eğilme deneyleri sonucunda tamamı uyumlu kompozit malzemelerin maksimum eğilme gerilmesine sahip olduğu görülmüştür. Fakat 6J enerjili çarpma deneyi sonrası absorbe ettikleri enerjiler karşılaştırıldığında tamamı uyumlu kompozit malzemenin en düşük absorpsiyon değerine sahip olduğu görülmüştür. 25J enerjili çarpışma deneyi sonucunda ise tamamı uyumlu kompozit malzemenin en yüksek enerji absorpsiyon değerine sahip olduğu görülmüştür.

Callens ve ark. (2015) PP matrisli, sünek paslanmaz çelik fiberli termoplastik kompozit malzemeler üretmişlerdir. Bu çalışmada üretilen kompozit malzemeler aynı matris ve aynı fiber malzemelere sahip olup 3 farklı yapıda üretilmişlerdir. Bu yapılar tek yönlü fiberin 0/90 doğrultuda oluşturulan yapı, basket weave (sepet örgü) yapısı ve satin weave (saten örgü) tekniği ile oluşturulan yapıdır. Üretilen kompozit malzemelerin özelliklerini belirlemek amacıyla, çekme ve darbe deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyleri sonucunda örgülü yapılara sahip olan kompozit malzemelerin tek yönlü 0/90 doğrultulu oluşturulan kompozit yapılardan daha üstün çekme gerilmesine sahip oldukları görülmüştür. Darbe deneyleri sonucunda ise kompozit yapıların absorbe ettikleri enerjiler karşılaştırılmış ve tek yönlü 0/90 doğrultulu oluşturulan kompozit yapının diğer yapılardan yaklaşık iki kat daha üstün enerji sönümlendiği görülmüştür.

Justo ve ark. (2015) dokuma teknolojisi ile üretilen karbon/epoksi tabakalarının arasına NOMEX (poliamid) plaka ilavesinin üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Çekme deneyleri sonucunda, karbon/epoksi + NOMEX kompozitin, karbon/epoksi kompozitten % 2 daha dayanıklı olduğu, tabakalar arası kırılma enerjilerinin elde edildiği deneyler sonucunda karbon/epoksi + NOMEX tabakalı kompozitin % 85 oranında daha yüksek değer verdiği görülmüştür. Çarpışma testi sonucunda karbon/epoksi tabakalardan oluşan kompozitin daha fazla hasara uğradığı görülürken çarpışma sonrası yapılan basma deneyinde laminaların daha az delamine olması nedeniyle karbon/epoksi + NOMEX tabakalı kompozit daha yüksek dayanıma ulaşmıştır.



Bizim çalışmamızda diğer çalışmalardan farklı olarak, matris ile fiber malzemeler arasında meydana gelen kristalizasyonun, uyumlaştırıcı özellikli malzemeler kullanılmadan gerçekleşmiş olmasıdır. Bu kristalizasyon termoplastik uyumlu cam elyaf kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede uyumlaştırıcı kullanmadan teorik değerlere yakın sonuçlar elde edilebilmekte ve üretim kolaylığı, maliyet gibi avantajlar elde edilmektedir. Bu tez çalışmasında poliamid, polipropilen ve polietilen matrisli termoplastik kompozit malzemeler laminasyon tekniği ile üretilerek elde edilmiştir. Kompozit üretimi, kompozit yapının sıcak preste belirli süre bekletilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu yapı, arasına uygun şekilde ve açıda cam elyaf dizilmiş levhalardan oluşturulmuştur. Sonrasında, üretilen malzemelerden; çekme, basma, kayma, üç nokta eğilme ve çentik darbe numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler uygun şartlarda test edilip mekanik özellikler belirlenmiştir.

### 3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzeme, farklı şekil ve kimyasal bileşimlere sahip, birbirleri içerisinde çözilemeyen iki ya da daha fazla malzemenin makro düzeyde birleştirilmesine denir. Malzeme içerisindeki bileşenler kompozitin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini belirlerler. İç yapılarının incelenmesi sonucunda bileşenlerin çıplak gözle ayırt edilebilmesi mümkündür. Yapılarında birden fazla sayıda fazın yer aldığı klasik alaşımlar makro ölçüde homojen olmalarına karşılık mikro ölçüde (mikroskopik muayene ile seçilebilen) heterojen malzemelerdir (Örçen 2005).

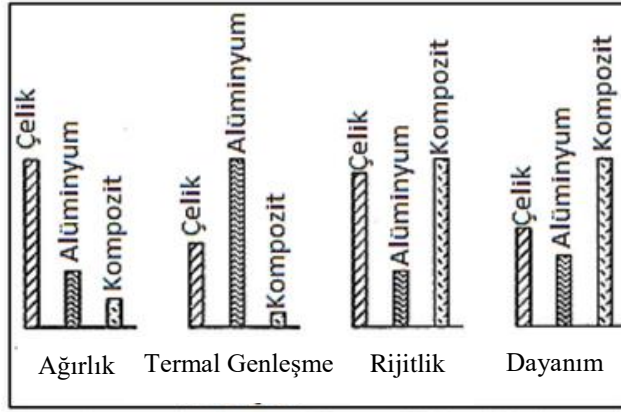
Kompozit malzemeler matris adı verilen ana faz ve fiber olarak adlandırılan ikinci bir fazdan oluşurlar. Matris ve fiber birbirleri içerisinde çözünmezler. Bu iki fazın birbirleri içerisinde karışmaz olması nedeniyle fazlar arasında ara yüzeyler oluşur. Fakat metalik sistemlerde oranda olsa dahi kompozitin özelliklerini etkileyebilecek çözünmeler ve ara yüzey reaksiyonları görülebilir (Örçen 2005).

Kompozit malzemeler hedefe yönelik malzeme olarak da tanımlanabilirler. Uygun teknikler ile bir araya getirilen farklı karakteristik yapılara sahip kompozit malzemeler üstün özellikler sergilemektedir. Kompozit malzeme tasarımındaki amaç fiziksel, kimyasal ve mekanik olarak yapıların bir ya da birkaç özelliğinin geliştirilmesidir.

#### 3.1. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerde; üstün özellikler genellikle kendi başlarına elde edilemezler. Belirli üstün özelliklere sahip malzemelerden yeni bir malzeme üretilmesi ile aşağıdaki bazı özellikler sağlanabilmektedir. Bunlar genel olarak şöyle sıralanabilir:

- Yüksek dayanım,
- Yüksek rijitlik,
- Yüksek yorulma dayanımı,
- Mükemmel aşınma direnci,
- Yüksek sıcaklık kapasitesi,
- İyi korozyon direnci,
- İyi termal ve ısı iletkenliği,
- Ağırlık,



**Şekil 3.1.** Farklı malzemelerin çeşitli özelliklerinin karşılaştırılması (Türkmen 2010)

Kompozit malzemelerde bütün bu özellikler bir arada bulunmazlar. Üretilen malzemelerin kullanım alanlarına ya da kullanım şartlarına göre mekanik özellikleri değişiklik gösterebilir. Özgül dayanım ve modülün gerçekten gerekli olduğu yerde kompozitin kullanılması önemli bir avantaj kaynağı olup tasarımda esneklik sağlarlar. Bir elyaf takviyeli kompozit malzemede elyaf ile matris arasında dayanım veya elyaf modülü arasındaki farkın büyük olması, kompozitin mekanik özellikleri açısından önemlidir.

**Çizelge 3.1.** Kompozit ve klasik malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Türkmen 2010)

Malzeme Cinsi	Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastik Modülü (GPa)	Özgül Çekme Dayanımı (G/ρ)	Özgül Modülü (E/ρ)	Uzama Miktarı (%)
Alüminyum	2,8	84	71	30	25	-
Al-2024	2,8	247	89	88	25	8-20
Al Alaşımı	2,8	600	71	210	25	-
Titanyum	4,51	700	117	192	21,1	20
Ni Alaşımı	8,18	450-1200	204	147	24,9	26-45
Ahşap	0,7	110	13	157	19	-
Alaşımız Çelik	7,86	460	210	60	27	20
Düşük Alaşımız Çelik	7,8	600	207	80-250	26,5	20-30
Dökme Demir	-	275	138	-	-	0,6
Pirinç (%30 Zn)	8,5	550	100	60	12	-
Karbon/Epoksi (%60)	1,62	1400	220	865	135	0,8
Kevlar/Epoksi	1,38	1310	83	950	60	-
Cam/Epoksi (%60)	1,66	1510	165	910	99	-
Cam/Polyester (%50)	1,9	750	38	390	19,8	1,8
Karbon/Epoksi (Y:D)	1,5	1650	140	1100	93	-
Cam/Polyester	1,55	110	9	72	5,7	2
Al/50%B	2,7	1130	207	420	77	-
Cu/50%T	14,13	1207	262	90	18	-

Kompozit malzemeler için matris ve takviye elamanı, üretim tekniği, uygulanan optimizasyon tekniği, bileşenlerin mukavemet özellikleri ve diğer faktörler göz önüne alınmalıdır. Ayrıca, matris ile fiber arasında meydana gelen ara yüzey bağının kuvvetli olması amacıyla bileşenlerin uyumu ve matrisin ıslatılabilirliği uygun olmalıdır.

Bu avantajların yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. Bunlar,

- Üretimin güçlüğü,
- Pahalı olması,
- İşlenmesinin güç olması yanında maliyetin yüksek oluşu ve gerekli yüzey kalitesinin elde edilmeyişi,
- Diğer malzemeler gibi geri dönüşümün olmayışı,
- Kırılma uzamasının az oluşu, gibi faktörler sayılabilir (Türkmen 2010).

### **3.2. Uygulama Alanları**

Kompozit malzemeler günümüzde oldukça geniş kullanım alanlarına sahiptir. Kompozit malzemeler hemen hemen endüstrinin tüm alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle ağırlık yüksek mukavemet istenen yerlerde metallerin yerine kullanılmaktadır. Bu durum kompozit malzemelere olan ilginin artmasını sağlamaktadır. Bu nedenle kompozit malzemeler en geniş kullanım alanını ulaşım endüstrisinde bulmuştur.

**Çizelge 3.2.** Kompozit malzemelerin uygulama alanları (Türkmen 2010)

Endüstrisi	Uygulama Alanları	Kullanılan Kompozit Malzemeler
Uçak	Uçak kanatları ve gövdesi, helikopter pervaneleri, iniş ve çıkış kapıları, payandalar döşeme kirişleri, çerçeveler, vantilatör ve türbin kanatları	B/Al, SiC <sub>w</sub> /Al, Gr/Al, B/Al, cam/epoksi, C/epoksi, B/epoksi, K/epoksi, süper alaşımlar
Helikopter	Transmisyon kutusu, giriş destek yapıtları, itici çubuklar, iniş takımları, rotor kanatları arkası	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Mg, Gr/Al, Gr/Mg, B/Al, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al, SiC <sub>w</sub> /Al, B/A, SiC/Al
Uzay	Uzay yapıtları, antenleri, robot kolları	B/Al, B/Mg, Gr/Mg
Otomotiv	Gövde parçaları, tampon ve çamurluklar, ön ve arka paneller, aks mili, yaylar, itme çubukları ve piston kolları	Kevlar/epoksi, SiC <sub>p</sub> /Al, SiC <sub>w</sub> /Al, B/Al
Gemi	Gemi teknesi, gemi güvertesi	Kevlar/epoksi, Karbon/epoksi
Kimya	Borular, basınçlı kaplar ve tanklar	Cam/epoksi, Karbon/epoksi
Spor	Oltalar, golf kulüpleri, yüzme havuzları, tenis raketleri bisiklet ve motosiklet gövdesi	Gr/Al, B/Al, C/epoksi, B/epoksi, SiC <sub>w</sub> /Al, B/Al, Gr/Al, SiC/Al
Elektrik	Motor fırçaları, kablo ve akü plakaları	Gr/Cu, Gr/Pb, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Pb
Tekstil	Mekikler	B/Al, C/Al, SiC/Al
Tıp	Röntgen masaları, protezler ve tekerlekli sandalyeler	B/Al, SiC/Al
Uçak-Uzay	Uçak frenleri, roket memeleri, türbin pervaneleri, roket çıkış sistemleri	Karbon/karbon kompozit
Diğer Alanlar	Makine yatakları	C/Pb, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Pb

### 3.2.1. Havacılık Sanayi

Son yıllarda havacılıkta metal malzeme yerine kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Kullanılan kompozit yapılar genel olarak epoksi matris içerisinde sürekli elyaf takviyeli kompozitlerdir. Uçak yapılarında alüminyum alaşımları gibi konvansiyonel malzemelerin yerini alan kompozit malzemeler, ağırlığa oranla yüksek mukavemet özelliğine sahiptirler.

### 3.2.2 Otomotiv Endüstrisi

Otomotiv endüstrisinin önem verdiği alanların başında ağırlığı azaltılmış araçlar gelmektedir. Bununla birlikte araçlarda emisyon değerleri, yakıt tüketimi, ivmelenme süresinde azalma gibi birçok avantaj görülmektedir. Bu doğrultuda kompozit malzemelere olan ilgi son yıllarda artmış durumdadır.

Otomotiv endüstrisinde termoset kompozit malzemelerin kullanımı yaygın olsa da son yıllarda geri dönüşüm, kolay şekil alma ve özgül mukavemetini yüksek olması nedeniyle termoplastik malzemeler sıklıkla kullanılmaktadır. Otomotiv kaporta parçaları, bazı motor parçaları, iç donanımda yer alan aynalar gösterge panelleri ve çarpışma esnasında mukavemet gerektiren araç parçalar bunlara örnek olarak gösterilebilir.

### **3.2.3. İnşaat Sektörü**

İnşaat sektöründe de kompozit malzeme kullanımı oldukça yaygındır. Lavabo, küvet, kapılar, kapı kolları, balkon korkulukları, soğuk hava depoları, bina kaplama panelleri kompozit malzeme kullanımına örnek olarak gösterilebilir.

### **3.2.4 Deniz Endüstrisi**

Kompozit malzemeler çok üstün korozyon direncine sahiptir. Bu nedenle su ile temas eden yüzeylerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda hafif olması su üzerinde deniz araçlarının daha rahat hareket edebilmesi, daha yakıt sarfiyatı ve hızlı hareket olanağı kompozit malzemelerin deniz endüstrisinde sıklıkla kullanılmasına sebep olarak gösterilebilir. Yelkenli gövdesi, yat ve tekne basamakları, öne ve arka platformlar kompozit malzemelerin deniz endüstrisinde sıklıkla kullanıldığı yerlerdir (Mazumdar 2002).

### **3.2.5. Elektrik-Elektronik Sanayi**

Kompozit malzemeler elektrik-elektronik sanayinde izolasyon özelliğinden dolayı üretim malzemesi olarak kullanılır (Yağcı 2007).

### **3.2.6. Spor Aletleri**

Kompozit malzemeler hafif, mukavim, yüksek titreşim sönümlenme özelliklerinden dolayı spor aletlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Golf sopaları, yarış botları, tenis raketleri, kayak aletleri, balık oltaları, bisikletler vb. spor ekipmanları örnek olarak gösterilebilir (Mazumdar 2002).

### **3.2.7. Ev Aletleri**

Mutfak aletleri, ss eşyaları, masa dolap gibi birçok ev aletlerinde kompozit malzemeler kullanılır.

### **3.3. Üretim Yöntemleri**

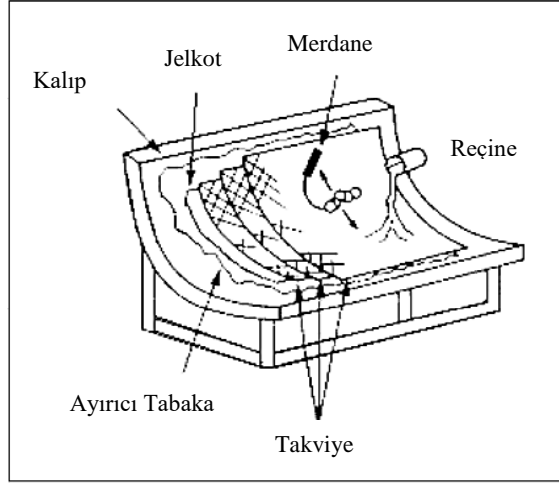
Kompozitlerin retiminde farklı ihtiyaçları karşılamak adına birçok farklı üretim yöntemi mevcuttur. Bu yöntemlerin her birinin çeşitli avantajları ve bazı faydaları mevcuttur. Bu nedenle uygun üretim yöntemini bulmak, son ürün kalitesini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Bu yöntemler:

#### **3.3.1 Elyaf Takviyeli Kompozit retim Yöntemleri**

##### **3.3.1.1. El yatırma**

El yatırma yöntemi en basit üretim yöntemidir. Genellikle keçe veya dokuma biçimli elyaf, daha önceden hazırlanan kalıp içerisine yerleştirilir ve matrisi oluşturan reçine fırça gibi basit el aletleriyle elyafın üzerine sürülür. İstenilen tabaka kalınlığı elde edilinceye kadar bu işleme devam edilir, böylece tabakalı kompozit üretilmiş olur. Bu yönteme en uygun reçineler; polyester ve epoksidir. El yatırma yönteminde, tutuşmanın engellenmesi, hafiflik eldesi, görünüm güzelliği gibi özellikleri sağlamak amacıyla reçineye değişik dolgu maddeleri katılmaktadır. Ayrıca reçinenin kalıp yüzeyine yapışmaması için polivinil alkol (PVA), silikon, madeni yağlar ve vaks gibi kalıp ayırıcılar kullanılır.

Bu retim yönteminde kullanılan takviye malzemeleri cam elyaftan yapılan keçeler ve dokumalardır. Ayrıca bu yöntemle tekneler, depolar, otomobil parçaları, makine parçaları ve teknik birçok parça üretilir.

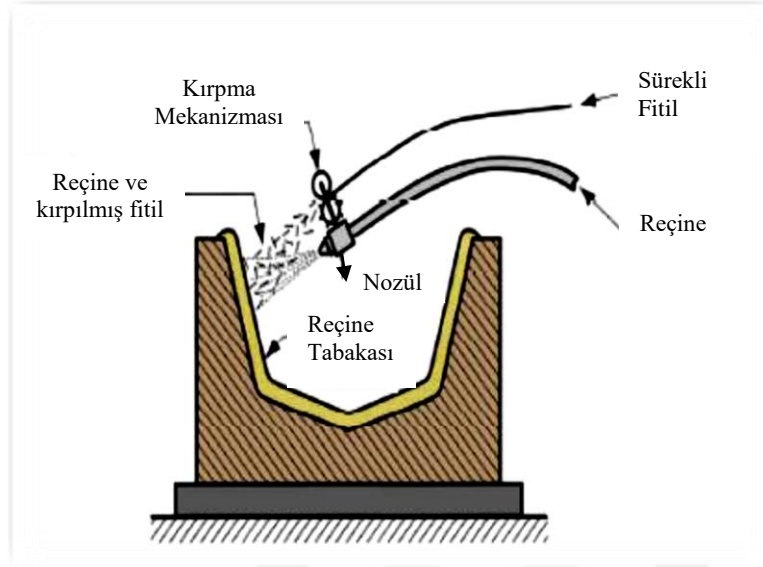


**Şekil 3.2.** El yatırma yöntemi (Eker 2011)

### **3.3.1.2. Püskürtme Yöntemi (Spray-Up)**

Püskürtme yöntemi, şekil olarak el yatırma yöntemine benzemektedir. Bu yöntem ile sadece kırılmış elyaf kullanılır. Elyafın kırılma işlemi tabanca üzerinde bulunan ve bağımsız çalışan bir kırıcı sayesinde yapılır. Kırılmış elyaflar uygun hızda kalıp yüzeyine, sertleştirici ilaveli reçine ile birlikte özel bir tabanca kullanılarak püskürtülür. Püskürtme işlemi uygun hızda yapılmalıdır. Bu üretim yönteminde de ıslatma önem taşımaktadır. Islatmanın tam gerçekleşmesi için kullanılan elyaf miktarı % 35 ile sınırlıdır. Püskürtme işleminden sonra hava kabarcıklarını engellemek için rulo püskürtülen tabaka üzerinde gezdirilir. Hızlı, kontrollü, maliyete sahip bu yöntem ile büyük ve kompleks parçaların üretimi kolaylıkla yapılabilir.

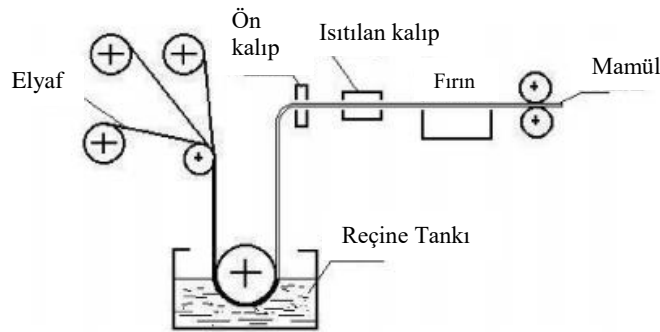




Şekil 3.3. Püskürtme yöntemi (Eker 2011)

### 3.3.1.3. Profil Çekme / Pultruzyon

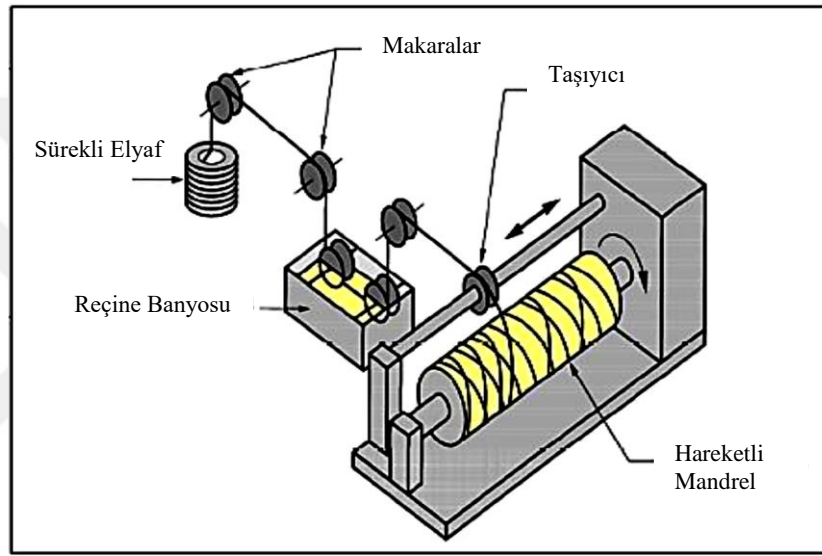
Profil çekme işlemi sürekli sabit kesitli kompozit profil ürünlerin üretilebildiği maliyetli seri üretim yöntemidir. Sistemde takviye malzemesi reçine banyosundan geçirildikten sonra 120-150 °C'ye ısıtılmış şekillendirme kalıbından geçirilerek sertleşmesi sağlanır. Islatmanın tam olması sebebiyle % 60-65 civarında elyaf kullanılabilir. Üretilecek kompozit malzemeden enine yük taşınması isteniyorsa özel dokuma yöntemlerinin kullanılması gerekir. Bu yöntemle genellikle çubuk ve boru şekilli ürünler elde edildiğinden, karışımın çubuk ve boru şekli kazanması için uygun kalıplardan çekilirler. Profil çekme yöntemi, yönlenmiş elyaf, uzunlamasına mukavemetin fazlalığı, otomasyon kullanılması, işletme ve yatırım maliyeti gibi avantajlara sahiptir (Aktaş 2010).



Şekil 3.4. Profil çekme yöntemi üretim şeması (Aktaş 2010).

### 3.3.1.4.Elyaf Sarma Yöntemi (Filament Winding)

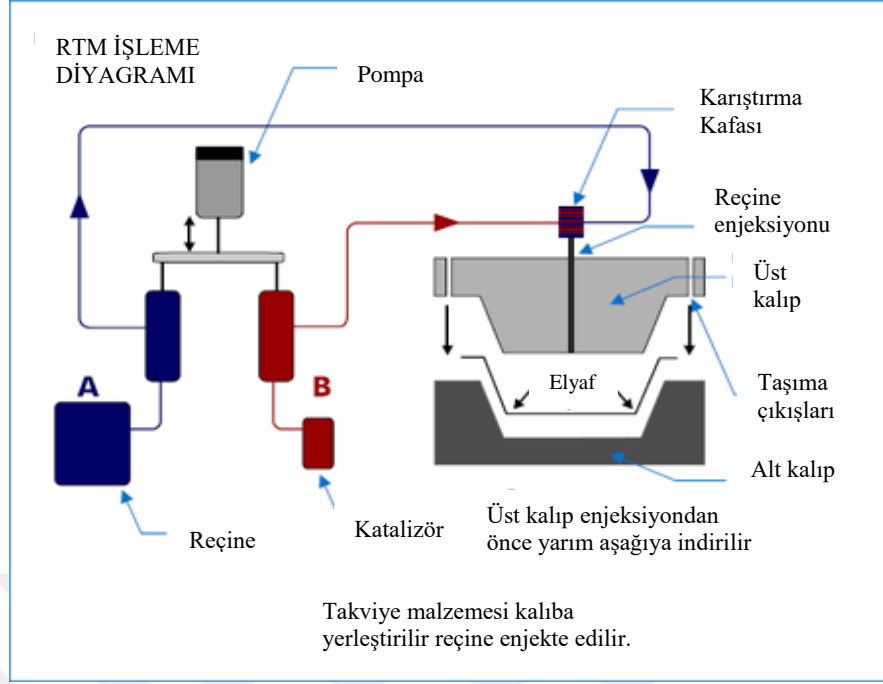
Özel biçimli ürünlerin seri üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Elyaf sarma yöntemi sürekli elyaf liflerinin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılmasıdır. Sürekli liflerin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklerde ürünler elde edilebilir. Yeterli sayıda elyaf katının sarılmasından sonra ürün sertleşir. Ardından döner kalıp ayrılır. Bu yöntemle yapılan ürünler genellikle silindirik borular, araba şaftları, su tankları, yat direkleri, dairesel basınç tanklarıdır (Arıcasoy 2006).



Şekil 3.5. Elyaf Sarma yöntemi (Eker 2011)

### 3.3.1.5. Reçine Transfer Kalıplama (RTM / Reçine Enjeksiyonu)

Hızlı ve uzun ömürlü olan reçine transfer kalıplama yöntemi için iki parçalı kalıp kullanmak gereklidir. Bu yöntem ile her iki yüzeyi düzgün ürünler elde edilebilirler. Takviye malzemesi kuru olarak keçe, kumaş veya ikisinin kombinasyonu kullanılabilir. Bu yöntemde takviye malzemesi önceden kalıp boşluğu doldurulacak şekilde galiba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Matris içinde geç çözünen reçineler elyafın sürüklenmesi önlenir. Reçine basınç altında kalıba pompalanır. Bu süreç daha fazla zaman ister. Matris enjeksiyonu soğuk, ılık veya en çok 80°C'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir.



Şekil 3.6. RTM yöntemi (Türkmen 2010)

### 3.3.1.6. Basınçla Kalıplama (Compression Molding)

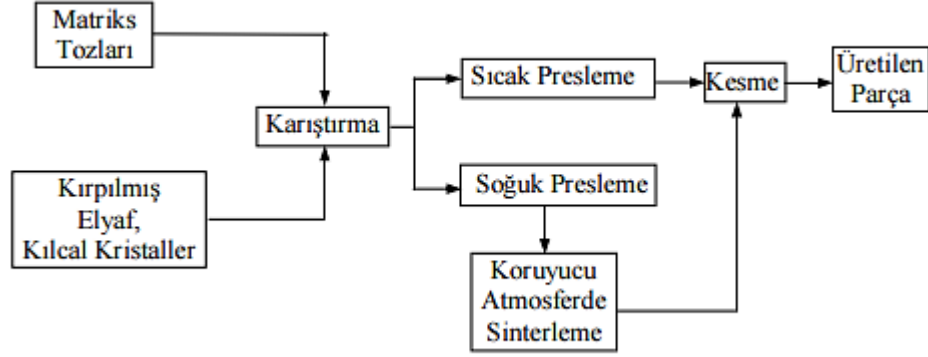
Hazır kalıplama bünyesinde cam elyafı, reçine, katkı ve dolgu malzemeleri içeren kalıplamaya hazır, hazır kalıplama bileşimi denen kompozit malzemeler sıcak pres kalıplarla ürün haline gelmektedir. Basın altında üretimin gerçekleşmesi nedeniyle karmaşık şekilli ve delikli yapıların elde edilmesi mümkündür. Iskarta oranı oldukça düşüktür. Bu yöntemde iki yüzeyde kalıp ile şekillenmektedir.

### 3.3.2. Metal Matrisli Kompozit Üretim Yöntemleri

#### 3.3.2.1. Sıcak presleme yöntemi

Elyaf düzenlerinin korunması için metal folyeler arasında yerleştirilir. 80-170°C sıcaklık ve 0,5-15 MPa basınç altında presleme yapılır. Presleme sırasında bağlayıcı madde püskürtülür. Basınç değeri kompozitin boyutlarına sıcaklık değeri ise reçine sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Saatlik üretim hızı 15-30 adet ürün arasında değişmektedir. Bu yöntemde kullanılan matrisler Alüminyum, Magnezyum, Titanyum ve alaşımlarıdır.

### 3.3.2.2. Toz metalürjisi yöntemi



Şekil 3.7. Toz metalürjisi yöntemi üretim şeması (Aktaş 2010).

Bu yöntemle üretim şemasından da görülebileceği gibi metal veya seramik matris tozları kırpılmış elyaf veya kılcal kristaller ile karıştırılır. Karışım sıcak veya soğuk preslenir. Eğer karışım soğuk pres altında uygulanacaksa koruyucu atmosferde bulunan toz parçaları arasındaki fiziksel bağları kimyasal bağlara çevirmek amacıyla sinterleme yapılır. Tozların sinterlenmesi sırasında elyaf ve takviye elemanın özellikleri bozulabileceğinden karışım uzun süre ısıtılmamalıdır. Presleme sonrası bitirme işlemleri yapılır. Matris olarak bakır, nikel, kobalt, alüminyum ve çelik, elyaf olarak kırpılmış elyaf, kılcal kristaller ve metal tozları kullanılır.

### 3.3.2.3. Sıvı metal emdirme yöntemi

Ergime noktası metallerle için uygun bir üretim yöntemi olduğundan dolayı ağırlıklı olarak alüminyum, magnezyum, gümüş ve bakır gibi metal matrisli kompozitler üretilir. Seri üretim için uygun olan bu yöntem ile % 45 elyaf hacim oranına sahip kompozit malzeme üretilebilir.

### 3.3.2.4. Elektroliz yöntemi

Elektroliz ile üretim katot olarak kullanılan mandrel üzerinde bulunan elyaflara elektroliz sırasında metal matris çökertilmesi işlemidir. Daha sonra elyaflar pres altında

birleştirilir. Bu yöntem ile yüksek elyaf hacim oranına sahip kompozit malzemeler üretilebilir.

### 3.3.2.5. Buhar çökeltme yöntemi

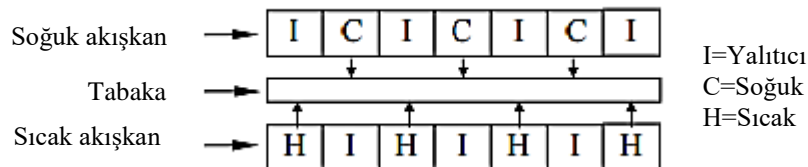
Buhar çökeltme yöntemi ile kompozit üretiminde buharlaştırılan matris malzeme takviye elemanı üzerine çökeltilerek kaplanır ve ardından presleme işlemi gerçekleşir. Bu yöntem sıcaklıklarda üretim olanağı sağlarken oldukça pahalıdır.

### 3.3.2.6. Haddeme yöntemi

Sürekli şerit halinde üretim yöntemidir. Elyaf ile metal folyeler birlikte basınç altında haddelenerek birleştirilir. Oksitlenmeyi önlemek amacıyla işlem vakum altında yapılabilir.

### 3.3.3. Yüksek Performanslı Kompozit Üretimi

Yüksek performanslı kompozit malzeme üretiminde amaç matris malzemesi, takviye fiberleri veya partikülleri iyi ıslatabilmek, iyi bir ara yüzey bağı oluşturmak, mümkün olan en basınç ve sıcaklıkta hızlı şekilde katılaşma yapabilmektir Normal şartlarda altı saatte yapılabilecek bir üretim bu metotla bir saatte yapılabilmektedir. Parça üzerine sıcak akışkan gönderilerek parçanın ısıl işlem için hazırlanması sağlanmaktadır. Akışkan olarak genellikle su ve yağ kullanılır. Biri yüksek diğeri basınca sahip iki kalıpta üretim yapılmaktadır. Yüksek basınca sahip üst kalıbın iç kısmında ısıl işlem sırasında alt basınç odasındaki parçanın üzerini saracak esnek bir membran bulunur. Bu metotla çok kalın numuneler bile üniform bir yapıya sahip olacak şekilde ısıl işleme tabi tutulabilir.



Şekil 3.8. Yüksek performanslı kompozit üretim şeması (Aktaş 2010).

Yüksek Performanslı kompozit üretimi aşağıdaki aşamalar sırasıyla takip edilerek yapılır (Aktaş 2010).

- Yüksek performanslı kompozit malzeme üretiminde parça ilk olarak basınca sahip alt kalıpta bekletilir. Ardından yüksek basınç odası (üst kalıp), içerisinde parça bulunan alt kalıp üzerine konulur.
- 25-40°C arasındaki soğuk akışkan yüksek basınç odasına basınçta gönderilir. Bunun nedeni yüksek basınç odasında bulunan membranın parçayı tam olarak sarmasıdır.
- Viskoziteye sahip orta sıcaklıktaki akışkan (70-100°C) parçanın çevresini dolaşacak şekilde yaklaşık beş dakika her iki arasına gönderilir.
- Isıl işlem sıcaklığındaki akışkan reçine sıcaklığına ulaşıncaya kadar yaklaşık 10-30 dakika arasında kalıp içerisinde dolaştırılır. Daha sonra bu akışkan kalıptan çekilir.
- Sırasıyla kalıplardan orta sıcaklıktaki akışkan ve soğuk akışkan çekilir ve üretimi yapılan parça kalıptan çıkarılır.

Yukarıda belirtildiği üzere kompozit üretmenin istenilen koşullar çerçevesinde bir çok çeşidi vardır ve birbirlerine göre farklı avantajlara sahiptirler (Çizelge 3.3).

**Çizelge 3.3.** Kompozit üretim yöntemlerinin bazı açılardan karşılaştırılması, 10: en büyük değer, 1: en küçük değer (Lubin 1982).

Yöntem	Ekipman Maliyeti	Üretim hızı	İşçiliğin Önemi	Parçanın karmaşıklığı	Tekrar Üretilebilirliği
El yatırması	1	3	10	9	1
Vakumlu torba	2	2	10	9	3
Püskürtme yöntemi	4	4	10	8	1
Elyaf sarma yöntemi	6	6	2	4	9
Pulrüzyon	7	9	2	2	10
SMC	10	8	4	9	10
Merkezkaç döküm	9	7	3	3	6
Sürekli laminasyon	10	10	2	1	10
Enjeksiyon	10	10	2	10	10

### 3.4. Kompozit Malzemelerin Temel Bileşenleri

Bir kompozit malzeme, fiberlerle (elyaf) takviye edilmiş matris malzemelerden meydana gelir. Bir kompozit malzemenin davranışını anlamak için kompozit malzemedeki fiberlerin ve matris malzemelerin görevlerinin bilinmesi gerekir. Fiberlerin ve matris malzemelerin önemli görevleri aşağıda verilmiştir.

Kompozit malzeme içerisinde matrislerin görevleri aşağıda verilmiştir (Toğuşoğlu 2011).

- Matris malzeme fiberleri bir arada tutar, böylece fiberlerin bireysel hareket etmesine engel olur.
- Kompozit malzeme üzerine gelen dinamik ve statik yükleri fiberlere transfer eder.
- Matris malzeme kompozit malzemenin şeklini verir ayrıca malzemenin katı durmasını sağlar.
- Matris malzeme, çevresel faktörlerin vermiş olduğu kimyasal ve fiziksel zararlara karşı kompozit malzemeyi korur.

Bir kompozit malzemedeki fiberlerin görevleri aşağıda verilmiştir (Toğuşoğlu 2011).

- Bir kompozit malzemeye uygulanan kuvvetin yükünün çoğunu fiberler taşır.
- Fiberler, yüksek elastik modülü, sertlik ve yüksek sıcaklıktaki dayanımları ve diğer yapısal özellikleriyle kompozit malzemeyi kararlı kılar.
- Kompozit içerisinde kullanılan fiber malzeme kompozit malzemenin elektrik iletkenliği ya da yalıtım özelliklerini belirler.

#### 3.4.1. Matris Malzemeleri

Fiber malzemelerini kaplayıp dışarıdan gelebilecek nem, ısı, kimyevi vb. çevresel etkilere karşı fiberleri koruyan matris malzeme, kompozit malzeme yapısında birçok fonksiyonu yerine getirir. Bunların birçoğu, yapının yeterli performans değerleri için çok önemlidir.

Polimer matrisli kompozit malzemelerde matris malzemesi polimerlerdir. Kompozitlerde kullanılan plastik matrisler, termoset ve termoplastik olmak üzere ikiye ayrılır. Aşağıda bu malzemelerin özellikleri incelenecektir.

#### **3.4.1.1. Termoset Matrisler**

Polimer matrisli kompozitlerde, matris malzemesi için en çok kullanılan malzeme termoset esaslı malzemelerdir. Bu malzemelerin üretiminde bir defaya mahsus ısıtılıp biçim verilir, bundan sonra malzemeye tekrar ısı verilir ve şekil elde edilemezler. Bunun nedeni termoset matrisli malzemelerin molekülleri birbirlerine çapraz bağlıdır. Böyle olunca bu moleküller ısıtıldığında atomlar birbirlerinin üzerine kaymazlar. Ayrıca bu malzemeler çözünmezler. Termoset plastikler mukavemeti ve sıcaklığa karşı dayanımları yönünden termoplastiklerden daha üstündür fakat geri dönüşümleri olmadığından ve ısıtma soğutma esnasında kimyasal değişimlere uğramadığından termoplastik malzemeler gelişen üretim teknikleri ve ihtiyaçlar doğrultusunda termoset malzemelerin yerini almaktadır.

Termoset grubunu oluşturan ve en çok kullanılan plastikler şunlardır:  
Epoksiler, polyesterler, vinylester ve fenolik reçine matrislerdir.

#### **3.4.1.2. Termoplastik Matrisler**

Termoplastik matrisler termoset plastik matrislerin aksine geri dönüşüm özelliği olan malzemelerdir. Termoplastik malzemeler üretimin sonunda da sıcaklık değerlerinde değişiklik yapılarak tekrar şekil verilebilir hale getirilebilir. Sıcaklık değerlerinde meydana gelen değişiklik sonucunda termoplastik matrislerin sadece fiziksel özellikleri değişir, kimyasal özelliklerinde bir değişiklik olmaz. Bunun sebebi termoplastik malzemelerin molekülleri düz zincirli polimerlerdir. Bundan dolayı termoplastik matris malzeme ısıtıldığında yapısındaki atomlar birbirlerinin üzerine kayarlar.

Termoplastik grubunu oluşturan ve en çok kullanılan plastikler şunlardır:

Akrilik, asetal, Akronitril-Butadiene-Styren (ABS), politetra florotilen (PTFE), poliamid (PA), polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinil klorür (PVC).



### 3.4.2. Kompozit Malzemelerde Takviye Elemanları

Kompozit yapının temel mukavemet elemanı olan fiberler yoğunluklarının yanı sıra yüksek sertliğe ve yüksek elastisite modülüne sahiptir. Fiber malzemeler kimyasal reaksiyonlara karşı da oldukça dirençlidir. Takviye elemanı olarak kullanılan elyaflar cam, karbon, aramid ve bor elyaflarıdır.

Son yıllarda kompozit yapılara duyulan ilgi oldukça artmış durumdadır. Bu yapılarda kullanılan en önemli takviye malzemeleri sürekli elyaflardır. Bu elyaflar özellikle modern kompozitlerin oluşturulmasında önemli bir yer tutarlar. Cam elyaflar kompozit teknolojide kullanılan en eski elyaf türleridir. Son yıllarda kompozit yapılardan beklenen mekanik değerler ve gelişen teknoloji bu yapıların temel bileşenlerinden olan fiberlerin geliştirilmesine neden olmuştur. Bunun sonucu olarak bor, karbon, silisyum karbür ve aramid elyaflar geliştirilen elyaf tipleridir. Elyafların ince çaplı olarak üretilmeleri ile büyük kütleli yapılara oranla yapısal hata olasılıkları en aza indirilmiştir. Bu nedenle üstün mekanik özellikler gösterirler. Ayrıca, elyafların yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olmalarının nedenleri aşağıda verilen özelliklere de bağlıdır (Asi 2008).

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

Kompozit malzemelerde kullanılan başlıca elyaf türleri aşağıda açıklanmıştır.

#### 3.4.2.1. Cam Elyaflar

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler arasında en fazla tercih edilen cam elyaflar, amorf bir malzeme olup polimer yapıya sahiptir. Cam elyaflar sıradan şişelerin kullanımından saflık oranı yüksek malzemelere kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Cam elyafların sıklıkla tercih edilme sebepleri aşağıda verilmiştir.

- Çekme mukavemeti ve özgül mukavemeti çeliğe göre oldukça yüksektir.

- Isıl dirençleri düşüktür. Yanmazlar, ancak yüksek sıcaklıkta yumuşarlar.
- Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler.
- Nem absorbe etme özellikleri yoktur, ancak cam elyafı kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir çözülme olabilir. Özel elyaf kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabilir.
- Elektriği iletmezler. Bu özellik sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda cam elyafı kompozitlerin kullanılmasına imkân tanır.

#### **3.4.2.2. Bor Elyafı**

Bor elyafı aslında kendi içlerinde kompozit yapıdadır. Çekirdek olarak adlandırılan ince bir flamanın üzerine bor kaplanarak imal edilirler. Bunun sebebi borun oldukça sert ve gevrek bir iç yapıya sahip olmasıdır. Çekirdek genellikle tungstendir. Karbon çekirdek de kullanılabilir ancak bu yeni bir uygulamadır. Bor lifler kompozit malzemelerde kullanılan en kalın elyaf türü olup, karbon elyafından yaklaşık 20 kat daha kalındır. Burkulma, çekme ve basma dayanımları yüksektir. Genellikle metal matrislerde kullanılır (Aran 1990).

#### **3.4.2.3. Karbon Elyafı**

Karbon,  $2.268 \text{ gr/cm}^3$  yoğunluğa sahip kristal yapıda bir malzemedir. Karbon elyafı cam elyafından daha sonra gelişen ve çok yaygın olarak kullanılan bir elyaf grubudur. Genellikle epoksi reçine ve polyester reçineler ile yaygın olarak kullanılan karbon elyafının en önemli özellikleri yoğunluğun yanı sıra yüksek tokluk değerine sahiptir. Karbon elyafı, nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Çeliğe göre mukavemeti yüksek olup, aşırı katıdır. Bu nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında, otomotiv endüstrisinde ve spor aletlerinde yaygın bir kullanım alanına sahiptirler.

Karbon elyafının takviye elemanı olarak kullanılması grafit kristalinin karakteristik özelliğinden dolayıdır. Karbon grafit kristalinin kristal kafes düzlemi altıgen hegzagonal katlı bir yapıda olup, köşe karbon atomları kovalent bağlı yapıya sahiptir. Katlar ise van der Waals bağlarıyla bağlanmıştır.

#### 3.4.2.4. Aramid Elyaf lar

Aramid "aromatik poliamid" in kısaltılmış adıdır. Poliamidler uzun zincirli polimerlerdir, aramidin moleküler yapısında altı karbon atomu birbirine hidrojen atomu ile bağlanmışlardır. Bugün uçak sanayisinde, yüksek performanslı kayış ve halat yapımında, yüksek basınca dayanıklı boruların yapımında, yüksek performanslı radyal tekerleklerin yapımında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Aramid elyafın sıklıkla tercih edilme sebepleri ve dezavantajları aşağıda verilmiştir.

- Aramid grafit elyaflarda olduğu elyaf eksenini doğrultusunda çok iyi mekanik özellik sergilerken elyaflara dik doğrultuda mekanik değerlere sahiptir.
- Aramid elyaflar ağırlık, yüksek çekme mukavemeti ve düşük maliyet özelliklerine sahiptir.
- Darbe direnci yüksektir, gevrekliği grafitin gevrekliğinin yarısı kadardır. Bu nedenle kolay şekil verilebilir.
- Doğal kimyasallara dirençlidir ancak asit ve alkalilerden etkilenir.

#### 3.4.2.5. Yüksek Sıcaklık Elyaf ları

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiC gibi seramik malzemelerden elde edilen elyaf türleridir. Bu elyafların oksidasyon direnci de yüksektir. Özellikle SiC elyaf metal matrisler için dayanım ve fiyat bakımından en uygun elyaf türüdür. Yüksek sıcaklık elyafları yüksek çekme mukavemetlerine sahip değildir ancak basma mukavemetleri yüksektir. Örneğin, alümina/epoksi kompozitlerin basma mukavemetleri 2275 ile 2413 MPa'dır (Chawla 1987).

## 4. TERMOPLASTİK KOMPOZİTLER

Isıtılarak şekillendirilebilen termoplastik malzemeler, soğutulmaları sonucunda şeklini korur. Bu plastikler, özelliklerinde önemli değişiklik olmadan defalarca ısıtılabilir ve yeni şekillere sokulabilir. Bu işlem sırasında hiçbir kimyasal değişikliğe uğramazlar. Isı ve basınç altındayken yumuşarlar ve soğutulduktan sonra sertleşirler. Uygun çözücülerde çözünebilirler ve bu şekilde kalıplanarak çeşitli şekiller alabilirler. Termoplastik malzemeler birbirine genellikle çok uzun karbon atomları ile bağlıdır. Asılı atomlar ve atom grupları bu ana zincir atomlarına ortaklaşa bağlanırlar. Termoplastik polimerlerdeki uzun molekül zincirleri birbirine ikincil bağlarla bağlanır. Bu molekül zincirleri doğrusaldır ve çapraz bağlanamazlar.

Termoplastik kompozit malzemelerin mühendislik uygulamalarındaki en önemli özelliklerinden biri nispeten düşük yoğunluğa sahip olmalarıdır. Örneğin demirin yoğunluğunun  $7,8 \text{ gr/cm}^3$  olmasına karşın termoplastik matris malzemelerin yoğunlukları  $1-1,5 \text{ gr/cm}^3$  civarındadır. Termoplastik malzemeler sıvı halde yüksek viskoziteye sahiptirler. Bu nedenle termoset malzemelere oranla ara yüzey bağı daha zordur.

Bu gruba giren plastikler;

- a) Asetol reçineler (şaft yatağı)
- b) Akrilikler (polimetik metakrilat) ışıklı reklamlarda
- c) Selilozik (seliloz asetat) ışıklı reklamlarda
- d) Florokarbon (polutetro floroetilen) teflon tava
- e) İzosiyonatlar (Poliüretan) ısı izolasyonunda
- f) Poliamidler (nylon) ip imalinde, çorap çamaşır
- g) Poliefinler (polietilen-polipropilen) nylon torba, meşrubat kasası
- h) Stiren (polistren) okul gereçleri, yoğurt kabı
- i) Vinil (poli vinil klorür, P.V.C.)
- j) Polikarbonat (trafik ışıkları)

### 4.1. Termoplastik Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Plastik malzemelerin nispeten düşük çekme dayanımları bazı mühendislik uygulamalarında istenmeyen bir özelliktir. Fakat takviye malzemeleri ile kompozit elde

edilen sonucunda özgül çekme dayanımları oldukça yüksektir. Ayrıca plastik malzemeler iyi bir elektrik yalıtkanındır. Bu özelliklerinden dolayı termoplastik malzemelerin dielektrik dayanımları, elektrik yalıtım dirençleridir (Baydar 2012).

Termoplastik malzemeler mühendislik ve genel amaçlı olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de bu malzemelerin mekanik özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Genel Amaçlı Plastiklerin Bazı Özellikleri (Smith 2012).

Malzeme	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme Dayanımı (MPa)	Darbe Dayanımı (izod, J/m)
Polietilen (düşük yoğunluk)	0.92-0.93	6.2-17.2	
Polietilen (yüksek yoğunluk)	0.95-0.96	20-37.2	21.35-747.3
Bükülmez PVC	1.49-1.58	51.7-62.1	53.38-298.9
Genel maksatlı PP	0.90-0.91	33-38	21.35-117.4
Stiren akrilonitril (SAN)	1.08	69-82.8	21.35-26.69
Genel maksatlı (ABS)	1.05-1.07	40.7	320.28
Genel maksatlı akrilik	1.11-1.19	75.9	122.7
Selüloz, asetat	1.2-1.3	20.7-55.2	133.45-213.52
Plitetrafloretillen	2.1-2.3	6.9-27.6	64.05-362.98

**Çizelge 4.2.** Mühendislik Amaçlı Plastiklerin Bazı Özellikleri (Smith 2012).

Malzeme	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme Dayanımı (MPa)	Farbe Dayanımı (izod, J/m)
Naylon 6.6	1.13-1.15	62.1.-82.8	106.76
Poliasetat	1.42	69	74.73
Polikarbonat	1.2	62.1	640.56-854.08
Polyester (PET)	1.37	71.7	42.7
Polyester (PBT)	1.31	55.2-56.5	64.05-69.39
Polifenilen oksit	1.06-1.10	53.8-66.2	266.9
Polisülfon	1.24	70.3	64.05
Poliefenilen sülfür	1.34	69	16.01

Plastik malzemelerin çok yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemeler değildir. Erime sıcaklıkları genel olarak 50-170°C arasında değişmektedir. Buna rağmen bazı termoplastik malzemeler daha yüksek sıcaklıklara kadar örneğin polieter eter keton 390°C'ye kadar dayanabilmektedir. Termoplastik reçineler erime ve ısıl işlem sıcaklıkları Çizelge 4,3'te gösterilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Termoplastik reçineler erime ve işlem sıcaklıkları (Eker 2011)

Malzeme	Erime Sıcaklığı Aralığı (°C)	Maksimum İşlem Sıcaklığı (°C)
PP	160-190	110
PA	220-270	170
PES- Poli Eten Sülfon	-	180
PEI-polieterimid	-	170
PAI- Poliamid imide	-	230
PPS- Polfenilen Sülfid	290-340	240
PEEK-Polieter Eter Keton	350-390	250

#### 4.2. Termoplastik Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Termoplastik kompozit malzemeler otomotiv ve uçak sanayi başta olmak üzere birçok endüstriyel alanda termoset kompozit malzemeler yerine tercih edilmektedir. Günümüz endüstrisinde sıklıkla kullanılan termoplastik kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları aşağıda verilmiştir.

Termoplastik kompozit malzemelerin avantajları;

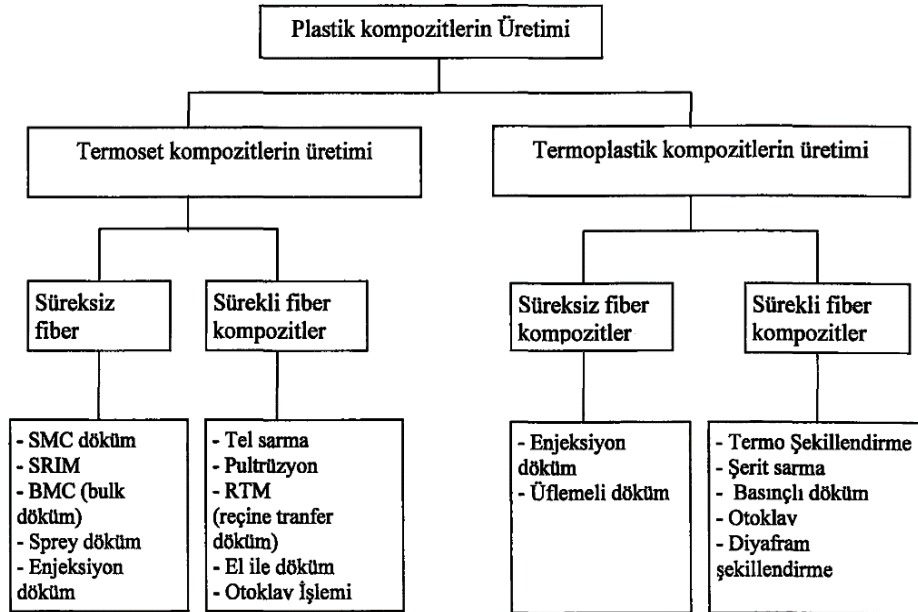
- Termoplastik malzemeler yüksek özgül mukavemet değerlerine sahip ve geri dönüşebilir olması
- Yüksek sıcaklıklarda biçim ve şekil verme esnekliği
- Proses süreci genelde çok kısa olması
- Proses sırasında kimyasal bir reaksiyon olmaması bu nedenle yüksek hacimli üretim metotları için kullanılabilir olması
- Yüksek tokluk ve darbe dayanımları

Termoplastik kompozit malzemelerin dezavantajları;

- Termoplastik kompozitlerin üretiminde ısı ve basınç uygulamak için nitelikli donanım gerekmektedir. Ayrıca sıcaklık ve basınç uygulamak için gerekli teçhizata ihtiyaç vardır.
- Termoplastik kompozit malzemelerde elyaf termoset kompozit malzemelere oranla daha zor ıslanmaktadır. Bu durumda meydana gelebilecek mekanik özellik kaybını önlemek için farklı ıslatma yöntemleri uygulanmalıdır.

### 4.3. Termoplastik Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Yüksek performanslı termoplastik kompozit üretimi ile ilgili son yıllarda önemli çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle uçak ve otomotiv sanayi başta olmak üzere endüstriyel alanda kullanımı giderek artmaktadır. Geliştirilen üretim teknikleri termoplastiklerin daha kolay işlenmesi ve şekil değiştirilmesine katkı sağlamıştır. Ayrıca eritilmiş termoplastiklerin kabiliyetleri yeni üretim teknolojisinin gelişmesine sebep olmuştur. Üretim esnasında termoplastik tabakalarda oluşan boşluklar ve ara yüzeylerinde meydana gelen hatalar ise yüksek sıcaklıklarda yeniden birleştirme ile ortadan kaldırılmaktadır.



Şekil 4.1. Plastik kompozit malzemelerin işleme tekniklerini sınıflandırılması (Türkmen 2010)

Bu bölümde termoplastik kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ile ilgili bilgi verilmiştir.

#### **4.3.1. Fiberlerin İşlenmesi**

Kompozit malzemelerde fiber ile reçine ara yüzeyi arasındaki ıslatma çok önemlidir. Gerçekte çoğu termoplastik fiber ile birleştirilmeden önce polimerizasyon gerçekleşir, nispeten soy hale getirilen fiber ile matris arasında iyi bir birleşmenin başarılması genellikle zordur.

Fiber takviyeleri üzerine yapılan literatürdeki çalışmaların çoğu termosetler üzerinedir. Buna karşın son zamanlarda termoplastik kompozitler için fiber takviye edilmesi yöntemleri oldukça gelişmiştir. Kompozit üretiminde kullanılacak termoplastik malzemenin çeşidi fiberin çeşidini belirler. Kullanılacak fiber termoplastik için uyumlu değilse ıslatma problemlerine neden olur ve kompozitin mekanik değerlerinde düşüş meydana gelir.

Uygulamanın boyutlandırılması ve uygun bağlama boyutu için reaktif yerlerdeki fiberlerin temizliğine, dağlanmasına ve oksitlenmenin önlenmesi önemlidir (Muzzy 1988). Bu operasyonlar fiberlerin (elle) işlenmesini azaltmak için fiber veya pre-preg şeklinde aynı zamanda tamamlanır. Bir boyutlandırmanın uygulanabilmesi; uçucu olmamasına, kolay uygulanabilmesine, matris ile uyumuna ve termal olarak kararlılığına bağlıdır. Termoplastik malzemeler yüksek işleme sıcaklıklarına sahiptir. Bu nedenle boyutlandırma esnasında meydana gelen bozulmalar önemli bir problemdir. 400 °C yakın sıcaklıkta plastiklerin hiç biri bozulmaya karşı koyamaz.

#### **4.3.2. Fiber ile Matrisin Birleşimi**

Termoplastik matris ile fiberlerin birleşiminde birçok teknik kullanılmaktadır. Bunlar eriterek kaplama, film yığma tekniği, toz ile kaplama ve fiber hibritleşme yöntemidir.

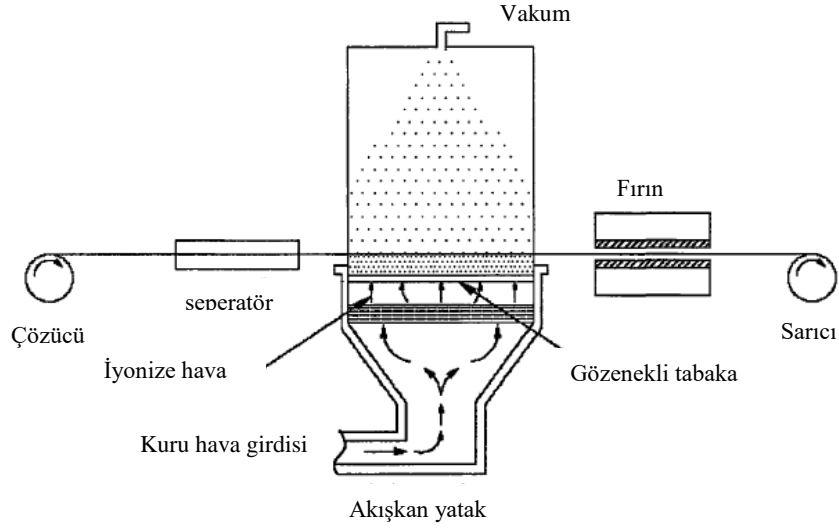


#### **4.3.2.1. Eriterek Kaplama**

Eriterek kaplama, fiber ile matris birleşiminde yaygın kullanımı olan bir yöntemdir. Başlangıçta fiber çekilerek burma makaradan çözülür ve daha iyi yönlendirebilme yapmak için taraktan geçirilir. Fiberler sonra bir makara veya hava jetine maruz bırakılarak çok sayıdaki fiberi mümkün olan polimere yaymak ve pre-preg malzemedeki boşlukları en aza indirmektir. Erimiş polimer kalıp içine ya ilave edilerek ya da reçine kalıplama gibi kâğıt üzerine döşenerek fiberler kalıp içinde beslenir ve sonra kaldırılır. Bu aşamada sadece fiber demetlerine ve fiberlere tek tek kaplama yapılması için eriyik üstüne basınç uygulanır. Basıncın önemi fiberlerin tamamen emdirilmesi için gereklidir. Kalıp çıkışında sıcak şerit soğutulur ve sarılır. Bu yöntem ile üretilen kompozitlerde istenilen ıslatma elde edilir. Bu yöntem yüksek erime sıcaklığına sahip polimerler için uygun değildir.

#### **4.3.2.2. Toz Kaplama**

Toz kaplama yöntemi eriterek kaplama yönteminin aksine yüksek erime viskozitesine ve düşük çözünürlüğe sahip polimerlerin üretimi için de sürekli ve sık tercih edilen bir yöntemdir. İnce toz formundaki polimer ( genelde 2-50  $\mu\text{m}$  çapta, ancak 90, 110, 240  $\mu\text{m}$  de olabilir) yüklenir. Sıvılaştırılan toz, sıvılaştırılmış bir yataktan geçen fiberlerde elektrostatik bir yöntemle çökertilir. Sıvılaştırılmış yataktan çıkmakta olan kaplanmış fiberler hemen haddelenebilir veya polimerin fiber üzerinde eridiği bir fırına verilir ve soğutulup haddelenir. Elde edilen ürün iyi kıvrımlara sahip ve bağlayıcı kullanılması durumunda iyi bir birleşme olur. Eğer kaplanmış fiberler ısıtma ve eritme prosesine girmezse fiberlere daha az yoğun gerilme empoze edilir, ancak ileri tutuş esnasında tozun fiberlerden ayrılmamasına dikkat edilmelidir. Toz ayrılmasından kaçınmak için tutuş öncesi veya biriktirmeden (toplama) önce pre-preg üzerine su püskürtülebilir.



**Şekil 4.2.** Toz kaplama yöntemi (Muzzy 1988).

#### 4.3.2.3. Film Yığıma

Film istifleme yönteminde matris materyali film formunda takviye materyali ise lif veya formundadır. İstenilen son ürün kalınlığına göre en alt ve en üst tabaka matris materyali olacak şekilde matris ve takviye materyali istiflenir. Üretim sırasında uygulanan sıcaklık ve basınç etkisiyle erime noktası daha düşük olan film eriyerek matris görevi görürken, kısmen yumuşayan tekstil materyali ise takviye materyali görevi görmektedir (Matabola 2009).

#### 4.2.2.4. Fiber Hibritleştirme

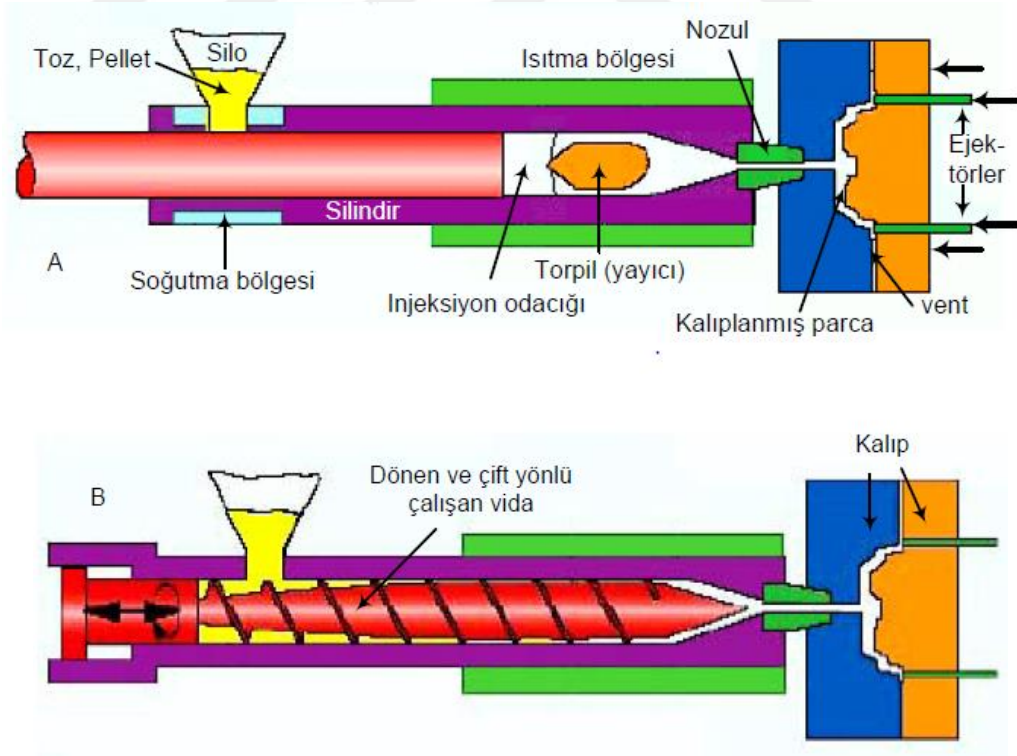
Termoplastik matris ile fiberin birleştirme yöntemlerinden biriside fiber hibritleştirmedir. Toz kaplamada teknolojisinde olduğu gibi, yüksek ergime viskozitesi ve düşük çözünürlüğe sahip polimer kullanılması uygundur. Bu yöntem fiber destekli bir tel ile termoplastik bir malzemeden bükülmüş bir telin birleştirilmesinden ibarettir. Birleştirme sırasında çok karmaşık yapılar dizayn edilebilir. Isı ve basınç altında termoplastik telin erimesi sonucunda fiberler ıslanır. Yoğun fiber ağının iyi ıslatılmasını sağlamak için karışık örülmüş örgülerde birleşik yönlü termoplastik pre-preglere nazaran daha uzun işlem süresi ve/veya daha yüksek sıcaklık ve basınç gerekir.

### 4.3.3. Şekillendirme Teknikleri

Termoplastik kompozitlerin ve termoplastik matris malzemelerin şekillendirilmesi endüstriyel alanda büyük bir öneme sahiptir. Üretilen kompozit malzemelerin farklı alanlarda kullanılması farklı şekillendirme yöntemlerinin gelişmesine neden olmuştur. Şekillendirme iki boyutlu tabakanın üç boyutlu hale gelmesidir. Fiziksel olarak değişime uğrayan malzemelerin mekanik ve kimyasal özelliklerini koruyarak değişime uğramaları amaçlanmaktadır.

#### 4.3.3.1. Enjeksiyon Kalıplama

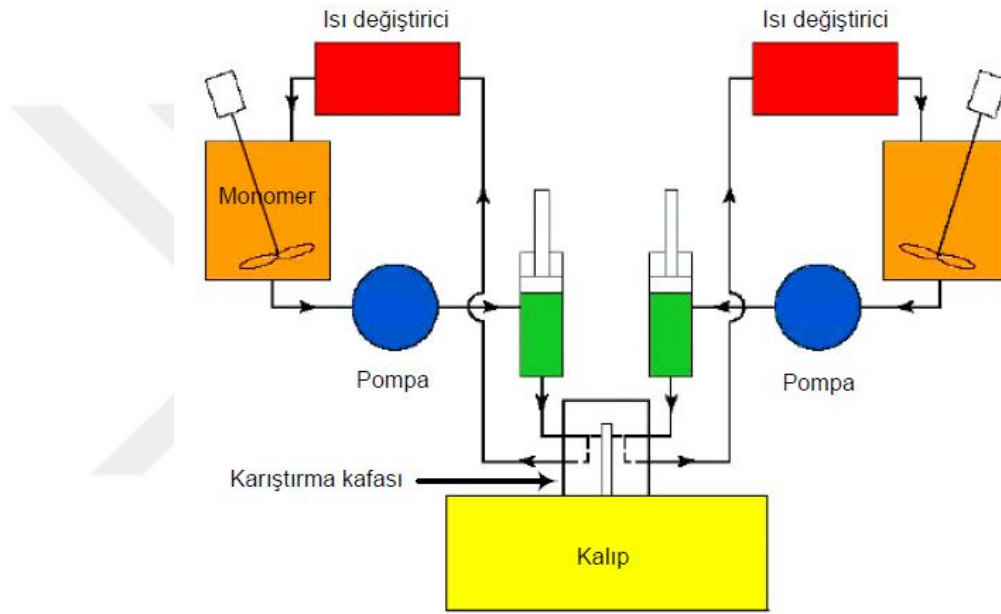
Enjeksiyon kalıplama tekniği, termoplastik malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılan en önemli prosestir; bazı modifikasyonlarla termoset plastikler de işlenebilmektedir. Plastik malzeme, yüksek basınçla bir kalıp içine enjekte edilir; kalıp, elde edilmek istenen şeklin negatiftir. Bu yöntemle kalıplanan malzemeler arasında PS, ABS, naylon, PP ve PVC sayılabilir.



Şekil 4.3. Enjeksiyon kalıplama sistemleri: A, Plunger (dalma pistonlu) tip. B, Reciprotating (ileri-geri çalışmalı) vidalı tip (Beşergil 2012)

### 4.3.3.2. Reaksiyon Enjeksiyon kalıplama

RIM prosesi poliüretan, epoksi ve diğer benzer sıvı kimyasal sistemlere uygulanan bir şekillendirme yöntemidir. Reaksiyon enjeksiyon kalıplama yönteminde 2 farklı yapıda sıvı bileşen kullanılır. Bu iki sıvı ayrı ayrı depolardan yaklaşık 1500- 3000 Psi arasında bir basınçla karışma odasına gelir. Yüksek bir hızda yoğun bir şekilde karışır. Karışma odasından karışım yaklaşık atmosfer basıncında kalıba içine akar. Bu yöntemle yüksek mukavemetli ve düşük yoğunluklu parçalar üretilebilir.



Şekil 4.4. Reaksiyon enjeksiyon kalıplama prosesi (RIM) (Beşergil 2012)

### 4.3.3.3. Kaplama

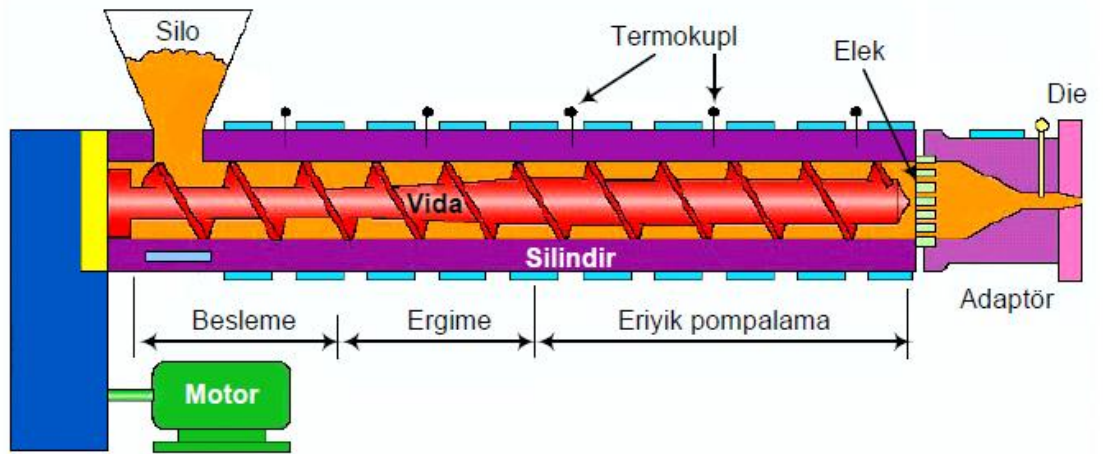
Ekstruderden üretilen plastik film veya levha kaplanacak malzeme hızlı bir şekilde örtüldükten sonra kompozit levha haddelenir. Böylece tam bir yapışma olur hem de tabak kalınlığı ayarlanmış olur. Önemli bir kaplama metodu tellerin üzerlerinin kaplanmasıdır. Özellikle elektrik teli üretiminde yüzeyi temizlenmiş ve ısıtılmış tel ekstruderden beslenen kalıba girer. Kaplama hızı tel çapına bağlı olarak 1-1000 m/dk. arasındadır.

#### 4.3.3.4. Ekstrüzyon

Kovanlara yerleştirilen malzemenin bir ıstampa yardımıyla basınç altında, belirli profillere sahip matrisler içerisinde geçirilerek şekillendirilmesine ekstrüzyon adı verilir. Termoplastiklerin şekillendirmesinde genellikle bir ekstruder kullanılır; plastik tüpler, borular, çubuklar, levha ve filmler üretilir.

Ekstrüzyon sürekli veya yarı sürekli yapılabilir. Bazı malzemelere sıcak çekme uygulanırken, bazılarında soğuk çekme uygulanır. Soğuk çekme, örneğin kuvvetli naylon filamentlerin üretilmesinde çok uygulanan bir tekniktir. Amorf düzendeki polimerik zincirler, soğuk çekme sonucu kristal bir düzenlenmeye girerek kuvvetli bir yapı kazanırlar.

Ekstruder çeşitli bölümleri olan bir işleme makinesidir. Üretim malzemesi bir odada ısıtılır ve yumuşama sağlanır. Sonsuz bir vida sistemiyle homojenleşme sağlanır ve ekstruder çıkışına bağlanmış bir kalıba basılır. Bu sistemde farklı ısı bölgeleri, ısı kontrol panelleri, filtre veya süzgeç gibi sistemler bulunur.

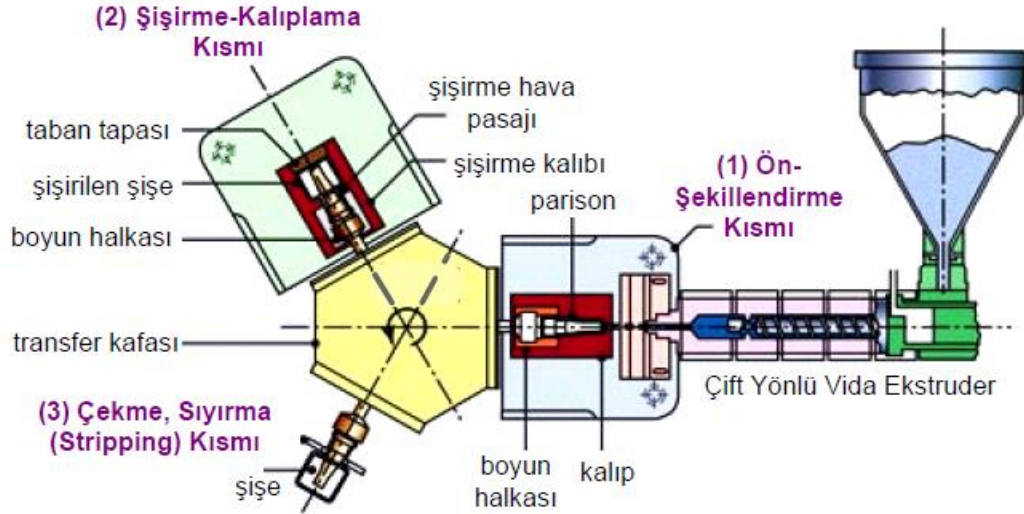


Şekil 4.5. Ekstruder şeması (Beşergil 2012)

#### 4.3.3.5. Şişirme

İçi boş kompozit elemanlar, şişirme yöntemi ile üretilirler. Bu yöntem özellikle büyük boyutlara sahip karmaşık biçimli parçaların üretiminde ucuzluk ve kolaylık sağlar. Üretim çalışmasında ilk olarak yuvarlak bir kalıptan erimiş bir tüp elde edilir. Daha sonra bu

boruya iki parça kalıp içerisinde basınçlı hava üflenir. Birden fazla kalıp kullanılarak işlem sürekli hale getirilebilir. Her şişirme işleminde belirli hacimdeki erimiş plastik malzeme şişirme ucuna iletilir. Hızlı soğumayı sağlamak için şişirme havası yerine sıvı CO<sub>2</sub>, soğuk hava veya yüksek basınçlı nemli hava üflenebilir.



**Şekil 4.6.** Plastik şişe üretiminde kullanılan üç kısımlı enjeksiyon kalıplama makinesi (Beşergil 2012)

#### 4.3.3.6. Termoforming-Vakum veya Basınç Şekillendirme

Termoforming, termoplastik kompozit bir levhanın katlanabilme veya yumuşama sıcaklığına kadar ısıtıldıktan sonra vakum veya basınç etkisi ile bir açık kalıp içerisinde şekillendirilmesidir. Vakum-termoforming ile 0,025 mm den 6,5 mm'ye kadar kalınlıktaki levhalar kalıp üzerinde gerilir. Kalın levhalar çift taraflı ısıtılıp yumuşatıldıktan sonra vakum uygulanır. Isı kaynağı kızıl ötesi lambasıdır. Basınçlı kalıplamada 2 MPa kadar basınç uygulandığında şekillendirme daha kolay olup diğer özellikleri aynıdır. Kalıp dizaynında ve malzeme akışında derin çekmeye kısmen benzerlik gösterse de burada kalıba temas eden kısım hemen soğuyup katılaşır.

#### 4.3.3.7. Hidro Şekillendirme

Hidro şekillendirme, genel olarak kâğıt-metal şekillendirmede kullanılan bir teknolojidir. Üst levhaya yerleştirilen iş parçasından çok daha büyük bükülebilir bir

diyaframdan (kaim lastik) ibarettir. Diyaframın arkasında bir akışkan vardır, genelde hidrolik akışkandır. Basınç altında, ön ısıtılmış iş parçası dişi veya erkek takımın şekline dönüşür. Yüksek basınçlar (Büyük sistemler için 69 MPa) ve düşük çevrim süreleri elde edilebilir. Bütün sistem basınç etkisi altında olduğu için çevredeki ekipmanlar (termokupl, ısıtma ve soğutma bağlantıları gibi) doğrudan takımın kendisine bağlanamaz (Beşergil 2012).

#### **4.3.3.8. Pultrüzyon**

Pultrüzyon, takviye malzemesinin bir reçine matrisi ile birleştirilerek sıcak bir kalıptan çekilmesi ile profil imalat işlemidir. Bu yöntemde cam elyafı ve cam elyaf keçe gibi kompozit üretiminin temel ihtiyaçları bir reçine banyosundan belirli bir diziliş ve geometride ıslatılarak sıcak kalıbın içinde polimerizasyonu tamamlanarak sürekli çekilmesi ile sonsuz profil imal edilebilmektedir. Sürekli imalat ve işlem kolaylığından dolayı otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır.

#### **4.3.3.9. Diğer Şekillendirme Teknikleri**

Termoplastik kompozit üretiminde tel sarımı, merdane ile şekillendirme gibi yöntemlerde kullanılmaktadır.

#### **4.3.4. Termoplastik Kompozitlerin Tezgâh ile İşlenmesi**

Termoplastik kompozitler iş takımlarının çok keskin (genelde elmas uçlu) ve kesme hızlarının yüksek olması koşuluyla konvansiyonel metal tezgâh takımları ile işlenebilirler. Termoplastik malzemeler düşük erime sıcaklıklarına sahiptirler. Bu nedenle tezgâh ile işleme boyunca soğutma sıvısı temin edilmelidir. Eğer soğutma sıvısı temin edilmez ise termoplastik matris, takım üzerinde eriyebilir. Arka yüzde fiber silinmesini engellemek için, yeterli arka yüzey desteği sağlanmalıdır.

#### **4.3.5. Yeniden İşlenebilirlik**

Termoplastik kompozit malzemelerin son dönemde endüstriyel alanda sıklıkla tercih edilmesinin ana nedenlerinden birisi geri dönüşüm özelliğidir. Hurda veya artık termoplastik kompozitleri tekrar ergitilerek eski haline dönüşür. Üretilen termoplastik

tabakalardaki kusurları ortadan kaldırmak ve yüksek kaliteli ürünler üretmek için yeniden kalıplanabilir. Teorik olarak birçok kez yeniden işlenebilir, fakat bazı termoplastikler işleme çevrimlerini kısıtlayan nedenlerden dolayı termoplastik, termoset özelliği gösterir. Örneğin, havada ısıtma. Esnasında PPS ve PEEK ( daha az uzama) oksidatif çapraz bağlamaya, zincirleme genişmeye ve zincirleme kesme reaksiyonuna maruz kalırlar. Bu olaylar en çok havadaki oksijen yerine azot geldiğinde yavaşlar. Çapraz bağlama miktarı düşüktür ve termoplastik yeniden işlenebilir, ancak elde edilecek en iyi kristallik derecesi, orijinal malzemedeki gibi olamaz ve bu işlem çevrim sayısını düşürür. Ayrıca kimyasal ve mekanik özellikleri de etkiler.





## 5. KOMPOZİT MEKANİĞİ VE LAMİNASYON TEORİSİ

Birbirleri içerisinde çözünmeyen iki ya da daha çok malzemenin, daha iyi özellikler elde etmek için makro yapıda birleştirilmesi ile elde edilen malzemelere kompozit malzeme denir. Kompozit malzemeler dolgu veya takviye elemanlarından oluşurlar.

Tabakalı yapılarda kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin elde edilmesi, üretim parametreleri, kullanılacak malzemelerin seçimi ve kullanılacak alanlar hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlamaktadır. Bu bölümde, kompozit malzemeleri oluşturan her bir bileşenin rijitlik, mukavemet, ısı ve genleşme katsayıları, fiber hacim oranları ve kullanılan malzemelerin sabitlerinin teorik hesaplamaları incelenmiştir.

### 5.1. Hacim ve Kütler Oranları, Yoğunluk ve Boşluk Miktarları

Tek yönlü kompozitin parametre değerlerini modellemeden önce hacim içerisindeki fiber oran kavramı bulunmalıdır. Bu kavram oldukça önemlidir. Çünkü tek yönlü bir laminanın rijitlik, mukavemet ve higrotermal özelliklerini bulmada kullanılan teorik formüller, fiber hacim oranına bağlıdır. Bileşenlere ait ölçümler genellikle onların kütlelerine dayanır. Bu nedenle fiber kütle oranı belirlenmelidir. Ayrıca kompozitin fiber hacim ve boşluk oranının belirlenmesi adına fiber kompozit yoğunluğunda belirlenmesi gerekir. Ayrıca özgül modül ve mukavemet kavramları içinde kompozit yoğunluğu belirlenmelidir (Kaw 2006).

#### 5.1.1. Hacim Oranları

Fiber ve matristen oluşan bir kompozit için aşağıdaki sembolik matrisler kabul edilsin (Kaw 2006).

$v_{c,f,m}$ = sırasıyla kompozit, fiber ve matris hacmi

$\rho_{c,f,m}$ = sırasıyla kompozit, fiber ve matris yoğunluğu

Fiber hacim oranı  $V_f$  ve matris hacim oranı  $V_m$  ile gösterilirse,

$$V_f = \frac{v_f}{v_c}$$

ve

$$V_m = \frac{v_m}{v_c}. \quad (5.1)$$

Hacim oranları toplamı,

$$V_f + V_m = 1$$

Denklem (5.1) den

$$V_f + V_m = V_c.$$

### 5.1.2. Kütle Oranları

Kompozit malzeme için aşağıdaki sembolik gösterimler kabul edilirse,

$w_{c,f,m}$  = sırasıyla kompozit, fiber ve matris kütlesi.

Fiberlerin kütle oranı  $W_f$  ve matris kütle oranı  $W_m$  ile gösterilirse,

$$W_f = \frac{w_f}{w_c} \text{ ve}$$
$$W_m = \frac{w_m}{w_c}. \quad (5.2)$$

Kütle oranları toplamı,

$$W_f + W_m = 1$$

Denklem (5.2) den

$$w_f + w_m = w_c$$

Tek bir malzeme yoğunluğu tanımı ele alınırsa,

$$w_c = \rho_c v_c$$

$$w_f = \rho_f v_f \text{ ve} \quad (5.3)$$

$$w_m = \rho_m v_m.$$

Denklem (5.3), denklem (5.2) de yerine konursa fiber ve matris hacim oranları cinsinden, kütle ve hacim oranları aşağıdaki denklemlerde belirtilmiştir (Kaw 2006).

$$W_f = \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f \text{ ve}$$

$$W_m = \frac{\rho_m}{\rho_c} V_m \quad (5.4)$$

Kütle ve hacim oranları, her bir bileşenin özelliği cinsinden aşağıda gösterilmiştir.

$$W_f = \frac{\frac{\rho_f}{\rho_m} V_f}{\frac{\rho_f}{\rho_m} V_f + V_m} V_f$$

$$W_m = \frac{1}{\frac{\rho_f}{\rho_m}(1-V_m)+V_m} V_m \quad (5.5)$$

Kompozit malzeme hesaplamalarında kütle ve hacim oranlarının bilinmesi kompozit teorisi açısından oldukça önemlidir. Denklem (5.4) de kütle ve hacim oranlarının eşit olmadığı görülmektedir.

### 5.1.3. Yoğunluk

Hacim oranları bilinen kompozit malzemelerin yoğunluğu aşağıdaki denklemlerle bulunur (Kaw 2006).

$$w_f + w_m = w_c \quad (5.6)$$

Denklem (5.3), denklem (5.6) da yerine yazılırsa

$$\rho_f v_f + \rho_m v_m = \rho_c v_c \text{ ve}$$

$$\rho_f \frac{v_f}{v_c} + \rho_m \frac{v_m}{v_c} = \rho_c \quad (5.7)$$

Denklem (5.1) deki fiber ve matris hacim oranları tanımını kullanarak

$$\rho_f V_f + \rho_m V_m = \rho_c \cdot \quad (5.8)$$

Kompozit hacmi fiber ve matris hacimleri toplamına eşittir.

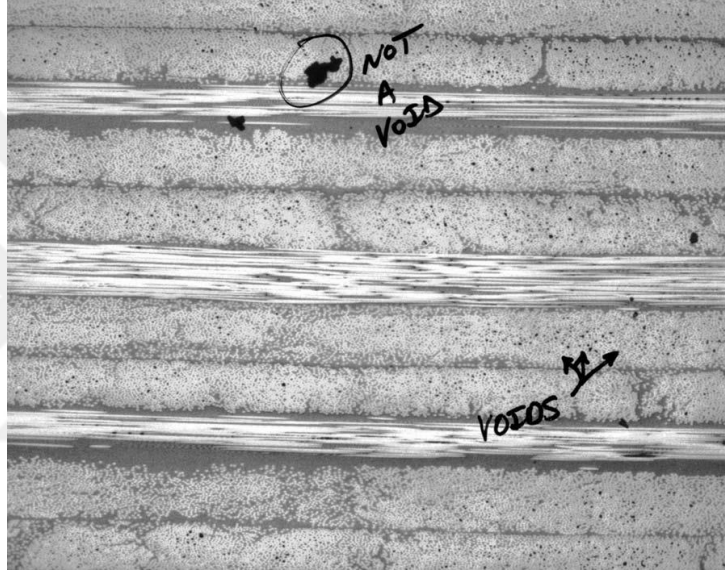
$$v_c = v_f + v_m \quad (5.9)$$

Kütle oranları cinsinden kompozit yoğunluğu aşağıdaki gibi bulunur.

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m} \quad (5.10)$$

#### 5.1.4. Boşluk Miktarı

Kompozit malzeme üretimi sırasında kompozit malzeme içerisinde boşluklar kalabilir. Bu istenmeyen durum kompozit mekanik özelliklerine olumsuz etki yapar. Ayrıca teorik kompozit yoğunluğunu gerçek yoğunluk değerlerinden daha yüksek hesaplanır.



**Şekil 5.1.** Boşluklu laminanın kesit fotomikrografisi (Kaw 2006).

Kompozit yapılarda meydana gelebilecek boşluklar aşağıda verilen özelliklerin değerlerini düşürmektedir (Kaw 2006).

- Kayma mukavemeti
- Basma mukavemeti
- Enine çekme mukavemeti
- Yorulma direnci
- Korozyon direnci

Kompozit yapı içerisinde meydana gelebilecek % 1 boşluk yapıda % 2-10 arasında dayanım kaybına neden olur.

$v_v$  boşluk hacmine sahip kompozit için boşluk hacim oranı  $V_f$  aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$V_v = \frac{v_v}{v_c} \quad (5.11)$$

Boşluklu kompozit malzemenin toplam hacmi ( $v_c$ )

$$v_c = v_f + v_m + v_v. \quad (5.12)$$

Kompozit malzemenin deneysel yoğunluğu  $\rho_{ce}$  olarak tanımlanırsa kompozitin gerçek hacmi,

$$v_c = \frac{w_c}{\rho_{ce}} \quad (5.13)$$

Kompozitin teorik yoğunluğu  $\rho_{ct}$  olarak tanımlanırsa kompozitin gerçek hacmi,

$$v_f + v_m = \frac{w_c}{\rho_{ct}}. \quad (5.14)$$

Denklem (5.13) ve (5.14), denklem (5.12) de yerlerine yazılırsa

$$\frac{w_c}{\rho_{ce}} = \frac{w_c}{\rho_{ct}} + v_v,$$

boşluk hacmi aşağıdaki gibi bulunur.

$$v_v = \frac{w_c}{\rho_{ce}} \left( \frac{\rho_{ct} - \rho_{ce}}{\rho_{ct}} \right). \quad (5.15)$$

Denklem (5.13) ve (5.15), denklem (5.11) de yerlerine yazılırsa boşluk hacim oranı aşağıdaki gibi bulunur (Kaw 2006).

$$\begin{aligned} V_v &= \frac{v_v}{v_c} \\ &= \left( \frac{\rho_{ct} - \rho_{ce}}{\rho_{ct}} \right). \end{aligned} \quad (5.16)$$

## 5.2. Kompozit Malzemeler Mikro Mekanik

### 5.2.1. Ortotropik Kompozit Malzemeler

Her yönde farklı özellik gösteren kompozit malzemelere anizotropik malzemeler denir. Karşılıklı olarak iki simetri düzlemi mevcut olan kompozitler ortotropik kompozit malzeme olarak adlandırılır.  $x,y,z$  kartezyen koordinat sisteminde;  $x-y$  simetri düzleminde başka  $y-z$  düzlemi de simetri düzlem ise, iki ortogonal simetri düzlemi mevcut olduğundan malzemelere ortotropik malzemedir. Ortotropik malzemenin elastiklik modülleri ( $E_1, E_2$ ) ve Poisson oranları ( $\nu_{12}, \nu_{21}$ ) arasında  $i, j = 1,2$  olmak üzere

$$\nu_{12} < \left( \frac{E_1}{E_2} \right)^{0,5} \quad (5.17)$$

şartı bulunmalıdır (Tümer 2013).

Uygunluk matrisinin simetrikliğinden dolayı majör ve minör Poisson oranları arasında,

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad (5.18)$$

eşitliği vardır. Gerilmenin uygulandığı yöne göre poisson oranları farklılık gösterir. Fiber doğrultusunda uygulanan gerilme sonucu majör poisson oranı, fibere dik doğrultuda uygulanan gerilmede ise minör poisson oranı oluşur.

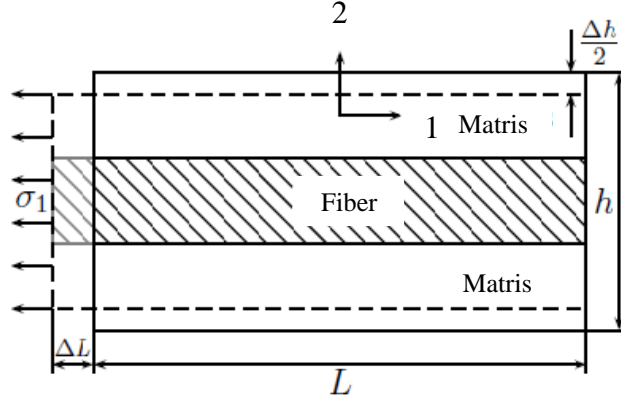
### 5.2.2. Kompozit Malzeme Mekanik Özelliklerinin ( $E_1, E_2, \nu_{12}, G_{12}$ ) Hesaplanması

Kompozit malzemeyi oluşturan malzemelerin mekanik özellikleri biliniyor ise karışım oranları kullanılarak malzemelerin mekanik özellikleri hesaplanabilir. Tek yönlü bir laminanın dört elastik modülü vardır. Bunlar,

- Boylamasına elastisite modülü,  $E_1$
- Enine elastisite modülü,  $E_2$
- Major Poisson oranı,  $\nu_{12}$
- Düzlem kayma modülü,  $G_{12}$

### 5.2.2.1. Elastiklik Modülü E1' in Hesaplanması

Kompozit malzemeye fiber doğrultusunda  $\sigma_1$  gerilmesi uygulandığını kabul edilirse, kompozit malzemeyi oluşturan matris ve takviye elamanları aynı miktarda şekil değiştirmeye  $\varepsilon_1$  sahip olurlar (şekil 1.1) (Tümer 2013).



Şekil 5.2. Kompozit malzemede gerilmenin takviye doğrultusunda uygulanması (Tümer 2013)

$$\varepsilon_m = \varepsilon_f = \varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L} \quad (5.19)$$

Fiber ve matris malzemelerin gerilmeleri ise,

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_1 \quad (5.20)$$

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1$$

Formülleri ile elde edilir. Burada; E elastiklik modülü,  $\sigma$  gerilme ve m,f,1 indisleri sırasıyla matris, fiber ve 1 yönüne ait değerleri ifade etmektedir. Kompozit malzemenin kesit alanı A ve malzemeye etki eden kuvvet F olsun,

$$\sigma_1 = \sigma_m + \sigma_f \quad (5.21)$$

$$A = A_m + A_f \quad (5.22)$$

$$F = \sigma_1 A = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \quad (5.23)$$

formülleri elde edilir. Denklem (5.20) denklem (5.23) de yerine yazılırsa,

$$E_1 = \frac{v_m}{v_c} E_m + \frac{v_f}{v_c} E_f \quad (5.24)$$

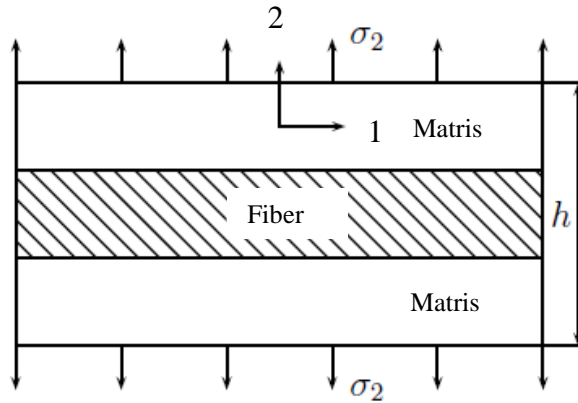
$E_1$  elastiklik modülü elde edilir. Denklem (5.1) de verilen matris ve fiber hacimsel oranları denklem (5.24) de yerine yazılırsa  $E_1$  elastiklik modülü

$$E_1 = V_m E_m + V_f E_f \quad (5.25)$$

Şeklinde elde edilir.

#### 5.2.2.2. Elastiklik Modülü $E_2$ ' nin Hesaplanması

Kompozit malzemeye fiber yönüne dik doğrultuda bir  $\sigma_2$  gerilmesi uygulandığını kabul edelim. Gerilme sonucu fiber ve matris malzemedeki Kompozit malzemede  $\Delta h$  kadar uzama meydana gelir (Tümer 2013).



**Şekil 5.3.** Kompozit malzemede gerilmenin takviye Doğrultusuna dik doğrultuda uygulanması (Tümer 2013)



$$\Delta h = \Delta h_m + \Delta h_f \quad (5.26)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta h}{h} \quad (5.27)$$

Formüllerleriyle tanımlanır. Eşitlikteki  $\Delta h_m$  ve  $\Delta h_f$  değerleri sırasıyla

$$\begin{aligned} \Delta h_m &= \varepsilon_m h_m \\ \Delta h_f &= \varepsilon_f h_f \end{aligned} \quad (5.28)$$

şeklindedir. Burada  $h_m$  ve  $h_f$  değerleri sırasıyla

$$\begin{aligned} h_m &= hV_m \\ h_f &= hV_f \end{aligned} \quad (5.29)$$

elde edilir. Denklem (5.26) ve (5.29) düzenlenirse  $\varepsilon_2$  aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f V_f \quad (5.30)$$

Hook kanunu denklemi

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5.31)$$

denklem (5.30) da yerine yazılırsa

$$\frac{1}{E_2} = \frac{E_m}{V_m} + \frac{E_m}{V_m} \quad (5.32)$$

Denklemden fiber doğrultusuna dike gerilme bulunur (Tümer 2013).

### 5.2.2.3. Poisson Oranı $\nu_{12}$ 'nin Hesaplanması

Poisson enine daralmanın boyuna uzamaya oranı olarak tanımlanır. Bu bölümde kompozit malzemelerde poisson oranı  $\nu_{12}$ 'nin hesaplanması ile ilgili eşitlikler aşağıda verilmiştir (Tümer 2013).

poisson oranı  $\nu_{12}$ ,

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (5.33)$$

enine şekil değiştirme  $\varepsilon_2$ ,

$$\varepsilon_2 = -\frac{\Delta h}{h} \quad (5.34)$$

şeklinde hesaplanır. Denklemden verilen  $\Delta h$  denklem (5.26) da verilen fiber ve matris malzemenin kısalmaları toplamıdır. Denklem (5.34) den faydalanarak;

$$\Delta h_m = hV_m\varepsilon_1\nu_m \quad (5.35)$$

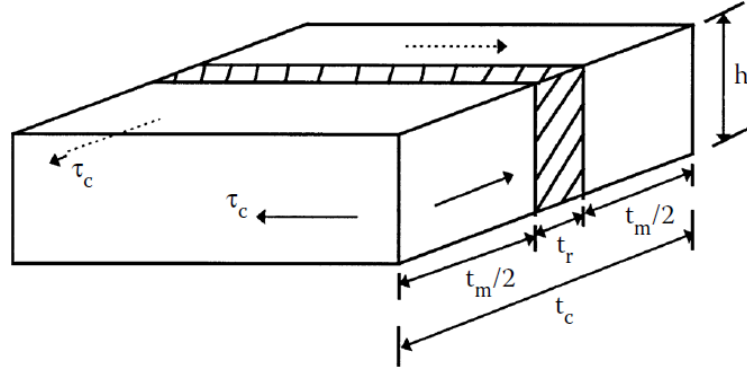
$$\Delta h_f = hV_f\varepsilon_1\nu_f$$

Denklemleri elde edilir.

$$\nu_{12} = \nu_m V_m + \nu_f V_f \quad (5.36)$$

#### 5.2.2.4. Kayma Modülü $G_{12}$ ' nin Hesaplanması

Şekil 5.3'de, kayma gerilmesine  $\tau_c$  maruz kalan bir lamina verilmiştir. Şekilde dikdörtgen bloklar ile gösterilen kompozitin kayma deformasyonu  $\delta_c$ , fiber kayma deformasyonu  $\delta_f$  ve matris kayma deformasyonu  $\delta_m$ 'nin toplamına eşittir.



**Şekil 5.4.** Tek yönlü bir laminaya ait düzlem kayma modülünü hesaplamak için kullanılan temsili hacim elamanı üzerindeki düzlem kayma gerilmesi (Kaw 2006).

$$\delta_c = \delta_f + \delta_m. \quad (5.37)$$

kayma şekil değiştirmesi,

$$\delta_c = \gamma_c t_c, \quad (5.38a)$$

$$\delta_f = \gamma_f t_f \quad (5.38b)$$

$$\delta_m = \gamma_m t_m, \quad (5.38c)$$

Burada,

$\gamma_{c,f,m}$  = sırasıyla kompozit, fiber ve matristeki kayma şekil değiştirmeleri

$t_{c,f,m}$  = sırasıyla kompozit, fiber ve matris kalınlıkları

Fiber, matris ve kompozit için geçerli Hooke kanunundan,

$$\gamma_c = \frac{\tau_c}{G_{12}}, \quad (5.39a)$$

$$\gamma_f = \frac{\tau_f}{G_f}, \quad (5.39b)$$

$$\gamma_m = \frac{\tau_m}{G_m}, \quad (5.39c)$$

Burada  $G_{12,m,f}$  = sırasıyla kompozit, matris ve fiberin kayma modülleridir.

Denklem (5.37) ve denklem (5.38) den

$$\frac{\tau_c}{G_{12}} t_c = \frac{\tau_f}{G_f} t_f + \frac{\tau_m}{G_m} t_m. \quad (5.40)$$

Fiber, matris ve kompozit kayma gerilmeleri ( $\tau_c = \tau_f = \tau_m$ ) eşit oldukları varsayılarak,

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{G_f} \frac{t_f}{t_c} + \frac{1}{G_m} \frac{t_m}{t_c}. \quad (5.41)$$

Kayma modülü bulunur.

fiber hacim oranı  $V_f$ ,

$$V_f = \frac{A_f}{A_c}, \quad (5.42a)$$

$$= \frac{t_f}{t_c},$$

ve matris hacim oranı  $V_m$ ,

$$V_m = \frac{A_m}{A_c}, \quad (5.42b)$$

$$= \frac{t_m}{t_c},$$

$$= 1 - V_f.$$

Denklem (5.42a) ve (5.42b) de görüldüğü gibi kalınlık oranının, hacim oranına eşit olması aşağıdaki eşitliği sağlar.

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m}. \quad (5.43)$$

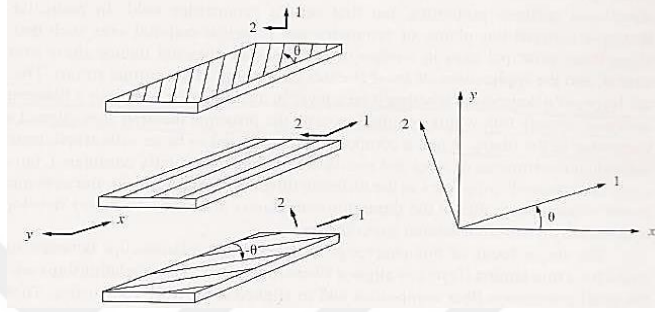
### 5.3. Kompozit Tabakaların Makromekanik Analizi

Kompozit malzeme tasarımında istenilen özelliklere uygun malzemenin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Tasarımda takviye malzemesinin yönlenme şekillerine göre kompozit farklı özellikler göstermektedir. Rastgele yönlenmiş malzemeler izotropik özellik sergilerken fiberin ortogonal ya da tek yönlü takviyelendirilmesi kompozitin ortotropik özellik göstermesine neden olur. İzotropik özellik gösteren kompozit malzemelerde tüm

mekanik özellikler malzemenin her doğrultusunda aynı iken, ortotropik malzemelerde fiber doğrultusu ve yönlerine göre farklılık göstermektedir.

### 5.3.1. Ortotropik Tabakaların Makromekanik Analizi

Bir kompozit malzemede, lif doğrultusunda yüksek dayanım ve rijitlik elde edilir. Bu yüksek mekanik özellikler kullanılan takviye elemanı özelliklerine göre değişiklik gösterebilir.



**Sekil 5.5.** Tek yönlü kompozit tabakalarda 1-2 lif koordinat sistemleri ve global x-y koordinatı (Özdemir 2009)

Hooke kanunu bağıntıları:

$$Q_{11} = \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{22} = \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{11} = Q_{22} = \nu_{21} \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \nu_{12} \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{33} = \sigma_{12} \cdot \quad (5.44)$$

Olmak üzere;

$$\sigma_{11} = Q_{11}\epsilon_{11} + Q_{12}\epsilon_{22}$$

$$\sigma_{22} = Q_{12}\epsilon_{11} + Q_{22}\epsilon_{22}$$

$$\sigma_{12} = Q_{33}\epsilon_{12} \quad (5.45)$$

Veya matris olarak,

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix}$$

$$[\sigma] = [Q][\varepsilon] \quad (5.46)$$

Ortotropik durumda kayma modülü ve gerilmeler, burulmanın olduğu doğrultulara göre tanımlanır. Bu durumda  $\sigma$ ,  $E$  ve  $\nu$  değerlerinden bağımsızdır. Ortotropik özelliklere sahip kompozitler tamamen bağımsız dört elastik sabit ( $E_{11}$ ,  $E_{22}$ ,  $\nu_{12}$  ve  $G_{12}$ ) ile ifade edilir. Uzunluklar ve gerilmeler ile ilgili olarak eşitlik takımları;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}$$

$$[\varepsilon] = [S][\sigma] \quad (5.47)$$

Şeklinde (Özdemir 2009).

$$S_{11} = \frac{1}{E_{11}}$$

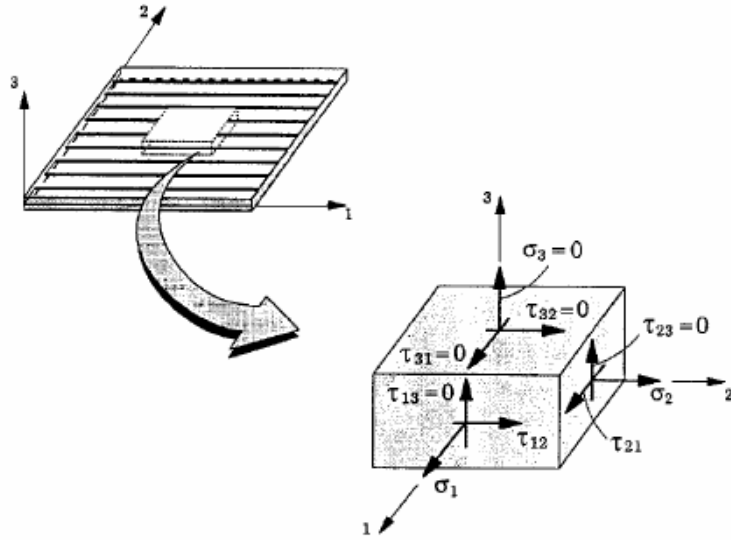
$$S_{22} = \frac{1}{E_{22}S_{33}} = \frac{1}{G_{12}}$$

$$S_{12} = \frac{-\nu_{21}}{E_{22}} = \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} \quad (5.48)$$

### 5.3.1.1. Ortotropik tabakada keyfi doğrultu

Eşitlik 2.1'de tanımlanan bağıntılar malzemenin esas eksenleri ile ilgili olduğundan malzeme simetrisi nedeniyle normal gerilmelerin etkileri kayma gerilmelerinden bağımsız olduğu için toplam etkiler süperpozisyon metodu ile belirlenir. Tabakanın esas eksenleri (1-2) bazı keyfi seçilen doğrultuda O referans noktaları ile aynı doğrultuda değilse, her bir tabaka için yukarıda oluşan bağıntı referans eksenlerine dönüştürülür. Bu nedenle, önce bir tabakada 2 eksen takımına bağlı olarak tanımlanan gerilmeler

arasındaki ilişki bulunur. Sonrasında ise benzer ilişki uzamalar arasında sağlanır (Güleşen 2005).



**Sekil 5.6.** Malzeme esas eksenleri ve esas eksenlerde gerilmeler (Özdemir 2009)

### 5.3.2.3. Gerilim Bağlıları

Malzemenin referans eksenleri x-y ile temel eksenler 1-2'deki gerilmeler arasındaki eşitlikler;

$$\sigma_{11} = \sigma_{xx} \cos 2\theta + \sigma_{yy} \sin 2\theta + \sigma_{xy} 2 \sin \theta \cos \theta$$

$$\sigma_{22} = \sigma_{xx} \sin 2\theta + \sigma_{yy} \cos 2\theta - \sigma_{xy} 2 \sin \theta \cos \theta \quad (5.49)$$

$$\sigma_{12} = -\sigma_{xx} \sin \theta \cos \theta + \sigma_{yy} \cos 2\theta + \sigma_{xy} (\cos 2\theta - \sin 2\theta)$$

Şeklinde yazılabilir. Eşitlikler matris formunda yazılırsa gerilmeler;

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (5.50)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (5.51)$$

Şeklinde dir. Burada matris dönüşümü (T) ise;

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 n^2 2mn \\ m^2 n^2 (-2mn) \\ -nmnm^2 - n^2 \end{bmatrix}$$

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} m^2 n^2 2mn \\ m^2 n^2 (-2mn) \\ nm - nm(m^2 - n^2) \end{bmatrix} \quad (5.52a-b)$$

Bu eşitliklerde  $m = \cos\theta$  ve  $n = \sin\theta'$  yı göstermektedir.

### 5.3.2.3. Uzama Bağlıları

0-1 doğrusu, 0-x ile  $\theta$  acısı yaptığı zaman  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$ ,  $\varepsilon_{xy}$  uzamalarını hesaplırsak;

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{xx} m^2 + \varepsilon_{yy} n^2 + \frac{\varepsilon_{xy}}{2} + 2mn \quad (5.53)$$

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_{xx} n^2 + \varepsilon_{yy} m^2 - \frac{\varepsilon_{xy}}{2} + 2nm \quad (5.54)$$

$$\frac{\varepsilon_{12}}{2} = -\varepsilon_{xx} nm + \varepsilon_{yy} mn - \frac{\varepsilon_{xy}}{2} (m^2 - m'^2) \quad (5.55)$$

Bu eşitliklerde  $m = \cos\theta$  ve  $n = \sin\theta'$  yı göstermektedir. Matris şeklindeki aşağıdaki bağlantılar referans eksenleri x-y ve esas eksenleri 1-2 de gerilmelerle birleşir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \frac{\varepsilon_{12}}{2} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \frac{\varepsilon_{xy}}{2} \end{bmatrix} \quad (5.56)$$

veya,

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \frac{\varepsilon_{xy}}{2} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \frac{\varepsilon_{12}}{2} \end{bmatrix} \quad (5.57)$$

Şeklinde yazılabilir.

### 5.3.1.4. Gerilme-Uzama Bağlıları

Esas eksenler 1-2 ye göre malzeme özelliklerine bağlı olarak x-y ekseninde gerilme ve uzama arasındaki bağlantılar aşağıdaki gibi belirlenir (Özdemir 2009).



$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (5.49)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (5.50)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (5.51)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = [S][T] \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (5.52)$$

Eşitlikleri elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = [R][T][R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (5.53)$$

Matrisi ters çevirerek

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = [R][T]^{-1}[R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (5.54)$$

Şeklinde yazılabilir.

$$[R][T]^{-1}[R]^{-1} = [[T]^{-1}]^T$$

$$[R][T]^{-1}[R]^{-1} = [T]^T$$

ve

$$[[T]^{-1}]^T = \begin{bmatrix} m^2 n^2 m n \\ m^2 n^2 (-m n) \\ -2 m n \quad 2 m n \quad (m^2 - n^2) \end{bmatrix}$$

$$[[T]^{-1}]^T = \begin{bmatrix} m^2n - mn \\ n^2mnm \\ 2mn - 2nm(m^2 - n^2) \end{bmatrix} \quad (5.55)$$

Elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = [[T]^{-1}]^T \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (5.56)$$

Matrisi ters çevirerek

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = [T]^T \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (5.57)$$

Şeklinde yazılabilir. x-y referans eksenlerinde gerilme bileşenleri elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q][[T]^{-1}]^T \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (5.58)$$

Sağlamalar yapılarak,

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (5.59)$$

Şeklinde yazılabilir. Eşitliklerde verilen [Q] matrisi 3x3 matris olup bileşenleri aşağıda verilmiştir.

$$Q_{11} = Q_{11}m^4 + Q_{22}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{33})n^2m^2$$

$$Q_{12} = Q_{21} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{33})n^2m^2 + Q(n^4 + m^4)$$

$$Q_{21} = Q_{12} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{33})nm^3 + (Q_{11} - Q_{22} - 2Q_{33})n^3m$$

$$Q_{22} = Q_{11}m^4 + Q_{22}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{33})n^2m^2$$

$$Q_{23} = Q_{32} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{33})n^3m + (Q_{12} - Q_{22} - 2Q_{33})nm^3$$

$$Q_{33} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{33})n^2m^2 + Q_{33}(n^4 + m^4) \quad (5.60a-f)$$

Bu eşitliklerde;  $\theta$  eksen arasındaki açı olup  $m=\cos\theta$  ve  $n=\sin\theta$ ' dir. Ayrıca  $Q_{11}$ ,  $Q_{12}$ ,  $Q_{21}$ ,  $Q_{22}$  ve  $Q_{33}$  indirgenmiş rijitlik matrisidir ve daha sonra bir uyum matrisi ile bu iki eleman aşağıdaki bağıntı ile açıklanır.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (5.61)$$

Eşitlikte verilen  $[S]$  matrisi 3x3 uyum matrisi olup bileşenleri aşağıda verilmiştir (Özdemir 2009).

$$S_{11} = S_{11}m^4 + S_{22}n^4 + (2S_{12} + 2S_{33})n^2m^2$$

$$S_{11} = S_{21} = S_{12}(n^4 + m^4) + (S_{11} + S_{22} + S_{33})n^2m^2$$

$$S_{13} = S_{31} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{33})nm^3 - (2S_{22} - S_{12} - S_{33})n^3m$$

$$S_{23} = S_{32} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{33})n^3m - (2S_{22} - S_{12} - S_{33})nm^3$$

$$S_{22} = S_{11}n^4 + S_{22}m^4 + (2S_{12} + S_{33})n^2m^2$$

$$S_{33} = 2(2S_{11} + 2S_{22} - 4S_{12} - S_{33})n^2m^2 + S_{33}(n^4 + m^4) \quad (5.62a-f)$$

Bu eşitlikte;

$$S_{11} = \frac{1}{E_1},$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_2},$$

$$S_{12} = S_{21} = -\nu_{12},$$

$$S_{33} = \frac{1}{G_2}. \quad (5.63)$$

eşitlikleri elde edilir.

## 6. HASAR TEORLERİ

Başarılı bir yapı etkili ve güvenli malzemeler ve başarılı bir dizayn ile oluşturulur. Malzemelerde meydana gelen gerilmeler sonucunda hasarlar oluşabilmektedir. Bu hasarların önüne geçebilmek adına hasar teorilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Bir lamina yapıda, mukavemet değerlerine ulaşabilmek için tek bir laminada meydana gelen mukavemet değerlerinin bulunması gerekmektedir. Eğer lamina yapı açılı ise hasar değerlerini ölçmek adına çeşitli teoriler geliştirilmiştir. Bu teoriler için tek yönlü laminanın mukavemet değerleri bulunmalıdır.

Bir laminada, asal gerilmeler ve maksimum kayma gerilmeleri kullanılmaz. Bunun yerine malzeme ekseninde oluşan gerilmeler hasar teorisinde kullanılır. Bunun sebebi, laminanın ortotropik özellik göstermesidir ve laminanın malzeme özellikleri her açıda farklı özellik gösterir.

Tek yönlü laminada, biri fibere paralel diğeri fibere dik olmak üzere iki eksen vardır. Gerilme esnasında tek yönlü lamina üzerinde dördü iki malzeme eksenini yönünde biri çekme ve diğeri basma gerilmesi ve tek yönlü laminanın kayma gerilmesi olmak üzere beş mukavemet parametresi oluşur (Kaw 2006).

$(\sigma_1^T)_{ult}$  = Maksimum boylamasına çekme mukavemeti (1 yönünde)

$(\sigma_1^C)_{ult}$  = Maksimum boylamasına basma mukavemeti (1 yönünde)

$(\sigma_2^T)_{ult}$  = Maksimum enine çekme mukavemeti (2 yönünde)

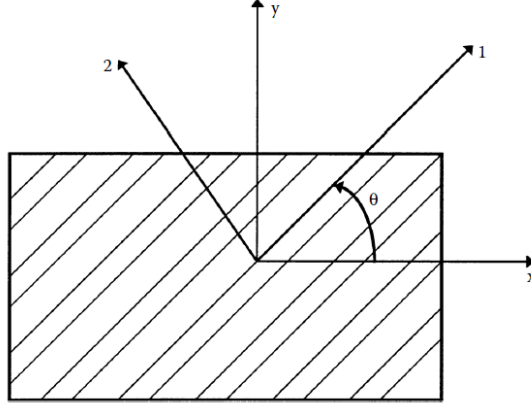
$(\sigma_2^C)_{ult}$  = Maksimum enine basma mukavemeti (2 yönünde)

$(\tau_{12})_{ult}$  = Maksimum kayma mukavemeti (1-2 düzleminde)

### 6.1. Maksimum Gerilme Hasar Teorisi

Maksimum gerilme ve hasar teorisi, izotropik malzemelere uygulanan maksimum kayma gerilmesi teorisi ve maksimum normal gerilme teorisine benzer. Lamina üzerine gelen gerilmeler lokal (veya malzeme) ekseninde meydana gelen gerilmelere çevrilmelidir. Lokal ekseninde meydana gelen normal veya kayma gerilmeleri aynı ekseninde meydana gelen normal veya kayma gerilme değerlerine ulaşır veya aşarsa hasar başlar. (Kaw 2006).

Laminanın global eksenlerinde meydana gelen gerilme ve şekil değiştirmeler aşağıda gösterilmiştir.



**şekil 6.1.** Açılı bir laminadaki global ve lokal eksenler (Kaw 2006).

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Global eksenlerde oluşan gerilmeler kullanılarak malzeme eksenindeki gerilmeler denklemin (6.1) ile bulunur. Aşağıdaki şartlar ihlal edilirse laminanın hasara uğrayacağı düşünülür.

$$-(\sigma_1^c)_{ult} < \sigma_1 < (\sigma_1^T)_{ult} \text{ veya}$$

$$-(\sigma_2^c)_{ult} < \sigma_2 < (\sigma_2^T)_{ult} \text{ veya}$$

$$-(\tau_{12})_{ult} < \tau_{12} < (\tau_{12})_{ult} \quad (6.2 \text{ a-c})$$

Denkleminde görülen mukavemet değerleri pozitif sayı gibi işlem görür. Normal gerilmeler, çekme durumunda pozitif, basma durumunda negatiftir.

## 6.2. Mukavemet Oranı

Bölüm 6,1'de verilen maksimum gerilme hasar teorisi gibi hasar teorilerinde, Denklem (6.2)deki denklemlerden herhangi birisinin ihlali durumunda bir laminanın hasara uğradığı tespit edilebilir. Fakat laminanın emniyetli olması durumunda yükün maksimum seviyesi veya laminanın hasara uğrama durumunda yükün minimum

seviyesi tespit edilemez. Bu durumda mukavemet oranı (SR) tanımı bize yardımcı olur. Mukavemet oranı aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$SR = \frac{\text{Uygulanabilen maksimum yük}}{\text{Uygulanan yük}} \quad (6.3)$$

Tüm hasar teorilerinde uygulanabilen bu teoride  $SR > 1$  olduğu durumlar güvenli olarak kabul edilir ve SR değeri kontrollü olarak arttırılabilir.  $SR < 1$  olduğu durumda ise lamina güvensizdir ve SR değeri kontrollü olarak azaltılmalıdır.  $SR = 1$  ise SR hasar yükünü ifade eder (Kaw 2006).

### 6.3. Maksimum Şekil Değişirme Hasar Teorisi

Bu teorinin temelinde izotropik malzemelere uygulanan maksimum kayma gerilmesi teorisi ve maksimum normal şekil değişirme teorisi vardır. Lamina üzerine gelen kuvvetler malzeme ekseninde şekil değişimine neden olur. Malzeme ekseninde meydana gelen kayma veya normal gerilmelerden herhangi birisi o eksene ait maksimum şekil değiştirmeye eşit olur veya aşarsa laminada hasar tahmini yapılır. Açılı laminada meydana gelen gerilme/şekil değiştirmelerden lokal eksenlerdeki şekil değiştirmeler bulunur. Aşağıdaki eşitsizliklerin ihmal durumunda laminada hasar meydana gelir (Kaw 2006).

$$-(\epsilon_1^c)_{ult} < \epsilon_1 < (\epsilon_1^T)_{ult} \text{ veya}$$

$$-(\epsilon_2^c)_{ult} < \epsilon_2 < (\epsilon_2^T)_{ult} \text{ veya}$$

$$-(\gamma_{12})_{ult} < \gamma_{12} < (\gamma_{12})_{ult} \quad (6.4 \text{ a-c})$$

Bu denklemde,

$(\epsilon_1^T)_{ult}$  = Boylamasına maksimum çekme şekil değiştirmesi (1 yönünde)

$(\epsilon_1^c)_{ult}$  = Boylamasına maksimum basma şekil değiştirmesi (1 yönünde)

$(\epsilon_2^T)_{ult}$  = Enine doğrultuda maksimum çekme şekil değiştirmesi (2 yönünde)

$(\epsilon_2^c)_{ult}$  = Enine doğrultuda maksimum basma şekil değiştirmesi (2 yönünde)

$(\gamma_{12})_{ult}$  = Maksimum düzlem kayma şekil değiştirmesi (1-2 düzleminde)

Kompozit bir laminada meydana gelen maksimum şekil değiştirmeler, laminada hasara kadar oluşan gerilme ve şekil değiştirmelerin lineer oldukları varsayılarak maksimum mukavemet parametreleri ve elastik modüllerden bulunabilir. Lamina malzeme ekseninde meydana gelen şekil değiştirmeler poisson oranı etkisini içerdiği için iki hasar teorisi farklı sonuçlar verir. Ancak eğer tek yönlü laminada poisson oranı sıfır ise iki hasar teorisi aynı sonucu verecektir.

Maksimum gerilme ve maksimum şekil değiştirme hasar teorisinde meydana gelen hasarlar birbirlerinden bağımsızdır. Fakat aşağıdaki teorilerinde hasarlar arasında etkileşim vardır.

#### 6.4. Tsai-Hill Hasar Teorisi

Tsai Hill anizotropik malzemeler için aşağıda verilen akma teorisini ileri sürmüştür. Bu teori Von mises izotropik akma teorisinin anizotropik malzemelere uygulanmış halidir.

$$(G_2 + G_3)\sigma_1^2 + (G_1 + G_3)\sigma_2^2 + (G_1 + G_2)\sigma_3^2 - 2G_3\sigma_1\sigma_2 - 2G_2\sigma_1\sigma_3 - 2G_1\sigma_2\sigma_3 + 2G_4\tau_{23}^2 + 2G_5\tau_{31}^2 + 2G_6\tau_{12}^2 < 1, \quad (6.5)$$

Hasar mukavemetine bağlı olan mukavemet kriterleri elemanları  $G_1, G_2, G_3, G_4, G_5$  ve  $G_6$  aşağıdaki gibi bulunabilir (Kaw 2006).

Tek yönlü laminaya  $\sigma_1 = (\sigma_1^T)_{ult}$  uygulanırsa lamina hasara uğrayacaktır. Bu durumda denklem (6.5) aşağıdaki gibi yazılır.

$$(G_2 + G_3) (\sigma_1^T)_{ult}^2 = 1. \quad (6.6)$$

1. Tek yönlü laminaya  $\sigma_2 = (\sigma_2^T)_{ult}$  uygulanırsa lamina hasara uğrayacaktır. Bu durumda denklem (6.5) aşağıdaki gibi yazılır.

$$(G_1 + G_3) (\sigma_2^T)_{ult}^2 = 1. \quad (6.7)$$

2. Tek yönlü laminaya  $\sigma_3 = (\sigma_2^T)_{ult}$  uygulanırsa normal çekme hasar mukavemetinin 2 ve 3 yönünde aynı olduğu kabul edilerek lamina hasara uğrayacaktır. Bu durumda denklem (6.5) aşağıdaki gibi yazılır.

$$(G_1 + G_2) (\sigma_2^T)_{ult}^2 = 1. \quad (6.8)$$

3. Tek yönlü laminaya  $\tau_{12} = (\tau_{12})_{ult}$  uygulanırsa lamina hasara uğrayacaktır. Bu durumda denklem (6.5) aşağıdaki gibi yazılır.

$$2G_6 (\tau_{12})_{ult}^2 = 1. \quad (6.9)$$

Denklem (6.6)'dan denklem (6.9) a kadar olan denklemlerden,

$$\begin{aligned} G_1 &= \frac{1}{2} \left( \frac{2}{[(\sigma_2^T)_{ult}]^2} - \frac{1}{[(\sigma_1^T)_{ult}]^2} \right) \\ G_2 &= \frac{1}{2} \left( \frac{2}{[(\sigma_1^T)_{ult}]^2} \right) \\ G_3 &= \frac{1}{2} \left( \frac{2}{[(\sigma_1^T)_{ult}]^2} \right) \\ G_6 &= \frac{1}{2} \left( \frac{2}{[(\tau_{12}^T)_{ult}]^2} \right) \end{aligned} \quad (6.10)$$

Tek yönlü lamina düzlem gerilme halinde olduğu varsayılarak  $\sigma_3 = \tau_{31} = \tau_{23} = 0$  Eşitliği bulunur. Denklem (6.5) denklem (6.10) üzerinden indirgenir.

$$\left[ \frac{\sigma_1}{(\sigma_1^T)_{ult}} \right]^2 - \left[ \frac{\sigma_1 \sigma_2}{(\sigma_1^T)^2_{ult}} \right] + \left[ \frac{\sigma_2}{(\sigma_2^T)_{ult}} \right]^2 + \left[ \frac{\tau_{12}}{(\tau_{12})_{ult}} \right]^2 < 1. \quad (6.11)$$

Bir laminadaki global gerilmeler göz önüne alınarak bu laminadaki lokal gerilmeler bulunabilir. Laminada hasar tespiti için verilen hasar teorisi uygulanır.

### 6.5. Tsai-Wu Hasar Teorisi

Bu teori, beltrami toplam şekil değiştirme enerjisi hasar teorisini baz alır. Tsai-Wu hasar teorisi, düzlem gerilmedeki bir lamina üzerindeki hasarı inceler. Aşağıdaki eşitsizliğin ihlal edilmesi durumunda laminanın hasara uğradığı düşünülür.



$$H_1\sigma_1 + H_2\sigma_2 + H_6\tau_{12} + H_{11}\sigma_1^2 + H_{22}\sigma_2^2 + H_{66}\tau_{12}^2 + 2H_{12}\sigma_1\sigma_2 < 1 \quad (6.12)$$

Tsai-Wu hasar teorisi, Tsai Hill hasar teorisinden daha geneldir. Çünkü laminanın basma ve çekme mukavemetlerinin her ikisinde hesaba katılır (Kaw 2006).

Hasar teorisine ait  $H_1, H_2, H_6, H_{11}, H_{22}, H_{66}$  sabitleri, 5 mukavemet parametresi kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

1. Ten yönlü laminaya  $\sigma_1 = (\sigma_1^T)_{ult}$ ,  $\sigma_2 = 0$ ,  $\tau_{12} = 0$  uygulandığı takdirde laminada hasar meydana gelecektir. Bu durumda denklem (6.12) aşağıdaki gibi yazılır.

$$H_1(\sigma_1^T)_{ult} + H_{11}(\sigma_1^T)_{ult}^2 = 1. \quad (6.13)$$

2. Ten yönlü laminaya  $\sigma_1 = -(\sigma_1^C)_{ult}$ ,  $\sigma_2 = 0$ ,  $\tau_{12} = 0$  uygulandığı takdirde laminada hasar meydana gelecektir. Bu durumda denklem (6.12) aşağıdaki gibi yazılır.

$$-H_1(\sigma_1^C)_{ult} + H_{11}(\sigma_1^C)_{ult}^2 = 1. \quad (6.14)$$

Denklem (6.13) ve (6.14) den,

$$H_1 = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_1^C)_{ult}}, \quad (6.15)$$

$$H_1 = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}(\sigma_1^C)_{ult}}. \quad (6.16)$$

3. Ten yönlü laminaya  $\sigma_1 = 0$ ,  $\sigma_2 = (\sigma_2^T)_{ult}$ ,  $\tau_{12} = 0$  uygulandığı takdirde laminada hasar meydana gelecektir. Bu durumda denklem (6.12) aşağıdaki gibi yazılır.

$$H_2(\sigma_2^T)_{ult} + H_{22}(\sigma_2^T)_{ult}^2 = 1. \quad (6.17)$$

4. Ten yönlü laminaya  $\sigma_1 = 0$ ,  $\sigma_2 = -(\sigma_2^C)_{ult}$ ,  $\tau_{12} = 0$  uygulandığı takdirde laminada hasar meydana gelecektir. Bu durumda denklem (6.12) aşağıdaki gibi yazılır.

$$-H_2(\sigma_2^C)_{ult} + H_{22}(\sigma_2^C)_{ult}^2 = 1. \quad (6.18)$$

Denklem (6.17) ve (6.18) den,

$$H_2 = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_2^C)_{ult}}, \quad (6.19)$$

$$H_2 = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}(\sigma_2^C)_{ult}}. \quad (6.20)$$

5. Ten yönlü laminaya  $\sigma_1 = 0$ ,  $\sigma_0 = 0$ ,  $\tau_{12} = (\tau_{12})_{ult}$  uygulandığı takdirde laminada hasar meydana gelecektir. Bu durumda denklem (6.12) aşağıdaki gibi yazılır.

$$H_6(\tau_{12})_{ult} + H_{66}(\sigma_1^T)_{ult}^2 = 1 \quad (6.21)$$

6. Ten yönlü laminaya  $\sigma_1 = (\sigma_1^T)_{ult}$ ,  $\sigma_1 = 0$ ,  $\tau_{12} = 0$  uygulandığı takdirde laminada hasar meydana gelecektir. Bu durumda denklem (6.12) aşağıdaki gibi yazılır.

$$-H_6(\tau_{12})_{ult} + H_{66}(\tau_{12})_{ult}^2 = 1. \quad (6.22)$$

Denklem (6.21) ve (6.22) den,

$$H_6 = 0, \quad (6.23)$$

$$H_6 = \frac{1}{(\tau_{12})_{ult}^2}. \quad (6.24)$$

Hasar teorisinde tek yönlü laminanın 5 mukavemet parametresinin nasıl bulunduğu incelendi. Direk olarak bulunamayan tek mukavemet parametresi  $H_{12}$  dir. Bu değer laminayı hasara uğratan iki eksenli gerilme durumunun deneysel olarak bulunması ve denklem (6.12) de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , ve  $\tau_{12}$  değerlerinin yerine koyulmasıyla bulunabilir.  $H_{12}$ 'nin hesaplanması için  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  sıfırdan farklı olmalıdır.  $H_{12}$  aşağıdaki deneysel metotlarla bulunabilir (Kaw 2006).

1. Tek yönlü laminaya iki malzeme eksenli boyunca eşit çekme yükü uygulanır.  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ ,  $\tau_{xy} = 0$  yükünde laminada hasar meydana geliyorsa denklem aşağıdaki gibi yazılır.

$$(H_1 + H_2)\sigma + (H_{11} + H_{22} + 2 H_{12})\sigma^2 = 1. \quad (6.25)$$

Denklem (6.24) den,

$$H_{12} = \frac{1}{\sigma^2} [1 - (H_1 + H_2)\sigma - (H_{11} + H_{22})\sigma^2] = 1. \quad (6.26)$$

Burada testlerin çekme yükü olma zorunluluğu yoktur. Aşağıdaki eşitlikler kullanılabilir.

$$\sigma_1 = \sigma, \sigma_2 = \sigma,$$

$$\sigma_1 = -\sigma, \sigma_2 = -\sigma,$$

$$\sigma_1 = \sigma, \sigma_2 = -\sigma,$$

$$\sigma_1 = -\sigma, \sigma_2 = \sigma. \quad (6.27)$$

$H_{12}$ 'yi bulmak için kullanılan bu deneysel metotta her dört testte birbirinden farklı  $H_{12}$  değeri bulunacaktır.

2. Tek eksenli çekme gerilmesi  $\sigma'_x$  e maruz  $45^\circ$  açılı bir lamina ele alınır. Hasara sebep olan  $\sigma_x$  gerilmesi not edilir. Eğer  $\sigma_x = \sigma$  ise denklem (6.1) yardımıyla hasardaki lokal gerilmeler aşağıdaki gibi bulunur. yükünde laminada hasar meydana geliyorsa denklem aşağıdaki gibi yazılır.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{2},$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma}{2},$$

$$\tau_{xy} = -\frac{\sigma}{2}, \quad (6.28a-c)$$

Eşitliklerden elde edilen lokal gerilmeler denklem (6.12) de yerine yazılırsa,

$$H_1 + H_2 = \frac{\sigma}{2} + \frac{\sigma^2}{4} (H_{11} + H_{22} + H_{66} + 2 H_{12}) = 1. \quad (6.29)$$

$$H_{12} = \frac{1}{2\sigma^2} [1 - (H_1 + H_2)\sigma - (H_{11} + H_{22})\sigma^2] = 1. \quad (6.30)$$

Ayrıca  $H_{12}$ 'nin bulunması için bazı ampirik formüllerde mevcuttur (Kaw 2006).

$$H_{12} = -\frac{1}{2(\sigma_1^T)_{ult}^2} \text{ Tsai- Hill hasar teorisine göre,}$$

$$H_{12} = -\frac{1}{2(\sigma_1^T)_{ult}(\sigma_1^C)_{ult}} \text{ Hoffman kriterine göre,} \quad (6.31a-c)$$

$$H_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}(\sigma_1^C)_{ult}(\sigma_2^T)_{ult}(\sigma_2^C)_{ult}}} \text{ Mises-Hencky kriterine göre}$$

bulunabilir.



## 7. MATERYAL VE METOD

Tez çalışmasında termoplastik maltrisli kompozit malzemelerin üretilmesi ve mekanik özelliklerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Matris malzemesi olarak polietilen, polipropilen ve poliamid termoplastik malzemeler kullanılmış olup, takviye malzemesi olarak cam elyaf kullanılmıştır. Üretim işleminde laminasyon tekniği kullanılmıştır. Elde edilen kompozit plakalar su jeti ile kesilerek ASTM standartlarında çekme, basma, kayma, üç nokta eğilme ve çentik darbe numuneleri hazırlanmıştır. Çekme ve basma numuneleri için ASTM standartlarında hazırlanan tablalar şekil 7.1’de görülen 3M DP8010 ve 3M DP8005 akrilik esaslı yapıştırıcılar ile yapıştırılıp teste hazır hale getirilmiştir.



**Şekil 7.1.** Çekme ve basma deney tablaları için kullanılan yapıştırıcılar

Deney için hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilen testler sonucunda numunelerin kırılma yüzeyleri deformasyon bölgeleri İnsize ISM-PM200S marka dijital mikroskopta incelenmiştir (şekil 7.2).



**Şekil 7.2.** Deney sonrası numunelerin incelendiği dijital mikroskop

### **7.1. Deneylerde Kullanılan Matris ve Takviye Malzemeleri**

Otomotiv endüstrisi başta olmak üzere birçok endüstri alanında termoplastik matrisli, cam elyaf takviyeli kompozit yapılara verilen önem artmıştır. Bunun sebebi olarak özgül mukavemetin yüksek oluşu, form verilebilirliği ve geri dönüşüm kabiliyeti gösterilebilir. Cam elyaf ise diğer elyaf çeşitlerine arasında düşük maliyete sahip olması açısından bu çalışmada tercih edilen takviye malzemesidir.

#### **7.1.2. Deneylerde Kullanılan Matris Malzemeleri**

Tez çalışmamızda üretilen ve deneyleri yapılan kompozit malzemelerin matris malzemeleri poliamid, polietilen ve polipropilendir. Bu malzemelerin mekanik özellikleri çizelge 7.1’de verilmiştir.

**Çizelge 7.1.** Matris ve takviye malzemeleri mekanik özellikleri

<b>Matris ve Takviye Malzemelerin Mekanik Özellikleri</b>						
<b>Malzemeler</b>	<b>Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Çekme Dayanımı (MPa)</b>	<b>Basma Dayanımı (MPa)</b>	<b>Eğilme Dayanımı (MPa)</b>	<b>Charpy Çentik Darbe Dayanımı (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Poisson Oranı</b>
Poliamid	1,07-1,14	60-70	70-90	27-50	15-25	0,39
Polietilen	0,92	20-28	15	28	12	0,4
Polipropilen	0,90	23-33	110	43	14	0,45
Cam Elyaf	2,55	1550				

#### **7.1.2.1. Poliamid**

Endüstriyel alanda çeşitli uygulama sahalarına sahip poliamid, kalıplama, ekstrüzyon, çözelti, kaplama ve döküm gibi yöntemlerde kullanılır. Tüm poliamid çeşitlerinin ortak özelliklerinden birisi elyaf ve takviye malzemelerle kuvvetlendirilebilir. Bu nedenle kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Poliamid 6 çeşitleri arasında en kolay şekil alma özelliğine sahip olan kristalin termoplastiktir.

Poliamidin özellikleri çeşitlerine bağlı olarak değişmektedir. Çeşitliliğe bağlı bu değişkenlik farklı alanlarda kullanılmasına olanak sağlayan bir durumdur. Genelde çok iyi yorulma mukavemeti, iyi sürünme mukavemeti ve oldukça iyi darbe mukavemeti (kristalinite derecesine bağlı) vardır. Kimyasal dirençleri ve elektriksel özellikleri iyi düzeydedir. Polimerizasyon esnasında kontrol edilebilen kristalinite derecesi poliamidin rijitliğini, mukavemetini ve ısıya karşı dayanıklılığını etkiler. Genelde düşük kristalinite derecesi tokluğu, uzamayı ve darbe mukavemetini yükseltir, fakat çekme mukavemeti ve rijitliği azaltır. İyi mekanik özelliklere ve katkılı halde iyi tribolojik özelliklere sahip olan poliamid, dişli çark, kam, kaymalı yatak, rulman kafesleri, kızak gibi elemanların imalatında kullanılır. Ayrıca aşınmaya karşı takım tezgahlarının kızaklarında kaplama olarak kullanılır (Toğuşoğlu 2011).

Yüksek kristalliğe sahip PA 6 düşük nem aktivitesine sahiptir. Ayrıca döküm yöntemi ile de imal edilebilen sentetik bir termoplastik olan PA 6, naylon türlerinin içinde

mekanik ve fiziksel özellikleri açısından en iyi olanıdır. PA 6' nın yoğunluğu 1.12-1.14 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişirken erime noktası 220 °C ve camsı geçiş sıcaklığı ise 50 °C' dir. PA 66 malzemesi yüksek ısı değerlerine karşı rijit bir davranış sergiler bu nedenle PA 6 ile özellikleri birbirine çok yakın olmasına rağmen erime noktasının daha yüksek olmasından dolayı yüksek ısı gerektiren durumlar için PA 66 kullanılır.

Poliamid genelde doğal renktedir, fakat üretim esnasında renk verebilir. PA 6 kimyasal yapısı ve kristal bünyesinden dolayı diğer plastiklerde bulunmayan birçok üstünlüklere sahiptir. Bu özelliklerinden bazıları aşağıda verilmiştir.

- Yüksek mekanik ve aşınma dayanımına sahip olması,
- Kolay işlenebilirlik,
- Sert fakat esnek olması nedeniyle yüksek darbe dayanımı,
- Yüksek elektrik izolasyonu,
- Rutubet, benzin ve solventlere karşı dayanıklılık,
- Geniş sıcaklık aralığında kullanılması (-50°C /+60°C)

#### **7.1.2.2. Polietilen**

Polietilen termoplastikler içerisinde en eski polimerlerden birisidir. İlk başlarda sadece düşük yoğunluklarda üretilen polietilen, teknolojik gelişmeler göstererek yüksek yoğunluklu, orta yoğunluklu ve lineer olmak üzere üç yeni polietilen türü polimer ailesine katılmıştır. Polimer molekülleri zincir şeklinde makro moleküllerden meydana gelir. Bu makro moleküllerin değişik dallanma durumları polietilenin çeşitliliğini sağlar. Polimer zincirindeki dallanmalar kristalliğin derecesini tayin eder. Lineer ve yüksek yoğunluklu polietilende dallanma çok az olup molekül yapısı doğrusaldır. Alçak yoğunluklu polietilende ise dallanma yok denecek kadar azdır. Orta yoğunluklu polietilende ise dallanma daha fazladır. Bu dört çeşit polietilen endüstriyel alanda sıklıkla kullanılan polimerik malzemelerdir. Bu polimer çeşitleri endüstride özel isimlerde adlandırılırlar.

AYPE : LDPE : Alçak yoğunluklu polietilen

YYPE : HDPE : Yüksek yoğunluklu polietilen

OYPE : MDPE : Orta yoğunluklu polietilen



LAYPE : LLDPE : Lineer alçak yoğunluklu polietilen

Alçak yoğunluklu polietilen (AYPE) 1200-3000 atm basınç ve 130-350°C sıcaklıkta, organik peroksitlerin yardımıyla polimerize olur. AYPE'nin yoğunluğu 0.910-0.925 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişir.

Yüksek yoğunluklu polietin (YYPE) ise titanyum tetraklorür katalizör ve organometalik kokatalizörler yardımıyla 10-20 atm basınç ve 70-80 °C sıcaklıkta etilenin polimerizasyonu sonucu elde edilir. YYPE dallanmamış moleküler yapıya sahip olup yoğunlukları 0.948-0.968 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişir.

Lineer alçak yoğunluklu polietilen (LAYPE) 1985'li yıllarda hızlı bir şekilde ortaya çıkan polietilen türü olup düşük basınç ve düşük sıcaklıkta gaz fazı reaktörlerde üretilir. Yoğunluğu normal AYPE gibi olup düşüktür

Polimer malzemeler içerisindeki kristallik seviyesi arttıkça sertlik artar, mekanik ve kimyasal özellikler iyileşir ve sıvı ile gazlara karşı dayanıklılık artar. Polimerlerde bu dayanıklılıkların artması için polimer içerisine bir takım kimyasallar ilave edilebilir. Bu işlem eritilip basınç altında karışma yöntemiyle yapılır.

Polietilen malzemelerin film tabakaları parlak, şeffaf ve ucuz olup işlenmesi kolaydır. Bu malzemeler gıda paketlenme işlemlerinde, ziraat ve inşaat alanlarında kullanılan örtü, poşet ve sarma uygulamalarında sıklıkla kullanılırlar. Ayrıca benzin depoları, süt ve su kapları, tel ve kablo imalatında kullanılırlar.

### **7.1.2.3. Polipropilen**

En çok tercih edilen plastiklerden olan polipropilen, petrokimyasal hammaddeden yapıldığından en ucuz plastiklerden biridir. Polietilenden polipropilen geçerken polimer zincirinde her iki karbon atomundan birinin üzerine bir metil grubun yerleşir. Bunun sonucunda zincirin dönmesi engellenerek, daha dayanımlı fakat daha az eğilebilir bir malzeme meydana gelir. Zincirdeki metil grupları aynı zamanda cam geçiş sıcaklığını da yükseltir, bu nedenle polipropilen polietilenden daha yüksek erime ve ısı dayanım sıcaklığına sahiptir. Erime noktası 165–177°C arasında olan PP, 120°C'de biçim değişikliğine uğramadan rahatlıkla kullanılabilir. PP bir takım üstün özelliklerinden dolayı endüstride sıklıkla kullanılmaktadır. Bunlar özellikler arasında İyi

kimyasal, nem ve ısı direnci, düşük yoğunluğu (0.90–0.91 g/cm<sup>3</sup>), iyi yüzey sertliği ve boyutsal kararsızlığı, uzun bükülme ve burulma ömrünü sayabiliriz. PP uzun bükülme ve burulma ömrüne sahiptir.

PP için en önemli uygulama alanları ev eşyaları, mutfak aletleri, paketleme malzemesi, laboratuvar eşyaları ve çeşitli şişelerdir. Taşıtlarda yüksek dayanımlı PP bağlaşık polimerleri, akü kabında lastiğin yerini almıştır. Aynı reçineler tampon ve çamurluk etekleri için de kullanılmaktadır. Dolgulu polipropilen yüksek ısı dirence sahip olduğu için otomobil fan ve ısıtıcı kanallarında kullanılmaktadır. PP türdeş polimeri halı desteği ve sanayi ürünleri taşınmasında torba olarak kullanılmaktadır. PP aynı zamanda yumuşak malzemeleri sarmak için ince film olarak ve paketleme kutu burgu ve kapağı olarak kullanılmaktadır (Smith 2012).

### **7.1.3. Deneyleerde Kullanılan Takviye Malzemeleri**

#### **7.1.3.4 Cam Elyaf**

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmakla beraber en sık rastlanan takviye elemanı cam elyaflardır. Cam elyaflar birçok yüksek özelliklere sahiptirler. Bu özellikler değişik malzemelerin takviye edilmesi ile geliştirilebilir ve kullanım alanları genişletilebilir. Düşük maliyeti, yüksek gerilim mukavemeti, yüksek kimyasal direnci ve mükemmel yalıtma özellikleri, yüksek çekme mukavemeti ve düşük uzama oranına sahip olması, cam elyaflarının avantajları arasındadır. Düşük gerilim modülü, yüksek yoğunluğu, kullanım esnasında aşınmaya karşı olan duyarlılığı, düşük yorulma direnci ve yüksek sertliği de dezavantajlarıdır.

Cam elyafı ürünlerini, üretim proseslerine ve kullanım amaçlarına bağlı olarak;

- Çok uçlu fitil (kırılabilir fitil)
- Tek uçlu fitil (direk sarma fitili)
- Keçe (sıvı bağlayıcı keçe, toz bağlayıcı keçe)
- Dokunmuş kumaş
- Kırılmış demet şeklinde üretilir (asi 2008).

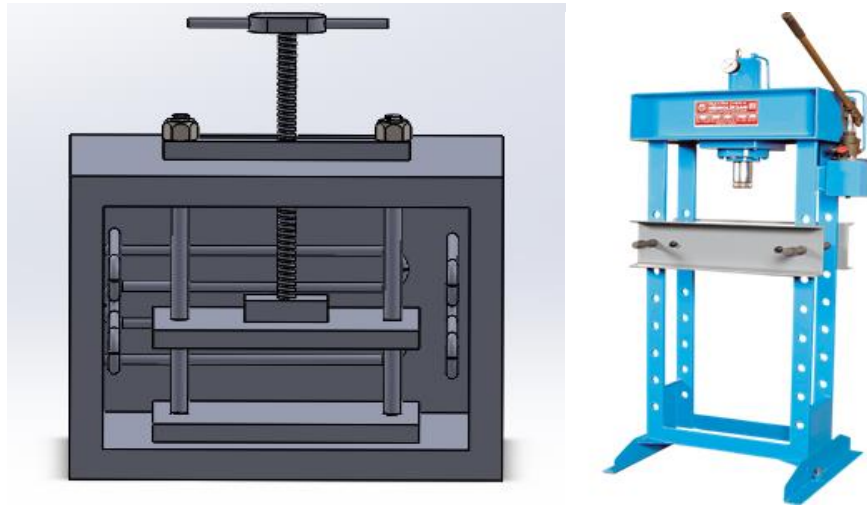
Bu çalışmada takviye malzemesi olarak termoplastik uyumlu 0.3 K boyutlarında cam elyaf kullanılmıştır. Cam elyaf matris üzerine [0/90] düzeninde yerleştirilip laminasyon yöntemi ile kompozit üretimi yapılmıştır.

## 7.2. Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Laminasyon Yöntemi ile Üretimi

Bu çalışmada cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelerin mekanik davranışlarını incelemek amacıyla [0/90] düzeninde yerleştirilen cam elyaflar laminasyon yöntemiyle 8 ile 14 katman aralıklarında üretilmişlerdir. Üretim çalışmalarımız Uludağ Üniversitesi kompozit laboratuvarında yapılmıştır. Kompozit malzeme üretiminde matris malzemesi olarak poliamid, polipropilen ve polietilen kullanılmıştır. Farklı polimerlerin kullanılma sebebi cam elyaf ile uyumu ve kompozit malzemenin mekanik özelliklerine etkisinin incelemesidir.

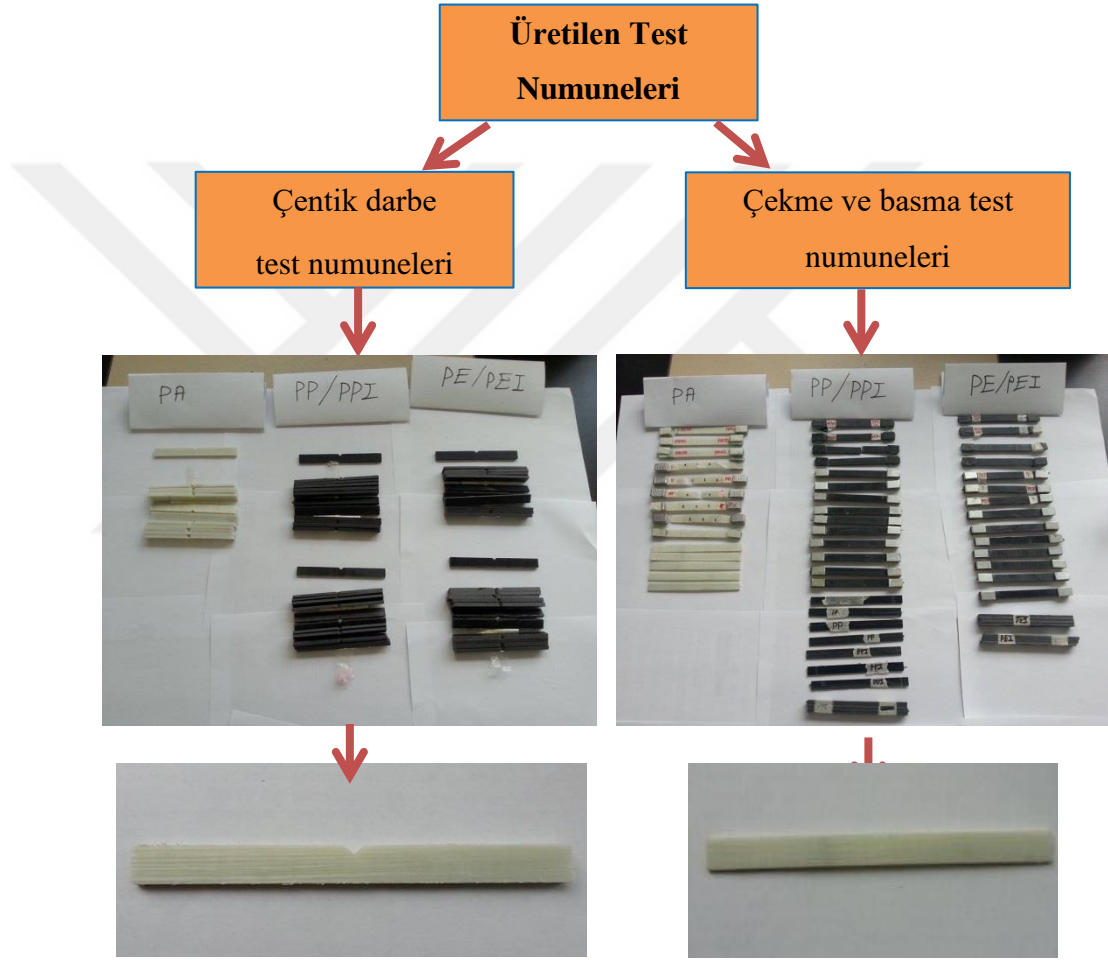
Termoplastik kompozit malzemelerin laminasyon yöntemiyle üretiminde iki farklı cihaz kullanılmıştır. Bunlar şekil 7.3'de gösterilen sıcaklık ayarlı vidalı pres ve 40 ton kapasiteli hidrolik prestir.

Üretim çalışmasında ilk olarak iki matris levha arasında gergin halde yerleştirilmiş cam elyafların vidalı pres altında 200°C'de 8 dakika bekletilip fiberin matris içerisine dağılması sağlanmıştır. Daha sonra hidrolik pres ve 100 bar basınç altında 5 dakika bekletilerek 0.20 mm ile 0.375 mm kalınlığında kompozit katmanların üretimi tamamlanmıştır.

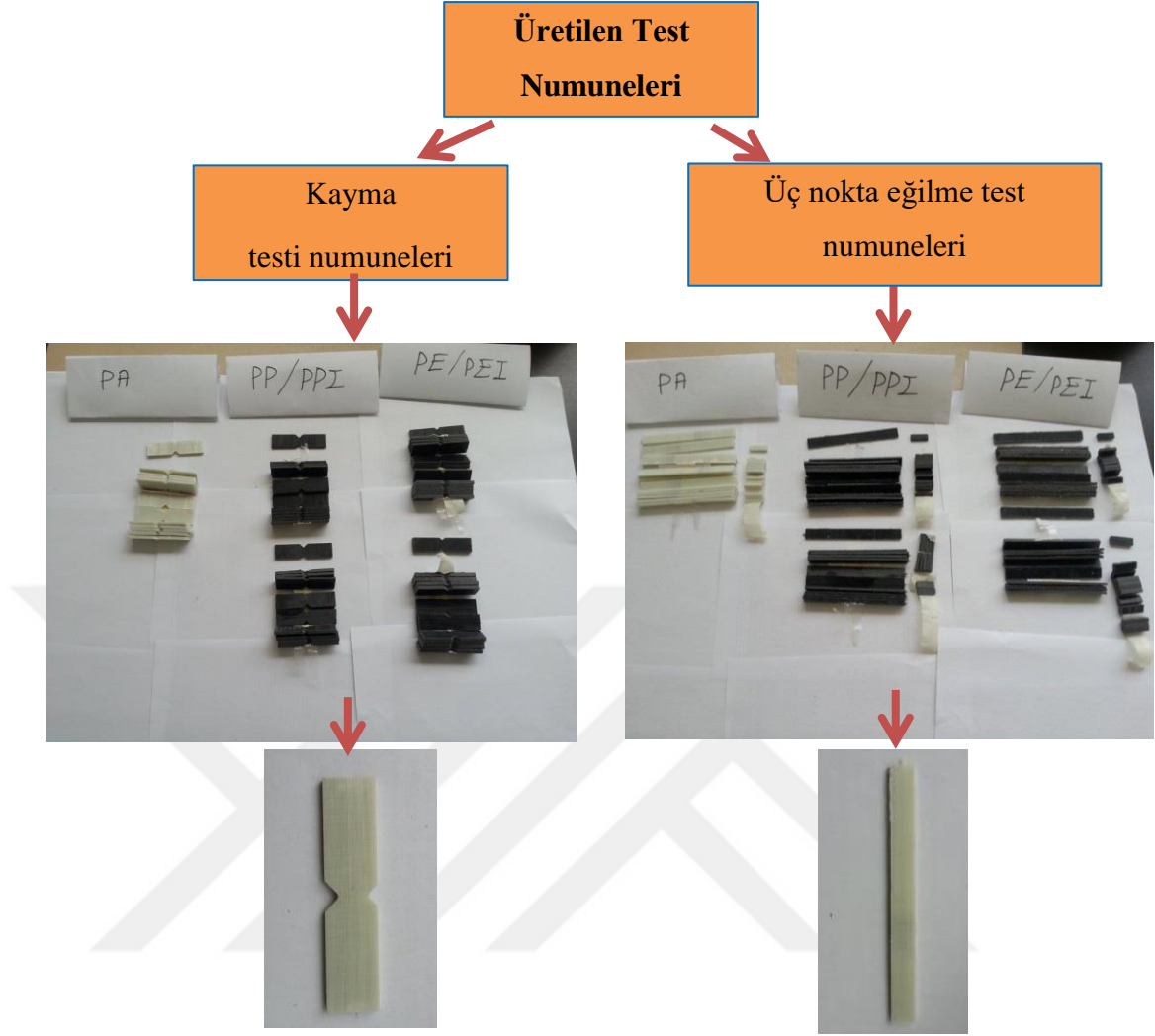


Şekil 7.3. Isıtma sistemli vidalı pres ve hidrolik pres

Üretilen bu katmanlar birbirlerine dik konumda lamina edilerek farklı kalınlıklarda [0/90] düzeninde kompozit malzemeler üretilmiştir. Bu üretim işlemi polipropilen, polietilen ve poliamid matris malzemeleri için yapılmıştır. Üretilen kompozit plakalar su jeti kesilerek ASTM standartlarında çekme, basma, kayma, çentik darbe ve üç nokta eğilme numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler şekil 7.4 ve şekil 7.5’de gösterilmiştir.



Şekil 7.4. Çentik darbe, çekme ve basma test numuneleri



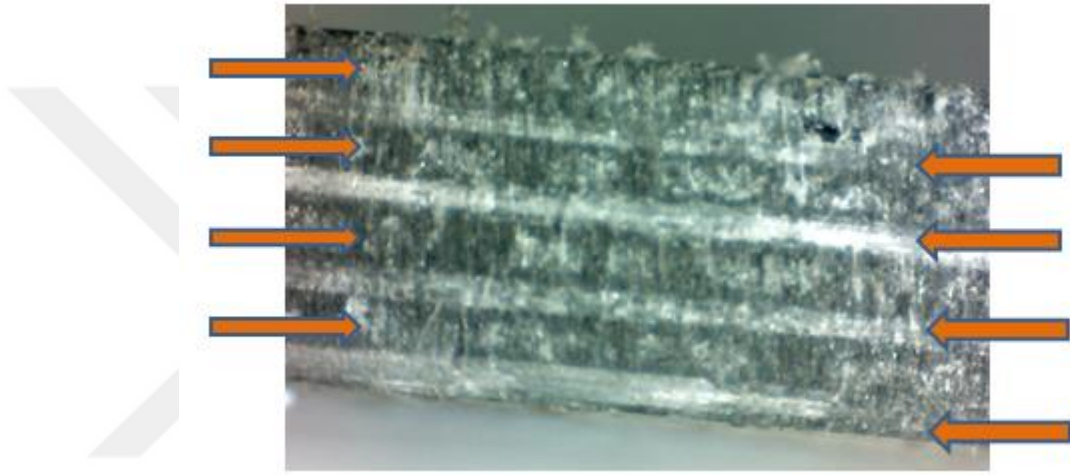
Şekil 7.5. Kayma ve üç nokta eğilme test numuneleri

### 7.3. DeneYler

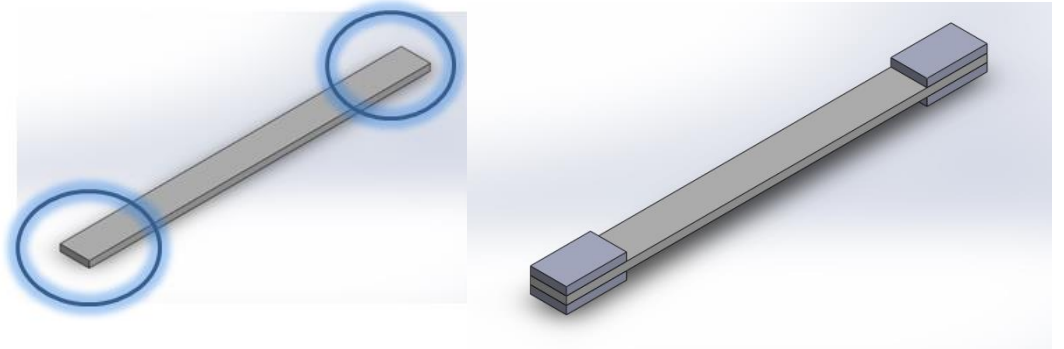
#### 7.3.1. Çekme DeneYleri

Mühendislik malzemeleri rijit olmadığından kuvvet altında deforme olup, şekil ve boyut değişiklikleri gösterirler. Malzeme özelliklerini anlamak üzere mekanik testler yapılır. Bunlardan en önemlisi “çekme deneyidir. Çekme deneyi malzemelerin statik yük altındaki elastik ve plastik davranışlarını belirlemek amacıyla yapılır. Standartlara göre kesilen numuneler çekme cihazına bağlanarak, eksenle ve değişken kuvvetler uygulanır.

Çekme deneyi numuneleri ASTM D3039 standardına göre 0/90 fiber doğrultusunda hazırlanmıştır. PA ve PE çekme deney numuneleri 140mm-12mm-2,6mm boyutlarında olup PP numuneleri 140mm-12mm-2mm boyutlarındadır. Kalınlıkları 2,6 mm olan PA ve PE matris malzemeli numuneler 0,325 mm kalınlığında 8 adet matris plaka ile hazırlanırken 2mm kalınlığa sahip PP matris malzemeleri numuneler 0,25 mm kalınlığında 8 adet matris plakadan oluşmaktadır (şekil 7.6). Kompozit malzemelerin çekme deneylerini yapmak için alüminyum malzemelerden kenar plakaları (end-tab) hazırlanmıştır (şekil 7.7).

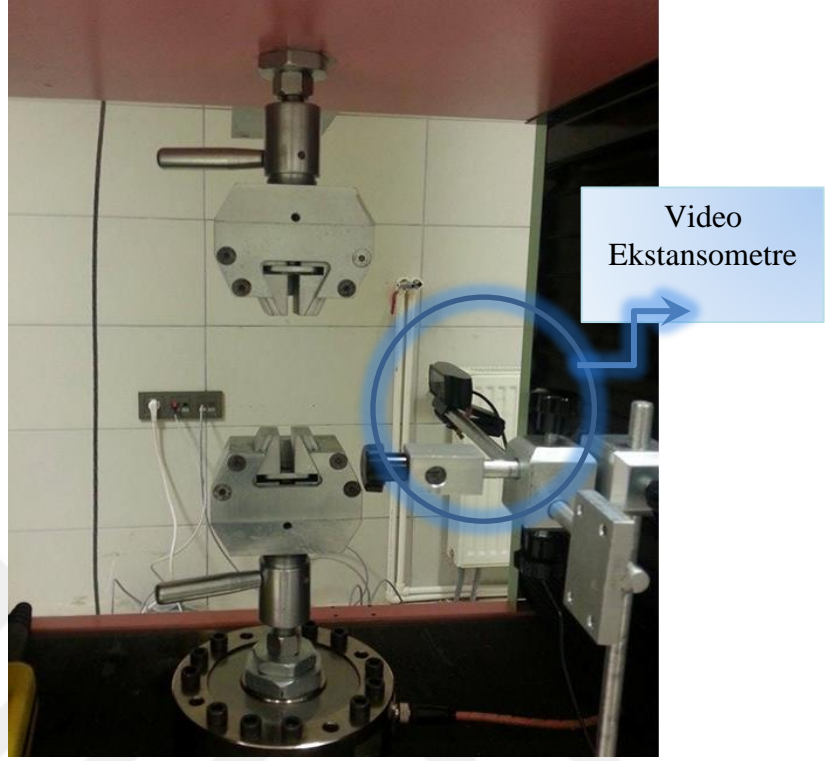


**Şekil 7.6.** Çekme deney numunelerinin 0/90 doğrultulu 8 katmanlı lamina düzeni



**Şekil 7.7.** Çekme Numuneleri

Çekme deneyleri 10 (mm/dk) sabit hızla yapılmış olup sonuçlar şekil 7.8’de gösterilen video ekstansometre ile ölçülmüştür.



Şekil 7.8. Çekme deneyi düzeneği

### 7.3.2. Basma Deneyleri

Basma deneyinin amacı; üretilen poliamid, polietilen ve polipropilen matrisli termoplastik kompozit numunelerin maksimum basma mukavemetinin hesaplanmasıdır. İlk olarak bu test için ASTM D3410 standartlarına göre 0/90 fiber doğrultusunda basma numuneleri hazırlanmıştır. PA ve PE matris malzemeli çekme deney numuneleri 140mm-12mm-2,6mm boyutlarında olup PP matris malzemeli numuneler 140mm-12mm-2mm boyutlarındadır. Kalınlıkları 2,6 mm olan PA ve PE 0,325mm kalınlığında 8 adet matris plaka ile hazırlanırken 2mm kalınlığa sahip PP numuneleri 0,250mm kalınlığında 8 adet matris plakadan oluşmaktadır (şekil 7.9). Kompozit malzemelerin basma deneylerini yapmak için alüminyum malzemelerden kenar plakaları (end-tab) hazırlanmıştır (Şekil 7.10).





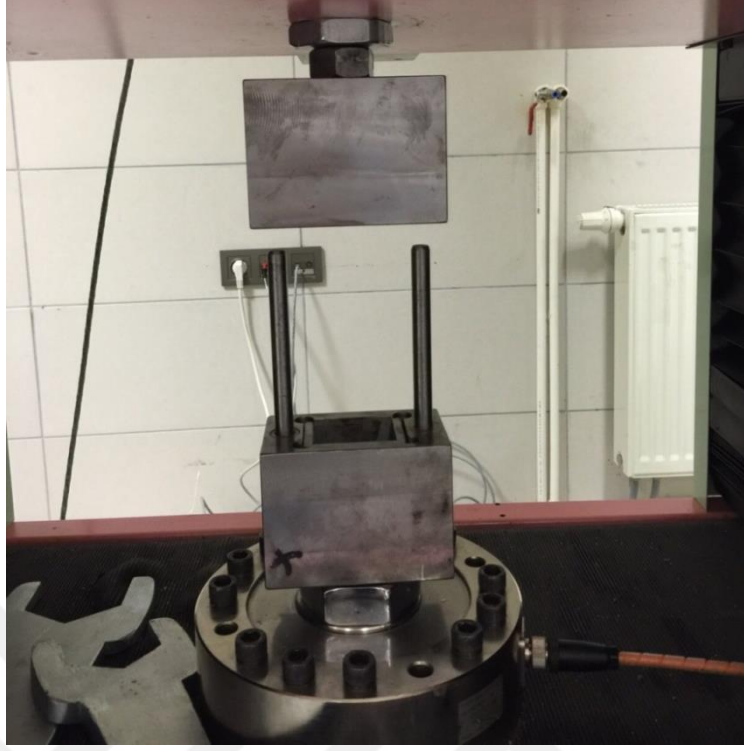
**Şekil 7.9.** Basma deney numunelerinin 0/90 doğrultulu 8 katmanlı lamina düzeni



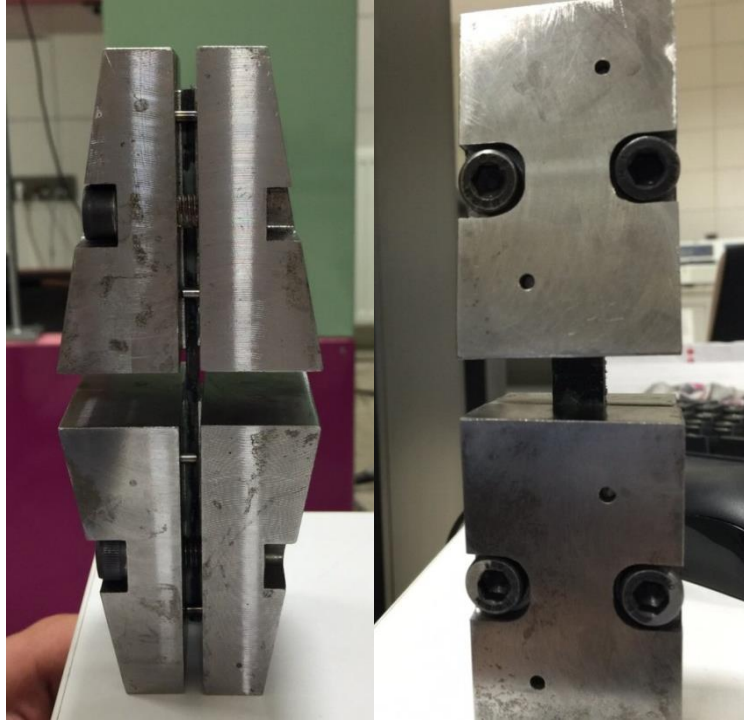
**Şekil 7.10.** Basma numuneleri end-tab hazırlanması

Basma deney numunelerinin test edilmesi için standartlara uygun olarak basma deney aparatı imal edilmiştir. Aparat şekil 7.11’de gösterilen sabit ve hareketli çeneler ve şekil 7.12’de gösterilen numunenin sıkıştırıldığı çeneden oluşmaktadır.





**Şekil 7.11.** Basma çeneleri



**Şekil 7.12.** Basma numuneleri sıkıştırma çenesi

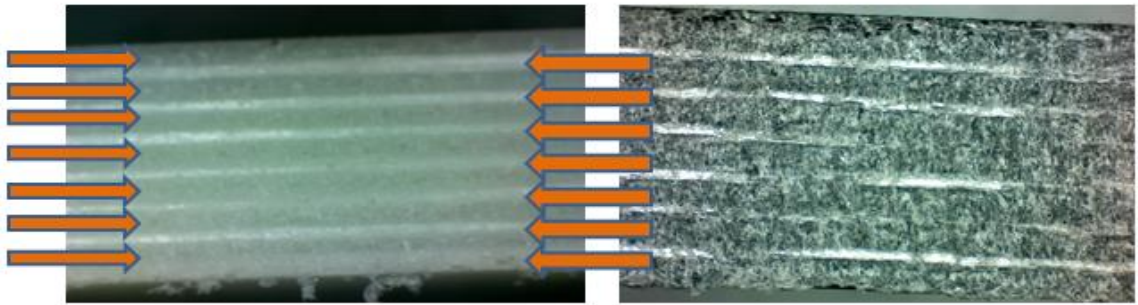
Deneylerde farklı matrisli kompozit malzemeler için 5'er adet basma deney numuneleri test edilmiştir.

### 7.3.3. Çentik Darbe Deneyleri

Çentik darbe deneyinin amacı, malzemenin bünyesinde bulunan gerilim konsantrasyonunun (gerilim birikiminin) darbe esnasında çentik tabanında suni olarak teşkil ettirilip, malzemenin bu durumda dinamik zorlamalara karşı göstereceği direnci tayin etmektir.

Otomotiv sanayinde hafifletme çalışmaları neticesinde kompozit malzemelere olan ilgi artmıştır. Özellikle yüksek çarpışma mukavemetlerinden dolayı darbelere maruz kalabilecek bölgelerde kompozit malzemelerin kullanıldıkları görülmektedir. Bu doğrultuda üretilen kompozit malzemelerin darbelere karşı gösterdikleri davranışlar incelenmiştir.

Çentik darbe deneyleri cam elyaf takviyeli poliamid, polietilen ve polipropilen termoplastik kompozit tabakaların kırılma enerjilerinin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan test numuneleri ASTM D6110 standartlarında 0/90 fiber doğrultusunda hazırlanmıştır. PA ve PP çentik darbe deney numuneleri 126mm-13mm-4,5mm boyutlarında olup PE numuneleri 126mm-13mm-5mm boyutlarındadır. Kalınlıkları 3 mm olan PA ve PP 0,310 mm kalınlığında 14 adet matris plaka ile hazırlanırken 5 mm kalınlığa sahip PP numuneleri 0,36 mm kalınlığında 14 adet matris plakadan oluşmaktadır (şekil 7.13).



**Şekil 7.13.** Çentik darbe deney numunelerinin 0/90 doğrultulu 14 katmanlı lamina düzeni

Deneylerde farklı matrisli kompozit malzemeler için 5'er adet charpy çentik darbe numuneleri test edilmiştir. Yapılan çentik darbe deneylerinde Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan çentik darbe deney cihazı kullanılmıştır (şekil 7.14).



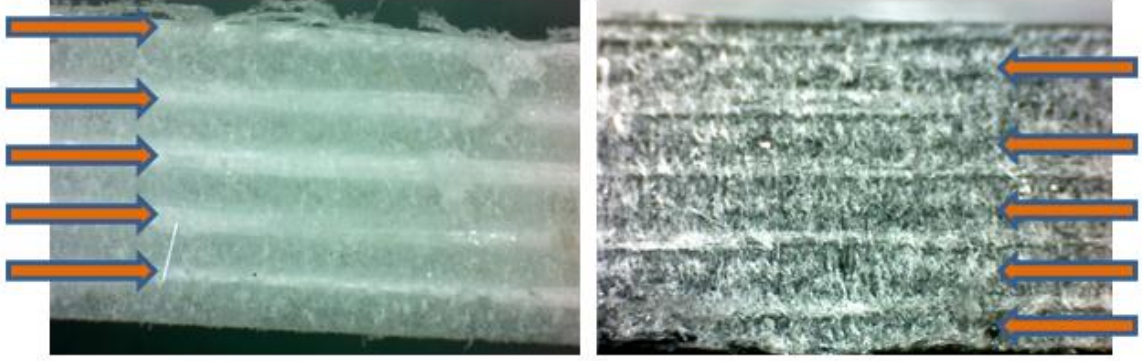
**Şekil 7.14.** Çentik darbe deney cihazı

#### **7.3.4. Üç Nokta Eğilme Deneyleri**

Üç nokta eğilme deneyi, malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacı ile yapılır. Eğilme deneyi ile malzemenin elastisite modülü, eğilme momenti, ve maksimum sehim miktarı tespit edilir.

Üç nokta eğilme deneyleri cam elyaf takviyeli poliamid, polietilen ve polipropilen termoplastik kompozit tabakaların eğilme anında gösterdikleri dayanımı incelemek

amacıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan test numuneleri ASTM D790 standartlarına uygun hazırlanmış olup 126mm-12,7mm-3,2mm boyutlarıdır. 0,320 mm kalınlığında 10 adet matris plakanın 0/90 fiber doğrultusunda hazırlanması sonucu 3,2 mm kalınlık elde edilmiştir (şekil 7.15).



**Şekil 7.15.** Üç Nokta Eğilme deney numunelerinin 0/90 doğrultulu lamina düzeni

Deneyleerde farklı matrisli termoplastik kompozit malzemeler için 5'er adet üç nokta eğilme numuneleri test edilmiştir (şekil 7.16).

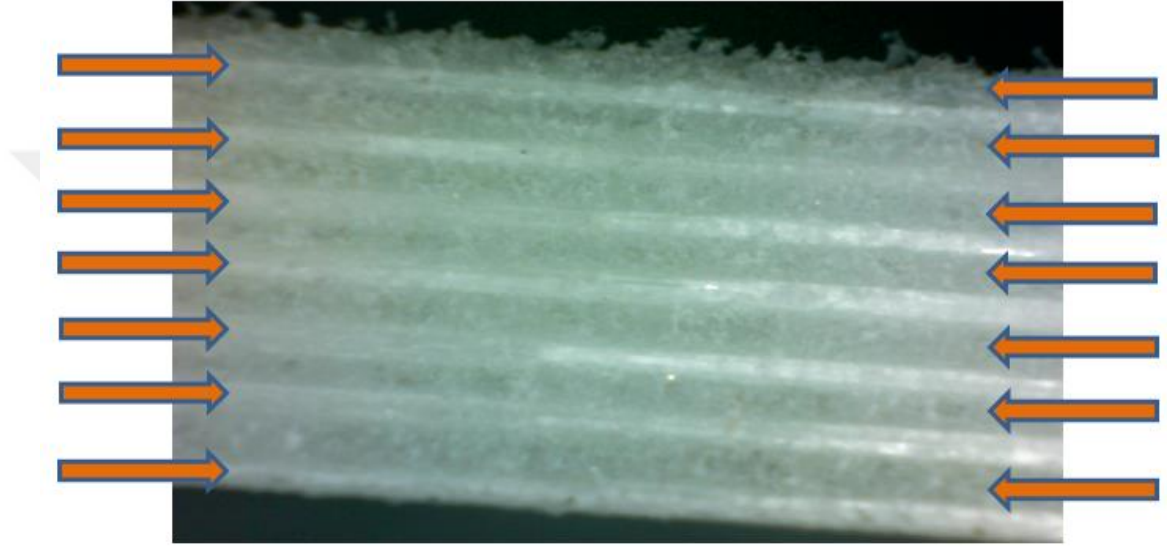


**Şekil 7.16.** Üç Nokta Eğilme Deney Düzenegi

### 7.3.5. Kayma Deneyleeri

Kompozit malzemelerde tabakalanmış sistemlerin kayma karakterizasyonu malzemenin mukavemet değerleri açısından önem teşkil etmektedir.

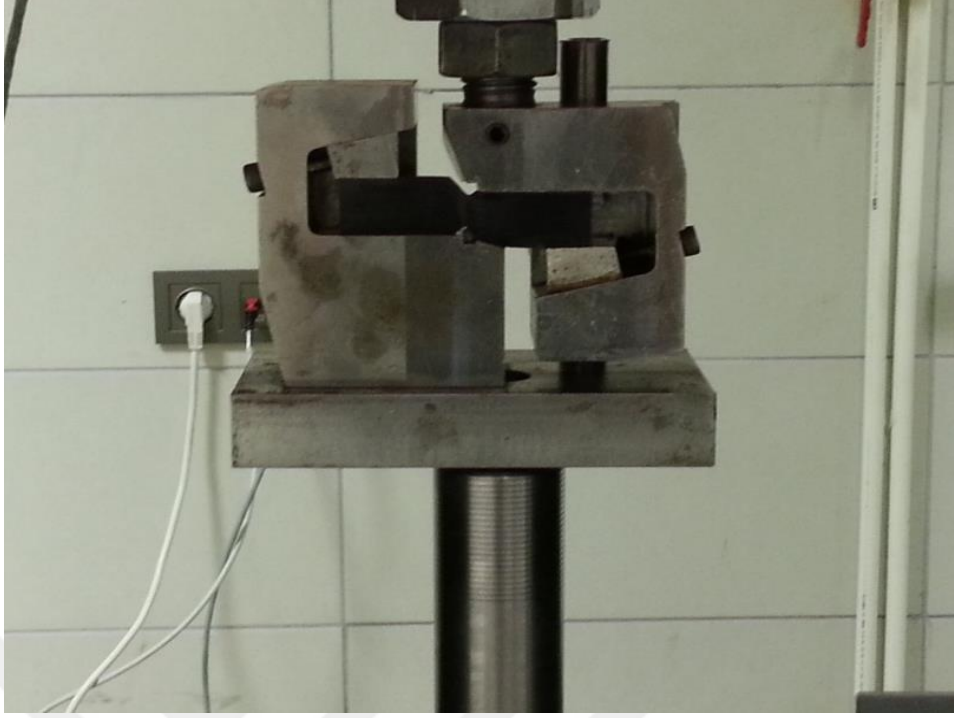
Kayma deneyleri cam elyaf takviyeli poliamid, polietilen ve polipropilen termoplastik kompozit tabakaların kayma yönünde gelen kuvvetlere karşı gösterdikleri dayanımı incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan test numuneleri ASTM D5379 standartlarına uygun hazırlanmış olup poliamid ve polietilen matrisli numuneler için 76mm-19mm-4mm boyutlarında, Polietilen matrisli numuneler için 76mm-19mm-5mm boyutlarındadır. Deney numuneleri 14 adet matris plakanın 0/90 fiber doğrultusunda hazırlanması sonucu elde edilmiştir (şekil 7.17).



**Şekil 7.17.** Kayma deney numunelerinin 0/90 doğrultulu lamina düzeni

Deneylerde PA, PE ve PP matrisli termoplastik kompozit malzemeler için 5'er adet kayma numuneleri test edilmiştir. Kayma deneyleri için özel olarak tasarlanan kayma aparatı ile gerçekleştirilmiştir (şekil 7.18).





**Şekil 7.18.** Kayma deneyleri için üretilen kayma deney aparatı

## 8. SONUÇLAR

### 8.1. Deneysel Sonuçlar

Poliamid, polietilen ve polipropilen matrisli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelerin çekme, basma, çentik darbe, üç nokta eğilme ve kayma deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda numunelerin deformasyon bölgeler incelenmiş, elyaf yüzeylerinde matris partiküllerine rastlanmıştır. Bu sonuç bize matris ile elyaf yüzeylerinde ıslanmanın var olduğunu göstermektedir.

#### 8.1.1. Çekme Deney Sonuçları

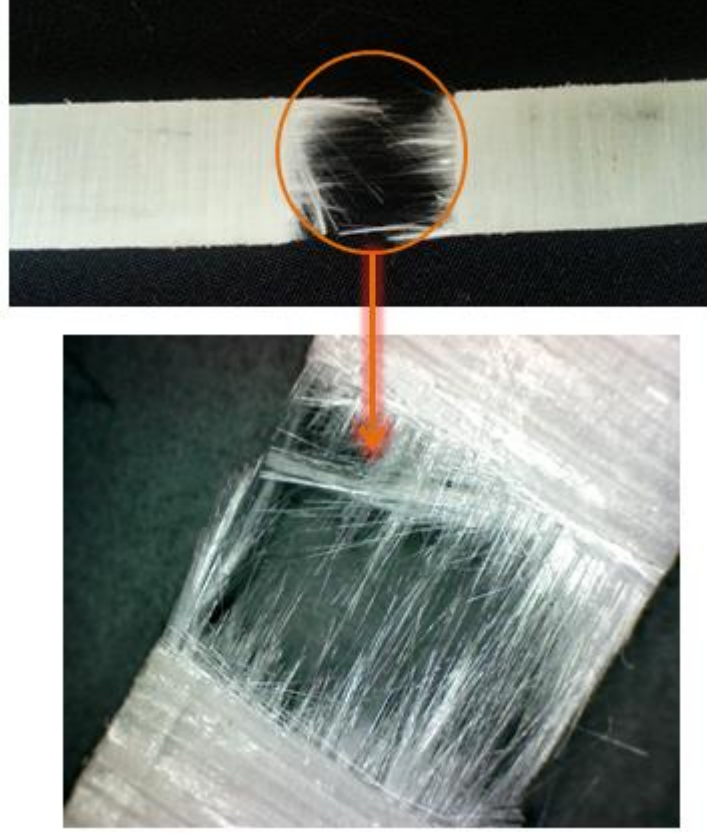
Çekme deneyi sonrasında çok katmanlı kompozit numunelerin teorik sonuçları denklem 9.1'de verilen eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır (çizelge 8.1). Yapılan çekme deneylerinde teorik verilere yakın sonuçlar elde edilmesi amaçlanmaktadır.

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad (9.1)$$

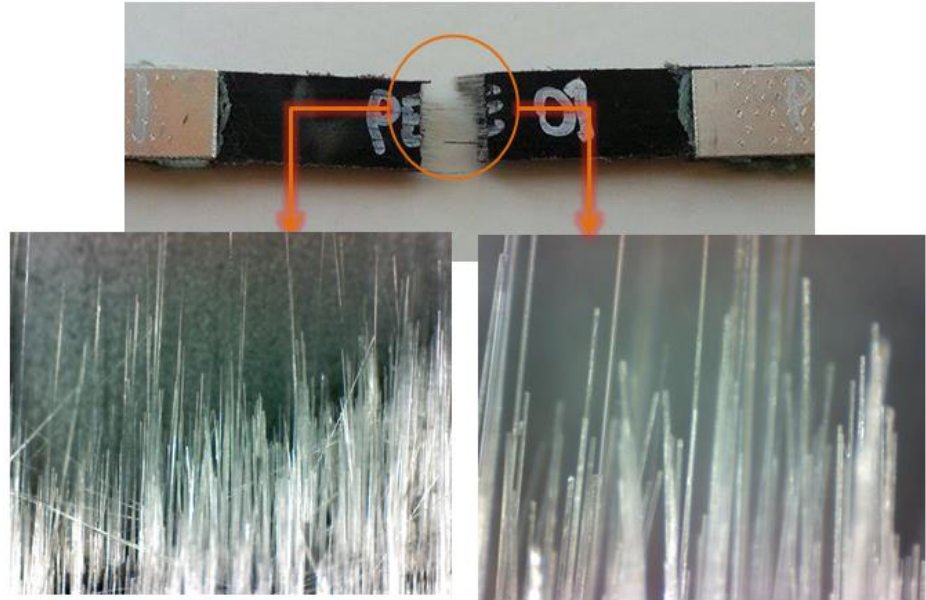
Çizelge 8.1. Kompozit boyuna çekme mukavemet değerleri

Boyuna Çekme Mukavemeti Teorik Sonuçlar					
	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_f$ (MPa)	$v_f$	$\sigma_m$ (MPa)	$V_m$
PA	374,09	1550	0,214	54	0,785
PE	373,45	1550	0,2285	25	0,771
PP	338	1550	0,212	12	0,778

PA, PE ve PP matrisli termoplastik kompozit malzemenin çekme deneyi esnasında kopma bölgeleri sırasıyla şekil 8.1, şekil 8.2 ve şekil 8.3'de gösterilmiştir.

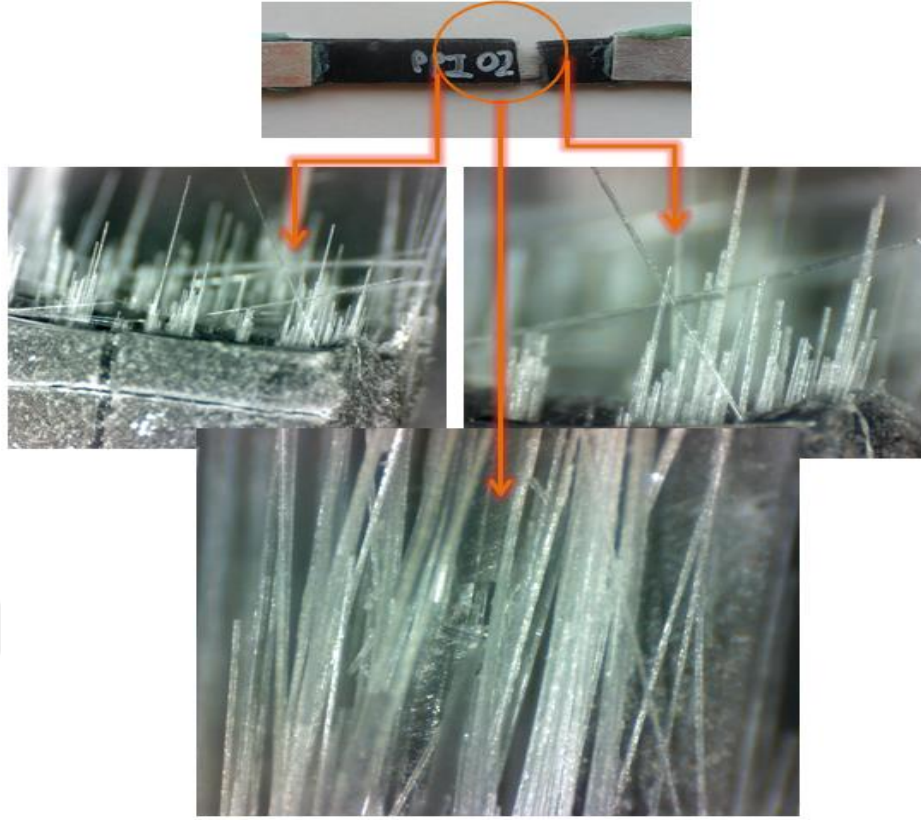


**Şekil 8.1.** PA matrisli TPC malzeme çekme deneyi kopma bölgesi



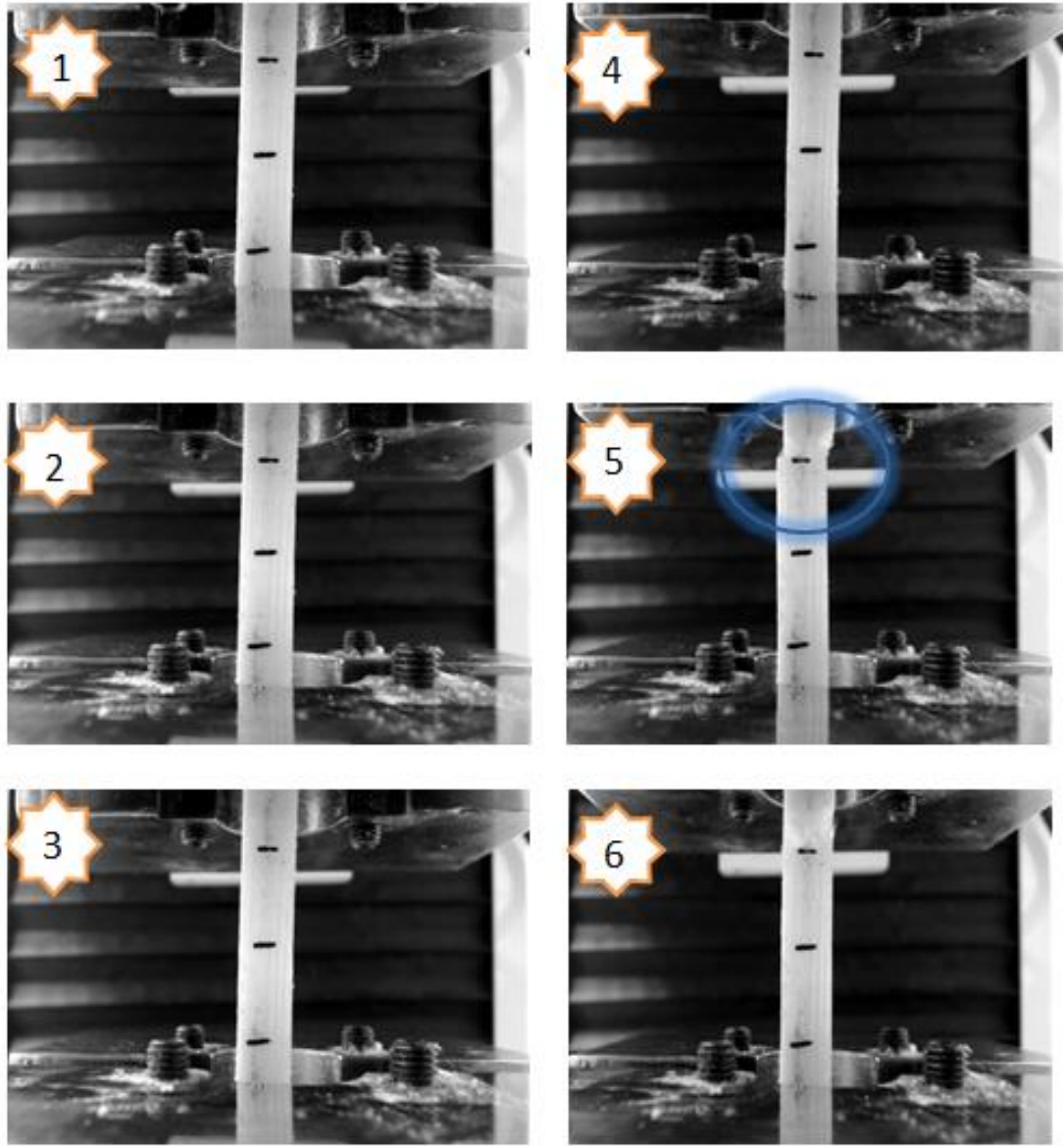
**Şekil 8.2.** PE matrisli TPC malzeme çekme deneyi kopma bölgesi





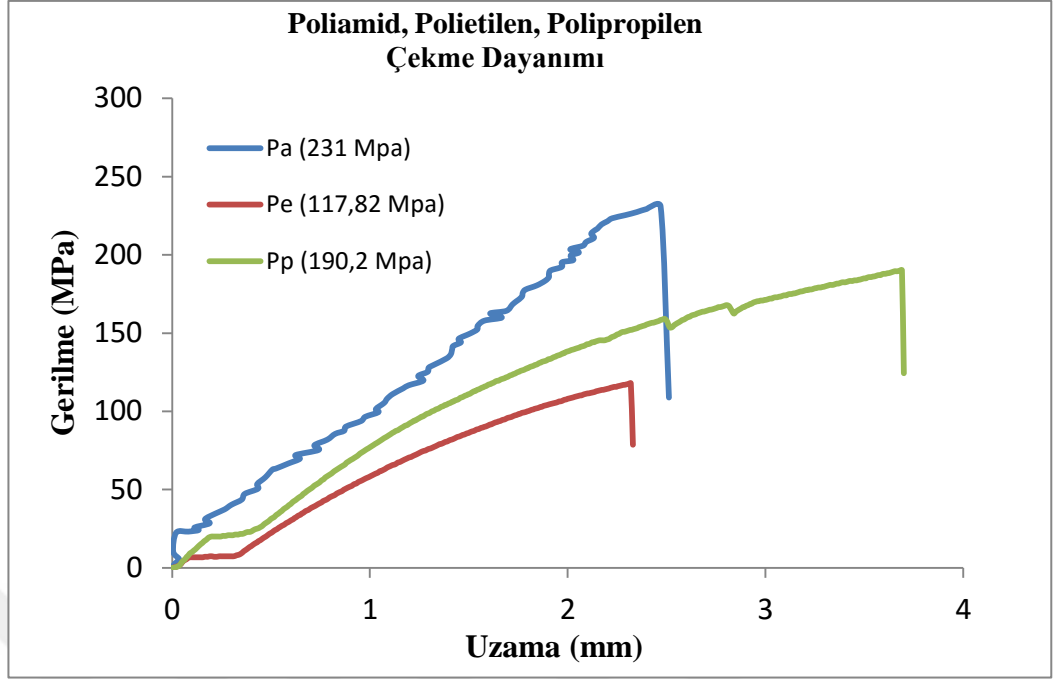
**Şekil 8.3.** PP matrisli TPC malzeme çekme deneyi kopma bölgesi

Çekme deneyleri ekstansometre ile test edilmiştir. Test esnasında farklı yükleme anlarında alınan görüntüler çekme deneyi başlangıcı ile bitişi arasında şekil değişimini göstermektedir (Şekil 8.4).



**Şekil 8.4** PA matrisli TPC malzeme çekme deneyi esnasında oluşan şekil değişimleri

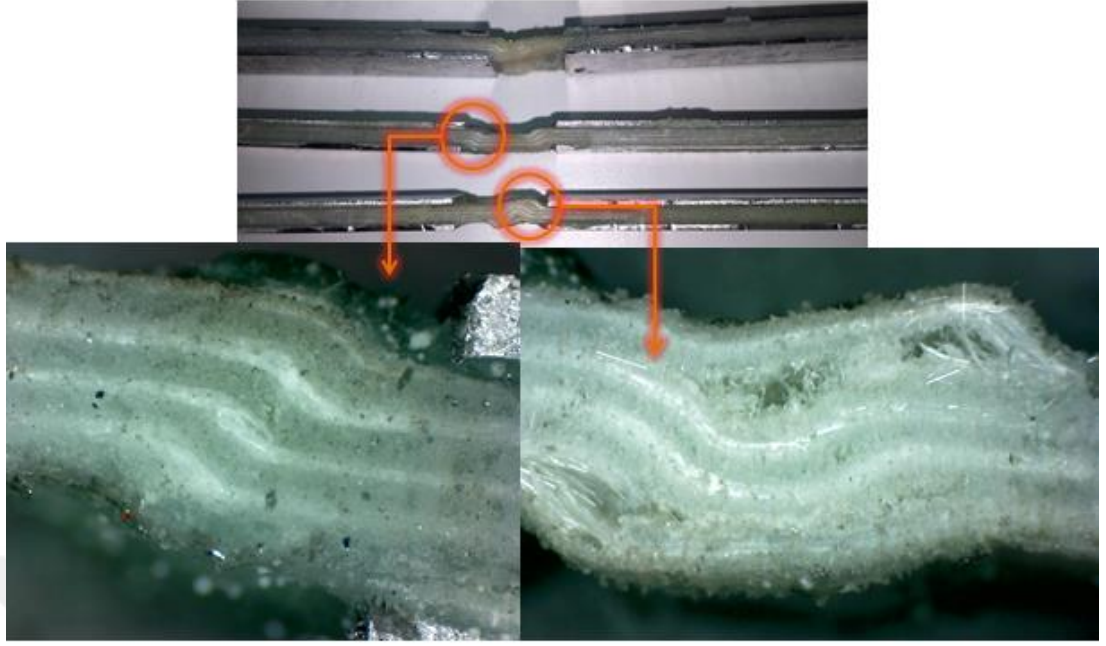
Poliamid, polietilen ve polipropilen matrisli cam elyaf kompozit malzeme çekme deneyleri sonucunda sırasıyla 231 MPa, 117,82 MPa ve 190,2 MPa çekme gerilmeleri elde edilmiştir (Şekil 8.5). Bu sonuçlar neticesinde PA matrisli cam elyaf kompozit malzemenin en yüksek çekme gerilmesine sahip olduğu görülmüştür. 370 MPa çekme gerilmesine sahip St37 çeliğinden yoğunluk değerleri dikkate alındığında PA ve PP matrisli cam elyaf termoplastik kompozit malzemenin çok daha dayanıklı olduğu sonucuna varılabilir.



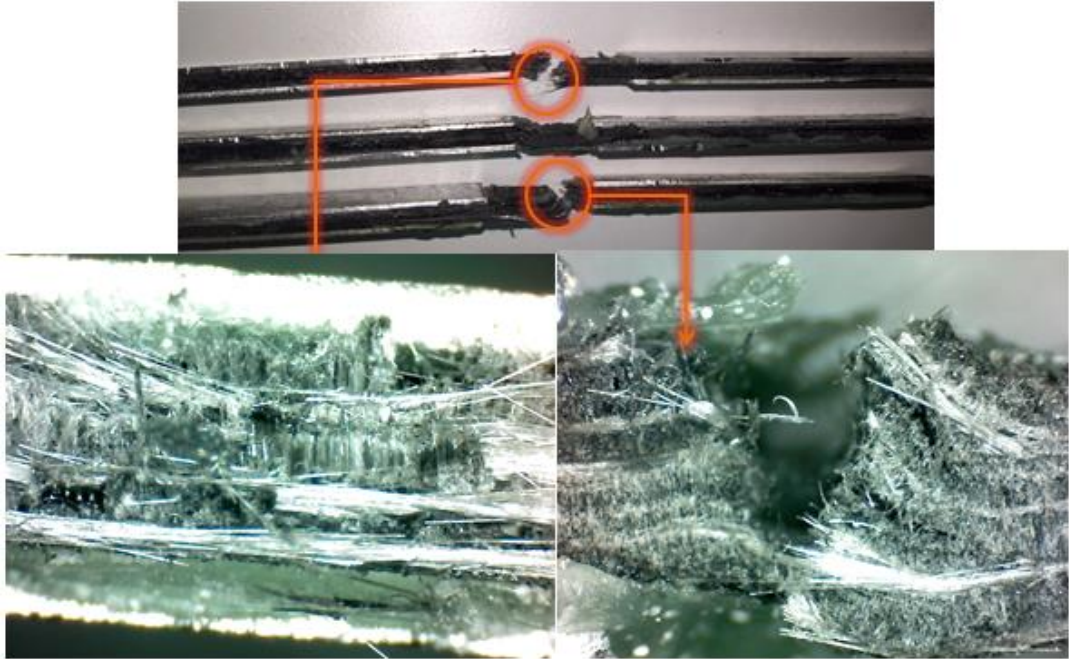
Şekil 8.5 PA, PE, PP matrisli TPC malzemelerin çekme deney sonuçları

### 8.1.2. Basma Deney Sonuçları

Deneyleerde kullanılan basma test numunelerinin basma anında deforme olan bölgeleri, cam elyafın ıslanma durumları poliamid, polietilen ve polipropilen matrisli olmak üzere sırasıyla şekil 8.6, şekil 8.7 ve şekil 8.8’de gösterilmiştir.

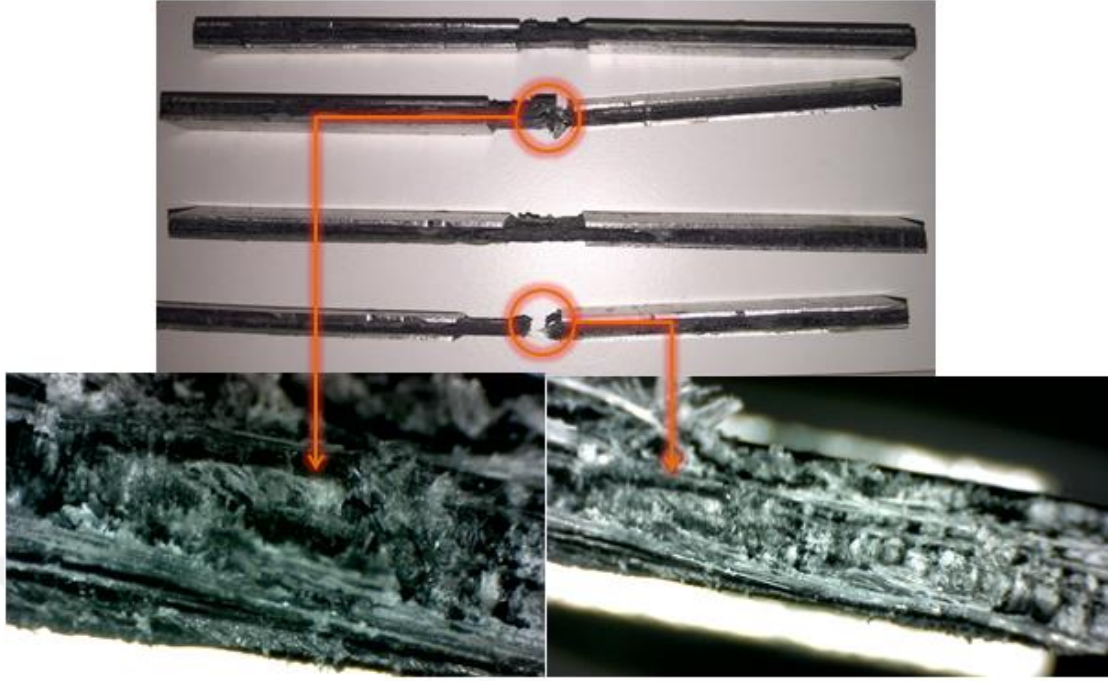


Şekil 8.6. PA matrisli TPC malzeme basma deneyi deformasyon bölgeleri



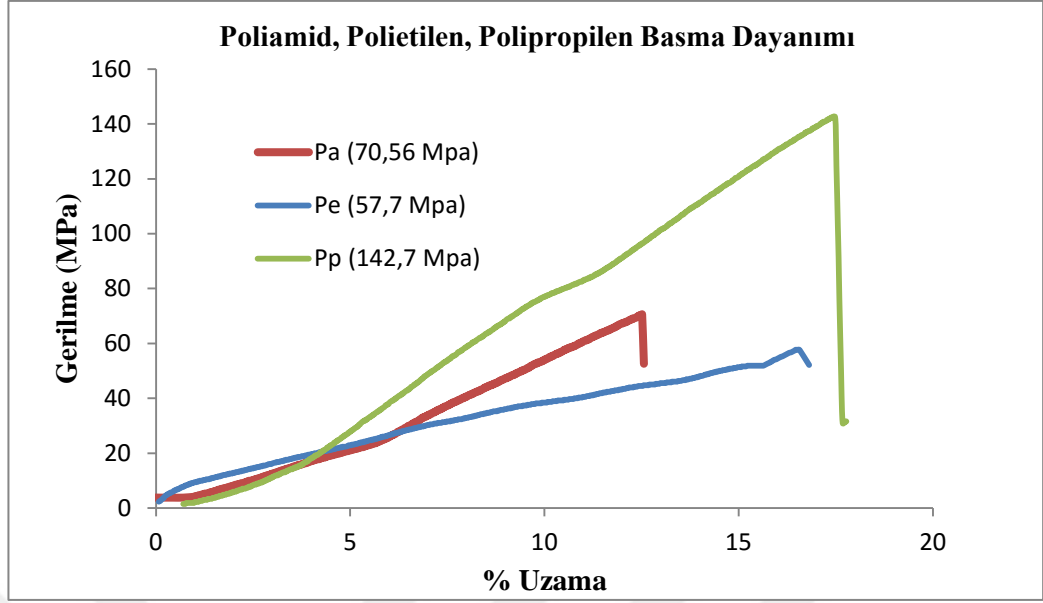
Şekil 8.7. PE matrisli TPC malzeme basma deneyi deformasyon bölgeleri





**Şekil 8.8.** PP matrisli TPC malzeme basma deneyi deformasyon bölgeleri

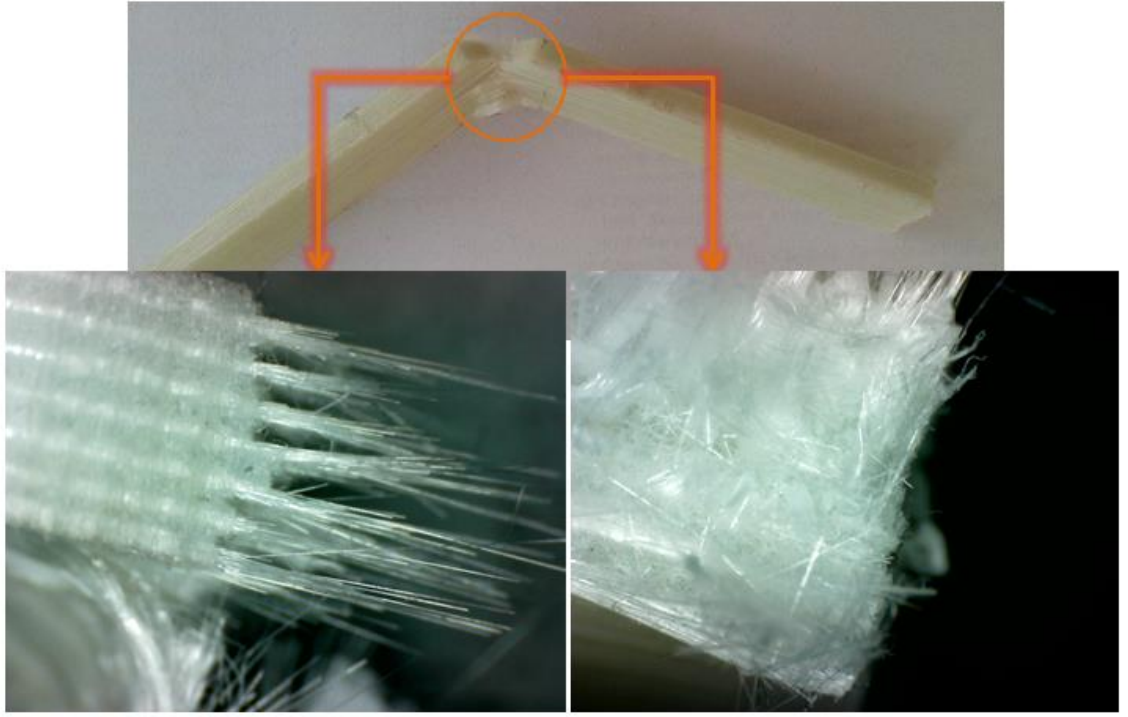
Poliamid, Polietilen ve polipropilen matrisli termoplastik kompozit malzemelerin basma gerilmeleri sırasıyla 70,56 MPa, 57,7 MPa ve 142,7 MPa olarak hesaplanmıştır (şekil 8.9). Polipropilen matrisli termoplastik kompozit malzemenin en yüksek basma gerilmesine sahip olduğu görülmüştür. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde PE ve PP matrisli malzemelerin PA matrisli malzemelere göre daha gevrek davranış sergiledikleri görülmüştür. Ayrıca şekil 8.6'da görüldüğü üzere PA matrisli malzemede deney esnasında tabakalar arasında delaminasyonlar meydana gelmiştir.



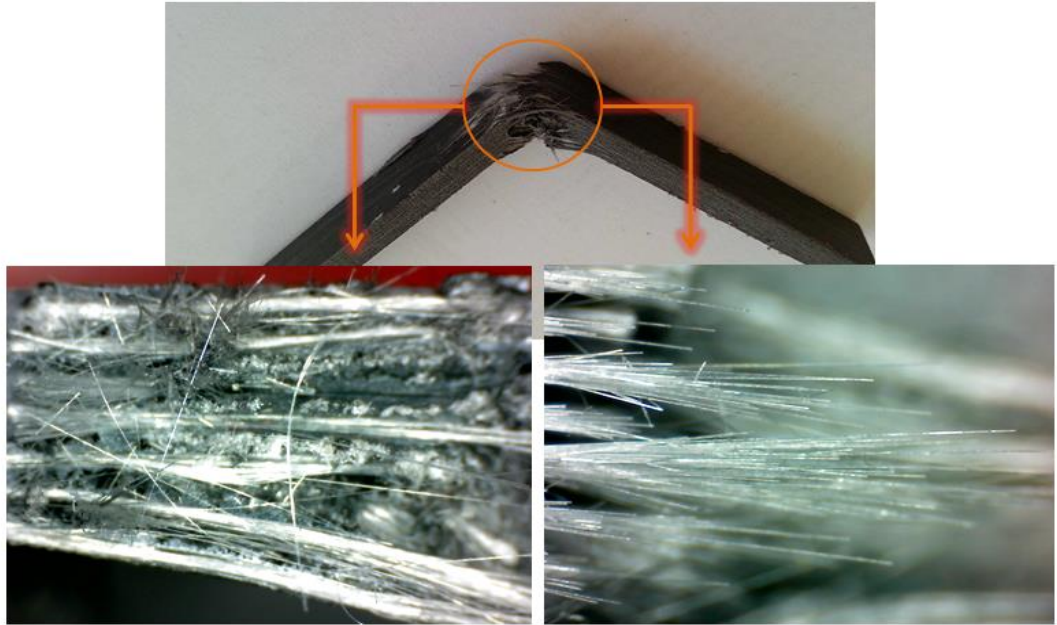
**Şekil 8.9.** PA, PE, PP matrisli termoplastik kompozit malzemelerin basma deney sonuçları

### 8.1.3. Çentik Darbe Deney Sonuçları

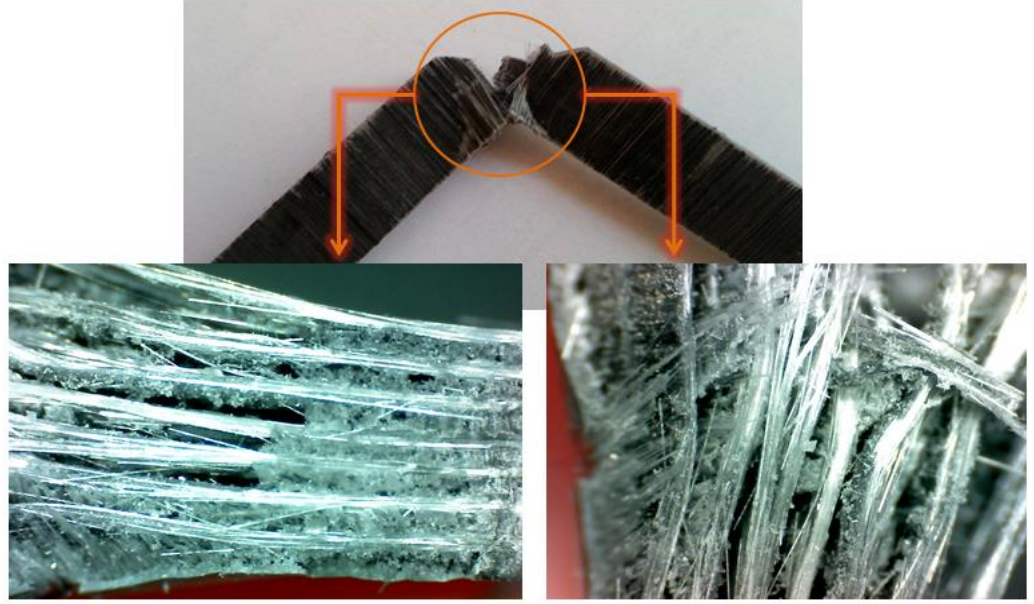
Deneylerde kullanılan test numunelerinin kırılma yüzeyleri, cam elyafın ıslanma durumları poliamid, polietilen ve polipropilen matrisli olmak üzere sırasıyla şekil 8.10, şekil 8.11 ve şekil 8.12’de gösterilmiştir. Ayrıca polipropilen matrisli termoplastik kompozit deney numunesinin deney sonrası yüzeylerinde tam ayrılmalar görülmüştür. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde PP matrisli numunenin daha gevrek olduğu görülmektedir.



**Şekil 8.10.** PA matrisli TPC malzeme kırılma yüzeyleri

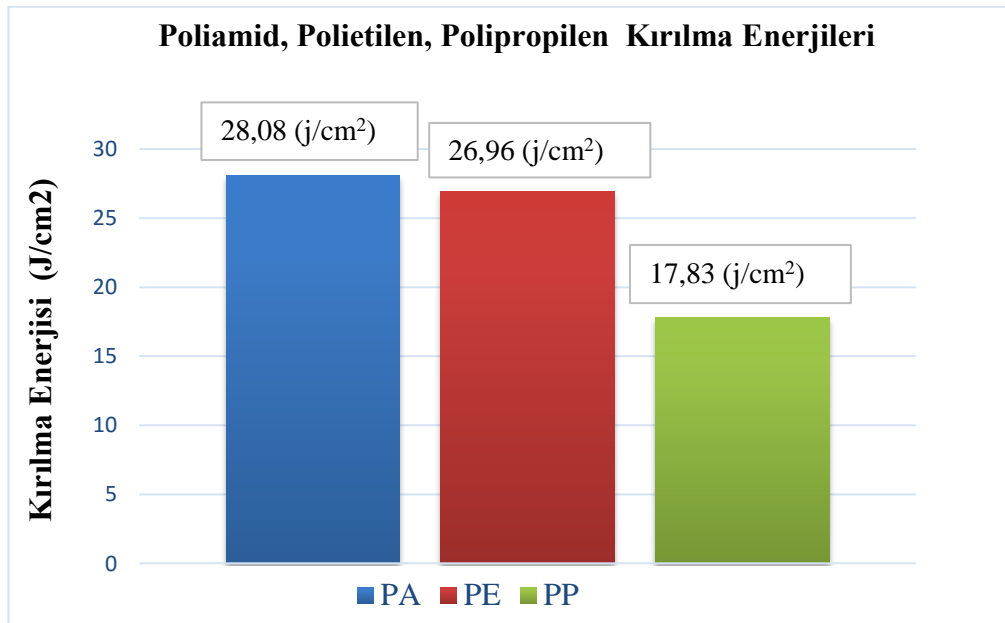


**Şekil 8.11.** PE matrisli TPC malzeme kırılma yüzeyleri



**Şekil 8.12.** PP matrisli TPC malzeme kırılma yüzeyleri

Charpy çentik darbe deney sonuçlarında cam elyaf ile matris malzemesi arasında belirgin bir ıslanma görülmüştür. Poliamid, polietilen ve polipropilen matrisli kompozit malzemelerin kırılma enerjileri  $28,08 \text{ (j/cm}^2\text{)}$ ,  $26,96 \text{ (j/cm}^2\text{)}$  ve  $17,83 \text{ (j/cm}^2\text{)}$  olarak şekil 8.13’de gösterilmiştir. Poliamid matrisli numunenin daha yüksek kırılma enerjisine sahip olduğu görülmüştür.

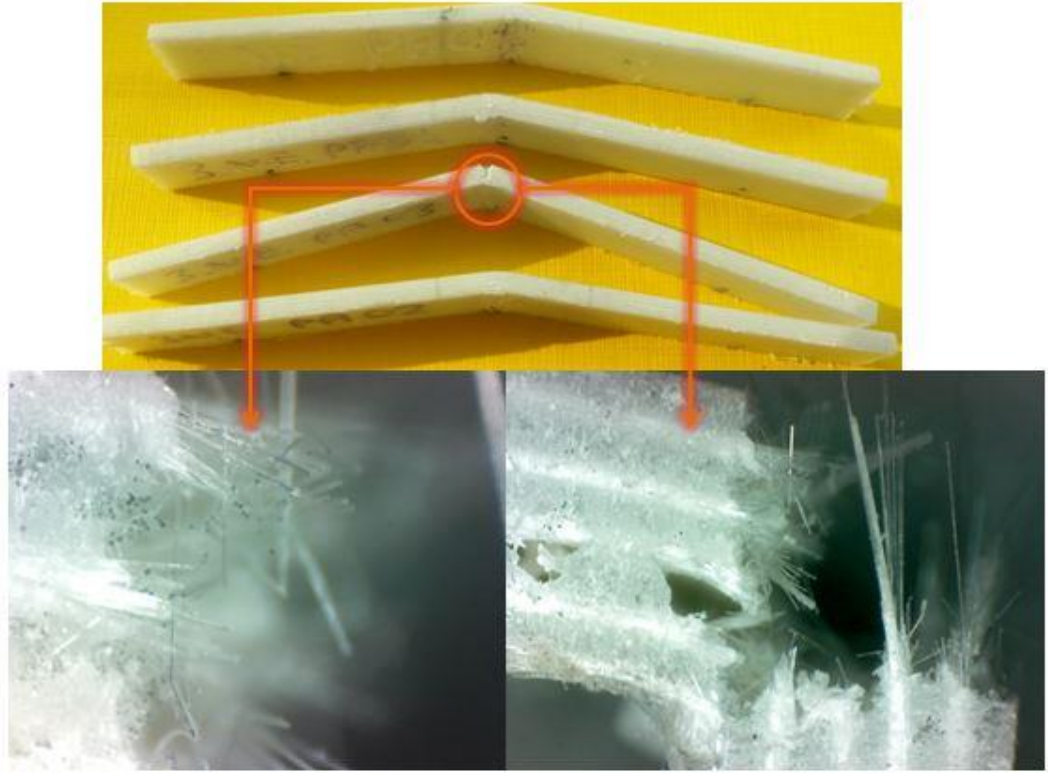


**Şekil 8.13.** PA, PE, PP matrisli termoplastik kompozit malzemelerin charpy çentik darbe enerjileri

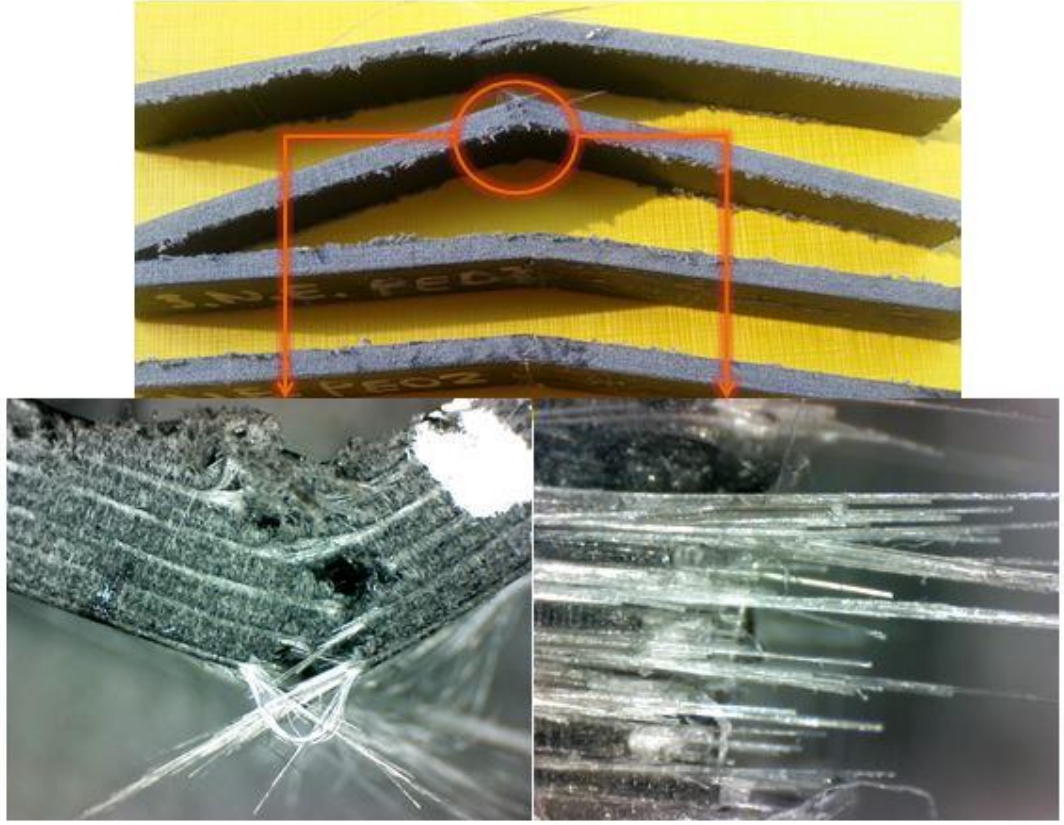


#### 8.1.4. Üç Nokta Eğilme Deney Sonuçları

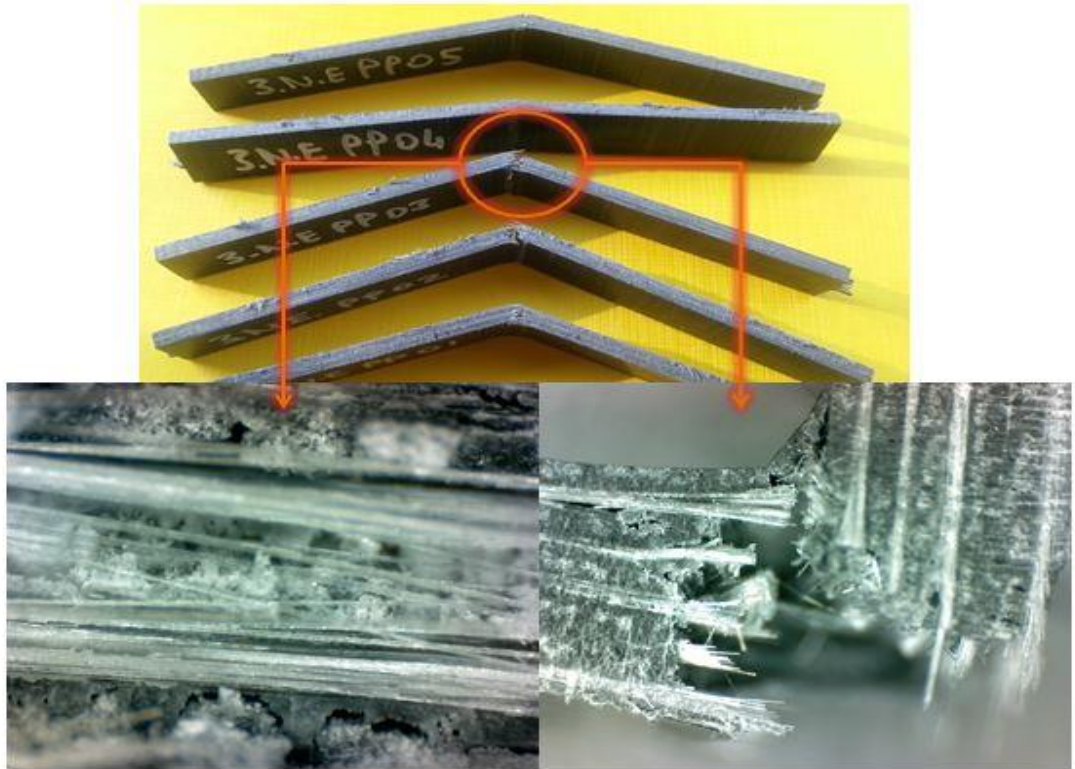
Deneylerde kullanılan test numunelerinin kırılma yüzeyleri, cam elyafın ıslanma durumları poliamid, polietilen ve polipropilen matrisli olmak üzere sırasıyla şekil 8.14, şekil 8.15 ve şekil 8.16’da gösterilmiştir.



Şekil 8.14. PA matrisli TPC malzeme üç nokta eğilme deneyleri deformasyon bölgeleri

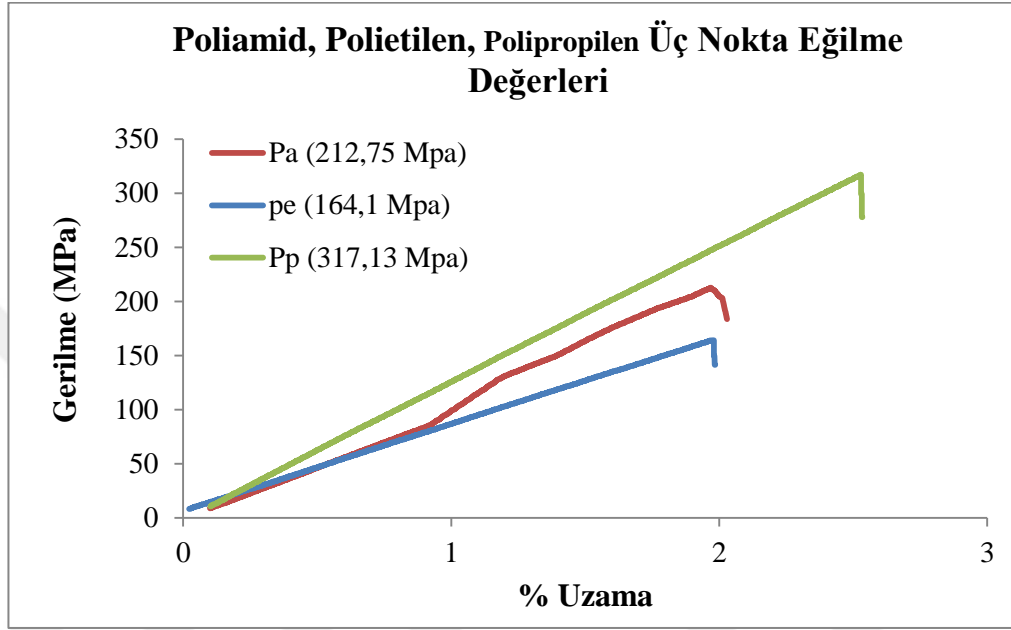


Şekil 8.15. PE matrisli TPC malzeme üç nokta eğilme deneyleri deformasyon bölgeleri



Şekil 8.16. PP matrisli TPC malzeme üç nokta eğilme deneyleri deformasyon bölgeleri

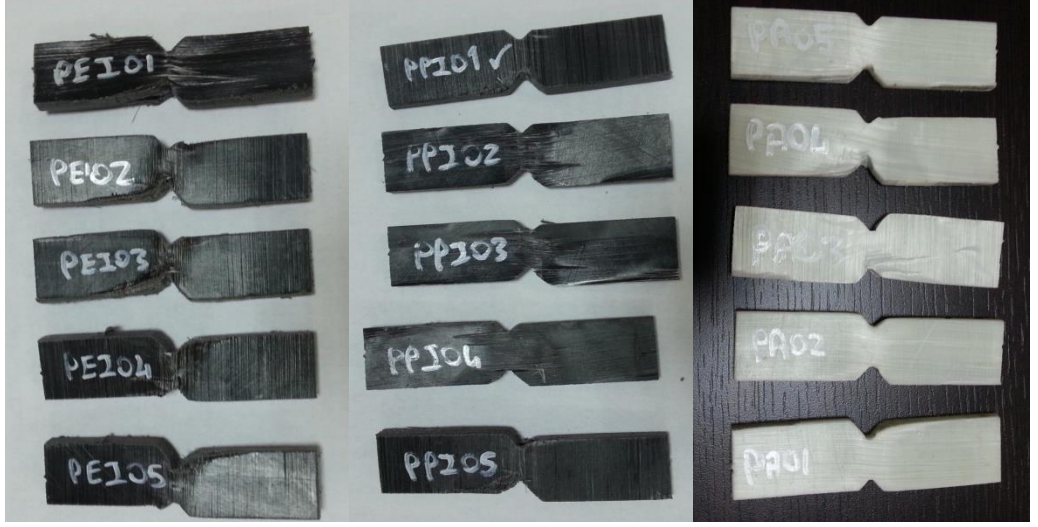
Deformasyon bölgeleri gösterilen poliamid, polietilen ve polipropilen matrisli termoplastik kompozit malzemenin üç nokta eğilme sonuçları sırasıyla 212,75 MPa, 164,1 MPa ve 317,13 MPa olarak bulunmuştur. Bu sonuçlardan yola çıkarak en yüksek gerilmenin polipropilen matrisli termoplastik kompozit malzemede olduğu görülmüştür (şekil 8.17).



Şekil 8.17. PA, PE, PP matrisli TPC malzemelerin üç nokta eğilme deney sonuçları

### 8.1.5. Kayma Deney Sonuçları

Kayma deneylerinde eşit standartlarda 5'er adet PA, PE ve PP matrisli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemenin kayma deneyleri yapılmıştır (şekil 8.18). Numunelerde yaklaşık % 80 uzama sonrasında tam deformasyon meydana gelmiştir.



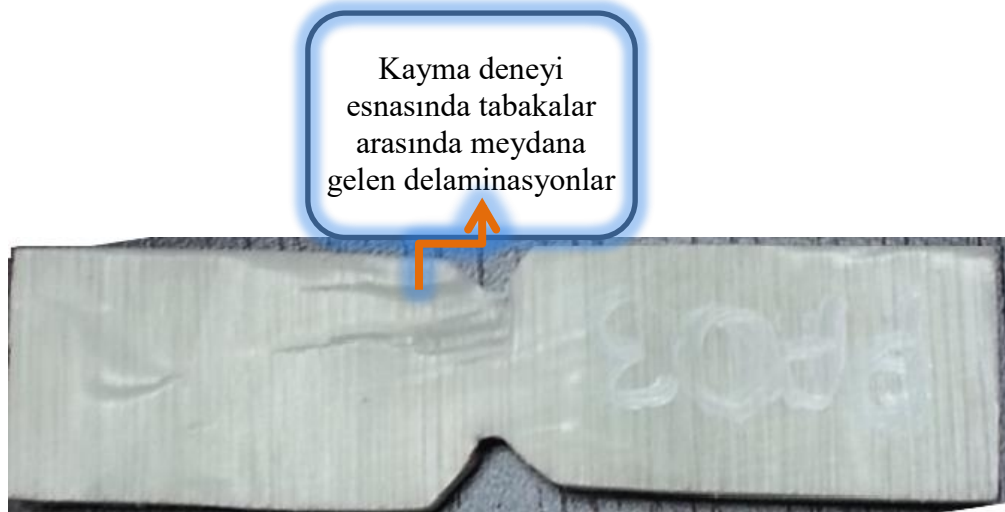
**Şekil 8.18.** Deney sonrası kayma numuneleri

Deneyleerde kullanılan test numunelerinin kayma deneyi esnasında üzerine gelen kuvvet sonucu şekil değıştirmesi şekil 8.19’da gösterilmiştir. Gelen kuvvetlerin etkisi ile tabakalar arasında delaminasyonlar meydana gelmiştir (Şekil 8.20).



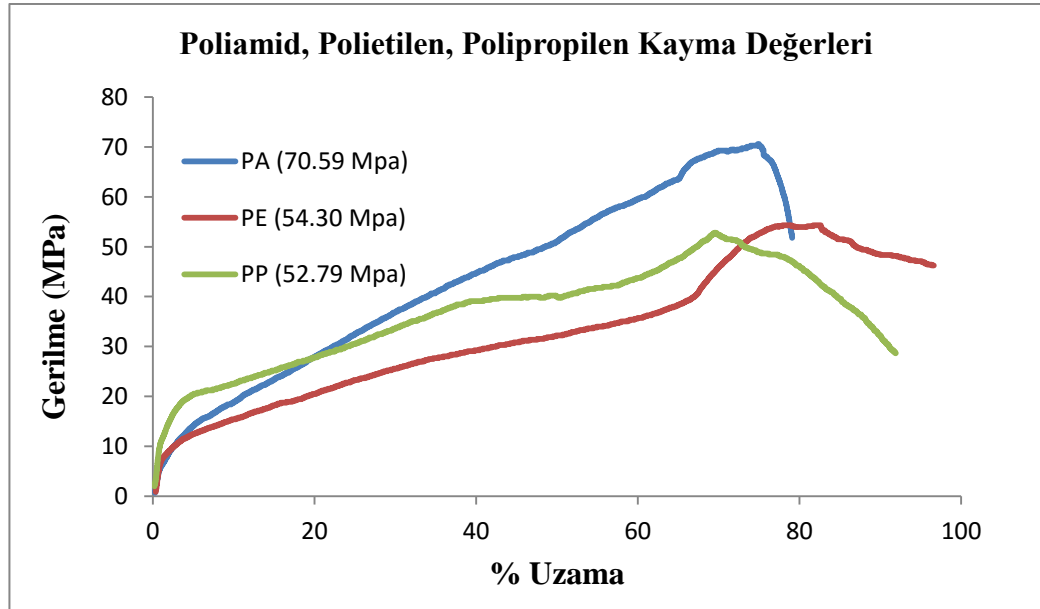
**Şekil 8.19.** PP matrisli termoplastik kompozit malzemelerin kayma deneyi esnasında şekil değışimi





**Şekil 8.20.** Kayma kuvvetinin etkisi ile tabakalar arasında meydana gelen delaminasyonlar

Deney esnasında şekil değişimleri gösterilen cam elyaf takviyeli poliamid, polietilen ve polipropilen matrisli termoplastik kompozit malzemelerin kayma deney sonuçları sırasıyla 70,59 MPa, 54,30 MPa ve 52,79 MPa olarak bulunmuştur. Bu sonuçlardan yola çıkarak en yüksek kayma gerilmesinin poliamid matrisli termoplastik kompozit malzemede olduğu görülmüştür (şekil 8.21).



**Şekil 8.21.** PA, PE, PP matrisli TPC malzemelerin kayma deney sonuçları

Deneysel Çalışmalar sonunda elde edilen veriler çizelge 8.2’de verilmiştir. Deney sonuçlarına göre polipropilen ve poliamid matrisli termoplastik kompozit malzemenin daha üstün mekanik özelliklere sahip oldukları görülmüştür.

**Çizelge 8.2.** Deneysel Sonuçlar

Deneysel	Malzemeler		
	PA	PE	PP
Çekme Gerilmesi (MPa)	231	117,82	190,2
Basma Gerilmesi (MPa)	70,56	57,7	142,7
Üç Nokta Eğilme Gerilmesi (MPa)	212,75	164,1	317,13
Charpy Çentik Darbe Enerji absorpsiyonu (j/cm <sup>2</sup> )	28,08	26,96	17,83
Kayma Gerilmesi (MPa)	70,59	54,3	52,79

## 9. TARTIŞMA

Bu tez çalışmasının mevcut otomobillerin hafifletilmesi ve buna bağlı olarak düşük emisyon değerlerine sahip, düşük yakıt tüketimine sahip ve ağırlık azaltılırken yüksek mukavemetli araçların üretilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla sürekli cam elyaf takviyeli poliamid, polipropilen ve polietilen matrisli termoplastik kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme, basma, üç nokta eğilme, kayma ve charpy çentik darbe deneyleri yapılmıştır.

Çekme deneyleri sonucunda poliamid ve polipropilen matrisli TPC malzemenin yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülmüştür. 370 MPa çekme dayanımına sahip st37 çeliği ile karşılaştırıldığında bu malzemelerin otomotiv sanayinde iyi bir alternatif malzeme olduğu görülmektedir.

Basma deney sonuçları incelendiğine PP matrisli TPC malzemenin yüksek gerilme değerlerine sahip olduğu görülmektedir. PA matrisli TPC basma numunelerinde deney esnasında delaminasyonlar meydana gelmiştir. PE matrisli deney TPC deney numunelerinde ise kayma gerilmeleri meydana gelmiştir.

Üç nokta eğilme deneyleri sonucunda TPC malzemelerin maksimum sehim miktarları ve eğilme gerilmeleri elde edilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde PP matrisli TPC malzemenin maksimum eğilme mukavemetine sahip olduğu görülmüştür.

Charpy çentik darbe deneyleri üretilen TPC malzemelerin dinamik zorlamalar karşısında gösterdikleri direnci tayin etmek amacıyla yapılmıştır. PA ve PE matrisli TPC malzemenin yüksek yüksek enerji absorpsiyon ve yüksek gerilme değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca deney numunelerinin deney sonrası kırılma yüzeyleri incelendiğinde PE matrisli TPC malzemelerin daha gevrek olduğu görülmüştür.

Kompozit malzemelerde tabakalanmış sistemlerin kayma karakterizasyonu malzemelerin mukavemet değerleri açısından önem teşkil etmektedir. Yapılan deneyler sonrasında PA matrisli TPC malzemelerin en yüksek kayma mukavemetine sahip oldukları görülmüştür.

Sonuç olarak poliamid ve polipropilen matrisli TPC malzemenin yüksek özgül mukavemet, düşük yoğunluk ve yeniden işlenebilirlik gibi birçok avantaja ve yüksek mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle otomotiv sanayinde elik malzemelere iyi bir alternatif malzeme olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmaların devamı olarak malzeme sabitlerinin elde edilmesi ile sonlu elaman yöntemi kullanılarak analizler yapılacaktır.





## KAYNAKLAR

- Aktaş, M. 2010.** Kompozit malzeme ders notları. DEÜ Makine mühendisliği bölümü
- Aricasoy, Ç. 2011.** Kompozit Sektör Raporu. İstanbul Ticaret Odası. İstanbul
- Asi, D. 2008.** Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin aşınma performansının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, AKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon.
- Baydar, D., Bekem, A., Doğu, M., Gemici, Z., Ünal, A. 2012.** Production and characterization of continuous e-glass fiber reinforcement polypropylene composites. Journal of Engineering and Natural Science., 30: 120-132.
- Beşergil, B. 2012.** Birsen Beşergil Ders Notları. CBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Boria, S., Obradovic, J., Belingardi, G. 2015.** Experimental and numerical investigations of the impact behaviour of composite frontal crash structures. Composites., 79: 20-27.
- Callens, M. G., Cuyper, P. D., Gorbatikh L., Verpoest, I. 2015.** Effect of fibre architecture on the tensile and impact behaviour of ductile stainless steel fibre polypropylene composites. Composites Structures., 119: 528-533.
- Chawla, K.K. 1987.** Composite Materials Science and Engineering. Springer Verlag New York, pp:140-283.
- Eker, A. A. 2011.** Plastik Matrisli Kompozitler Ders Notları. YTÜ Makine Mühendisliği Bölümü.
- Engels, A., Roehrig, M., Witte, T. 2012.** Possible optimization of the energy balance in the automotive sector by the use of carbon composite structures. Procedia Engineering., 49: 303-309.
- Güleşen, M. 2005.** Fiber takviyeli termoplastik kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin bulunması. Yüksek Lisans Tezi, DPÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya.
- Hamada, H., Fujihara, K., Harada, A. 2000.** The influence of sizing conditions on bending properties of continuous glass fiber reinforced polypropylene composites. Composites., 31: 979-990.
- Justo, J., Osuna, S., Paris, F. 2015.** Design of composite materials with improved impact properties. Composites., 76: 229-234.
- Kaw, A. 2006.** Mechanics of composite materials. U.S.A., 473.

- Lubin, G., 1982.** Handbook of Composites. 788
- Matabola, K.P., Vries, A.R.D., Moolman, F.S., Luyt, A.S. 2009.** Single Polymer Composites: A Review. Journal of Materials Science., 23,44: 6213-6222.
- Mazumdar, S.K. 2002.** Composites manufacturing, materials, product, and process engineering. New York, 416 s.
- Moussavi-Torshizi, S. E., Dariushi, S., Sadighi M., Safarpour, P. 2010.** A study on tensile properties of a novel fiber/metal laminates. Materials Science and Engineering., 527: 4920-4925.
- Örçen, G. 2005.** Çelik takviyeli termoplastik kompozit levhalarda elastik ve elasto-plastik gerilme analizi. Yüksek Lisans Tezi, FÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ.
- Özdemir, Y. 2009.** Otomotiv sektöründe kullanılan doğal lif destekli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, MÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.
- Prabhakaran, R.T., Pillai, S., Charca, S., Oshkovr, S., Knudsen, H., Andersen, T.L., Bech, J.I., Thomsen, O.T., Lilholt, H. 2015.** Mechanical characterization and fractography of glass fiber/polyamide (PA6). Polymer Composites., 36: 834-853.
- Ravikumar, R.B., Anil, S.G., Kumar, D.G., Ashish, J. 2011.** Static bending and impact behaviour of areca fibers composites. Materials and Design., 32: 2469-2475.
- Russo, P., Acierno, D., Simeoli, G., Lannace, S., Sorrentino, L. 2013.** Flexural and impact response of woven glass fiber fabric/polypropylene composites. Composites., 54: 415-421.
- Seo, Y., Kim, J., Kim, K., Kim, Y. 2000.** Study of the crystallization behaviors of polypropylene and maleic anhydride grafted polypropylene. Polymer., 41: 2639-2646.
- Simeoli, G., Acierno, D., Meola, C., Sorrentino, L., Lannace S., Russo, P. 2014.** The role of interface strength on the low velocity impact behaviour of PP/glass fibre laminates. Composites., 62: 88-96.
- Smith, William F. 2012.** Material Science and Engineering. Çeviri, Kınıkoğlu, Nihat, G. 900 s
- Sorrentino, L., Simeoli, G., Lannace S., Russo, P. 2015.** Mechanical performance optimization through interface strength gradation in PP/glass fibre reinforced composites. Composites., 76: 201-208.

**Srvinasa, C. V., Arifulla, A., Goutham, N., Santhosh, T., Jaeethendra, H. J..**

**Suresh, S., Kumar, V. S. 2014.** Experimental determination of the mechanical behavior of glass fiber reinforced polypropylene composites. Procedia Engineering., 97: 632-641.

**Toğuşoğlu, Ç. 2011.** Cam fiber ve grafit takviyeli naylon 6 matrisli kompozit malzemelerin bazı mekanik özellikleri ve aşınma mekanizmaları deneysel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir.

**Tümer, H. 2013.** Karbon ve cam elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit şaftların burulma mukavemeti. Yüksek Lisans Tezi, EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri.

**Türkmen, İ. 2012.** Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde elyaf tabaka sayısına bağlı mekanik özelliklerin ve darbe dayanımının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, CBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa.

**Yağcı, E. 2007.** Tabakalı kompozit ince plakların plak düzlemine dik yükleme etkisi altındaki eğilme analizi. Yüksek Lisans Tezi, ÇÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hakkı ÖZER  
Doğum Yeri ve Tarihi : Keçiören/Ankara 07/07/1989  
Yabancı Dili : İngilizce

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Halide Edip Lisesi, 2007

Lisans : Makine Mühendisliği Bölümü, (2008-2012)

Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 2013

Çalıştığı Kurum ve Yıl : Hidropol Mühendislik 2012 (Temmuz-Eylül)  
Uludağ Üniversitesi 2013(Eylül-...

İletişim(e-posta) : hakkiozer@uludag.edu.tr