



**T.C.**  
**NECMETTİN ERBAKAN**  
**ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**BAZALT ELYAF TAKVİYELİ FİLAMAN**  
**SARIM KOMPOZİT BORULARIN**  
**İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Furkan ERHAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Mayıs-2022**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Furkan ERHAN tarafından hazırlanan “Bazalt Elyaf Takviyeli Filaman Sarım Kompozit Boruların İşlenebilirliğinin Araştırılması” adlı tez çalışması 18/05/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ

.....

#### Danışman

Doç. Dr. Lokman GEMİ

.....

#### Üye

Doç. Dr. Mürsel EKREM

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun ....../.../20.. gün ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI  
FBE Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Furkan ERHAN

Tarih: 18.05.2022

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## BAZALT ELYAF TAKVİYELİ FİLAMAN SARIM KOMPOZİT BORULARIN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

**Furkan ERHAN**

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Lokman GEMİ  
Doç. Dr. Şakir YAZMAN  
2022, 115 Sayfa**

**Jüri  
Doç. Dr. Lokman GEMİ  
Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ  
Doç. Dr. Mürsel EKREM**

Bu çalışmada filaman sarım yöntemiyle üretilen kompozit boruların işlenebilirliği araştırılmıştır. Üretilen kompozit borular, son zamanlarda kullanımı artan, karbon ve cam elyaflara bir alternatif olan bazalt elyafla sarılmıştır. Kompozit borular  $\pm 30/\pm 60/\pm 90$ ,  $\pm 60/\pm 90/\pm 30$  ve  $\pm 90/\pm 30/\pm 60$  olmak üzere üç farklı sarımda üretilmiş ve açılı farklılıklarının işlenebilirliğe etkileri incelenmiştir. Kompozit borulara 300 mm/dk sabit ilerleme hızında 1000, 2000, 3000 ve 4000 dev/dk'da kesme ve 2500 dev/dk sabit kesme hızında 150, 250, 350, 450 mm/dk ilerleme hızlarında delme işlemi uygulanarak işlem sonrası oluşan kuvvetler dinamometre ile ölçülüp kaydedilmiştir. Elde edilen verilerle ilerleme ve iş mili dönüş hızlarının da işlenebilirliğe etkileri karşılaştırılmıştır. Delme sonrası oluşan delaminasyon alanları verilmiştir ve bu doğrultuda delaminasyon faktörleri hesaplanmıştır. Numunelere ASTM D 2290 standardında halka çekme de uygulanmış olup malzemelerde oluşan gerilmeye göre birim şekil değişimleri de hesaplanmıştır.  $\pm 90^\circ$  yönlü tabaka iç katmana ne kadar yakınsa numunenin o kadar dayanıklı olduğu görülmüştür. Bunların yanında kompozit malzemeler hakkında gerekli olduğu kadar detay bilgi verilerek bu tezin, kompozitler hakkında bir kaynak olarak kullanılmasını sağlamak da amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Bazalt, elyaf, filaman, işlenebilirlik, kompozit, sarım

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

## **INVESTIGATION OF MACHINABILITY OF BASALT FIBRE REINFORCED FILAMENT WINDING COMPOSITE PIPES**

**Furkan ERHAN**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN MECHANICAL ENGINEERING**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Lokman GEMİ  
Assoc. Prof. Dr. Şakir YAZMAN  
2022, 115 Pages**

**Jury  
Assoc. Prof. Dr. Lokman GEMİ  
Prof. Dr. Ugur KOKLU  
Assoc. Prof. Dr. Mursel EKREM**

In this study, machinability of composite pipes produced by filament winding method was investigated. The composite pipes produced were wrapped with basalt fibre, an alternative to carbon and glass fibres, whose use has increased recently. Composite pipes were produced in three different windings,  $\pm 30/\pm 60/\pm 90$ ,  $\pm 60/\pm 90/\pm 30$  and  $\pm 90/\pm 30/\pm 60$ , and the effects of angle differences on machinability were investigated. By applying drilling process to composite pipes at 1000, 2000, 3000 and 4000 rpm spindle speed at constant feed rate of 300 mm/min and at 150, 250, 350 and 450 mm/min feed rate at constant spindle speed of 2500 rpm, the forces that occur after the process were measured and recorded with a dynamometer. The effects of feed rates and spindle speeds on machinability were compared with the data obtained. The delamination areas occurred after drilling were calculated and accordingly delamination factors were calculated. Ring tensile tests also applied to the samples in ASTM D 2290 and strain changes were calculated according to stress occurred in the materials. It was seen that how close  $\pm 90^\circ$  oriented layer is to the inner layer, the sample is more durable. In addition to these, it is aimed to provide detailed information about composite materials and to use this thesis as a source about composites.

**Keywords:** Basalt, composite, fibre, filament, machinability, winding

## ÖNSÖZ

Bu çalışmanın ortaya çıkan her aşamasında yardımını esirgemeyen danışmanım Necmettin Erbakan Üniversitesi Meram MYO Öğr. Üyesi Doç. Dr. Lokman GEMİ hocama, emekleriyle tezi yazmamı ve deney sonuçlarını düzenleyip hesaplamamı sağlayan ikinci danışmanım Selçuk Üniversitesi Ilgın MYO Doç. Dr. Şakir YAZMAN hocama, laboratuvarı kullanmam için imkân sağlayan ve deney verilerini elde etmemi sağlayan Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ ile Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Arş. Gör. Sezer MORKAVUK hocalarıma, görüntü alma ve hesaplamalarda yardımlarıyla yalnız bırakmayan Selçuk Üniversitesi Ilgın MYO Öğr. Gör. Barış BAKIRCIOĞLU hocama içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez yazım aşaması boyunca her zorlukta yanımda olan, maddi ve manevi hiçbir desteği esirgemeyen aileme sonsuz borçluyum.

Verdiği destekle hayatımda oldukça ayrı bir yeri olan çok sevdiğim arkadaşım Gülşah KIVRAK'a, ayrıca tezi tamamlamam konusunda beni hep destekleyen Ahmet Can SAYGILI ile Hasan Tahsin DAĞLI'ya ve prosedür aşamasında yardımını esirgemeyen Mevlüt YILMAZ'a da teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, rahat bir eğitim almamız için her şeylerini geride bırakmış olan başta yakinen tanıdığım ve benim için bir ağabeyden daha fazlası olan Selçuk PAKER olmak üzere tüm şehitlerimize en içten minnet duygularıyla...

Furkan ERHAN  
KONYA-2022

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER.....</b>	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ .....</b>	<b>ix</b>
<b>ÇİZELGELER LİSTESİ .....</b>	<b>x</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>5</b>
<b>3. KURAMSAL TEMELLER .....</b>	<b>7</b>
3.1. Kompozit Malzemeler.....	7
3.2. Polimerik Matrisler .....	9
3.2.1. Termosetler (Isıl sertleşir matrisler) .....	12
3.2.1.1. Epoksi .....	13
3.2.1.2. Polyester .....	14
3.2.1.3. Fenolik.....	15
3.2.2. Termoplastikler (Isıl yumuşar matrisler) .....	16
3.3. Takviye Fazları.....	18
3.3.1. Doğal elyaflar .....	21
3.3.2. Cam elyaflar.....	21
3.3.3. Karbon elyaflar .....	23
3.3.4. Bazalt elyaflar .....	29
3.3.5. Aramid elyaflar .....	36
3.4. Kompozit Üretim Yöntemleri .....	38
3.4.1. El yatırma (Hand lay-up) .....	38
3.4.2. Sprey püskürtme (Spray lay-up) .....	39
3.4.3. Elyaf sarım (Filament winding) .....	40
3.4.4. Otoklav (Autoclave) .....	44
3.5. Kompozit Malzemelerde Hasar Mekanizmaları .....	45
3.5.1. Matris çatlakları .....	48
3.5.2. Ara yüzey ayrılması (Debonding).....	48
3.5.3. Delaminasyon .....	50
3.5.4. Elyaf köprülemesi .....	51
3.5.5. Elyaf çekmesi (Pull out) .....	51
3.5.6. Boşluk oluşumu .....	51
3.5.7. Yorulma .....	51

3.6. İşlenebilirlik .....	53
3.6.1. Takım malzemeleri .....	56
3.6.2. Kompozit malzemelerin delinmesi .....	59
3.6.3. Kompozit malzemelerin frezelenmesi .....	63
3.6.4. Kompozit malzemelerin tornalanması .....	64
<b>4. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>66</b>
4.1. Bazalt Takviyeli Polimer (BTP) Kompozit Boruların Üretimi.....	66
4.2. Halka Çekme Deneyleri .....	68
4.2.1. Halka çekme deneyleri sonrası hasar analizi .....	69
4.3. İşlenebilirlik (Delme) Deneyleri .....	71
4.3.1. Delme deneyleri sonrası hasar analizi .....	72
<b>5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>73</b>
5.1. Halka Çekme Deneyleri .....	73
5.2. Delme Deneyleri .....	82
5.2.1. İş mili dönüş ve ilerleme hızlarına göre oluşan itme kuvvetleri.....	84
5.2.2. İş mili dönüş ve ilerleme hızlarına göre oluşan momentler.....	88
5.2.3. Delaminasyon hasarları ve faktörleri .....	92
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>104</b>
6.1. Sonuçlar.....	104
6.2. Öneriler .....	105
<b>7. KAYNAKLAR .....</b>	<b>107</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. B-2 bombardıman uçağında kullanılan kompozitler .....	4
Şekil 1.2. Çelik, alüminyum ve kompozitlerin karşılaştırılması .....	4
Şekil 1.3. Yüksek performanslı kompozit bileşenlerin üretim maliyet dağılımı .....	4
Şekil 3.1. Elyaf ve matris ara yüzeyi .....	9
Şekil 3.2. Polipropilen polimerindeki mer yapısı .....	9
Şekil 3.3. Amorf bir polimerin elastisite modülü-sıcaklık değişimi .....	11
Şekil 3.4. Çeşitli matris malzemelerinin gerilme-gerinim kıyasları .....	12
Şekil 3.5. Termoset yapısı .....	13
Şekil 3.6. Epoksit halkası .....	13
Şekil 3.7. Termoplastik yapısı .....	16
Şekil 3.8. Termoplastik kristal yapılar a) Amorf b) Yarı kristal .....	18
Şekil 3.9. Takviye türlerine göre kompozitler .....	18
Şekil 3.10. Cam elyaf üretimi .....	22
Şekil 3.11. Grafit yapısı .....	24
Şekil 3.12. Grafen yapısı .....	25
Şekil 3.13. PAN bazlı karbon elyaf üretim işlem basamakları .....	27
Şekil 3.14. PAN bazlı karbon elyaf üretim şeması .....	28
Şekil 3.15. Zift öncülünden elyaf üretimi .....	29
Şekil 3.16. Selüloz öncülünden elyaf üretimi .....	29
Şekil 3.17. Bazalt elyaf üretim şeması .....	31
Şekil 3.18. Bazalt ve E cam takviyeli kompozitlerin modül kıyasları .....	33
Şekil 3.19. Bazalt ve E cam takviyeli kompozitlerin mukavemetleri .....	33
Şekil 3.20. Bazalt elyaf çaplara göre kullanım sıklıkları .....	34
Şekil 3.21. Titreşim kayıp sönüm katsayıları kıyasları .....	37
Şekil 3.22. Aramid elyaf üretimi .....	38
Şekil 3.23. El yatırma yöntemi .....	39
Şekil 3.24. Sprey püskürtme yöntemi .....	39
Şekil 3.25. Elyaf sarım tekniği .....	41
Şekil 3.26. Kutupsal sarım yöntemi .....	41
Şekil 3.27. Helisel sarım yöntemi .....	41
Şekil 3.28. Dairesel sarım yöntemi .....	41
Şekil 3.29. Elyaf sarım tekniğiyle üretilmiş 2 m çaplı cam elyaf kompozit boru .....	43
Şekil 3.30. Otoklav üretim yöntemi .....	45
Şekil 3.31. Elyaf takviyeli kompozitte hasar mekanizmaları .....	46
Şekil 3.32. Sürekli elyaf takviyeli bir kompozitte matris çatlakları .....	47
Şekil 3.33. Basma yüklemesi hasarları .....	48
Şekil 3.34. Çatlak hasarlarının ve diğer hasarların şematik gösterimi .....	48
Şekil 3.35. Elyaf takviyeli bir kompozitte debonding hasarı .....	49
Şekil 3.36. Partikül takviyeli kompozitte debonding ve diğer hasarlar .....	49
Şekil 3.37. Sertleştirilmemiş CFRP tabakanın enine kesit delaminasyonu .....	50
Şekil 3.38. Darbe sonucu oluşan hasarlar .....	52
Şekil 3.39. CFR ve GFR epoksi kompozitlerin yorulma çevrimleri .....	52
Şekil 3.40. İşlenebilirlik literatür çalışmaları .....	54
Şekil 3.41. Elyaf takviyeli polimerleri işlemede kullanılan takımlar .....	57
Şekil 3.42. Kesme malzemeleri arasındaki sertlik ve tokluk ilişkisi .....	59
Şekil 3.43. Şematik delaminasyon gösterimi .....	60
Şekil 3.44. Karbon elyaf takviyeli plastik kompozitte delik çıkış hasarları .....	60
Şekil 3.45. Giriş ve çıkış delaminasyon hasarları .....	61
Şekil 3.46. Delme sonucu oluşan delaminasyon hasar modları .....	61
Şekil 3.47. Çeşitli uçlar .....	62
Şekil 3.48. Aramid için kullanılan C tipi matkap ucu .....	63
Şekil 3.49. Frezeleme delaminasyon ölçümü .....	64
Şekil 4.1. BTP kompozit boruların üretimi .....	67
Şekil 4.2. Test düzeneği ve numune boyutları .....	69
Şekil 4.3. Dış ve iç makro hasar görüntüleri .....	70
Şekil 4.4. Kesici takım .....	71
Şekil 4.5. Test düzeneği .....	71

Şekil 4.6. Optik mikroskop ve delaminasyon faktörü hesaplaması .....	72
Şekil 5.1. Daraltılmış bölgelerde oluşan hasarların karşılaştırmalı yakın görüntüleri.....	74
Şekil 5.2. CP_1 gerilme-birim şekil değiştirme.....	75
Şekil 5.3. CP_1 numunesinde meydana gelen hasarlar .....	76
Şekil 5.4. CP_2 gerilme-birim şekil değiştirme.....	77
Şekil 5.5. CP_2 numunesinde meydana gelen hasarlar .....	77
Şekil 5.6. CP_3 gerilme-birim şekil değiştirme.....	78
Şekil 5.7. CP_3 numunesinde meydana gelen hasarlar .....	79
Şekil 5.8. Numunelerin birim şekil değiştirme kıyasları .....	80
Şekil 5.9. Numunelerde oluşan maksimum gerilmeler .....	81
Şekil 5.10. Numunelerin kopma uzamaları .....	82
Şekil 5.11. Numunelerin toklukları .....	82
Şekil 5.12. İş mili dönüş ve ilerleme hızlarına göre meydana gelen itme kuvvetleri .....	85
Şekil 5.13. İş mili dönüş hızlarına göre numunelerde oluşan itme kuvvetleri a) desteksiz b) destekli .....	86
Şekil 5.14. İlerleme hızlarına göre numunelerde oluşan itme kuvvetleri a) desteksiz b) destekli .....	87
Şekil 5.15. İş mili dönüş ve ilerleme hızlarına göre meydana gelen momentler .....	89
Şekil 5.16. İş mili dönüş hızlarına göre numunelerde oluşan momentler a) desteksiz b) destekli .....	90
Şekil 5.17. İlerleme hızlarına göre numunelerde oluşan momentler a) desteksiz b) destekli .....	91
Şekil 5.18. Desteksiz delinen numunelerde delik giriş ve çıkış hasar detayları.....	98
Şekil 5.19. Destekli delinen numunelerde delik giriş ve çıkış hasar detayları.....	99
Şekil 5.20. İş mili dönüş hızlarına göre giriş delaminasyonu a) desteksiz b) destekli .....	100
Şekil 5.21. İş mili dönüş hızlarına göre çıkış delaminasyonu a) desteksiz b) destekli .....	101
Şekil 5.22. İlerleme hızlarına göre giriş delaminasyonu a) desteksiz b) destekli .....	102
Şekil 5.23. İlerleme hızlarına göre çıkış delaminasyonu a) desteksiz b) destekli .....	103

## ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Matris malzemelerinin kıyaslanması .....	11
Çizelge 3.2. Epoksi karakteristik özellikleri .....	14
Çizelge 3.3. Polyester karakteristik özellikleri .....	15
Çizelge 3.4. Fenolik karakteristik özellikleri.....	15
Çizelge 3.5. Çeşitli kristallerin mekanik özellikleri.....	21
Çizelge 3.6. Çeşitli kristallerin mekanik özellikleri.....	21
Çizelge 3.7. Çeşitli cam elyafların mekanik özellikleri .....	22
Çizelge 3.8. Cam elyaf bileşim içerikleri .....	23
Çizelge 3.9. Bazalt elyaf kimyasal bileşenleri .....	30
Çizelge 3.10. Bazalt elyaf karakteristik özellikleri .....	32
Çizelge 3.11. Bazalt ve E cam elyafların ortalama değer kıyasları .....	32
Çizelge 3.12. Kevlar aramid elyaflarının karşılaştırılması .....	36
Çizelge 4.1. BTP boruların üretiminde kullanılan malzemelerin özellikleri .....	66
Çizelge 4.2. Üretilen BTP kompozit boruların istifleme sırasına göre şematik gösterimi ve kodları.....	68
Çizelge 5.1. Çekme deneyi sonucu elde edilen mekanik özellik verileri.....	80
Çizelge 5.2. İşlenebilirlik parametreleri sonucu elde edilen veriler.....	83
Çizelge 5.3. İş mili dönüş hızlarına göre delme sonucu CP_1 numunesi giriş ve çıkış görüntüleri .....	92
Çizelge 5.4. İlerleme hızlarına göre delme sonucu CP_1 numunesi giriş ve çıkış görüntüleri.....	93
Çizelge 5.5. İş mili dönüş hızlarına göre delme sonucu CP_2 numunesi giriş ve çıkış görüntüleri .....	94
Çizelge 5.6. İlerleme hızlarına göre delme sonucu CP_2 numunesi giriş ve çıkış görüntüleri.....	95
Çizelge 5.7. İş mili dönüş hızlarına göre delme sonucu CP_3 numunesinde giriş ve çıkış görüntüleri ....	96
Çizelge 5.8. İlerleme hızlarına göre delme sonucu CP_3 numunesi giriş ve çıkış görüntüleri.....	97

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$Al_2O_3$	: Alüminyum oksit	(Alümina)
$B_4C$	: Bor karbür	
$B_2O_3$	: Bor oksit	
$BeO$	: Berilyum oksit	
$CaO$	: Kalsiyum oksit	
cm	: Santimetre	
Co	: Kobalt	
Cr	: Krom	
$Fe_2O_3$	: Demir oksit	
GPa	: Basınç birimi	(Gigapascal)
J/s	: Güç birimi	
K	: Sıcaklık birimi	(Kelvin)
k	: Isıl iletkenlik katsayısı	(W/mK)
$K_2O$	: Potasyum oksit	
$MgO$	: Magnezyum oksit	
mm	: Milimetre	
MPa	: Basınç birimi	(Megapascal)
mPa.s	: Milipascal second	
$Na_2O$	: Sodyum oksit	
nm	: Nanometre	
SiC	: Silisyum karbür	
$Si_3N_4$	: Silisyum nitrür	
$SiO_2$	: Silisyum dioksit	
TiN	: Titanyum nitrür	
$TiO_2$	: Titanyum dioksit	
$V_f$	: Elyaf hacim oranı	( $v_f / v_c$ )
$v_f$	: Elyaf hacmi	
$v_c$	: Kompozit hacmi	
$\sigma$	: Dayanım / Mukavemet	
$\rho$	: Yoğunluk	
$\nu$	: Poisson oranı	
$\mu m$	: Mikrometre	
W/mK	: Isıl iletkenlik katsayısı	(Kelvin cinsinden)
W/m°C	: Isıl iletkenlik katsayısı	(Santigrat derece cinsinden)
WC	: Tungsten karbür	

### Kısaltmalar

AFR	: Aramid fibre reinforced	(Aramid elyaf takviyeli)
BFRP	: Basalt fibre reinforced polymer	(Bazalt elyaf takviyeli polimer)
BTP	: Bazalt takviyeli polimer	
CBN	: Cubic boron nitride	(Kübik bor nitrür)
CFR	: Carbon fibre reinforced	(Karbon elyaf takviyeli)
CFRP	: Carbon fibre reinforced polymer	(Karbon elyaf takviyeli polimer)
D	: Diameter	(Çap)

$D_{maks}$	: Maksimum ap	
$D_0$	: Nominal ap	
$F_d$	: Delamination Factor	(Delaminasyon faktörü)
GFR	: Glass fibre reinforced	(Cam elyaf takviyeli)
HD	: High density	(Yüksek yoğunluk)
HSS	: High Speed Steel	(Yüksek hız elięi)
LD	: Low density	(Düşük yoğunluk)
PAN	: Poly acrylo nitrile	(Poli akrilo nitril)
PCD	: Poly crystal diamond	(Poli kristal elmas)
PE	: Poly ethylene	(Poli etilen)
PEEK	: Polyether ether ketone	(Polieter eter keton)
PP	: Poly propylene	(Poli propilen)
PTFE	: Poly tetra fluoro ethylene	(Poli tetra floro etilen)
PVC	: Poly vinyl chloride	(Poli vinil klorür)
uv	: Ultraviyole	

## 1. GİRİŞ

Özellikle 19. yüzyıl sonlarına doğru matematik, fizik ve kimya gibi çeşitli pozitif bilimlerin de olağanüstü ilerlemesine paralel olarak hemen hemen tüm sektörlerde endüstriyelleşme oldukça önemli bir hâl almıştır. Bunun sonucunda çeşitli sektörlerde daha kaliteli ürünler üretebilmek adına daha nitelikli malzeme arayışları, yeni mühendislik malzemelerinin gelişimini zorunlu kılmıştır. Mühendislik malzemelerinden istenen bütün özelliklerin tek bir malzemede toplanması mümkün olmadığından, bu soruna en başarılı çözümü kompozit malzemeler oluşturmaktadır. Bu doğrultuda malzemelerin gelişimi metallere kompozit malzemelere doğru evrilmiştir. Nitekim doğada bulunan malzemeler artık istenen nitelikleri sağlayamamıştır. Elbette bu geliştirmeler sonucunda da kompozit malzemeler, bugün aklımıza gelen her sektörde yeni mühendislik malzemelerini başarıyla temsil etmektedirler. Günümüz çağında neredeyse tüm mühendislik alanları, ileri seviye kompozit malzemeler kullanarak malzemelerden yüksek performans elde etmektedirler (Sultan ve ark., 2021; Yıldız, 2019). 20. yüzyılın ortalarından itibaren olgunlaşan kompozitler, kendilerini kanıtlamıştır (İnançer, 2015). Kompozit kullanım alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

**Denizcilik:** Yelkenli gövdesi, yelken direkleri, yarış botları, su kaydırakları, sörf tahtaları, su tankları, kanolar (Arıcasoy, 2006; Gay ve ark., 2002).

**Spor:** Tenis racketleri, golf sopaları, bisikletler, kayaklar (Arıcasoy, 2006; Yılmaz, 2016).

**Otomotiv:** Otomobil kaportaları, cam silecekleri, şanzıman şaftları, süspansiyon yayları, süspansiyon kolları, şasiler, gösterge ve göğüs panelleri, frenler, tamponlar, kapı vs. benzeri araç iç kaplamaları, volanlar, yaprak yaylar ve hava emiş manifoldları gibi çok çeşitli parçalar (Arıcasoy, 2006; Gay ve ark., 2002; Sultan ve ark., 2021).

**Günlük:** Lavabo, küvet, olta (Arıcasoy, 2006; Yılmaz, 2016).

**Müzik:** Çello, gitar ya da keman gibi çalgı aletleri (Arıcasoy, 2006; Yılmaz, 2016).

**Elektrik-Elektronik:** Antenler, uçak burun radomları (Gay ve ark., 2002)

**Havacılık-Uzay:** Roket sistemleri, uçak frenleri (Yılmaz, 2016).

**Askerî:** Savaş tankları, bombardıman uçakları, askerî helikopterler, helikopter kanatları, koruyucu (Zırh vs. gibi) balistik uygulamalar (Gay ve ark., 2002; Yılmaz, 2016). Şekil 1.1’de bir bombardıman uçağında kullanılan kompozitler gösterilmiştir.

**Sağlık:** Medikal uygulamalar, protezler (Sheikh-Ahmad, 2009; Yılmaz, 2016).

Bu sektörlere ek olarak, kompozit malzemelerin bilinen en eski ve en geniş kullanım alanı inşaat sektörüdür. Milattan oldukça uzun bir zaman önce saman-çamur ikilisinden yapılan duvarlar, kompozit malzemelerin ilk ve ilkel örneklerini oluşturarak birçok uygulamada kullanılmıştır (İnançer, 2015; Zor, 2015).

Son yıllarda artan kullanımlarıyla polimer matrisli kompozitler başta olmak üzere çeşitli kompozit malzemelerin geliştirilmesi, dikkate değer bir araştırma konusu teşkil etmektedir. Bu geliştirmeler sonucunda günümüzde kompozit malzemeler birçok üstün özelliğe ve çeşitli avantajlara sahip olmuştur (Arıcasoy, 2006). Bunlar şu şekilde sıralanabilmektedir:

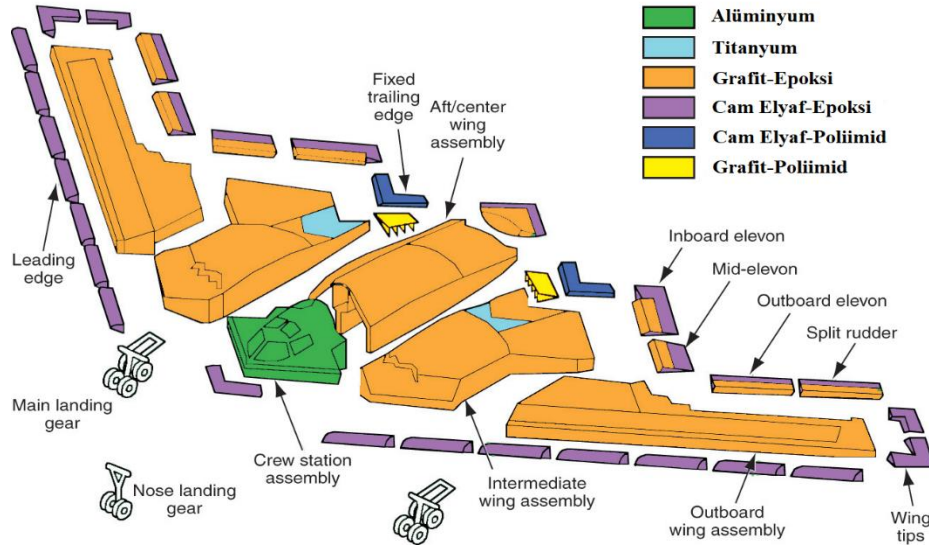
- Kompozitlere, kalıplanabilme ve kolay şekillendirilebilme yeteneklerine sahip olmaları dolayısıyla istenilen yönde gereken nitelikler rahatlıkla kazandırılabilir (Arıcasoy, 2006; Zor, 2015).
- Kompozit malzemeler yüksek mukavemet/ağırlık oranları sunabildiği için mühendislerin çeşitli termal ve elastik özelliklere sahip malzemeler tasarlamasına olanak vererek büyük bir esneklik sağlar (Anderson, 2005).
- Kompozit malzemelerdeki malzeme bileşimleri sonsuzdur ki bu özellik aynı zamanda, kompozitleri geleneksel malzemelerden ayıran en önemli özellik niteliğini taşımaktadır. Bu ise, malzeme özelliklerinin istenildiği gibi tasarlanması serbestliğini vermektedir (Günaydın, 2003).
- Kompozit malzemeler, süneklikleri aracılığıyla titreşim sönümleyebilme özelliklerine sahiptirler (Arıcasoy, 2006).
- Kompozit malzemeler istenilen mekanik özelliklere ve malzemenin kullanılacağı yere göre takviye edilebilirler (Yıldız, 2019).
- Kompozitler termal olarak kararlıdır ve aşınmaya, korozyona ve kimyasal etkilere karşı oldukça dirençli olabilirler (Arıcasoy, 2006).
- Kompozitler üstün elektriksel özelliklere sahiptir. Bu özellikler kullanım amacına göre iletkenlik veya yalıtkanlık olabilir (Arıcasoy, 2006).
- Kompozit malzemeler, metallerle üretimi mümkün olmayan ya da çok çok zor olan karmaşık parçaların, kaynaksız ve perçinsiz tek parça halinde üretimine izin verirler (İnançer, 2015). Bu, daha az parça kullanımı dolayısıyla montaj maliyetinde bir azalış sağlar (Campell, 2010).
- Kompozitler hafiftir (Campell, 2010). Örnek vermek gerekirse kompozit malzemeler bir otomobilin ağırlığını %50-70 oranında düşürebilirken alüminyumda %40-55 oranında ve çelikte ise ancak %25-35 aralığında bir

düşüş sağlanabilmektedir (Sultan ve ark., 2021). Şekil 1.2’de bu üç malzemenin özellikleri görülmektedir. Aynı zamanda ağırlık tasarrufu sayesinde, havacılık gibi maliyetin oldukça önem arz ettiği sektörlerde daha fazla menzile ve eş zamanlı olarak yakıttan tasarruf sağlanabilmektedir (Campell, 2010).

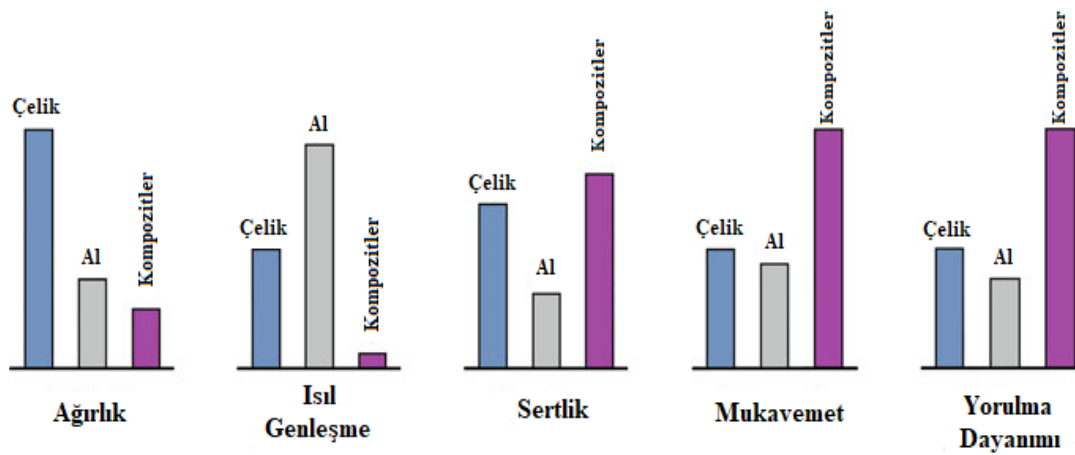
- Kompozitler iyileştirilmiş yorulma ömürlerine sahiptir (Campell, 2010).
- Birim ağırlık başına modül (spesifik veya özgül modül) ve birim ağırlık başına dayanım (spesifik veya özgül mukavemet) dikkate alındığında, kompozit malzemelerin ne kadar avantajlı olduğu kolaylıkla görülebilmektedir (Günaydın, 2003).

Elbette bu avantajlara ek olarak kompozit malzemelerin şüphesiz bazı olumsuz özellikleri de bulunmaktadır. Örneğin bir kompozit malzemenin hava kabarcıkları içermesi malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir (Zor, 2015). Nitekim kompozitlerdeki boşluk içeriğinin %1 artışı bile çekme mukavemetlerinde %10-20 ve eğilme mukavemetlerinde %10 azalmaya yol açabilmektedir (Rajak ve ark., 2019). Bunun yanında üretimlerinde kullanılan ham maddeler zaman zaman pahalı ve geleneksel mühendislik malzemeleri olarak kullanılan metalik malzemelere kıyasla tamir edilebilirlikleri zor olabilir. Kompozit hammadde maliyetleri elyaf cinsine, elyaf şekline ve reçine cinsine bağlı olarak değişmektedir. Kompozitler, darbe hasarlarına karşı da hassas olabilirler (Campell, 2010; Younossi ve ark., 2001).

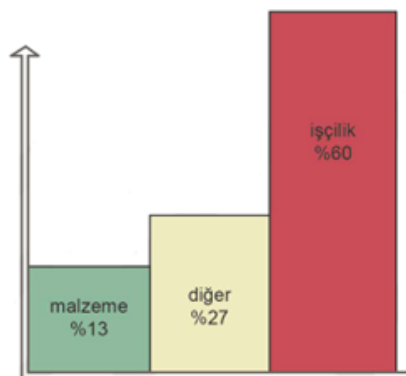
Bilindiği gibi özellikle elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kullanımı her geçen gün artmaktadır ve artan kullanıma bağlı olarak bu malzemelerin işlenebilirliği önemli bir araştırma konusu olmuştur. Cam ve karbon elyaflara alternatif olarak bazalt elyaf kullanılmaya başlanmıştır ve bazalt elyaf takviyeli polimer (BFRP) kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilmiş malzemelerdeki mekanik farklılıklar işlenebilirlik sırasında çeşitli sorunlara yol açmaktadır; çünkü bu malzemelerin işlenmesi, geleneksel metal malzemelerden daha farklı olmaktadır. Özellikle yüksek performanslı kompozit ürünlerde bu durum üzerinde durulması gereken önemli bir konudur. Şekil 1.3’te yüksek performanslı kompozitlerin maliyet kalemleri gösterilmiştir. Havacılık uygulamalarında kullanılan yüksek performanslı kompozitlerin maliyetinin, alüminyum gibi metallerden daha yüksek olduğu bilinmektedir (Younossi ve ark., 2001). Bu çalışma, kompozit malzemelerin işlenebilirliğindeki temel farklılıkları ele alıp çeşitli işlenebilirlik sorunlarına cevap ve kompozit malzemeler hakkında bilgi vermeyi amaçlamıştır.



Şekil 1.1. B-2 bombardıman uçağında kullanılan kompozitler (Younossi ve ark., 2001)



Şekil 1.2. Çelik, alüminyum ve kompozitlerin karşılaştırılması (Chawla, 2019)



Şekil 1.3. Yüksek performanslı kompozit bileşenlerin üretim maliyet dağılımı (Kahraman, 2017)

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Vigneshwaran ve ark. (2018), iş mili dönüş ve ilerleme hızları ile takım geometrisinin kompozit malzemelerin işlenebilirliğini etkileyen en önemli parametreler olduğunu, bu parametrelerin işlenebilirliği etkileme koşullarının takviyenin cinsine ve içeriğine göre de değişebildiğini bulmuşlardır (Vigneshwaran ve ark., 2018).

Caggiano (2018), kompozit malzemelerin işlenmesinde takım geometrisi ve malzemesi ile kesme derinliği, elyaf yönü özelliklerinin önemli bir role sahip olduğunu göstermiştir. Aynı çalışmada elyaf takviyeli kompozitlere son şeklini verebilmek için çeşitli işleme yöntemleri uygulandığında birtakım zorlukların meydana geldiğini ve bu zorluklara ne yazık ki hâlâ tam anlamıyla bir çözüm getirilemediği belirtilmiştir.

Gemi ve ark. (2019), çeşitli delme uçlarının günümüzde basınçlı kanalizasyon hatları ve doğalgaz iletim hatları gibi birçok sektörde kullanılan cam elyaf takviyeli plastik kompozit borularda delme performansı ve hasar oluşumu üzerindeki etkilerini incelemiştir. Borular filament winding yöntemiyle  $\pm 55^\circ$  sarım açısıyla 3 katman hâlinde üretilmiştir. Delme sırasında oluşan itme kuvvetleri kaydedilmiş, delme işleminden sonra delik çıkış yüzey hasarı ve delik yüzey hasarı SEM ile incelenmiştir. Daha yüksek itme kuvveti oluşumunun delaminasyon hasarını arttırdığı görülmüştür. Boru şeklindeki bir kompozitin son tabakasının delinmesi esnasında oluşan delaminasyon hasarının, en şiddetli delaminasyon hasarı olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda kesici takım geometrisinin cam elyaf takviyeli plastik boruların delme performansında özellikle hasar oluşumu açısından önemli bir etkiye sahip olduğu da anlaşılmıştır.

Abrão ve ark. (2008), kesici takım geometrisinin ve malzemesinin cam elyaf takviyeli epoksi kompozitin, delinirken üretilen itme kuvveti ve delaminasyon üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Kompozit tabakalar; el yatırma yöntemiyle üretilmiş olup  $0/90^\circ$  yönelimlidir. Takım geometrisinin ve malzemesinin itme kuvvetini önemli oranda etkilediği gözlemlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda takım malzemeleri ve geometrileri için itme kuvveti ve delaminasyon arasında doğrudan bir ilişki olmadığı görülmüştür. Oluşan delaminasyon hasarlarının, uç çıkışında daha şiddetli olduğu da yapılan deneyler sonucunda gözlemlenmiştir.

Tsao ve Hocheng (2007), karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin delinmesinde uç aşınmasının sebep olduğu delaminasyonu incelemişlerdir. Araştırmalarında kullandıkları tabakalar otoklav yöntemiyle üretilmiştir ve 24 katlı olup  $0/90^\circ$  ( $[0.90]_{12s}$ ) yönelime sahiptir. Yapılan deneyler sonucunda aşınmayla birlikte itme

kuvvetinin daha büyük ölçüde artışı sebebiyle delaminasyon oluşma olasılığının daha yüksek olduğu görülmüştür. Nitekim endüstriyel deneyim de aşınmış uçların daha fazla delaminasyona sebep olduğunu göstermektedir.

Davim ve Reis (2003), karbon elyaf takviyeli plastiklerde kesme ve ilerleme hızı gibi kesme parametrelerinin delaminasyon üzerindeki etkilerini, Taguchi tekniklerine dayanan bir deney planı oluşturarak incelemişlerdir. Kompozit malzemeler (plakalar) otoklav yöntemiyle üretilmiştir ve 0/90° yönelimlidir. Daha yüksek kesme ve ilerleme hızlarında delaminasyon hasarının arttığı gözlemlenmiştir.

Kılıçkap ve Çelik (2012), kesme parametreleri (kesme ve ilerleme hızı) ve takım malzemesinin, cam elyaf takviyeli plastik kompozit malzemelerin frezelenmesinde oluşan yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Kullanılan kompozit malzeme el yatırma yöntemiyle üretilmiştir ve elyaflar arası açı 90°'dir. Elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin artan kesme hızı ile azalırken artan ilerleme hızı ile arttığı görülmüştür.

Yazman (2021), cam elyaf takviyeli polimer kompozit boruların delme işlemi esnasında numunede destek kullanımının etkisini araştırarak delaminasyon, itme kuvvetleri, hasar oluşumları ve yüzey kalitesi gibi durumları araştırmıştır. Kompozit borular  $\pm 55^\circ$  yönelimlidir ve cam elyaflar 17  $\mu\text{m}$  çaplıdır. Destekli delme işleminin itme kuvvetini biraz arttırdığı görülmüştür. İlerleme hızının delaminasyon üzerindeki etkisinin kesme hızından daha önemli olduğu, destek kullanımının delik çıkışlarındaki delaminasyon hasarlarını azalttığı gözlemlenmiştir. Destek kullanmanın özellikle daha yüksek ilerleme hızlarında yüzey kalitesini iyileştirdiği anlaşılmıştır.

Gemi ve ark. (2020), cam ve karbon elyaf takviyeli hibrit kompozit borularda delme işlenenebilirliğini delaminasyon faktörü, yüzey kalitesi ve delik çıkış hasarları açısından incelemişlerdir. Üretilen kompozit borular  $\pm 55^\circ$  yönelimlidir ve borular elyaf sarım yöntemi kullanılarak sarılmıştır. Çalışma sonucunda kompozit plakalar delinirken daha yüksek kesme hızlarında ve daha düşük ilerleme hızlarında delaminasyon hasarlarının daha az olduğu gözlemlenmiştir. Oluşan hasarların genellikle elyaf sarım yönünde meydana geldiği görülmüştür. Daha yüksek iş mili dönüş ve daha düşük ilerleme hızları ile destek kullanmanın yüzey pürüzlülüğünü azalttığı anlaşılmıştır. Çalışma sonucunda cam tabakaların karbon tabakalara göre delaminasyon hasarına karşı daha hassas olduğu da anlaşılmıştır.

### 3. KURAMSAL TEMELLER

#### 3.1. Kompozit Malzemeler

En az iki farklı malzemenin sistematik şekilde bir araya gelerek oluşturduğu malzemelere kompozit malzemeler adı verilir. Kompozit yapıyı oluşturan malzemeler birbirleri arasında kimyasal reaksiyon gerçekleştirmez ve makro seviyede heterojen özellikler gösterirler. Kompozit malzemeler; takviye fazını bir arada tutan, yükü takviye fazına dağıtan, takviyelerin yüzeyini mekanik bozulmalardan koruyan matris ve matrisin dayanımını arttırarak kompozit yapının rijitliğini güçlendiren takviye fazlarından oluşurlar. Kompozit malzemeler en genel halleriyle polimer, seramik ve metal matrisli olmak üzere üçe ayrılırlar (Gemi, 2014; Mallick, 2007; Yılmaz, 2016).

Polimer matrisli kompozitler (PMK) günümüze kadar en sık kullanılmış olan kompozit uygulamalarıdır (Sheikh-Ahmad, 2009). Kompozit yapımında kullanılan matris malzemeleri, polimer olarak termoset ve termoplastik malzemelerdir. Kompozit üretiminde en çok tercih edilen polimerler, termosetlerdir (Morkavuk, 2016). PMK'ler; metal matrisli kompozitlere (MMK) ve seramik matrisli kompozitlere (SMK) kıyasla daha düşük sıcaklık özelliklerine sahipken üretimleri de MMK'lere ve SMK'lere göre daha kolaydır (Chung, 1994; Hocheng, 2012). PMK'lerin çalışma sıcaklığı, MMK'lere göre daha düşüktür (Krishnaraj ve ark., 2013). Polimer ürünü mühendislik plastiklerinin düşük maliyet, kolay üretilebilirlik ve yüksek korozyon direnci gibi çeşitli avantajları bulunmaktadır (Anderson, 2005).

SMK'ler hem matris hem de takviye olarak seramik malzemeleri kullanabilmektedirler (Sheikh-Ahmad, 2009). SMK'ler yüksek spesifik modüllerine ve yüksek sıcaklık özelliklerine sahip oldukları için metallere kıyasla daha üstün olsalar da seramik matrislerin yüksek gevrekliklerinden ötürü yeterli dayanıklılığa sahip olmaması, bu kompozitlerin kullanımını çoğunlukla yüksek ısı uygulamalarıyla sınırlamak zorunda kalmıştır (Alarçin, 2014; Krishnaraj ve ark., 2013). Yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve yüksek sertlik istenen yerlerdeki kullanımlarda, elbette seramiklerin yüksek sertliğe ve mükemmel termal kararlılığa sahip olmaları da oldukça etkili olmaktadır (Sheikh-Ahmad, 2009).

Metaller genellikle yüksek yoğunluğa sahipken magnezyum (Mg), berilyum (Be) ve alüminyum (Al) gibi bazı metaller, diğer metallere göre daha düşük yoğunluğa sahiptir (Morkavuk, 2016). Metal matrisler büyük çaplı uygulamalarda kullanılmak için fazlasıyla

maliyetlidirler -ki bu sebepten MMK'lerin üretimi de maliyetçe yüksek olmaktadır- ve bu matrislerle çalışılması oldukça zordur (Alarçin, 2014; Morkavuk, 2016). Aynı zamanda üretimlerinde çok yüksek işlem sıcaklıkları gerektirmesi de bu kompozitleri pahalı bir hâle getirmektedir (Chung, 2010). Metal matrisler çoğunlukla alüminyum ve titanyum alaşımlarından oluşmaktadır. Özellikle alüminyum metal matrisli kompozitler mukavemetin ve sertliğin istenildiği yerlerde kullanılır (Sheikh-Ahmad, 2009). MMK'ler için en yüksek sertliği ve dayanımı sürekli elyaflar sağlar (Krishnaraj ve ark., 2013).

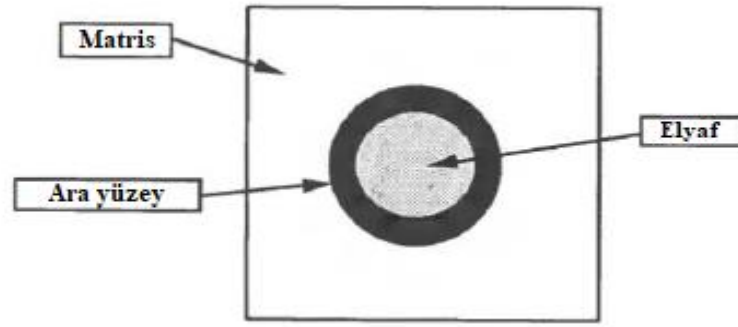
Kompozitler her ne kadar kendilerini kanıtlamış olsalar da hâlâ geliştirildikleri ve geliştirmeler sonucu tanıtilen yeni malzemelerin hasar davranışları henüz tam anlamıyla bilinmediği için metallerin yerini tamamen alması beklenemez (Younossi ve ark., 2001).

Kompozit malzemelerin işlenebilirliğini, üst kullanım sıcaklığını, yanıcılık özelliklerini ve korozyon direncini kontrol eden mekanizma, reçinedir (Mallick, 1997). Yani matris seçimi, çevresel etmenlere karşı en önemli etkidir (Campell, 2010).

Kompozitlerin performansını mekanik özellikler açısından değerlendirebilmek için ara yüzey davranışları da bilinmelidir; zira mekanik özellikler bu bölgenin özelliklerine önemli ölçüde bağlıdır (Kohjiya ve Ikeda, 2014). Ara yüzeyin kompozite etkileri aşağıdaki gibidir:

1. Kompozit malzemelerin rijitliği, takviye ve matris arasındaki ara yüzey dayanımına bağlıdır. Ara yüzey, aynı zamanda kompozit malzemelerin elastisite modülünü etkileyen önemli bölgedir (Sepet, 2019).
2. Ara yüzey bağlanmasının iyi olması yüksek enine ve kayma gibi mukavemetler ile yorulma dayanıklılığı için oldukça önemlidir; ancak bu bağlanmanın çok güçlü olduğu durumlarda kompozit malzemenin kırılma tokluğu ve hasar direnci azalış gösterir (Mallick, 2018).
3. Basma mukavemeti, elyaf ve matris yapışma mukavemetiyle ilişkilidir. Ara yüzey yapışmasının kompozit malzemelerin performansını oldukça etkilediği bilinmektedir. Bu yapışma kötü olursa kompozitin basma ve eğilme mukavemeti düşer ve darbe sonrası oluşan delaminasyon hasarları artar (Mallick, 1997).
4. Ara yüzey bağları; elyaf ve matris arasındaki gerilim transferinde çok önemli bir role sahiptir (Talreja ve Singh, 2012). Bu sebeple elyaf ve matris ara yüzeyinin ıslanabilirliğini iyileştirip daha güçlü ve sağlıklı bir ara yüzey bağı oluşturmak amacıyla elyaflara çeşitli yüzey işlemleri uygulanabilir (Mallick, 2007).

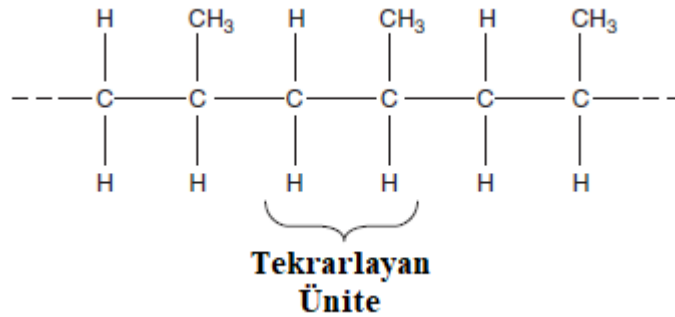
Şekil 3.1'de elyaf takviyeli bir kompozit malzemedeki ara yüzeyin sembolik olarak gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Elyaf ve matris ara yüzeyi (Mallick, 1997)

### 3.2. Polimerik Matrisler

Polimerler, “mer” adı verilen iki veya daha fazla bileşiğin birleşiminden oluşmaktadırlar (Anderson, 2005). Polimerlerin sentezine polimerizasyon adı verilir ve bu işlemde monomerler birbirine bağlanarak uzun zincirler oluşturarak polimer yapısını meydana getirirler (Callister ve Rethwisch, 2010). Polimerler, uzun moleküler zincirlerden oluştuğu için diskolasyon içermezler (Anderson, 2005). Şekil 3.2’de tekrarlı mer yapısı görülmektedir.



Şekil 3.2. Polipropilen polimerindeki mer yapısı (Mallick, 2007)

1900’lü yılların başlarında modern plastiklerin geliştirilmesinin ardından 1930 sonlarında plastikler, diğer geleneksel malzemeler ile benzer özelliklere sahip olmaya başlamışlardır. Plastik malzemelerin güçlendirilmesi amacıyla yapılan çalışmalar, 1950’li yıllarda polimer matrisli kompozitlerin geliştirilmesiyle sonuçlanmıştır (Arıcasoy, 2006). Polimer matrisler, özellikle sürekli elyafarla kullanılan epoksi ve doymamış polyester reçineler başta olmak üzere, kompozit yapılarda kullanılan en yaygın matris

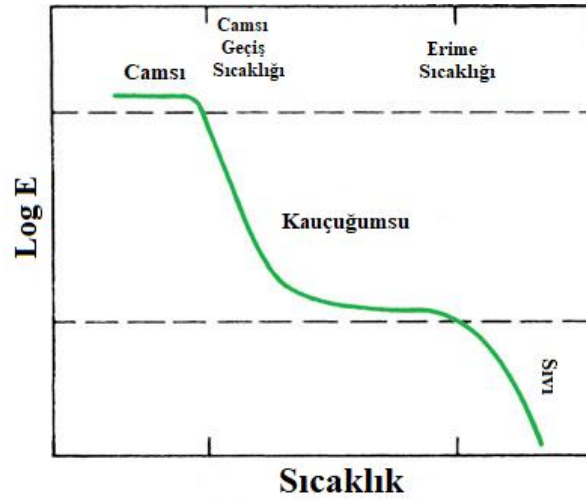
malzemeleridir (Chawla, 2019; Yılmaz, 2016). Kompozit kullanımında pazara hâkim olan polimerler termosetler olsa da 1980'li yıllardan itibaren termoplastiklerin kullanımı da giderek artış göstermiştir (Mallick, 1997).

Polimer malzemeler birçok avantaja sahiptir. Bunlar şöyle sıralanabilir:

- ❖ Üretimlerinde kullanılan malzemeler ucuz olduğu ve polimerler kolay şekillendirilebildiği için polimerler de ucuzdur.
- ❖ Çok yüksek sıcaklık ve basınçlara ihtiyaç duymadan üretilebilirler.
- ❖ Kimyasallara metallere göre daha dirençlidirler.
- ❖ Genellikle metallere ve seramiklere göre daha yüksek termal genliklere sahiptirler.
- ❖ Tek başlarına mühendislik metal alaşımlarına kıyasla mukavemet, sertlik, tokluk ve yüksek sıcaklık özellikleri açısından daha düşük özellik sergilerler; ancak çeşitli takviyelerle özgül mukavemet ve modülleri başta olmak üzere spesifik özellikleri iyileştiği için mekanik özellikleri de iyileşir (Chawla, 2019; Sheikh-Ahmad, 2009; Yılmaz, 2016).
- ❖ Polimerler, özellikle termoplastikler, viskoelastik davranışlara sahip olduklarından dolayı sönümlenme yeteneğine sahiptirler. Camsı geçiş sıcaklıkları ( $T_g$ ), oda sıcaklığından daha düşük olan amorf termoplastikler sönümlenme uygulamaları için oldukça ilgi çekicidir (Chung, 2010).

Tüm polimerler, camsı geçiş sıcaklığı olarak bilinen karakteristik bir geçiş sıcaklığına ısıtıldıklarında sertliklerinde önemli bir düşüş yaşarlar. Isıtıldıktan sonra yarı kristalli ve amorf polimerler, camsı geçiş sıcaklığında kademeli olarak sert bir katıdan kauçuğumsu bir malzemeye ve bunun ardından erime sıcaklığında sıvıya dönüşür (Sheikh-Ahmad, 2009).  $T_g$  soğutma hızına duyarlı olduğu için ani ısıtma veya soğutma,  $T_g$ 'yi arttırma eğilimindedir (Anderson, 2005). Şekil 3.3'te  $T_g$ 'nin sıcaklıkla ilişkisi gösterilmiştir.

Polimerlerin üstün özellikleri kadar dezavantajları da vardır. Yapısal olarak metallere ve seramiklere göre çok daha karmaşık bir yapıya sahiptirler ve nem emilimi yoluyla bozunabilirler (Chawla, 2019). Ortamdan nem emilimi, genellikle polimerlerin  $T_g$ 'sini de düşürmektedir (Mallick, 1997).



Şekil 3.3. Amorf bir polimerin elastisite modülü-sıcaklık değişimi (Chawla, 2019)

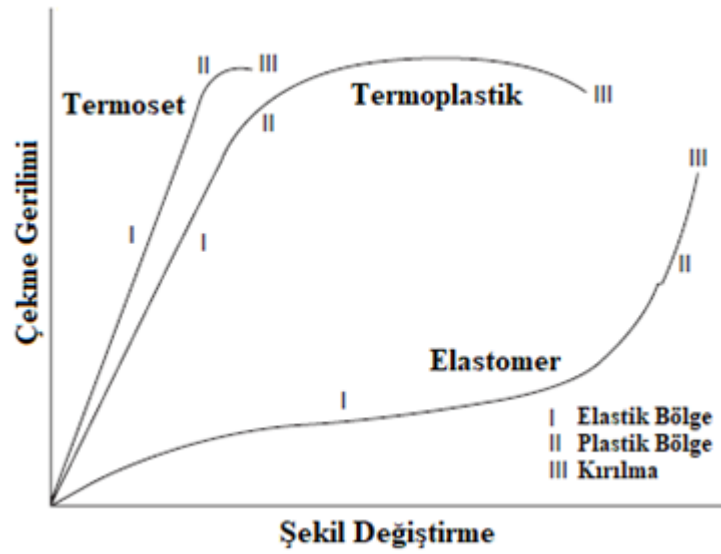
Takviye edilmemiş polimerlerin termal genişleme katsayısı metallere göre daha yüksektir. Polimer bir matrise elyaf takviyesi yapıldığı zaman elde edilen kompozitin termal genişleme katsayısı çoğunlukla düşmektedir (Mallick, 2007).

Polimerler temel olarak termosetler ve termoplastikler olmak üzere ikiye ayrılır da bunlara üçüncü olarak elastomerler de eklenebilir (Yılmaz, 2016). Çizelge 3.1'de termoset ve termoplastikler kıyaslanmıştır.

Çizelge 3.1. Matris malzemelerinin kıyaslanması (Sheikh-Ahmad, 2009)

	Termosetler	Termoplastikler
Maliyet	Düşük	Yüksek
Hasar toleransı	Ortalama	İyi
Çevresel dayanıklılık	İyi	Olağanüstü
Nüfuz edilebilirlik	Kolay	Zor
Prepreg sarımı	İyi	Kötü
Teknik bilgi ve malzeme verisi	Geniş	Sınırlı
Prepreg raf ömrü	Kısa	Süresiz
Prepreg yapışma	İyi	Yok
Kürleme süresi	Uzun	Kısa
Kürleme sıcaklığı	Düşük	Yüksek
Kürleme basıncı	Düşük	Yüksek
Geri dönüştürülebilirlik	Yok	İyi
Viskozite	Düşük	Yüksek

Elastomerler, hafif çapraz bağlara sahiptir ve büyük elastik gerilmelere sahip olabilirler (Anderson, 2005). %200'den fazla elastik deformasyon gösterebilen yeteneğine sahiptirler (Askeland ve Wright, 2014). Silikon ve karbon siyahı elastomerlere iyi bir örnektir (Callister ve Rethwisch, 2010). Şekil 3.4'te üç tür polimerin gerilme ve gerinim grafiği verilmiştir.

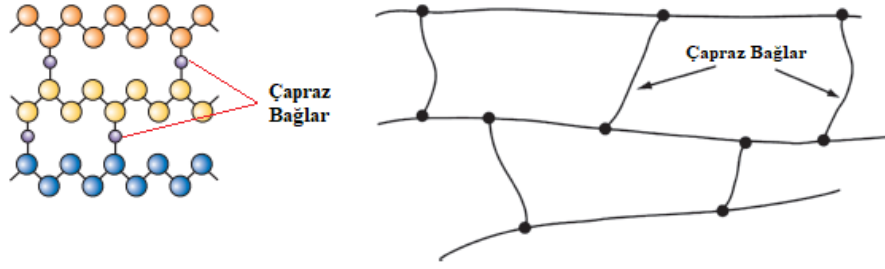


Şekil 3.4. Çeşitli matris malzemelerinin gerilme-gerinim kıyasları (Mouritz, 2012)

### 3.2.1. Termosetler (Isıl sertleşir matrisler)

Moleküldeki atomları bir arada tutan birincil bağlara sahip uzun hidrokarbon moleküllerinden oluşurlar ve kovalent bağlarla çapraz bağlanırlar. Çapraz bağlardan dolayı molekül tarzlarını değiştirmek mümkün olmadığı için, termosetler hem sıvı hem de katı hâlde hep amorf yapıdadırlar. Moleküler zincirlerin yüksek oranda çapraz bağlanmış olması aşırı kırılma tokluğuna, yani çok düşük kırılma tokluğuna sebep olur. Aynı zamanda bu çapraz bağlar lineer zincirin hareket etme yeteneğini de kısıtladığı için  $T_g$ 'leri yüksektir ve bundan dolayı yeniden ısıtılıp şekillendirilemezler, geri dönüşümleri yoktur; ancak buna rağmen maliyetleri oldukça düşüktür. Termosetlerin performanslarını arttırmak için elyaf/reçine oranını arttırmak ve malzeme içinde oluşabilecek hava boşluklarını tamamen gidermek gerekmektedir. Termosetlere; epoksi, polyester, fenolik, vinil ester ve poliimid reçineler örnek olarak verilebilir (Arıcasoy, 2006; Chawla, 2019; Gemi, 2014; Sheikh-Ahmad, 2009; Vahapoğlu, 2013; Yılmaz, 2016).

Yüksek oranda çapraz bağlı termosetler, genellikle termoplastik polimerlerden daha düşük sürünme gerilmeleri sergiler (Mallick, 2007). Şekil 3.5'te termosetlerdeki kovalent çapraz bağlar görülmektedir.

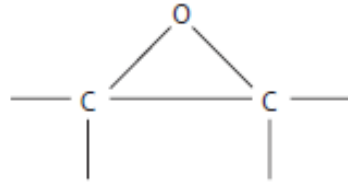


Şekil 3.5. Termoset yapısı (Askeland ve Wright, 2014; Mallick, 2018)

Süneliklerinin ve darbe dirençlerinin zayıf olması ile termoplastiklere göre daha fazla nem emmeleri gibi dezavantajları bulunsa da termoset reçinelerin izotropik özellik göstermesi büyük avantajdır (Askeland ve Wright, 2014; Campell, 2010; Sepet, 2019).

### 3.2.1.1. Epoksi

Epoksi, molekülünde bir dizi reaktif epoksit halkası içerir ve bu epoksit halkalarının her birisi bir O ve iki C atomu içerir (Mallick, 2018). Şekil 3.6'da epoksit görünümü bulunmaktadır.



Şekil 3.6. Epoksit halkası (Mallick, 2018)

En yaygın termoset matris malzemelerinden birisidir ve yüksek performanslı polimer matrisli kompozitlerin çok büyük bir kısmında matris olarak epoksi tercih edilmektedir (Chawla, 2019). Aynı zamanda prepreg üretimlerinde de en sık kullanılan matristir (Mallick, 2007). Elbette bu, üstün mekanik özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu özellikler şu şekilde sıralanabilir:

- ❖ Kimyasallara ve neme dirençleri yüksektir.
- ❖ Düşük ve yüksek sıcaklıklarda sertleşebilirler.
- ❖ Aşınma dirençleri yüksektir.
- ❖ Suya dayanıklıdırlar.

- ❖ Yüksek mukavemete sahiptirler.
- ❖ Kürleme esnasındaki büzülme yüzdeleri düşüktür.
- ❖ Kullanım alanları çok geniştir (Arıcasoy, 2006; Chawla, 2019; Günaydın, 2003).
- ❖ Çoğunlukla polyester ve vinil esterlerden daha yüksek kırılma tokluğuna sahiptirler ve çalışma ömürleri de polyester ve vinil esterlere göre daha uzundur (Mallick, 1997).
- ❖ Boyutsal stabiliteye sahiptirler ve iyi yapışma sergilerler (Chung, 1994). Çok farklı malzemelere oldukça iyi yapışma yetenekleri sayesinde hem polimerlerin hem metallerin hem de seramiklerin yapıştırılmasında kullanılabilirler (İnançer, 2015; Sarı, 2017).
- ❖ Epoksilerin özellikleri, farklı formüllerle büyük oranda değiştirilebilmektedir (Gemi, 2014).

Doymamış polyesterlere göre daha yüksek maksimum kullanım sıcaklığına sahiptirler ve havacılık sektöründe kullanımları yaygındır. Doymamış polyesterlere göre daha pahalı ve imalatlarının polyestere göre daha zor oluşu, polyesterlerden daha az kullanılmasına neden olmuştur (Chawla, 2019; Günaydın, 2003; Younossi ve ark., 2001).

Bir epoksinin kürleme reaksiyonu, reaksiyon sıcaklığının düşürülmesiyle yavaşlatılabilir (Chawla, 2019). Bu ise bir yönden avantajken çoğu yönden dezavantajdır. Düşük reaksiyon sıcaklıkları maliyeti azaltırken, kürleme reaksiyonunun süresini uzatabileceği için zaman kaybını arttırmaktadır. Epoksilerin kırılma doğaları gereği gevrek olması da bir diğer dezavantajdır (Sepet, 2019). Çizelge 3.2'de epoksilerin özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Epoksi karakteristik özellikleri (Chawla, 2019)

Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Mukavemet (MPa)	Young modülü (GPa)	Poisson oranı ( $\nu$ )	Termal genleşme katsayısı (10 <sup>-6</sup> /K)	Kürleme büzülmesi (%)	Servis sıcaklığı (°C)
1.2-1.3	50-125	2.5-4	0.2-0.33	50-100	1-5	120

### 3.2.1.2. Polyester

Çok üstün olmayan mekanik özelliklerine rağmen ucuzlukları sebebiyle çok kullanılırlar (Arıcasoy, 2006; Günaydın, 2003). Avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- ❖ Kolay kullanıma sahiptirler.

- ❖ Düşük maliyetlidirler.
- ❖ Suya, çeşitli kimyasallara, hava koşullarına ve eskimeye karşı yeterli dirence sahiptir (Arıcasoy, 2006; Chawla, 2019). Yaklaşık 80°C'ye kadar olan sıcaklıklara dayanabilirlerken, suya dayanıklılıkları sayesinde de özellikle denizcilik pazarına hâkimdirler (Chawla, 2019; Mallick, 1997).
- ❖ İşlenmelerinde çok yönlülüğe izin verdikleri için oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta kürlenebilecek şekilde formüle edilebilirler ki en büyük avantajı budur. (Campell, 2010). Epoksilerin aksine, reaksiyon sıcaklıkları yükselttilerek kürlleme süreçleri hızlandırılabilir (Chawla, 2019).

Raf ömürlerinin kısa olması ise en büyük dezavantajlarıken düşük sıcaklık kapasiteleri, daha düşük mekanik özellikler ve kürlleme esnasında daha fazla büzülme gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Arıcasoy, 2006; Campell, 2010). Çizelge 3.3'te polyester özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Polyester karakteristik özellikleri (Chawla, 2019)

Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Mukavemet (MPa)	Young modülü (GPa)	Poisson oranı ( $\nu$ )	Termal genleşme katsayısı (10 <sup>-6</sup> /K)	Kürleme büzülmesi (%)	Servis sıcaklığı (°C)
1.1-1.4	30-100	2-4	0.2-0.33	50-100	5-12	80

### 3.2.1.3. Fenolik

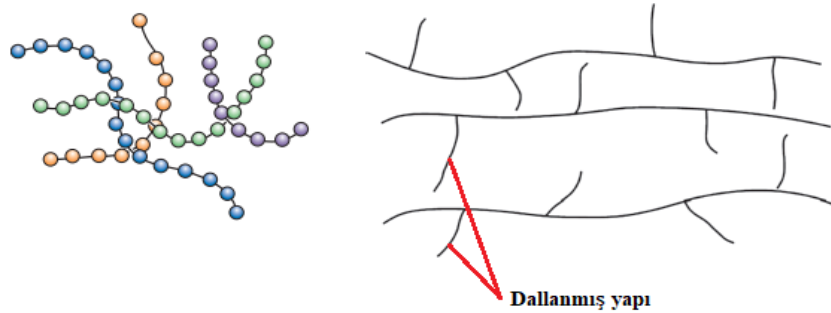
Geniş bir sıcaklık aralığında mükemmel boyutsal kararlılığa, elektriksel yalıtım özelliklerine, sürünme direncine, sertliğe sahiptirler (Mallick, 1997). Duman ve yangın dirençleri olağanüstüdür ancak işlenmesi zor olabilmektedir (Campell, 2010). Kırılgan ve yüzey kalitesi her ne kadar düşük olsa da ateşe dayanıklı ve düşük maliyetli olmaları fenoliklerin de matris olarak kullanılmasını sağlamaktadır (Arıcasoy, 2006). Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde kullanımı, kırılgan doğaları sebebiyle sınırlıdır (Mallick, 1997). Çizelge 3.4'te fenoliklerin özellikleri bulunmaktadır.

**Çizelge 3.4.** Fenolik karakteristik özellikleri (Chawla, 2019)

Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme mukavemeti (MPa)	Sürekli servis sıcaklığı (°C)	Termal genleşme katsayısı (10 <sup>-6</sup> /K)	Su emiciliği (24 saat %)
1.3	50-55	150-175	45-110	0.1-0.2

### 3.2.2. Termoplastikler (Isıl yumuşar matrisler)

İkincil (Van der Waals) bağlarla bir arada tutulan uzun hidrokarbon moleküllerinden oluşurlar. Şekil 3.7’de bu bağ yapıları gösterilmiştir. İkincil bağlar birincil bağlara nazaran daha zayıf olduğu için, sıcaklıkları arttırıldığında kırılarak akma gösterirler. Bu sebeple üretimleri daha kolaydır. Çapraz bağlara sahip olmadıklarından dolayı  $T_g$ ’leri termosetlerden daha düşüktür. Termosetlerin aksine geri dönüştürülebilirler; ancak her geri dönüşüm sonrası mekanik özellikleri ilk durumlarına göre kötüleşir. Termoplastikler sahip olduğu bağlardan dolayı amorf ya da yarı kristal bir halde bulunabilirler. Moleküllerin düzeni hem erimiş hem de katı hâlde rastgele ise amorf, eriyik hâlden katılaşmaya geçerken moleküller kendisini düzenli bir hale sokarsa yarı kristalli adı verilir. Soğutma süresi termoplastiklerin kristallik derecesini etkiler. Soğutma hızı daha yavaş olursa kristalleşme derecesi de artar. Termoplastik polimerlerin molekülleri, termoplastik polimerlere yüksek sıcaklıklarda olağanüstü bir boyutsal kararlılık veren sert aromatik halkalar içermektedir. Termoplastiklere; poli etilen (PE), polieter eter keton (PEEK) ve poli propilen (PP) örnek olarak verilebilir (Chawla, 2019; Mallick, 2007; Sheikh-Ahmad, 2009; Yılmaz, 2016). Son yıllarda kullanımları giderek popüler bir hâl almıştır (Anderson, 2005).



Şekil 3.7. Termoplastik yapısı (Askeland ve Wright, 2014; Mallick, 2018)

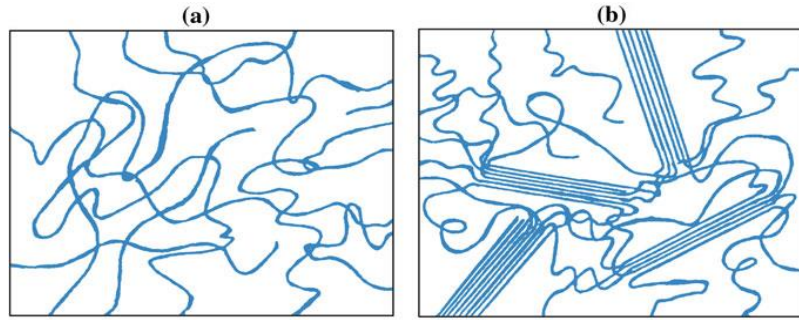
Çapraz bağlı termosetlere göre daha serttirler ve kendi içlerinde amorf yapıdaki termoplastikler genellikle yarı kristalli termoplastiklerden daha serttir. %30-100 arasında değişen kopma uzamasına sahiptirler. Bu geniş kopma uzaması aralığı kristalleşme miktarındaki büyük farklılıklardan kaynaklanır. Kompozit malzemelerde matris olarak kullanılan termoplastikler genellikle %20-35 arası kristal yapıya sahiptir. Kristalleşme artarsa mukavemet, sertlik, sürünme ve sıcaklık direnci artar; ancak tokluk genellikle

azalır. Özellikle PEEK kristalimsi içeriği sayesinde tokluk ve darbe özelliklerinden dolayı çekici bir matris malzemesi olarak, yüksek sıcaklıklara da uygundur, 250°C uzun süreli ve 300°C kısa süreli kullanım sıcaklığına sahiptir. Termoplastiklerin viskoziteleri basınç ve ortalama molekül ağırlığı artışıyla artış gösterir, artan sıcaklıkla ise azalır; ancak daha yüksek sıcaklıklarda reçinenin ayrışma tehlikesi vardır. Termoplastiklerin avantajları aşağıdaki gibidir:

- ❖ Soğuk depolamaya ihtiyaç duymazlar.
- ❖ Termosetlere göre daha iyi tokluğa, sünekliğe ve darbe direncine sahiptir (Campell, 2010; Chawla, 2019; Mallick, 2018; Sheikh-Ahmad, 2009).
- ❖ Çevresel etmenlere dirençleri yüksektir ve çatlak yayılmalarına karşı daha iyi dirence sahiptirler (Chung, 1994; Mallick, 2018).
- ❖ Raf ve depolama ömürleri sınırsızdır. Depolama için özel araçlara ihtiyaç duymazlar (Chung, 1994; Mallick, 2018).
- ❖ Kopma uzamaları, kırılma toklukları ve darbe enerjisi emilimleri daha yüksek olduğu için yüksek performans istenen uygulamalarda kullanıma uygundur (Mallick, 2018). Kırılma toklukları çok iyi olduğu için darbe dirençleri de buna bağlı olarak yüksektir (Ulus, 2018).
- ❖ Üretimlerinde esnasında açığa çıkan kimyasal miktarları daha az olduğu için daha az sağlık sorununa yol açarlar (Chung, 1994).
- ❖ İşlem süreleri daha kısadır (Mallick, 2018).
- ❖ Titreşim kaynağı ve ultrasonik kaynak kullanılarak kaynaklanabilme özelliğine sahiptirler (Mallick, 2018).
- ❖ Termoplastik reçineler, kompozit malzemelerin çekme ve eğilme dayanımlarının artırılması için de kullanılabilirler (Alarçin, 2014).
- ❖ Nem emilimleri termosetlere göre daha düşüktür (Campell, 2010).
- ❖ Yarı kristalli termoplastikler çözücülere karşı oldukça iyi direnç gösterirler. Amorf termoplastikler ise iyi uzama, iyi tokluk ve iyi darbe direncine sahiptirler (Campell, 2010).
- ❖ Termoplastikten imal edilen prepregler de soğutma dolabına ihtiyaç duymamaktadır (Campell, 2010).
- ❖ Termoforming ile sonradan da şekillendirilebilirler (Mallick, 2007).

Bunların yanında; oldukça fazla genleşmeleri, yüksek viskoziteleri -ki bundan dolayı sürekli elyafların bu polimerler ile ıslatılması daha zordur-, işlem sıcaklıklarının termosetlerden yüksek olması, sert ve kurlenmiş epoksilerin yapışkanlığından yoksun

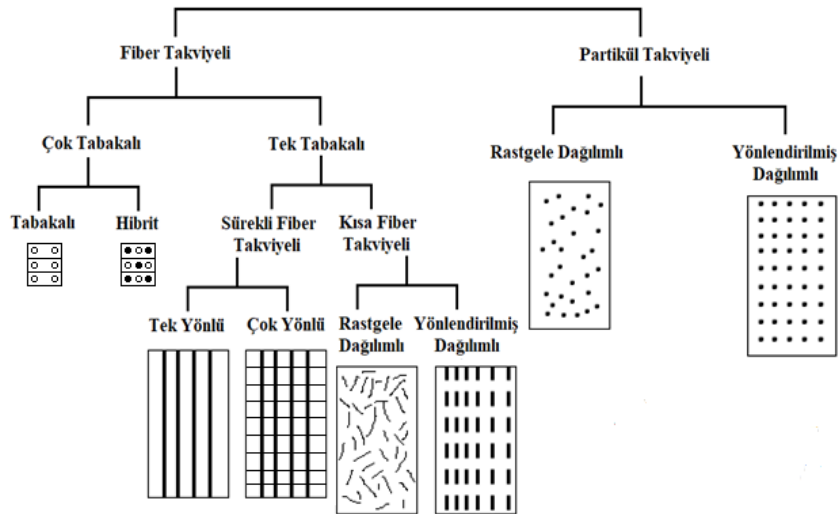
(Kalın) ve yüksek sıcaklıklarda genellikle düşük sürünme direncine sahip olmaları ise olumsuz özellikleridir (Chawla, 2019; Chung, 1994; İnançer, 2015; Mallick, 1997). Aynı zamanda bazı amorf termoplastikler çözücü maddelere karşı hassastır (Campell, 2010). Şekil 3.8’de termoplastiklerin kristal yapıları gösterilmiştir. Çoğu termoplastik yarı kristal bir yapıya sahiptir (Yılmaz, 2016). Termoplastiklerde aynı zamanda  $T_g$ ’si yüksek malzemeler elde edilmeye çalışılmaktadır ve bu noktada PEEK ve polifenilen sülfid (PPS) yüksek  $T_g$ ’ye sahiptir; ancak epoksi ve polyeester gibi çeşitli termosetlerle kıyaslandığında oldukça pahalı kalmaktadırlar (Mallick, 2018; Yılmaz, 2016).



Şekil 3.8. Termoplastik kristal yapıları a) Amorf b) Yarı kristal (Chawla, 2019)

### 3.3. Takviye Fazları

Polimer matrisli kompozitlerde takviye elemanları sürekli elyaf, kırılmış elyaf, kristal (Whisker) ya da partikül şeklinde olabilir. Şekil 3.9’da takviyeler görülmektedir.



Şekil 3.9. Takviye türlerine göre kompozitler (Yılmaz, 2016)

Elyaf lar; malzemelerin en üstün özelliklerini sergileyebilen bir yapıya sahiptirler ve elyaf ların boy/çap oranı art tıkça, kompozit malzemede elyafa iletilen yük de artış göstermektedir (Bayraktar, 2011; Ulus, 2018). Elyaf ların çapları artınca kopma mukavemetleri azaldığı için genellikle elyaf ların olabildiği kadar ince olması istenir; ancak bor elyaf lar buna bir istisnadır (Gay ve ark., 2002). Elyaf çapının artması elyaf ın çekme mukavemetini azaltır; ancak elyaf çapı küçüldüğünde aynı zamanda elyaf üzerinde doğal kusur bulunma olasılığı da azalmaktadır (Kaw, 2006; Mallick, 1997). Elyaf ların esnekliği young modülü ve elyaf çapı ile ilişkilidir. Yüksek modüllü elyaf lar da çap, esnekliği çok yakından etkileyen bir parametredir. Aynı modüle sahip iki farklı elyaf tan çapı daha küçük olan, daha iyi örülebildiği için tasarım aşamasında farklı kullanım şekillerine izin vermektedir (Yılmaz, 2016). Elyaf takviyeler genellikle sürekli formda üretilirler (Sheikh-Ahmad, 2009). Elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf hacim oranı en fazla %80 civarı olabilir. Bunun üzerine çıkıldığında elyaf lar matris tarafından tamamen sarılamamaktadır (Askeland ve Wright, 2014). Elyaf takviyeli polimerlerin termal genleşme katsayısı elyaf cinsine, elyaf yönelimine ve elyaf hacim oranına göre geniş bir aralıkta değer almaktadır (Mallick, 2007). Elyaf takviyeli kompozitler oda sıcaklığında üstün özellikler gösterirler (Sepet, 2019). Yüksek performanslı PMK'lerde genellikle sürekli elyaf lar kullanılır ve bu kompozitlerde elyaf hacim oranı %50-65 arasındadır (Mallick, 2018). Karbon elyaf takviyeli (CFR) polimerler (CFRP) hariç olmak üzere elyaf takviyeli polimer kompozitlerin termal iletkenliği genellikle düşüktür. CFRP'ler, karbon elyaf ların yüksek iletkenlikleri nedeniyle yüksek termal iletkenliğe sahiptir. Elyaf takviyeli polimerlerin termal iletkenliği elyaf cinsine, elyaf yönelimine ve elyaf hacim oranına bağlıdır (Mallick, 2007). Polimerler çoğunlukla düşük termal iletkenliğe sahip oldukları için yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirler (Mallick, 2007).

Sürekli elyaf takviyeli plastik kompozitler, diğer takviyeleri içeren kompozitlere kıyasla daha iyi performans gösterme eğilimindedir. Bu sebepten bu malzemeler, son yıllarda oldukça kapsamlı araştırmalara konuk olmaktadır (Anderson, 2005). Cam elyaf lar, grafit ve karbon elyaf lar a göre daha fazla kullanılır. Bunun sebebi, cam elyaf ın diğer takviyelere göre daha ucuz olması, yüksek mukavemeti, temin edilebilmesinin ve işlenmesinin kolaylığıdır. (Günaydın, 2003). Çekme modülü ve basma mukavemeti için karbon elyaf lar cam ve aramid elyaf lar a göre açıkça üstünken maliyet konusunda ise E camı en uygun seçenektir çünkü karbon elyaf en pahalı elyaf türüdür. Aramid elyaf ların darbe direnci mükemmel olsa da darbe direnci dikkate alınırken matris seçiminin de oldukça etkili olduğu göz önünde bulundurulmalıdır (Campell, 2010). Karbon elyaf lar

yüksek sıcaklıkta iyi korozyon direncine sahip değildirler. Seramik elyaflar yüksek sıcaklıkta en uygun adaydır (Chawla, 2019).

Kompozit malzemelerde aranan en önemli özelliklerden birisi de spesifik mukavemetin yüksek olmasıdır ve bunu sağlamak için yoğunluğu düşük olan elyaflar tercih edilir çünkü; düşük yoğunluk, mukavemet/yoğunluk ( $\sigma/\rho$ ) oranını arttıracığından spesifik mukavemeti de arttıracaktır. (Yılmaz, 2016). Buna bağlı olarak tüm yüksek performans uygulamaları elyafları yoğunlukça düşük değerlere sahiptir (Chawla, 2019).

Elyaf takviyeli kompozitlerin zaman zaman dezavantajları da olabilmektedir. Örnek olarak sürekli elyaf takviyeli termoplastikleri üretmenin, -elyaf yüzeyini yüksek viskoziteli termoplastikle ıslatmak zor olduğundan- süreksiz elyaf takviyeli termoplastikleri üretmeye göre daha zor olması gösterilebilir (Mallick, 2018).

Süreksiz elyaf takviyeli kompozitler, sürekli elyaf takviyeli kompozitlerin daha yüksek sertliğine ve mukavemetine ihtiyaç olmayan uygulamalarda, örneğin yüksek performansın önemli olmadığı PMK'lerde, ucuza üretilebildikleri için kullanılırlar ve bu kompozitlerde elyaf hacim oranı %20-40 arasındadır (Campell, 2010; Mallick, 2018).

Partikül takviyeli kompozitler daha zayıf olmaya meyillidir ve sürekli takviyeli kompozitlerden daha az sertliğe sahiptirler; ancak sürekli takviyeli kompozitlere kıyasla daha ucuzdurlar (Campell, 2010). Son zamanlarda partikül takviyeli kompozitler, izotropik özellikleri sayesinde daha fazla ilgi görmeye başlamıştır (Rajak ve ark., 2019).

Kristal takviyelere whisker adı da verilir ve bu takviyeler 20-1000 arasında boy/çap oranına sahip olan tek kristallerdir. Mukavemetleri olağanüstü olabilir ancak maliyetleri de çok yüksek olabilir (Askeland ve Wright, 2014). Çizelge 3.5'te ve 3.6'da farklı kaynaklardan alınmış çeşitli kristallerin mekanik özellikleri görülmektedir. Değerlerdeki farklılıklar, farklı yazar kaynaklarını kullanmaktan ve kristal takviyelerin içeriğine göre mekanik özelliklerinin de oldukça fazla değişebilmesinden kaynaklanmaktadır.

Takviyeler konusunda bilinmesi gereken en önemli konu; kompozit malzemelerin içindeki takviye oranlarının matris ve takviye birleşimini optimum bir seviyede tutabilecek şekilde ayarlanmasıdır (Morkavuk, 2016). Aksi takdirde kompozit malzemelerden istenen özelliklerin elde edilememesi söz konusu olabilmektedir.

**Çizelge 3.5.** Çeşitli kristallerin mekanik özellikleri (Rana ve Fanguero, 2016)

	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Elastisite modülü (GPa)	Çekme mukavemeti (MPa)	Kopma uzaması (%)	Kırılma tokluğu (MPa m <sup>1/2</sup> )	Maksimum servis sıcaklığı (°C)	Termal iletkenlik (W/m°C)
Silisyum Karbür (SiC) kristalleri	3.15-3.21	440-480	6000-8000	0.2-0.25	2.25-3.25	1130-1180	6-100
Alümina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) kristalleri	3.95-3.97	445-460	1660-2340	0.2-0.25	3-5.9	977-1030	20-25.6

**Çizelge 3.6.** Çeşitli kristallerin mekanik özellikleri (Chung, 1994)

	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme mukavemeti (GPa)	Elastisite modülü (GPa)	Süneklik (%)	Erime sıcaklığı (°C)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.96	21	430	4.9	1982
SiC	3.18	21	480	4.4	2700
Grafit	1.66	21	703	3	3700
Bor Karbür (B <sub>4</sub> C)	2.52	14	480	2.9	2450
Berilyum Oksit (BeO)	2.85	13	340	3.8	2550
Silisyum Nitrür (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	3.18	14	380	3.7	-
Krom (Cr)	7.2	8.9	240	3.7	1890

### 3.3.1. Doğal elyaflar

Yapılarında selüloz bulundurlar. Yanmaları, bozulmaları ve nem tutmaları en büyük olumsuzluk özellikleridir. Pamuk, ipek ve kenevir gibi malzemeler örnek olarak gösterilebilir (Yılmaz, 2016).

### 3.3.2. Cam elyaflar

Cam amorf bir malzemedir ve çekildiğinde mikroyapıda tercih edilen bir yön geliştirmede için izotropik olarak kabul edilebilir (Sheikh-Ahmad, 2009). Camın amorf yapısından dolayı cam elyaflar da amorf bir yapıdadır (Mallick, 1997).

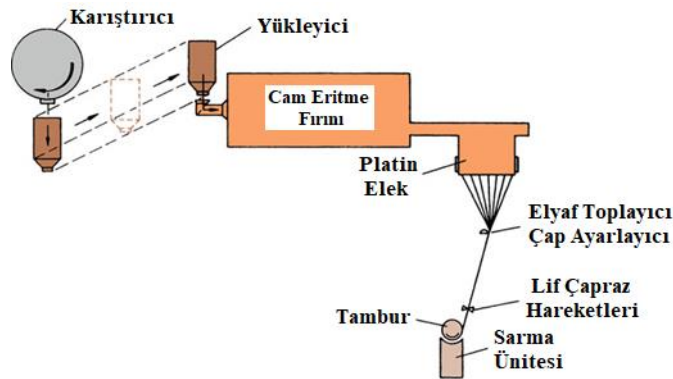
Cam elyafların modern kompozitlerde kullanımı 1940'lı yıllara dayanmaktayken yüksek mukavemete sahip olan cam elyaflar ilk olarak 1930'lu yıllarda geliştirilmeye başlanmıştır (Campell, 2010, Mallick, 1997). Cam elyaflar günümüze kadar en sık kullanılan elyaflardır ve sentetik inorganiklerdir. Düşük maliyetleri, yüksek korozyon dirençleri ve yüksek uzamaları avantajlarıyken nispeten düşük sertlikleri, düşük yorulma dayanımları ve neme maruz kaldıklarında hızlı bozunmaları gibi olumsuz özellikleri nedeniyle yüksek performans istenen yerlerde kullanımları sınırlı kalmıştır. En büyük

avantajları düşük maliyetken nem duyarlılıkları ise en büyük dezavantajları olarak görülmektedir (Günaydın, 2003; Sheikh-Ahmad, 2009; Yılmaz, 2016). Çizelge 3.7’de çeşitli cam elyafların mekanik özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 3.7.** Çeşitli cam elyafların mekanik özellikleri (Chawla, 2005)

	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme mukavemeti (GPa)	Elastisite modülü (GPa)
C	2.48	1.7-2.8	70
E	2.54	1.7-3.5	69-72
S	2.48	2-4.5	85

Cam elyaflar özel tasarlanmış ve dibinde küçük deliklerin bulunduğu özel bir ocaktan eritilmiş camın itilmesiyle üretilirler. Üretiminde camın birçok farklı bileşimi kullanılır. Çoğunlukla -silika adı verilen- SiO<sub>2</sub> içerenleri başta olmak üzere kalsiyum, boron, sodyum, demir ve alüminyum oksitlerini içerenleri de vardır. Cam elyafların modülleri, kendilerini oluşturan bileşimlerin içeriğine göre 40-120 GPa arasında bir değer almaktadır (Arıcasoy, 2006; Mallick, 1997; Yılmaz, 2016). Şekil 3.10’da cam elyaf üretim şeması görülmektedir.



**Şekil 3.10.** Cam elyaf üretimi (Chawla, 2019)

En çok kullanılan cam elyaflar C, E ve S cam elyaflarıdır. Bu elyafların bileşimleri Çizelge 3.8’de görülmektedir. C camı kimyasal korozyona karşı son derece dirençliken E camı; düşük maliyete, yüksek mukavemet ve sertliğe, makul modüle, iyi elektrik yalıtımına, yüksek elektriksel dirence ve düşük su emişine sahiptir ve tipik olarak çapları 11 mikrometre ( $\mu\text{m}$ )’dir. S camı ise -yüksek silika oranına sahip olmasından dolayı- yüksek sıcaklıklara karşı gösterdiği direnç ve young modülü yüksekken, rijitliği ve dayanımı E camına kıyasla daha fazladır. Aynı zamanda, bileşim farkından ve yüksek

üretim maliyetinden dolayı E camına kıyasla daha pahalı kalmaktadır (Arıcasoy, 2006; Mallick, 1997; Mallick, 2007; Yılmaz, 2016). E camı 3.5 GPa çekme mukavemetine ve 70 GPa modüle sahipken S camı ise 4.5 GPa çekme mukavemetine ve 87 GPa modüle sahiptir ve E camına kıyasla pahalı olsa da %40 oranında daha güçlüdür (Campell, 2010). E camı, elyaf takviyeli polimer kompozitlerde, tüm takviye elemanları arasında en düşük maliyete sahip olduğu için kullanımı yaygındır (Mallick, 2007). Üretilen sürekli cam elyafların çoğunluğu E camı olmasına rağmen E cam cinsinin elektriksel alanlarda kullanımının, toplam pazarın sadece küçük bir kısmı olduğu bilinmelidir (Chawla, 2019).

Cam elyaf takviyeli (GFR) kompozit üretiminde kullanılan en eski ve en basit üretim yöntemi el yatırmadır (İnançer, 2015).

**Çizelge 3.8.** Cam elyaf bileşim içerikleri (Chawla, 2019)

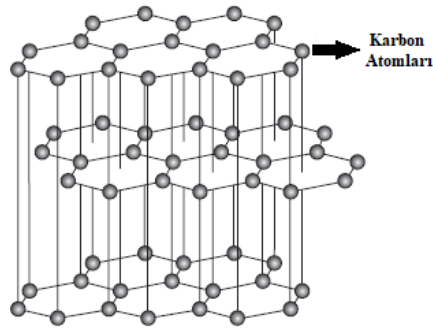
Bileşim (Ağırlıkça %)	E Camı	C Camı	S Camı
Silisyum Dioksit (SiO <sub>2</sub> )	55.2	65	65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	4	25
Kalsiyum Oksit (CaO)	18.7	14	-
Magnezyum Oksit (MgO)	4.6	3	10
Sodyum Oksit (Na <sub>2</sub> O)	0.3	8.5	0.3
Potasyum Oksit (K <sub>2</sub> O)	0.2	-	-
Bor Oksit (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7.3	5	-

### 3.3.3. Karbon elyaflar

Karbon çok yönlü bir malzemedir; amorf, grafit, elmas, grafen, nanotüp vb. gibi şekillerde bulunabilir (Chawla, 2019).

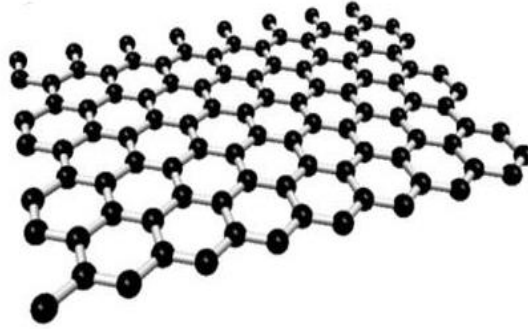
- i. Elmas: Kübik yapıya sahiptir. Her C atomu bir tetrahedron'un köşelerindeki dört C atomuna kovalent olarak bağlıdır. Elmas formundaki C izotropik özelliklere sahiptir ve en sert malzemelerden birisidir (Chawla, 2019). Elmas, 3550°C çok yüksek erime noktasına ve 2000 W/mK çok yüksek termal iletkenliğe sahiptir. Mükemmel bir termal iletken olarak addedilen alüminyumun 238 W/mK'ya sahip olduğu düşünüldüğünde elmasın bu konuda ne kadar üstün olduğu daha rahat anlaşılabilir. Elmas, 1100 GPa'lık elastisite modülüyle birlikte bilinen en sert malzemelerden biri olarak titanyumdan 10 ve alüminyumdan 15 kat daha serttir. Sertliği dolayısıyla kesici takımlarda kullanılır. Aynı zamanda iyi bir elektrik yalıtkanıdır (Askeland ve Wright, 2014).
- ii. Grafit: En yaygın karbon formudur (Chung, 2010). Grafitik karbon formu altıgen bir yapıya sahiptir. C atomları katmanlar halindedir (Chawla, 2019).

Katmanlarının birbirleri üzerinde kayabilme kolaylıkları sebebiyle aynı zamanda iyi bir yağlayıcıdırlar (Chung, 2010). Katman düzlemindeki atomlar arasındaki bağ kovalent olsa da katmanlar arasındaki bağ zayıf Van der Waals'tir. Bu sebepten grafitler, oldukça anizotropik özellik gösterirler. Grafitin çekme mukavemeti, termal genişmesi ve termal iletimi de benzer şekilde anizotropik özelliktedir (Chawla, 2019). Grafit de tıpkı elmas gibi yüksek bir erime noktasına sahiptir ve elektriksel olarak iletkenidir (Askeland ve Wright, 2014). Şekil 3.11'de grafit yapısı ve karbon atomları görülmektedir.



Şekil 3.11. Grafit yapısı (Callister ve Rethwisch, 2010)

- iii. Grafen: Grafit yapısında kat kat bulunan yapılardan birinin uzunlamasına tek bir katman halinde bulunması halinde yapıya grafen adı verilmektedir. Grafen mükemmel bir termal iletkenidir, elektriksel olarak iletkenidir ve oldukça güçlüdür (Askeland ve Wright, 2014). Grafen üzerindeki çalışmalar 2004'ten beri hızla devam etmektedir. Grafen; matris malzemeleri ile mükemmel yapışma sağlar ve bu, matris malzemesine yüksek darbe dayanımı, kırılma tokluğu ve yorulma dayanımı kazandırır (Sepet, 2019). Grafen yapının bütünlüğünü koruyarak mekanik, elektriksel ve termal özellikleri geliştirir ve kompozitlerin ağırlığını azaltma potansiyeline sahiptir. Enerji, havacılık ve otomotiv gibi sektörlerde kullanılan polimer kompozitlerde takviye olarak büyük potansiyele sahiptirler. Ağırlıkça %1'den az grafen takviyesi bile hem termoset hem de termoplastik bazlı kompozitlerin performansını önemli oranda iyileştirebilmektedir. Üretim maliyeti yüksektir. Grafen, potansiyelini termosetlerde kanıtlamış olsa da termoplastik kompozitler için hâlâ araştırma aşamasındadır (Okan, 2019). Şekil 3.12'de grafenin yapısal formu gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Grafen yapısı (Çalışkan, 2021)

- iv. Karbon siyahı: %97'den fazla C içeren son derece ince boyutlu (nanometre – nm) ve çok yüksek yüzey alanına sahip elemental karbon tozudur. Elektriksel olarak iletkenlerdir. Otomobil lastikleri ağırlıkça %60-65 karbon siyahı içerir. Elastomerlerde kullanılan en yaygın takviye malzemesidir. Güneş ışığındaki ultraviyole (uv) ışınlarını absorbe ederek elastomerin oksidatif olarak bozulmasını önler (Chawla, 2019; Yılmaz, 2016).

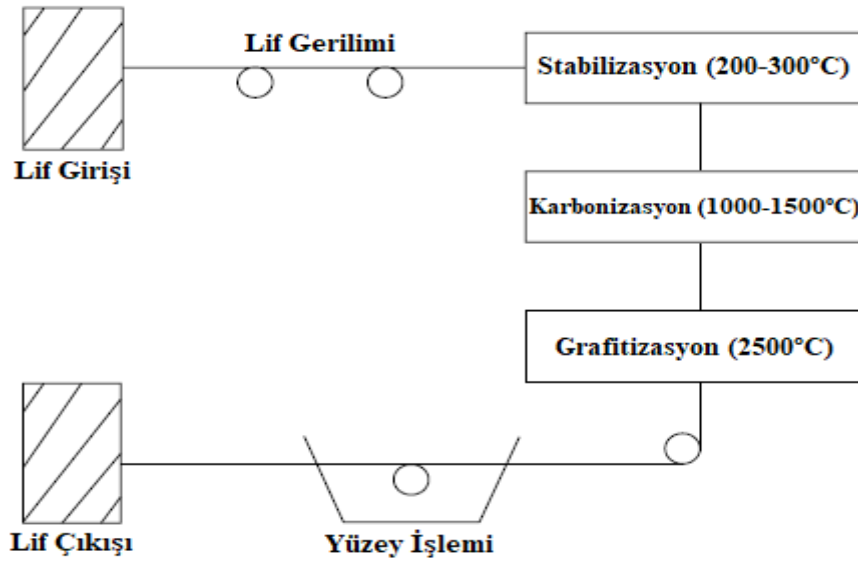
Karbon elyaflar sentetik inorganik elyaflardır ve yoğunlukları düşüktür. Spesifik mukavemetleri yüksektir (Yılmaz, 2016). Düşük yoğunlukla birleşen yüksek sertlik ve mukavemet, karbon elyafların cam elyaftan sonra kullanımda ikinci sıraya yerleşmesini sağlamıştır (Sheikh-Ahmad, 2009). Grafit tabakalarındaki C atomları arasındaki güçlü kimyasal bağ nedeniyle yüksek elastisite modülüne ve yüksek çekme dayanımına sahiptirler (Arıcasoy, 2006). Karbon elyafların ısıl genleşme katsayıları düşüktür –ki bu değerleri negatiftir– ve yorulma mukavemetleri yüksektir (Campell, 2010, Kaw, 2006). Epoksi ile çok iyi bir ikili oluştururlar ve birleştiklerinde üstün dayanıklılık ve sertlik gösterirler (Arıcasoy, 2006). Oda sıcaklığında nemden, çeşitli çözücülerden, asitlerden ve bazlardan etkilenmezler (Callister ve Rethwisch, 2010). Bu özelliklere sahip olmalarından dolayı üretimleri pahalıdır (Arıcasoy, 2006). Elbette yüksek maliyet, düşük darbe direnci, yüksek elektriksel iletkenlik, çekme mukavemetlerine göre basma mukavemetlerinin daha düşük olması ve kırılganlıkları gibi çeşitli dezavantajları da bulunmaktadır (Campell, 2010; Kaw, 2006). Kompozit malzemelerde karbon elyaf kullanımı 1960'lı yıllara dayanmaktadır (Morkavuk, 2016).

Genellikle rayon (Selüloz), poli akrilo nitril (PAN) ve pitch (Zift) bazlı olarak üretilirlerken en çok PAN ile üretilirler. Orta modüllü ve yüksek dayanımlı olanları neredeyse hep PAN ile üretilirken daha düşük mukavemete sahip yüksek modüllü olanlar

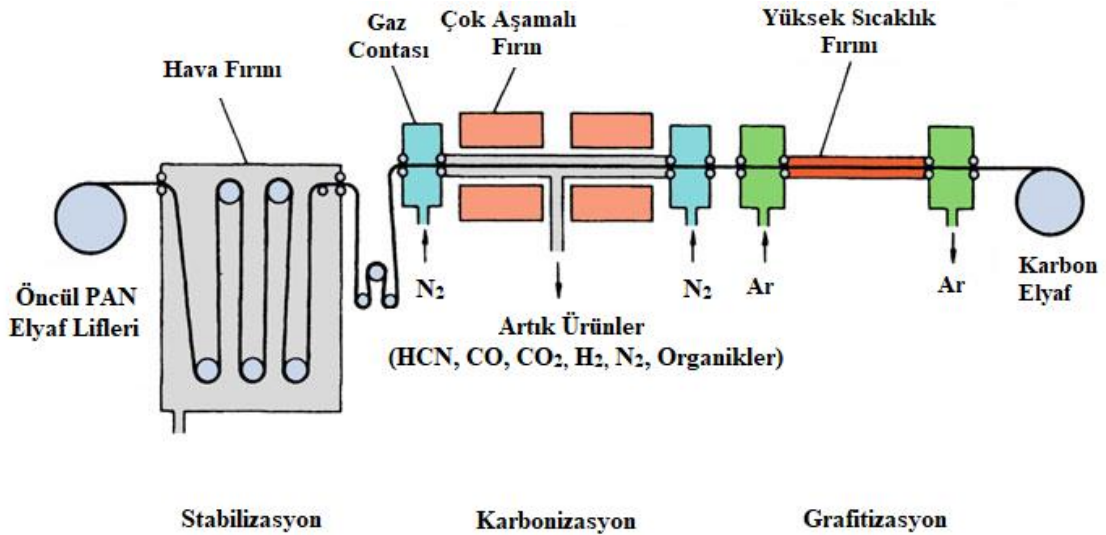
ise daha düşük maliyetle ziftten elde edilir. Zift bazlı elyaflar daha yüksek modüle sahip olsa da PAN bazlı olanlardan daha düşük mukavemete sahiptir (Kaw, 2006; Sheikh-Ahmad, 2009). Karbon elyafların; ultra yüksek gerilme mukavemetli, ultra yüksek modüllü ( $\geq 500$  GPa), yüksek gerilme mukavemetli, yüksek modüllü ( $\geq 300$  GPa ve dayanım/modül $<0.01$ ), orta derece modüllü ( $\leq 300$  GPa ve dayanım/modül $>0.01$ ), düşük modüllü ( $\cong 100$  GPa) ve düşük dayanımlı çeşitleri bulunmaktadır (Chawla, 2019; Sultan ve ark., 2021).

1. PAN bazlı karbon elyaflar: PAN öncülü, akrilo nitril monomerinin polimerizasyonu ile elde edilir (Campbell, 2010). PAN bazlı karbon elyafların çapları 5-7  $\mu\text{m}$  arasındadır. Aynı modüle sahip olan PAN ve zift bazlı karbon elyaflardan, PAN bazlı olanların basma mukavemeti daha yüksek olsa da, genel olarak PAN bazlı karbon elyafların basma mukavemeti zift bazlı karbon elyaflara göre daha düşüktür. PAN bazlı karbon elyaflar, zift bazlı karbon elyaflardan daha düşük termal ve elektriksel iletkenliğe sahiptir (Mallick, 1997; Mallick, 2007). Zift bazlı karbon elyaflar çok yüksek modül değerlerine sahip olabilseler de çekme mukavemetleri ve kopma uzamaları, PAN bazlı karbon elyaflarinkine kıyasla daha düşüktür (Mallick, 2007). PAN lifleri mekanik özellikleri iyileştirmek için uzunluklarının 5-10 katı gerilir ve 3 işlemde geçirilir. Stabilizasyon (Kararlılaştırma) adı verilen ilk işlemde elyaf, sonraki yüksek sıcaklık işlemleri sırasında boyutlarını kararlı bir halde tutabilmek için 200-300°C arasındaki bir fırından geçirilir. PAN için stabilizasyon süresi daha uzun olduğundan PAN bazlı karbon elyaflar, zift bazlılara göre daha maliyetlidir. Karbonizasyon adı verilen ikinci işlemde PAN elyafları 1000-1500°C inert bir nitrojen veya argon atmosferinde pirolize edilir. Grafitleştirme adı verilen son işlemde ise elyaflar, 2500°C sıcaklık üzerinde saflığını ve kristallliğini iyileştirmek için ısıl işleme tabi tutulurlar. Grafitleştirme işlemi, karbonizasyonla elde ettiğimizden daha grafitik bir elyaf yapısı sağlamaktadır. Üç aşamalı işlemin sonunda elyafların yapışma özelliğini iyileştirmek için elyaflar yüzey işlemine tabi tutulabilirler (Chung, 1994; Kaw, 2006; Sheikh-Ahmad, 2009). Grafitleştirme isteğe bağlı bir işlemdir. Nitekim yüksek sıcaklıklar grafitileştirmeyi pahalı bir hâle getirdiği için genellikle uygulanmaz. Nitrojen 2000°C'ye kadar kullanılırken, argon ise 2000°C üzerindeki

sıcaklıklarda kullanılır (Chung, 1994). Grafitizasyon aynı zamanda karbon elyafın grafit elyafa dönüştürülmesini de sağlamaktadır (Chawla, 2005). Grafit içeriğinde artış, sertliği de arttırmaktadır (Campell, 2010). Karbon ve grafit elyaflar sıklıkla birbirlerinin yerine kullanılsa da karbon elyaflar %93-95 oranında C içerirlerken grafit elyaflar, 1900°C civarındaki sıcaklıklarda işlendiği için %99'dan fazla C içerirler ve karbon elyaflara göre daha yüksek kristalliğe sahiptirler. İkincil bağlar altıgen düzlemler boyunca kaymayı sağlayan grafit katmanlarını bir arada tuttuğu için grafit elyaflar uzunlamasına yönde enine yönünde olduğundan çok daha güçlüdür (Kaw, 2006; Sheikh-Ahmad, 2009). Karbon ve grafit elyaf takviyeli polimerler, uzayda karşılaşılan geniş bir sıcaklık aralığı altında yüksek özgül mukavemet ve sertlik ile çok yüksek derecede boyutsal kararlılık gerektiren uygulamalarda ihtiyaç duyulan yüksek mukavemeti ve sertliği sağlayabilirler (Sheikh-Ahmad, 2009). Şekil 3.13 ve 3.14'te sırasıyla PAN öncülünden elyaf eldesinde uygulanan işlem basamakları ve PAN bazlı karbon elyaf üretim şeması görülmektedir.

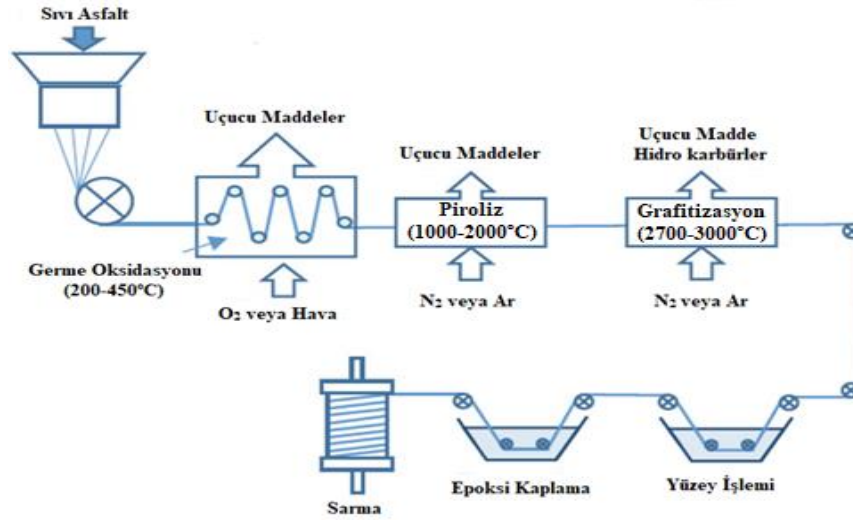


Şekil 3.13. PAN bazlı karbon elyaf üretim işlem basamakları (Kaw, 2006)



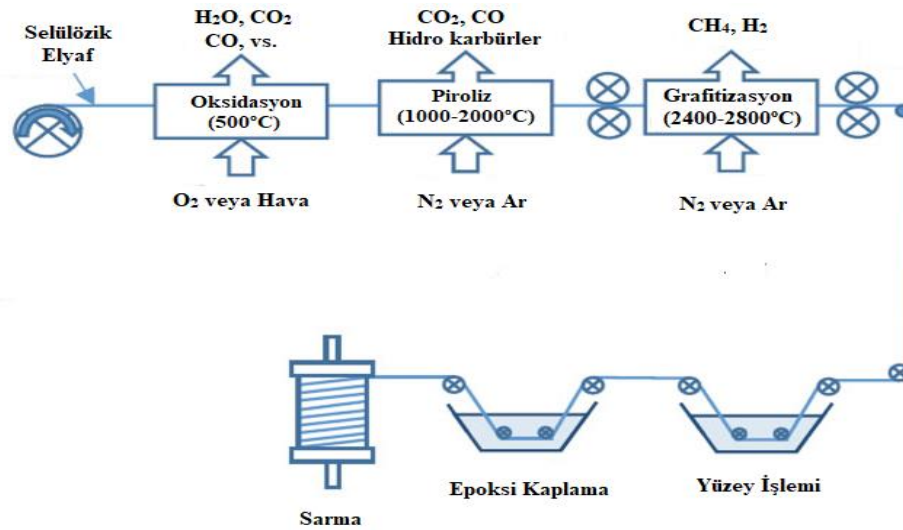
Şekil 3.14. PAN bazlı karbon elyaf üretim şeması (Chawla, 2019)

2. Zift bazlı karbon elyaflar: Zift, ısıtıldığında eriyen termoplastik bir polimerdir ve öncül olarak bakıldığında PAN'dan daha yüksek maliyete sahiptir (Chung, 2010; Mallick, 2007). Petrol bazlı asfalt, kömür katranı ve poli vinil klorür (PVC) zift kaynaklarıdır (Chawla, 2005). Zift bazlı karbon elyaflar, 10-12  $\mu\text{m}$  çaplarına sahiptirler (Mallick, 1997). Zift bazlı karbon elyafların çekme modülleri 345-1000 GPa aralığında olabilir; ancak çekme mukavemetleri PAN bazlı karbon elyaflara kıyasla daha düşük kalmaktadır (Campell, 2010; Mallick, 2018). Zift bazlı karbon elyaflar ilk olarak 1970'lerin başında Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) ve 1980'lerde Japonya'da üretilmiştir (Boisse, 2011). Zift bazlı grafit elyaflar, PAN bazlı grafit elyafların 10-20 W/mK gibi düşük ısı iletkenliğine kıyasla 900-1000 W/mK gibi çok daha yüksek ısı iletkenliğe sahiptirler (Campell, 2010). Şekil 3.15'te zift öncülünden elyaf üretimi görülmektedir.



Şekil 3.15. Zift öncülünden elyaf üretimi (Rana ve Fangueiro, 2016)

- Selüloz bazlı karbon elyaflar: Rayon bazlı elyaflar, selülozun özütlendiği odun hamurundan elde edilirler (Campell, 2010). Şekil 3.16'da yöntemin üretim şeması görülmektedir.



Şekil 3.16. Selüloz öncülünden elyaf üretimi (Rana ve Fangueiro, 2016)

### 3.3.4. Bazalt elyaflar

Bazalt; Kuzey Amerika'da, Doğu Avrupa'da ve Rusya gibi yerlerde bulunan, tarih öncesi çağlarda lavların yeryüzüne taşması sonucu oluşmuş volkanik bir kaya türüdür (Chawla, 2019; Technobasalt-Invest LLC, 2019). Özellikle Kuzeybatı ABD'de büyük

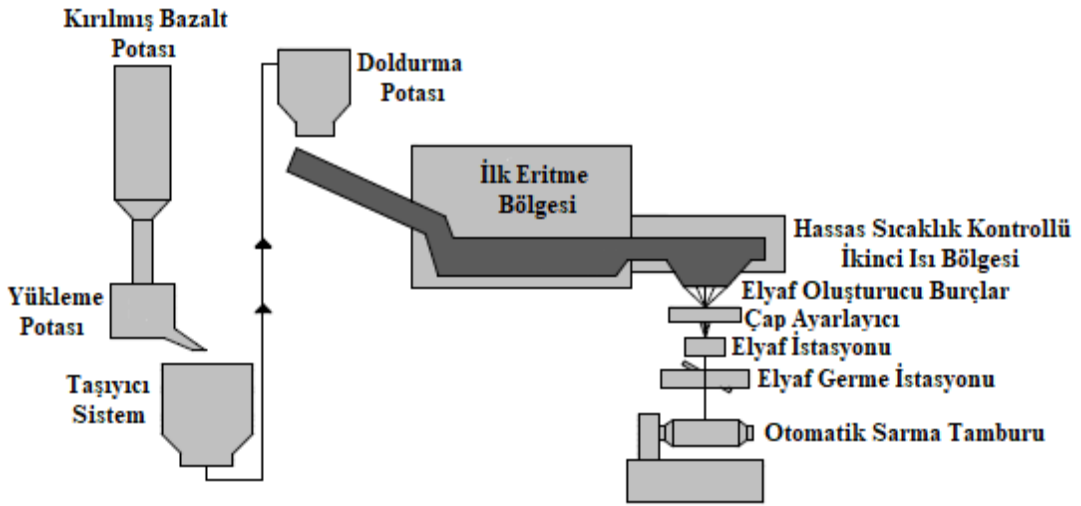
bazalt oluşumları yaygın olarak görülmektedir (Ross, 2006). Bazalt doğada yer kabuğunun %33'ünü oluşturacak kadar bol miktardadır (Dhand ve ark., 2015). Bazalt elyaflar da, bu volkanik, yer üstü ve taşkın bir kaya olan bazalt kayalarından elde edilmektedir (Czigány ve ark., 2005). Bazalt ülkemizde de çeşitli bölgelerde bol miktarda bulunabilir; ancak elyaf üretimi için hammadde olarak kullanılan kaynaklar her yerde bulunmamaktadır. Örneğin Ukrayna'daki bazalt yataklarından birinde, Technobasalt elyafları için bazalt çıkarılmaktadır (Technobasalt-Invest LLC, 2019; Ulus, 2018). Bazalt; yavaşça soğutulduğunda kısmi kristal bir yapıya bürünürken hızlı soğutulduğunda ise cam yapısına benzeyen amorf bir yapı oluşturmaktadır (Deák ve Czigány, 2008). Bazalt; eser miktarda  $Al_2O_3$  ile birlikte  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $SiO_2$  ve demir oksitleri ( $Fe_2O_3$ ) içerdiği için kimyasal olarak zengindir. Bu kimyasal içerik, bazaltın bulunduğu coğrafi bölgelere göre değişebilmektedir. Bazalt elyafların bileşimlerinin kesin içeriği, bazalt elyafların elde edildiği doğal bazalt kayasına bağlıdır (Chawla, 2019; Dhand ve ark., 2015). Çizelge 3.9'da bu içerikler görülmektedir. Bazalt; sert çevre koşullarına karşı yüksek dirençlidir, korozyon direnci çok yüksektir ve zamanla niteliklerini kaybetmemektedir (Technobasalt-Invest LLC, 2019). Bazalt, ülkemizde genellikle inşaat sektöründe neme maruz kalan betonlarda dayanımı arttırıp korozyonu azaltmak için kullanılsa da Rusya tarafından uzay sanayisinde kullanılmaktadır. Bazaltın savunma sanayisindeki uygulamalarda kullanım çalışmaları 1980'li yıllara dayanmaktadır (Ulus, 2018). Bazaltın iyi yalıtım özelliği daha önceleri de bilindiği için, bazaltlar inşaat sektöründe taş yünü şeklinde işlenen yaygın bir yalıtım malzemesi olarak da kullanılmaktadır (Czigány ve ark., 2005). Ezilmiş formdaki bazalt, betonda agrega olarak kullanılabilir. Yüksek erime noktası sayesinde yangından korunma sektöründe de kullanımları yaygındır (Ross, 2006).

Parisli Paul Dhé'nin bazalt kayasından elyaf elde etme fikrini ortaya atmasıyla bazalt elyaf üretimi söz konusu olmuştur (Ross, 2006). Bazalt elyaflar bazalt kayalarından cam elyaf üretimine benzer şekilde elde edilirler (Chawla, 2019).

**Çizelge 3.9.** Bazalt elyaf kimyasal bileşenleri (Chawla, 2019)

Bileşim	Ağırlık (%)
$SiO_2$	50-55
$Al_2O_3$	15
$Fe_2O_3$	10-13
$MgO$	5
$Na_2O$	3
Titanyum Dioksit ( $TiO_2$ )	1-3
$K_2O$	1

Kırılmış bazalt taşlarının platin-rodyum bir kaptta eritilip çap ayarlayıcıdan geçirilmesiyle bazalt elyaflar elde edilir. Üretimleri esnasında silan gibi çeşitli malzemelerle kaplanabilirler. Kaplanmamış bazalt elyaf içeren kompozitler, kaplanmış bazalt elyaf içeren kompozitlere göre daha kırılğan bir yapıya sahipken aynı zamanda çekme, darbe ve eğilme mukavemetleri de daha düşüktür (Deák ve Czigány, 2008). Bazalt elyaflar birçok yönden cam elyaflara benzer özellik gösterirler. (Chawla, 2019). Bazalt elyafların tatmin edici düzeydeki ilk örnekleri dönemin Sovyetler Birliği'ne ait Ukrayna'daki araştırma enstitüsünde 1959-1961 yıllarında elde edilmişken ilk sürekli kaliteli bazalt elyaflar ise 1963'te yine bu enstitüde üretilmiştir (Osnoş, 2012). Son yıllarda, mineral bazlı bazalt elyafları, cam ve karbon gibi geleneksel elyaflara kıyasla artan bir ilgi görmektedirler (Czigány ve ark., 2005). Şekil 3.17'de bazalt elyaf üretim şeması görülmektedir.

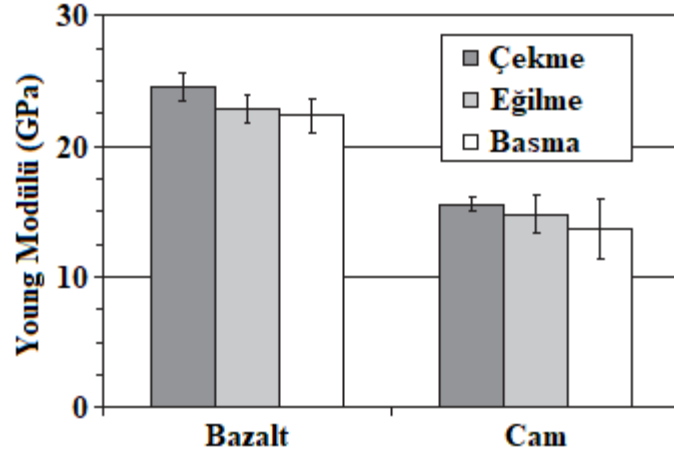


Şekil 3.17. Bazalt elyaf üretim şeması (Deák ve Czigány, 2008)

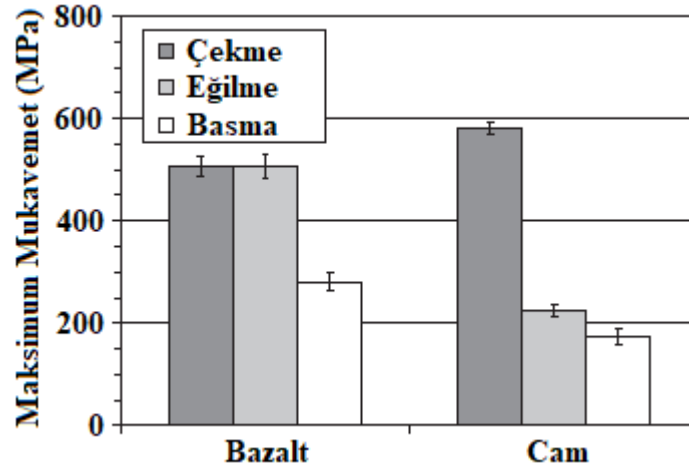
Bazalt elyafların birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlar şöyle sıralanabilir:

- Takviyeler arasında cam, karbon ve aramid gibi malzemeler başı çekse de son yıllarda bazaltlar dikkatleri üzerine çekmeyi başarmışlardır. Bunun en önemli sebeplerinden birisi, hiç kuşkusuz bazalt elyafların insan sağlığına zararsız oluşu ve diğer takviyelere kıyasla çevreye verdiği zararın hemen hemen hiç olmamasıdır. (Yıldız, 2019).
- Bazalt elyaflar biyolojik olarak çözünebilirdir ve aşınmaya karşı direnç gösteren özelliklere sahip polimer kompozitlerin üretiminde kullanılan



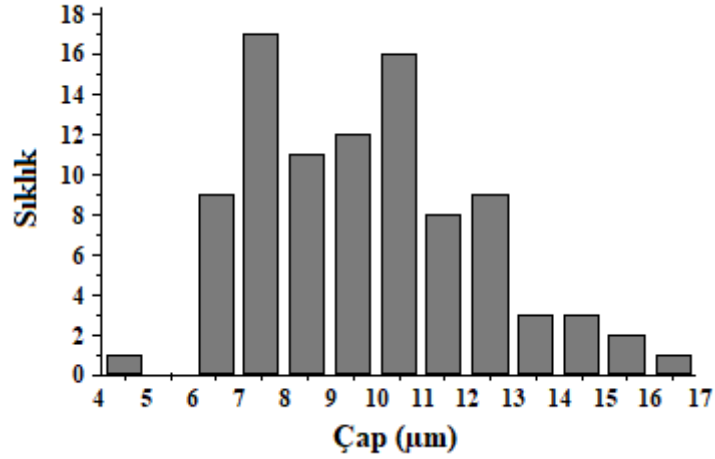


Şekil 3.18. Bazalt ve E cam takviyeli kompozitlerin modül kıyasları (Lopresto ve ark., 2011)



Şekil 3.19. Bazalt ve E cam takviyeli kompozitlerin mukavemetleri (Lopresto ve ark., 2011)

- f. Bazalt elyaflar  $-260$  ve  $680^{\circ}\text{C}$  arasındaki çalışma sıcaklıklarında, mekanik özelliklerinde bir düşüş yaşanmaksızın kullanılabilirler. Bazalt elyafların üretimleri esnasında gereken yüksek enerji tüketimleri, bu elyafların maliyetinin camdan daha ucuz olmasındaki en büyük engeldir. Sürekli bazalt elyaflar, cam elyaflar ile hem performansı hem de maliyeti yüksek olan karbon ve aramid elyaflar arasındaki boşluğu dolduran elyaflardır (Deák ve Czigány, 2008; Technobasalt-Invest LLC, 2019). Bazalt elyaflar, karbon elyafa kıyasla maliyet bakımından daha büyük avantaja sahiptirler (Technobasalt-Invest LLC, 2019). Şekil 3.20’de, üretilen bazalt elyaflardaki çap yoğunlukları görülmektedir.



Şekil 3.20. Bazalt elyaf çaplara göre kullanım sıklıkları (Czigány ve ark., 2005)

- g. Bazalt elyaflar, üretimleri sırasında ek katkı maddesine ihtiyaç duymadıkları için karbon ve cam elyaflara nazaran daha çevreci bir özellik göstermektedir (Sfarra ve ark., 2013).
- h. Bazalt elyafların bozulmaya başlama süreleri cam elyaflardan çok daha uzundur (Nasir ve ark., 2012).
- i. Bazalt elyaflar yüksek ıslanabilirliğe sahiptir. Silan ile kaplandıklarında matris ve elyaf ara yüzeyindeki bağ güçlendiği için kompozitin mekanik özellikleri de iyileşmektedir (Dhand ve ark., 2015).
- j. Uvye ve yüksek enerjili elektromanyetik radyasyona karşı doğal olarak dirençlidirler ve özelliklerini soğuk havada da koruyabilir ve daha iyi asit direnci sağlarlar (Ross, 2006).
- k. Bazalt elyaflar iyi kimyasal dirence sahiptirler. İşlenmeleri kolaydır, doğal ve ucuzdurlar. Karbon elyaf ile bir hibrit kompozitte kullanıldıklarında bu malzeme gelişmiş özellikler sergilerler (Dhand ve ark., 2015).
- l. Bazalt elyaflar aleve maruz bırakıldıklarında bile bütünlüğünü uzun süre koruma yeteneğine sahiptir. %100 inert özellik sergilerler ve patlamaya dayanıklıdır (Ross, 2006).
- m. Betona takviye edilmeleri durumunda betonun mukavemetini %55'e kadar arttırabilirler. Asfaltı güçlendirdiği için yol yapımlarında, betonu güçlendirdiği için ise bina ve inşaat uygulamalarında kullanılmaktadır. Paslanma yapmazlar. Homojen yapıyı korudukları için betonda

delaminasyon oluşumuna sebep olmazlar ve bazı elyafların aksine beton içinde çözünmezler (Technobasalt-Invest LLC, 2019).

- n. Bazalt elyaf takviyeli bir plastiğin mekanik karakteri araştırıldığında, bu kompozitlerde bazaltın basma ve eğilme mukavemeti, darbe kuvveti ve darbe enerjisi açısından yüksek bir performans gösterdiği sonucuna varılmıştır (Lopresto ve ark., 2011).
- o. Kırılmış bazalt elyaflar; eğilme mukavemetini, darbe özelliklerini ve kırılma tokluğunu arttırmaktadır (Khandelwal ve Rhee, 2020).
- p. Dokunmuş bazalt elyaf takviyeli kompozit malzemeler, E cam elyafı takviyeli kompozitler malzemelere benzer elektriksel özellikler sergilemektedirler (Carmisciano ve ark., 2011).

Bazalt elyaflar günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikle bazalt elyafların uv ışınlarına karşı yüksek direnç göstermesi birçok sektörde kullanımını arttıran etkenlerden birisidir (Yozgat, 2019). Bazalt elyaflar nükleer radyasyondan etkilenmedikleri için radyoaktif nükleer malzemelerin taşınması ve depolanması gibi çok kritik uygulamalarda kullanılabilirler (Baştürk ve ark., 2014). Motorlu taşıtların, motor bölümü gibi, yüksek sıcaklık üretilen çeşitli kısımlarında kullanılabilirler (Deák ve Czigány, 2008). Bazalt elyaflar; asbestten 3 kat daha fazla ısı yalıtım özelliklerine sahip olarak, asbest gibi yüksek sıcaklıklarda yumuşamadıkları ve fren sistemi mekanizmasının parçaları üzerinde birikme yapmadıkları için fren sistemlerinde asbestin yerini almaya başlamışlardır (Dhand ve ark., 2015; Ross, 2006). Bazalt elyaflar son zamanlarda nispeten üstün mekanik özellikleri dolayısıyla altyapısal uygulamalar ve inşaat uygulamaları için yüksek kaliteli hibrit kompozit malzemeler üretmek için kullanılmaya başlanmıştır. Bazalt elyaflar epoksi ile beraber kullanılarak yeni bir takviye malzemesi olarak ilgi çekmektedir (Zhao ve ark., 2020). Bazalt elyaf/epoksi kompozitlerin basma ve çekme gibi mekanik özellikleri bazalt elyaf/vinil ester kompozitlerin mekanik özelliklerinden daha yüksektir (Colombo ve ark., 2012). Bazalt elyafların kompozit basınçlı kaplarda kullanımı test aşamasındayken, bazalt elyaflar tabakalı kompozitlerin üretiminde ticarileşme aşamasına oldukça yakındır (Sepet, 2019). Bunlara ek olarak bazalttan üretilen elyaflar, denizcilik ve balistik gibi çeşitli uygulamalarda da kullanılabilirler (Zhao ve ark., 2020).

Birçok avantajının yanı sıra bazalt elyafların cam elyaftan daha aşındırıcı olması ise bir dezavantaj olarak görülebilir (Ross, 2006).

### 3.3.5. Aramid elyaflar

Aromatik poliamidlerden elde edilirler (Sheikh-Ahmad, 2009). Sentetik organik elyaflardır, daha çok Kevlar veya Twaron gibi ticari isimle anılırlar. Yüksek dayanıklılık, yüksek aşınma ve yorulma dayanımı, yüksek kimyasal dayanım, düşük yoğunluk gibi özelliklere sahiptirler. Aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere, yüksek ısı kapasiteye de sahiptirler. Termal genişleme katsayıları düşük bir değer olarak negatiftir. Bazı türleri uv ışınlarına karşı dayanıksızdır ve uvye maruz kalınca mekanik özelliklerini kaybederler, bu sebepten güneş ışığında bozunabilirler. Çekme dayanımları yüksekken basma dayanımları düşüktür. En yaygın kullanılan aramid elyaflar, Kevlar 29 ve 49 elyaflarıdır (Arıcasoy, 2006; Campell, 2010; Chawla, 2019; Yılmaz, 2016). Kevlar 29, ~83 GPa gibi düşük modüle ve yüksek tokluğa sahipken Kevlar 49 ise ~130 GPa gibi orta derecede bir modüle sahiptir (Campell, 2010). Çizelge 3.12’de bu elyafların mekanik özellik karşılaştırması görülmektedir. Aramid elyaflar oldukça kristal bir yapıya sahiptirler (Chawla, 2019).

**Çizelge 3.12.** Kevlar aramid elyaflarının karşılaştırılması (Chawla, 2019)

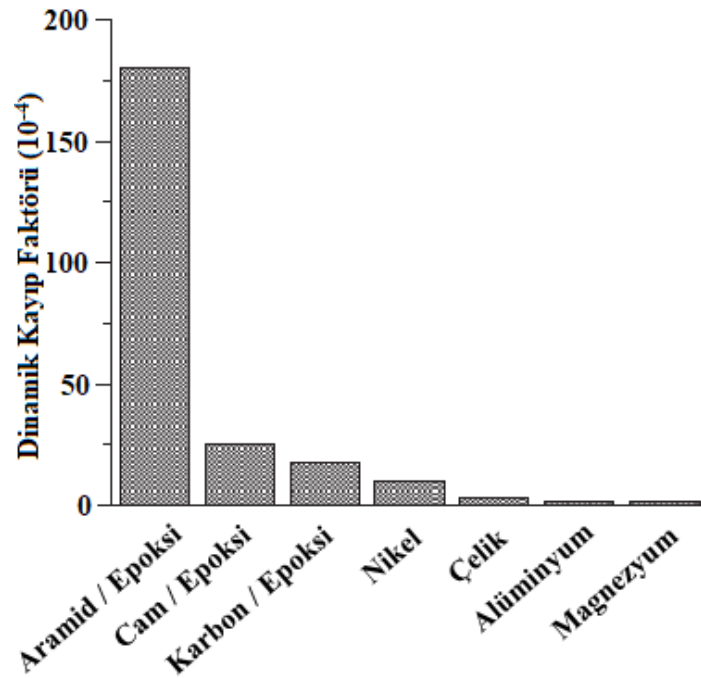
	Kevlar 29	Kevlar 49
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1.44	1.44
Çap (µm)	12	12
Çekme dayanımı (GPa)	2.8	2.8
Kırılma gerinimi (%)	3.5-4	2.8
Young modülü (GPa)	65	125

Gerilme yüklemelerinde yük, güçlü kovalent bağlar tarafından taşınırken basma yüklemelerinde ise zayıf hidrojen bağları ve Van der Waals bağları devreye girer. Bu sebepten basma mukavemetleri çekme mukavemetlerine göre düşüktür (Chawla, 2019).

Aramid elyafların avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

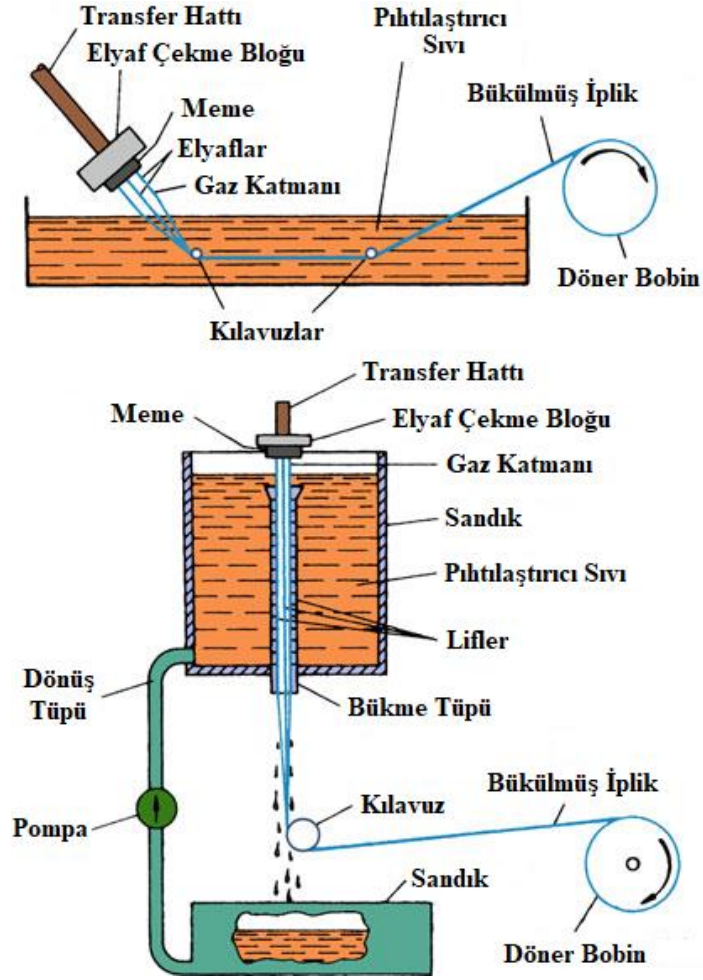
- ❖ Mevcut elyaf takviyeleri arasında yüksek çekme mukavemeti-ağırlık oranına sahip yüksek kristalli aromatik poliamid elyaf sınıfında yer almaktadırlar (Mallick, 2007).
- ❖ Olağanüstü tokluk ve hasar toleransı sergilerler. Kırılgan karbon elyafların aksine darbe altında sünek bir davranış gösterirler (Sheikh-Ahmad, 2009). Olağanüstü tokluklarından dolayı balistik koruma uygulamalarında sıklıkla kullanılırlar (Campell, 2010).

- ❖ -200 ve +200°C aralığındaki sıcaklıklarda üstün mekanik özelliklerini koruyabilirler (Callister ve Rethwisch, 2010).
- ❖ Yüksek sıcaklıkta sürünme mukavemetleri çok iyidir (Bayraktar, 2011). Modülü yüksek olan aramid elyaflarda ise sürünme davranışı çok daha azdır (Mallick, 1997).
- ❖ Yoğunlukları dolayısıyla çok hafiftirler, çok yüksek sertliğe ve gerilme mukavemetine sahiptirler. Aynı zamanda titreşimi çok iyi sönümleme özelliğine de sahiptirler (Chawla, 2019). Şekil 3.21’de aramidlerin bu özelliklerinin diğer malzemelerle kıyaslanması görülmektedir.



Şekil 3.21. Titreşim kayıp sönüm katsayıları kıyasları (Mouritz, 2012)

Aramid elyafların çeşitli dezavantajları da mevcuttur. Örneğin diğer yüksek performanslı organik elyafların çoğunluğu gibi aramid elyaflar da basmada oldukça zayıf karakteristiklere sahiptirler. Basma mukavemetleri, gerilme mukavemetlerinin yaklaşık 1/8'i kadardır (Chawla, 2019). Basmadaki kopma uzamaları ise, çekmedeki kopma uzamalarının yalnızca %25'i kadardır (Campell, 2010). Aramid elyaf takviyeli (AFR) kompozitlerin en büyük dezavantajı ise işlenebilirliklerinin diğer takviyeli kompozitlere göre çok daha zor olmasıdır (Mallick, 2007). Şekil 3.22’de aramid elyaflarının nasıl üretildiği gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Aramid elyaf üretimi (Chawla, 2019)

### 3.4. Kompozit Üretim Yöntemleri

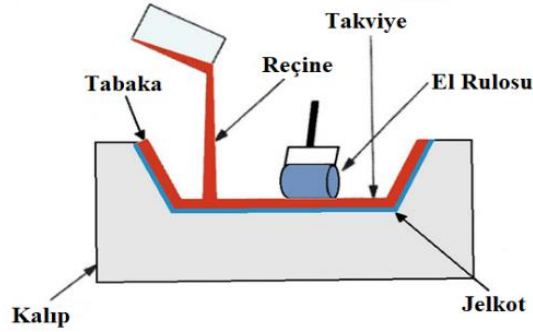
Yüksek performans istenen ürünlerle günlük hayatta kullanılabilecek basit ürünlerin üretimleri için aynı yöntemleri kullanmak, maliyet artışına sebep olacağı için çeşitli alternatif üretim yöntemleri geliştirilmiştir.

Kompozit malzemelerin kalitesi, üretim tekniğinin kalitesine bağlı olarak değişebilmektedir (Arıcasoy, 2006).

#### 3.4.1. El yatırma (Hand lay-up)

El yatırma güvenli bir üretim yöntemi olmasına rağmen oldukça yavaştır ve yoğun işçilik gereksinimine ihtiyaç duymaktadır (Mallick, 2007). Bu yöntemde genellikle epoksi ve polyeşter reçineler kullanılır (Morkavuk, 2016).

Öncelikle üretimde kullanılacak kalıp malzemesi temizlenir ve içine jelkot sürülür. Jelkot sertleştikten sonra takviye fazları, hazırlanmış kalıp üzerine elle yatırılarak üzerine sıvı reçine emdirilir. Reçinenin elyafa iyi emdirilmesi gerekir (Arıcasoy, 2006). Şekil 3.23'te yöntemin uygulanışı görülmektedir.

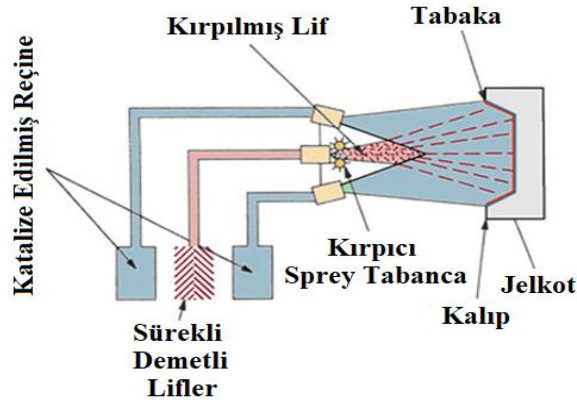


Şekil 3.23. El yatırma yöntemi (Chawla, 2019)

### 3.4.2. Sprey püskürtme (Spray lay-up)

Otomasyona çok uygun olduğu için işçilik maliyeti ve işçilerin açığa çıkan tehlikeli maddelere maruz kalma olasılığı oldukça azdır (Campell, 2010).

Elyaf kalıp yüzeyine, içine sertleştirici katıl reçineyle birlikte bir sprej tabanca aracılığıyla püskürtülür. Tabanca üzerindeki kırpıcı aracılığıyla elyaf püskürtülürken aynı zamanda kırpılır. Püskürtme sonrası yüzey bir rulo ile düzeltilir (Arıcasoy, 2006). Şekil 3.24'te sprej püskürtme yönteminin uygulanışı görülmektedir.

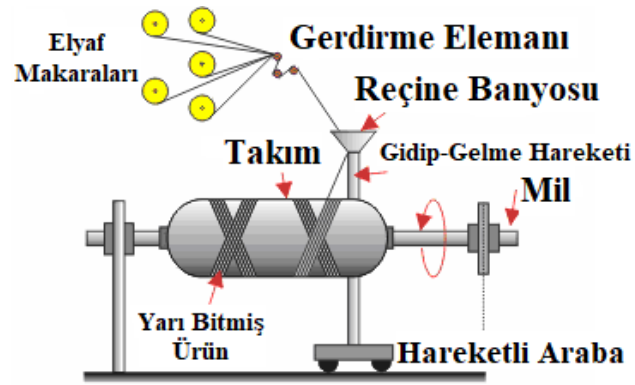


Şekil 3.24. Sprej püskürtme yöntemi (Chawla, 2019)

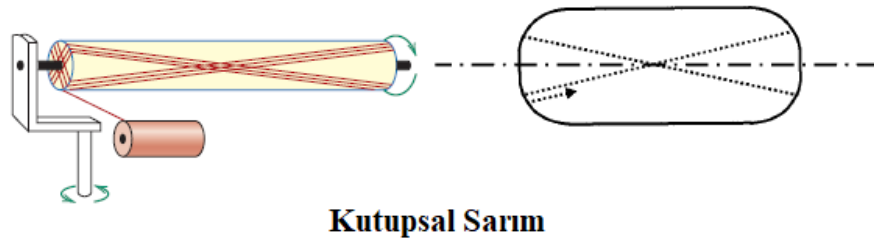
### 3.4.3. Elyaf sarım (Filament winding)

Sürekli elyaf liflerinin bir makaradan çekilerek döner bir kalıp (mandrel) üzerine sarılmasıyla kompozit malzeme elde edilen üretim yöntemidir. Yeterli sayıda elyaf katı sarıldıktan sonra ürün ısı veya basınçla ya da bunlar olmadan kürlenir ve döner kalıbın ayrılmasıyla üretim tamamlanmış olur. Uygulamaya bağlı olarak döner kalıp ahşap, alüminyum veya çelik gibi malzemelerden imal edilir. Örneğin açık uçlu silindir imal etmek için çelik mandrel kullanılırken kapalı uçlu silindir üretmek için ise düşük erime noktalı alaşım mandreller kullanılır. Özel tasarlanmış sargı makineleriyle kafa ve mandrel dönüş hızları ayarlanarak istenilen sarım açılarında üretim yapılır. Sarım açıları mandrel boyuna doğru küçük açılardan mandrel eksenine dik açığa kadar değişebilmektedir. Sürekli elyafların farklı açılarda kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklere sahip ürünler elde edilebilir (Arıcasoy, 2006; Gemi, 2004; Kaw, 2006).

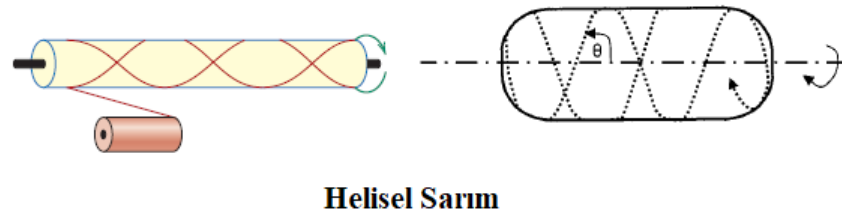
Bu yöntemde ıslak ve kuru olmak üzere iki sarım çeşidi bulunmaktadır. Islak sarımda düşük viskoziteli reçine sarım esnasında uygulanırken kuru sarımda ise prepreg adı verilen ve önceden daha yüksek viskoziteli reçineyle ıslatılmış olan elyaflar kullanılır. Islak sarım ucuzdur ve kompozitin özelliklerini kontrol etmemize izin verirken kuru sarımın avantajı ise daha temiz bir üretim olmasıdır; ancak pahalı olduğu için yaygın olarak kullanılmaz. Bunun yanında sarım işlemi dairesel, kutupsal ve helisel olmak üzere üçe ayrılır. Kutupsal sarım yönteminde mandrel sabit kalırken besleme kafası mandrel eksenine etrafında, belirlenmiş bir açıda hareket etmektedir. Helisel sarım yönteminde ise mandrel dönme hareketi gerçekleştirirken elyaf besleme kafası ileri ve geri hareket etmektedir (Callister ve Rethwisch, 2010; Chawla, 2019; Gemi, 2004; Kaw, 2006). Kutupsal sarım helisel sarıma göre daha kolaydır ve küresel şekilleri sarmak için hızlı bir yöntem olarak yaygın kullanılır (Campell, 2010; Mallick, 1997). Helisel sarımda çok yönlü sarım yapılabildiğinden hemen hemen tüm uzunluk ve çaplarda ürünler sarılabilir (Campell, 2010; Mallick, 1997). Dairesel veya çevresel sarım yöntemi ise yaklaşık 90° yüksek açılı sarım çeşidi olarak en basit yöntemdir (Campell, 2010; Mallick, 1997). Şekil 3.25'te yöntemin üretim şeması görülürken Şekil 3.26'da, 3.27 ve 3.28'de sırasıyla kutupsal, helisel ve dairesel sarım çeşitleri görülmektedir.



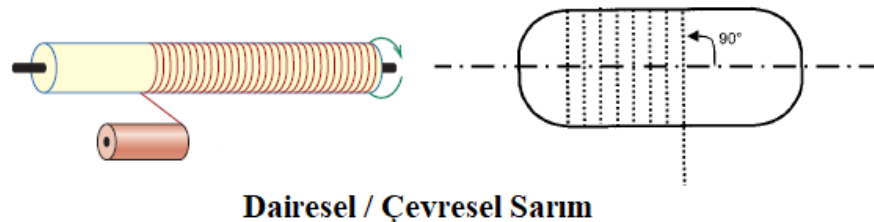
Şekil 3.25. Elyaf sarım tekniği (Ekşi, 2007)



Şekil 3.26. Kutupsal sarım yöntemi (Callister ve Rethwisch, 2010; Campell, 2010)



Şekil 3.27. Helisel sarım yöntemi (Callister ve Rethwisch, 2010; Campell, 2010)



Şekil 3.28. Dairesel sarım yöntemi (Callister ve Rethwisch, 2010; Campell, 2010)

Yöntemde kullanılan başlıca reçineler epoksi, polyester ve vinil ester gibi termoset reçinelerdir. Ağırlığın kritik olduğu ve yüksek mukavemet istenen

uygulamalarda epoksi; daha iyi mekanik, yorulma dayanımı, ısı dayanım, takviye malzemesine iyi yapışma ve sertleşme esnasında düşük çekme oranı gibi özelliklere sahip olması sebebiyle daha ucuz olan polyestere tercih edilmektedir (Gemi, 2004). Yöntemde en yaygın kullanılan ve en uzun geçmişe sahip olan takviye cam elyafken en yaygın cam elyaf takviyesi ise E camıdır (Gemi, 2004; Mallick, 1997). Elyaf sarım yönteminde elyaf hacim oranı en fazla %60-85 arasında olabilmektedir (Gay ve ark., 2002).

Yöntemin avantajları şöyle sıralanabilir:

- a. Elyafların ve reçinelerin en düşük maliyetli biçimde kullanılması ve yüksek oranlı üretim potansiyeli sayesinde yöntem maliyeti düşüktür (Sheikh-Ahmad, 2009). Çok sayıda parça için üretim maliyetleri, diğer üretim tekniklerinin maliyetlerinin çoğundan daha düşüktür. Diğer yöntemlere göre daha az işçilik gerektirir (Mallick, 1997).
- b. Elyaf yerleşimi parçadan parçaya ve hatta tabakadan tabakaya bile son derece doğru ayarlanabilir. Tüm parça alanı üzerinde sürekli elyaf kullanabilme imkânı bulunmaktadır. Mandrel maliyetleri duruma göre düşük olabilir. Otoklavda kullanılan inert gazına ihtiyaç yoktur ve otoklavda üretilenden daha büyük, daha geniş ve kalın duvarlı yapılar üretilir (Mallick, 1997).

Yöntemin çeşitli dezavantajları da bulunmaktadır ki bunlar da şöyle sıralanabilir:

- a. Elyaf sarımında üretim ortamının sıcaklığı ve nemi kontrol altında tutulmalıdır (Sepet, 2019).
- b. Elyaf sarımında 0-15° gibi açıların sarımı zordur (Mazumdar, 2002).
- c. Bileşen şekli, mandrelin çıkarılmasına izin verir bir tasarıma sahip olmalıdır. Yöntem genellikle iç bükey yüzeylere uygun değildir. Elyaf yolu kolayca değiştirilemeyebilir (Mallick, 1997).
- d. 1940'ların ortalarından itibaren kullanılan eski bir yöntem olsa da ekipman maliyetleri parça büyüklüğüne, sarım tipine ve kontrol sistemine bağlı olarak az, orta ya da yüksek olabilir (Campell, 2010). Oldukça eski bir yöntemin yüksek maliyete sahip olması dezavantaj olarak düşünülebilir.

Genellikle kimyasallarla baş etmek amaçlı tank ve borular, kimyasal depolama tankları, oksijen tüpleri, sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) tüpleri, volan ve gücü diferansiyelle aktarmaya yarayan şanzıman tahrik şaftı gibi parçalar için sıklıkla bu yöntem tercih edilmektedir (Kaw, 2006; Strong, 2008). Hem E camı hem de S camı elyaf sarım tekniğine uygun yüksek çekme mukavemetine sahip olsa da S camı daha çok genellikle

karbon ve aramid elyaflarla birlikte bu üretim tekniğinin tercih edildiği havacılık uygulamalarında kullanılır (Gemi, 2004). Elyaf sarım tekniğiyle üretilmiş kompozit borularda en sık kullanılan reçine epoksidir (Yozgat, 2019). Şekil 3.29’da bu yöntemle üretilmiş GFR kompozit bir boru görülmektedir.



**Şekil 3.29.** Elyaf sarım tekniğiyle üretilmiş 2 m. çaplı cam elyaf kompozit boru (Chawla, 2019)

Mandrel seçiminde dikkate alınacak kriterler dayanıklılık, termal genişleme, mandrelden parça çıkarabilme kolaylığı ve maliyet gibi kriterlerdir (Mallick, 1997).

- I Çelik mandreller: Plastikten veya alüminyumdan daha dayanıklı olsalar da daha ağırlardır. Düşük maliyetli mandrel malzemeleri basit malzemeleri sarmak için kullanılabilir; ancak toleransın önem arz ettiği parçalarda pahalı çelik mandreller gerekebilir. Zaman zaman pahalı ve karmaşık mandrellere ihtiyaç duyulması, maliyeti yükseltmektedir. Kompozitler yüksek basınçta gözenekli yapıda olduğundan, gaz içeren basınçlı kaplarda metal astarlara da ihtiyaç duyulmaktadır (Mallick, 1997).
- II Grafit mandreller: 315°C gibi yüksek sıcaklıklarda yapılan küremelerde düşük termal genişlemeye sahip grafit mandreller kullanılabilir. Mandrel genişmesi malzemede basma yüklemesine sebep olduğu için oldukça dikkat edilmesi gereken bir konu olmaktadır (Mallick, 1997).
- III Çözünür mandreller: Suda çözünür mandreller küçük üretim miktarları için düşük maliyete sahip olsa da ilk takım yatırım maliyeti yüksek kalmaktadır (Mallick, 1997). Çözünebilir mandreller; çoğunlukla küçük açıklıkları olan parçalar için kullanılmaktadır (Campell, 2010).
- IV Alçı mandreller: Yüksek toleranslı bir mandrel yüzeyine ihtiyaç duyulduğu durumlarda kullanılırlar (Mallick, 1997).

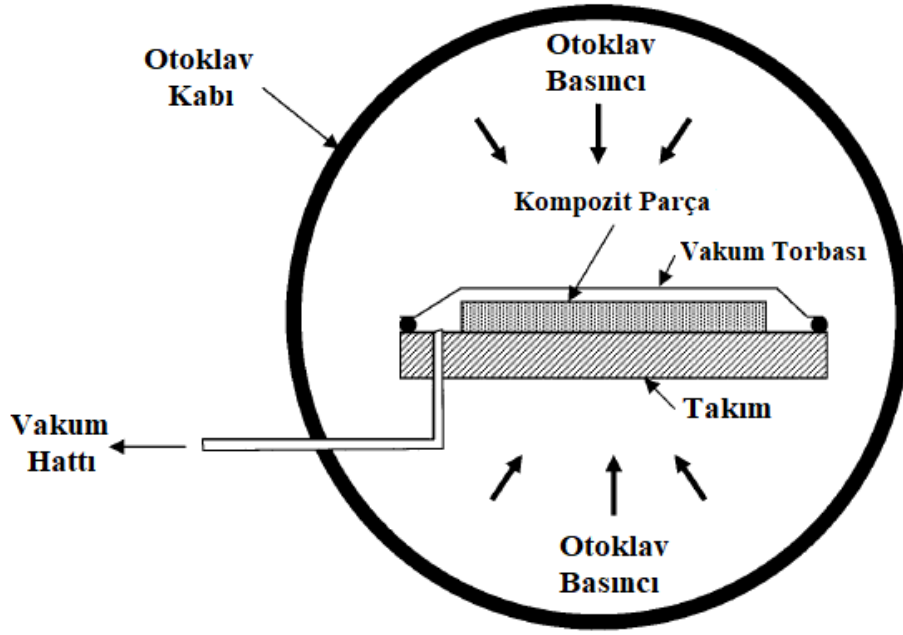
#### 3.4.4. Otoklav (Autoclave)

Otoklav kabı kesin basıncın, ısının ve vakumun kontrol edilebildiği bir fırındır. Bu kontrol edilebilirlik, yüksek kaliteli kompozit üretebilmek için kür şartlarının tam olarak oluşmasını sağlamaktadır. Üretilcek kompozit malzemeye yüksek ısı ve basınç aynı anda uygulandığında malzeme içerisinde oluşabilecek hava boşluklarının önüne geçilebilir. Yöntem, bu hava boşluklarının giderilmesi üzerine geliştirilmiştir. Dışarıdan sıkıştırılmış gaz, kompozit malzemenin içinde bulunduğu otoklava kabına verilir. Otoklav, diğer üretim tekniklerine göre daha uzun süreli uygulanır ve maliyeti daha yüksektir (Arıcasoy, 2006). Şekil 3.30'da yöntemin şeması görülmektedir.

İlk olarak kalıbın üzerine Teflon (Poli tetra floro etilen - PTFE) kaplanmış naylon veya saydam bir zardan yapılmış soyma kumaşı yerleştirilir. Teflon parçanın kolayca çıkarılması için kullanılırken soyma kumaşı ise pürüzsüz ve kırışksız bir bitiş sağlar. Gerekli sayıdaki prepregler her seferinde birer kat olarak serilir. Hapsedilmiş havayı ve kırışıklıkları gidermek için her kata basınç uygulanır. Daha sonra bu bileşim, ısı ve basıncın, nitrojen gibi inert bir gazla uygulandığı otoklava yerleştirilir. Bu esnada vakum sistemi de fazla uçucuların uzaklaştırılması ve parçanın kalıba uyumunun sağlanması için çalışır durumdadır. Otoklav kürlenme süreleri ürün özelliklerine göre farklılık gösterebilmektedir (Kaw, 2006).

Yöntem düşük boşluk içeriğinin ve yüksek kalitenin önemli olduğu yapılarda karmaşık şekilleri üretmek için kullanılır (Kaw, 2006). PMK'ların otoklavla üretilmesi, çok yüksek kaliteli bir ürün eldesiyle sonuçlanır. Havacılık alanında sıklıkla kullanılması bu sebeptendir. Otoklav, yüksek sıcaklık ve basıncın aynı anda meydana getirildiği bir kap olduğu için ısı ve basıncın prepreglere uygulanan birliktelik etkisi, tabakayı sağlamlaştırır, hapsedilmiş havayı giderir ve polimerik matrisin kürlenmesine yardımcı olur (Chawla, 2019).

Otoklavda termoplastik matris kullanıldığında, termosetlere göre çok daha yüksek sıcaklık ve basınçlara ihtiyaç duyulmaktadır (Morkavuk, 2016).



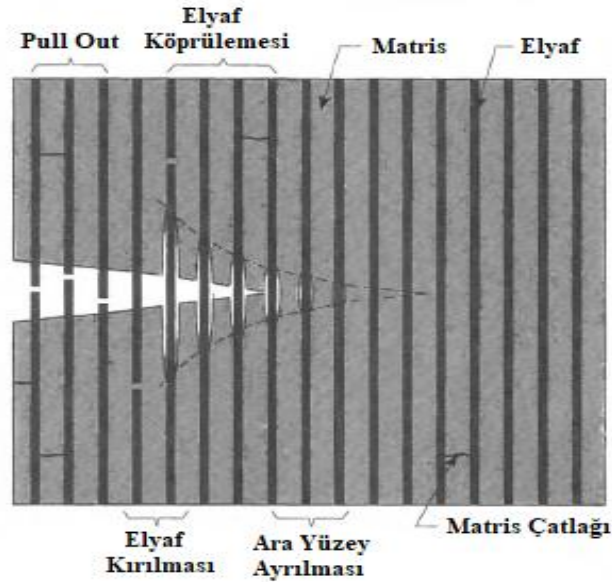
Şekil 3.30. Otoklav üretim yöntemi (Campell, 2010)

### 3.5. Kompozit Malzemelerde Hasar Mekanizmaları

Metallerin darbe hasarları kopma ya da kırılma şeklinde oluşurken kompozit malzemelerde çok farklı hasar modları oluşabilir. Oluşan hasar modlarının incelenmesi, malzemenin dayanımını değerlendirmek açısından da oldukça önemlidir (Kara, 2006). Kompozit malzemelerdeki hasarlar geleneksel metallerdeki hasarlardan daha sık oluşsa da, metallerdeki hasar gelişimleri ani olduğu için geleneksel metaller potansiyel olarak kompozitlerden daha tehlikelidir. Kompozitlerdeki hasar bölgeleri, tahribatsız muayene yöntemleri ile daha iyi belirlenebilmektedir (Gemi, 2014).

Polimerik malzemelerin kırılma davranışları, mühendislik plastikleri kritik yapısal uygulamalarda kullanılmaya başlandığından beri bir endişe kaynağı haline gelmiştir (Anderson, 2005). Düşük hızlı darbe gibi nispeten küçük bir darbe bile kompozit malzemelerde performansı olumsuz etkileyebilecek mikro hasarlara sebebiyet verebilmektedir ve bu hasarlar da genellikle ilk olarak matris hasarı şeklinde meydana gelmektedir (Anderson, 2005; Yozgat, 2019). Düşük hızlı darbeler dahi kompozitlerin basma ve çekme mukavemetlerini 2/3 oranında düşürebilmektedir (İnançer, 2015). Polimer bazlı kompozit malzemelerin darbe performansı, matrisin tokluk özellikleri ile doğrudan ilişkilidir (Yozgat, 2019). Düşük hızlı darbeler aynı zamanda matris çatlakları, delaminasyon ve elyaf kırılması gibi çeşitli hasarların oluşumunu da hızlandırmaktadır

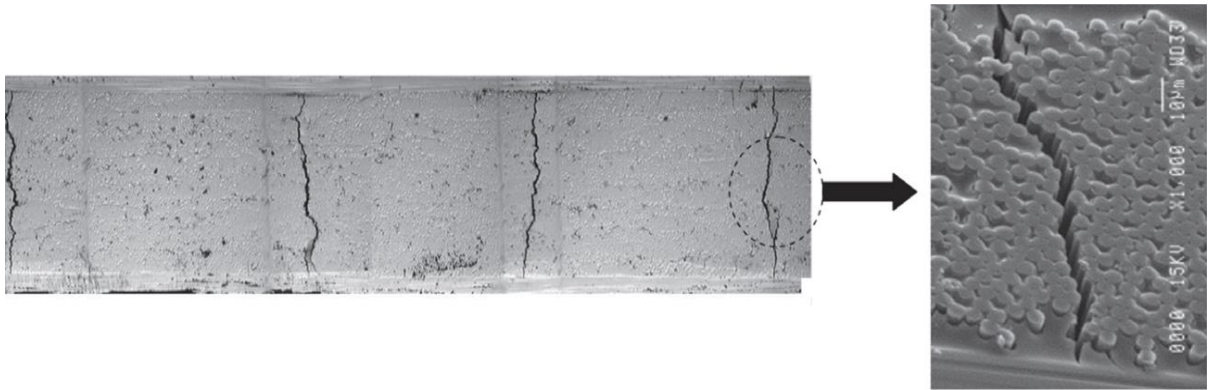
(İnançer, 2015). Kompozit malzemelerde matris çatlağı ve delaminasyon hasarları sonrası çoğunlukla elyaf kopması meydana gelmektedir (Yozgat, 2019). Kompozit malzemelerin içyapısındaki matris çatlağı, elyaf kopması ve delaminasyon gibi hasarlar malzemeden istenen verimin tam alınamamasına sebep olabilmektedir. (Fidan ve ark., 2011). Şekil 3.31’de hasar mekanizmaları görülmektedir.



Şekil 3.31. Elyaf takviyeli kompozitte hasar mekanizmaları (Mallick, 1997)

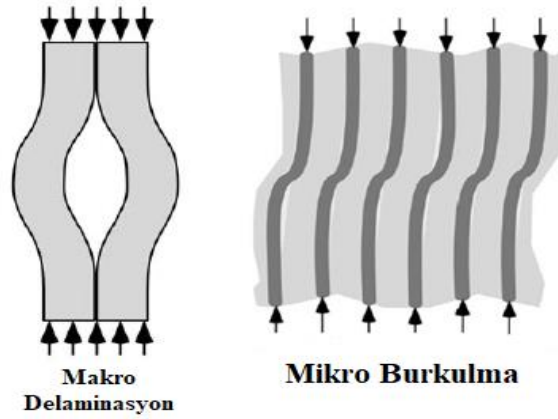
Elyaf takviyeli kompozitlerdeki hasar modlarının nitelikleri aşağıdaki sıralanmıştır:

- i. Elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerde ilk gözlemlenen çatlak gibi hasarlar; termal yüklemelerde, basma, çekme ya da yorulma yüklemelerinde meydana gelebilirler (Sultan ve ark., 2021).
- ii. Elyaf takviyeli kompozitlerde ilk gözlemlenen hasar türü çoğunlukla çatlaklardır; ancak matris çatlakları aynı zamanda kısa (Süreksiz) elyaf takviyeli kompozitlerde de oluşabilir (Talreja ve Singh, 2012). Şekil 3.32’de matris çatlak hasarı görülmektedir.



**Şekil 3.32.** Sürekli elyaf takviyeli bir kompozitte matris çatlakları (Talreja ve Singh, 2012)

- iii. Elyaf takviyeli kompozitlerde elyaflar matrise güçlü bir şekilde bağlanmışsa matris çatlaması anında gerçekleşmez; ancak elyaflar matris tarafından zayıf bir şekilde tutuluyorsa kompozit malzemede nispeten düşük bir gerilimde dahi matris çatlağı beklenenden erken oluşabilir. Matris çatlakları ilerledikçe elyaf kırılmaları da meydana gelebileceğinden kompozit yapı, istenen performansının elde edilememesine sebebiyet verebilir (Talreja ve Singh, 2012).
- iv. Elyaf takviyeli kompozitlerde kırılma, çoğunlukla tek bir makro çatlaktan ziyade malzeme boyunca dağılan birçok mikro çatlak tarafından kontrol edilir. Çekme yüklemeleri; matris çatlaklarına, elyaf-matris ara yüzey ayrılmalarına, elyaf köprülemelerine, elyaf kopmalarına neden olabilir. Nitekim elyaf takviyeli kompozitlerin çekme kırılması da sıklıkla bu hasarlardan birini içerir. Basma yüklemeleri ise -özellikle tek yönlü- elyafların mikro burkulmalarına neden olabilir. Aynı zamanda basma yüklemeleri, özellikle önceden delamine olmuş bir alan içeren malzemelere uygulandığı zaman makroskopik delaminasyon burkulmalarına da yol açabilir (Anderson, 2005). Şekil 3.33'te basma yüklemesinden kaynaklanan hasarlar gösterilmiştir.

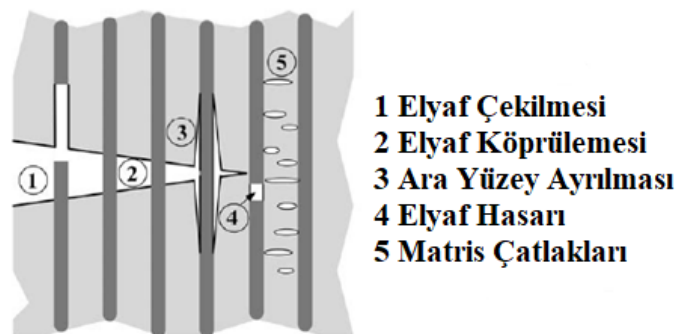


Şekil 3.33. Basma yüklemesi hasarları (Anderson, 2005)

- v. Elyaf hasarları ikincil bir hasar olarak, matris çatlakları ve delaminasyon gibi hasarlardan sonra oluşmaktadır (Sepet, 2019).

### 3.5.1. Matris çatlakları

Elyaf takviyeli kompozitlerde meydana gelen ilk hasar oluşumu matris çatlakları şeklinde görülmektedir. (Mallick, 1997). Kompozitteki elyaf yönelimi, çatlak ilerlemesi üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir (Sepet, 2019). Şekil 3.34'te çatlak hasarları görülmektedir.



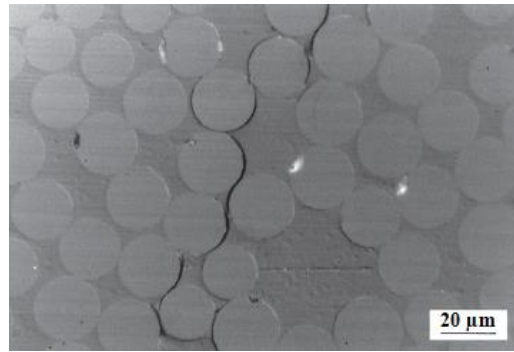
Şekil 3.34. Çatlak hasarlarının ve diğer hasarların şematik gösterimi (Anderson, 2005)

### 3.5.2. Ara yüzey ayrılması (Debonding)

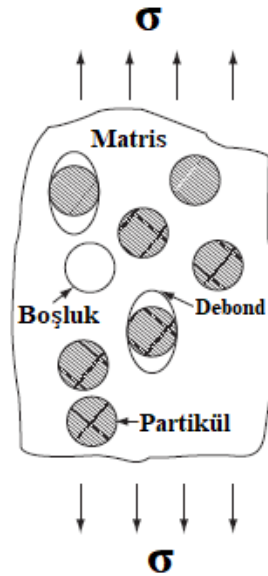
Matris çatlağı ilerledikçe elyaflarda hasar oluşturabilir. Nitekim çatlak, kendisine komşu olan elyaflara yaklaştıkça elyaf ve matris ara yüzeyinde ayrılma meydana getirir.

Bu hasarın sonucunda matristen elyafa aktarılan gerilim zayıflayacağı için gerilimi taşıma görevini üstlenen elyaflar görevini tam anlamıyla yerine getiremez (Mallick, 1997). Tabakalı kompozitlerde elyaf ve matris ara yüzey ayrılması, çekme gerilmelerinden dolayı genellikle darbe almamış alt tabakalarda oluşmaktadır (Gemi, 2014).

Debonding aynı zamanda partikül takviyeli kompozitler için bir ana hasar mekanizmasıdır. Debonding hasarı bu tür takviyeye sahip kompozitlerde partikül bağlarının çözülmesine sebebiyet vermektedir (Talreja ve Singh, 2012). Şekil 3.35'te ve 3.36'da sırasıyla elyaf ve partikül takviyeli bir kompozitte meydana gelen debonding hasarları ve diğer hasarlar görülmektedir.



Şekil 3.35. Elyaf takviyeli bir kompozitte debonding hasarı (Talreja ve Singh, 2012)

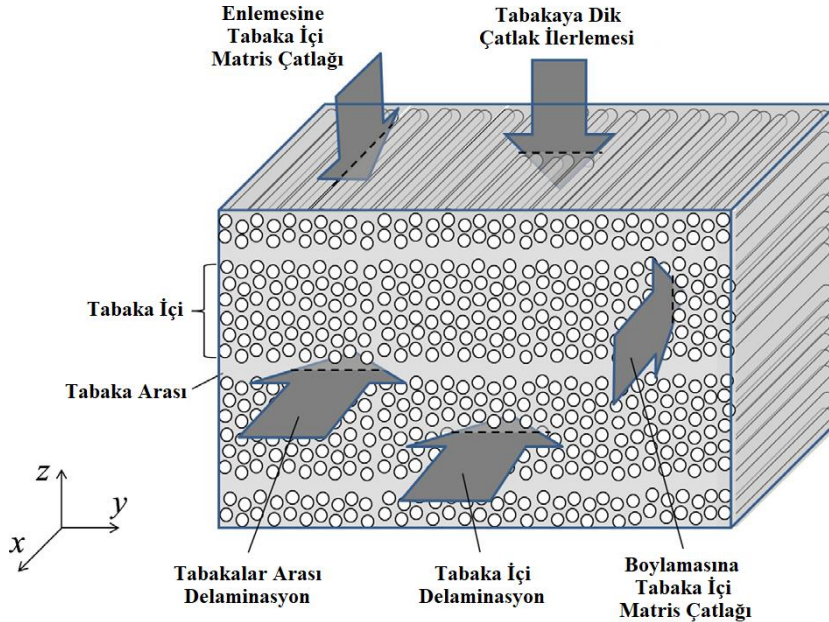


Şekil 3.36. Partikül takviyeli kompozitte debonding ve diğer hasarlar (Talreja ve Singh, 2012)

### 3.5.3. Delaminasyon

Birleşik tabakalar arasında tutunmanın azalması sonucu tabakanın mukavemeti düşerek ayrılmaya sebep olur ve delaminasyon hasarı oluşur (Yozgat, 2019). Aynı zamanda tabakalar arasında ayrılmalara sebebiyet veren çatlak hasarları olarak da adlandırılabilir; ancak delaminasyon hasarının başlaması için matriste öncelikle bir çatlak oluşmalıdır (Günaydın, 2003; Yozgat, 2019). Bu çatlakların ilerlemeleri, malzemelerin mukavemetini ve rijitliğini düşürmektedir (Günaydın, 2003). Bu sebepten delaminasyon, tabakalı kompozit yapıların yük taşıma kapasitesinde çok ciddi azalmalar meydana getirmektedir (Mallick, 1997).

Tabakalı kompozitlerde tabakalar farklı yönelimlere sahip elyaflar içeriyorsa tabakaların rijitlikleri birbirinden farklı olmaktadır. Bu fark, delaminasyon hasar oluşumunun en önemli sebeplerinden birisidir. (Yozgat, 2019). Delaminasyon düşük hızlı bir darbe sonucunda da oluşabilmektedir. Delaminasyon; güçlü elyafların etkisini azaltıp daha zayıf nitelikteki matris özelliklerinin yapısal dayanımı yönetmesine sebep olabileceği için, kompozitlerin tasarımında önemli bir faktördür (Talreja ve Singh, 2012). Nitekim tabakalı kompozitlerde en önemli hasar mekanizması olarak bu hasar gösterilmektedir (Günaydın, 2003). Şekil 3.37’de delaminasyon hasarı görülmektedir.



Şekil 3.37. Sertleştirilmemiş CFRP tabakanın enine kesit delaminasyonu (Sato ve ark., 2015)

### 3.5.4. Elyaf köprülemesi

Bu hasar çoğunlukla düşük dayanımlı matrise sahip olan kompozitlerde görülmektedir. Bu hasar, aynı zamanda debonding hasarını da tetikler (Mallick, 1997).

### 3.5.5. Elyaf çekmesi (Pull out)

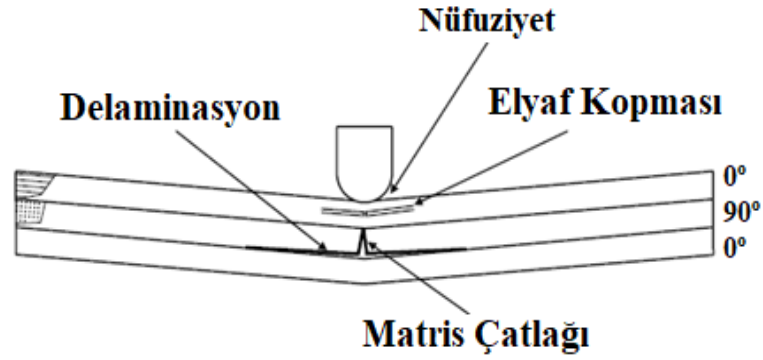
Matris çatlağı ilerledikçe çatlağı köprüleyen elyaflar, taşımaya çalıştığı yük dolayısıyla kırılana kadar uzama göstermeye devam eder. Ara yüzeydeki sürtünme kuvvetleri yeteri kadar direnemediği zaman bu hasar oluşur ve elyaf çekilerek kırılma gerçekleşir (Mallick, 1997). Ara yüzey, kırılan elyaftan belirli bir mesafedeki gerilimi, tekrar elyafa aktararak, mukavemetin uygulanan yük tarafından aşıldığı durumlarda diğer elyafların da kırılmasına sebep olabilir. Elyaf kırılması, elyaf takviyeli kompozitlerden istenilen performansın elde edilememesine neden olur. (Talreja ve Singh, 2012).

### 3.5.6. Boşluk oluşumu

Malzemede bulunan boşluklar, hemen hemen her tür kompozit malzemede görülebilen başlıca kusurlardan biridir. Boşlukların oluşumu, vakum basıncı, kürlenme sıcaklığı, kürlenme basıncı ve matris viskozitesi gibi parametrelerden etkilenmektedir. Boşluklar, mekanik özellikleri ve -boşlukların şekil, boyut ve dağılımına bağlı olarak- malzemenin bozulma özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Aynı zamanda plastik deformasyona da sebebiyet verdikleri için çatlak gibi çeşitli hasar oluşumlarının başlamasında da etkin bir rol oynamaktadırlar (Talreja ve Singh, 2012).

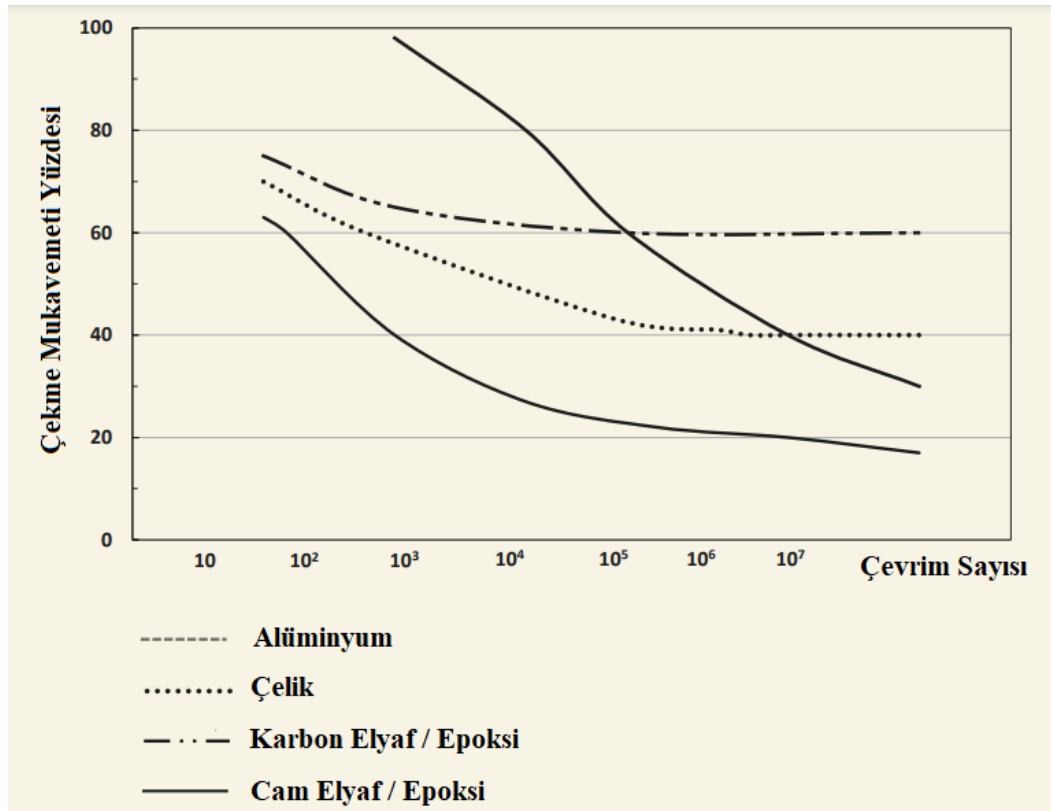
### 3.5.7. Yorulma

Gerek endüstriyel amaçlı ürünlerde gerekse de üstün özellik gerektiren yüksek performanslı uzay ve havacılık sektörü gibi yerlerde kullanmak için kompozit malzemelerin değişken yükleme (Yorulma) şartlarının ve hasar davranışlarının bilinmesi; tasarım, üretim yöntemi ve kullanılacak malzeme açısından çok büyük bir önem arz etmektedir (Gemi, 2004). Malzemeyi yoran tekrarlı darbe yüklemeleri sonrası ilk ortaya çıkan hasar, matris hasarıdır (Fidan ve ark., 2011). Şekil 3.38’de darbe sonucu oluşan hasarlar görülmektedir.



Şekil 3.38. Darbe sonucu oluşan hasarlar (Kara, 2006)

GFR kompozitler yorulma yüklemelerine AFR ve CFR kompozitlere göre daha hassastır. AFR kompozitler yorulmada CFR kompozitler kadar olmasa da oldukça başarılı sayılabilirler. CFR kompozitler ise, metallere kıyasla oldukça üstün yorulma performanslarına sahiptirler (Campell, 2010). Şekil 3.39'da çeşitli elyaf takviyeli polimerlerin alüminyum ve çelik ile yorulma çevrimleri kıyası görülmektedir.

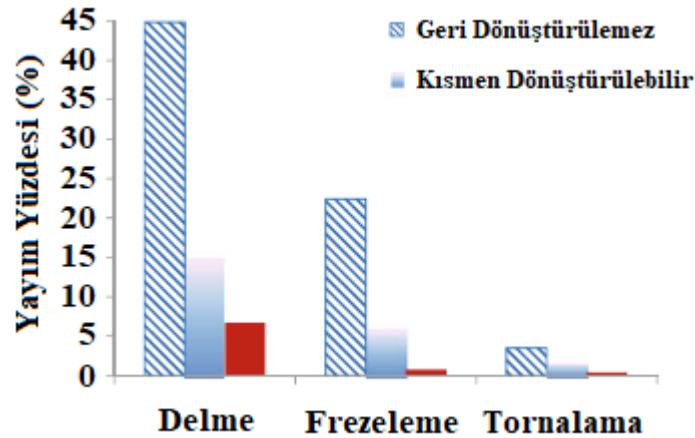


Şekil 3.39. CFR ve GFR epoksi kompozitlerin yorulma çevrimleri (Küsefoğlu, 2017)

### 3.6. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik; malzemelerin işlenme kolaylığını veya zorluğunu ifade eden teknik bir terimdir ve üç kriter açısından değerlendirilir. Bunlar; kesme kuvvetleri, yüzey kalitesi ve takım aşınması -dolayısıyla takım ömrü- olarak sıralanabilir. (Morkavuk, 2016). İyi işlenebilirlik az takım aşınması, düşük kesme kuvvetleri ve iyi yüzey kalitesi anlamına gelmektedir (Sheik-Ahmad, 2009). Kompozit malzemelerin işlenmesi; anizotropi, heterojenlik ve takviyelerin aşındırıcı olması sebebiyle zordur (Lopresto ve ark., 2016). Kompozitlerin işlenebilirlikleri, çelik gibi homojen özellik gösteren malzemelere göre çeşitli farklılıklar göstermektedir (Santhanakrishnan ve ark., 1988). Kompozit parçaların gerekli toleranslara sahip olabilmesi için kompozit malzemelerin işlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır (Sheikh-Ahmad, 2009).

Tornalama, delme ya da frezeleme gibi geleneksel işleme teknikleri, uygun takım tasarımı ve yeterli işleme koşulları oluşturulduğunda başarıyla uygulanarak sıklıkla kullanılırken bunların yanında lazer ışınıyla ya da aşındırıcı su jetiyle işleme gibi geleneksel olmayan çeşitli diğer işleme metotları da malzemelerin işlenebilirliği için kullanılmaktadır (Lopresto ve ark., 2016; Sheikh-Ahmad, 2009). Bu yöntemler, çoğunlukla metal endüstrisine uygun olsa da takım geometrisine, kesme ve ilerleme hızlarına uygun ayarlamalar yapıldıktan sonra elyaf takviyeli polimerlerin işlenmesinde de kullanılabilirler (Sheikh-Ahmad, 2009). Lazer ışınıyla işleme, iş parçasına hasar verebilecek mekanik hareketlere ve aşındırıcı elyaf kaynaklı hızlı takım aşınmasına sebep olmadığı için geleneksel elyaf takviyeli plastik kompozit kesme teknolojileri alanında iyi bir alternatif olma potansiyeline sahip görünse de kompozit malzemede termal hasara neden olabileceği için delaminasyon hasar oluşumunu tetikleyebilir (Caggiano, 2018). Geleneksel olmayan işleme teknikleri kompozit malzemelerin işlenmesiyle ilgili çeşitli sorunları çözebilecek olsa da bu teknikler maliyet ve zaman açısından geleneksel işleme tekniklerine üstünlük sağlayamamaktadır (Lopresto ve ark., 2016). Frezeleme, delme ve tornalama gibi operasyonlarda kullanılan malzemelerin, literatüre bakıldığında, çoğunluğunun GFR plastik kompozitler olduğu görülmektedir (Morkavuk, 2016). Bu tezin amaçlarından biri de özellikle elyaf sınıfında yeni sayılabilecek bazalt elyafların işlenebilirliğini araştırıp literatürdeki açığı kapatarak işlenebilirlik literatürüne katkıda bulunmaktır. Şekil 3.40'da geleneksel işleme metotları yayım yüzdeleri görülmektedir.



Şekil 3.40. İşlenebilirlik literatür çalışmaları (Sultan ve ark., 2021)

Elyaf takviyeli polimerlerin işlenmesi, metallerin işlenmesinden farklıdır; çünkü elyaf takviyeli polimerlerin işlenebilirliği elyaf ve matris ikilisinin fiziksel ve mekanik özellikleri, elyaf içeriği ve elyaf yönü ile belirlenir. Bu sebepten işlenmiş kenar yüzey kalitesi, elyaf takviyesinin cinsi ve yönünden büyük oranda etkilenir. Matris mukavemeti de genellikle elyafların mukavemetinden daha düşük olduğu için kesme kuvvetleri de elyaflara bağlıdır. Kesme sıcaklıkları da elyafların yönleri ile termal ve mekanik özelliklerinden etkilenir. Aynı zamanda takım aşınması da elyafların cinsinden ve hacim oranından büyük oranda etkilenir. Elyaf takviyeli polimerlerin işlenmesi esnasındaki talaş oluşum süreçleri, metallerin süreçlerinden oldukça farklılık gösterir (Sheikh-Ahmad, 2009). Kompozit yapı içindeki elyaf oranı artışı, kompozit malzemenin işlenebilirliğini azaltmaktadır (Bayraktar, 2011). Tek yönlü elyaf takviyeli kompozitlerin işlenmesi, kısa elyaf takviyeli kompozitlerin işlenmesine kıyasla daha zordur (Teti, 2002). GFR, CFR ve AFR plastikler üretim süreçleri açısından birbirlerine benzeseler dahi, mekanik özelliklerinin farklılığından kaynaklı olarak işlenebilirlik özellikleri de birbirinden farklı olmaktadır (Santhanakrishnan ve ark., 1988). Elyaf takviyeli plastik malzemelerin işlenebilirliği üzerindeki ilk çalışma 1971 yılında Everstine ve Rogers (Everstine ve Rogers, 1971) tarafından yayımlanmıştır (Davim ve Reis, 2005). Kompozit malzemeler işlenirken oluşan hasarları azaltmak için yüksek kesme hızları, düşük ilerleme hızları ve küçük kesme derinlikleri kullanılır (Campell, 2010).

Kompozit malzemelerin işlenmesi esnasında görülen işlenebilirlik sorunları şu şekilde sıralanabilir:

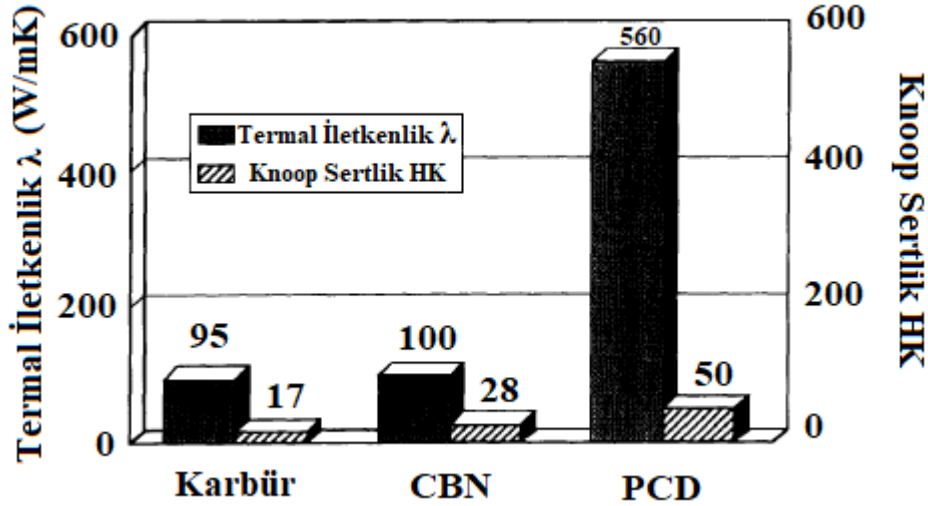
- a. Kompozitlerin delik delme veya kesme gibi talaşlı işlemlerle işlenmesi esnasında elyaflarda açılma, kesilme vb. gibi hasarlar meydana gelebileceği için kompozit malzemelerin işlenmesi zordur (Arıcasoy, 2006; Zor, 2015).
- b. Kompozitlerin işlenmesinde kullanılan takım malzemeleri işlemeden kaynaklanan elyaf aşındırıcılığına dayanabilmeli ve takım geometrisi de elyafları düzgün bir şekilde kesebilen keskin bir kenar sağlayabilmelidir. Bu iki gereksinim, metallerin işlenmesinde kullanılan kesici takımlardan beklenen özelliklerden belirgin bir şekilde farklıdır (Sheikh-Ahmad, 2009).
- c. Elyafların ve matrislerin farklı termal özellikleri işlenebilirliği etkiler. Matris ve elyafların farklı termal genişleme katsayıları -özellikle kürlemeden sonra işleme sırasında açığa çıkarak- deformasyona ve parça hasarına sebep olabilecek termal ve artık gerilmelere yol açar (Sheikh-Ahmad, 2009). Çeşitli elyafların düşük termal iletkenliklere sahip olmasından dolayı, kompozitler işlenirken ısı oluşumu ani bir şekilde oluşarak matris yapısını bozabilmektedir. Bu durum, matris çatlağı ve delaminasyon gibi hasarların oluşmasına sebebiyet verebilir (Campell, 2010).
- d. Düşük ısı iletkenlik sebebiyle işlenen yüzeyde oluşan sürtünme kaynaklı bölgesel ısınma, aşırı ısınmaya sebebiyet vererek termosetlerin işlenmiş yüzeyinde yanmaya ya da termoplastiklerin yapışmasına neden olabilir. Polimer matrislerin termal ve mekanik özellikleri, kompozitlerin işlenebilirlik yetenekleri üzerinde oldukça derin etkilere sahiptir (Sheikh-Ahmad, 2009). Termosetlerin kesme davranışları, termoplastiklerden kopma uzaması ve termal özellikler açısından oldukça farklıdır (Jahanmir ve ark., 1999).
- e. Polimerik matris metallerin işlenmesi esnasında ortaya çıkan yüksek sıcaklıklara dayanamadığı için, polimer matrisli kompozitlerin işlenmesi esnasında matrisin uzun süre ısıya maruz bırakılmamasına dikkat edilmelidir. Soğutma esnasında matris veya elyaflar tarafından nem emilimi, işlenmiş parçanın şeklini, boyutsal doğruluğunu ve mekanik özelliklerini tehlikeye atabilir. Elyaf takviyeli kompozitlerdeki polimer matris, işleme operasyonundan kaynaklanan talaş türü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Aynı zamanda polimerlerin termal özellikleri de talaş oluşumu üzerinde çok derin bir etkiye sahiptir. Buna ek olarak polimer matrislerin kendine özgü termal özellikleri, özellikle termal iletkenlikleri nedeniyle kesme bölgesindeki sıcaklığın belirlenmesinde de rol oynamaktadır. Polimerlerin işlenme davranışları; takım malzemesi, kesme kenarı yarıçapı,

kesme derinliği ve kesme hızı gibi çok çeşitli işlem parametrelerinden etkilenmektedir (Sheikh-Ahmad, 2009).

- f. Karbon elyaflar elektriksel olarak iletken olduğu için, işleme sırasında aşındırıldığında elyafın tozları takım tezgâhı kontrollerine nüfuz edebilir ve elektrikli ekipmana kısa devre yaptırabilir. Aynı zamanda karbon ve grafit elyafların kendi kendini yağlama etkisi matris üzerinde kolay kaymaya yardımcı olduğu için CFRP'ler, işleme sırasında debonding hasarı oluşturmaya daha yatkındır (Sheikh-Ahmad, 2009).
- g. Aramid elyafların olağanüstü toklukları işleme sırasında sorun yaratır. Aramid elyafların cam ve karbon elyaflardan daha tok olması, aramid elyafların ilerleyen kesme kenarının önünde büyük ölçüde bükülmelerine sebep olur. Bu sebepten AFR polimerlerin kesilmesi çok zordur (Sheikh-Ahmad, 2009). Aramid elyaflar kesildiğinde yıpranmaya ve parçalanmaya meyillidir. Bu yüzden AFR kompozitler için özel tasarlanmış takımlar gerekir (Mallick, 2018). Kevlar elyaf takviyeli (KFR) plastiklerin işlenmesi, karbon ve cama göre daha yüksek kesme kuvvetleriyle yapılmaktadır. Bu; kevlar elyafların daha yüksek olan tokluklarının, işlenebilirliğin ağırlıklı olarak plastik deformasyonla ilişkili olmasına yol açmasıyla açıklanır (Santhanakrishnan ve ark., 1988).
- h. Camın aşındırıcı özelliğinden dolayı GFR kompozitlerin işlenmesi büyük bir zorluk teşkil etmektedir (Sheikh-Ahmad, 2009).
- i. Bor elyaflar aşırı derecede aşındırıcı oldukları için işlenirken şiddetli çizilme (Abrazif) aşınmasına sebebiyet verirler (Sheikh-Ahmad, 2009).

### 3.6.1. Takım malzemeleri

Elyaf takviyeli polimerleri işleyecek takımlar, aşınmaya karşı dayanıklılık için yüksek sertliklere ve ısıyı dağıtmak için yüksek termal iletkenliklere sahip olmak zorundadırlar. Kullanılan sert kesici takım malzemeleri sementte karbürler, kaplanmış karbürler ve seramikler iken süper sert malzemeler ise kübik bor nitrürler (CBN), poli kristal elmas (PCD) ve tek kristal elmaslardır (Hocheng, 2012). Şekil 3.41'de bu malzemelerin sertlik değerleri gösterilmektedir.



Şekil 3.41. Elyaf takviyeli polimerleri işlemede kullanılan takımlar (Jahanmir ve ark., 1999)

PCD; kobalt (Co) ile kristal elmasların yüksek sıcaklık ve basınç altında sıkıştırılmasıyla elde edilen, oldukça tok özellikler sergileyen, rastgele yönlendirilmiş kristallerden oluşan ve doğal elmasa yakın özelliklere sahip olan insan yapımı bir elmadır (Jahanmir ve ark., 1999; Sultan ve ark., 2021). Tüm kesme malzemelerinden üstündürler (Jahanmir ve ark., 1999). Tek kristal elmas zincire ana avantajı, malzemenin sertliğini ve tokluğunu iyileştiren mekanik özelliklere sahip olmasıdır (Sultan ve ark., 2021). PCD'lerin termal iletkenliği 5-9.2 W/cmK arasındadır. Şok ve darbeye karşı da oldukça dirençlidirler, talaş kaldırma oranları yüksektir (Jahanmir ve ark., 1999). Mekanik ve termal özellikleri etkileyici olduğu için en gelişmiş takım malzemelerinden biri olarak kabul edilirler. Mükemmel bir ısı iletkenidirler, kimyasal olarak kararlı bir yapıya ve düşük sürtünme katsayısına sahiptirler (Hocheng, 2012). PCD takım malzemeleri, tungsten karbür malzemelerden 500 kata kadar daha yüksek aşınma direncine ve daha yüksek termal iletkenliğe sahipken kompozit malzemelerin işlenmesinde kullanılan karbür takım malzemelerine göre ise 100 kat daha uzun aşınma ömrüne sahiptirler. Bu sebepten kompozit malzemelerin işlenmesinde kullanılan karbür takımlara kıyasla daha uzun ömürlere sahiptirler ve daha iyi bir işlenmiş yüzey kalitesi oluşturmaktadırlar (Jahanmir ve ark., 1999, Sultan ve ark., 2021). PCD uçlar, karbür uçlardan 20 kat daha pahalıdır (Mallick, 1997). Yüksek maliyetleri en büyük dezavantajları olarak göze çarpmaktadır (Hocheng, 2012). PCD malzemeler, tüm polimer matrisli kompozitlerin işlenmesi için kullanılabilir (Bratukhin ve Bogolyubov, 1995).

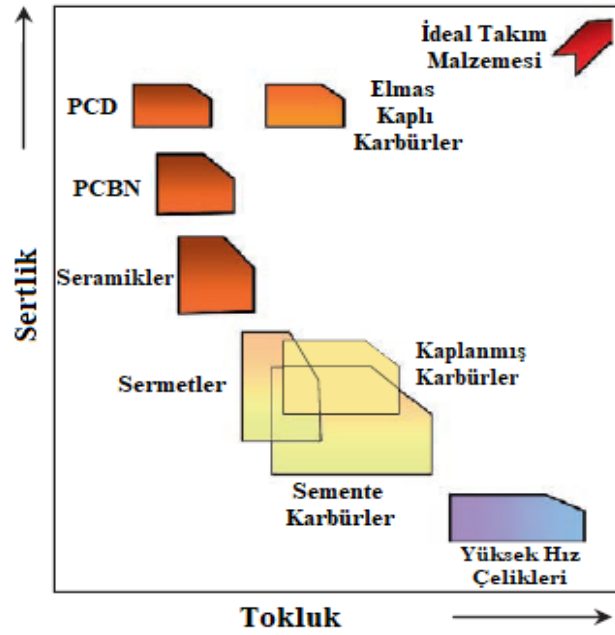
Elmas kesiciler; iyi aşınma direncine sahip olsalar da talaş kaldırma oranları düşüktür (Jahanmir ve ark., 1999).

CBN; elmastan sonraki en sert kesici malzemedir. Maliyetleri PCD takımlar ile aynıdır (Jahanmir ve ark., 1999).

Yüksek hız çelikleri (HSS); yüksek tokluklara, kabul edilebilir/orta derece mukavemetlere ve orta/düşük derece sertliklere sahiptirler ve orta dereceli sertlikleri sebebiyle oldukça popülerdirler. Düşük sertlikleri ve orta dereceli mukavemetleri nedeniyle frezeleme gibi çeşitli işleme operasyonlarında, elyaf ya partikül takviyeli polimerler gibi yüksek aşındırıcılığa sahip malzemeleri işlemek için yeterince uygun ve pratik değildirler. Yüksek sıcaklıklarda sertliklerini koruyamadıkları için yüksek hızlı işlemlere pek uygun değildirler (Sheikh-Ahmad, 2009; Sultan ve ark., 2021). Cam ve karbon elyafların yüksek aşındırıcı nitelikleri, HSS takımların hızla aşınmasına neden olmaktadır (Mallick, 2018). HSS kesici takımlar, yalnızca polimer kompozitlerin aşındırıcı takviye içermediği durumlarda kullanılabilir; çünkü bu takımlar düşük aşınma direncine, nispeten düşük sertliğe ve düşük termal iletkenliğe sahiptir. Yine bu takımların düşük dayanıklılığı sebebiyle, bu takımlar polimer kompozitlerin frezelenmesinde kullanılmamaktadır. HSS'lerin kesme yeteneğini geliştirmek için takıma, aşınmaya karşı dirençli kaplamalar yapılabilir (Bratukhin ve Bogolyubov, 1995).

Semente karbür; üstün aşınma direncine ve yüksek sertliğe sahiptirler. Tungsten karbürler (WC) bu grupta ana partikülü oluşturmaktadırlar (Sultan ve ark., 2021).

Sert alaşım takımlar; polimer matrisli kompozitlerin işlenmesinde HSS'ye göre daha başarılıdır. Sert alaşım matkap uçları, tek seferlik deliklerin açılacağı bor plastikler hariç diğer tüm polimer matrisli kompozitleri işlemek için kullanılabilir (Bratukhin ve Bogolyubov, 1995). Şekil 3.42'de takım malzemelerinin sertlik ve tokluk ilişkisi görülmektedir.



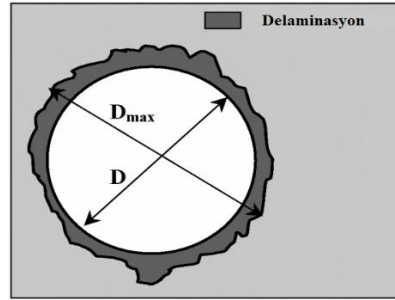
Şekil 3.42. Kesme malzemeleri arasındaki sertlik ve tokluk ilişkisi (Sheikh-Ahmad, 2009)

### 3.6.2. Kompozit malzemelerin delinmesi

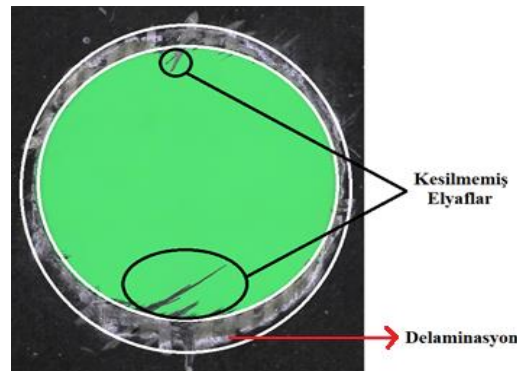
Delme; kompozit malzemede delik açılması gereken montaj uygulamalarında kullanılan en yaygın yöntemken aynı zamanda mekanik parça ve yapılarda bileşen montajına ihtiyaç duyulması nedeniyle endüstride sıkça kullanılan bir işleme operasyonudur ve metaller ile kompozit malzemelerdeki en yaygın talaş kaldırma işlemidir (Davim ve Reis, 2003; Gemi ve ark., 2019; Sheikh-Ahmad, 2009). Aynı zamanda perçinleme gibi işlemlerin yaygın kullanımı dolayısıyla da elyaf takviyeli polimer kompozitlerde en sık kullanılan işlem türü delmedir. Elyaf takviyeli polimerlerin delinmesi, hızlı takım aşınmasına sebep olduğu ve yüzey kalitesine zarar verdiği için zordur (Fleischer ve ark., 2018). Delinmiş kompozitlerde karşılaşılan bazı problemler yüzey delaminasyonları ve elyaf çekilmesi gibi hasarlardır (Davim ve Reis, 2003). Özellikle delaminasyon çoğunlukla kompozit malzemelerin delinmesi esnasında en sık karşılaşılan hasar mekanizmalarından bir tanesidir (Tsao ve ark., 2007). Elyaf takviyeli plastik kompozitlerin delinmesinde meydana gelen temel sorunlar hızlı takım aşınması ve yüzey kalitesine verilen hasarlarken elyaf takviyeli polimerlerin delinmesinde en büyük sorun delaminasyondur; çünkü bu sorun işlenmiş malzemenin yapısal bütünlüğünü ciddi anlamda olumsuz etkileyebilmektedir (Caggiano, 2018; Sheikh-Ahmad, 2009). Delme delaminasyonu, kompozit yapının tabakaları arası düşük mukavemetinden ve

kesmeden kaynaklanan yüksek enine kuvvetlerden kaynaklanır (Sheikh-Ahmad, 2009). Takım geometrisi delaminasyon üzerinde önemli bir etkiye sahipken kesme hızı artışıyla delaminasyon daha ciddi bir hâl alır (Sheikh- Ahmad, 2009; Vigneshwaran ve ark., 2018). Matkap ucu, iş parçası ile ilk temas ettiği anda, kesme hareketi sonucu ilk tabakaları, altındaki tabakalardan ayrılmaya zorladığında soyulma (peel-up) delaminasyonu oluşurken matkap ucu delik çıkışına yaklaştığında oluşturduğu delaminasyona ise itme (push-out) adı verilir. Delme kaynaklı oluşan delaminasyon sebebiyle işlenen malzemeler, %60'lara varan oranlarda kullanım reddi yiyebilirler (Davim, 2015).

Delaminasyon ölçümü, delaminasyon faktörü adı verilen bir formülle hesaplanmaktadır. Delaminasyon faktörü, açılan delik sayısının artışıyla artış gösterirken aynı zamanda kullanılan takım ucuyla da bağıntılıdır (Mallick, 1997). Şekil 3.43'te şematik delaminasyon alanı görülürken Şekil 3.44'te elyaf takviyeli bir kompozitteki delaminasyon çıkış hasarının gerçek görüntüsü bulunmaktadır. Şekil 3.45'te ve 3.46'da ise sırasıyla giriş ve çıkış delaminasyonları ile delaminasyon modları görülmektedir.

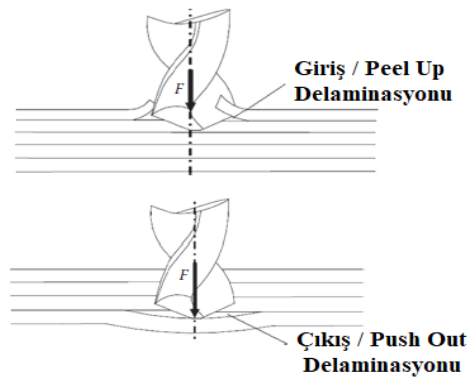


Şekil 3.43. Şematik delaminasyon gösterimi (Davim ve Reis, 2003)

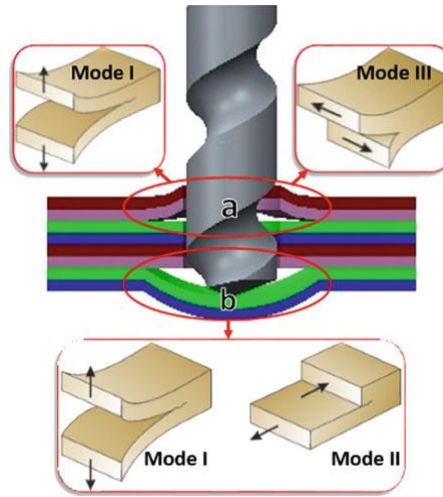


Şekil 3.44. Karbon elyaf takviyeli plastik kompozitte delik çıkış hasarları (Caggiano, 2018)

$$\text{Delaminasyon faktörü (F}_d\text{)} : \frac{D_{maks} \text{ (Maksimum delik çapı)}}{D \text{ (Delik çapı)}} \text{ (Davim ve Reis, 2003).}$$



Şekil 3.45. Giriş ve çıkış delaminasyonu hasarları (Mallick, 2018)



Şekil 3.46. Delme sonucu oluşan delaminasyon hasar modları (Sultan ve ark., 2021)

Delme işlemlerinde ilerleme hızı; itme kuvveti, çıkış delaminasyonu ve delik çapı üzerinde oldukça fazla etkiye sahiptir (Caggiano, 2018). Özellikle ilerleme hızı ve itme kuvveti arasında güçlü bir ilişki vardır; çünkü itme kuvveti ilerleme hızına bağlıdır ve ilerleme hızının artışıyla itme kuvveti de artar (Davim, 2015; Sultan ve ark., 2021). Delme sonucu oluşan delaminasyondan sorumlu olan en önemli parametre yine itme kuvvetidir. İlerleme hızındaki azalış, itme kuvvetinde de bir azalış gerçekleştirdiği için giriş ve çıkış delaminasyonlarının ikisinde de bir azalma sağlar (Sultan ve ark., 2021). Yüksek ilerleme hızlarında yapılan delme işlemleri, delikte sürtünmeden kaynaklı yüksek sıcaklık oluşturabileceği için polimer matrisin aşırı ısınmasına sebebiyet vererek matris yapısını bozabilir (Mouritz, 2012). İş mili ya da kesme hızında bir artış olduğunda itme kuvvetinde azalma görülür (Davim, 2015). Delme işlemi ne kadar fazla olursa, yani ne kadar fazla delik delinirse, takım aşınması da o oranda artacağı için itme kuvvetinde artış gerçekleşir.

Delmede takım aşınması, ilerleme ve iş mili dönüş hızı artışıyla artış gösterirken matkap uç çapları da takım aşınmasını etkilemektedir (Davim, 2015; Sultan ve ark., 2021). Delik yüzey pürüzlülüğü de iş mili ve ilerleme hızının artmasıyla artış gösterirken aynı zamanda elyaf yönelimine de ziyadesiyle bağlıdır (Davim, 2015; Sheikh-Ahmad, 2009). Delme işlemi sonrası elde edilen delik kalitesi, yüksek oranda takviye elemanlarının mekanik özelliklerine de bağlıdır (Mallick, 1997).

Çeşitli elyaf takviyeli polimerlerin delinmesi için kullanılacak takımlar; iyi tokluk, yeterli sertlik, iyi aşınma direnci, iyi termal iletkenlik ve kimyasal tepkimeye girmeme gibi özelliklere sahip olmalıdır (Lantrip, 2008). Matkap uç geometrisi, elyaf takviyeli polimerlerin delinmesi sonrasında elde ettiğimiz deliklerin kalitesini ve bütünlüğü önemli ölçüde etkiler (Sultan ve ark., 2021). Takım çapları ise polimerlerin delinmesi esnasında itme kuvvetini etkiler (Vigneshwaran ve ark., 2018). Twist uçlar delmede en yaygın kullanılan uçken bu uç ile yapılan geleneksel delme işlemi, kompozitler için en ekonomik ve uygun işlemdir (Hocheng, 2012; Sultan ve ark., 2021).



**Şekil 3.47.** Çeşitli uçlar (Sultan ve ark., 2021)

Twist matkap uçlarının; HSS, Co, karbür, elmas, WC ve PCD gibi çeşitleri bulunmaktadır (Sultan ve ark., 2021).

Delmede PCD, karbür ve kaplamalı takımlar HSS'ye göre daha uzun takım ömrü sağlar. HSS'de sürtünme katsayısı düşüktür (Davim, 2015). Cam ve karbon elyaflar çok aşındırıcı olduğundan HSS uçlar, bu takviyeye sahip kompozitlerde birkaç delikten sonra iş göremez hâle gelmektedir. WC bu konuda yeterli ömre sahiptir. PCD ile kaplanmış WC takımlarla çok daha yüksek sayıda delik açılabilir (Mallick, 1997). WC uçlar PCD'ye göre daha küçük itme kuvvetleri üretse de PCD takımlar daha yüksek iş mili hızlarında kullanılabilme avantajı sağlar (Davim, 2015). Grafit-epoksi ya da cam-epoksi

için PCD kaplı twist uç ile çok iyi sonuçlar elde edilebilir. Bor elyaf takviyeli kompozitleri delmek için elmasla kaplanmış takımlara ihtiyaç duyulmaktadır. AFR kompozitler delinirken elyaf yıpranması gözlemlenebilmektedir (Mallick, 1997). Aramid için kullanılan delme uçları C tipi kesici kenarlara sahiptir (Mouritz, 2012).



Şekil 3.48. Aramid için kullanılan C tipi matkap ucu (Mouritz, 2012)

Su jeti işleme, lazer işleme gibi geleneksel olmayan çeşitli delme teknikleri geleneksel delme teknikleriyle kıyaslandığı zaman, elyaf takviyeli kompozitlerde delmede daha iyi sonuç vermektedir. Su jeti ile delme yapıldığında, polimer bazlı kompozitler üzerinde daha kaliteli delikler elde edildiği de görülmüştür. Su jeti ile işleme ısıl hasar oluşturmamış olsa da şiddetli delaminasyona veya jet çıkışında talaşlara sebep olabilmektedir (König ve ark., 1985).

### 3.6.3. Kompozit malzemelerin frezelenmesi

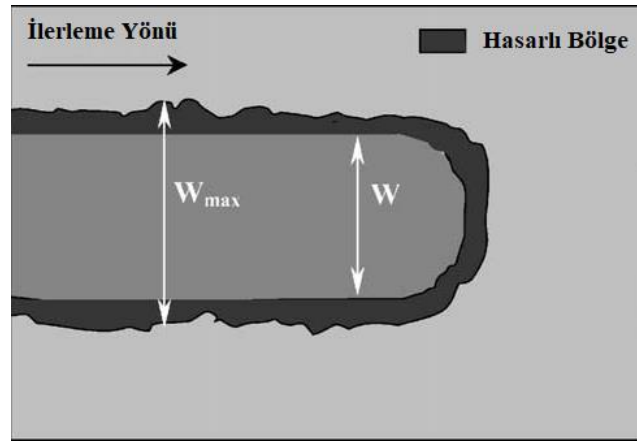
Frezeleme, toleransları kontrol etmek için uygulanan en pratik işleme operasyonudur ve yüksek kaliteli yüzeyler üretebilmek için kompozitlerde yaygın olarak uygulanır (Fleischer ve ark., 2018; Jahanmir ve ark., 1999). Kompozitlerin frezelenmesi yapılarının homojen olmamasından, takviye elemanlarının aşındırıcı olmasından ve işlenmiş yüzeyde hasar oluşumundan dolayı epey karmaşıktır (Kılıçkap ve Çelik, 2012).

Elyaf takviyeli plastik kompozitlerin frezelenmesinde kullanılacak takım ve işleme parametreleri, elyaf cinsi, takviye yapısına ve matris hacim oranına bağlıdır. Frezelemede takviye cam veya karbonsa kesici takım malzemesi dikkate alınırken aramid takviyede ise kesici takım geometrisi dikkate alınmaktadır (Teti, 2002).

Frezeleme için kesici takımlarda abrazif aşınmaya karşı direnç ve yüksek kırılma tokluğuna ihtiyaç vardır (Sheikh-Ahmad, 2009). Elyaf takviyeli plastik kompozitlerin frezelenmesinde yüksek sertliğe ve yüksek termal iletkenliğe sahip olan sinterlenmiş karbür, PCD ve CBN gibi takım malzemeleri sıklıkla kullanılmaktadır (Caggiano, 2018).

PCD elyaf takviyeli polimer kompozitlerin delinmesinde daha uzun takım ömrünü ve daha yüksek işleme hızlarını daha yüksek maliyetle sunmaktadır (Teti, 2002).

Elyaf takviyeli polimerlerin frezeleme işlenebilirliği; takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyona göre değerlendirilir. Frezeleme işleminde takım döndüğü için kesme kuvvetleri ve kesme sıcaklıkları kolaylıkla ölçülemez. Bu sebepten işlenebilirlik çalışmalarında frezelemeden daha az yararlanır. Frezelemede yüzey kalitesi; ilerleme hızı ve takım aşınması gibi parametrelerden etkilenir. İlerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü de artış göstermektedir. Kesme ve ilerleme hızlarındaki artış genellikle delaminasyon faktörünün de artmasına yol açmaktadır. İlerleme hızı delaminasyon genişliğini etkileyen en önemli parametredir (Sheikh-Ahmad, 2009). Şekil 3.49'da delaminasyon ölçümü görülmektedir.



Şekil 3.49. Frezeleme delaminasyon ölçümü (Davim ve Reis, 2005)

Delaminasyon faktörü ( $F_d$ ) :  $\frac{W_{maks}}{W}$  (Davim ve Reis, 2005).

#### 3.6.4. Kompozit malzemelerin tornalanması

Tornalama, çeşitli endüstriyel uygulamalarda zaman zaman birincil işleme operasyonu olabilmektedir (Kılıçkap ve ark., 2017). Kompozitlerin tornalama işlenebilirlikleri takım aşınması, kesme kuvvetleri, kesme sıcaklıkları ve yüzey kalitesi açısından değerlendirilir (Sheikh-Ahmad, 2009). Takım aşınması; takım ömrünü, işlenen parçanın yüzey kalitesini ve üretim maliyetini doğrudan etkilerken, iş parçası yüzey kalitesinin ve iş parçasının toleranslar içinde üretilmesini de etkilemektedir. Yüzey pürüzlülüğü ise parçaların aşınma ve korozyon direncini, yorulma davranışlarını,

yağlama özelliklerini ve aşınma oranını etkiler. Tornalamada ilerleme hızları, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametre olarak kabul edilirler; çünkü ilerleme hızı artışı ısı artışına sebep olarak takım aşınmasını artırır ve yüzey kalitesini kötüleştirir (Kılıçkap ve ark., 2017). Bu sebepten, tornalama operasyonlarında yavaş ilerleme hızları uygulanmalıdır (Caggiano, 2018). Yüzey pürüzlülükleri artan ilerleme hızları ile kötüleşse de artan kesme kuvvetleri ile iyileşmektedir (Yardımeden, 2016). Elyafların cinsi, yönelimi ve kompozitteki hacim oranları işlenebilirliği etkileyen en önemli parametrelerdir. Elyaf yönelim açısı; talaş oluşum şekli, kesme kuvvetleri ve işleme sonrası elde edilen yüzey kalitesi üzerinde büyük etkiye sahiptir (Sheikh-Ahmad, 2009).

GFR ve CFR plastik malzemelerin tornalanması için PCD gibi süper sert takım malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır; çünkü bu malzeme yeterli mukavemet, sertlik, tokluk ve termal şok direnci sağlamaktadır (Caggiano, 2018).

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1. Bazalt Takviyeli Polimer (BTP) Kompozit Boruların Üretimi

BTP kompozit boruların üretiminde elyaf malzemesi olarak 13  $\mu\text{m}$  çapında Kamenny Vek BCF13 – 400 – KV12 (Basfiber), matris malzemesi olarak da düşük viskoziteli MY 740 epoksi reçinesi ve yine düşük viskoziteli HY 918 sertleştirici kullanılmıştır. Kalıp ayırıcı olarak ise Huntsman Araldite QZ-13 kullanılmıştır. BTP kompozit boruların üretiminde kullanılan malzemelerin özellikleri Çizelge 4.1’de görülmektedir.

**Çizelge 4.1.** BTP boruların üretiminde kullanılan malzemelerin özellikleri (ChemCenters, 2000; Viba, 2015)

	Yoğunluk (25°C)	Viskozite (25°C)
MY 740	~ 1.16 g/cm <sup>3</sup>	~ 12000 mPa.s
HY 918	~ 1.2 g/cm <sup>3</sup>	~ 65 mPa.s
QZ 13	~ 0.86 g/cm <sup>3</sup> (20°C)	~ 4 mPa.s (20°C)

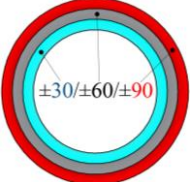
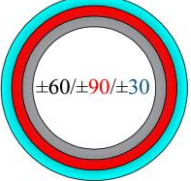
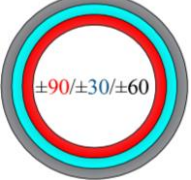
Numunelerin üretimi yaş elyaf sarım yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’de üretim aşaması görülmektedir. Bazalt elyaflar belirli bir gerginlikte reçine banyosuna daldırılmıştır ve banyodaki reçine karışım sıcaklığı 60 °C’de tutulmuştur. Ardından reçinenin viskozitesini düşürüp ıslatılabilirliğini arttırmak için mandrel sarım işleminden önce kütleme fırınında 150 °C’ye kadar ısıtılmıştır. Mandrellerin üstüne ayırıcı olarak Araldite QZ-13 sürülmüştür. Üretim parametreleri olarak 400 tex kullanılan bazalt elyaf bobinlerden 9 roving alınmış ve 10 mm bant genişliğinde sarım işlemleri gerçekleştirilmiştir. Boru üretimi tamamlandıktan sonra borular mandrel ile birlikte döner kütleme fırınına konularak kürelemeye tabi tutulmuştur. Bu işlem 135 °C’de 2 saat ve ardından 150 °C’de yine 2 saat olarak gerçekleştirilmiştir. BTP kompozit boruların üretimi ve fırında sertleştirme işlemleri, İzmir İzoreel Komp. Malz. San. ve Tic. Ltd. Şti. imkanlarından yararlanılarak yapılmıştır.



Şekil 4.1. BTP kompozit boruların üretimi

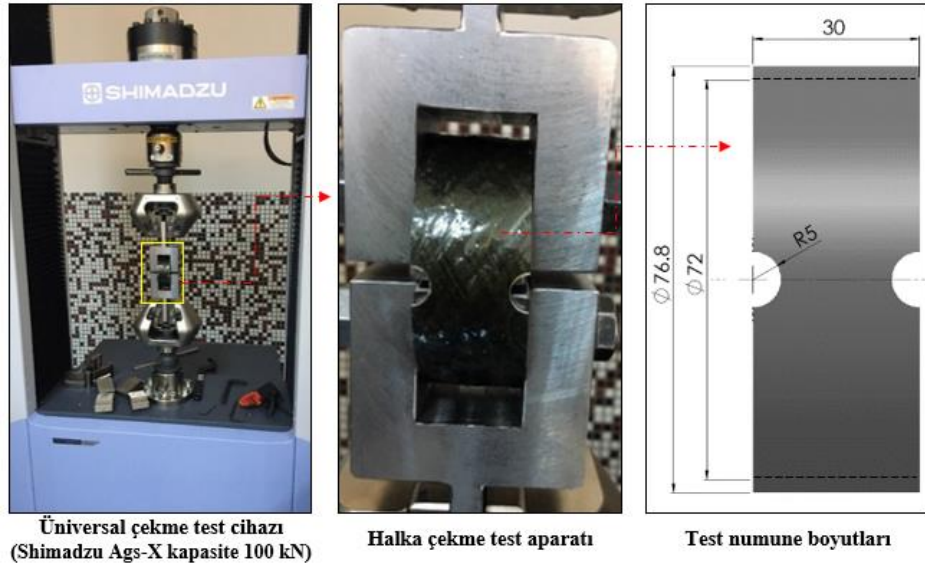
Deneyisel çalışmalar için üretilen bazalt elyaf sarımlı polimer kompozit boruların iç çapı 72 mm'dir. Deney parametresi için üç farklı sarım açısında ( $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$  ve  $\pm 90^\circ$ ) tabakaların istiflemeleri dikkate alınarak üretimler gerçekleştirilmiştir. Numuneler her istifleme sırasında  $\pm 2$  tabaka olmak üzere toplam 6 tabakadan oluşmaktadır. Çizelge 4.2'de üretilen BTP kompozit boruların şematik gösterimi, açı konfigürasyonları ve kodları verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Üretilen BTP kompozit boruların istifleme sırasına göre şematik gösterimi ve kodları

Şematik gösterim	Numune	Numune kodu
	$\pm 30/\pm 60/\pm 90$	CP_1
	$\pm 60/\pm 90/\pm 30$	CP_2
	$\pm 90/\pm 30/\pm 60$	CP_3

#### 4.2. Halka Çekme Deneyleri

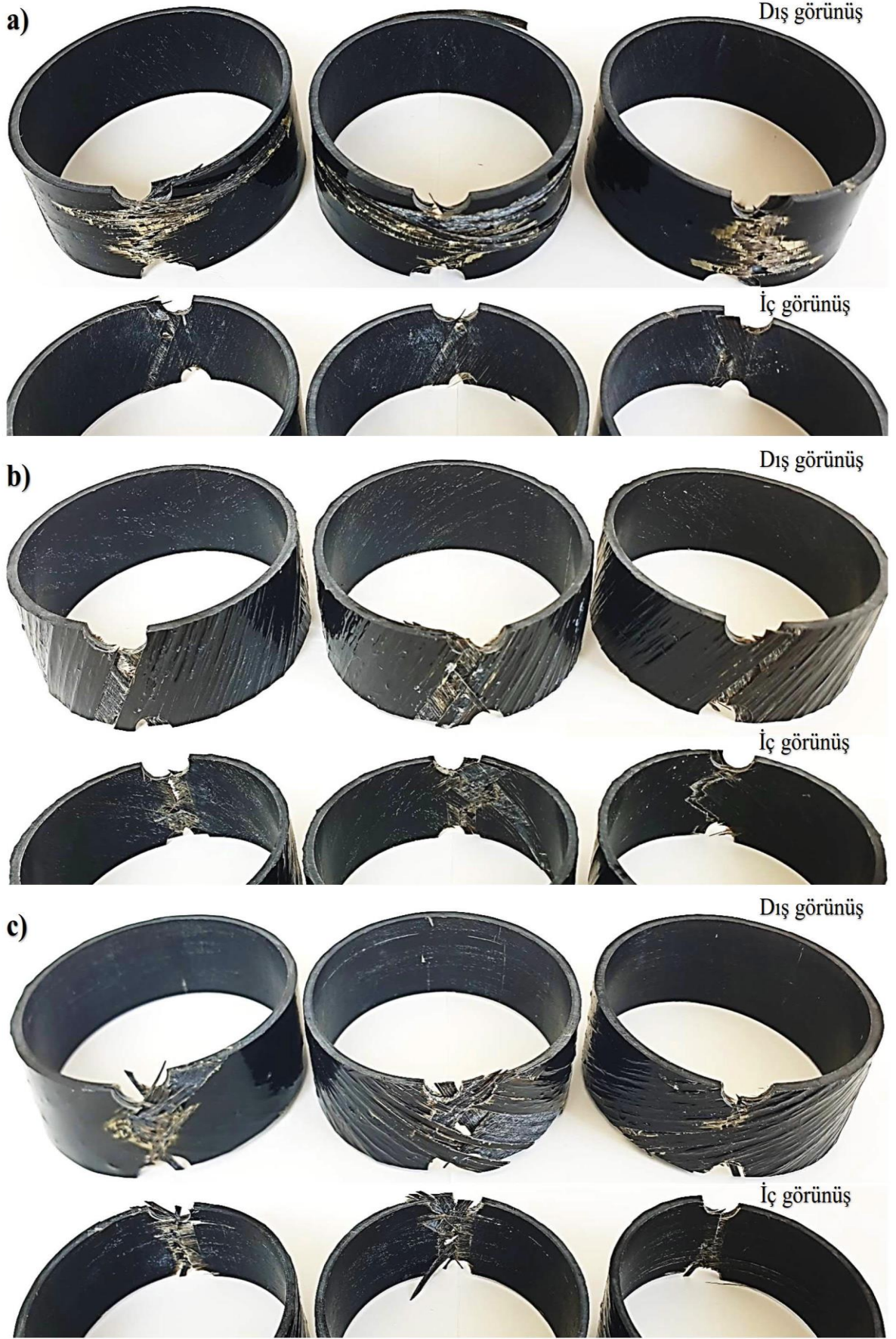
Halka çekme deneyleri, oda sıcaklığında 100 kN kapasiteli Shimadzu universal çekme test cihazında ASTM D 2290 standartlarına göre 2 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan çekme test cihazı, standarda göre üretilmiş halka çekme aparatı ve numune boyutları Şekil 4.2’de verilmiştir. Halka çekme deneyleri üç tekrarlı yapılmıştır. Çekme işlemi sırasında veriler kaydedilmiş ve deney sonrası her üç boru numunesi için de gerilme-şekil değiştirme grafikleri çizilmiştir. İşlenmiş grafiklerden elde edilen yüzde uzama, statik tokluk ve maksimum gerilme gibi veriler tablo halinde Çizelge 5.1’de sunulmuştur.



Şekil 4.2. Test düzeneği ve numune boyutları

#### 4.2.1. Halka çekme deneyleri sonrası hasar analizi

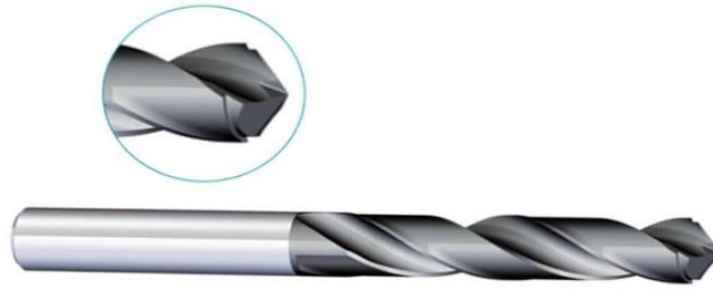
Halka çekme deneyleri sonrası hasarlı numuneler optik mikroskop (Keyence VHX900F) aracılığıyla incelenmiş ve istifleme sırası değişikliğinin hasar gelişimine etkileri gözlemlenmiştir. Hasar analizi sonrası oluşan diğer hasarlar da incelenerek yorumlanmıştır. Belirlenen hasar modları hasar görselleri üzerinde gösterilmiştir. Şekil 4.3'te ise dış ve iç makro hasar görüntüleri yer almaktadır.



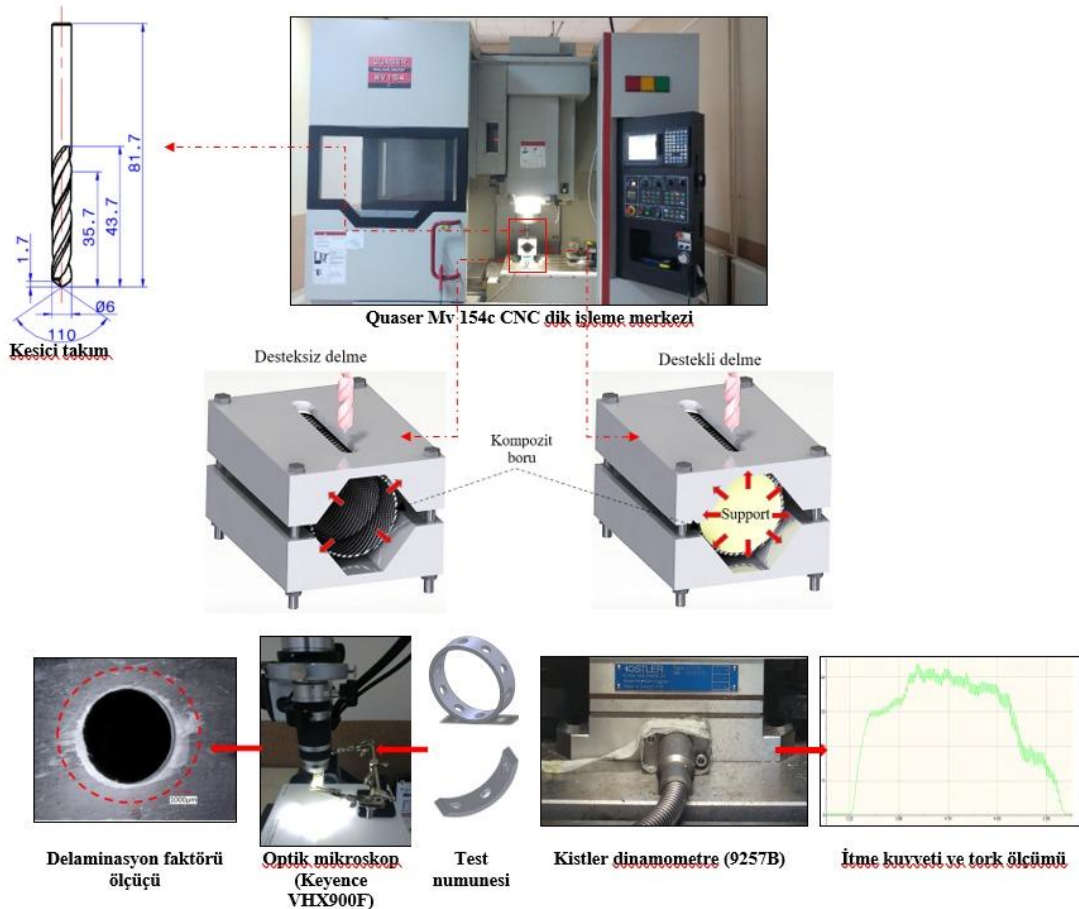
Şekil 4.3. Dış ve iç makro hasar görüntüleri a)  $\pm 30/\pm 60/\pm 90$  b)  $\pm 60/\pm 90/\pm 30$  c)  $\pm 90/\pm 30/\pm 60$

### 4.3. İşlenebilirlik (Delme) Deneyleri

Delme deneylerinde numuneler destekli ve desteksiz olarak farklı iş mili dönüş (1000, 2000, 3000 ve 4000 dev/dk) ve ilerleme (150, 250, 350 ve 450 mm/dk) hızlarında CNC dikey işleme tezgâhında (Quaser Mv 154c) kuru kesme şartlarında her bir parametre için üç tekrarlı gerçekleştirilmiştir. Delme işlemleri için Şekil 4.4'te görülen Taegutec marka 6 mm çaplı TTD610 elmas kaplanmış karbür matkap ucu kullanılmıştır. İş mili ilerleme hızı 300 mm/dk'de sabitken dönüş hızı ve iş mili dönüş hızı 2500 dev/dk'de sabitken ilerleme hızı değiştirilerek delme işlemleri tamamlanmıştır. Deney düzeneği ile cihazın şematik görünümü Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Kesici takım (Taegutec, 2022)



Şekil 4.5. Test düzeneği

### 4.3.1. Delme deneyleri sonrası hasar analizi

Şekil 4.6’da literatürde delaminasyon hasarının derecesini karakterize etmek için en çok kullanılan yöntem olan ve delaminasyon alanının maksimum çapının ( $D_{maks}$ ) delik nominal çapına ( $D_0$ ) oranı olarak tanımlanan tek boyutlu delaminasyon faktörünün ( $F_d=D_{maks}/D_0$ ) şematizması ile deney cihazı görülmektedir. Bu hesaplamalarda maksimum çap dijital mikroskop aracılığıyla her bir delik için hesaplanmıştır.



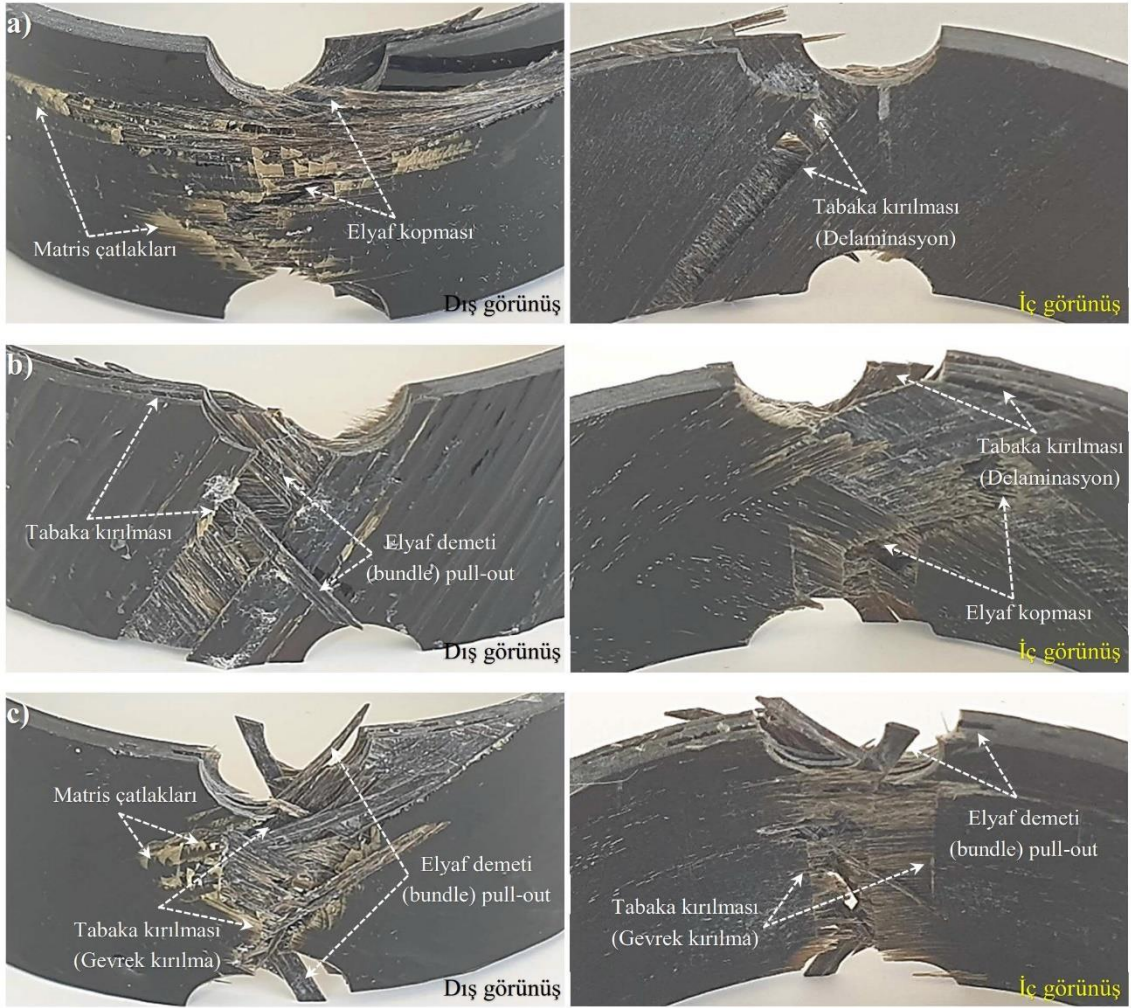
Şekil 4.6. Optik mikroskop ve delaminasyon faktörü hesaplaması

Kesme esnasında oluşan itme kuvvetleri ve tork değerleri üç eksenli ölçüm yapabilen dinamometre (Kistler 9257B) aracılığı ile alınmış ve grafik haline dönüştürülmüştür.

## 5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

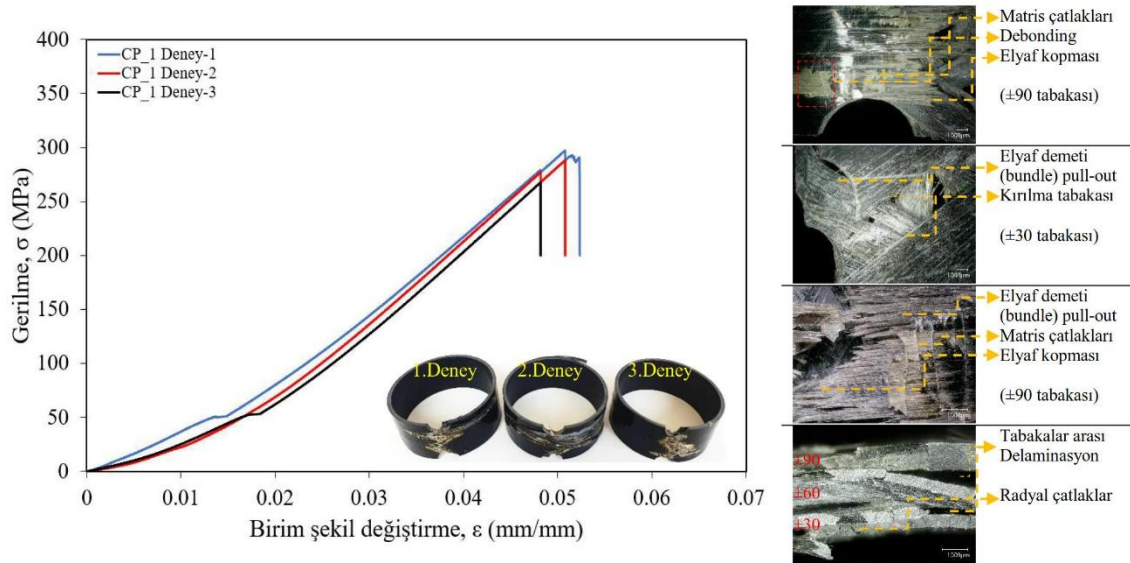
### 5.1. Halka Çekme Deneyleri

Deneysel çalışma sonrasında elde edilen veriler ve hasar görüntüleri işlenerek karşılaştırmalı yorumlar yapılmıştır. Üç tekrarlı olarak yapılmış deneylerde bütün hasarlar daraltılmış bölgelerde meydana gelmiştir. Üç farklı istifleme sırasında üretilmiş numunelerin dış ve iç görüntüleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.1’de verilmiştir. Kompozit boru numunesinin iç kısmına istiflenmiş  $\pm 90^\circ$  sarım açılı tabakalarda gevrek kırılma hasarları görülmüş ve elyaflarda şekil değiştirme olmaksızın tabaka kırılması oluşturacak şekilde toplu olarak kırılmalar oluşmuştur. Borunun dış kısmında istiflenmiş  $\pm 90^\circ$  sarım açılı tabakalarda oluşan hasarların elyaf doğrultusunda yayıldığı görülmüştür. Elyaf doğrultusunda yayılan hasarlar incelendiğinde; elyaf kopma, yarıma, debonding ve matris çatlak hasar modlarının olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.1ac) Boruların iç ve dış kısımlarına istiflenmiş  $\pm 60^\circ$  sarım açılı tabakalarda (Şekil 5.1bc) kısmen gevrek kırılmaların oluşmasının yanında oluşan hasarların  $\pm$  elyaf doğrultularında ilerlediği görülmüştür. Boru numunesinin iç kısmında istiflenen tabakalarda belli bir şekil değiştirme sonrasında elyaf kopmaları ve elyaf demetlerinde çekilme (Pull-out) şeklinde hasar modlarının olduğu gözlemlenmiştir. Borunun dış kısmında istiflenmiş  $\pm 60^\circ$  sarım açılı tabakada da benzer hasarlar oluşmuş ancak oluşan hasarlar tek bir açı (+) doğrultusunda yoğunlaşmıştır. Şekil 5.1ac’de  $\pm 30^\circ$  sarım açılı tabakalarda diğer sarım açılarından farklı bir hasar oluşumu gözlenmiştir. Kompozit borunun hem iç kısmında hem de dış kısmında hasarların tabaka kırılması (Delaminasyon) hasar modunun baskın olduğu ortaya çıkmıştır. Delaminasyon hasarlarının oluşması ile elyaf doğrultusunda yarıma hasarı ile tabakaların kırıldığı ve ilerleyen deplasman artışı ile tabakaların çekildiği tespit edilmiştir.  $\pm 30^\circ$  sarım açılı tabakalarda tabaka çekilmelerinin numune kesiti boyunca olduğu ancak kısmen tabaka içi yarılmalardan kaynaklı elyaf demeti çekilmelerinin de olduğu gözlenmiştir. İstifleme sıraları farklı olsa da bütün borularda ilk oluşan hasar  $\pm 90^\circ$  sarım açılı tabakada başlamış deplasman artışı ile sırasıyla  $\pm 60^\circ$  ve  $\pm 30^\circ$  sarım açılı tabakaların kırılması ile numunede kopmalar gerçekleşmiştir. İstifleme sıralarının farklı olması halka çekme mukavemet değerlerinde önemli değişimlere neden olmuştur. Özellikle  $\pm 90^\circ$  sarım açılı tabakaların kompozit borunun iç kısmında istiflenmesi en yüksek mukavemet değerini elde etmeye sebep olmuştur.



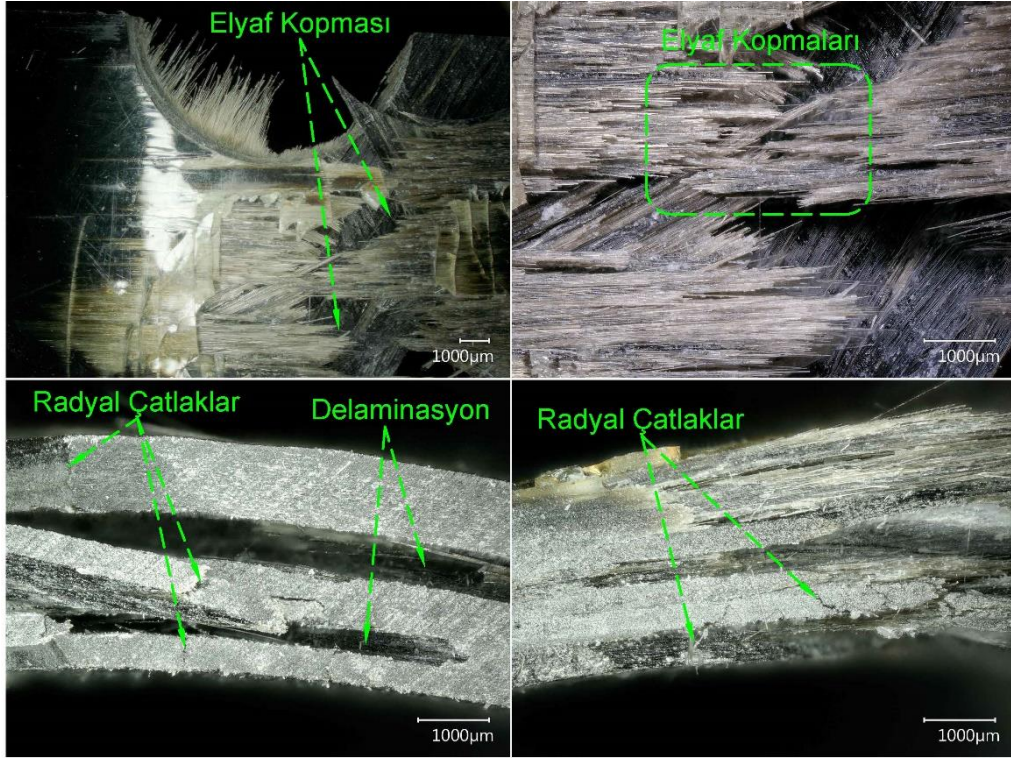
**Şekil 5.1.** Daraltılmış bölgelerde oluşan hasarların karşılaştırmalı yakın görüntüleri  
a)  $\pm 30/\pm 60/\pm 90$  b)  $\pm 60/\pm 90/\pm 30$  c)  $\pm 90/\pm 30/\pm 60$

Şekil 5.2'deki birim şekil değiştirme grafiği incelendiği zaman yapılan 3 deneyde birbirine oldukça yakın değerler elde edildiği görülmektedir. Bu durum, numunenin tutarlı bir davranış sergileme göstergesi olarak açıklanabilir. Kompozit borunun iç kısmında istiflenen  $\pm 30^\circ$  açılı sarımın olduğu bu numunenin (CP\_1) grafiğe göre çok fazla yük taşıyamadığı ve borunun genel mukavemetini düşürdüğü görülmektedir. Özellikle yapılan 3. deney sonucunda numunenin daha düşük deplasmanla erken bir kopma yaşadığı anlaşılmaktadır. Numunenin kopma esnasında oluşan yük dalgalanmaları farklı açılarda istiflenmiş tabakaların sırayla kırıldığını göstermektedir.



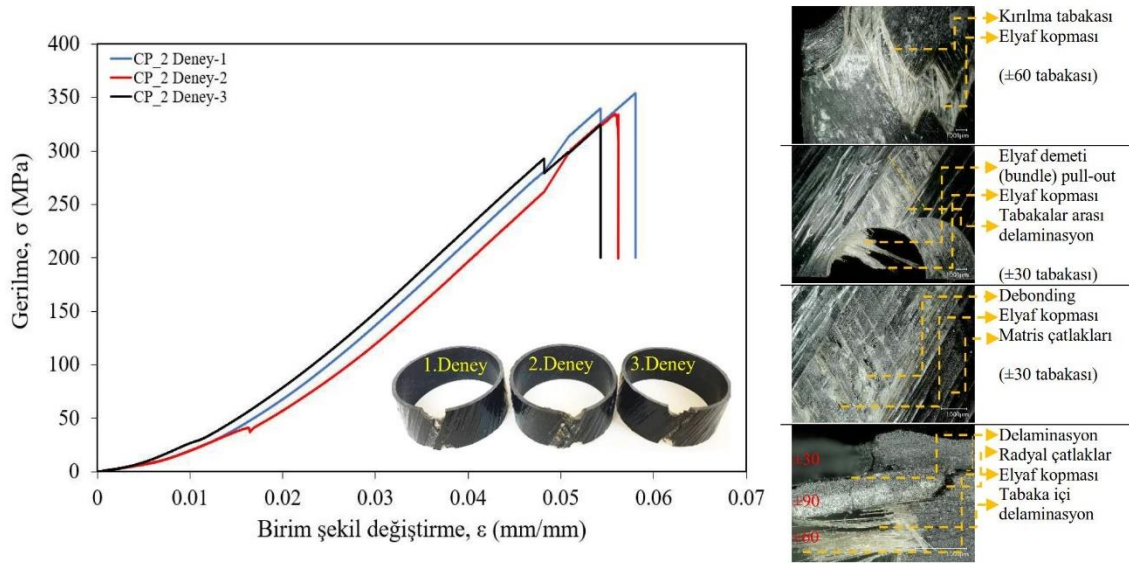
Şekil 5.2. CP\_1 gerilme-birim şekil değiştirme

Şekil 5.3’de CP\_1 numunesinde meydana gelmiş hasarların görüntüleri bulunmaktadır. Özellikle  $\pm 30^\circ$  açılı tabakalar arasındaki delamine olmuş alanlar ve radyal çatlaklar net bir şekilde görülebilirken,  $\pm 60^\circ$  ve  $\pm 90^\circ$  açılı tabakalar elyaf kopmaları ve elyaf kırılmaları da gözlemlenmektedir. Elyaf kırılmalarının hem açılal yönde hem de doğrusal yönde olduğu bu görüntülerden anlaşılabilir. Delaminasyona uğrayan tabakaların yanı sıra uğramayan tabaka katmanlarında da radyal çatlaklar oluştuğu görülmektedir.



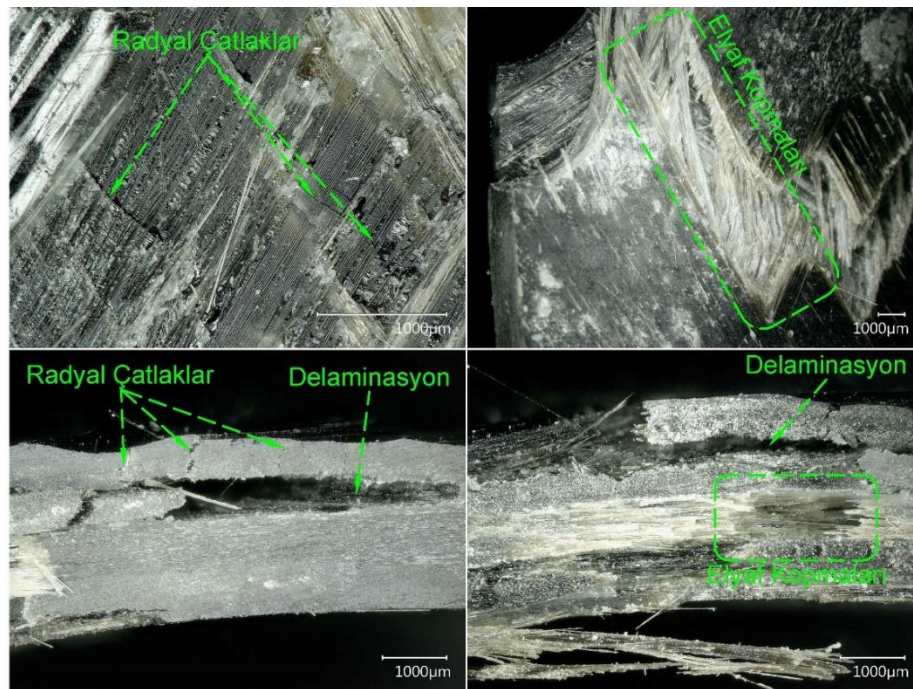
Şekil 5.3. CP\_1 numunesinde meydana gelen hasarlar

Şekil 5.4'teki incelendiğinde  $\pm 90^\circ$  tabakanın kompozit borunun dış yüzeyi yerine orta katmanda istiflendiği bu numunenin CP\_1 numunesine kıyasla daha fazla yük taşıyabildiği ve bu sebeple daha fazla birim şekil değişimine uğradığı görülmektedir. CP\_2 numunemizdeki bu dayanım artışının temel sebebi,  $\pm 90^\circ$  sarımlı elyafların en iç katmandan uygulanan çekme gerilmesine CP\_1 numunesine göre daha erken cevap vermesi olarak yorumlanabilir. Nitekim  $\pm 90^\circ$  yönlü elyaflar gerilmenin uygulandığı yönde sarıldığı ve elyafların yük taşıması kapasitesi elyaf doğrultusunda daha yüksek olduğu için bu numunede daha yüksek değerler elde ettiğimiz söylenebilir.  $\pm 30^\circ$  sarım açılı tabakanın borunun dış tabakasında istiflenmesi kısmende olsa sargı etkisi ile mukavemet artışına katkı sağlamıştır.



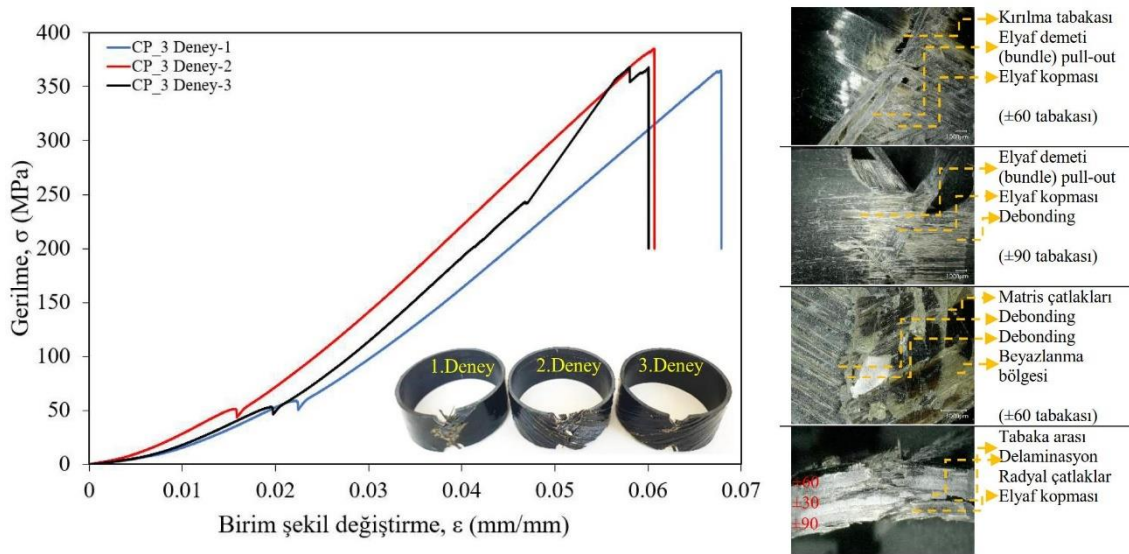
Şekil 5.4. CP\_2 gerilme-birim şekil değiştirme

Şekil 5.5'te CP\_2 numunesinin mikro hasar görüntüleri verilmiştir. Kompozit borunun dış kısmında istiflenmiş  $\pm 30^\circ$  sarım açılı tabakada CP\_1 numunesinde de olduğu gibi delaminasyon ve radyal çatlakların oluştuğu görülmüştür. Delamine olmuş alanlardaki elyaf demetlerinin matristen ayrıldığı noktalar ile matriste yer yer çatlaklar ve beyazlaşmalar olduğu görülmektedir.  $\pm 60^\circ$  ve  $\pm 90^\circ$  sarım açılı tabakada elyaf kopma hasarlarının oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.5. CP\_2 numunesinde meydana gelen hasarlar

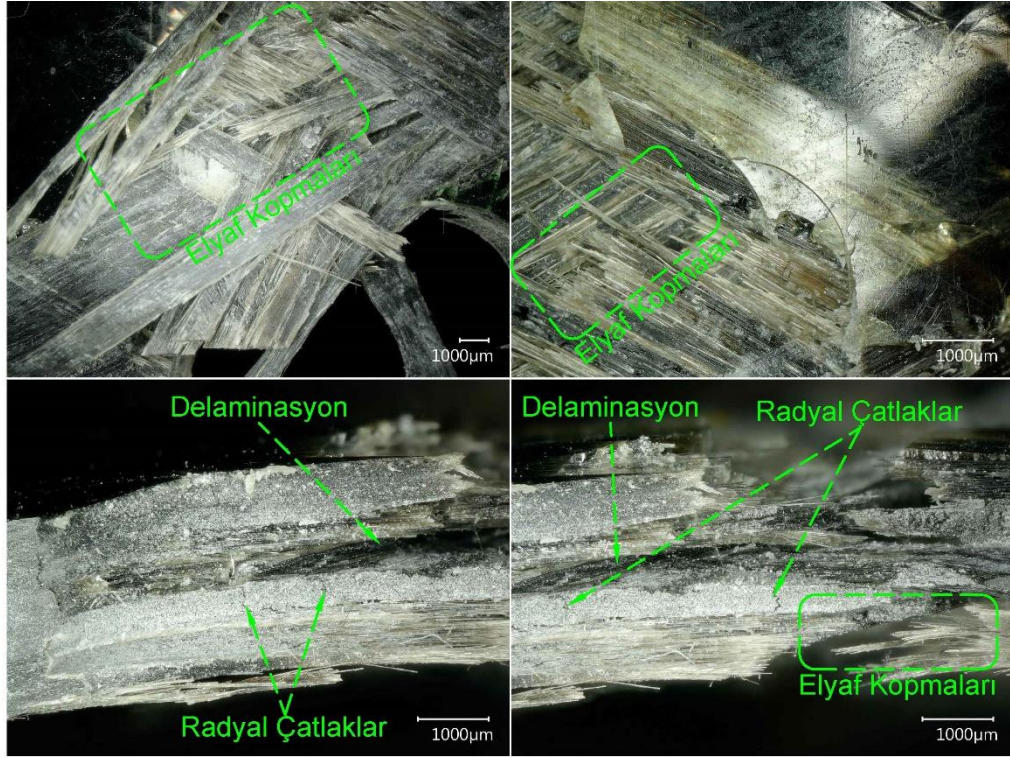
Şekil 5.6'daki CP\_3 grafiğine bakıldığında ise en yüksek birim şekil değıştiren numunenin bu numune olduğu görülmektedir. Bu numunenin en yüksek gerilmeye dayandığı görülürken bu durum,  $\pm 90^\circ$  tabakanın kompozit borunun en iç kısmında istiflenmesi ile açıklanabilir. Bu durumda test cihazı tarafından uygulanan gerilmeyi ilk karşılayan tabakanın  $\pm 90^\circ$  olması ve diğer tabakaların sargı etkisi ile takviye olarak yük taşımada katkı sağlamasına sebep olacaktır. Uygulanan çekme gerilmesinin bu katmandaki elyafların boyunca olması ve elyafların boyuna daha fazla gerilmeye dayanabilmesi sebebiyle bu numunemiz en dayanıklı numune olmuştur. Bununla birlikte yapılan üç deneyden ilkinde, sonraki iki deneyden daha farklı bir değeri elde edilmiştir. Yapılan ilk deneyi kopma noktasından değerelelendirecek olursak sonraki iki deneye göre numune daha az yük taşımış; ancak daha fazla birim şekil değışimine uğramış görülmektedir. Bu veriden numunenin son iki deneyde daha çabuk elyaf kırılması ve elyaf – matris ayrılması yaşadığı çıkarılabilir. İlk deneyde ise numune daha yavaş bir şekilde elyaf kopmasına maruz kalmış ve dolayısıyla elyaflar yükü daha ağır bir şekilde taşıırken daha fazla birim şekil değışimine uğrayabilmiş denilebilir.



Şekil 5.6. CP\_3 gerilme-birim şekil değıştirme

Şekil 5.7'de verilen mikro yapı resimleri incelendiğinde, numunenin ortasında istiflenen  $\pm 30^\circ$  tabakalarında diğer numunelerde de olduğu gibi delaminasyon ve radyal çatlakların yoğun olarak olduğu görülmüştür. Aynı zamanda delaminasyonun yoğun olduğu bölgelerde beyazlaşmalar ve elyaf sarım açısı doğrultusunda matris çatlaklarının

oluştugu görülmektedir.  $\pm 60^\circ$  ve  $\pm 90^\circ$  tabakalarda elyaf kırılmaların ve tabakalarda kopmaların daha çok dik ve doğrusal olarak gerçekleştiği söylenebilmektedir.

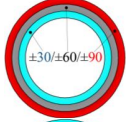
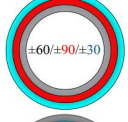
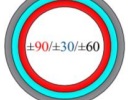


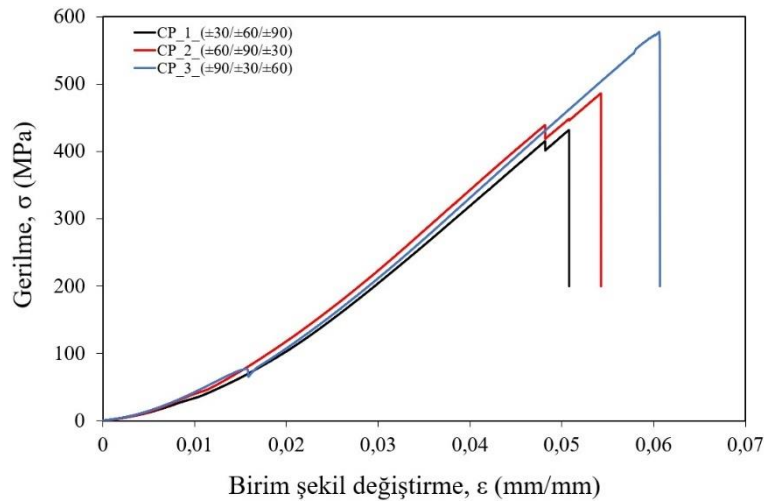
Şekil 5.7. CP\_3 numunesinde meydana gelen hasarlar

Çizelge 5.1 ve Şekil 5.8’de halka çekme deneylerinden elde edilen verilerin karşılaştırmaları görülmektedir. Şekil 5.8’de karşılaştırmalı olarak verilen grafikler her bir boru tipini en uygun temsil eden deney verilerinden seçilmiştir. Çizelge 5.1’de verilen değerler, üç tekrarlı yapılan deney sonuçlarının ortalaması alınarak standart sapmaları hesaplanmıştır. Çizelge 5.1 ve Şekil 5.8 birlikte incelendiğinde; üretilen kompozit borular aynı sarım açılarında olsa da tabakaların istifleme sıralarının değişimi mekanik özellikleri önemli derecede etkilediği görülmektedir (Gemi ve ark., 2017; Gemi ve ark., 2020;). Filaman sarım kompozit boruların tasarımında kullanılan açısal konfigürasyonlar yaygın olarak kullanılırken, farklı açılarda tasarlanan tabakaların boru et kalınlığının içerisinde konumlanmasının mukavemet değerlerini etkilediği anlaşılmaktadır (Gemi, 2018; Maziz ve ark., 2021a; Maziz ve ark., 2021b). Halka çekme deneylerinde yükleme durumları ve gerilmelerin kesit içerisinde tabaka dağılımları dikkate alınarak sonuçlar incelendiğinde,  $\pm 90^\circ$  sarım açılı tabakanın konumlanması kompozit borunun mukavemet değişiminde baskın olduğunu göstermiştir.  $\pm 90^\circ$  sarım açılı tabakanın borunun iç kısmında

konumlanmasıyla yükleme esnasında yükü taşıyan ilk tabaka olmuştur. Bu tabakanın üstünde konumlanan  $\pm 30^\circ$  ve  $\pm 60^\circ$  sarım açılı tabakalar yük taşımaya destek olarak yük taşıma kapasitesi artışına katkı sağlamıştır. Bundan dolayı  $\pm 90^\circ/\pm 30^\circ/\pm 60^\circ$  istifleme sırasında üretilen CP\_3 numunesi 372 MPa gibi yüksek bir gerilme değerine ulaşmıştır.  $\pm 30^\circ/\pm 60^\circ/\pm 90^\circ$  istifleme sırasında üretilen kompozit borularda  $\pm 30^\circ$  ve  $\pm 60^\circ$  tabakaların borunun iç kısmında istiflenmesi açılı konfigürasyonundan kaynaklı olarak yük taşıma açısından  $\pm 90^\circ$  tabakaya destek olamamıştır.  $\pm 90^\circ$  tabakanın kompozit borunun dışında istiflenmesi diğer tabakaların yük taşımaya müsaade etmemiş ve CP\_1 numunesinde 284 MPa gibi düşük bir gerilme değeri elde edilmiştir. Ayrıca  $\pm 90^\circ$  tabakanın dışta konumlanması kompozit borunun dış çapına tekabül etmesi yani çap büyümesinden kaynaklı alan artışından gerilmenin düşmesine sebep olduğu da düşünülmelidir.

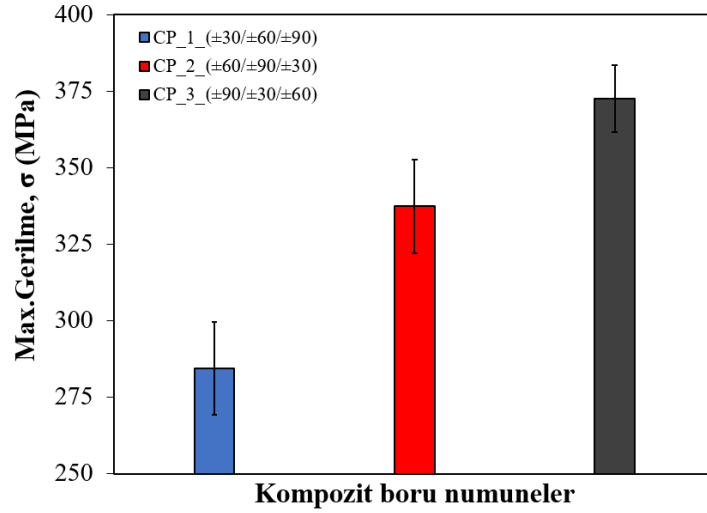
**Çizelge 5.1.** Çekme deneyi sonucu elde edilen mekanik özellik verileri

Test numuneleri	Mekanik Özellikler		
	Maksimum gerilme (MPa)	Kopma uzaması (%)	Statik tokluk (kJ/m <sup>3</sup> )
	284.36±15.16	5.04±0.21	5977±909
	337.42±15.25	5.62±0.19	7760±656
	372±10.95	6.29±0.43	9316±778



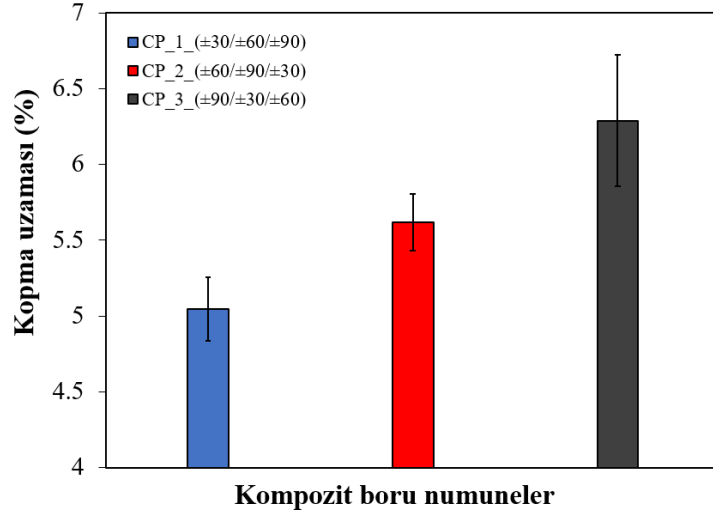
**Şekil 5.8.** Numunelerin birim şekil değiştirme kıyasları

Şekil 5.9'daki maksimum gerilme grafiği incelendiğinde en yüksek gerilmeye dayanan numunenin CP\_3 olduğu görülmektedir. Bu durum, numunenin en iç katmanında 90° yönlü elyaf sarılı olmasıyla bağlantılıdır. Test cihazında uygulanan ilk kuvvet numunenin en iç tabakasından başladığı için en iç tabakada 30° ve 60° sarımlı CP\_1 ve CP\_2 numunesinde elde edilen gerilme değerleri CP\_3 numunesine göre daha düşük kalmıştır.



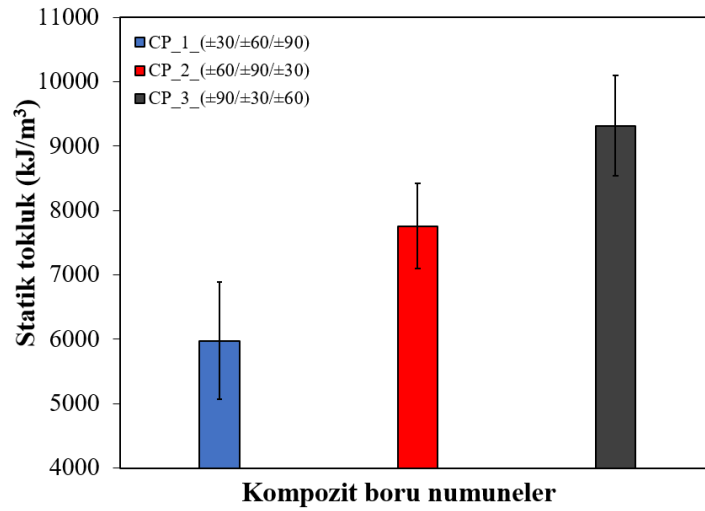
Şekil 5.9. Numunelerde oluşan maksimum gerilmeler

Şekil 5.10'daki kopma uzaması grafiği incelendiğinde en düşük uzamaya sahip numunenin CP\_1 numunesi olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu numunenin en kırılgan numune olduğu söylenebilir. En çok uzama gösteren numune ise CP\_3 numunesi olmuştur. Bu durumun, 90° yönelimli elyaf tabakasının en iç katmana yakınlığıyla ilgili olduğu söylenebilir.



Şekil 5.10. Numunelerin kopma uzamaları

Şekil 5.11'deki tokluk grafiğine bakıldığında en tok numunenin CP\_3 olduğu görülmektedir. Bu, yine  $90^\circ$  yönlü elyafların en iç tabakada sarılı olmasıyla ilişkilidir. Numune daha fazla şekil değişimine uğradığı ve daha fazla gerilmeye dayanabildiği için tokluğu en yüksek olan numune olmuştur.  $30^\circ$  yönlü elyafların en iç katmanda sarılı olduğu CP\_1 numunesi ise CP\_3 numunesi ile bir zıtlık içermektedir.



Şekil 5.11. Numunelerin toklukları

## 5.2. Delme Deneyleri

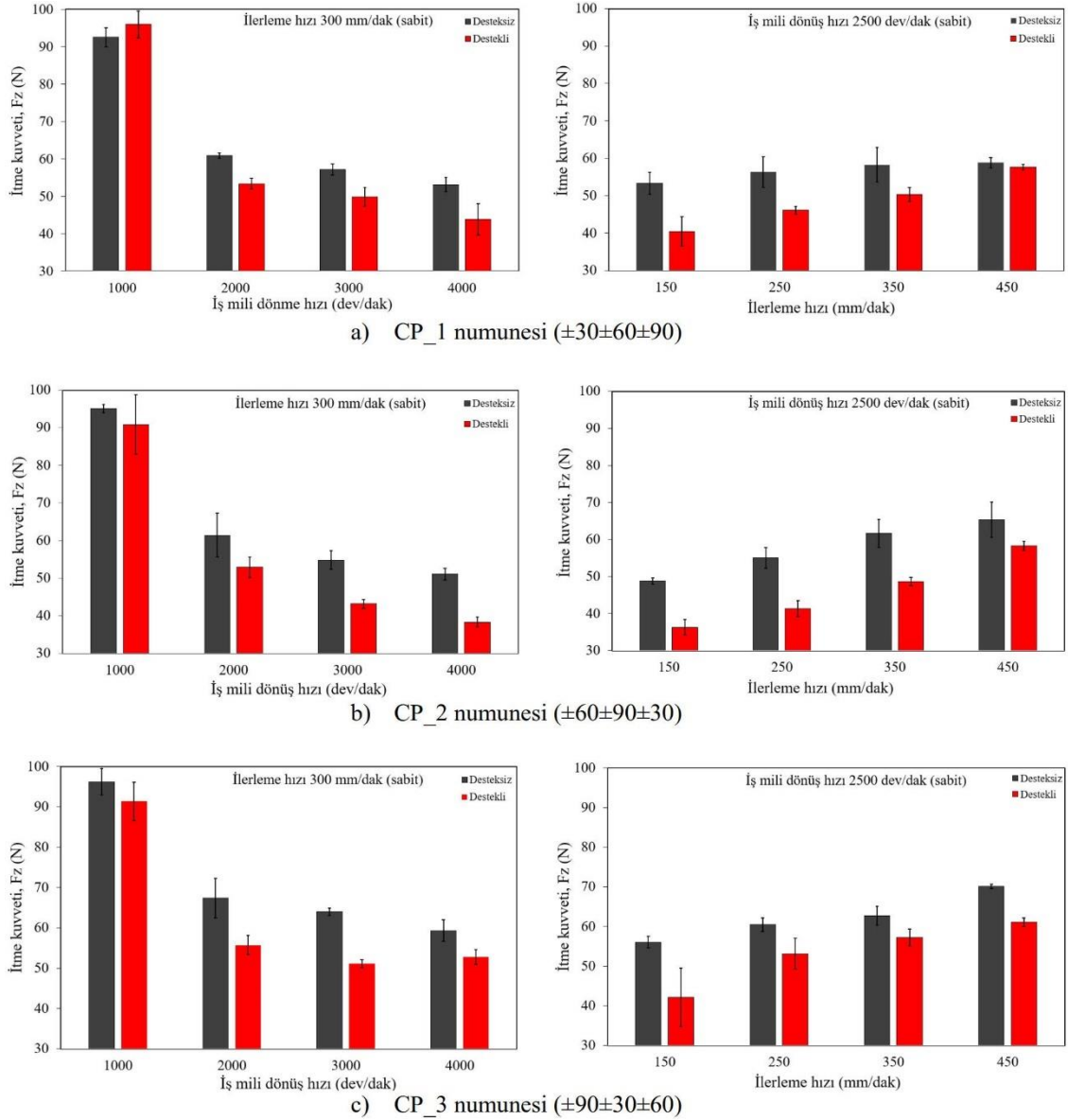
Çizelge 5.2'de işlenebilirlik parametrelerine göre elde edilen veriler ile giriş ve çıkış delaminasyon faktörlerinin hesaplanmış sayısal değerleri toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 5.2. İşlenebilirlik parametreleri sonucu elde edilen veriler

İşlenebilirlik deney sonuçları								
Numune	Kesme parametreleri		Kesme durumu	Elde edilen değerler				
	İş mili dönme hızı (dev/dk)	İlerleme hızı (mm/dk)		İtme kuvveti, Fz (N)	Moment (tork) (Nm)	Delaminasyon, Fd		
						Giriş	Çıkış	
CP_1	1000	300	DESTEKSİZ	92.50±2.54	0.36±0.27	1.43±0.03	1.59±0.23	
	2000			60.88±0.75	0.28±0.02	1.15±0.05	1.45±0.16	
	3000			57.16±1.41	0.31±0.07	1.19±0.13	1.61±0.20	
	4000			53.11±1.97	0.23±0.03	1.18±0.25	1.34±0.11	
	2500			150	53.35±2.93	0.44±0.12	1.11±0.06	1.24±0.04
				250	56.36±4.06	0.41±0.07	1.21±0.13	1.54±0.18
		350	58.28±4.65	0.37±0.05	1.18±0.05	1.33±0.13		
		450	58.86±1.33	0.35±0.03	1.37±0.19	1.65±0.25		
	CP_2	1000	300	DESTEKLİ	95.98±3.58	0.65±0.16	1.50±0.12	1.20±0.08
		2000			53.37±1.41	0.29±0.01	1.09±0.03	1.17±0.05
		3000			49.85±2.47	0.26±0.11	1.06±0.03	1.14±0.03
		4000			43.88±4.17	0.23±0.06	1.18±0.07	1.15±0.02
2500		150	40.49±3.94	0.40±0.11	1.27±0.15	1.08±0.001		
		250	46.12±1.09	0.25±0.02	1.07±0.05	1.14±0.07		
		350	50.37±1.91	0.26±0.02	1.28±0.29	1.16±0.03		
		450	57.64±0.70	0.29±0.02	1.24±0.13	1.20±0.09		
CP_3	1000	300	DESTEKSİZ	95.07±1.06	0.53±0.18	1.85±0.07	1.92±0.36	
	2000			61.44±5.88	0.36±0.04	1.51±0.31	1.43±0.12	
	3000			54.80±2.47	0.28±0.04	1.42±0.27	1.56±0.22	
	4000			51.12±1.57	0.39±0.05	1.27±0.22	1.33±0.16	
	2500			150	48.82±0.88	0.27±0.08	1.06±0.0001	1.28±0.18
				250	55.02±2.77	0.28±0.05	1.10±0.04	1.36±0.18
		350	61.63±3.81	0.43±0.02	1.11±0.03	1.61±0.13		
		450	65.33±4.71	0.44±0.14	1.34±0.38	1.47±0.14		
	CP_3	1000	300	DESTEKLİ	90.84±7.88	0.56±0.09	1.28±0.06	1.18±0.04
		2000			52.92±2.72	0.24±0.03	1.16±0.07	1.12±0.02
		3000			43.18±1.21	0.20±0.004	1.25±0.20	1.12±0.06
		4000			38.37±1.36	0.20±0.08	1.16±0.08	1.18±0.04
2500		150	36.30±2.09	0.39±0.12	1.08±0.06	1.10±0.02		
		250	41.38±2.15	0.21±0.03	1.10±0.02	1.15±0.04		
		350	48.68±1.07	0.25±0.03	1.13±0.03	1.21±0.06		
		450	58.28±1.21	0.29±0.06	1.31±0.11	1.30±0.08		
CP_3		1000	300	DESTEKSİZ	96.20±3.29	0.39±0.21	1.44±0.27	1.84±0.02
		2000			67.38±4.85	0.34±0.05	1.24±0.08	1.48±0.21
		3000			64.00±0.95	0.39±0.08	1.58±0.69	1.31±0.14
		4000			59.34±2.71	0.32±0.02	1.07±0.05	1.36±0.14
	2500	150			56.09±1.49	0.43±0.06	1.25±0.23	1.25±0.14
		250			60.49±1.70	0.54±0.21	1.28±0.12	1.33±0.01
		350	62.68±2.37	0.29±0.01	1.22±0.12	1.52±0.11		
		450	70.14±0.50	0.33±0.02	1.23±0.16	1.50±0.07		
	CP_3	1000	300	DESTEKLİ	91.35±4.82	0.50±0.13	1.72±0.30	1.33±0.20
		2000			55.77±2.30	0.29±0.03	1.12±0.01	1.16±0.02
		3000			51.09±0.96	0.22±0.02	1.07±0.02	1.15±0.02
		4000			52.79±1.83	0.37±0.16	1.07±0.01	1.14±0.04
2500		150	42.15±7.35	0.50±0.25	1.28±0.20	1.11±0.02		
		250	53.16±3.91	0.32±0.10	1.18±0.18	1.15±0.03		
		350	57.25±2.18	0.29±0.02	1.16±0.06	1.18±0.04		
		450	61.08±1.12	0.34±0.05	1.22±0.09	1.28±0.15		

### 5.2.1. İş mili dönüş ve ilerleme hızlarına göre oluşan itme kuvvetleri

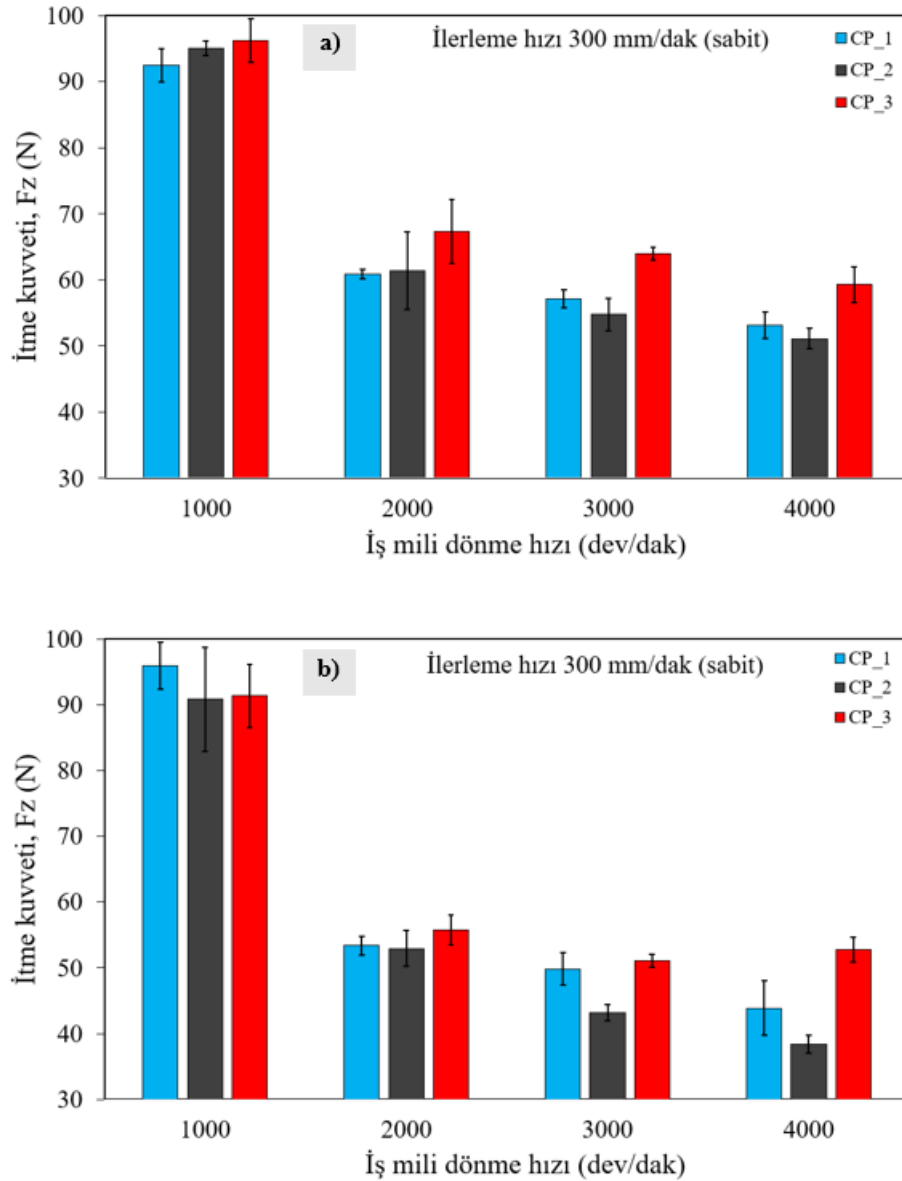
Destekli ve desteksiz delme işlemlerinde, ilerleme ve iş mili dönüş hızlarına göre numunelerde oluşan itme kuvvetlerinin değişimleri Şekil 5.12’de karşılaştırılmalı olarak grafik şeklinde verilmiştir. CP\_1, CP\_2 ve CP\_3 numuneleri incelendiğinde hem destekli hem de desteksiz delme işlemlerinde iş mili dönüş hızlarına göre oluşan itme kuvvetlerine bakıldığında 1000 dev/dk’da en yüksek itme kuvvetlerinin oluştuğu, iş mili dönme hızının 2000 dev/dk’ya çıkmasıyla itme kuvvetlerinde çok ciddi bir azalmanın olduğu ve bu dönme hızından sonra 4000 dev/dk işmili dönme hızına kadar itme kuvvetlerinin lineer bir şekilde azaldığı görülmektedir (Şekil 5.12abc). 1000 dev/dk’nın delme işlemleri için kritik bir hız olduğu söylenilebilir. İş mili dönme hızlarının artmasıyla itme kuvvetlerinde meydana gelen azalma, kesici takım-ış parçası arayüzü arasındaki temas alanının ve özgül kesme enerjisinin azalması ile ilgilidir. Destekli delme işlemlerinde bütün numunelerde ve genel olarak bütün kesme parametrelerinde itme kuvvetleri desteksiz delinen numunelerde oluşan itme kuvvetlerinden daha düşük miktarlarda ölçülmüştür. Bazalt elyaf kullanılarak üretilen kompozit boru numunelerin delinme işlemlerinde destek kullanımı işlenebilirlik açısından pozitif bir etki yapmıştır. Bununla beraber ilerleme hızlarına bağlı olarak bütün numunelerde deneylerde kullanılan en düşük ilerleme hızında (150 mm/dk) en düşük itme kuvvetleri oluşurken ilerleme hızının artması ile itme kuvvetlerinin de buna paralel olarak arttığı görülmüştür (Şekil 5.12abc). İlerleme hızlarının artmasıyla itme kuvvetlerinde meydana gelen artışın, kesilmemiş talaş kalınlığına ve kesme bölgesinde kayma alanına bağlı olduğu düşünülmektedir. İlerleme hızlarına bağlı olarak, yine farklı kesme hızlarında delme işlemlerinde olduğu gibi destekli delinen numunelerde oluşan itme kuvvetleri desteksiz delinen numunelerde oluşan itme kuvvetlerinden düşük çıkmıştır.



Şekil 5.12. İş mili dönüş ve ilerleme hızlarına göre meydana gelen itme kuvvetleri  
a) CP\_1 b) CP\_2 c) CP\_3

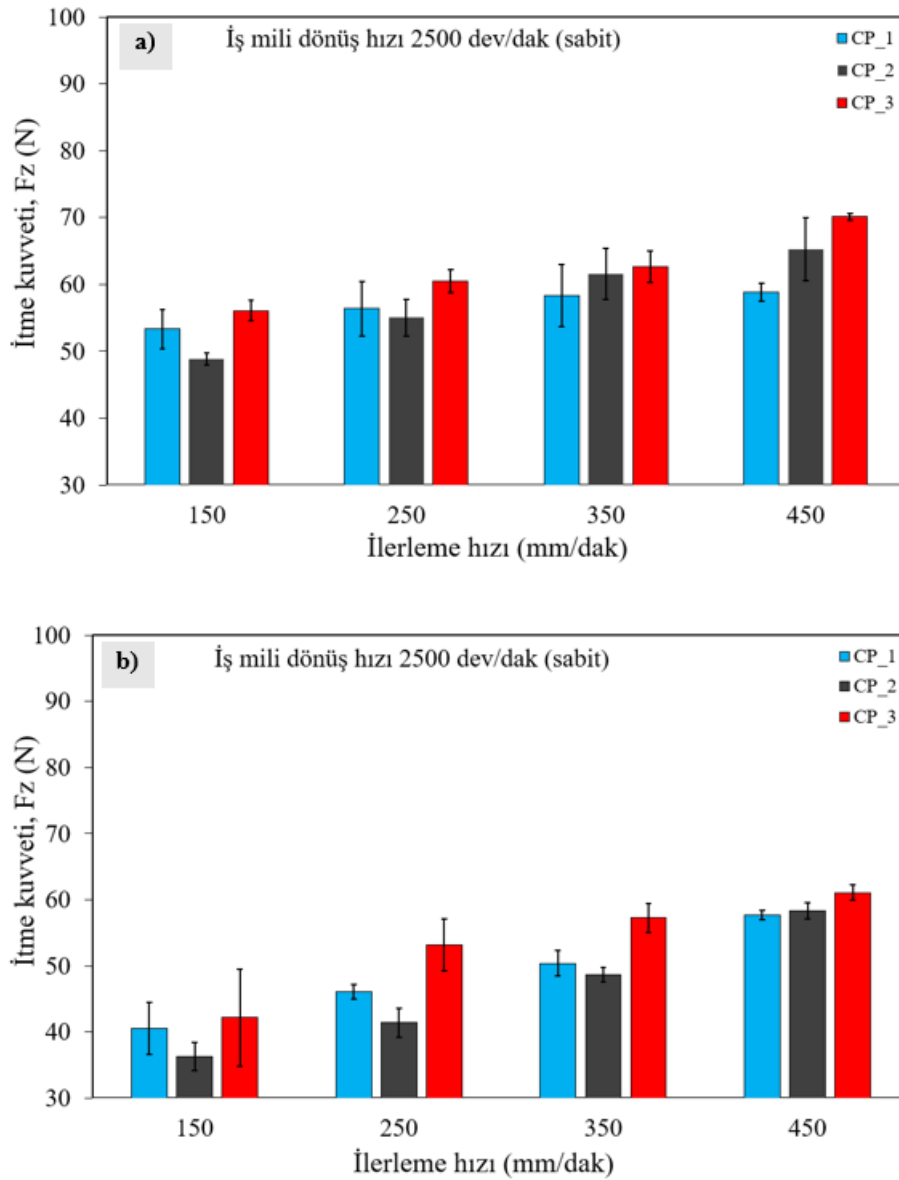
Şekil 5.13'te deneylerde kullanılan üç farklı numunenin farklı iş mili dönme hızlarına göre destekli ve desteksiz delme işlemi esnasında ölçülen itme kuvvetlerinin karşılaştırmalı grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde, CP\_3 numunesinin hem destekli hemde desteksiz delinmesinde oluşan itme kuvvetlerinin diğer numunelere göre daha yüksek çıktığı görülmektedir. Desteksiz delme işlemlerinde, CP\_1 ve CP\_2 numunelerinde ise çok bariz bir fark olmamasına rağmen deneylerde düşük iş mili dönme hızlarında (1000-2000 dev/dk) CP\_2 numunesinde itme kuvvetleri bir miktar yüksek ölçülmüş, iş mili dönme hızı arttıkça (3000-4000 dev/dk) CP\_1 numunesinde itme kuvvetlerinin CP\_2 numunesinden yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 5.13a). Bununla

birlikte destekli delme işlemlerinde, CP\_1 numunesinde oluşan itme kuvvetlerinin her kesme parametresi için CP\_2 numunesinden yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 5.13b).



**Şekil 5.13.** İş mili dönüş hızlarına göre numunelerde oluşan itme kuvvetleri a) desteksiz b) destekli

Şekil 5.14'te deneylerde kullanılan üç farklı numunenin farklı kesme ilerleme hızlarına göre destekli ve desteksiz delme işlemi esnasında ölçülen itme kuvvetlerinin karşılaştırmalı grafiği verilmiştir. İlerleme hızlarına göre üç farklı numune karşılaştırıldığında, destekli ve desteksiz delmede ve genel olarak bütün kesme parametrelerinde CP\_3 numunesinin delinmesi esnasında oluşan itme kuvvetleri yine diğer numunelerden yüksek miktarlarda oluşmuşken, en düşük itme kuvvetleri CP\_2 numunesinden elde edilmiştir (Şekil 5.14ab).



**Şekil 5.14.** İlerleme hızlarına göre numunelerde oluşan itme kuvvetleri a) desteksiz b) destekli

Numunelerin delinmesi esnasında kesme parametreleri ve destek kullanımı, işlenebilirlik açısından önemli bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte yapılan çalışma göstermiştir ki, kompozit boru imalatında elyaf sarım açılarına göre yapılan istifleme sırası da işlenebilirlik açısından büyük bir önem arz etmektedir.  $90^\circ$  sarım açılı tabakanın en iç tabakada olması işlenebilirliği itme kuvvetleri açısından olumsuz yönde etkilemektedir.  $90^\circ$  sarım açısının kompozit borunun işlenebilirliğinde belirleyici bir faktör olduğu söylenilebilir.  $90^\circ$  sarım açısının dış tabakalara doğru istiflenmesi işlenebilirliği itme kuvvetleri açısından olumlu yönde etkilemektedir.

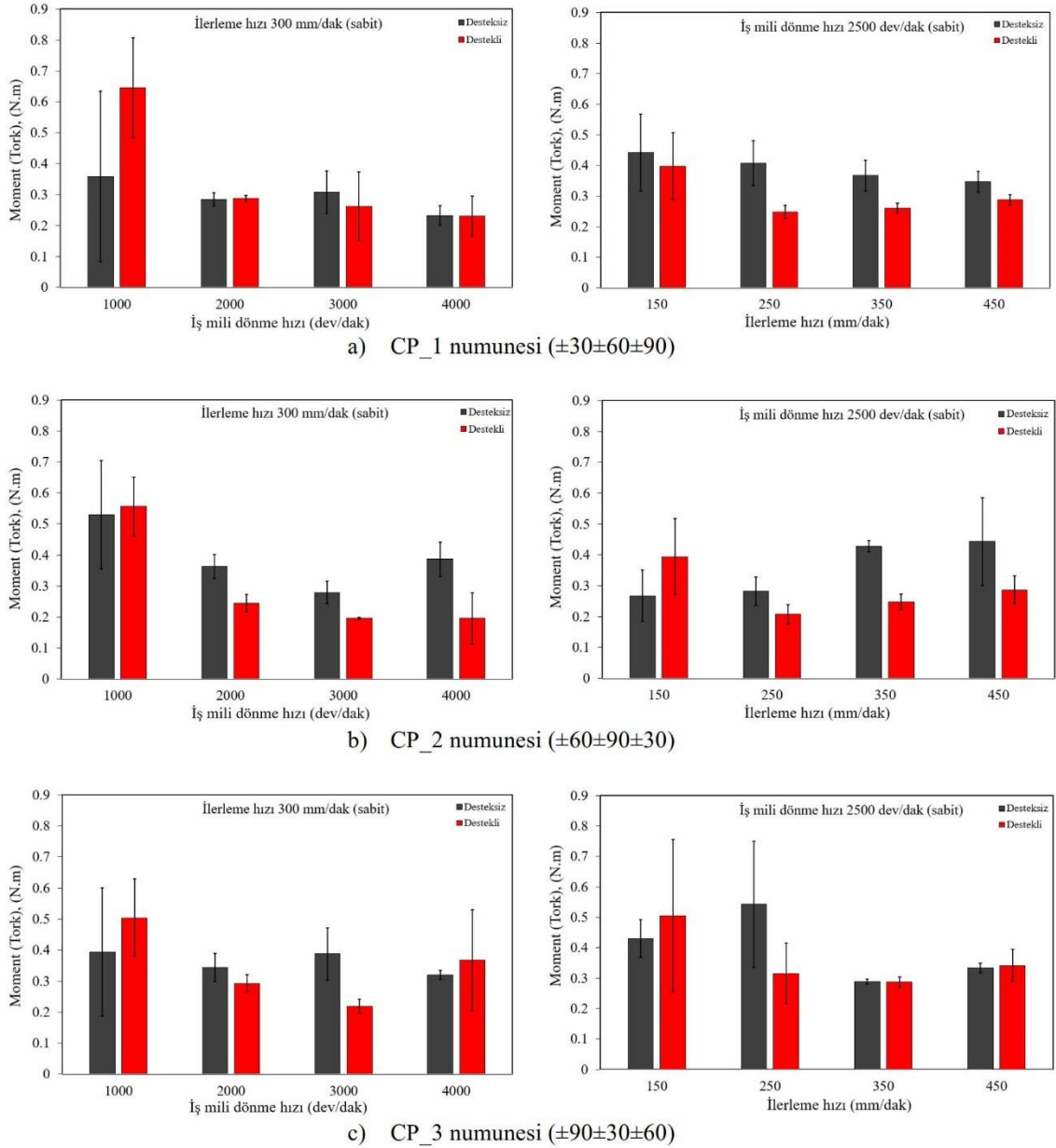
### 5.2.2. İş mili dönüş ve ilerleme hızlarına göre oluşan momentler

Kompozit malzemelerin delme işleminde oluşan moment delme esnasında oluşan ısıdan kaynaklı matris yumuşamasına, titreşimlere, kesilmemiş elyaf yoğunluğuna, elyaf konumlanmasına ve delik içerisinde kesilmiş elyafların sıkışmasına bağlı olarak değişmektedir.

Şekil 5.15'te 5.16'da ve 5.17'de iş mili dönme ve ilerleme hızlarına göre numunelerde oluşan destekli ve desteksiz torklar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 5.15a CP\_1'e bakıldığında 1000 dev/dk ve 2000 dev/dk'da destekli delinen numunede oluşan torkun desteksiz delinen numuneden büyük olduğu görülmektedir. 3000 dev/dk ve 4000 dev/dk devirler için ise desteksiz delinen numunelerde oluşan torklar, destekli delinen numunelerde oluşan torklardan daha yüksek çıkmıştır. CP\_1 numunesine bakıldığında desteksiz delme işlemi sonucu oluşan torkların, destekli delme işlemi sonucu oluşan torklardan tüm ilerleme hızlarında daha yüksek olduğu görülmektedir. 250 mm/dk ilerleme hızı için oluşan torkların farkının daha fazla olduğu sonucuna varılabilmektedir.

Şekil 5.15b'deki CP\_2 numunesi incelendiğinde ise 1000 dev/dk'da destekli delinen numunede oluşan torkun desteksiz delinen numunede oluşan torktan büyük olduğu ancak aradaki farkın çok olmadığı görülür. Diğer devirlerde oluşan torklar için ise bu durum geçerli değildir. Bu devirlerde desteksiz delinen numunede oluşan torkların, destekli delinen numunede oluşan torklardan daha küçük çıktığı görülmektedir. CP\_2 numunesi için de CP\_1 numunesi için geçerli olan yorum yapılabilmektedir; ancak 150 mm/dk ilerleme hızı için bunun geçersiz olduğu görülmektedir. 150 mm/dk ilerleme hızı için destekli delme işlemi sonucu oluşan torkun desteksiz delme işlemi sonucu oluşan torktan daha yüksek olduğu görülmekteyken, 350 mm/dk ilerleme hızında oluşan torkların farkının en yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 5.15c incelendiğinde ise CP\_3 numunesi tork farklarının daha belirgin olduğu numune olarak göz çarpmaktadır. 1000 dev/dk ve 4000 dev/dk için destekli delinen numunede oluşan torklar desteksiz delinen numunede oluşan torklardan daha yüksek çıkmışken, diğer iki iş mili dönüş hızı için bu durum tersine dönmektedir. CP\_3 numunesi ise diğer numunelerden ayrılmaktadır. 250 mm/dk ve 350 mm/dk ilerleme hızlarında desteksiz delinen numunede oluşan torklarda destekli numunede oluşan torklardan daha yüksekken, diğer iki ilerleme hızı için tam tersi durum geçerli görülmektedir. 150 mm/dk ilerleme hızında destekli numunede oluşan tork standart sapmasının çok yüksek olduğu da bu grafikten anlaşılabilmektedir.

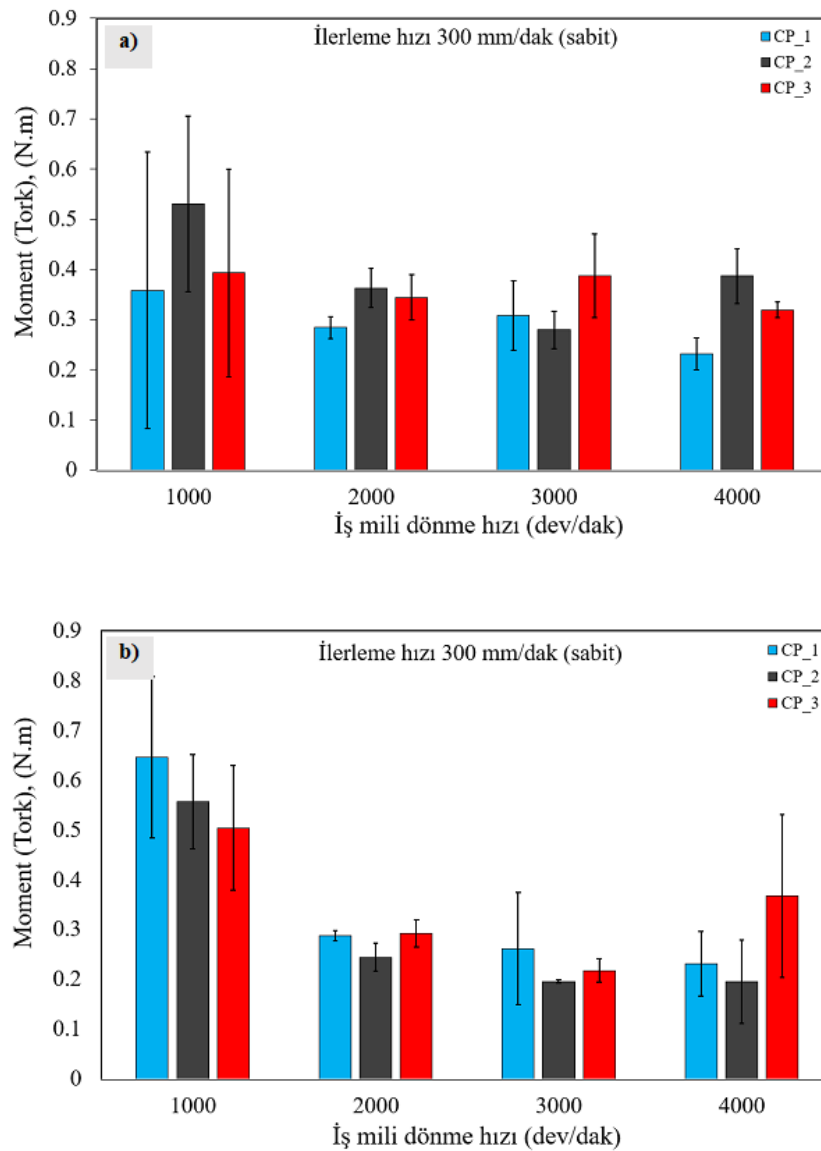


**Şekil 5.15.** İş mili dönüş ve ilerleme hızlarına göre meydana gelen momentler  
a) CP\_1 b) CP\_2 c) CP\_3

Şekil 5.16'da iş mili dönüş hızlarına göre oluşan momentler görülmektedir. Şekil 5.16a grafiğine bakıldığında CP\_1 numunesinin iş mili dönme hızının değişimine bağlı olarak değerlerde çok fazla bir değişimin olmadığı ve hız artışına bağlı olarak da kararsız bir artış ve azalışın meydana geldiği görülmüştür. CP\_2 numunesi incelendiğinde 1000 dev/dk'da en yüksek torkun ölçüldüğü, 3000 dev/dk'ya kadar torkun lineer bir düşüş eğiliminde olduğu ve bu devirden sonra tork değerinin arttığı görülmüştür. Bunun da muhtemel sebebinin iş mili dönme hızı arttıkça ısının artmasına bağlı olarak matrisin yumuşaması olduğu düşünülmektedir. 3000 dev/dk'dan sonra da torkta meydana gelen artış delme esnasında oluşan titreşimlere bağlanmaktadır. CP\_3 numunesinde ise yine

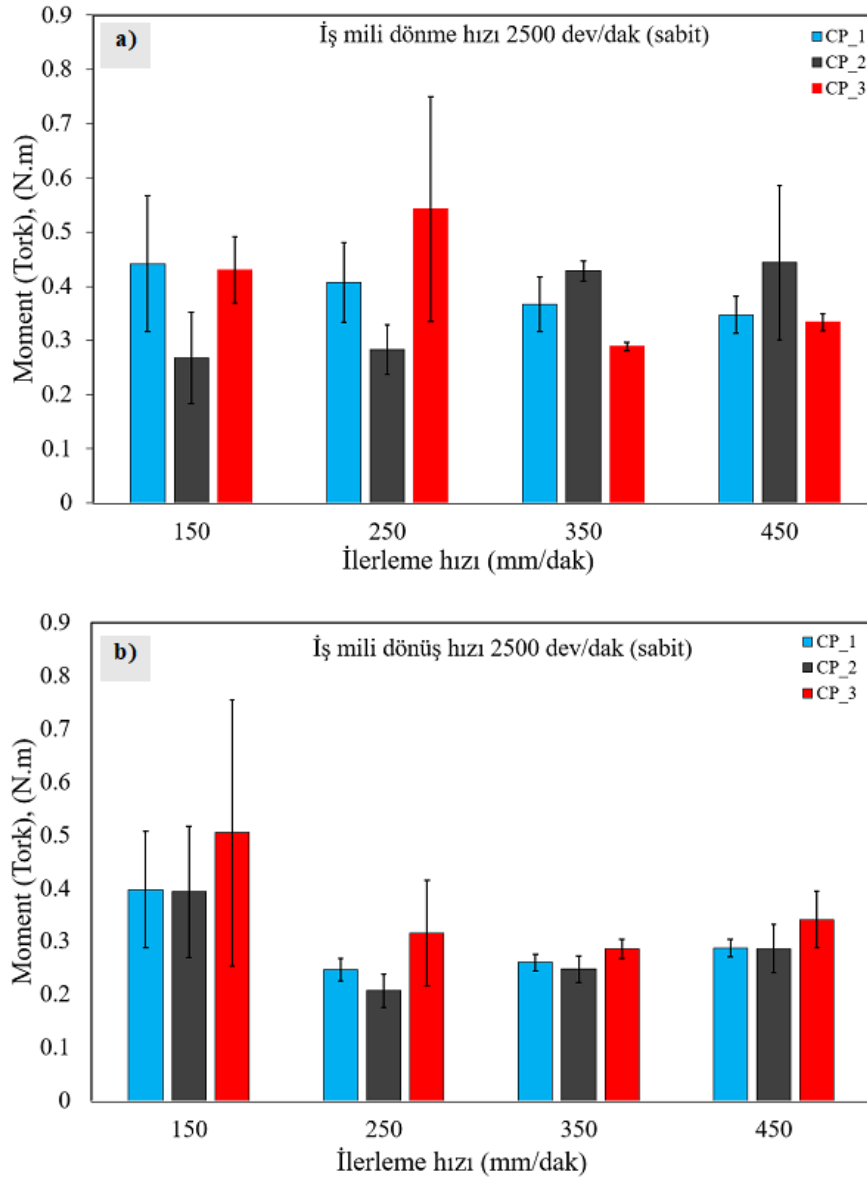
tork değerlerindeki değişimin çok az miktarda gerçekleştiği ve CP\_1 numunesinde olduğu gibi kararsız davranış sergilediği görülmüştür. Buradan, elyaf konfigürasyonunun delme esnasında oluşan torka etkili olduğu görülmüştür.

Şekil 5.16b incelendiğinde ise destekli numunelerde en düşük iş mili dönüş hızında tork miktarlarının yüksek olduğu, iş mili dönüş hızı arttıkça tork değerlerinin düştüğü görülmüştür. Bunun sebebi olarak; destekli numunelerde destekten kaynaklı daha rijit bir delme işleminin gerçekleşmesi, kesilmemiş elyaf yoğunluğunun bu numunelerde daha az oluşması düşünülmektedir. Genel olarak destekli ve desteksiz numuneler karşılaştırıldığında destekli numunelerde daha az tork oluştuğu görülmektedir.



**Şekil 5.16.** İş mili dönüş hızlarına göre numunelerde oluşan momentler a) desteksiz b) destekli

Şekil 5.17’de ilerleme hızlarına bağlı olarak oluşan momentler görülmektedir. Şekil 5.17a’daki delme esnasında oluşan moment değerleri incelendiğinde, CP\_1 numunesinde düşük miktarda lineer bir düşüş görülürken CP\_2 numunesinde ise lineer bir artış olduğu görülmektedir. İlerleme hızı arttıkça delme işlemi esnasında oluşan talaş hacminin artması, tork değerlerinin artışına sebep olmuştur. CP\_3 numunesinde ise ilerleme hızına bağlı olarak kararsız bir artış ve azalış olması dikkat çekicidir. Yine iş mili dönme hızında olduğu gibi ilerleme hızındaki değişime göre de destekli numunelerde oluşan tork, desteksiz numunelerde oluşan torktan daha düşük çıkmıştır.









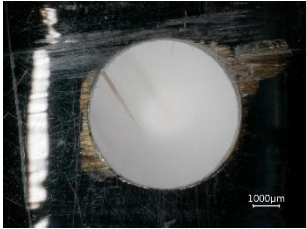
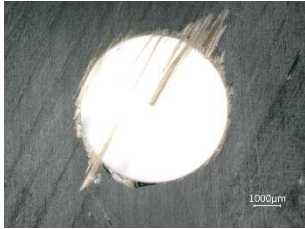
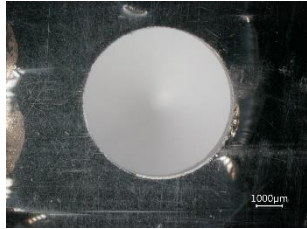
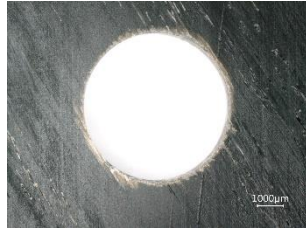
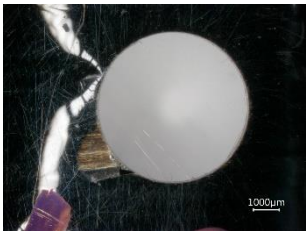

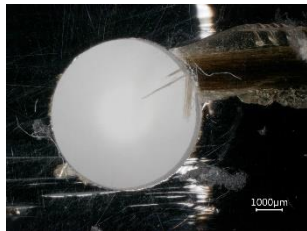
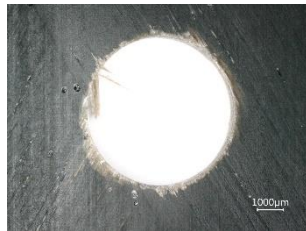


Şekil 5.17. İlerleme hızlarına göre numunelerde oluşan momentler a) desteksiz b) destekli









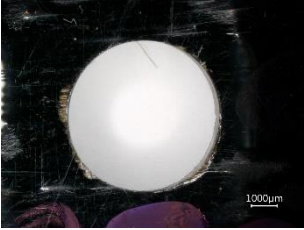

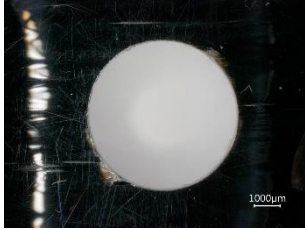



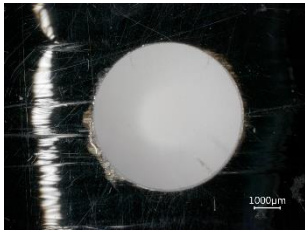

### 5.2.3. Delaminasyon hasarları ve faktörleri

Çizelge 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 ve 5.8’de delme işlemi sonrası elde edilen hasar görüntülerine yer verilmiştir. Bu görüntüler aracılığıyla delaminasyon faktörleri hesaplanmış olup hasar yorumları yapılmıştır.



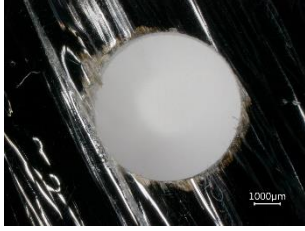










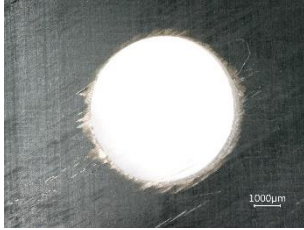


Çizelge 5.3. İş mili dönüş hızlarına göre delme sonucu CP\_1 numunesi giriş ve çıkış görüntüleri

DESTEKSİZ		DESTEKLİ	
GİRİŞ	ÇIKIŞ	GİRİŞ	ÇIKIŞ
			
1000 dev/dk – 300 mm/dk			
			
2000 dev/dk – 300 mm/dk			
			
3000 dev/dk – 300 mm/dk			
			
4000 dev/dk – 300 mm/dk			



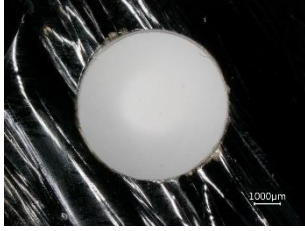
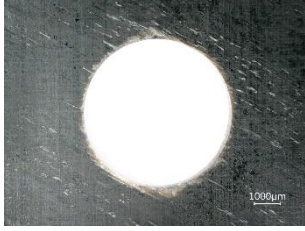







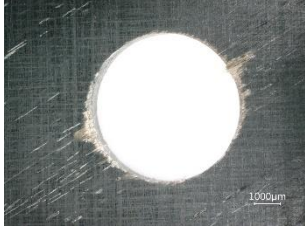




Çizelge 5.4. İlerleme hızlarına göre delme sonucu CP\_1 numunesi giriş ve çıkış görüntüleri

DESTEKSİZ		DESTEKLİ	
GİRİŞ	ÇIKIŞ	GİRİŞ	ÇIKIŞ
			
150 mm/dk – 2500 dev/dk			
			
250 mm/dk – 2500 dev/dk			
			
350 mm/dk – 2500 dev/dk			
			
450 mm/dk – 2500 dev/dk			



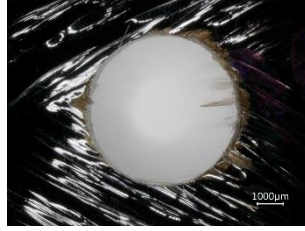

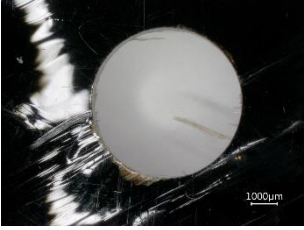











Çizelge 5.5. İş mili dönüş hızlarına göre delme sonucu CP\_2 numunesi giriş ve çıkış görüntüleri

DESTEKSİZ		DESTEKLİ	
GİRİŞ	ÇIKIŞ	GİRİŞ	ÇIKIŞ
			
1000 dev/dk – 300 mm/dk			
			
2000 dev/dk – 300 mm/dk			
			
3000 dev/dk – 300 mm/dk			
			
4000 dev/dk – 300 mm/dk			

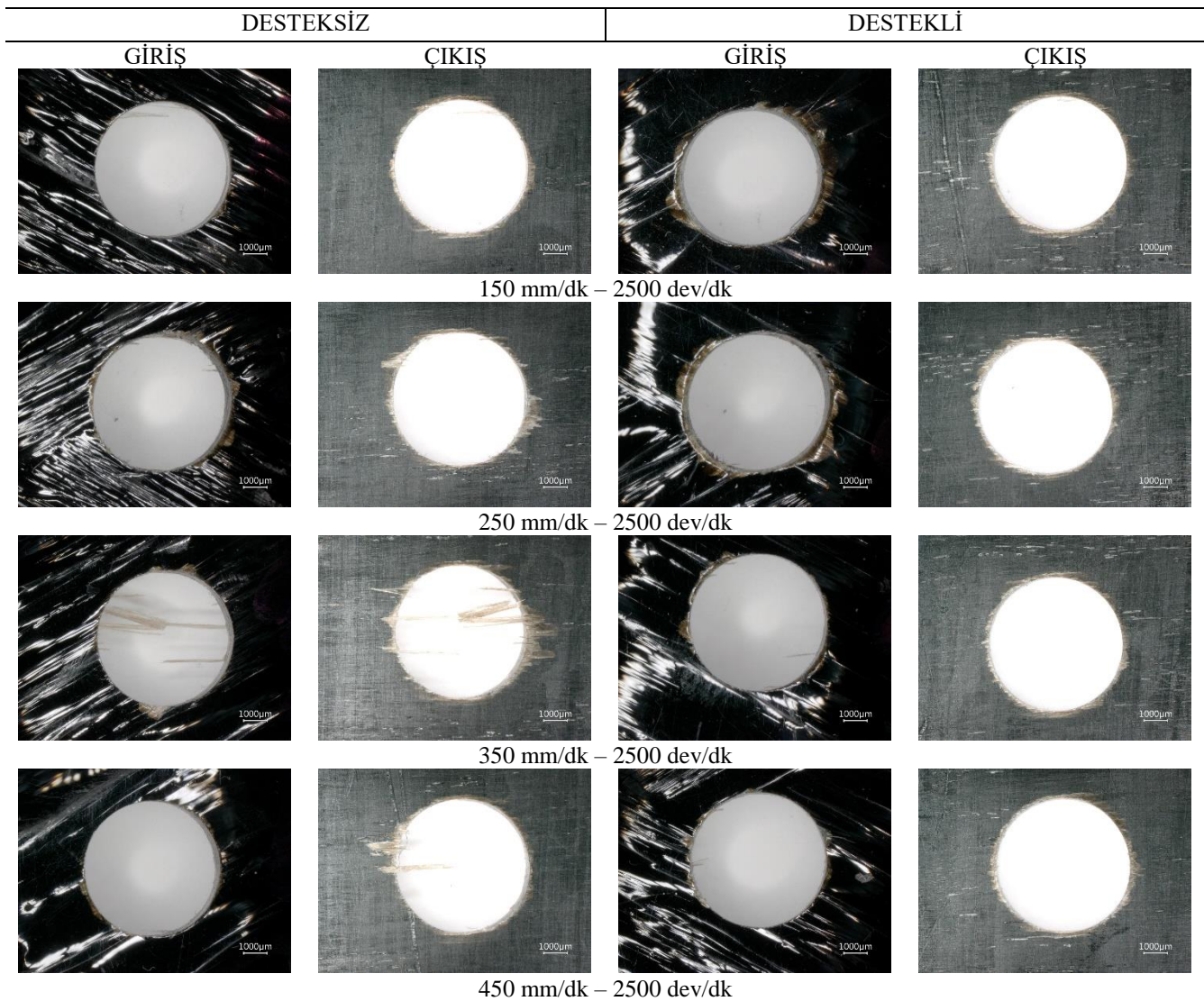
Çizelge 5.6. İlerleme hızlarına göre delme sonucu CP\_2 numunesi giriş ve çıkış görüntüleri

DESTEKSİZ		DESTEKLİ	
GİRİŞ	ÇIKIŞ	GİRİŞ	ÇIKIŞ
			
150 mm/dk – 2500 dev/dk			
			
250 mm/dk – 2500 dev/dk			
			
350 mm/dk – 2500 dev/dk			
			
450 mm/dk – 2500 dev/dk			

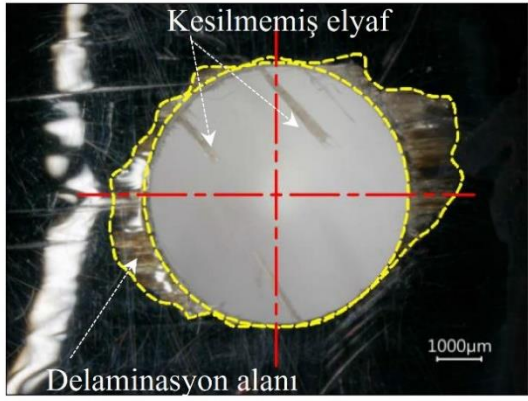
Çizelge 5.7. İş mili dönüş hızlarına göre delme sonucu CP\_3 numunesinde giriş ve çıkış görüntüleri

DESTEKSİZ		DESTEKLİ	
GİRİŞ	ÇIKIŞ	GİRİŞ	ÇIKIŞ
			
1000 dev/dk – 300 mm/dk			
			
2000 dev/dk – 300 mm/dk			
			
3000 dev/dk – 300 mm/dk			
			
4000 dev/dk – 300 mm/dk			

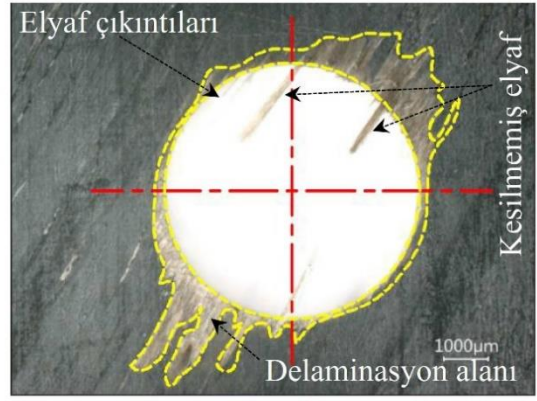
Çizelge 5.8. İlerleme hızlarına göre delme sonucu CP\_3 numunesi giriş ve çıkış görüntüleri



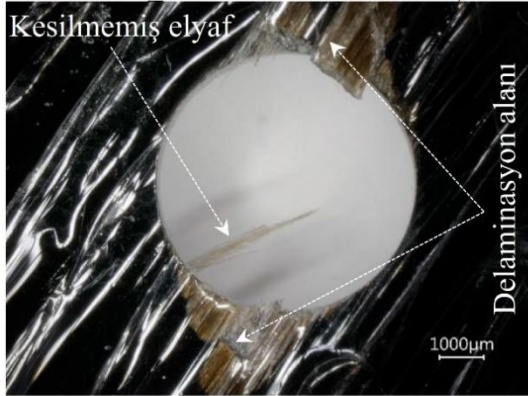
Şekil 5.18’de ve 5.19’da desteksiz ve destekli olarak delinen numunelerin delik giriş/çıkışında oluşan hasarların detayları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde genel olarak hasarların elyaf doğrultusu boyunca oluştuğu görülmektedir. Delik çıkışında oluşan hasarlar delik girişine nazaran daha yoğun bir şekilde oluşmaktadır. Delik çıkışlarında kesilmemiş elyaflar ve elyaf çıkıntısı hasarları oluşurken delik girişlerinde bu tarz hasarlara rastlanmamıştır. Delik girişlerinde ve delik çıkışlarında delaminasyon hasarları oluşurken, delik çıkışındaki delaminasyonun delik girişindeki delaminasyona kıyasla daha yoğun bir şekilde oluştuğu belirlenmiştir. Destek kullanılan numunelerde oluşan delaminasyon alanı desteksiz delinen numunelerde oluşan delaminasyon alanından daha küçüktür.



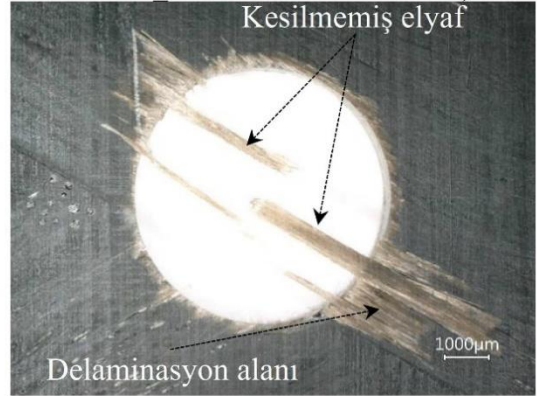
CP\_1- Delik girişi (iş mili dönme hızı:1000 dev/dk ilerleme hızı:300 mm/dk)



CP\_1- Delik çıkışı (iş mili dönme hızı:1000 dev/dk ilerleme hızı:300 mm/dk)



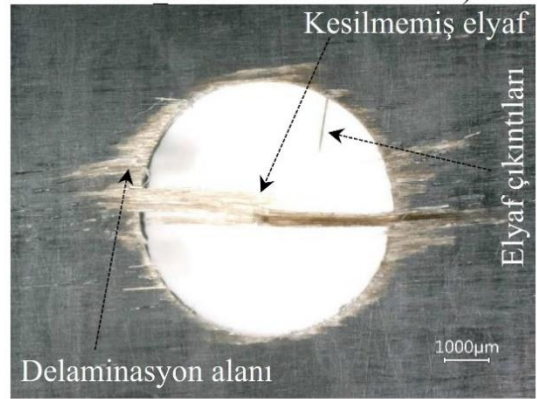
CP\_2- Delik girişi (iş mili dönme hızı:1000 dev/dk ilerleme hızı:300 mm/dk)



CP\_2- Delik çıkışı (iş mili dönme hızı:1000 dev/dk ilerleme hızı:300 mm/dk)

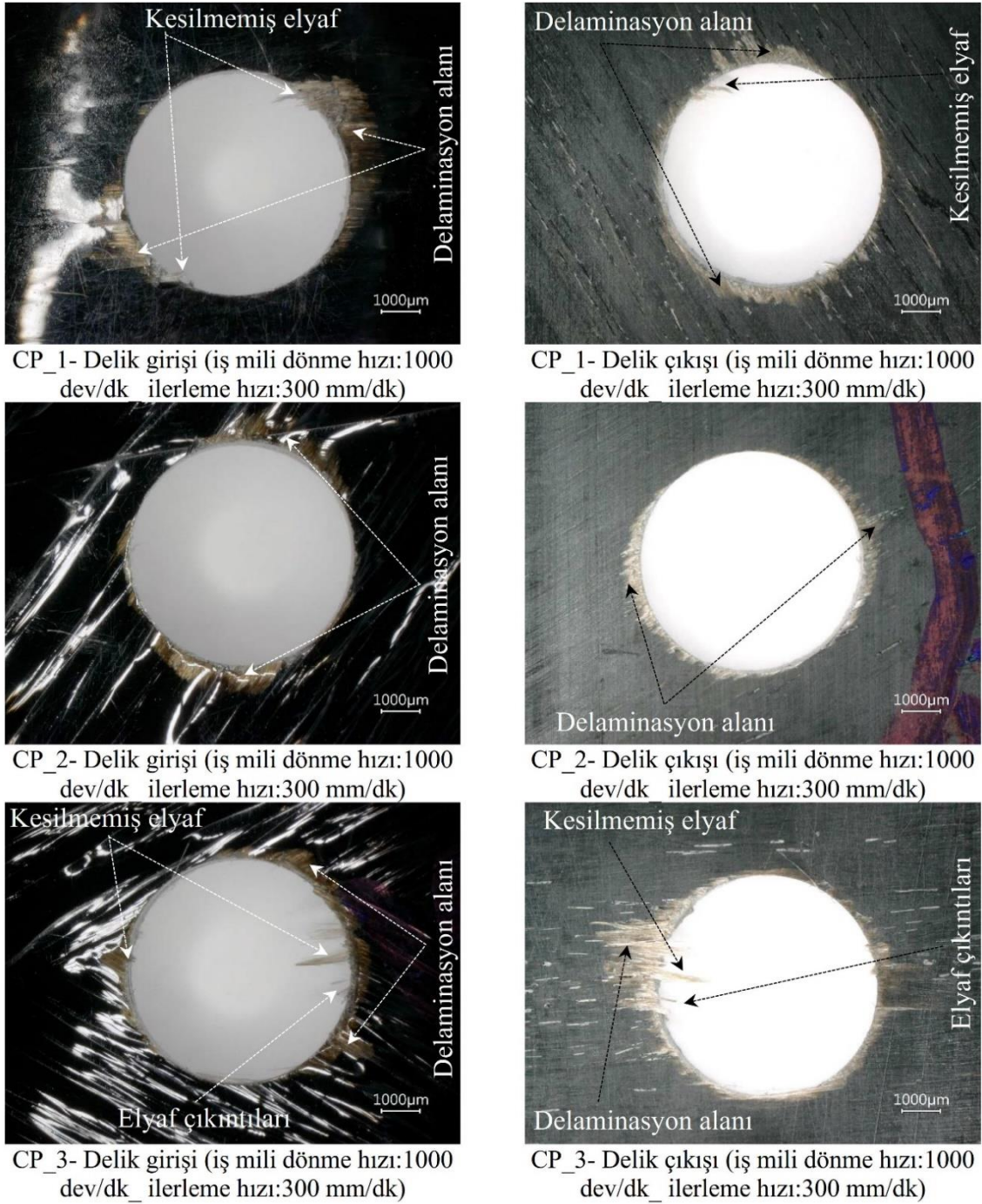


CP\_3- Delik girişi (iş mili dönme hızı:1000 dev/dk ilerleme hızı:300 mm/dk)



CP\_3- Delik çıkışı (iş mili dönme hızı:1000 dev/dk ilerleme hızı:300 mm/dk)

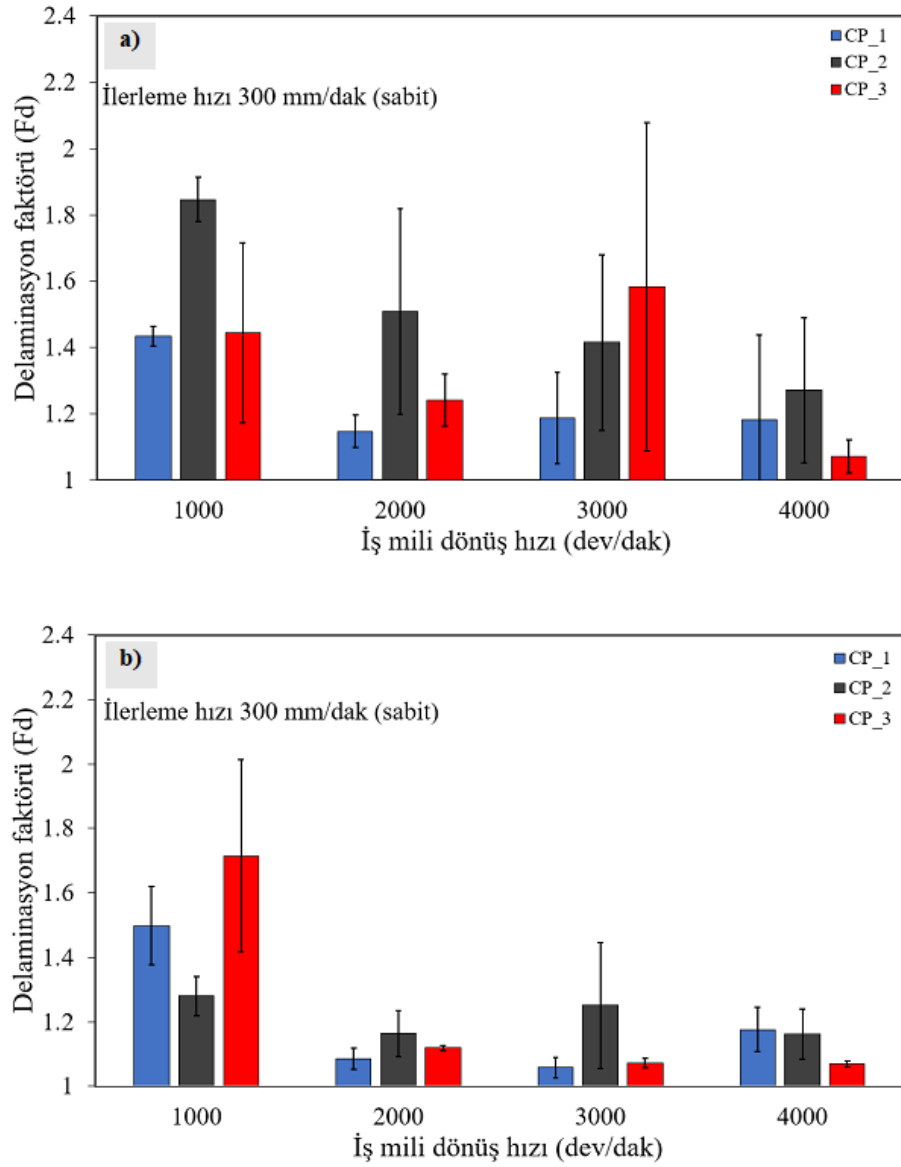
Şekil 5.18. Desteksiz delinen numunelerde delik giriş ve çıkış hasar detayları



**Şekil 5.19.** Destekli delinen numunelerde delik giriş ve çıkış hasar detayları

Şekil 5.20'de iş mili dönüş hızlarına göre giriş delaminasyonu görülmektedir. Şekil 5.20a incelendiğinde 3000 dev/dk hariç en yüksek giriş delaminasyon faktörünün desteksiz delinen CP\_2 numunesinde olduğu görülmektedir. Buradan en yüksek giriş delaminasyon hasarının bu numunede olduğu anlaşılmaktadır. 3000 dev/dk için ise giriş delaminasyon hasarının en yüksek olduğu numune desteksiz delinen CP\_3 numunesi olmuştur. Şekil 5.20b incelendiğinde en düşük iş mili dönüş hızında en fazla giriş

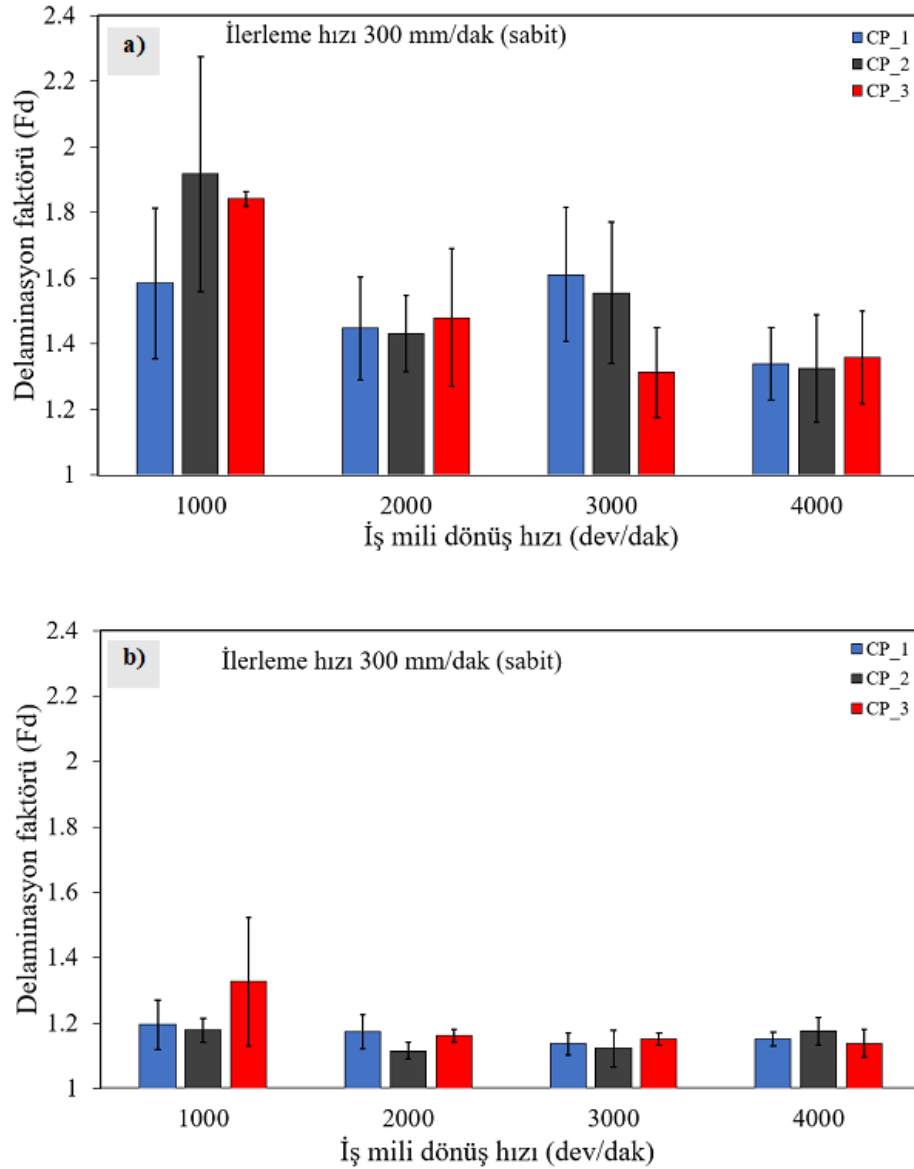
delaminasyon hasarının CP\_3 numunesinde olduğu anlaşılmaktadır. En yüksek devirde ise aynı numune en düşük giriş delaminasyon hasarına uğrayan numune olmuştur. İş mili dönüş hızı düştükçe tüm numuneler için oluşan giriş delaminasyonlarının azaldığı görülürken CP\_2 numunesi 3000 dev/dk'da ve CP\_1 numunesi de 4000 dev/dk'da bir kararsızlık yaşamıştır.



Şekil 5.20. İş mili dönüş hızlarına göre giriş delaminasyonu a) desteksiz b) destekli

Şekil 5.21'de iş mili dönüş hızlarına göre desteksiz ve destekli çıkış delaminasyonu verilmiştir. Şekil 5.21a'ya bakıldığında özellikle en düşük iş mili dönüş hızı olan 1000 dev/dk'da en yüksek çıkış delaminasyon faktörü CP\_2 numunesinde elde edilmişken iş mili dönüş hızı azaldığında bu numunede oluşan çıkış delaminasyon

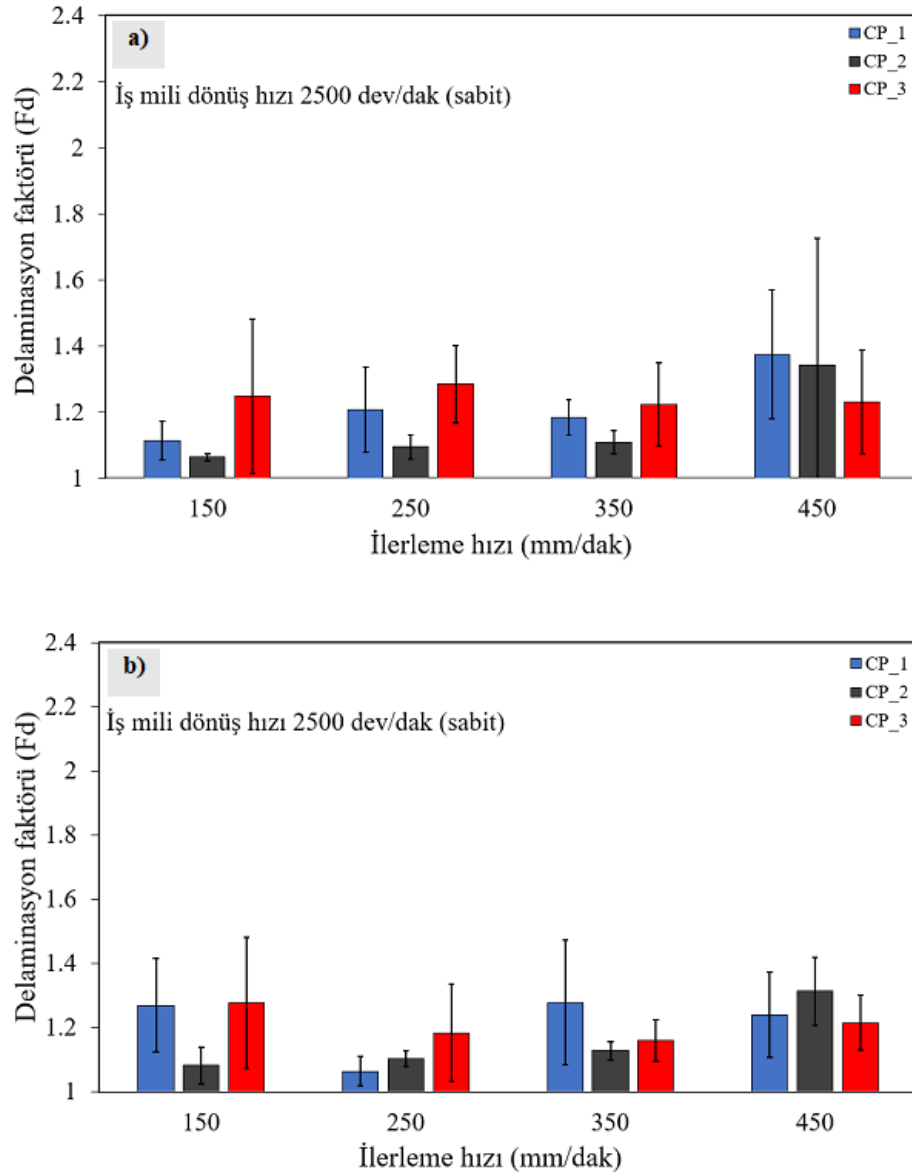
hasarının kararsız bir artış ve azalış gösterdiği delaminasyon faktöründen anlaşılmaktadır. CP\_3 numunesi ise 2000 dev/dk ve 4000 dev/dk iş mili dönüş hızlarında en yüksek çıkış delaminasyon hasarına uğrayan numune olmuştur. Şekil 5.21a ile Şekil 5.21b kıyaslandığında, desteğin genel olarak daha rahat bir işlenebilirlik sağlaması sayesinde delaminasyon faktörünün düştüğü anlaşılmaktadır.



Şekil 5.21. İş mili dönüş hızlarına göre çıkış delaminasyonu a) desteksiz b) destekli

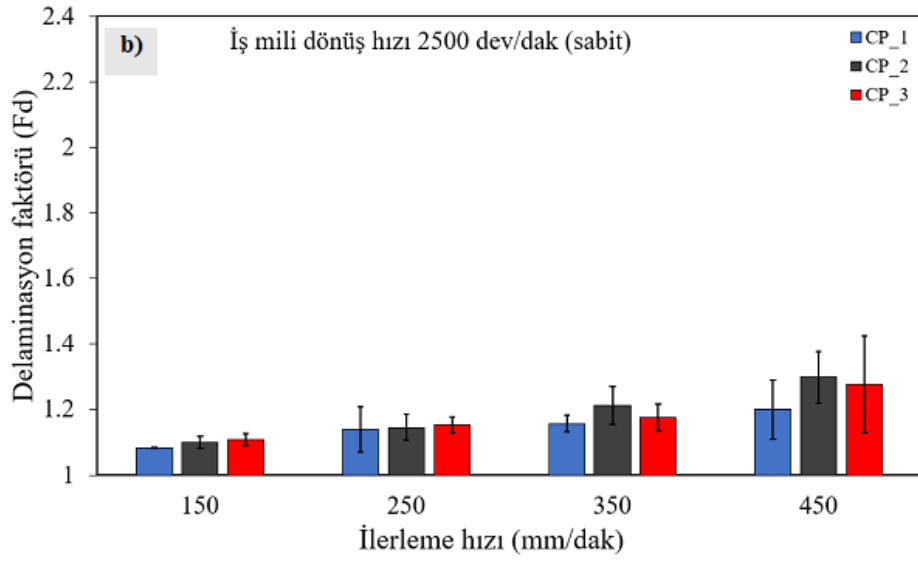
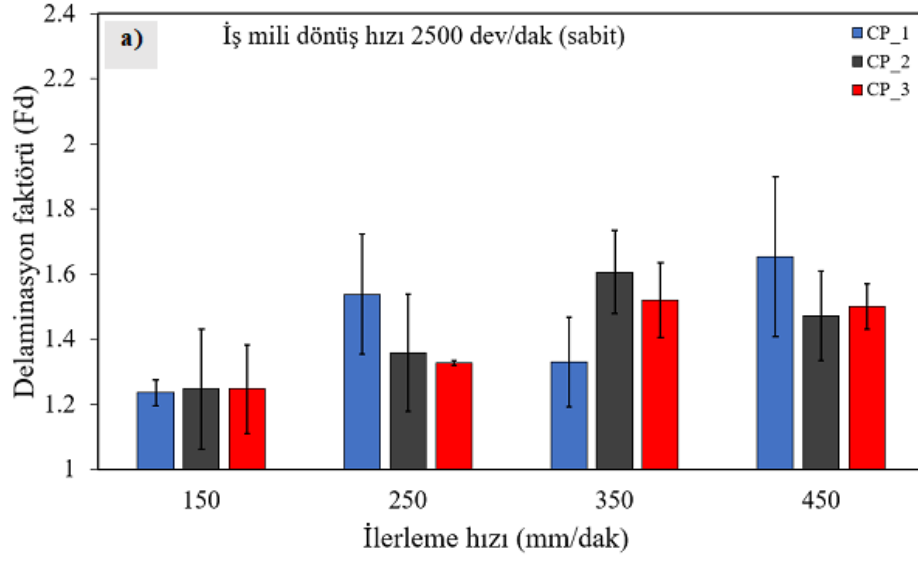
Şekil 5.22a'daki grafiğe baktığımızda 150 mm/dk ve 250 mm/dk ilerleme hızları için en yüksek giriş delaminasyonunun CP\_3 numunesinde olduğu anlaşılmaktadır. 450 mm/dk'da ise en düşük giriş delaminasyonu oluşan numune yine CP\_3'tür. İlerleme hızlarının artışına bağlı olarak desteksiz numunelerde CP\_2 hariç diğer numuneler

kararsız bir artış ile azalış yaşamıştır. Şekil 5.22b dikkate alındığında ise CP\_2 yine delaminasyon hasarı oluşumu açısından kararlı bir artış yaşamış görünmektedir.



Şekil 5.22. İlerleme hızlarına göre giriş delaminasyonu a) desteksiz b) destekli

Şekil 5.23'te desteksiz delme sonucu oluşan delaminasyonlara baktığımızda tüm numunelerin lineer bir artış yaşadığı görülebilirken bunun iki istisnası 350 mm/dak için CP\_1 numunesi ve 450 mm/dak için CP\_3 numunesi olmuştur. Şekil 5.23b için ise ilerleme hızının artışına bağlı olarak destekli delinen numunelerde lineer bir delaminasyon hasarı artışının meydana geldiği; ancak bu hasarların desteksiz delinen numunelerde oluşan hasarlar kadar fazla olmadığı görülebilmektedir.



**Şekil 5.23.** İlerleme hızlarına göre çıkış delaminasyonu a) desteksiz b) destekli

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1. Sonuçlar

Tez için yapılan delme deneylerinin amacı, farklı elyaf açılarında 6 kat sarılan bazalt elyaf takviyeli kompozit borularda farklı iş mili dönüş ve ilerleme hızlarında oluşacak çeşitli hasarları gözlemlemektir. Bunun yanında halka çekme deneyi ile farklı sarım açılarında üretilen tabakaların istifleme sırasının değişiminin mekanik özelliklere etkisini belirlemek de tezin amaçlarından biridir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. Tezden elde edilen veriler şu şekilde sıralanabilir:

- Desteksiz yapılan delme işleminde iş mili dönüş hızının artışıyla genel olarak giriş delaminasyon faktörünün azaldığı yani daha az delaminasyon hasarı olduğu söylenebilir. Aynı durumun, çıkış delaminasyonunda da geçerli olduğu görülmektedir. 3000 dev/dk'nın delaminasyon faktörünün azalıştan artışa geçtiği bir eşik olduğu görülmektedir.
- Desteksiz yapılan delme deneyinde ilerleme hızının artışına bağlı olarak hem giriş hem de çıkış delaminasyonlarının genel olarak artış yaşadığı anlaşılmaktadır. Özellikle 250 mm/dk'dan sonraki hızlarda çıkış delaminasyonlarının giriş delaminasyonlarından daha büyük olduğu fark edilmektedir.
- Destekli yapılan delmede iş mili dönüş hızının artışı özellikle 1000 dev/dk'dan sonra çok önemli bir değişiklik gerçekleştirilmemektedir. Bu dönüş hızında giriş delaminasyonlarının çıkış delaminasyonlarından daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.
- Son olarak destekli yapılan delme işleminde ilerleme hızının artışı bazı numunelerde giriş delaminasyon faktörünü azaltmışken bazılarında ise arttırmıştır. Çıkış delaminasyonlarında ise ilerleme hızlarının artışıyla çok büyük bir delaminasyon alanının oluşmadığı anlaşılabilmektedir.
- 90° yönelimli elyaf tabakalarının en iç katmanda bulunduğu durumlarda numunelerin daha yüksek gerilmelere dayandığı görülmüştür. Bu sebepten çok tabakalı boru üretimlerinde en alt katmanda 90° yönelimli elyaflar kullanılabilir.

- Farklı sarım açılarında oluşturulan tabakaların yer değiştirilmesi ile üretilen CP\_1, CP\_2 ve CP\_3 kodlu kompozit borularda istifleme sırası değıştikçe mekanik özelliklerin değıştiği tespit edilmiştir.
- 30° yönelimli elyafların gerilmeye fazla dayanamadığı görüldüğünden yüksek dayanım istenen yerlerde bu açı yönelimi ilk tercih olmayabilir.
- ±90° yönelimli elyaf tabakalarının en iç katmanda bulunduğu CP\_3 (±90/±30/±60) kompozit boru numunesi en yüksek gerilme (372 MPa), % kopma uzaması (6.29) ve statik tokluk değerine (9316 kJ/m<sup>3</sup>) ulaşmıştır. Bu istifleme sırasında kompozit borunun iç kısmında istiflenen ±90° sarım açılı tabaka gerilme yükünü karşılayan ilk tabaka olmuştur. ±30° ve ±60° sarım açılı tabakalar sargı etkisi ile gerilme yükünü karşılamada ±90° tabakaya takviye görevini üstlenmiştir.
- Hasar gelişimi açısından değerlendirildiğinde; ±30° sarım açılı tabakalarda delaminasyon, tabaka çekilmesi ve elyaf doğrultusunda yarıma hasarları baskın olmuştur. ±60° tabakalarda hasarlar ± sarım açılarında zikzak çizerek elyaf kopma hasarı şeklinde yoğunlaşmıştır. ±90° tabakada elyaflar yükleme yönüne dik olarak konumlandığından diğer tabakalarda görülen hasar modlarından farklı olarak gevrek elyaf kırılması ve elyaf çekilmesi şeklinde hasar gelişimi gözlenmiştir.

## 6.2. Öneriler

Bu tez çalışmasında kullanılan numuneler, benzer numuneler ile daha farklı çalışmalara konu olabilir. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- 1000 dev/dk hemen hemen çoğu numunede en yüksek delaminasyon üreten iş mili dönüş hızı olmuştur. Bu sebepten minimum iş mili dönüş hızı 1000 dev/dk üzerinde belirlenebilir.
- 30°, 60° ve 90° olan sarım açıları değıştirilebilir ve açısal farklılıktan kaynaklanan hasar modları incelenebilir. Aynı zamanda farklı açılarda meydana gelen birim şekil değışimi, gerilme ve tokluk gibi değerler birbiriyle kıyaslanabilir.
- Boru çapları değıştirilerek et kalınlığının işlenebilirliğe etkileri tartışılabilir.

- Kompozit borular pultrüzyon gibi diğer yöntemlerle üretilebilir ve elde edilen malzeme, işlenebilirlik özellikleri ve mekanik özellikler açısından elyaf sarım yöntemine göre üretilen borularla kıyaslanabilir.

## 7. KAYNAKLAR

- Abrão, A.M., Campos Rubio, J.C., Faria, P.E., Davim, J.P., 2008, The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite, *Materials&Design*, 29 (2), 508-513.  
(<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.016>)
- Alarçin, S., 2014, Savunma sanayiinde kullanılan kompozit malzemelerin balistik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi*, Afyon, 9-20.
- Anderson, T.L., 2005, Fracture mechanics, *CRC Press*, Florida.  
(ISBN-13: 978-1-4200-5821-5 / ISBN-10: 1-4200-5821-5)
- Araldite is a registered trademark of Huntsman Advanced Materials, The Woodlands, TX.
- Aricasoy, O., 2006, Kompozit sektör raporu, *İstanbul Ticaret Odası-İTO 2006*, İstanbul, 4-22.
- Askeland, D.R., Wright, W.J., 2014, The science and engineering of materials, *Cengage Learning*, Massachusetts.  
(ISBN-13: 978-1-305-07676-1 / ISBN-10: 1-305-07676-1)
- Basfiber is a registered trademark of Kamenny Vek Co., Dubna, MO.
- Baştürk, S., Uyanık, H., Kazancı, Z., 2014, An analytical model for predicting the deflection of laminated basalt composite plates under dynamic loads, *Composite Structures*, 116, 273-285.  
(<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.05.018>)
- Bayraktar, Ş., 2011, Karbon elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin frezeleme işleminde işlenebilirliğinin deneysel araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 22-47.
- Boisse, P., 2011, Composite reinforcements for optimum performance, *Woodhead Publishing*, Cambridge.  
(ISBN-13: 978-1-84569-965-9 / ISBN-10: 1-84569-965-3)
- Bratukhin, A.G., Bogolyubov, V.S., 1995, Composite manufacturing technology, *Chapman&Hall*, London.  
(ISBN-13: 978-0-412-58250-9 / ISBN-10: 0-412-58250-3)
- Caggiano, A., 2018, Machining of fibre reinforced plastic composite materials, *Materials*, 11 (3), 442.  
(<https://doi.org/10.3390/ma11030442>)
- Callister, W.D., Rethwisch, D.G., 2010, Materials science and engineering, *John Wiley&Sons*, New Jersey.  
(ISBN-13: 978-0-470-41997-7 / ISBN-10: 0-470-41997-0)

- Campell, F.C., 2010, Structural composite materials, *ASM International*, Ohio.  
(ISBN-13: 978-1-61503-037-8 / ISBN-10: 0-61503-037-9)
- Carmisciano, S., De Rosa, I.M., Sarasini, F., Tamburrano, A., Valente, M., 2011, Basalt woven fiber reinforced vinylester composites: flexural and electrical properties, *Materials&Design*, 32 (1), 337-342.  
(<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.042>)
- Chawla, K.K., 2019, Composite materials, *Springer Nature Switzerland AG*, Cham.  
(ISBN-13: 978-3-030-28982-9 / ISBN-10: 3-030-28982-6)
- Chawla, K.K., 2005, Fibrous materials, *Cambridge University Press*, Cambridge.  
(ISBN-13: 978-0-521-61985-1 / ISBN-10: 0-521-61985-8)
- ChemCenters, 2000, *Araldite MY740 Hardener HY918* [online],  
<https://www.chemcenters.com/images/suppliers/169257/Araldite%20MY%20740,%20HY%20918,%20DY%20062.pdf> [Ziyaret tarihi: 29 Ekim 2021].
- Chung, D.D.L., 1994, Carbon fiber composites, *Butterworth-Heinemann*, Massachusetts.  
(ISBN-13: 978-0-7506-9169-7 / ISBN-10: 0-7506-9169-7)
- Chung, D.D.L., 2010, Composite materials, *Springer-Verlag*, London.  
(ISBN-13: 978-1-84882-830-8 / ISBN-10: 1-84882-830-6)
- Colombo, C., Vergani, L., Burman, M., 2012, Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites, *Composite Structures*, 94 (3), 1165-1174.  
(<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.10.007>)
- Czigány, T., Vad, J., Pölöskei, K., 2005, Basalt fiber as a reinforcement of polymer composites, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 49 (1), 3-14.
- Çalışkan, M.B., 2021, KNT ve SiO<sub>2</sub> nanopartikül ile modifiye edilmiş karbon-cam elyaf/epoksi kompozit plakaların mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 21.
- Dandekar, C.R., Shin, Y.C., 2012, Modeling of machining of composite materials: a review, *International Journal of Machine Tools&Manufacture*, 57, 102-121.  
(<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.01.006>)
- Davim, J.P., 2015, Machinability of fibre-reinforced plastics, *De Gruyter*, Berlin.  
(ISBN-13: 978-3-11-029222-0 / ISBN-10: 3-11-029222-X)
- Davim, J.P., Reis, P., 2005, Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments, *Journal of Materials Processing Technology*, 160 (2), 160-167.  
(<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.06.003>)

- Davim, J.P., Reis, P., 2003, Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave—experimental and statistical study, *Materials&Design*, 24 (5), 315-324. ([https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(03\)00062-1](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00062-1))
- Deák, T., Czigány, T., 2008, Investigation of basalt fiber reinforced polyamide composites, *Materials Science Forum*, 598, 7-12. (<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.589.7>)
- Dehkordi, M.T., Nosraty, H., Shokrieh, M.M., Minak, G., 2013, The influence of hybridization on impact damage behavior and residual compression strength of intraply basalt/nylon hybrid composites, *Materials&Design*, 43, 283-290. (<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.005>)
- Dhand, V., Mittal, G., Rhee, K.Y., Hui, D., 2015, A short review on basalt fiber reinforced polymer composites, *Composites Part B: Engineering*, 73, 166-180. (<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.011>)
- Ekşi, O., 2007, Plastik esaslı malzemelerin ısııl şekil verme özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, 76.
- Everstine, G.C., Rogers, T.G., 1971, A theory of machining of fiber-reinforced materials, *Journal of Composite Materials*, 5 (1), 94-106. (<https://doi.org/10.1177%2F002199837100500109>)
- Fidan, S., Avcu, E., Sınmazçelik, T., 2011, Cam fiber takviyeli polyester kompozitte tekrarlı darbe yüklemeleriyle oluşan hasar mekanizmaları, *I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu-KOMPEGE 2011*, İzmir, 1-9.
- Fleischer, J., Teti, R., Lanza, G., Mativenga, P., Möhring, H-C., Caggiano, A., 2018, Composite materials parts manufacturing, *CIRP Annals*, 67 (2), 603-626. (<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.05.005>)
- Fourné, F., 1999, Synthetic fibers, *Carl Hanser Verlag*, Munich. (ISBN-13: 978-3-446-16072-9 / ISBN-10: 3-446-16072-8)
- Gay, D., Hoa, S.V., Tsai, S.W., 2002, Composite materials, *CRC Press*, Florida. (ISBN-13: 978-1-58716-084-4 / ISBN-10: 1-58716-084-6)
- Gemi, L., 2014, Düşük hızlı darbe hasarlı filaman sarım hibrid boruların iç basınç altında yorulma davranışı, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 2-36.
- Gemi, L., 2004, Filaman sarım ctp boruların iç basınç etkisi altında yorulma davranışı, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 2-29.
- Gemi, L., 2018, Investigation of the effect of stacking sequence on low velocity impact response and damage formation in hybrid composite pipes under internal pressure. A comparative study, *Composites Part B: Engineering*, 153, 217-232. (<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.07.056>)

- Gemi, L., Köklü, U., Yazman, Ş., Morkavuk, S., 2020, The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-1 mechanical characterization and drilling tests, *Composites Part B: Engineering*, 186, 107787.  
(<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107787>)
- Gemi, L., Morkavuk, S., Köklü, U., Soylu Gemi, D., 2019, An experimental study on the effects of various drill types on drilling performance of GFRP composite pipes and damage formation, *Composites Part B: Engineering*, 172, 186-194.  
(<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.023>)
- Gemi, L., Morkavuk, S., Köklü, U., Yazman, Ş., 2020, The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-2 damage analysis and surface quality, *Composite Structures*, 235, 111737.  
(<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111737>)
- Gemi, L., Şahin, Ö. S., Akdemir, A., 2017, Experimental investigation of fatigue damage formation of hybrid pipes subjected to impact loading under internal pre-stress, *Composites Part B: Engineering*, 119, 196-205.  
(<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.051>)
- Günaydın, B., 2003, Yüzey çatlaklı cam/polyester kompozit malzemelerde yorulma çatlak ilerlemesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 8-21.
- Hocheng, H., 2012, Machining technology for composite materials, Woodhead Publishing, Cambridge.  
(ISBN-13: 978-0-85709-030-0 / ISBN-10: 0-85709-030-5)
- İnançer, G., 2015, Farklı takviye malzemeli plastik kompozitlerin darbe davranışına çevrenin etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 1-25.
- Jahanmir, S., Ramulu, M., Koshy, P., 1999, Machining of ceramics and composites, *CRC Press*, Florida.  
(ISBN-13: 978-0-8247-0178-9 / ISBN-10: 0-8247-0178-X)
- Kahraman, İ., 2017, Cam, bazalt ve karbon fiber esaslı hibrit kardan milinin filament sarma tekniği ile üretimi ve matematiksel optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 12-26.
- Kara, M., 2006, Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerin dinamik cevabı, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 2-35.
- Kaw, A.K., 2006, Mechanics of composite materials, *CRC Press*, Florida.  
(ISBN-13: 978-0-8493-1343-1 / ISBN-10: 0-8493-1343-0)
- Kevlar 29 is a registered trademark of E.I. duPont deNemours and Company, Inc., Wilmington, DE.

- Kevlar 49 is a registered trademark of E.I. duPont deNemours and Company, Inc., Wilmington, DE.
- Khandelwal, S., Rhee, K.Y., 2020, Recent advances in basalt-fiber-reinforced composites: tailoring the fiber-matrix interface, *Composites Part B: Engineering*, 192, 108011.  
(<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108011>)
- Kılıçkap, E., Çelik, Y.H., 2012, Cam elyaf takviyeli plastik kompozitlerin frezelenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi, 3. *Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu-UTİS 2012*, Ankara, 99-103.
- Kılıçkap, E., Çelik, Y.H., Yardımeden, A., 2017, Karbon elyaf takviyeli plastik kompozitlerin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasına etki eden parametrelerin araştırılması, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8 (1), 175-180.
- Kohjiya, S., Ikeda, Y., 2014, Chemistry, manufacture and applications of natural rubber, *Woodhead Publishing*, Cambridge.  
(ISBN-13: 978-0-85709-683-8 / ISBN-10: 0-85709-683-4)
- König, W., Wulf, C., Graß, P., Willerscheid, H., 1985, Machining of fibre reinforced plastics, *CIRP Annals*, 34 (2), 537-548.  
([https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60186-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60186-3))
- Krishnaraj, V., Zitoune, R., Davim, J.P., 2013, Drilling of polymer-matrix composites, *Springer-Verlag*, Heidelberg.  
(ISBN-13: 978-3-642-38344-1 / ISBN-10: 3-642-38344-0)
- Küsefoğlu, S., 2017, *Carbon fiber / epoxy composites: ideal materials for orthopedic prosthetics*. [online], Kordsa The Reinforcer, 6, 19-22,  
([https://www.kordsa.com/en/images/pdf/The\\_Reinforcer\\_6.pdf](https://www.kordsa.com/en/images/pdf/The_Reinforcer_6.pdf) [Ziyaret tarihi: 4 Şubat 2021].
- Lantrip, J., 2008, New tools needed, *Cutting Tool Engineering Magazine*, 60 (8), 72-84.
- Lopresto, V., Caggiano, A., Teti, R., 2016, High performance cutting of fibre reinforced plastik composite materials, *Procedia CIRP*, 46, 71-82.  
(<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.079>)
- Lopresto, V., Leone, C., De Iorio, I., 2011, Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic, *Composites Part B: Engineering*, 42 (4), 717-723.  
(<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.030>)
- Mallick, P.K., 1997, Composites engineering handbook, *Marcel Dekker*, New York.  
(ISBN-13: 978-0-8247-9304-3 / ISBN-10: 0-8247-9304-8)
- Mallick, P.K., 2007, Fiber-reinforced composites, *CRC Press*, Florida.  
(ISBN-13: 978-0-8493-4205-9 / ISBN-10: 0-8493-4205-8)

- Mallick, P.K., 2018, Processing of polymer matrix composites, *CRC Press*, Florida. (ISBN-13: 978-1-4665-7822-7 / ISBN-10: 1-4665-7822-X)
- Maziz, A., Tarfaoui, M., Gemi, L., Rechak, S., Nachtane, M., 2021a, A progressive damage model for pressurized filament-wound hybrid composite pipe under low-velocity impact, *Composite Structures*, 276, 114520. (<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114520>)
- Maziz, A., Tarfaoui, M., Rechak, S., Nachtane, M., Gemi, L., 2021b, Finite Element Analysis of Impact-Induced Damage in Pressurized Hybrid Composites Pipes, *International Journal of Applied Mechanics*, 13(07), 2150074. (<https://doi.org/10.1142/S1758825121500745>)
- Mazumdar, S.K., 2002, Composites manufacturing, *CRC Press*, Florida. (ISBN-13: 978-0-8493-0585-6 / ISBN-10: 0-8493-0585-3)
- Morkavuk, S., 2016, Karbon fiber takviyeli plastiklerin kuru ve kriyojenik işleme koşullarında frezelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 6-47.
- Mouritz, A.P., 2012, Introduction to aerospace materials, *Woodhead Publishing*, Cambridge. (ISBN-13:978-1-85573-946-8 / ISBN-10: 1-85573-946-8)
- Nasir, V., Karimipour, H., Taheri-Behrooz, F., Shokrieh, M.M., 2012, Corrosion behaviour and crack formation mechanism of basalt fibre in sulphuric acid, *Corrosion Science*, 64, 1-7. (<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.06.028>)
- Nextel 610 is a trademark of 3M Co., St. Paul, MN.
- Okan, B.S., 2019, *Graphene: a new generation reinforcement in lightweight composites* [online], *Kordsa The Reinforcer*, 11, 11-13, [https://www.kordsa.com/en/images/pdf/Reinforcer\\_11\\_Combined.pdf](https://www.kordsa.com/en/images/pdf/Reinforcer_11_Combined.pdf) [Ziyaret tarihi: 4 Şubat 2021].
- Osnos, S., 2012, *Basalt continuous fiber: development of technologies and equipment from the past to the present.* [online], <http://basaltfm.com/eng/articles/article01.html> [Ziyaret tarihi: 13 Ocak 2020].
- Pavlovski, D., Mislavsky, B., Antonov, A., 2007, CNG cylinder manufacturers test basalt fibre, *Reinforced Plastics*, 51 (4), 36-39. ([https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(07\)70152-2](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(07)70152-2))
- Rajak, D.K., Pagar, D.D., Menezes, P.L., Linul, E., 2019, Fiber-reinforced polymer composites: manufacturing, properties, and applications, *Polymers*, 11 (10), 1667. (<https://doi.org/10.3390/polym11101667>)
- Rana, S., Figueiro, R., 2016, Advanced composite materials for aerospace engineering, *Woodhead Publishing*, Cambridge.

(ISBN-13: 978-0-08-100939-0 / ISBN-10: 0-08-100939-9)

- Ross, A., 2006, *Basalt fiber: alternative to glass?* [online], CompositesWorld, <https://www.compositesworld.com/articles/basalt-fibers-alternative-to-glass> [Ziyaret tarihi: 3 Mart 2020].
- Santhanakrishnan, G., Krishnamurthy, R., Malhotra, S.K., 1988, Machinability characteristics of fibre reinforced plastics composites, *Journal of Mechanical Working Technology*, 17, 195-204. ([https://doi.org/10.1016/0378-3804\(88\)90021-6](https://doi.org/10.1016/0378-3804(88)90021-6))
- Sarı, M., 2017, Havacılık ve uzay sanayiinde kullanılan AL2024-T3 malzemeleri için SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli yapıştırıcıların araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 38.
- Sato, N., Hojo, M., Nishikawa, M., 2015, Intralaminar fatigue crack growth properties of conventional and interlayer toughened CFRP laminate under mode I loading, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 68, 202-211. (<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.09.031>)
- Sepet, H., 2019, Grafen takviyesinin düşük hızlı darbe hasarlı ve hasarsız bazalt elyaf takviyeli kompozit basınçlı kapların yorulma davranışlarına etkisi, Doktora Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya, 13-53.
- Sfarra, S., Ibarra-Castanedo, C., Santulli, C., Paoletti, A., Paoletti, D., Sarasini, F., Bendada, A., Maldague, X., 2013, Falling weight impacted glass and basalt fibre woven composites inspected using non-destructive techniques, *Composites Part B: Engineering*, 45 (1), 601-608. (<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.078>)
- Sheikh-Ahmad, J.Y., 2009, Machining of polymer composites, *Springer Science+Business Media*, New York. (ISBN-13: 978-0-387-35539-9 / ISBN-10: 0-387-35539-1)
- Spectra is a registered trademark of Honeywell International Inc., Charlotte, NC.
- Strong, A.B., 2008, Fundamentals of composites manufacturing, *Society of Manufacturing Engineers*, Michigan. (ISBN-13: 978-0-87263-854-9 / ISBN-10: 0-87263-854-5)
- Sultan, M.T.H., Azmi, A.I., Majid, M.S.A., Jamir, M.R.M., Saba, N., 2021, Machining and machinability of fiber reinforced polymer composites, *Springer Nature Singapore Pte Ltd*, Singapore. (ISBN-13: 978-981-33-4152-4 / ISBN-10: 981-33-4152-1)
- Taegutec, 2022, Cutting Tools [online], [www.taegutec.com/pages/en/products-2/cutting-tools/](http://www.taegutec.com/pages/en/products-2/cutting-tools/), [Ziyaret tarihi: 15/06/2022].
- Talreja, R., Singh, C.V., 2012, Damage and failure of composite materials, *Cambridge University Press*, New York.

(ISBN-13: 978-0-521-81942-8 / ISBN 10: 0-521-81942-8)

Technobasalt-Invest LLC, 2019, *Which fiber to choose?* [online], <https://technobasalt.com/en/resources-en/faq-en/basalt-fiber-vs-other-fiber-en/> [Ziyaret tarihi: 13 Ocak 2020].

Technobasalt is a registered trademark of Technobasalt-Invest, LLC., Kyiv, UA.

Teflon is a registered trademark of E.I. duPont deNemours and Company, Inc., Wilmington, DE.

Teti, R., 2002, Machining of composite materials, *CIRP Annals*, 51 (2), 611-634. ([https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61703-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61703-X))

Tsao, C.C., Hocheng, H., 2007, Effect of tool wear on delamination in drilling composite materials, *International Journal of Mechanical Sciences*, 49 (8), 983-988. (<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2007.01.001>)

Twaron is a registered trademark of Teijin Aramid BV, Arnhem, NL.

Ulus, S., 2018, Balistik koruyucu kompozit plakalarda bazalt fiber kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, *Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Şanlıurfa, 2-61.

Vahapoğlu, V., 2013, Kauçuk türü malzemeler: sınıflandırma, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4 (1), 25-34.

Varol, Z., 2014, Kimyasal buhar biriktirme, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı*, Ankara, 3, <https://www.slideshare.net/Zzmmrrtt/kimyasal-buhar-biriktirme-cvd>, [Ziyaret tarihi: 25 Mart 2021].

Viba, 2015, Araldite Release Agent QZ 13 [online], <https://www.viba.nl/media/files/tds/tds0001383.pdf> [Ziyaret tarihi: 29 Ekim 2021].

Vigneshwaran, S., Uthayakumar, M., Arumugaprabu, V., 2018, Review on machinability of fiber reinforced polymers: a drilling approach, *Silicon*, 10 (5), 2295-2305. (<https://doi.org/10.1007/s12633-018-9764-9>)

Yardımeden, A., 2016, Investigation of optimum cutting parameters and tool radius in turning glass-fiber-reinforced composite material, *Science and Engineering of Composite Materials*, 23 (1), 85-92. (<https://doi.org/10.1515/secm-2013-0301>)

Yıldız, R., 2019, Karbon prepreg, cam prepreg ve bazalt elyaf ile üretilmiş hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-2.

Yılmaz, T., 2015-16 Bahar Yarıyılı, Kompozit malzemeler, Doç. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e ait tarihsiz Bahar Yarıyılı ders notları (75 sayfa), *Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü*, Kocaeli, 1-67.

- Younossi, O., Kennedy, M., Graser, J.C., 2001, Military airframe costs, *RAND*, California.  
(ISBN-13: 978-0-8330-3036-8 / ISBN-10: 0-8330-3036-1)
- Yozgat, U., 2019, Bazalt elyaf takviyeli filaman sarım kompozit boruların düşük hızlı darbe davranışlarının düşük iç basınç altında incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya, 13-31.
- Zhao, X., Ouyang, J., Yang, H., Tan, Q., 2020, Effect of basalt fibers for reinforcing resin-based brake composites, *Minerals*, 10 (6), 490.  
(<https://doi.org/10.3390/min10060490>)
- Zor, M., 2015, Kompozit malzemeler, Bölüm I (12 sayfa), *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü*, İzmir, 2-5, <http://ansys.deu.edu.tr/wp-content/uploads/2015/12/12.pdf>, [Ziyaret tarihi: 4 Şubat 2020].