

T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



TERMOPLASTİK KAPLI SÜREKLİ CAM ELYAF TAKVİYELİ  
KOMPOZİT İP ÜRETİMİ VE UYGULAMA ALANLARININ  
ARAŞTIRILMASI

AHMET GÖKTUĞ KIZILÇAOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Raif SAKİN (Tez Danışmanı)  
Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ (Eş Danışman)  
Prof. Dr. Ali ORAL  
Doç. Dr. Can ÇİVİ

BALIKESİR, HAZİRAN – 2025

## ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Termoplastik Kaplı Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Kompozit İp Üretimi ve Uygulama Alanlarının Araştırılması**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

**Ahmet Göktuğ KIZILÇAOĞLU**

## ÖZET

**TERMOPLASTİK KAPLI SÜREKLİ CAM ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT İP  
ÜRETİMİ VE UYGULAMA ALANLARININ ARAŞTIRILMASI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
AHMET GÖKTUĞ KIZILÇAOĞLU  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. RAİF SAKİN)  
(EŞ DANIŞMAN: DOÇ. DR. ALAADDİN TOKTAŞ)  
BALIKESİR, HAZİRAN - 2025**

Bu tez çalışmasının ilk amacı sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozit ip üretim prosesinin masaüstü prototipini tanıtmaktır. Diğer amaç ise polilaktik asit (PLA), termoplastik poliüretan (TPU), polietilen tereftalat glikol (PET-G) kaplı cam elyaf kompozit iplerin çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerini inceleyerek endüstride amaca uygun kullanılabilirliğini araştırmaktır. Kompozit iplerin kaplanabilmesi için maksimum çalışma sıcaklığı 300°C olan ve 250-660 mm/dak ekstrüzyon hızında çalışabilen 120W masaüstü filament ekstrüder kullanılmıştır. Kaplanma işlemi sırasında kompozit ipleri bobine sarabilmek için 60W nominal güce, 1350 dev/dak hıza, tork arttırıcı redüktöre ve hız kontrol ünitesine sahip (0–135 dev/dak) bir AC motor kullanılmıştır. Kompozit ip üretiminde elyaf olarak 300 tex, 600 tex ve 1200 tex lineer yoğunluğa sahip sürekli E-cam elyaf, reçine olarak ise polilaktik asit (PLA), termoplastik poliüretan (TPU) ve polietilen tereftalat glikol (PET-G) kullanılmıştır. Süreç sonunda çapları Ø0.52 mm–Ø1.16 mm aralığında, fiber hacim oranları %31–%53 aralığında ve yoğunlukları 1.610 g/cm<sup>3</sup>–1.919 g/cm<sup>3</sup> aralığında 9 farklı kompozit ip üretimi yapılmıştır. Test edilen sürekli cam elyaflar ortalama 1025 MPa’lık yüksek bir çekme mukavemetine ve 20300 MPa’lık bir elastikiyet modülüne sahip olmasına rağmen, kırılma davranış göstermişlerdir. Termoplastik malzemeler ile kaplandıktan sonra sürekli cam elyafların çekme mukavemetinde ortalama %48’lik (533 MPa) ve elastisite modülünde %64’lük (7318 MPa) azalma elde edilmiştir. Bununla birlikte kompozit iplerin kırılma oranı, uzama oranındaki ortalama %53’lük bir artış ile önemli ölçüde azalmıştır. Çalışma sonunda elde edilen veriler, PLA, TPU ve PET-G kaplı cam elyaf takviyeli kompozit iplerin endüstride amaca uygun olarak kullanılabilirliği açısından umut vericidir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Cam elyaf, çekme özellikleri, kaynak, kompozit ip, PETG kaplama, PLA kaplama, TPU kaplama

## ABSTRACT

### PRODUCTION OF THERMOPLASTIC COATED CONTINUOUS GLASS FIBRE REINFORCED COMPOSITE ROPE AND INVESTIGATION OF ITS

#### APPLICATION AREAS

#### MSC THESIS

AHMET GÖKTUĞ KIZILÇAOĞLU

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. RAİF SAKİN )

(CO-SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. ALAADDİN TOKTAŞ )

BALIKESİR, JUNE - 2025

The first aim of this thesis is to introduce a desktop prototype of a continuous fiber reinforced thermoplastic composite rope manufacturing process. The other aim is to investigate the mechanical properties such as tensile strength of polylactic acid (PLA), thermoplastic polyurethane (TPU), polyethylene terephthalate glycol (PET-G) coated glass fiber composite ropes and to investigate their usability in the industry. A 120W desktop filament extruder with a maximum operating temperature of 300°C and an extrusion speed of 250-660 mm/min was used to coat the composite ropes. An AC motor with a nominal power of 60W, a speed of 1350 rpm, a torque increasing reducer and a speed control unit was used to wind the composite ropes on the bobbin during the coating process. Continuous E-glass fibers with linear densities of 300 tex, 600 tex and 1200 tex were used as fibers and polylactic acid (PLA), thermoplastic polyurethane (TPU) and polyethylene terephthalate glycol (PET-G) were used as resins. At the end of the process, 9 different composite ropes with diameters between Ø0.52 mm-Ø1.16 mm, fiber volume ratios between 31%-53% and densities between 1.610 g/cm<sup>3</sup>-1.919 g/cm<sup>3</sup> were produced. Although the tested glass fibers had a high tensile strength of 1025 MPa on average and a modulus of elasticity of 20300 MPa, they showed brittle behavior. After coating with thermoplastic materials, an average reduction of 48% (533 MPa) in tensile strength and 64% (7318 MPa) in modulus of elasticity of continuous glass fibers was obtained. However, the brittleness of composite ropes was significantly reduced with an average increase in elongation of 53%. The data obtained at the end of the study are promising for the use of PLA, TPU and PET-G coated glass fiber reinforced composite yarns in the industry.

**KEYWORDS:** Composites rope, glass fiber, PETG coating, PLA coating, tensile properties, TPU coating, welding

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KOMPOZİT MALZEMELER</b> .....	<b>5</b>
2.1 Kompozit Malzemelerin Temel Bileşenleri.....	5
2.1.1 Matris malzemeleri .....	5
2.1.2 Takviye malzemeleri.....	5
2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması .....	6
2.2.1 Matris malzemesine göre kompozitler.....	6
2.2.1.1 Polimer matrisli kompozitler .....	6
2.2.1.2 Metal matrisli kompozitler.....	7
2.2.1.3 Seramik matrisli kompozitler.....	8
2.2.2 Takviye malzemesine göre kompozitler .....	9
2.2.2.1 Parçacık takviyeli kompozitler .....	9
2.2.2.2 Lamine kompozitler .....	9
2.2.2.3 Elyaf takviyesine göre kompozit malzemeler.....	10
2.3 Sürekli Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	11
2.3.1 Sürekli elyaf türleri .....	11
2.3.1.1 Karbon elyaf .....	11
2.3.1.2 Aramid elyaf .....	12
2.3.1.3 Bazalt elyaf .....	12
2.3.1.4 Cam elyaf.....	12
2.4 Cam Elyaf Takviyeli Kompozitler.....	14
<b>3. TERMOPLASTİK MALZEMELER</b> .....	<b>16</b>
3.1 Termoplastiklerin Kısa Tarihi.....	16
3.2 Termoplastiklerin Genel Özellikleri .....	16
3.3 Eklemeli İmalatta Kullanılan Bazı Termoplastikler .....	17
3.3.1 Polilaktik asit (PLA) .....	17
3.3.2 Termoplastik poliüretan (TPU).....	19
3.3.3 Polietilen tereftalat glikol (PETG).....	21
3.4 Termoplastik Kaynağı.....	22
<b>4. PULTRÜZYON YÖNTEMİ</b> .....	<b>24</b>
<b>5. MALZEME VE YÖNTEM</b> .....	<b>26</b>
5.1 Sürekli Cam Elyaf (Tek Uçlu Fıtil) .....	26
5.2 Termoplastik Filamentler.....	26
5.3 Cam Elyaf Takviyeli Kompozit İp Üretim Prosesi.....	27
5.4 Kompozit İp Üretimini Etkileyen Faktörler.....	28
5.4.1 Teorik fiber hacim oranı .....	29
5.4.2 Ortam sıcaklığı.....	30
5.4.3 İp sarma hızı.....	30
5.5 Birim Ağırlıkların Ölçümü .....	30

## İÇİNDEKİLER (devam)

5.6 Kompozit İplerin Çap Ölçümleri .....	31
5.7 Fiber Hacim Hesabı ( $V_f$ ) .....	31
5.8 Çekme Testleri .....	32
5.9 Optik Görüntülemeler .....	33
5.10 Üretilen Kompozit İplerin Test Prosesleri .....	33
5.11 Üretimi Yapılan Kompozit İplerde Kaynak (Birleştirme) İşlemi .....	33
<b>6. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>35</b>
6.1 Sürekli Cam Elyaf İpler İçin Çekme Testi Bulguları .....	35
6.2 Sürekli Cam Elyaf İpler İçin Optik Görüntüler .....	36
6.3 Termoplastik Filamentler İçin Çekme Testi Bulguları .....	37
6.4 Termoplastik Filamentler İçin Optik Görüntüler .....	39
6.5 Kompozit İpler İçin Ortalama Çap, Fiber Hacmi Ve Özgül Ağırlık Bulguları .....	40
6.6 Kompozit İplerin Çekme Testleri .....	41
6.7 Kompozit İplerin Çekme Testleri Sonrası Optik Görüntüleri .....	50
6.8 Kompozit İplerin Kaynağı (Birleştirme) Ve Kaynak Mukavemeti .....	54
6.9 Kaynaklı Kompozit İplerin Çekme/Kayma Testleri Sonrası Optik Görüntüleri .....	58
6.10 Tartışma .....	61
6.11 Optimum Proses Parametreleri .....	62
<b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>64</b>
<b>8. KAYNAKLAR .....</b>	<b>67</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>72</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Metal matrisli kompozit örneği.....	8
Şekil 2.2: Seramik matrisli kompozit örneği. ....	9
Şekil 2.3: Yolcu uçaklarında kullanılan malzemeler. ....	10
Şekil 2.4: Karbon elyaf; (a) kırılmış, (b) sürekli (ip). ....	11
Şekil 2.5: Aramid (keklar) elyaf; (a) kırılmış, (b) sürekli (ip). ....	12
Şekil 2.6: Bazalt elyaf; (a) kırılmış, (b) sürekli (ip). ....	12
Şekil 2.7: Cam elyaf; (a) kırılmış, (b) sürekli (ip). ....	13
Şekil 3.1: PLA'nın zincir yapısı.....	18
Şekil 3.2: PLA kullanılarak üretilen parça örneği.....	19
Şekil 3.3: Termoplastik poliüretanın zincir yapısı. ....	19
Şekil 3.4: TPU kullanılarak üretilen esnek ürün. ....	20
Şekil 3.5: PETG'nin zincir yapısı. ....	21
Şekil 3.6: PETG kullanılarak üretilen 3D parça örneği. ....	22
Şekil 4.1: Pultrüzyon yöntemi ile üretilen malzeme örnekleri.....	25
Şekil 4.2: Açık banyo pultrüzyon yöntemi üretim standı. ....	25
Şekil 5.1: Tek uçlu cam elyaf fitil ürünler. ....	26
Şekil 5.2: Cam elyaf takviyeli kompozit ip üretimi (a) termoplastik kaplama prosesi ve (b) kaplama (emprenye) işlemi. ....	28
Şekil 5.3: Beş farklı maksimum ölçüye sahip çap ayarlı nozul uçları. ....	29
Şekil 5.4: Ortam sıcaklığının ölçümü (dijital termometre). ....	30
Şekil 5.5: Sarma bobini için devir ölçer (takometre). ....	30
Şekil 5.6: Laboratuvar tipi hassas terazi (a) 10m 300 tex cam elyaf, (b) 2m PLA filament ve (c) 10m CE300/PLA.....	31
Şekil 5.7: Dijital kumpas (0.01 hassasiyetli) ile ölçüm.....	31
Şekil 5.8: Çekme testlerinde kullanılan düzenek. ....	32
Şekil 5.9: Optik görüntülemelerde kullanılan dijital mikroskop.....	33
Şekil 5.10: Kaynak kalemi prototipi. ....	34
Şekil 5.11: Kaynaklı birleştirmede kullanılan nozullar.....	34
Şekil 6.1: 300 tex cam elyaf için çekme testi eğrileri ..... 35	35
Şekil 6.2: 600 tex cam elyaf için çekme testi eğrileri ..... 36	36
Şekil 6.3: 1200 tex cam elyaf için çekme testi eğrileri ..... 36	36
Şekil 6.4: 300 tex cam elyaf; (a) test öncesi ve (b) test sonrası ..... 37	37
Şekil 6.5: 600 tex cam elyaf; (a) test öncesi ve (b) test sonrası ..... 37	37
Şekil 6.6: 1200 tex cam elyaf; (a) test öncesi ve (b) test sonrası ..... 37	37
Şekil 6.7: PLA filamentin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrisi..... 38	38
Şekil 6.8: TPU filamentin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrisi..... 38	38
Şekil 6.9: PETG filamentin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrisi ..... 38	38
Şekil 6.10: PLA filamentin (a) orijinal hali ve (b) kopma noktası ..... 39	39
Şekil 6.11: TPU filamentin (a) orijinal hali ve (b) kopma noktası ..... 39	39
Şekil 6.12: PETG filamentin (a) orijinal hali ve (b) kopma noktası ..... 40	40
Şekil 6.13: CE300/PLA ipin (a) test anı ve (b) kopma anı ..... 41	41
Şekil 6.14: CE300/PLA ipin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrileri ..... 42	42
Şekil 6.15: CE600/PLA ipin (a) test anı ve (b) kopma anı..... 42	42
Şekil 6.16: CE600/PLA ipin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrileri ..... 43	43
Şekil 6.17: CE1200/PLA ipin (a) test anı ve (b) kopma anı ..... 43	43

## ŞEKİL LİSTESİ (devam)

Şekil 6.18: CE1200/PLA ipin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrileri .....	44
Şekil 6.19: CE300/TPU ipin (a) test anı ve (b) kopma anı.....	44
Şekil 6.20: CE300/TPU ipin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrileri .....	45
Şekil 6.21: CE600/TPU ipin (a) test anı ve (b) kopma anı .....	45
Şekil 6.22: CE600/TPU ipin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrileri .....	46
Şekil 6.23: CE1200/TPU ipin (a) test anı ve (b) kopma anı .....	46
Şekil 6.24: CE1200/TPU ipin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrileri .....	47
Şekil 6.25: CE300/PETG ipin (a) test anı ve (b) kopma anı.....	47
Şekil 6.26: CE300/PETG ipin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrileri.....	48
Şekil 6.27: CE600/PETG ipin (a) test anı ve (b) kopma anı.....	48
Şekil 6.28: CE600/PETG ipin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrileri.....	49
Şekil 6.29: CE1200/PETG ipin (a) test anı ve (b) kopma anı.....	49
Şekil 6.30: CE1200/PETG ipin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrileri.....	50
Şekil 6.31: CE300/PLA ipin (a) test öncesi ve (b) test sonrası kopma noktası .....	51
Şekil 6.32: CE600/PLA ipin (a) test öncesi ve (b) test sonrası kopma noktası .....	51
Şekil 6.33: CE1200/PLA ipin (a) test öncesi ve (b) test sonrası kopma noktası .....	51
Şekil 6.34: CE300/TPU ipin (a) test öncesi ve (b) test sonrası kopma noktası .....	52
Şekil 6.35: CE600/TPU ipin (a) test öncesi ve (b) test sonrası kopma noktası .....	52
Şekil 6.36: CE1200/TPU ipin (a) test öncesi ve (b) test sonrası kopma noktası.....	53
Şekil 6.37: CE300/PETG ipin (a) test öncesi ve (b) test sonrası kopma noktası .....	53
Şekil 6.38: CE600/PETG ipin (a) test öncesi ve (b) test sonrası kopma noktası .....	53
Şekil 6.39: CE1200/PETG ipin (a) test öncesi ve (b) test sonrası kopma noktası.....	54
Şekil 6.40: Kaynak bölgesinin kayma mukavemeti–uzama (%) eğrileri (CE300/PLA) ....	55
Şekil 6.41: Kaynak bölgesinin kayma mukavemeti–uzama (%) eğrileri (CE600/PLA) ....	56
Şekil 6.42: Kaynak bölgesinin kayma mukavemeti–uzama (%) eğrileri (CE1200/PLA) ..	56
Şekil 6.43: Kaynak bölgesinin kayma mukavemeti–uzama (%) eğrileri (CE300/TPU) ....	56
Şekil 6.44: Kaynak bölgesinin kayma mukavemeti–uzama (%) eğrileri (CE600/TPU) ....	57
Şekil 6.45: Kaynak bölgesinin kayma mukavemeti–uzama (%) eğrileri (CE1200/TPU) ..	57
Şekil 6.46: Kaynak bölgesinin kayma mukavemeti–uzama (%) eğrileri (CE300/PETG)..	57
Şekil 6.47: Kaynak bölgesinin kayma mukavemeti–uzama (%) eğrileri (CE600/PETG)..	58
Şekil 6.48: Kaynak bölgesinin kayma mukavemeti–uzama (%) eğrileri (CE1200/PETG)	58
Şekil 6.49: CE300/PLA ipin (a) kaynak ve (b) sıyrılma/kopma bölgesi .....	58
Şekil 6.50: CE600/PLA ipin (a) kaynak ve (b) sıyrılma/kopma bölgesi .....	59
Şekil 6.51: CE1200/PLA ipin (a) kaynak ve (b) sıyrılma/kopma bölgesi. ....	59
Şekil 6.52: CE300/TPU ipin (a) kaynak ve (b) sıyrılma/kopma bölgesi .....	59
Şekil 6.53: CE600/TPU ipin (a) kaynak ve (b) sıyrılma/kopma bölgesi .....	59
Şekil 6.54: CE1200/TPU ipin (a) kaynak ve (b) sıyrılma/kopma bölgesi .....	60
Şekil 6.55: CE300/PETG ipin (a) kaynak ve (b) sıyrılma/kopma bölgesi.....	60
Şekil 6.56: CE600/PETG ipin (a) kaynak ve (b) sıyrılma/kopma bölgesi.....	60
Şekil 6.57: CE1200/PETG ipin (a) kaynak ve (b) sıyrılma/kopma bölgesi.....	60

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1:</b> Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	6
<b>Tablo 3.1:</b> Termoplastiklerin kaynak yöntemleri. ....	23
<b>Tablo 5.1:</b> Tek uçlu cam fitillerin teknik özellikleri.....	26
<b>Tablo 5.2:</b> Kullanılan filamentlerin bazı özellikleri. ....	27
<b>Tablo 6.1:</b> Cam elyaf fitillerin teorik ve ölçülen fiziki özellikleri.....	35
<b>Tablo 6.2:</b> Sürekli cam elyaflar için temel mekanik özellikler.....	36
<b>Tablo 6.3:</b> Termoplastik filamentler için elde edilen mekanik özellikler.....	39
<b>Tablo 6.4:</b> Termoplastikler ve kompozit ipler için hesaplanan özgül ağırlıklar.....	40
<b>Tablo 6.5:</b> Kompozit iplerin mekanik özellikleri. ....	50
<b>Tablo 6.6:</b> Kaynaklı birleştirme işlemindeki proses parametreleri.....	55
<b>Tablo 6.7:</b> Kompozit iplerdeki kaynağın (birleşmenin) mekanik özellikleri. ....	55
<b>Tablo 6.8:</b> Optimum proses parametreleri. ....	63
<b>Tablo 7.1:</b> Bazı sentetik ve kompozit kaplı iplerin mekanik ve fiziksel özellikleri. ....	65
<b>Tablo 7.2:</b> Kompozit ip ve kompozit ip kaynağın mekanik özelliklerinin karşılaştırması. ....	65

## SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ

<b>FRP</b>	: Elyaf takviyeli plastik (Fiber reinforced plastic)
<b>GFRP (CTP)</b>	: Cam elyaf takviyeli kompozit (Glass fiber reinforced plastic)
<b>CFRP</b>	: Karbon elyaf takviyeli kompozit (Carbon fiber reinforced plastic)
<b>300 tex</b>	: Teorik ağırlığı 300 g olan 1000 m uzunluğundaki sürekli cam elyaf fitil
<b>600 tex</b>	: Teorik ağırlığı 600 g olan 1000 m uzunluğundaki sürekli cam elyaf fitil
<b>1200 tex</b>	: Teorik ağırlığı 1200 g olan 1000 m uzunluğundaki sürekli cam elyaf fitil
<b>PLA</b>	: Polilaktik asit
<b>TPU</b>	: Termoplastik poliüretan
<b>PETG</b>	: Tereftalat glikol
<b>CE300/PLA</b>	: PLA kaplı 300 tex cam elyaf takviyeli kompozit ip
<b>CE600/PLA</b>	: PLA kaplı 600 tex cam elyaf takviyeli kompozit ip
<b>CE1200/PLA</b>	: PLA kaplı 1200 tex cam elyaf takviyeli kompozit ip
<b>CE300/TPU</b>	: TPU kaplı 300 tex cam elyaf takviyeli kompozit ip
<b>CE600/TPU</b>	: TPU kaplı 600 tex cam elyaf takviyeli kompozit ip
<b>CE1200/TPU</b>	: TPU kaplı 1200 tex cam elyaf takviyeli kompozit ip
<b>CE300/PETG</b>	: PETG kaplı 300 tex cam elyaf takviyeli kompozit ip
<b>CE600/PETG</b>	: PETG kaplı 600 tex cam elyaf takviyeli kompozit ip
<b>CE1200/PETG</b>	: PETG kaplı 1200 tex cam elyaf takviyeli kompozit ip
<b>A<sub>kya</sub></b>	: Kaynaklanan yüzey alanı (mm <sup>2</sup> )
<b>V<sub>f</sub></b>	: Fiber hacmi (%)
<b>ρ<sub>c</sub></b>	: Kompozit ipin özgül ağırlığı (g/cm <sup>3</sup> )
<b>V<sub>m</sub></b>	: Matris hacmi (%)
<b>ρ<sub>f</sub></b>	: Fiber özgül ağırlığı (g/cm <sup>3</sup> )
<b>T<sub>kay</sub></b>	: Kaynak sıcaklığı (°C)
<b>ρ<sub>m</sub></b>	: Matris özgül ağırlığı (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Ø<sub>ce</sub></b>	: Ortalama cam elyaf ip çapı (mm)
<b>A<sub>ce</sub></b>	: Ortalama cam elyaf ip kesit alanı (mm <sup>2</sup> )
<b>Ø<sub>ki</sub></b>	: Ortalama kompozit ip çapı (mm)
<b>A<sub>ki</sub></b>	: Ortalama kompozit ip kesit alanı (mm <sup>2</sup> )

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve bu çalışmanın başından sonuna kadar her aşamasında bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren danışman hocam Sn. Prof. Dr. Raif SAKİN'e ve sürecin en başından beri bana her hususta destek olan eş danışman hocam Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve hayatımda bana hep destek olan ve beni hiç yalnız bırakmayan kıymetli eşim Dicle KIZILÇAOĞLU'na, hiç sabırları tükenmeden hep arkamda olan ve bana hep güvenen annem Filiz KIZILÇAOĞLU'na, babam Alaattin KIZILÇAOĞLU'na ve yüksek lisans eğitimim boyunca beni destekleyen KZ Mekatroniğe ve tüm personellerine teşekkür ederim.

**Balıkesir, 2025**

**Ahmet Göktuğ Kızılçaoğlu**



## 1. GİRİŞ

Günümüzde birçok sektörde çelik tel ve sentetik ip en yaygın kullanılan iki halat tipidir. Polimer matrisli ve elyaf takviyeli kompozit fiber ipler ise son yıllarda yenilikçi malzemeler arasında yer almaktadır. Her birinin kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır. Modern imalat sektöründe kompozit gibi yenilikçi ve sürdürülebilir malzemelerin geliştirilmesi, konstrüksiyonların güvenliğini ve ekonomik verimliliğini artırmada çok önemli bir faktördür (Roh et al., 2023).

Tel halatlar madencilik, asansörler, vinçler ve havacılık gibi çeşitli alanlarda çok önemli bir bileşen olarak hizmet vermektedir (Onur, 2010). Tel halatlar yüksek aşınma direnci ve minimum çekme deformasyonu ile bilinir. Ancak tel halatlar, özellikle deniz suyu gibi tuzlu, nemli ve asitli ortamlarda çalıştıklarında paslanma ve çabuk kopmaya eğilimlidir. Bu faktörler tel halatların korozyonunu ve tel kırılmasını hızlandırarak hizmet ömürlerini azaltır (Hussain et al., 2021; Chalioris et al., 2018).

Sentetik ipler çapı yaklaşık 4mm'den fazla olan ve üç veya daha fazla koldan bükülerek, örülerek veya bir çekirdek etrafına örgülü ya da plastik film tabakası kılıf yapılarak elde edilen bir kordon parçasıdır (ISO 2001 standartları). Üretimi sağlanan sentetik ipler hafiflik, yüksek mukavemet, korozyon direnci ve mükemmel esneklik gibi çok fazla avantaja sahiptir. Sentetik liflerin, yüksek mukavemet, yüksek kuru ve yaş aşınma direnci, yüksek gerilme dayanımı gibi özellikleri halat üreticileri için vazgeçilmez özelliklerdendir (Tayyar and Alan, 2007). Çok nemli ve tuzlu deniz ortamlarında korozyonu önleyerek tel halatlardan daha yüksek performans gösterirler. Bu yüzden özellikle marina gibi deniz işletmelerinde daha sık kullanılırlar (Hussain et al., 2021; Chalioris et al., 2018).

Kompozit fiber ipler için ise kullanılan üretim malzemeleri hususunda kompozit malzemeler gelişen teknolojinin en önemli unsurlarından biridir. Son on yılda, lif takviyeli polimer kompozitler, hem akademik dünyadan hem de çeşitli endüstrilerden giderek daha fazla ilgi görmüştür. Özellikle yapısal toplulukta zayıf yapıların güçlendirilmesi konusunda büyük bir ilgi görmeye başlamıştır (Roh et al., 2023). Aynı zamanda halat sektöründe de kompozit fiber ipler kendine önemli yer bulmaya başlamıştır. Fiber ip hale getirilmiş kompozitlerde yüksek taşıma kapasiteleri, hafifliği ve korozyon direnciyle kendisini ön plana çıkarmaktadır. Kompozit fiber ipler, yakın zamanda daha umut verici ve geniş uygulama

yelpazesi sergileyeceklerdir (Hussain et al., 2021; Chalioris et al., 2018). Kompozit fiber ipler, dış mekan donanımı, dekorasyon, ambalaj, tarım, nakliye, güvenlik, elektrik yalıtım malzemeleri, kablo dolguları, kauçuk borular, contalar, yüksek sıcaklık bandı, sıcaklığa dayanıklı kumaş, denizcilik (marinalar, balık ağı), su ürünleri (kafes ağı), inşaat sektörü (perde duvar onarımı, sıva), binalar, altyapı, otomotiv, ev eşya endüstrisi ve spor malzemeleri gibi çok farklı alanlarda kullanım imkanına sahiptir (Azhar and Mon, 2022; Bertelsen and Ottosen, 2022; Mustafaraj et al., 2020; Tian-Yi-Engineering, 2024; Myrli, 2017; Myrli and Khawaja, 2019; Akro-Plastic, 2024; MatWeb, 2024; RTP-Company, 2024). Düşük ağırlık, yüksek özgül mukavemet çoğu zaman kompozit malzemelerin kullanım nedenidir (Maier and Schledjewski, 2016).

Cam, bazalt, karbon, aramid vb. yüksek cam, bazalt, karbon, aramid gibi yüksek mukavemetli sürekli elyaf demetlerinin termoset veya termoplastik reçine havuzunda ıslatılıp yüksek sıcaklıktaki bir kalıptan veya nozuldan geçirilerek çekilmesi işlemi ekstrüzyon veya pultrüzyon yöntemidir. Pultrüzyon yöntemi ile üretilen kompozit ürünlere ise imalat sonrası kesit geometrisine, ölçüsüne, yapısal tasarımına ve kullanım yerine göre kompozit ip, halat (Zhou et al., 2024), şerit kablo (Zhang et al., 2024), profil (Lorenz et al., 2024), inşaat donatısı (rebar) (Heins et al., 2023), çubuk (Naito et al., 2020), kablo (tendon) (Mihara et al., 2023), filament (Ueda et al., 2023; Matsuzaki et al., 2016; Vaneker, 2017) gibi isimler verilmektedir.

Fiber takviyeli kompozit iplerin çekme mukavemeti, fiber ve reçine matris tipi, kesit geometrisi ve imalat yöntemi ile alakalıdır. Kompozit iplerin çekme mukavemeti, yapısındaki bozukluklardan dolayı mikro fiber bükülmelerinden (mikro kırılmalar), düzensiz gerilme dağılımından, iç aşınma ve dış aşınmalardan büyük oranda etkilenir. Kompozit iplerin, düşük çekme deformasyonu, karbon ve cam gibi kırılğan fiber lif yapısından dolayı eğilmeye ve özellikle düğümlenme hassasiyet gösterir. Aşınma, yüksek fiber mukavemetinin yeterli oranda kullanılmaması veya mekanik olarak fiberlerin yeterli performansa sahip olmaması gibi farklı dezavantajları da gözden kaçırılmamalıdır. Asıl zorluk, yükü taşıyan fiberlerin ıslanmasındaki yanlışlıklardan dolayıdır. Üretimde fiberlerin mekanik özelliklerini maksimum düzeye ulaştıracak şekilde fiber-matris kombinasyonunun kullanılması, kompozit fiber ipler için en ideal olan yaklaşımdır. Bu durum yalnızca kompozit iplerin kullanım yerine göre tasarımı, uygun malzeme çifti kullanımı ve imalat parametrelerinin seçimiyle başarılabilir. Yapılan mühendislik çalışmalarında ise kompozit

iplerin maliyeti, yapısal formu, kesit tasarımı, çekme ve eğilme mukavemeti ile eğilme (bükülme) yorulması gibi mekanik özelliklerinin ele alınması gereklidir. Kompozit ipe mukavemeti, en küçük çaplı mikro liflerin veya demetlerin mekanik özelliklerinin yanında reçine matrisinin de mekanik özelliklerinden ciddi olarak etkilenir (Sakin, 2024a). Bu nedenle kompozit ip üretiminde polilaktik asit (PLA), termoplastik poliüretan (TPU), polietilen tereftalat glikol (PETG) gibi esnek, düşük elastisite modülüne sahip ve yüksek toklukta farklı termoplastik matrislerin kullanımı, deformasyonu arttırarak özellikle mikro liflerdeki ani kırılma dayanımını azaltarak çekme ve eğilme dayanımını arttırabilir. Kompozit ipler ile ilgili zorlukları etkili bir şekilde ele almak amacıyla ilk olarak; ip yapısını en küçük çaplı liflerin veya demetlerin gerilme yapılarına göre optimize etmek olabilir. İkinci olarak yapabileceğimiz, kompozit iplerin maliyeti öncelikle elyaf tipine bağlıdır. Bu yüzden, uygun maliyetli bir elyaf seçimi yapılması, kompozit iplerin genel maliyetinin düşürülmesine katkı sunar. Cam ve bazalt elyaflar, yüksek öz mukavemeti, yüksek korozyon direnci ve mükemmel maliyet/özellik mukavemet özelliklerine sahiptir (Zhou et al., 2024; Sakin, 2024a).

Polietilen Tereftalat glikoliz (PETG), termoplastikler arasında zayıf asitlere, bazlara ve çoğu çözücülere karşı dayanımı olduğu kadar, sağlamlık, sertlik, parlaklık ve yüksek darbe dayanımı gibi özellikleriyle de üstündür. Ayrıca PET'in gaz geçirgenliği diğer plastiklerin çoğundan daha düşüktür (Ahrabi et al., 2012). Polilaktik asit (PLA)'in kullanımının yaygın olmasının sebebi PLA, biyouyumlu ve biyo çözümlü özellikte olması ve düşük maliyeti ile öne çıkmaktadır (Tábi et al., 2010). PETG ve PLA'nın haricinde özellikle termoplastik poliüretan (TPU) gibi esnek, düşük elastisite modülünü sahip ve yüksek toklukta bir matris kullanarak deformasyonu arttırıp özellikle mikro liflerdeki ani kırılma dayanımını azaltıp çekme ve eğilme dayanımını arttırabileceğini ve bu şekilde çok daha çeşitli sonuçlar elde edileceği düşünülmüştür.

Cam elyafının mekanik özellikleri karbon elyafından biraz daha düşük olsa da çok daha az kırılma ve karbon elyafa göre daha ucuzdur. Özellikle E-tipi cam elyafı, hafif, mukavemeti yüksek, düşük maliyetli, iyi yalıtım sağlayan, düşük su emiş oranına sahip, Türkiye'de Şişecam Elyaf Sanayii A.Ş. tarafından üretilen yerli bir elyaf türüdür. Dolayısıyla cam elyafları polimer matrisli kompozitlerde en yaygın kullanılan, optimum birim maliyet / özgül mukavemet performansı elde etmede çok önemli seçeneklerden biridir (Maier and Schledjewski, 2016; Zhou et al., 2024; Sakin, 2024b).

Bu tez çalışmasında; elyaf ve matris tipi, ortam sıcaklığı, ekstrüzyon sıcaklığı, ekstrüzyon besleme hızı, ip çekme hızı (ip çekme, sarma bobini devri) ve nozul çapına bağlı kaplama hacmi gibi malzeme ve imalat parametreleri değiştirilebilen masa üstü kompozit ip üretim prosesi geliştirilmiştir. Bu proses ile 200–260°C arasında ısıtılabilen hazneye termoplastik poliüretan (TPU), polilaktik asit (PLA) ve polietilen tereftalat glikol (PETG) malzemeleri ile sürekli E-cam elyafların yüzeylerine kaplama işlemi yapılmıştır. Üretimi yapılan kompozit iplerin çekmeye bağlı uzama (%), mukavemet gibi mekanik özellikleri deneysel olarak elde edilmiştir. Bunlar ile birlikte kompozit ipler birbirleri ile kaynak edilip kaynak noktalarında ki dayanımları test edilmiştir. Çalışma sonuçları değerlendirilmiş ve kompozit iplerin olası kullanım alanları açıklanmıştır.



## **2. KOMPOZİT MALZEMELER**

Kompozit malzemeler, insanlık tarihinin en eski zamanlarından itibaren kullanılan ve gün geçtikçe gelişerek günümüz mühendislik uygulamalarının vazgeçilmez bir parçası haline gelen malzemelerdir. Kompozit malzeme, iki veya daha fazla farklı malzemenin birleştirilmesiyle elde edilen ve bu şekilde tek tek malzemelerin sahip olduğu özelliklerden daha üstün mekanik, termal ve kimyasal özellikler sergileyen bir yapıya sahiptir.

### **2.1 Kompozit Malzemelerin Temel Bileşenleri**

#### **2.1.1 Matris malzemeleri**

Kompozit yapılarda matrisin temel olarak görevi; takviye elemanlarını beraber tutmak, yükü takviye elemanına uygun şekilde dağıtmak ve takviye elemanını çevresel faktörlerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıya sahipken daha sonra takviye elemanlarını sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilecek katı forma rahatça geçebilmelidir (Asi, 2008).

Kompozit malzemelerde matrislerin görevleri ise kısaca şunlardır (Özer, 2015);

- Matris malzeme, takviye elemanlarını beraber tutarak hareket etmelerine izin vermez.
- Kompozite uygulanan yüklerin takviye elemanlarına eşit dağıtılmasını sağlar.
- Kompozit malzemelerin şeklini verir ve malzemelerin katı formda kalmasını sağlar.
- Dış faktörlerden kaynaklanan fiziksel ve kimyasal etkilere karşı kompoziti korur.

#### **2.1.2 Takviye malzemeleri**

Takviye malzemesinin görevi, matris malzemesini güçlendirip oluşan kompozit yapının dayanım özelliklerini arttırmaktır. Takviye elemanı, kompoziti etkileyen yükün büyük çoğunluğunu taşımaktadır. Yükün takviye elemanına gönderilebilmesi için bileşenler arasında fiziksel ve kimyasal uyumun uygun olmasının yanında ara yüzey bağı da yeterince güçlü olmalıdır. Kompozit malzemelerde geri dönülemez yapısal gerilmeler olmaması için, takviye elemanı ile matris elemanının ısı genleşme katsayıları da uyumlu olmalıdır. Kompozit malzeme üretiminde kullanılacak takviye elemanından, yüksek elastik modül, yüksek dayanım, düşük yoğunluk, kimyasal uyum, üretim kolaylığı ve ısı direnç gibi bazı özellikler istenmektedir (Harris, 1999).

## 2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması matris ve takviye elemanlarının özelliklerine göre yapılmaktadır. Uygun sınıflandırma Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

**Tablo 2.1:** Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

<b>Kompozit malzemeler</b>	
<b>Matris malzemesine göre</b>	<b>Takviye malzemesine göre</b>
Metal matrisli kompozitler	Elyaf takviyeli kompozitler
Seramik matrisli kompozitler	Parçacık takviyeli kompozitler
Polimer matrisli kompozitler	Lamine kompozitler

### 2.2.1 Matris malzemesine göre kompozitler

#### 2.2.1.1 Polimer matrisli kompozitler

Organik polimer matrisinin sahip olduğu fiberlerden meydana gelen kompozitler polimer matrisli kompozitlerdir. Bu kompozitler son zamanlarda çeşitli potansiyel çalışmalarda kullanılmaktadır. Mevcut araştırmalarda, inorganik nano malzemeler fiziksel karıştırma yöntemiyle polimer matrislere dahil edilmiştir. Kompozit malzeme üretiminde yaygın olarak tercih edilen polimer matris türleri; termoplastikler, termosetler ve elastomerlerdir. Polimer matrisli kompozitlerin üstün özellikleri ise şu şekilde sıralanabilir:

- Yoğunlukları düşüktür
- Aşınma direnci ve korozyon dayanımı yüksektir
- Materyal kararlılığına sahiptir
- Isı ve elektrik yalıtımı yüksektir
- Kolay şekillendirilebilir
- İyi optik özelliklere sahiptir

Bu bilgilere karşın özellikle sertlik ve mukavemet konularında bazı dezavantajları vardır. Bu dezavantajları tersine çevirmek ve aynı zamanda üstün mekanik özelliklere sahip olabilmesi adına çeşitli ilaveler ile polimer malzemeler güçlendirilir. Polimer matrisli kompozit malzemeler birçok yöntemle ile oluşturulabilmektedir. Uygun yöntem, istenilen kalite düzeyi, üretim hacmi ve maliyet gereksinimlerine göre belirlenebilir (Balasubramanian, 2014; Strong, 2008; Chawla, 2012).

Açık kalıplama işlemlerinde en çok tercih edilen yöntemler aşağıda verilmiştir: (a) El yatırma, (b) Profil çekme (pultrüzyon), (c) Enjeksiyonla kalıplama, (d) Elyaf sarma, (e) Püskürtme, (f) Torbalama ve (g) Kalıplama

Kapalı kalıplama yöntemleri ise: (a) Reçine transfer kalıplama (RTM), (b) Hazır kalıplama, (c) Enjeksiyonla kalıplama ve (d) Savurma kalıplama yöntemi şeklinde özetlenebilir.

### **2.2.1.2 Metal matrisli kompozitler**

MMC olarak adlandırılan metal matrisli kompozitler, farklı malzemelerin uyumlu bir birleştirme ile belirli mühendislik özelliklerinin elde edildiği yapılar olarak tanımlanabilir. Yoğunluk, sertlik ve güç özelliklerinin birlikte sağlanması açısından monolitik malzemeler bazı sınırlamalar göstermektedir. MMC'ler, metal matris içinde bulunan sürekli veya kesikli takviye elemanları sayesinde geniş bir birleşim çeşitliliğine sahiptir. Metal matrisli kompozitler, alaşım matris içinde yer alan sürekli ya da süreksiz takviye elemanlarıyla yapılandırılır ve bu yapı, monolitik alaşımlarla elde edilemeyen özelliklerin kazandırılmasına olanak tanır. Metal matrisli kompozitler, yüksek performanslı malzemelere olan ihtiyacın bir sonucu olarak, özellikle ileri askeri uygulamalarda kullanılmak üzere yeni ve farklı bir teknoloji biçiminde geliştirilmiştir. Bu yüzden elde edilen deneyiminden sonra basitçe ticarileşmesi sağlanmıştır. 1980'lerin sonuna doğru önemi artan savunma sanayinde yaşanabilecek olumsuz durumlara duyulan ve gün geçtikçe artış gösteren duyarlılık, yeni üstün özellikli materyallerin sisteme girmesini güçleştirdi. Metal matrisli kompozitler gibi gelişmiş malzemelerin tasarımı ve uygulama alanlarının genişletilmesi çeşitli güçlükler doğurmuştur. 1980'lerin son dönemlerinde, yüksek performanslı MMC malzemeleri, ABD'deki NASP programı ve diğer bazı lider ülkelerdeki benzer projelerde önemli bir ilgi alanı olmuştur. Takviye malzemesi ve matrisin uygunluğu, yük dağılımını uygun seviyede tutabilen maliyeti düşük birincil ve ikincil üretim yöntemleri, tasarım yöntemleri, ara yüzlerin karakterizasyonu ve kontrolü dahil olmak üzere zorlu teknik sorunların üstesinden gelinmiştir. MMC'ler artık yerleşik ve dinamik bir malzeme teknolojisidir (Balasubramanian, 2014; Strong, 2008; Chawla, 2012; Eisen et al., 1998).



Şekil 2.1: Metal matrisli kompozit örneği

### 2.2.1.3 Seramik matrisli kompozitler

Seramik malzemeler genellikle faydalı fiziksel ve mekanik özelliklerin bir kombinasyonunu sergiler, ancak kırılma eğilimine sahip olduklarından dolayı çok fazla kullanımı yapılamamaktadır. Seramik malzemelerin tokluğunu ve mukavemetini iyileştirmek amacıyla parçacık iyileştirme ve elyaf ekleme yöntemleri uygulanmıştır. Seramik matrisli kompozitlerde mekanik performansı belirleyen unsurlar tartışılmış ve farklı deneysel yaklaşımlar gözden geçirilmiştir (Donald and McMillan, 1976). Seramik malzemeler, yüksek sıcaklık koşullarında yüksek mukavemet ve sertlik sağlarken, aynı zamanda kimyasal eylemsizlik ve düşük yoğunluk gibi avantajlara sahiptir. Fakat sağlamlıkları zayıftır. Üretim veya hizmet sürecinde, termal şoka karşı hassas yapıları nedeniyle seramikler kolaylıkla hasar alabilir. Dolayısıyla, seramik matrisli kompozitler (CMC'ler), seramik yapıya lif ilavesiyle sertlik kazandırılarak, kırılma eğilimi gibi olumsuzluklar ortadan kaldırılıp, seramiklerin yüksek sıcaklık ve çevresel koşullara karşı dayanıklılığında güvenle faydalanmayı sağlar. Seramik matrisli kompozitlerin ve geri kalan kompozitlerin aralarında önemli farklılıkların olduğu belirtilmelidir. Seramik dışı matris kompozitlerin ana prensibi, liflerin yük taşıma kapasitesini artırarak yapının dayanımını artırmaktır. Yükün fiber ve matris arasında nasıl paylaşıldığı, esas olarak fiberin elastik modülünün matrise oranına ( $E_f/E_m$ ) bağlıdır. Seramik olmayan matrisli kompozitlerde bu oran genellikle yüksekken, CMC'lerde (seramik matrisli kompozitlerde) oldukça düşük olabilmektedir. CMC'lerin dikkat çeken bir diğer özelliği matrisin sınırlı sünekliği ve üretimdeki yüksek sıcaklık koşullarının, bileşenler arasındaki termal uyumsuzluğu önemli ölçüde etkilemesidir. Bunun yanı sıra, kimyasal uyumsuzluklar MMC'lerde olduğu gibi CMC'lerde de benzer etkiler doğurabilir. (Chawla and Chawla, 2012).



**Şekil 2.2:** Seramik matrisli kompozit örneği

## **2.2.2 Takviye malzemesine göre kompozitler**

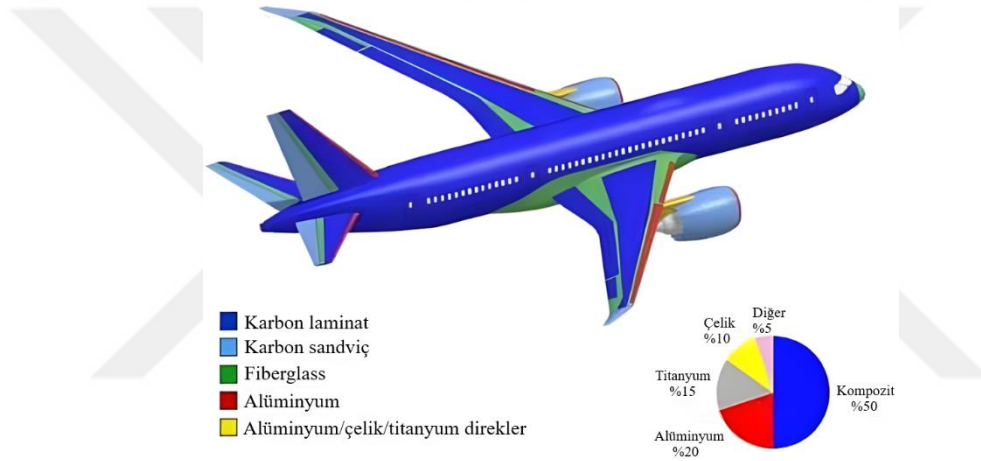
### **2.2.2.1 Parçacık takviyeli kompozitler**

Parçacık takviyeli ve makroskobik olarak izotropik iki fazlı kompozitlerde, yapısal davranış büyük ölçüde malzeme özelliklerine, matrisin hacim fraksiyonuna ve yapının homojenlik düzeyine bağlıdır. Parçacıkların şekli ve bileşenlerin geometrik düzeni genellikle ikincil öneme sahip olsa da bu faktörler mikro ölçekteki gerilme ve deformasyon alanları üzerinde ciddi etkiler yaratabilir. Parçacık şeklinin etkilerini doğrudan deneysel yollarla analiz etmek zor olabilir; ancak sayısal deneyler gibi veri tabanlı yöntemler, bu kompozitlerin termomekanik özelliklerine dair önemli bilgiler sağlayabilir. Bu tür kompozit malzemelerin termoelastoplastik davranışlarını analiz etmede en gelişmiş yaklaşım, yapının mikroskobik ölçekteki gerilme ve gerinim alanlarını üç boyutlu sayısal modellerle yüksek doğrulukla simüle edebilmektir. Bu tür yaklaşımlarda, kompozitlerin mikrogeometrileri, en doğru şekilde konumlandırılmış ve uygun olduğunda, matris içerisinde gömülü olan doğru şekilde yönlendirilmiş parçacıkların şeklini alır. Birçok durumda, bu tür faz modifikasyonlarının istatistiksel olarak homojenlik gösterdiği kabul edilir. Hacim elemanları modellerde temsil amaçlı kullanılır ve seçilen geometrik detaylar ile sınır koşullarından etkilenmeden, homojenleştirilmiş davranışı sağlayacak yeterlilikte heterojenliği barındırırlar. (Mansouri et al., 2020; Chawla and Shen, 2001).

### **2.2.2.2 Lamine kompozitler**

Metal malzemelere göre üstün performans gösteren fiber takviyeli lamine kompozitler, havacılık, denizcilik ve spor malzemeleri gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır. Termal yüklere maruz kalan kompozit yapılar çok büyük hasarlara maruz kalabilir. Mikro çatlak oluşumu, fiberlerin kırılması ve delaminasyon, lamine kompozitlerin karakteristik hasar davranışlarıdır. Katmanlı yapıda, kalınlıktaki enine mikro çatlamlar ilk hasar türü olarak ortaya çıkar ve sonrasında delaminasyon gelişir. Gerçekleşen hasarın en son aşamasında ise

fiber kırılması yaşanır. Ancak yalnızca mikro çatlak oluşumu ve ardından delaminasyon ile birlikte de çok büyük arıza durumları oluşabilir. Kompoziti oluşturan malzeme yapıları, fiber yerleşimi, istifleme düzeni ve yükleme koşulları gibi faktörler, lamine kompozitlerdeki karmaşık hasar davranışını belirler. Tabaka sınırlarındaki normal ve kayma tipi gerilmeler, delaminasyonun başlıca nedenleri arasındadır. Tabaka sınırındaki gerilmeler, lamine kompozitlerde serbest yüzeyin civarında daha kolay meydana gelebilir. 1970'lerden bu yana, tek eksenli yükleme altındaki lamine kompozitlerin serbest kenarlarında oluşan delaminasyon davranışı araştırılmaktadır. Bu süreçteki tabakalar arası gerilme bileşenleri; laminat yerleşimi, istif sırası, malzeme nitelikleri ve yükleme koşullarına göre önemli ölçüde değişkenlik gösterir (Sihn et al., 2007).



Şekil 2.3: Yolcu uçaklarında kullanılan malzemeler (Zhang Hongyu., 2019)

### 2.2.2.3 Elyaf takviyesine göre kompozit malzemeler

Kompozit malzemelere uygulanan fiber takviyesi, yüksek özgül dayanım, özgül sertlik ve istenen özelliklere uyarlanabilme kabiliyetleri nedeniyle, bu malzemeler geleneksel malzemelere alternatif olarak her geçen gün daha fazla tercih edilmektedir. Bununla birlikte, kompozitlerin sahip olduğu viskoelastik davranış, bu malzemelerin havacılık, denizcilik ve otomotiv gibi ileri mühendislik uygulamalarında tercih edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, fiber takviyeli kompozit malzemeler, metallere göre yapı gereksinimi açısından önemli ölçüde farklıdır. Bunun nedeni, öncelikle matris çatlaması, delaminasyon ve elyaf bozulması gibi kendine özgü birkaç hasar mekanizması göstermeleridir. Hem statik hem de dinamik açıdan kompozitlerin performansını değerlendirmek amacıyla mikromekanik, makromekanik ve yapısal modelleri kapsayan çeşitli analitik yöntemler mevcuttur (Chandra et al., 1999).

### 2.3 Sürekli Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler

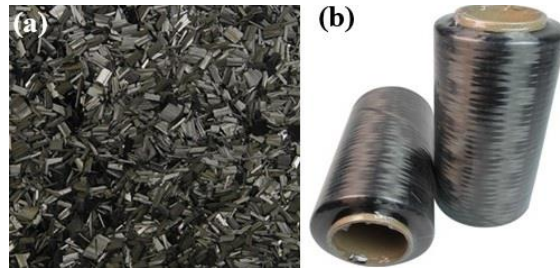
Sürekli elyaflar, anizotropilerinin kontrollü olması, yüzey boyutlarının küçük olması ve yüzey kusurları sebebiyle mukavemet ve sertlik gibi özelliklerde maksimum değerlere çıkabilen sınırsız liflerdir. Sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemelerde yük, çoğu zaman yükün yönü boyunca yönlendirilmiş elyaf sayesinde taşındığı düşünülmektedir. Sürekli elyaf takviyelerde yapı içinde genellikle lif demeti, bir taraflı kumaş, desenleri farklı dokunmuş kumaşlar veya kumaşların örülmesi olarak kullanılmaktadır. Elyafların matris içindeki yönelimleri malzemenin dayanımını ortaya koyan ana faktördür. Boylamasına yapılan dizilimde kompozite etki eden yük eğer elyaflar ile aynı yönde olursa en yüksek dayanım değeri elde edilir. Etki eden yükün elyaflar ile aynı doğrultuda olmaması durumunda, az da olsa farklı açıda olması bile, yapının dayanımında büyük düşümlere neden olur. Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf genellikle üç farklı şekilde bulunmaktadır. Sürekli elyaf kullanımı ile değiştirilen karma yapılar içerisindeki elyaf yönelimleri, kompozit malzemelerin farklı yönlerde maruz kalacakları gerilimlere farklı tepkiler vermesine sebep olmaktadır (Türkoğlu, 2020).

#### 2.3.1 Sürekli elyaf türleri

Sürekli elyaflar arasında en sık kullanılan elyaf çeşitleri cam elyaf, karbon elyaf, aramid elyaf ve bazalt elyafıdır.

##### 2.3.1.1 Karbon elyaf

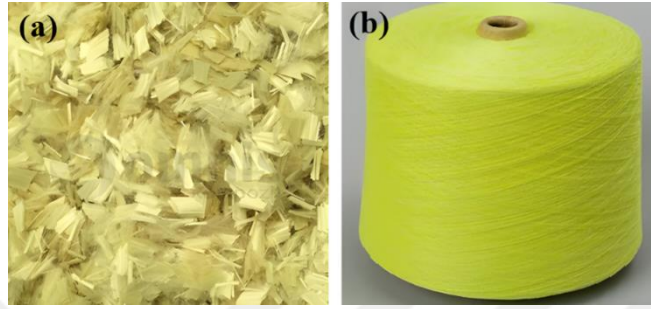
Karbon elyafı, çok yüksek “mukavemet / ağırlık” oranına (özgül mukavemet) sahiptir. Sertlik ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir. Havacılık, uzay ve otomotiv sanayilerinde yaygın olarak kullanılan karbon elyafı, yüksek termal kararlılığı ve kimyasal direnci ile öne çıkmaktadır. Ancak, karbon elyafının üretim maliyetinin çok yüksek olması ve kırılma göstermesi bazı dezavantajlar yaratmaktadır.



Şekil 2.4: Karbon elyaf; (a) kırılmış, (b) sürekli (ip)

### 2.3.1.2 Aramid elyaf

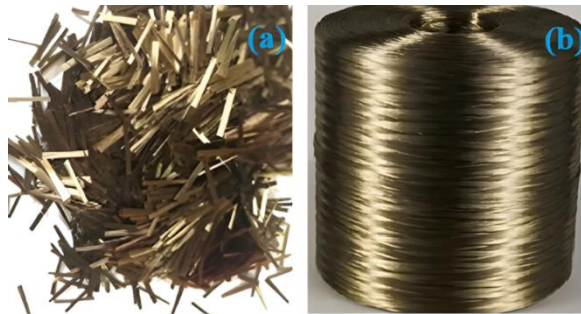
Aramid elyafı (keklar gibi ticari ürünlerle bilinir), yüksek darbe dayanımına ve aşınmaya karşı yüksek bir dirence sahiptir. Hafif olması ve esneklik göstermesi sebebiyle balistik koruma, otomotiv ve spor ekipmanları gibi alanlarda kullanılmaktadır. Ancak, UV ışınlarına ve nem etkilerine karşı duyarlılığı sebebiyle koruyucu kaplamalar gerektirebilir.



Şekil 2.5: Aramid (keklar) elyaf; (a) kırılmış, (b) sürekli (ip)

### 2.3.1.3 Bazalt elyaf

Bazalt elyafı, volkanik kayalardan elde edilen ve cam elyafına alternatif olarak geliştirilen bir malzemedir. Yüksek sıcaklık dayanımına sahip olan bazalt elyafı, kimyasal ve korozyon direncinin yüksek olması nedeniyle inşaat ve altyapı projelerinde kullanılmaktadır. Cam elyafına göre daha dayanıklı olmasına rağmen, karbon elyafı kadar yüksek mekanik özelliklere sahip değildir.



Şekil 2.6: Bazalt elyaf; (a) kırılmış, (b) sürekli (ip)

### 2.3.1.4 Cam elyaf

Cam elyafın icadı Rene Ferchault de Reaumur'a aittir. Büyük çaplı üretim ancak 18. yüzyılın sonlarına doğru mümkün olmuştur. İlk zamanlar cam elyaflarının ipek benzeri bir şekilde dokunması teknik olarak gerçekleştirilememiştir. Owens-Illinois Glass Company'nin 1935'te cam elyafını ipliğe dönüştürmesine kadar, yani 18. yüzyıldan 1935 yılına kadar cam

elyafı yaygın bir kompozit malzeme değildir. 1942 yılında havacılık endüstrisinde kompozit malzeme olarak kullanımı başlayan cam elyafı, sonrasında S-2 tipi cam elyafı olarak pek çok ticari uygulamada hızla yer buldu. Cam elyafı ve cam yünü arasındaki fark, cam yününün lif çapının farklı olması ve bu çapın kısıtlı tutulmasıdır. Camın soğutma özelliklerindeki farklılıklar, cam yünü üretiminde yapının hassas ve kırılğan olmasını sağlar. Kompozitlerin sağlamlık ve takviye özelliklerini yükseltmek için cam elyaflar kullanılır. Cam yünü, başlıca ısı yalıtımı malzemesi olarak görev yapar; cam elyaflar ise başka kullanım alanlarının yanı sıra ısı yalıtımında da kullanılabilir.

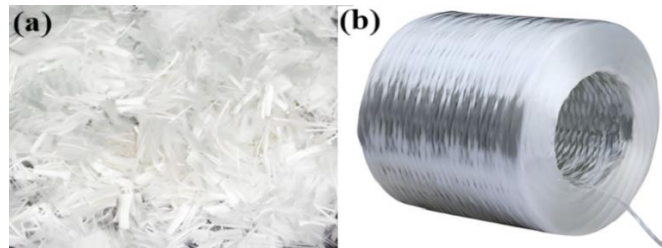
Avantajları;

- Fiyatı diğer liflerden uygundur.
- Çekme Mukavemetleri yüksektir.
- Etkili bir yalıtım sağlar.
- Yüksek kimyasal dirence sahiptir.
- Termal etkilere karşı dayanıklıdır.

Dezavantajları;

- Karbon fiber ile karşılaştırıldığında çekme dayanımı daha düşük seviyededir.
- Yoğunluk, karbon ve aramid elyaflara göre nispeten yüksektir.
- Taşıma sırasında hasara karşı hassastır.
- Yorgunluk dayanımı kısmen zayıftır.

Cam elyafları, hem genel hem de özel türler olarak sınıflandırılabilir. E-cam elyafı, en çok bilinen çeşidi olup ticari anlamda "cam elyafı" olarak adlandırılır. Cam elyaflarının diğer türleri özel tipler olarak adlandırılır. Çok sayıda özel cam elyaf türü bulunmaktadır; bunlar arasında S-glass, D-glass, A-glass, ECR-glass, ultra saf silika elyaflar, içi boş elyaflar ve trilobal elyaflar sayılabilir.



Şekil 2.7: Cam elyaf; (a) kırılmış, (b) sürekli (ip)

## **E-Cam Elyaf**

Piyasada Cam Elyaf olarak bilinmektedir. Alüminyum bor silikat cam elyaflar, %1'in altında alüminyum oksit ve diğer alkali oksit bileşenleri içerir. Bu nedenle alkali içeriği oldukça düşüktür. Her ne kadar elektronik uygulamalar için geliştirilmiş olsalar da, günümüzde birçok farklı alanda kullanılan ve dünya genelinde en yaygın cam elyaf formülüdür. Termoset reçinelerle bir araya gelerek cam takviyeli plastiklerin üretilmesini sağlamıştır. Plastik paneller ve levhalar, günümüzün hemen her endüstri alanında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Mekanik darbeler ve etkiler karşısında yapısal bütünlüğünü koruma konusundaki başarısı sayesinde, her geçen gün daha çok sektörde tercih edilmektedir.

### **2.4 Cam Elyaf Takviyeli Kompozitler**

Yapı ve inşaat sektöründe cam elyaf takviyeli kompozitlerin kullanımı, uzun yıllar boyunca sınırlı kalmıştır. Fiber takviyeli kompozitler, son zamanlarda hızla bozulan altyapının onarımı ve güçlendirilmesi ihtiyacından dolayı daha geniş alanlarda uygulanmaya başlanmıştır. Geleneksel yapı malzemeleriyle karşılaştırıldığında, bu malzemeler dış etkiler ve yorgunluğa karşı çok iyi direnç gösterirken, yüksek modül/ağırlık ve mukavemet/ağırlık oranlarına sahiptir. Ayrıca, kompozit malzemelerin yaygın kullanımını kısıtlayan faktörlerden biri, uzun vadeli performans ve dayanıklılık bilgilerine ilişkin eksikliklerdir. Yorulma ve çevresel yorulma konusunda son 30-40 yılda kompozit malzemelerle ilgili çok sayıda çalışma yapılmış, ancak yapısal kompozitlere ilişkin çalışmalar daha çok havacılık uygulamalarına odaklanmıştır. Günümüzde inşaat sektöründe, havacılıkta kullanılan karbon fiber takviyeler yerine, daha uygun maliyetli olan cam takviyelere daha çok önem verilmektedir. Bunun yanında, altyapı alanlarındaki kullanım süresi çok daha uzun olabileceği öngörülmektedir. Kısaca, eski verilere dayanarak genel bir çerçeve oluşturulsa da, düşük maliyetli ve büyük miktarlarda üretim sağlayan pultrüzyon yöntemiyle üretilen kompozitlerin altyapı uygulamalarındaki performansına dair yeni çalışmalar büyük ilgi görmektedir. Özellikleri farklı uygulamaların özel taleplerine uyacak şekilde modifiye edilebildiğinden, cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler oldukça ilgi çekicidir. Mekanik ve termal özellikler bir kompozitte genellikle karışım kuralına uyar. A-camı elyafı, ağırlıkça %75 (hacimce %60) oranında ana bileşeni oluşturur; bu yüzden doğru cam seçimi önemlidir. Cam elyaf takviyeleri; sürekli fitiller, kıyılmış elyaflar ve kumaşlar gibi birçok formda mevcuttur. Bir takviye ürününün seçimi, forma ek olarak cam türü, filament çapı ve tex değerinin belirlenmesini içerir. Cam tipi veya formülasyonu, malzemenin mekanik, termal ve korozyon performansını etkiler; boyutlandırma ise camın korunması ve reçine sistemiyle

uygun etkileşim kurmasını sağlar. Farklı üretim teknolojileri kullanılarak elde edilen cam elyaf takviyeli polimer kompozitler, çeşitli endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin yüksek mekanik performansı, son yıllarda bu malzemelere yönelik araştırmaların artmasına neden olmuştur. Cam elyaflar, mekanik özellikler açısından yüksek mukavemet, iyi esneklik, sertlik ve uzun ömürlülük gibi avantajlara sahiptir. Cam elyaf hacminin artırılmasıyla, cam elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerinde belirgin iyileşmeler sağlanmıştır. Mekanik yüklere maruz bırakılan farklı polimer matrisli cam elyaf takviyeli kompozitlerin performansları detaylı biçimde incelenmiş ve literatürde raporlanmıştır (Morampudi et al., 2021).

#### Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Avantajları;

- Geniş yelpazedeki kimyasallara karşı dirençlidir.
- Kütle olarak oldukça hafiftir.
- Termal genleşme katsayısı düşüktür.
- İyi bir yalıtıcıdır.
- Radyo ve elektromanyetik dalga geçirgenliğine sahiptir.
- Üretim aşamaları ve maliyet açısından daha avantajlıdır.
- Düşük sıcaklık koşullarında yüzey hasarını önlemek üzere darbe yükünü sönümler.
- Yüksek sertliğe sahip olmasına rağmen esnek yapıya sahiptir.
- Bakıma ihtiyaç duymaz, uzun ömürlüdür.
- Yüksek özgül mukavemete sahiptir.

### **3. TERMOPLASTİK MALZEMELER**

#### **3.1 Termoplastiklerin Kısa Tarihi**

Termoplastik malzemelerin tarihi, 19. yüzyılın ortalarına kadar uzanır. İlk sentetik plastik, 1862'de Alexander Parkes tarafından keşfedilen Parkesin ile başladı. Bu malzeme, reçinelerin alkol ile karıştırılmasıyla elde edilen, ısıtıldığında Şekil alabilen bir plastikti ve plastiklerin ticari üretimi için önemli bir ilk adımdı. 1907'de Leo Baekeland tarafından geliştirilen Bakelit, termoset plastiklerin ilk örneği olarak büyük bir devrim yarattı. Bakelit, dayanıklılığı ve ısıya karşı gösterdiği dirençle elektrikli cihazlarda ve otomotivde yaygın olarak kullanıldı. 1920'lerde Polivinil Klorür (PVC) ve Polistiren (PS) gibi malzemeler geliştirildi ve bu malzemeler özellikle ambalaj sanayi ve inşaat sektörlerinde kullanılmaya başlandı. 1930'larda Polietilen (PE), ilk başta düşük yoğunluklu formuyla, ardından 1950'lerde yüksek yoğunluklu formuyla (HDPE) geliştirildi. Polietilen, dünya çapında en yaygın kullanılan termoplastiklerden biri haline geldi. Aynı dönemde Polietilen Tereftalat (PET), 1940'larda Polistiren (PS) ile birlikte popülerleşti. PET, özellikle şişe üretiminde kullanılarak ambalaj endüstrisini dönüştürdü. 1950'lerin sonunda Polipropilen (PP) ve Naylon (PA) gibi yüksek performanslı malzemeler geliştirildi. Polipropilen, kimyasal direnci ve esnekliği ile endüstriyel uygulamalar için ideal hale gelirken, Naylon da tekstil ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanıldı. 1990'lardan sonra çevre duyarlılığının artmasıyla birlikte, biyobozunur termoplastiklere olan ilgi de arttı. Polilaktik Asit (PLA) gibi biyolojik kaynaklardan türetilen plastikler, çevre dostu alternatifler olarak gelişti. Aynı dönemde Termoplastik Poliüretan (TPU) gibi elastik ve dayanıklı malzemeler, otomotiv, ayakkabı ve elektronik sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaya başlandı. Günümüzde termoplastikler, yalnızca otomotivden ambalaja kadar çok geniş bir yelpazede kullanılmakla kalmayıp, aynı zamanda ileri üretim teknolojileriyle (örneğin 3D baskı) sürekli olarak gelişen malzemelerdir. Termoplastiklerin sağladığı esneklik, dayanıklılık ve işlenebilirlik, modern sanayinin en önemli yapı taşlarından birini oluşturur.

#### **3.2 Termoplastiklerin Genel Özellikleri**

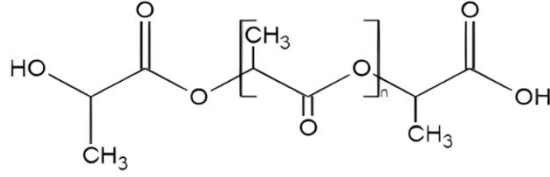
Termoplastikler yüksek kırılma tokluğuna sahip olan malzemelerdir. Termoset malzemelere göre diğer fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından da bazı konularda öne çıkmaktadır. Kolay geri dönüştürülebilir olmaları, korozyon dayanımları, aşınma dayanımları ve düşük toksisite özellikleri başlıca özelliklerindedir. Ayrıca raf ömrü bakımından herhangi bir sınırlama söz konusu değildir, oda sıcaklığında istenildiği kadar muhafaza edilebilirler.

Termoplastikler tamamen polimerize olabildikleri için kürlenmeye mecbur olan termosetlere göre daha hızlı ürüne dönüştürülebilirler. Bu yüzden termoplastiklerin üretimi termosetlere göre daha kısa zamanda gerekleŒir. Ayrıca kürlenme yani otoklav gerektirmedikleri için termosetlerde  retilenemeyen bazı büyük parçaların  retilenmesini mümkün kılar. Otoklavsız üretimden dolayı termosetlere göre daha d Œ k maliyetler ile  retilerler. Termoplastik malzemelerin kürlenme ile kimyasal yapıları deėiŒtirilmedikleri için termoplastik malzemeler eritilerek rahatça tekrar Œekil alabilirler. Bu avantajından dolayı kaynakla birleŒtirmeleri mümkündür. Bu Œekilde havacılıkta kullanılan bazı çok büyük parçalar daha hızlı ve daha ekonomik olarak üretilmektedir. Hepsinin yanında termoplastiklerde gerekleŒtirilen direnç, indüksiyon ve lazer gibi kaynak teknikleri kullanarak montaj iŒçiliėi çok az olacak Œekilde büyük boyutlu parçaların üretimini mümkün kılar. Eritilip tekrardan Œekil verilerek kolayca tamir edilebilme imkanlarına olanak sunmaktadır. Bu  zellikleri ile termoplastikler ve termosetler önemli oranda ayrıŒmaktadır. Termoplastikler, normal Œartlarda katı haldedirler ve oda sıcaklığında bulunurlarken ısıtıldıklarında viskoz bir duruma geiŒ yaparlar, devamında ise erime sıcaklığını ( $T_m$ ) geçtikleri zaman akıŒkan hale gelirler. Termoplastiklerin iŒlenmesi anında kimyasal çapraz bağlanma oluŒmaz. Bu özelliklerinden yararlanarak termoplastik malzemeler, mühendislik uygulamalarında sıklıa kullanılmakta olup önemli bir yere sahiptirler, çünkü malzeme özelliklerinde herhangi bir deėiŒme olmadan tekrar ısıtılabilir, geri d n Œt r lebilir ve yeniden Œekillendirilebilirler. Bunlardan dolayı, termoplastik gibi malzemeler çoğunlukla ekstrüzyon, termal Œekillendirme ve enjeksiyon kalıplama gibi üretim proseslerinde yaygın olarak kullanılırlar (Wang et al., 2011).

### **3.3 Eklemeli İmalatta Kullanılan Bazı Termoplastikler**

#### **3.3.1 Polilaktik asit (PLA)**

Polilaktik asit (PLA) tamamen yenilenebilir kaynaklardan üretilen evre dostu olan bir alifatik polyesterdir. PLA  $[(C_3H_4O_2)_n]$  doğada bulunan kaynaklardan (mısır, Œeker pancarı, buğday, biyopolimerler vs.)  retilerek eriyikten çekme yöntemiyle üretilen ilk lif olma özelliği ile öne çıkmaktadır. PLA doğa dostu oluŒu, mevcut endüstriyel makinelerle ve araçlarla iŒlenebilme kabiliyetinin yüksek olması, ulaŒılabilir ve ekonomik olması sayesinde tekstil, plastik ve paketleme alanlarında ticari olarak giderek artmakta olan ilgiye sebep olmaktadır (Jacobsen et al., 1999).



**Şekil 3.1:** PLA'nın zincir yapışı

PLA polimerinin monomeri mısır, buğday gibi çok üretilen tarım ürünlerinden üretilebildiği için ulaşılabilirlik açısından sürdürülebilirdir. PLA üretimi, petrole dayanan polimerlerin üretiminden çok daha az fosil enerjisi gerektirmektedir. Bununla birlikte çok daha az fosil yakıtına ihtiyaç duymaktadır. Bu yüzden ortaya çıkan net sonuç daha az sera gazı emisyonu sağlamakla birlikte, önemli derecede enerji tasarrufu sağlamaktadır. Aynı zamanda PLA plastik atıklarla ilgili problemlerin oluşmasının da önüne geçmektedir. PLA ürünleri kullanımlarının sonunda kolaylıkla degradasyona uğrayabilir veya uygun şartlarda rahatça geri dönüştürülebilir. PLA lifleri, tıpkı doğal lifler gibi kullanıldıklarında yeteri kadar dayanıklıdır. Ancak belirli bozulma şartlarında (genellikle 60 °C ve üzerinde) tamamıyla bozulabilmektedirler. PLA önce hidrolizle, sonrasında mikrobiyolojik olarak bozuşmaktadır. En sonunda da kolaylıkla karbondioksit ve suya kadar bozuşmaları mümkündür. PLA geri dönüştürülebilme ve geri dönüşüm sırasında ortaya çıkan laktik asit yeni PLA üretiminde monomer olacak şekilde tekrardan işleme alınabilmektedir. Laktik asidin hidroliz yöntemi ile geri dönüştürülmesi çevreye atılan atıklarda azalmayı da sağlamaktadır. PLA yaklaşık 1.21–1.25 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa ve markasına bağlı olarak 150–180 °C ve 180–220 °C arasında değişen erime sıcaklıklarına sahiptir. Orta düzeyde mekanik mukavemeti bulunan PLA, sert ve kırılğan bir yapıya sahip olup elastikliği düşüktür. Asitlere ve bazlara karşı orta seviyede direnç gösterirken, suya karşı duyarlıdır ve nemle birlikte mekanik özellikleri değişebilir. Düşük erime noktası ve kolay işlenebilirliği sayesinde 3D baskı, ambalaj endüstrisi, tekstil ve biyomedikal alanlarında yaygın olarak kullanılır. Karbon ayak izine sahiptir. Ancak düşük ısı dayanımı, kırılğan yapısı ve nem karşısında dirençsiz olması gibi dezavantajları vardır.

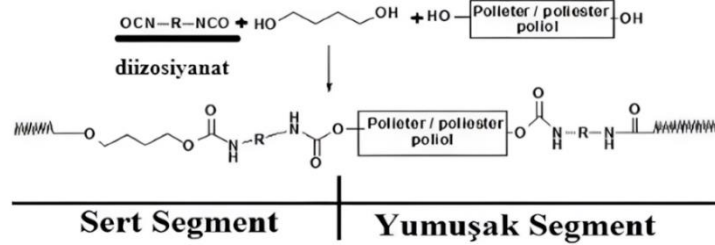


Şekil 3.2: PLA kullanılarak üretilen parça örneği

### 3.3.2 Termoplastik poliüretan (TPU)

Termoplastik malzemelerde üç değişik malzemenin bileşimi olacak şekilde polimer bir malzeme ortaya çıkmaktadır. Bu üretilen polimerler polilo, uzun zincirli diol ve uzatıcı veya kısa zincirli diol ve 1 adet diizosiyanat bileşikten oluşan bir polimer bileşkesidir (Hu et al., 2018). TPU, 3 temel yapının uygun bir sıra ve şekilde birleştirildiğinde oluşturulan çok fazlı bir blok kopolimerdir. TPU üretebilmek için gerekli bileşenler şunlardır:

- Uzun bir zincirli diol veya poliöl
- Kısa bir zincirli diol veya zincir uzatıcı
- Bir diizosiyanat



Şekil 3.3: Termoplastik poliüretanın zincir yapısı

İlk endüstriyel termoplastik poliüretanlar (TPU'lar), 1950'lerde Almanya'da Bayer Faben fabrikasında üretilmiştir, TPU'ları plastik ile kauçuk malzemelerin arasında tanımladılar, çünkü TPU'lar hem termoplastik olarak işlenebilirken hem de kauçuk benzeri mekanik özellikler göstermektedir. Yumuşak segmentlerin içerisine sert segmentlerin yayılması sayesinde yapıya ısıl-tersinir çapraz bağlar kazandırır. Bu özellikler sayesinde TPU'lar özellikle sıcaklığın kullanıldığı üretim yöntemleri olan Enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon gibi yöntemler sayesinde üretilir ve aynı zamanda geri dönüştürülebilir. TPU'lar yüksek aşınma ve sürtünme direnci, belli oranda yüksek sıcaklığa direnç, darbe emme ve yüksek

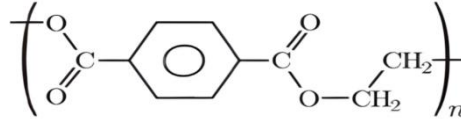
uzama kapasiteleri gibi özelliklerinden dolayı özellikle hortum, ayakkabı, spor ürünleri ve kablolar başta olmak üzere birçok kullanım alanına sahiptir (Quan et al., 2009). TPU ile ilgili mevcut çalışmalar incelendiğinde genel olarak iki ana farklı çalışma grubu öne çıkmaktadır. Bunlardan birincisi sert ve yumuşak segmentlerin sentezlenerek poliüretan yapısına dahil olmasıyla birlikte TPU'nun özelliklerini geliştirilmesi, İkincisi ise günümüz dünyasına uygun olan TPU matrisli kompozit malzemelerin hazırlanmasıdır. TPU yaklaşık 1.10–1.25 g/cm<sup>3</sup> arasında yoğunluğa, markaya göre 200–230 °C ve 240–260 °C arasında değişen erime sıcaklıklarına sahiptir. TPU, mükemmel esneklik, aşınma direnci ve düşük sıcaklıklarda bile iyi performans gösteren bir malzemedir. TPU, yüksek mekanik mukavemeti ile de dikkat çeker ve genellikle kauçuk benzeri esneklik sunmaktadır. Ayrıca, kimyasal dayanıklılığı oldukça yüksektir, asitlere, bazlara ve yağlara karşı direnç göstermektedir. Termal stabilitesi ise, yüksek sıcaklıklara karşı oldukça dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Bu özellikleri, onu zorlu koşullarda çalışan ürünlerde tercih edilen bir malzeme yapmaktadır. Bir diğer önemli avantajı ise TPU'nun suya karşı yüksek direnç göstermesi ve nemin malzemenin mekanik özelliklerini etkilememesidir. Bu, özellikle dış mekân uygulamaları ve suya maruz kalan endüstriyel kullanım alanlarında avantaj sağlar. Ancak TPU'nun da bazı dezavantajları vardır. Özellikle, yüksek maliyeti ve işlenmesi için özel ekipman gerektirmesi, bazı kullanıcılar için zorluk yaratabilir. Ayrıca, PLA'ya kıyasla karbon ayak izi daha yüksek olabilir. TPU, yüksek elastikiyet ve dayanıklılık sağlasa da bazı durumlarda PLA gibi çevre dostu bir malzeme ile karşılaştırıldığında biyolojik çözünürlük açısından sınırlamalara sahiptir. Sonuç olarak, TPU'nun esnekliği, dayanıklılığı ve geniş uygulama yelpazesi, onu modern mühendislik ve üretim süreçlerinde önemli bir malzeme haline getirmiştir. Ancak, çevre etkileri ve maliyet gibi faktörler, kullanım kararlarını etkileyebilir.



**Şekil 3.4:** TPU kullanılarak üretilen esnek ürün

### 3.3.3 Polietilen tereftalat glikol (PETG)

Polietilen tereftalat, termoplastik bir polimerdir. Uzun yıllar boyunca Terylene, Dacron gibi ticari adlarla polyester lif ve fotoğraf filmleri yapımında kullanılan en önemli ticari polimerlerden birisidir. Polietilen tereftalat (PET), son yılların en önemli teknik plastiklerinden biri olarak kabul edilmektedir. PET, genel olarak film, elyaf ve kapların imalatında kullanılmaktadır. Bu malzemenin ambalajda vermiş olduğu yüksek şeffaflık, ince kalınlıktaki duvarlar için iyi mekanik özellikler, işleme anında boyutsal kararlılık (yüksek sıcaklıklarda bile), kısmen düşük maliyet (kap başına fiyat) ve karbondioksit gibi gazlar için düşük geçirgenlik gibi üstün özellikler nedeniyle çok önemlidir. Tüm bu sebeplerden dolayı PET, ambalaj malzemesi olarak her geçen gün daha fazla kullanılmaktadır. PET'in endüstriyel üretimi, su ve meşrubat şişeleri sebebiyle son yıllarda artmıştır; ancak doğaya atılmaları durumunda, bu polimerin ayrışması uzun zaman aldığı için ciddi çevresel sorunlara sebebiyet vermektedir. PET geri dönüşümü, bu sorunu en aza indirmenin bir yoludur. Şekil 3.5'te PET' in tekrarlanan monomeri görülmektedir (Navarro et al., 2008).



Şekil 3.5: PETG'nin zincir yapısı

PETG, PET'in (Polietilen Tereftalat) özelliklerini glikol ile birleştiren termoplastik bir polyesterdir. Bu değişiklik, standart PET'e oranla daha fazla dayanıklılık, berraklık ve esneklik sağlamaktadır. Bu yüzden PETG'nin de kullanımı son günlerde oldukça artmıştır. PETG, yüksek darbe direnci ve dayanımı sunarak mekanik bileşenler için uygun ürün ortaya koymaktadır. Asitler ve alkaliler de dahil olmak üzere birçok kimyasala karşı iyi bir direnç göstermektedir, dolayısıyla çeşitli endüstriyel uygulamalar için idealdir. PETG doğal olarak şeffaftır ve görselliğin önemli olduğu uygulamalarda önemli avantaj sağlamaktadır. Nispeten yüksek bir cam geçiş sıcaklığına sahiptir (Sood et al., 2010). PETG, esneklik ve sertlik arasında bir denge kurarak kırılma gerçeğlemeden güç sağlamaktadır. Darbe dayanımının yüksek olması, bazı mekanik strese dayanması gereken parçalar için uygun kılmaktadır. Çok yönlü özellikleri sayesinde PETG çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Dayanıklılık ve biyouyumluluk şartları isteyen bazı protezler ve diğer tıbbi ürünlerin üretiminde tercih edilmektedir. Mekanik strese ve kimyasallara maruz kalmaya dayanması

gereken araba parçalarının imalatında da sıkça kullanılmaktadır. Dayanım gücü ve estetik güzelliği sebebiyle ev eşyaları, elektronik muhafazalar ve diğer tüketiciye ulaşan T-ürünlerin yapımında kullanılmaktadır (Conner et al., 2014). PETG yaklaşık 1.23–1.27 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa ve 230–250°C erime sıcaklığına sahiptir. PLA'ya kıyasla daha esnek olan PETG, kırılğan değildir ve bu özelliği sayesinde darbeye dayanıklı uygulamalarda sıklıkla tercih edilebilir. Asitlere, bazlara ve yağlara karşı dirençli olup, suya karşı da iyi bir direnç gösterir, bu nedenle nemli ortamlarla etkileşimi sınırlıdır. Isıya karşı dayanıklılığı PLA'dan daha yüksektir, ancak ABS kadar dayanıklı değildir. PETG, şeffaf yapısıyla optik uygulamalarda ve ambalaj sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, gıda ile teması uygun olabilmesi için FDA onaylı PETG ürünleri de bulunmaktadır. Bununla birlikte, PETG'nin bazı dezavantajları da vardır; örneğin, yüksek sıcaklıklarda deformasyon riski taşıması ve yüzeyinin çizilmeye duyarlı olması, bazı kullanıcılar için sınırlayıcı olabilir. Yine de kimyasal dayanıklılığı, suya karşı olan direnci ve işlenebilirliği sayesinde, özellikle dayanıklılık ve şeffaflık gerektiren uygulamalarda tercih edilen bir malzemedir.



**Şekil 3.6:** PETG kullanılarak üretilen 3D parça örneği

### **3.4 Termoplastik Kaynağı**

Termoplastik malzemelerin kaynak yöntemlerini incelediğimizde Tablo 3.1'de görüldüğü gibi ısının transfer edildiği yöntemler ve ısının direkt malzemede oluşturulduğu yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır (Karagöz, 2014).

**Tablo 3.1:** Termoplastiklerin kaynak yöntemleri

<b>Isı transfer yöntemleri</b>	<b>Isının direkt malzemede oluşturduğu yöntemler</b>	
<i>Isıl yöntemler</i>	<i>Mekanik yöntemler</i>	<i>Elektromanyetik yöntemler</i>
Sıcak gaz kaynağı	Sürtünme kaynağı	Rezistans
Sıcak kama kaynağı	Sürtünme karıştırma kaynağı	İndüksiyon kaynağı
Ekstrüzyon kaynağı	Ultrasonik kaynak	Dielektrik kaynağı
Lazer kaynağı	Titreşim kaynağı	Mikro-dalga ısıtma kaynağı

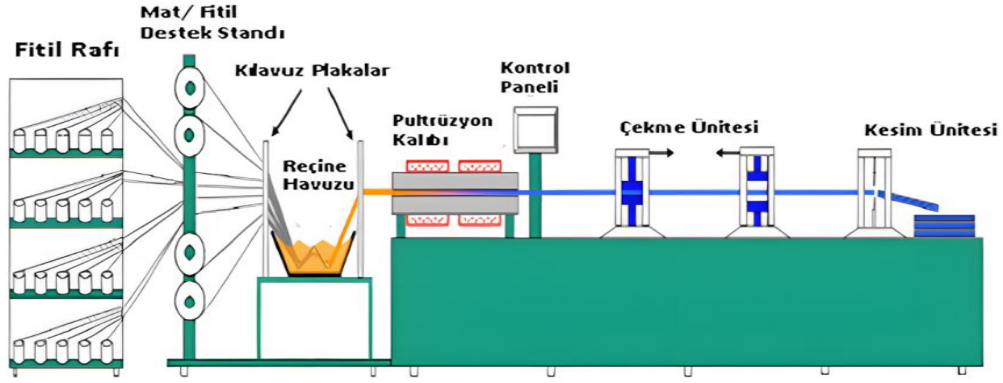
#### 4. PULTRÜZYON YÖNTEMİ

Pultrüzyon yöntemi, cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin elde edilmesinde kullanılan bir teknolojidir. İngilizce “pull” (çekmek) ve “extrusion” (ekstrüzyon) kelimelerinin birleşiminden oluşmaktadır. Pultrüzyon, uzun ve fiber takviyeli malzemelerin polimer reçine içinde entegre edilmesi, kılavuz kesit alanında Şekillendirilmesi ve istenilen kalıpta reçinenin ‘kür’ olarak sertleşmesi sürecidir. Bu süreç, endüstriyel uygulamalarda üretilmekte olan yapısal elemanlar, boru hatları, merdiven korkulukları ve elektrik izolatörleri gibi pek çok ürünün üretimini mümkün kılmaktadır. Şu anda, pultrüzyon yöntemi kullanılarak, S-camı, karbon ve kevlar gibi kuvvetli takviye malzemeleri ile epoksi, fenolik ve termoplastik matris malzemeleri birleştirilerek üretim gerçekleştirilebilmektedir. Bu gelişmeler, pultrüzyonun sahip olduğu avantajlardan dolayı, havacılık, taşımacılık, spor malzemeleri ve tıbbi donanım ürünleri gibi birçok sektörde kullanım alanı bulmasına imkân tanımaktadır. Bu yöntemin geniş bir malzeme çeşitliliği kullanabilme esnekliği, yüksek mukavemet ve hafiflik gibi önemli avantajları sağlamaktadır. Farklı endüstriyel alanlarda pultrüzyonun etkili bir şekilde uygulanabilmesi, malzeme çeşitliliğinin ve üretim esnekliğinin bir sonucudur. Pultrüzyon, üretimi yapılmak istenen malzemenin uygun bir kalıpta Şekillendirilip sertleştirilmesini içermektedir, bu da yüksek mukavemet sağlaması, dayanıklı olması ve sürekli üretim gibi avantajları ortaya koymaktadır. Mukavemete en önemli katkıyı sağlayan unsur ise malzeme içerisindeki fiberlerin matris ile homojen bir şekilde birleştirilmesinin sağlanmasıdır (Gülsever and Güzel, 2024). Pultrüzyonun gerçekleşmesi birçok parametreye bağlıdır. Örneğin, hazırlanan kalıbın iyi bir mühendislik ile tasarlanması önemlidir ya da cam elyafların kalitesinin iyi seviyede olması gerekmektedir. Reçinedeki monomerlerin oranları, katalizör ve başlatıcı miktarları, reaksiyon sıcaklığı gibi birçok şey oluşacak ürünün kalitesini belirlemektedir. Bu özelliklerinden dolayı diğer birçok kompozit işleme yöntemiyle karşılaştırıldığında pultrüzyon, en fazla mukavemet sağlayan üretim yöntemlerinden biri olarak kabul edilir. Pultrüzyon, çoğunlukla ekonomik hammaddelerin (doymamış polyester reçineleri, cam elyaf fitilleri ve diğer takviyeler) beraber kullanıldığı bir süreçtir. Bu yöntemin dezavantajı, sabit kesitli profiller gibi bazı basit ve rijit geometrilerin üretimiyle sınırlıdır. Pultrüzyonla üretilen ürünler, öncelikle korozyon direnci ve dielektrik özelliklerin çok önemli olduğu inşaat ve altyapı gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Ancak, hafiflik anlamındaki potansiyel uygulamalar henüz tam olarak keşfedilmemiştir. Örnek olarak, sağlık, otomotiv ve taşımacılık endüstrileri verilebilir (Bezerra, 2018).



Şekil 4.1: Pultrüzyon yöntemi ile üretilen malzeme örnekleri

Pultrüzyon işlemi, özellikle sabit kesitli rijit profillerin üretimine imkân tanıyan bir işlemdir. Pultrüzyon işleminin örnek bir üretim standı Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2: Açık banyo pultrüzyon yöntemi üretim standı

Endüstri uygulamalarında sıkça kullanılan Şekil 4.2’de gösterilen yöntem "**açık banyo pultrüzyon yöntemi**" olarak adlandırılmaktadır. Açık banyo, pultrüzyon işleminde özel bir açık tank içinde gerçekleştirilerek, uzun ve düz profillerin veya filamentlerin üretimini sağlar. Bu yöntemde, lifler atmosfere açık ve içerisinde sıvı reçine ile doldurulmuş bir tanka yönlendirilmektedir. Daha sonra sıvı reçine içerisinde homojen bir şekilde ıslanmış olan fiberler sıcaklık kontrollü bir kalıptan geçtikten sonra reaksiyona sokulur. Bir çekme ünitesi yardımıyla ürün çekilir ve sonrasında kesilir. Ancak Açık banyo pultrüzyon yönteminde, reçine tankının açık durumda olması, bazı reçine bileşenlerinin uçucu ve toksik olmasından dolayı reçinelerin hazırlanması esnasında çeşitli kimyasal maddeler salınabilir. Açık tanklarda bu maddelerin atmosfere yayılma riski oldukça yüksektir. Bu yüzden çevresel sorunlara ve sağlık sorunlarına yol açabilir (Bezerra, 2018).

## 5. MALZEME VE YÖNTEM

### 5.1 Sürekli Cam Elyafar (Tek Uçlu Fitol)

Bu çalışmada kullanılan 300, 600 ve 1200 tex'lik cam elyaflar, Şişecam'ın E-camından ürettiği filament sarma uygulamaları için geliştirilmiş termoset reçinelerden polyester, vinilester ve epoksi uyumlu “tek uçlu fitil” ürünüdür. Teknik özellikleri 5.1’de verilen ve görülen tek uçlu sürekli cam elyaf fitiller Balıkesir Şişecam Elyaf Sanayii A.Ş. firmasından temin edilmiştir (Şişecam, 2024).



Şekil 5.1: Tek uçlu cam elyaf fitil ürünler

Tablo 5.1: Tek uçlu cam fitillerin teknik özellikleri

Cam tipi	Tex (g/1000m) $\pm\%7$	Lif çapı ( $\mu\text{m}$ ) $\pm 0,5$	Özgül ağırlık ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Nem miktarı (%)	Bağlayıcı türü	Bağlayıcı miktarı (%)	Termoset reçine uyumu
E	300 600 1200	13.74 14.00 16.00	2.54	maks. 0.1	Silan	0.55 $\pm$ 0.15	Polyester Vinilester Epoksi

### 5.2 Termoplastik Filamentler

Bu çalışmada sürekli cam elyafları kaplamada kullanılan termoplastik filamentler PLA, TPU ve PETG’dir. Bu malzemelerin birbirlerinden daha güçlü olduğu yönlerde daha zayıf olduğu yönlerde mevcuttur. Bu özellikler Tablo 5.2’de verilmiştir. Kullanım amacına ve parçanın maruz kalacağı şartlara göre hepsi sektörde geniş bir alanda kullanılmaktadır. Literatürde PLA, TPU ve PETG’nin yoğunluğu ve çekme mukavemeti değerleri verilmiş olsa da kullanılan marka-modele göre bu özellikler geniş bir yelpazede değişkenlik gösterdiğinden;

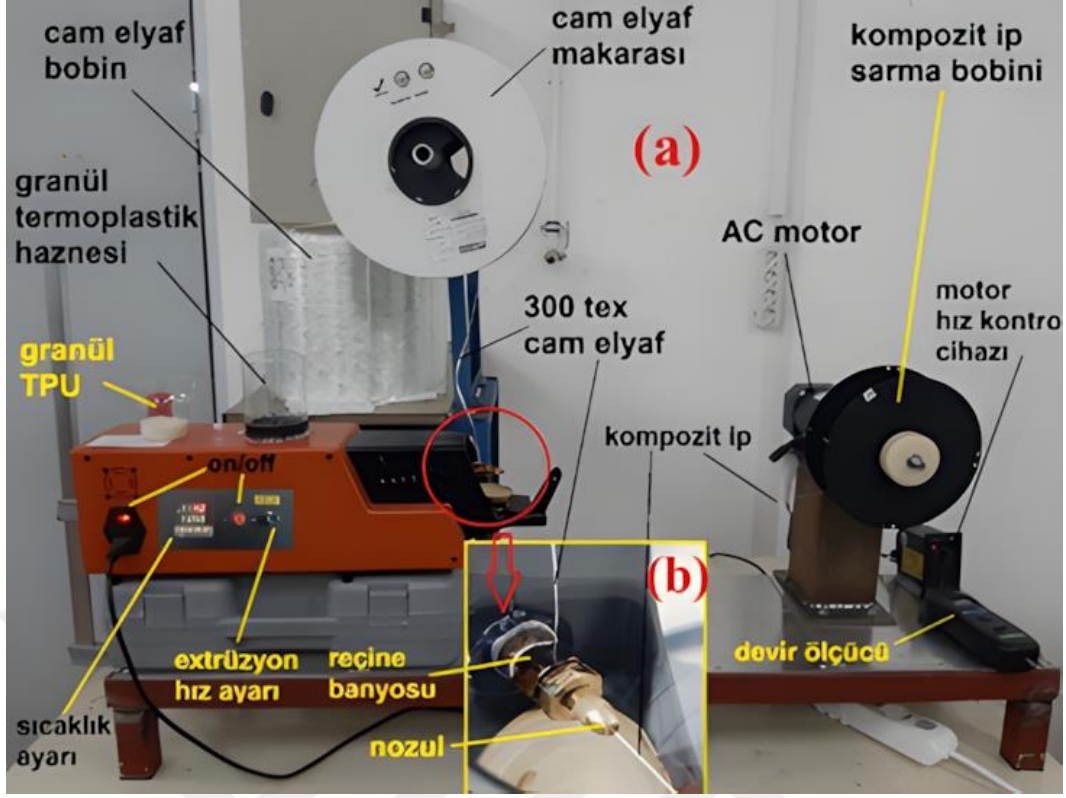
bu çalışmada her bir termoplastik filamentin çekme mukavemeti ve özgül ağırlığı test edilmiştir.

**Tablo 5.2:** Kullanılan filamentlerin bazı özellikleri

Özellikler	PLA	TPU	PETG
Marka/Model	7-Hills ( <a href="http://www.7hillsfilament.com">www.7hillsfilament.com</a> )	7-Hills, E-Sun ( <a href="http://www.7hillsfilament.com">www.7hillsfilament.com</a> ) ( <a href="http://www.esun3d.com">www.esun3d.com</a> )	E-Sun ( <a href="http://www.esun3d.com">www.esun3d.com</a> )
Çap	1.75mm (±0.05mm)	1.75mm (±0.05mm)	1.75mm (±0.05mm)
Erime sıcaklığı (°C)	180–220	240–260	230–250
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1.21–1.25	1.10–1.25	1.23–1.27
Esneklik	Düşük	Yüksek	Orta
Dayanıklılık	Orta	Yüksek	Yüksek
Darbe direnci	Düşük	Çok yüksek	Yüksek
Aşınma direnci	Düşük	Çok yüksek	Orta-yüksek
Suya dayanıklılık	Düşük	Yüksek	Orta-yüksek
Kimyasal dayanım	Düşük	Yüksek	Orta
Bükülebilirlik	Düşük	Çok yüksek	Orta
Kullanım alanları	Prototipleme, Dekoratif parçalar	Esnek parçalar, Contalar	Mekanik parçalar, Dayanıklı ürünler

### 5.3 Cam Elyaf Takviyeli Kompozit İp Üretim Prosesi

Bu çalışmada Şekil 5.2’de görülen cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit ip üretimi için masaüstü bir prototip cihaz geliştirilmiştir. Bu prototip cihazda sürekli cam elyaflarının termoplastik matris ile kaplanması için maksimum 300 °C çalışma sıcaklığına ve 250–660 mm/dak ekstrüzyon hızına sahip 120 Watt gücünde masaüstü filament ekstrüder kullanılmıştır. Hazır Ø1.75 mm çaplı sürekli filament şeklinde temin edilen termoplastikleri granül hale getirilip cihazdaki ekstrüder haznesine dökülebilmek için yaklaşık 3–5 mm uzunlukta kırılmıştır. Üç farklı termoplastik matrisle kaplanan üç farklı elyafı çekerek bobine sarmak amacıyla 60 Watt nominal güce, 1350 dev/dak hıza, tork arttırıcı redüktöre ve hız kontrol ünitesine sahip (0–135 dev/dak) bir AC motor kullanılmıştır.



**Şekil 5.2:** Cam elyaf takviyeli kompozit ip üretimi  
(a) termoplastik kaplama prosesi ve (b) kaplama (emprenye) işlemi

Kompozit ip üretiminde fiber olarak, demetlerindeki her bir lif çapları sırasıyla  $\text{\O}13.74 \mu\text{m}$ ,  $\text{\O}14 \mu\text{m}$  ve  $\text{\O}16 \mu\text{m}$  olan 300 tex, 600 tex ve 1200 tex'lik E-camından "tek uçlu fitil" olarak adlandırılan sürekli cam elyaflar kullanılmıştır. Reçine banyosunda eriyerek cam elyafları kaplamada (ıslatan veya emprenye) kullanılan üç farklı termoplastik matris malzeme ise esnek poliüretan (TPU), polilaktik asit (PLA) ve polietilen tereftalat glikoldür (PETG).

#### 5.4 Kompozit İp Üretimini Etkileyen Faktörler

Kompozit ip üretimi etkileyen temel faktörler aşağıda özetlenmiştir;

- Cam elyaf tex sayısı (lineer yoğunluk)
- Termoplastik matris tipi
- Nozul çapına bağlı kompozit ip kesiti ve ip kesitine bağlı fiber hacim oranı
- Fiber hacim oranına bağlı termoplastik kaplama hacim oranı
- Ekstrüzyon hızı
- İp çekme hızı (kompozit ip sarma bobini devri)
- Ortam sıcaklığı
- Ekstrüzyon sıcaklığı (reçine banyosu sıcaklığı)

#### 5.4.1 Teorik fiber hacim oranı

Şekil 5.3'te verilen çap ayarlı nozul uçları Şekil 5.2'deki üretim prototipi üzerinde değiştirilerek üretilen kompozit ipin kesitini ve buna bağlı olarak da fiber hacim oranı değişebilmektedir. Şekil 5.3'teki çap ayarlı nozul kullanmanın iki önemli sebebi vardır. Bunlar; (a) üretim başlangıcında cam-elyaf ucunu manuel olarak nozul ucundan rahat geçirebilmek ve (b) ayar somununun sıkıştırılması veya gevşetilmesiyle üretilen kompozit ip çapını değiştirebilmektir.



Şekil 5.3: Beş farklı maksimum ölçüye sahip çap ayarlı nozul uçları

Teorik fiber hacim oranı; fiber ve kompozit ip çaplarına göre matematiksel denklemler kullanılarak hesaplanabilir. Bunun için denklem (5.1) – (5.3) kullanılabilir (Vatandaş et al., 2023; Gür et al., 2024). Her cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit ipte, elyaf hacim oranı elyaf demetindeki toplam lif sayısına göre değişkenlik gösterir.

$$\text{Toplam fiber kesit alanı} = \text{fitil demetindeki lif sayısı} \times \frac{\pi \times (\text{tek lif çapı})^2}{4} \quad (5.1)$$

$$\text{Kompozit ip kesit alanı} = \frac{\pi \times (\text{ortalama kompozit ip çapı})^2}{4} \quad (5.2)$$

$$\text{Teorik fiber hacim oranı (\%)} = \frac{\text{Toplam fiber kesit alanı}}{\text{Kompozit ip kesit alanı}} \times 100 \quad (5.3)$$

$$\text{Kaplama hacim oranı (\%)} = 100 - \text{Teorik fiber hacim oranı (\%)} \quad (5.4)$$

Örneğin yukarıdaki formüller kullanılarak hesaplamalar yapıldığında; 300 tex cam elyafın (lif çapı  $\text{\O}13.74 \mu\text{m}$ , lif sayısı 700–800 adet) PLA kaplanarak maksimum  $\text{\O}1.00 \text{ mm}$  çaplı ayarlı nozuldan geçtikten sonra elde edilen kompozit ipin çapı  $\text{\O}0.55 \text{ mm}$  olarak elde edilmiştir. Buna göre elyaf hacim oranı yaklaşık  $V_f = \%43.66$  olarak elde edilir. Aşağıdaki

bölümlerde, bu parametreler altında gerçek fiber hacminin teorik hesaptan önemsiz derecede farklı ( $V_f = \%44.35$ ) olduğu görülecektir.

#### 5.4.2 Ortam sıcaklığı

Kompozit ip üretimlerinde Şekil 5.4'te görseli verilen "Xiaomi Mijia Miaomiao Dijital Termometre" kullanılmıştır. Ortam sıcaklığı, termoplastik granüllerin reçine banyosundaki erime sıcaklıklarını ve nozul ucundan çıkan kompozit ipin çapını etkilemektedir.



Şekil 5.4: Ortam sıcaklığının ölçümü (dijital termometre)

#### 5.4.3 İp sarma hızı

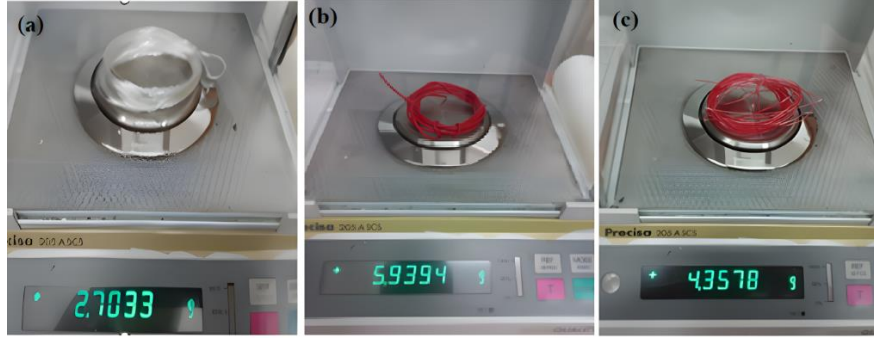
Kompozit ip üretimlerinde ip sarma hızının ölçülebilmesi için Şekil 5.5'te görseli verilen "LYK-2236C" model devir ölçer (takometre) kullanılmıştır. İp sarma hızı nozul ucundan çıkan kompozit ipin çap stabilitesini ve kaplama oranını etkilemektedir.



Şekil 5.5: Sarma bobini için devir ölçer (takometre)

#### 5.5 Birim Ağırlıkların Ölçümü

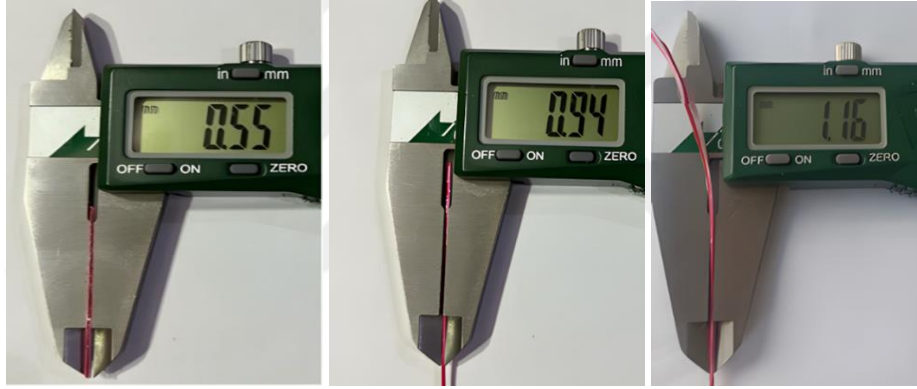
Çalışmada kullanılan cam elyaflar, termoplastik filamentler ve bu filamentler ile üretilen kompozit iplerin birim ağırlıklarının ölçümü için Şekil 5.6'daki laboratuvar tipi Precisa 205A-SCS dijital (0.0001 hassasiyetli) hassas terazi kullanılmıştır. Buradan elde edilen ağırlık ölçümleri (g), özgül ağırlık ( $g/cm^3$ ) ve fiber hacim ( $cm^3$ ) hesaplarında kullanılmıştır.



**Şekil 5.6:** Laboratuvar tipi hassas terazi  
(a) 10m 300 tex cam elyaf, (b) 2m PLA filament ve (c) 10m CE300/PLA

### 5.6 Kompozit İplerin Çap Ölçümleri

Üretilen kompozit iplerin ortalama çapları Şekil 5.7’de görülen 0.01 hassasiyetli dijital kumpas ile en az 20 farklı noktadan ölçülüp ortalaması alınmıştır.



**Şekil 5.7:** Dijital kumpas (0.01 hassasiyetli) ile ölçüm

### 5.7 Fiber Hacim Hesabı ( $V_f$ )

Elde edilen kompozit iplerin içeriğindeki fiber (cam elyaf) hacim hesabı kompozit malzemelerdeki en önemli verilerden biridir. Denklem (5.5)’de görüldüğü gibi fiber hacmi ile matris hacminin toplamı kompozit ipin hacmini verir. Bu denklem, birim kompozit hacmi için yazıldığında denklem (5.6)’da görüldüğü gibi fiber hacminin ve matris hacminin toplamı 1’dir. Denklem (5.7)’de de gösterilen bu eşitliğe yalnızca iki bileşene sahip kompozit malzemeler için “hacim kuralı” denir. Kompozit ipin özgül ağırlığı ( $\rho_c$ ), fiber hacmi ( $V_f$ ) ve matris hacmi ( $V_m$ ) ile bunların özgül ağırlıklarıyla orantılı olarak denklem (5.8)’de görüldüğü gibi ifade edilebilir. Kompozit ipteki fiber (elyaf) hacim oranı ( $V_f$ ) ise kompozit ip ( $\rho_c$ ), fiber ( $\rho_f$ ) ve matrisin ( $\rho_m$ ) özgül ağırlıklarına bağlı olarak denklem (5.9)’da gösterildiği gibi direkt olarak hesaplanabilir (Mallick, 1997)

$$V_c = V_f + V_m \quad (5.5)$$

$$1 = V_f + V_m \quad (5.6)$$

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (5.7)$$

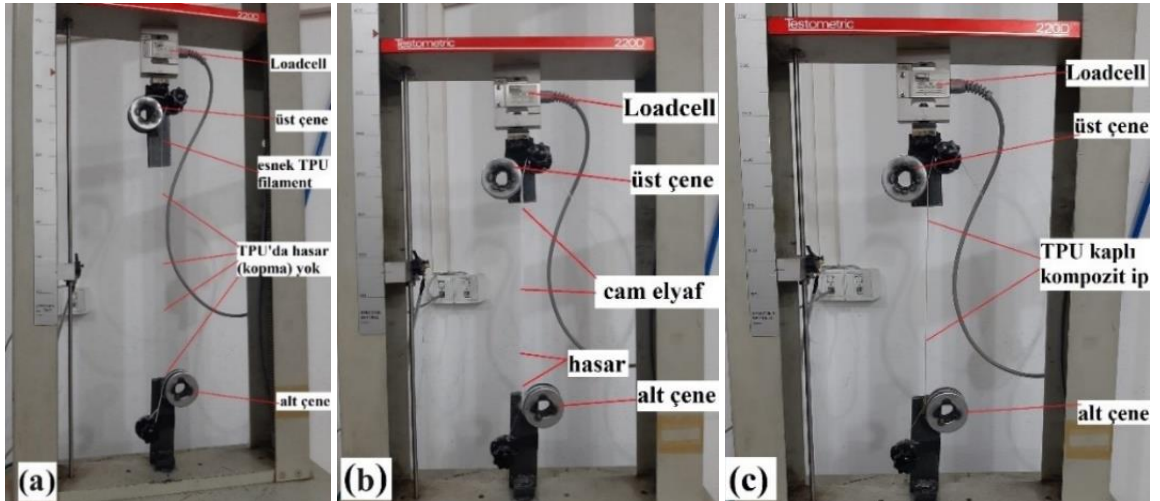
$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m (1 - V_f) \quad (5.8)$$

$$V_f = \frac{\rho_c - \rho_m}{\rho_f - \rho_m} \quad (5.9)$$

Burada;  $V_c$ : kompozit ipin hacmi ( $\text{cm}^3$ ),  $V_f$ : fiberin hacmi ( $\text{cm}^3$ ),  $V_m$ : matrisin hacmi ( $\text{cm}^3$ ),  $\rho_c$ : kompozit ipin özgül ağırlığı ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $\rho_f$ : fiberin özgül ağırlığı ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) ve  $\rho_m$ : matrisin özgül ağırlığıdır ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

### 5.8 Çekme Testleri

Çekme testleri, ip ve kumaş çekme testlerinde kullanılan 3000 N (loadcell) kapasiteli Testometric çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Üç farklı lineer yoğunluktaki (300, 600 ve 1200 tex) cam elyaflar, üç farklı termoplastik filamentler (TPU, PLA ve PETG) ve elde edilen kompozit iplerin çekme testleri Şekil 5.8'de görüldüğü gibi ASTM-D2256 (2002) standardına göre gerçekleştirilmiştir (Halabi et al., 2023). Standartta belirtildiği gibi tespit çenelerinin merkezleri arası (ölçüm) mesafesi 250 mm ve çekme hızı ise 300 mm/dakika (5 mm/s) olarak kullanılmıştır.



Şekil 5.8: Çekme testlerinde kullanılan düzenek

## 5.9 Optik Görüntülemeler

Kompozit iplerin, cam elyafların ve termoplastiklerin hasara uğramış ve hasara uğramamış bölgelerinin optik görüntüsü; 7" ekran 2000X (12 milyon piksel), 11 led ışıklı, çift lensli (düşük/yüksek büyütme, fotoğraf/video çekim ve depolama) özelliklerindeki Şekil 5.9 'da görseli verilen Tignapoo dijital mikroskop ile elde edilmiştir.



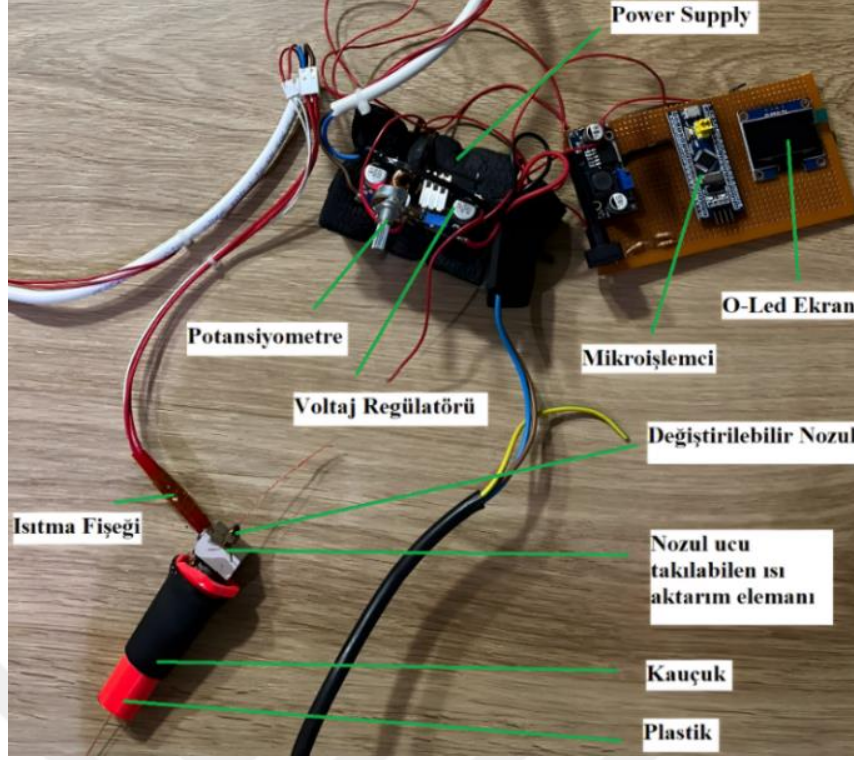
Şekil 5.9: Optik görüntülemelerde kullanılan dijital mikroskop

## 5.10 Üretilen Kompozit İplerin Test Prosesleri

Elde edilen kompozit iplerin özgül ağırlıklarının hesaplanmasında hatanın en aza indirilmesi için 10 metrelik kompozit iplerin ağırlıkları esas alınmıştır. Fiber hacim ve özgül ağırlık hesaplamalarında elde edilen kompozit iplerin çapları, dijital kumpas (0.01 hassasiyetli) ile farklı bölgelerinden en az 20 kez ölçülüp ortalaması alınmıştır. Her çekme testinde kullanılan bir adet kompozit ip numunesinin toplam uzunluğu yaklaşık 400–500 mm'dir.

## 5.11 Üretimi Yapılan Kompozit İplerde Kaynak (Birleştirme) İşlemi

Şekil 5.10'da görseli verilen kaynak kalemi düzeneğinde sıcaklığı ayarlayabilmek için smps (switch mode power supply) kullanılmıştır. Voltaj seviyesini ayarlayabilmek için ise voltaj regülatörü ve potansiyometre kullanılmıştır. Sisteme gelen sıcaklığın derecesini ölçmek için "stm32fc8t6" tipinde mikroişlemci kullanılmıştır. Mikroişlemcinin üzerinde bulunan sıcaklık sensörü yardımıyla sıcaklık ölçüldükten sonra led ekran üzerine yazdırılmaktadır. Voltaj ile ısıtılan ısıtma fişegi ısı aktarım elemanının içerisine montajlanmaktadır. Şekil 5.11'de görseli verilen nozul uçlarının kullanılacak olan malzemeye göre değiştirilmesi gerekeceği için tasarımda nozul ucunun kolayca değiştirilebileceği malzeme kullanılmıştır.



Şekil 5.10: Kaynak kalemi prototipi



- (1) Ø2.0 mm (300 tex elyaftan elde edilen kompozit ip için)
- (2) Ø2.5 mm (600 tex elyaftan elde edilen kompozit ip için)
- (3) Ø3.0 mm (1200 tex elyaftan elde edilen kompozit ip için)

Şekil 5.11: Kaynaklı birleştirmede kullanılan nozullar

## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

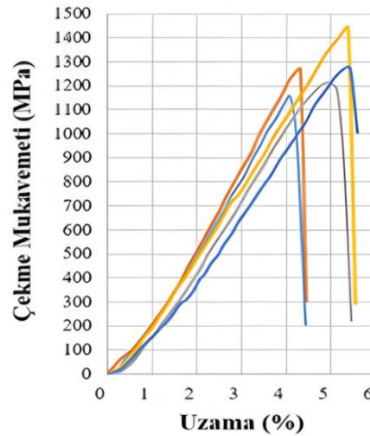
### 6.1 Sürekli Cam Elyaf İçin ekme Testi Bulguları

Teorik olarak 300 tex’lik cam elyaf fitilin 10 metresinin uzunluğu 3.00 gram beklenirken, hassas ölçümlerde 2.71 gram olarak tespit edilmiştir. Diğer ölçümler ise Tablo 6.1’de verilmiştir. Özellikle 300 tex elyaf liflerindeki bu %9.67’lik azalmanın sebebi ise; kullanılan üç farklı fitil (ip, demet) içinde en hassas olanı 300 tex cam elyaftır. Dolayısıyla 300 tex’lik cam elyafta makasla belirli uzunluklarda keserken, el ile çekme cihazına taşırken veya cihaza bağlarken lif kayıplarının meydana geldiği görülmüştür. Bu kapsamda Tablo 6.1’de cam elyafların teorik ve ölçülen fiziki özellikleri verilmiştir. Cam elyaf fitillerin çekme testlerindeki gerilme – %uzama grafikleri elde edilirken kesit alan olarak Tablo 6.1’deki gerçek “**toplam kesit alan ( $A_{ce}$ )**” olarak hesaplanan değerler kullanılmıştır.

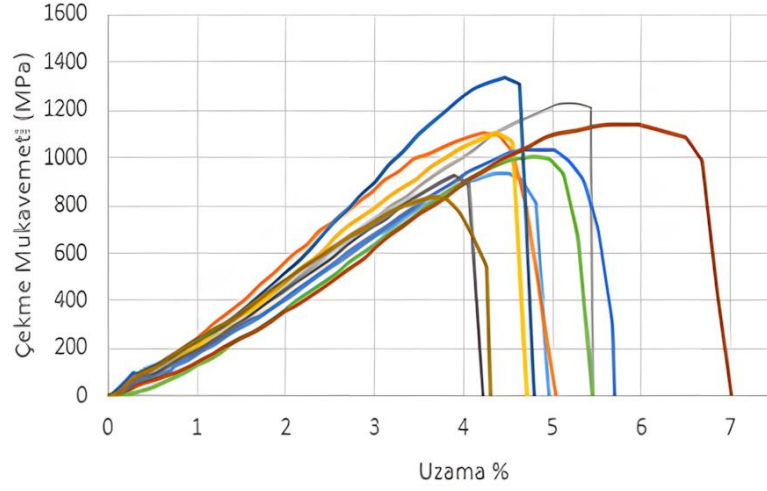
**Tablo 6.1:** Cam elyaf fitillerin teorik ve ölçülen fiziki özellikleri

Teorik tex (g/1000m)	Ölçülen tex (g/1000m)	Hacim (mm <sup>3</sup> )	Tek lifin ağırlığı (g)	Teorik top. lif sayısı (adet)	Hesaplanan top. lif sayısı (adet)	Toplam kesit alan ( $A_{ce}$ ) (mm <sup>2</sup> )	Liflerin ap ( $\text{ØD}_{ce}$ ) hali (mm)
300	271	148	0.377	800	716	0.1063	0.3680
600	613	154	0.391	1600	1535	0.2126	0.5205
1200	1200	201	0.510	2400	2351	0.4724	0.7758

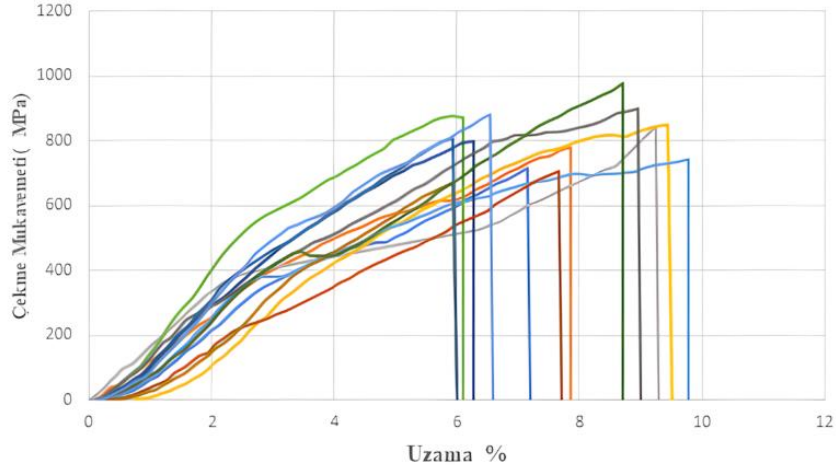
Yapılan çekme testleri sonunda; sürekli cam elyaflar için kopma süreleri ortalama 3–5 saniye olarak tespit edilmiştir. Testler sonucundaki çekme mukavemeti – %uzama grafikleri sırasıyla Şekil 6.1, 6.2 ve 6.3’te, elde edilen temel mekanik özellikler ise Tablo 6.2’de verilmiştir.



**Şekil 6.1:** 300 tex cam elyaf için çekme testi eğrileri



**Şekil 6.2:** 600 tex cam elyaf için çekme testi eğrileri



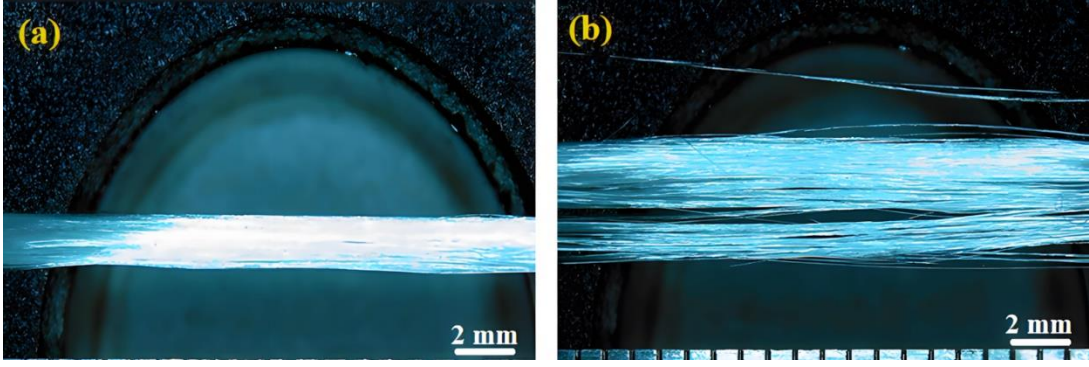
**Şekil 6.3:** 1200 tex cam elyaf için çekme testi eğrileri

**Tablo 6.2:** Sürekli cam elyaflar için temel mekanik özellikler

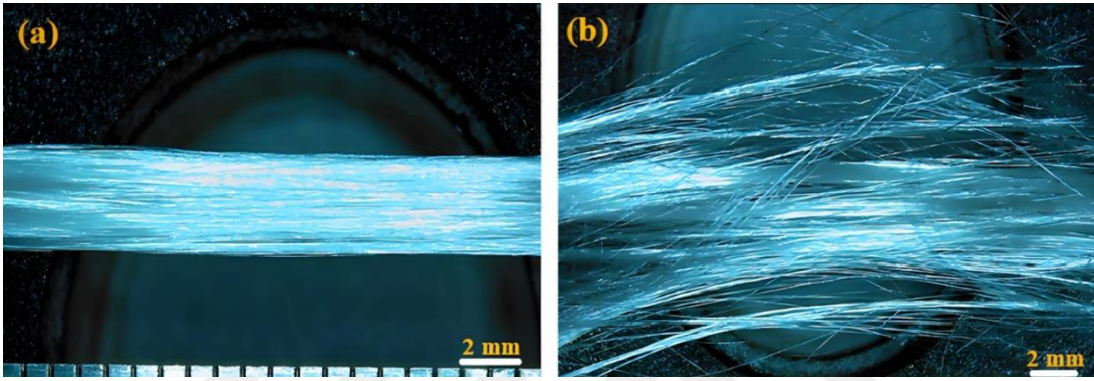
Sürekli cam elyaf	Çekme mukavemeti (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	Maks. uzama (%)
300 tex	1270 ± 49.0	28350 ± 900	4.83
600 tex	1058 ± 32.6	22700 ± 4078	5.10
1200 tex	750 ± 93.5	9870 ± 1237	7.50

## 6.2 Sürekli Cam Elyaflar İçin Optik Görüntüler

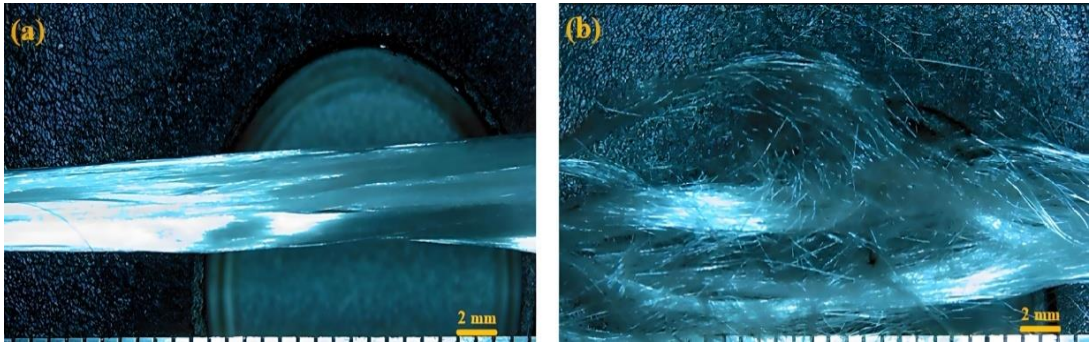
Çekme testi öncesi ve sonrası cam elyafların optik görüntüleri Şekil 6.4, 6.5 ve 6.6'da verilmiştir. Özellikle çekme testi sonrası cam elyaf hasarlarında “**liflerde pamuklanma ve düzensiz dağılma**” gözlenmiştir.



Şekil 6.4: 300 tex cam elyaf; (a) test öncesi ve (b) test sonrası



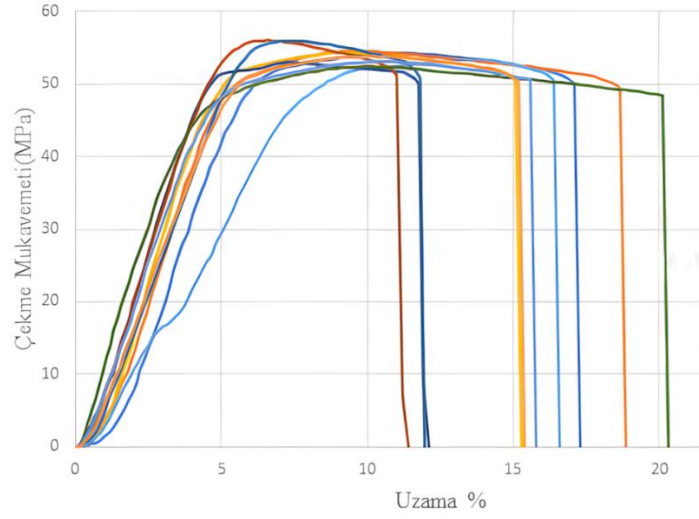
Şekil 6.5: 600 tex cam elyaf; (a) test öncesi ve (b) test sonrası



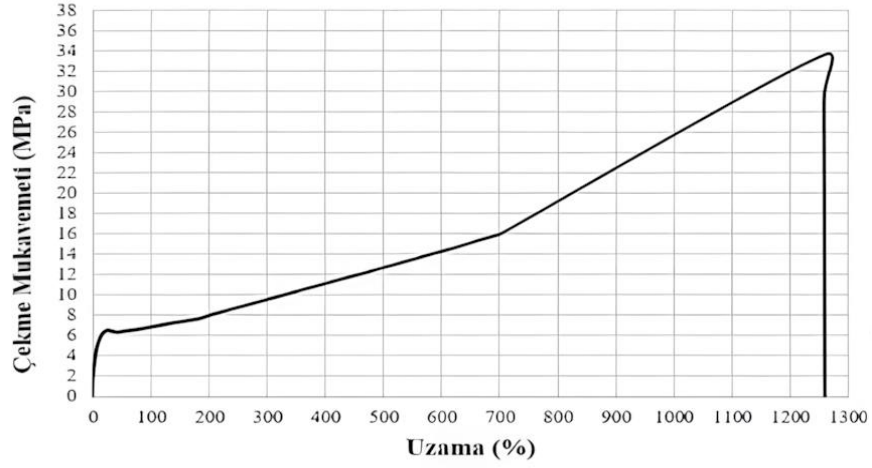
Şekil 6.6: 1200 tex cam elyaf; (a) test öncesi ve (b) test sonrası

### 6.3 Termoplastik Filamentler İçin Çekme Testi Bulguları

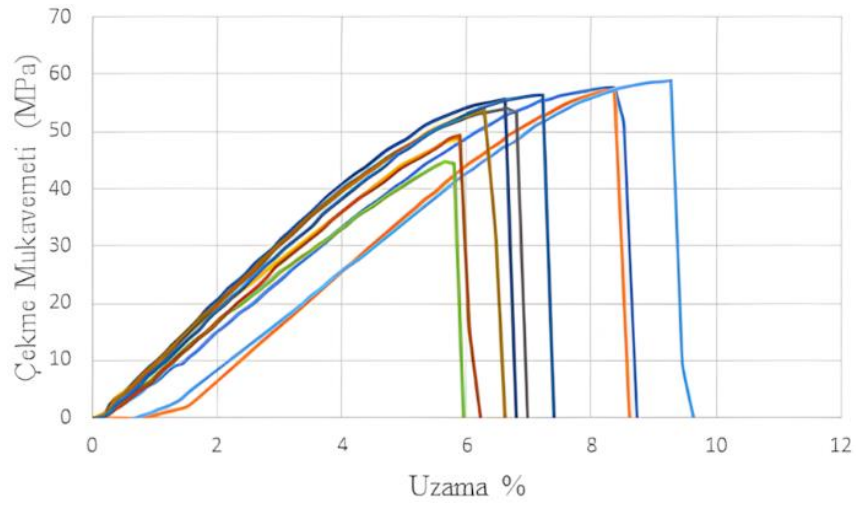
Yapılan çekme testleri sonunda; termoplastik filamentler için çekme mukavemeti – %uzama grafikleri sırasıyla Şekil 6.7, 6.8 ve 6.9’da, elde edilen temel mekanik özellikler ise Tablo 6.3’de verilmiştir.



Şekil 6.7: PLA filamentin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrisi



Şekil 6.8: TPU filamentin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrisi



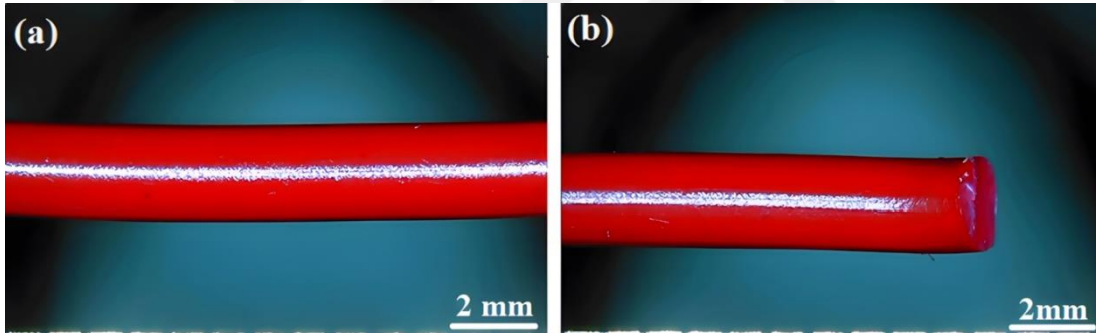
Şekil 6.9: PETG filamentin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrisi

**Tablo 6.3:** Termoplastik filamentler için elde edilen mekanik özellikler

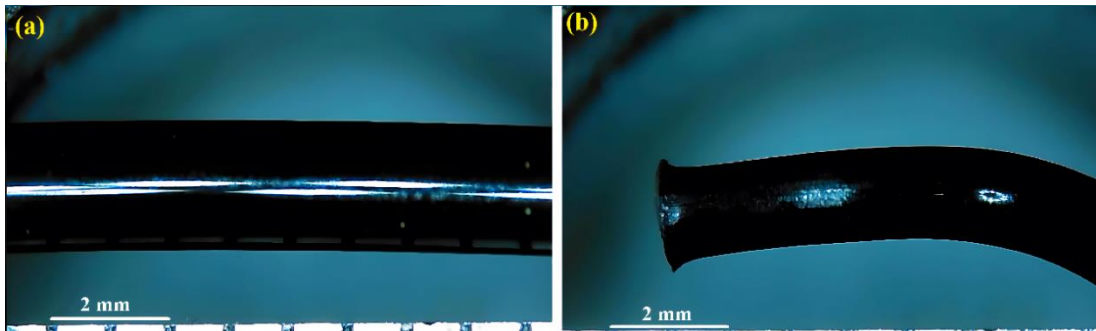
Termoplastik filamentler	Çekme mukavemeti (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	Maks. Uzama (%)	Test süresi (saniye)
PLA	$53.60 \pm 2.0$	$348.10 \pm 12.3$	15.4	8.2
TPU	$33.60 \pm 4.0$	$44.10 \pm 9.0$	1250	202
PETG	$48.76 \pm 4.3$	$750.15 \pm 66.3$	6.5	3.81

#### 6.4 Termoplastik Filamentler İçin Optik Görüntüler

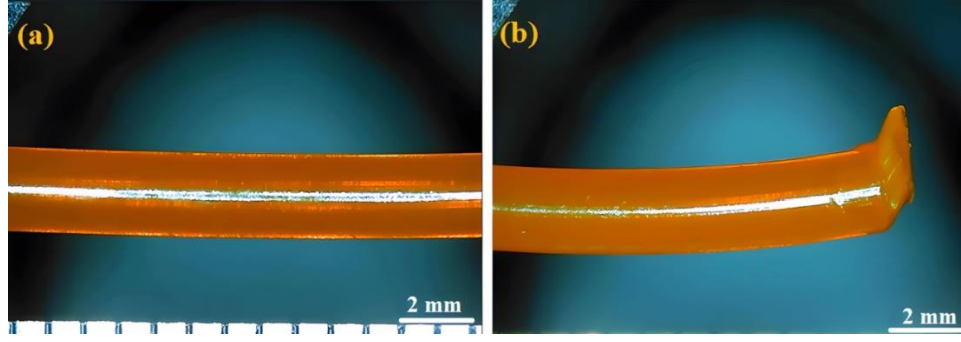
PLA, TPU ve PETG termoplastik filamentler ortalama çapları standart olarak  $\text{ØD}_{\text{tp1}} \approx 1.75$  mm'dir. Kesit alanları ise  $A_{\text{tp1}} \approx 2.40$  mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Çekme testi öncesi ve sonrası termoplastik filamentlerin optik görüntüleri sırasıyla Şekil 6.10, 6.11 ve 6.12'de verilmiştir. PLA ve PETG filamentlerin çekme testi sonrası hasarları Şekil 6.10(b) ve 6.12(b)'de görüldüğü gibi “**gevrek (kırılğan) kopma**” şeklinde, TPU filamentin ise Şekil 6.11(b)'de görüldüğü gibi “**sünek kopma**” şeklinde gözlenmiştir.



**Şekil 6.10:** PLA filamentin (a) orijinal hali ve (b) kopma noktası



**Şekil 6.11:** TPU filamentin (a) orijinal hali ve (b) kopma noktası



Şekil 6.12: PETG filamentin (a) orijinal hali ve (b) kopma noktası

### 6.5 Kompozit İpler İçin Ortalama Çap, Fiber Hacmi Ve Özgül Ağırlık Bulguları

Kompozit ip üretiminde fiber olarak lif çapları sırasıyla  $\text{Ø}13.74 \mu\text{m}$  (300 tex),  $\text{Ø}14 \mu\text{m}$  (600 tex) ve  $\text{Ø}16 \mu\text{m}$  (1200 tex) olan sürekli E-cam elyafları, matris olarak ise sırasıyla PLA, TPU ve PETG kullanılmıştır. Elde edilen kompozit iplerin özgül ağırlık hesabı için üç farklı tex'deki cam elyaflardan 10'ar metre, üç farklı termoplastik filamentlerden 2'şer metre ve üretilen dokuz farklı kompozit ipten 10'ar metre kesilerek hassas terazide tartılmıştır.

Tablo 6.4: Termoplastikler ve kompozit ipler için hesaplanan özgül ağırlıklar

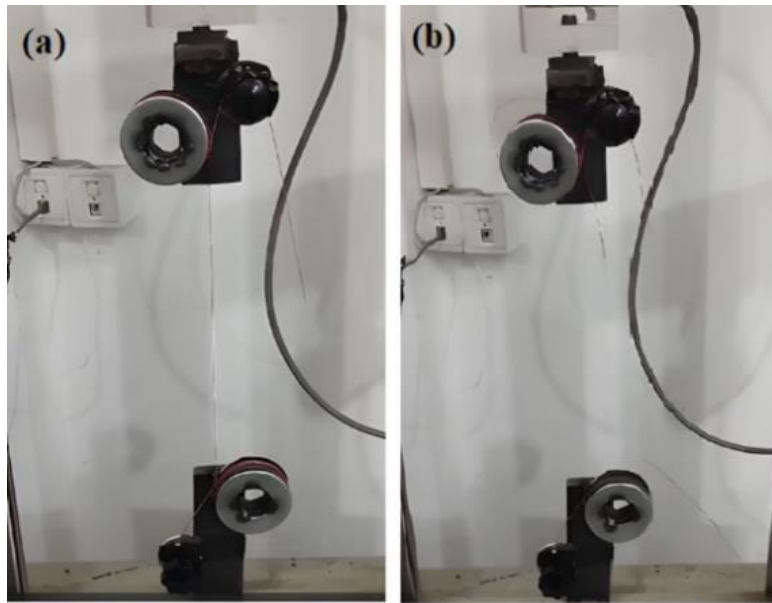
Fiber, matris ve kompozit ip tipleri	Çap (cm)	Ölçülen ağırlık (g)	Ağırlık (g/10m)	Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Fiber hacim oranı (%V <sub>f</sub> )
Cam elyaf (300 tex)	0.0368	10m = 2.7033	2.7033	2.543	%100
Cam elyaf (600 tex)	0.0554	10m = 6.1340	6.1340	2.543	%100
Cam elyaf (1200 tex)	0.0775	10m = 12.207	12.207	2.543	%100
PLA	0.1750	2m = 5.9394	29.697	1.240	%0.00
TPU	0.1750	2m = 5.1771	25.885	1.076	%0.00
PETG	0.1750	2m = 5.941	29.7060	1.234	%0.00
CE300/PLA	0.0551	10m = 4.3578	4.3578	1.820	%44.35
CE600/PLA	0.0940	10m = 11.768	11.768	1.690	%34.68
CE1200/PLA	1.1620	10m = 19.478	19.478	1.830	%45.00
CE300/TPU	0.0523	10m = 3.7979	3.797	1.768	%47.15
CE600/TPU	0.0917	10m = 10.681	10.681	1.610	%36.40
CE1200/TPU	0.1179	10m = 18.835	18.8350	1.724	%43.80
CE300/PETG	0.0541	10m = 4.226	4.2269	1.843	%46.30
CE600/PETG	0.0984	10m = 12.529	12.529	1.652	%31.80
CE1200/PETG	1.0800	10m = 17.585	17.5858	1.919	%53.30

Daha sonra cam elyaflar, termoplastik filamentler ve üretilen kompozit iplerin; çap ve birim ağırlık ölçümleri ile hesaplanan yaklaşık özgül ağırlıkları Tablo 6.4’te verilmiştir. Süreç sonunda sırasıyla ortalama çapları ve kısaltmaları; Ø0.55 mm CE300/PLA, Ø0.94 mm CE600/PLA, Ø1.162 mm CE1200/PLA, Ø0.523 mm CE300/TPU, Ø0.917 mm CE600/TPU, Ø1.179 mm CE1200/TPU, Ø0.541 mm CE300/PETG, Ø0.984 mm CE600/PETG ve Ø1.08 mm CE1200/PETG olan ve her birinden en az 250’şer metre kompozit ipler üretilmiştir. Fiber hacim hesabı ( $%V_f$ ) bölümündeki denklem (5.5)’deki ilgili özgül ağırlık ifadelerinin yerine Tablo 6.4’teki hesaplanan veriler yazılarak; kompozit iplerdeki yaklaşık fiber hacim oranları ( $%V_f$ ) elde edilmiştir. Üretilen dokuz farklı kompozit ip için hesaplanan fiber hacim oranları ise sırasıyla Tablo 6.4’te verilmiştir.

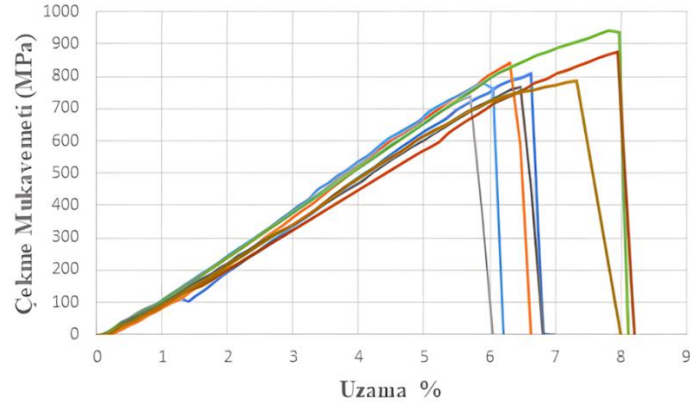
## 6.6 Kompozit İplerin Çekme Testleri

### CE300/PLA

Şekil 6.13 ‘te görseli verilen testlerde 300 tex PLA kaplı kompozit ip için kopma süresi 3.8 saniye olarak tespit edilmiştir. Kompozit iplerin ortalama çekme mukavemeti  $824 \pm 58$  MPa, elastisite modülü  $13080 \pm 850$  MPa ve maksimum uzama oranı ise %6.3 olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.14).



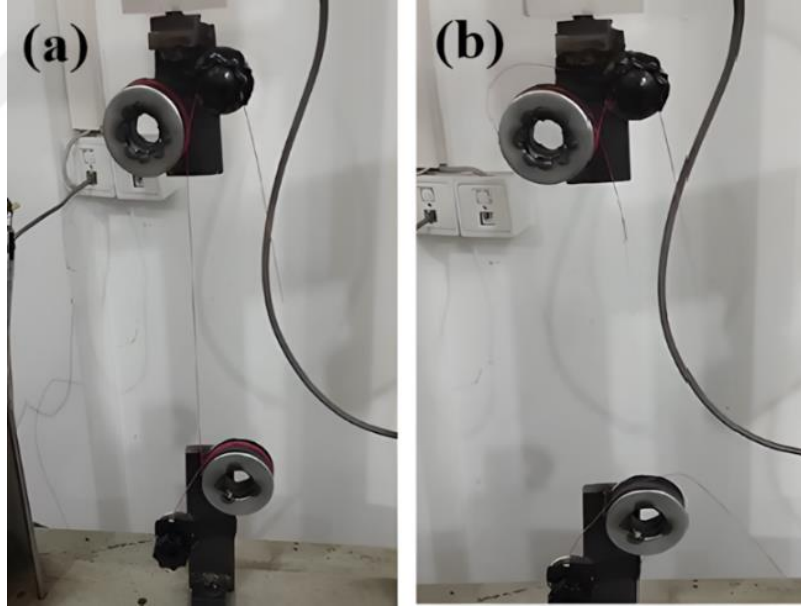
Şekil 6.13: CE300/PLA ipin (a) test anı ve (b) kopma anı



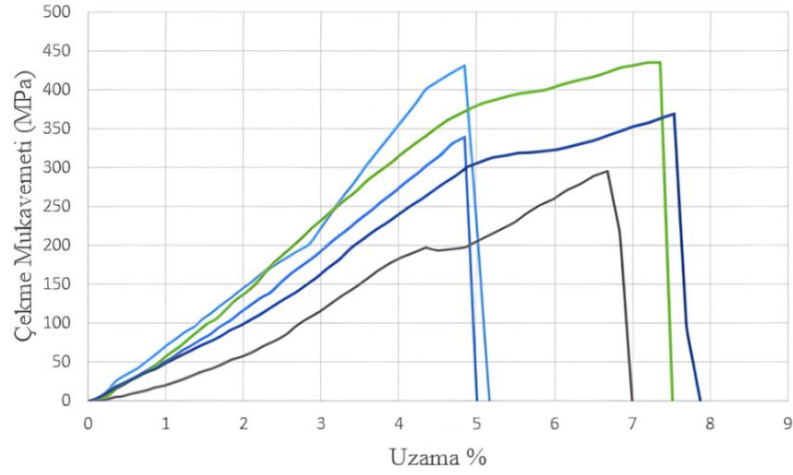
**Şekil 6.14:** CE300/PLA ipin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrileri

### CE600/PLA

Şekil 6.15'te görseli verilen testlerde kopma süresi, 600 tex PLA kaplı kompozit ip için 4.2 saniye olarak tespit edilmiştir. Kompozit iplerin ortalama çekme mukavemeti  $366.8 \pm 53$  MPa, elastisite modülü  $5719 \pm 890$  MPa ve maksimum uzama oranı ise %6.4 olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.16).



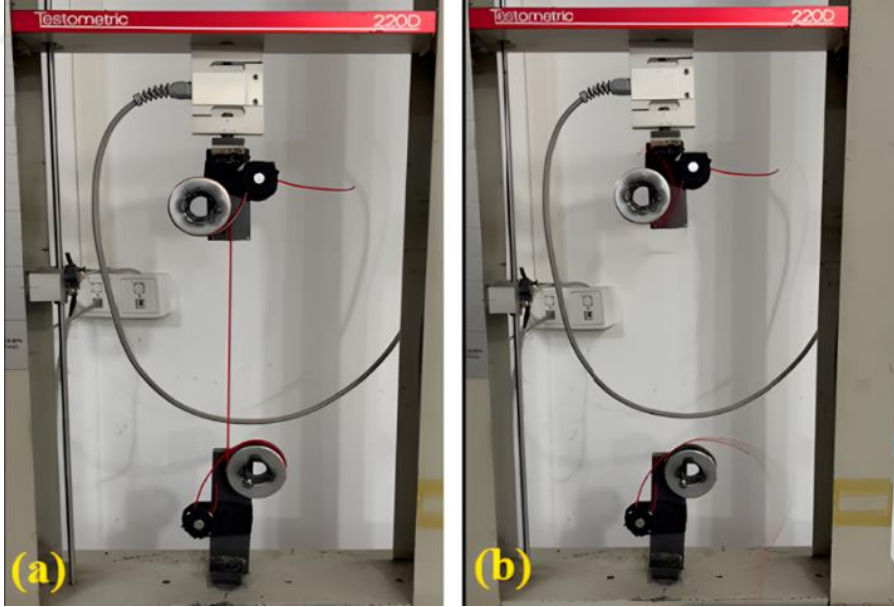
**Şekil 6.15:** CE600/PLA ipin (a) test anı ve (b) kopma anı



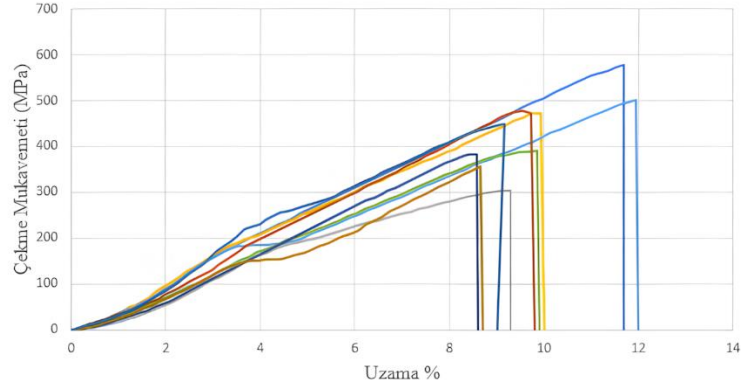
**Şekil 6.16:** CE600/PLA ipin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrileri

### CE1200/PLA

Şekil 6.17’de görseli verilen testlerde kopma süresi, 1200 tex PLA kaplı kompozit ip için 5.6 saniye olarak tespit edilmiştir. Kompozit iplerin ortalama çekme mukavemeti  $444 \pm 75$  MPa, elastisite modülü  $4530 \pm 770$  MPa ve maksimum uzama oranı ise %9.88 olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.18).



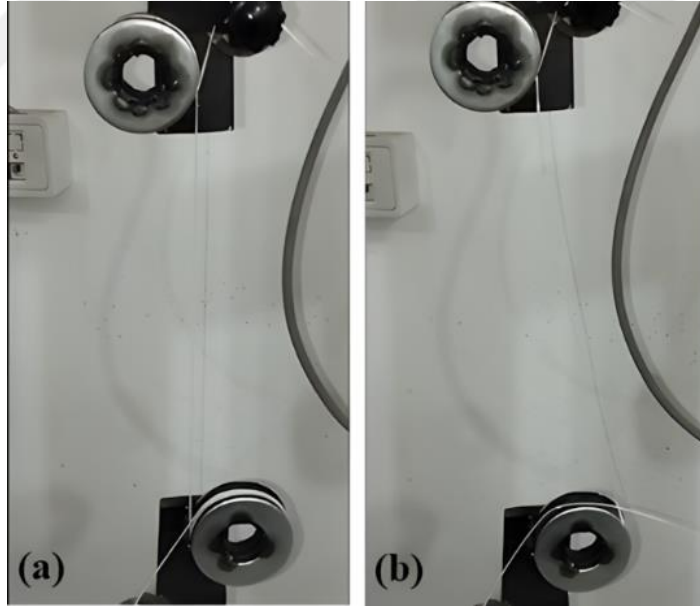
**Şekil 6.17:** CE1200/PLA ipin (a) test anı ve (b) kopma anı



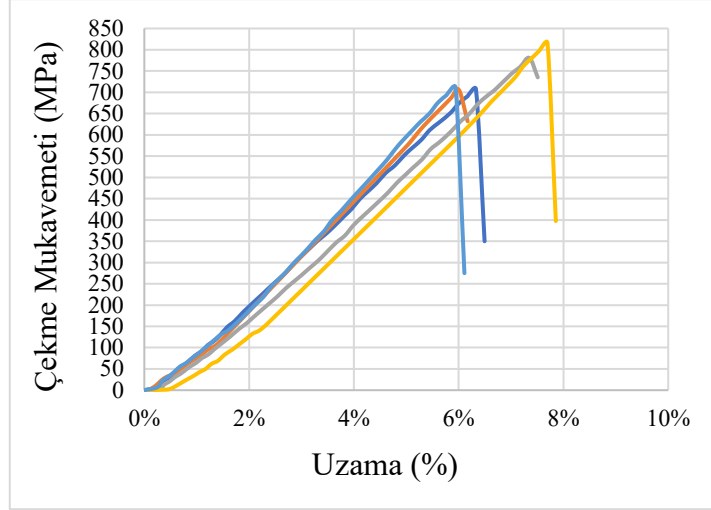
**Şekil 6.18:** CE1200/PLA ipin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrileri

### CE300/TPU

Şekil 6.19’da görseli verilen testlerde kopma süresi, 300 tex TPU kaplı kompozit ip için 4.4 saniye olarak tespit edilmiştir. Kompozit iplerin ortalama çekme mukavemeti  $774 \pm 23$  MPa, elastisite modülü  $11761 \pm 253$  MPa ve maksimum uzama oranı ise yaklaşık %6.66 olarak tespit edilmiştir. (Şekil 6.20).



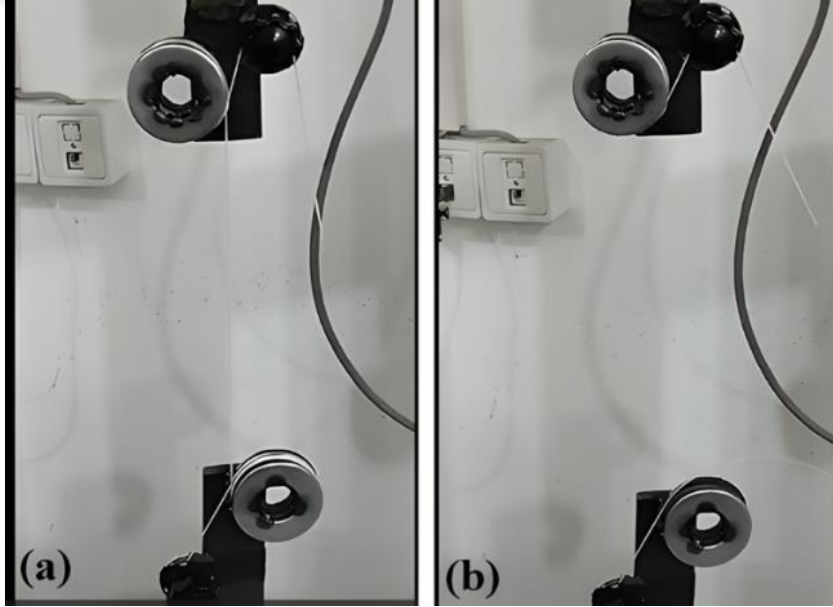
**Şekil 6.19:** CE300/TPU ipin (a) test anı ve (b) kopma anı



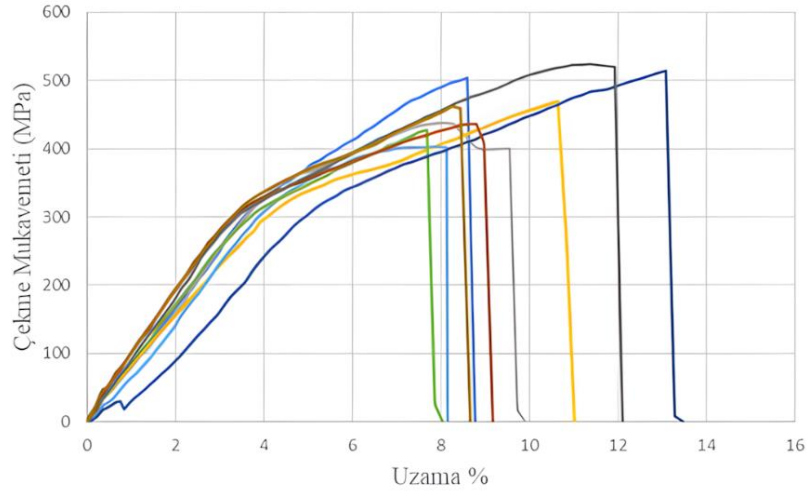
**Şekil 6.20:** CE300/TPU ipin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrileri

### CE600/TPU

Şekil 6.21’de görseli verilen uygulanan testlerde kopma süresi, TPU kaplı kompozit ip için 5.7 saniye olarak tespit edilmiştir. Kompozit iplerin ortalama çekme mukavemeti  $457 \pm 48$  MPa, elastisite modülü  $4722 \pm 487$  MPa ve maksimum uzama oranı ise yaklaşık %9.68 olarak tespit edilmiştir. (Şekil 6.22).



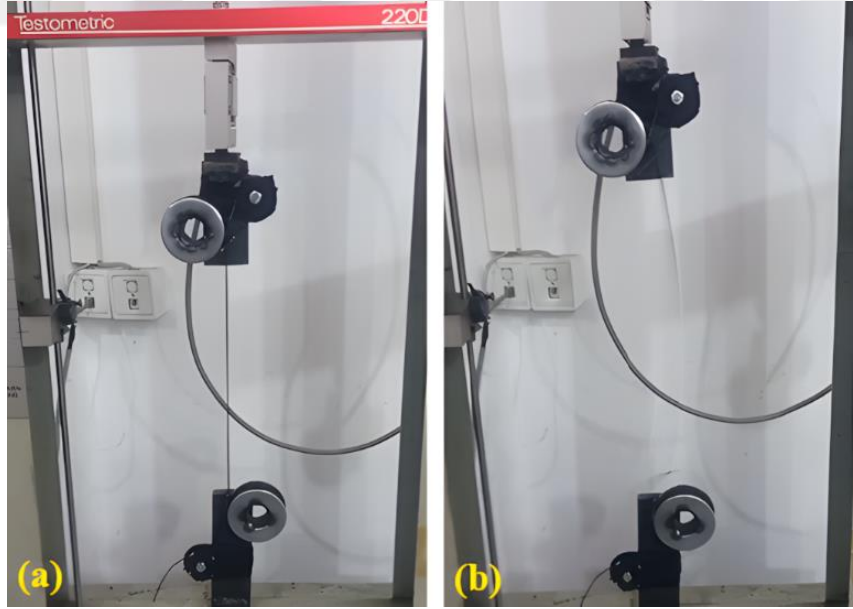
**Şekil 6.21:** CE600/TPU ipin (a) test anı ve (b) kopma anı



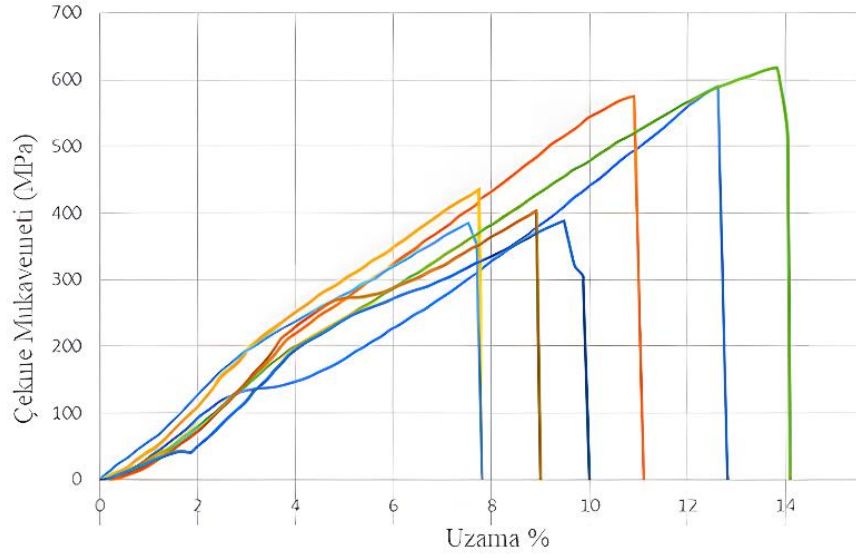
**Şekil 6.22:** CE600/TPU ipin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrileri

### CE1200/TPU

Şekil 6.23’da görseli verilen testlerde kopma süresi, 1200 tex TPU kaplı kompozit ip için 10.4 saniye olarak tespit edilmiştir. Kompozit iplerin ortalama çekme mukavemeti  $454 \pm 101$  MPa, elastisite modülü  $4365 \pm 971$  MPa ve maksimum uzama oranı ise %10.4 olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.24).



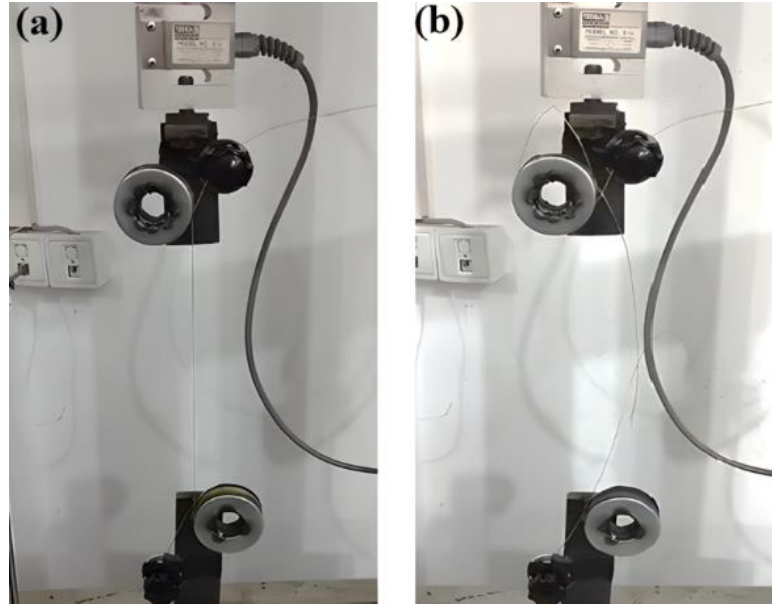
**Şekil 6.23:** CE1200/TPU ipin (a) test anı ve (b) kopma anı



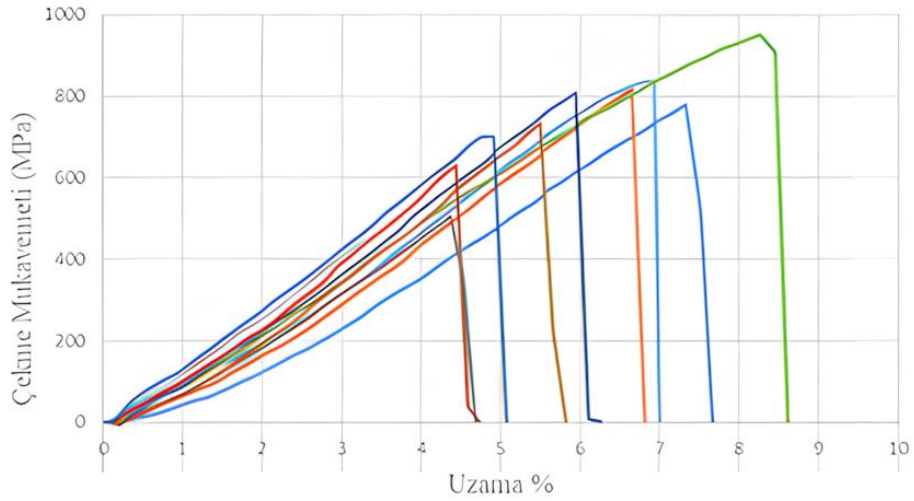
**Şekil 6.24:** CE1200/TPU ipin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrileri

### CE300/PETG

Şekil 6.25'te görseli verilen testlerde kopma süresi, PETG kaplı kompozit ip için 3.5 saniye olarak tespit edilmiştir. Kompozit iplerin ortalama çekme mukavemeti  $726 \pm 134$  MPa, elastisite modülü  $12100 \pm 2177$  MPa ve maksimum uzama oranı ise yaklaşık %6.0 olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.26).



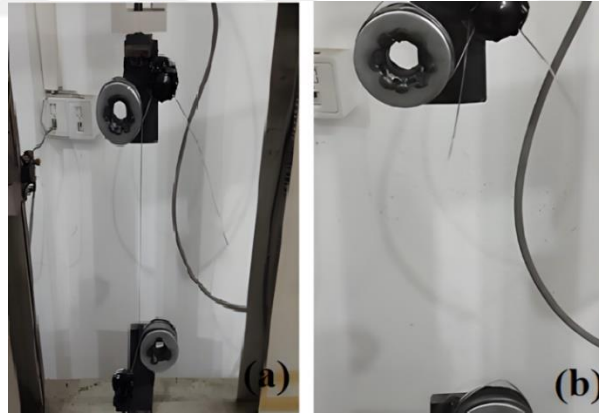
**Şekil 6.25:** CE300/PETG ipin (a) test anı ve (b) kopma anı



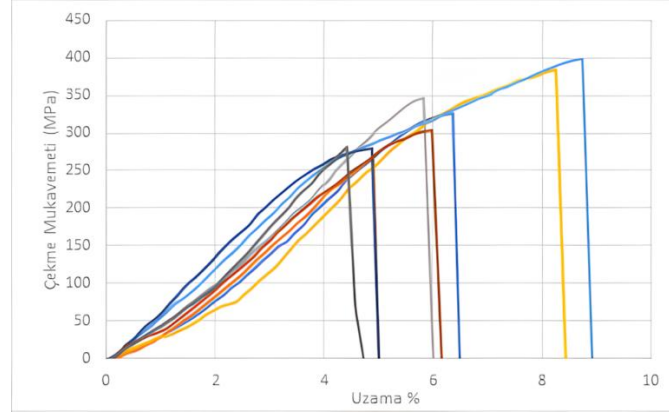
**Şekil 6.26:** CE300/PETG ipin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrileri

### **CE600/PETG**

Şekil 6.27’de görseli verilen uygulanan testlerde kopma süresi, PETG kaplı kompozit ip için 3.8 saniye olarak tespit edilmiştir. Kompozit iplerin ortalama çekme mukavemeti  $338 \pm 50.6$  MPa, elastisite modülü  $5525 \pm 770$  MPa ve maksimum uzama oranı ise yaklaşık %6.1 olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.28).



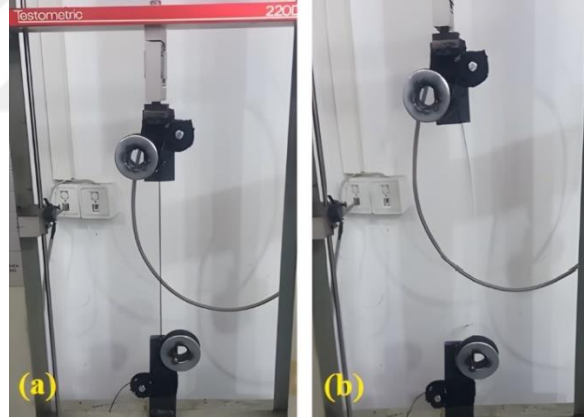
**Şekil 6.27:** CE600/PETG ipin (a) test anı ve (b) kopma anı



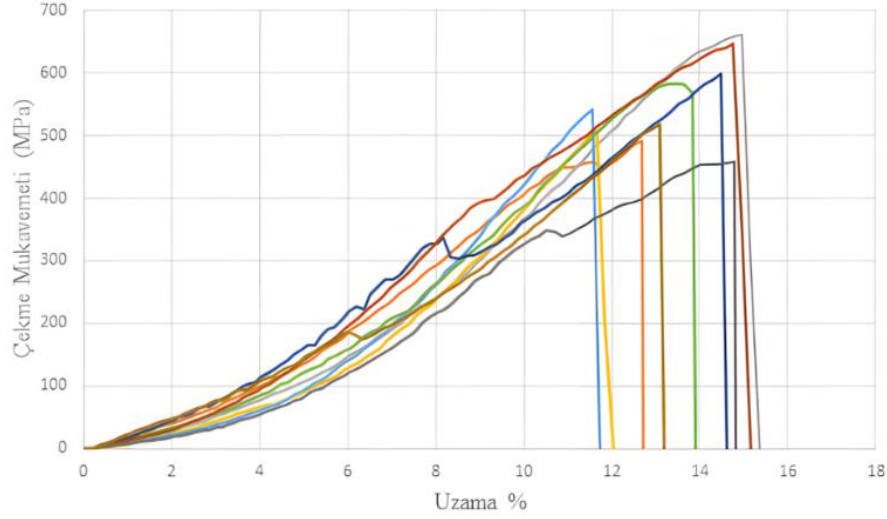
**Şekil 6.28:** CE600/PETG ipin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrileri

### CE1200/PETG

Şekil 6.29’da görseli verilen testlerde kopma süresi, 1200 tex PETG kaplı kompozit ip için 7.5 saniye olarak tespit edilmiştir. Kompozit iplerin ortalama çekme mukavemeti  $560 \pm 67$  MPa, elastisite modülü  $4068 \pm 535$  MPa ve maksimum uzama oranı ise yaklaşık %13.8 olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.30).



**Şekil 6.29:** CE1200/PETG ipin (a) test anı ve (b) kopma anı



Şekil 6.30: CE1200/PETG ipin çekme mukavemeti – uzama (%) eğrileri

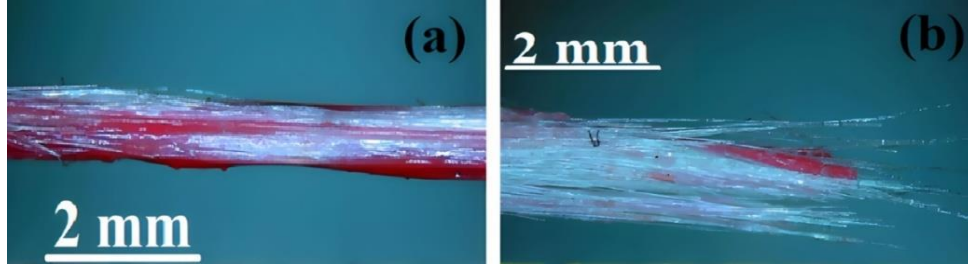
Tablo 6.5: Kompozit iplerin mekanik özellikleri

Kompozit ip	Çekme mukavemeti (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	Maks. Uzama (%)	Test süresi (saniye)
CE300/PLA	824 ± 58	13080 ± 850	6.30	3.8
CE600/PLA	367 ± 53	5719 ± 890	6.40	4.2
CE1200/PLA	444 ± 75	4530 ± 770	9.88	5.6
CE300/TPU	774 ± 23	11761 ± 253	6.66	4.4
CE600/TPU	457 ± 48	4722 ± 487	9.68	5.7
CE1200/TPU	454 ± 101	4365 ± 971	10.4	10.4
CE300/PETG	726 ± 134	12100 ± 2177	6.0	3.5
CE600/PETG	338 ± 50.6	5525 ± 770	6.1	3.8
CE1200/PETG	560 ± 67	4068 ± 535	13.8	7.5

## 6.7 Kompozit İplerin Çekme Testleri Sonrası Optik Görüntüleri

### CE300/PLA

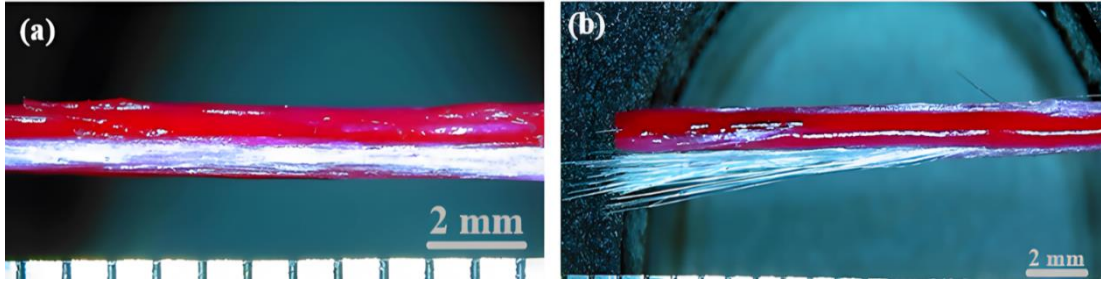
Nozul çapı Ø1.00 mm nozul kullanılarak üretilen kompozit iplerin çapı  $\text{ØD}_{ki} \approx 0.55$  mm olarak tespit edilmiştir. Üretilen kompozit iplerin kesiti ise  $A_{ki} \approx 0.2375$  mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Kompozit iplerin çekme testi öncesindeki durumları ve kopma noktaları verilmiştir (Şekil 6.31).



Şekil 6.31: CE300/PLA ipin (a) test öncesi ve (b) test sonrası kopma noktası

### CE600/PLA

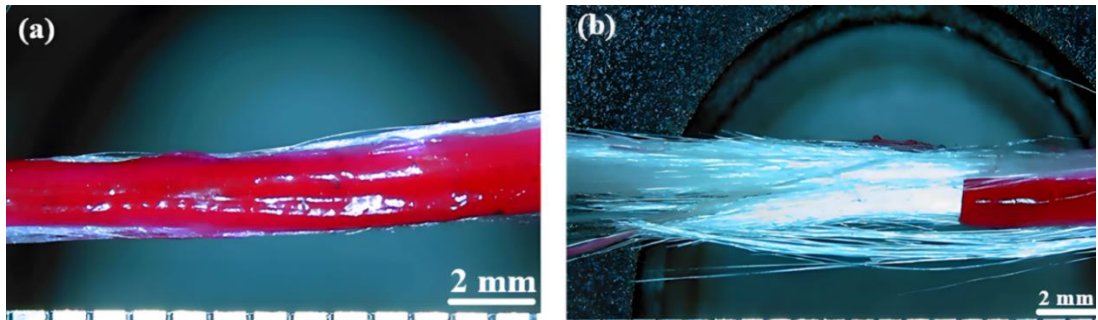
Şekil 6.32’de kompozit iplerin çekme testi öncesi durumlarının ve kopma noktalarının optik görüntüsü verilmiştir. Nozul çapı 1.50 mm nozul kullanılarak üretilen kompozit iplerin çapı  $\text{ØD}_{ki} \approx 0.940$  mm olarak tespit edilmiştir. Üretilen kompozit iplerin kesiti ise  $A_{ki} \approx 0.693$  mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.32: CE600/PLA ipin (a) test öncesi ve (b) test sonrası kopma noktası

### CE1200/PLA

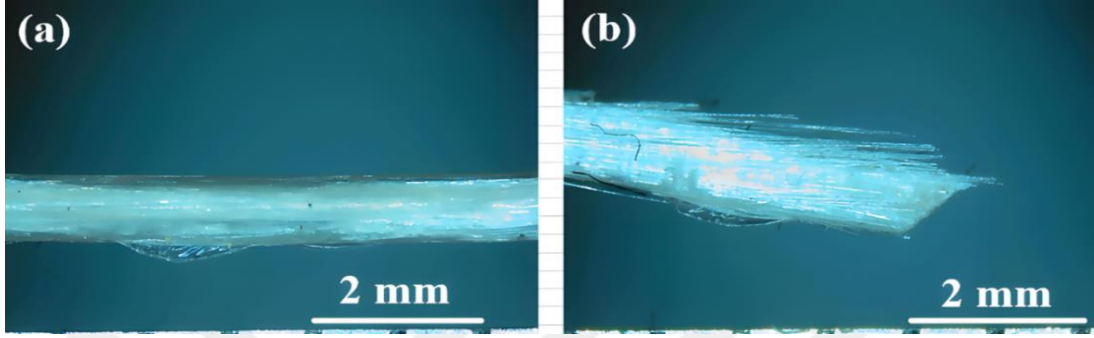
Şekil 6.33’te kompozit iplerin çekme testi öncesindeki durumlarının ve kopma noktalarının optik görüntüsü verilmiştir. Nozul çapı 1.50 mm nozul kullanılarak üretilen kompozit iplerin çapı  $\text{ØD}_{ki} \approx 1.162$  mm olarak tespit edilmiştir. Üretilen kompozit iplerin kesiti ise  $A_{ki} \approx 1.06$  mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.33: CE1200/PLA ipin (a) test öncesi ve (b) test sonrası kopma noktası

### CE300/TPU

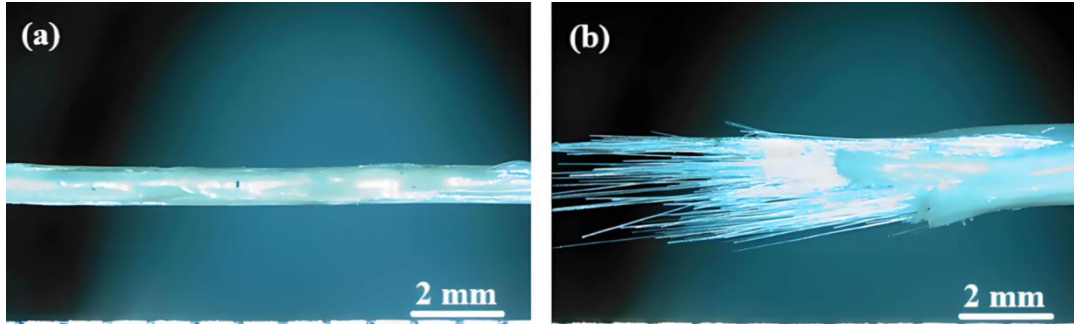
Şekil 6.34'te kompozit iplerin hasar görmemiş halinin ve kopma noktalarının optik görüntüsü verilmiştir. Nozul çapı 1.00 mm nozul kullanılarak üretilen kompozit iplerin çapı  $\text{ØD}_{ki} \approx 0.523$  mm olarak tespit edilmiştir. Üretilen kompozit iplerin kesiti ise  $A_{ki} \approx 0.21483$  mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.34: CE300/TPU ipin (a) test öncesi ve (b) test sonrası kopma noktası

### CE600/TPU

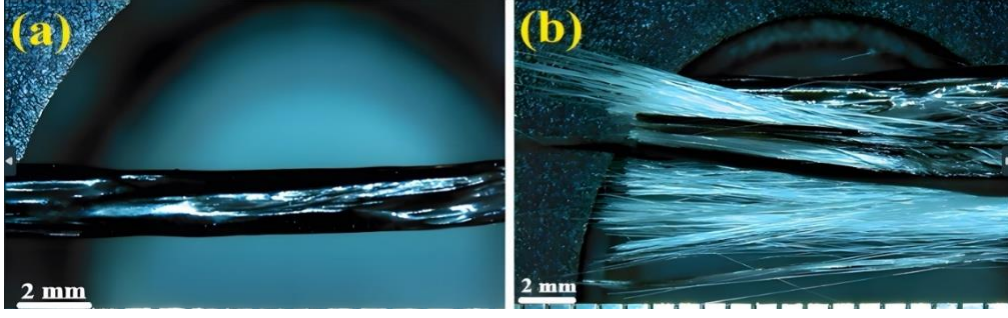
Şekil 6.35'te kompozit iplerin çekme testi öncesi durumları ve kopma noktalarının optik görüntüsü verilmiştir. Nozul çapı 1.50 mm nozul kullanılarak üretilen kompozit iplerin çapı  $\text{ØD}_{ki} \approx 0.917$  mm olarak tespit edilmiştir. Üretilen kompozit iplerin kesiti ise  $A_{ki} \approx 0.660$  mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.35: CE600/TPU ipin (a) test öncesi ve (b) test sonrası kopma noktası

### CE1200/TPU

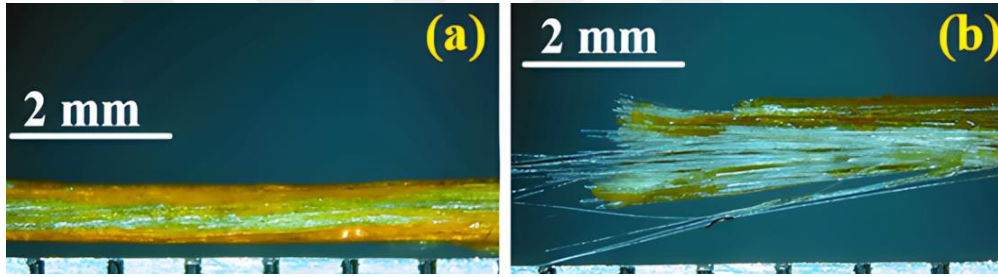
Şekil 6.36'da kompozit iplerin hasar görmemiş halinin ve kopma noktalarının optik görüntüsü verilmiştir. Nozul çapı 1.50 mm nozul kullanılarak üretilen kompozit iplerin çapı  $\text{ØD}_{ki} \approx 1.179$  mm olarak tespit edilmiştir. Üretilen kompozit iplerin kesiti ise  $A_{ki} \approx 1.09$  mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.36: CE1200/TPU ipin (a) test öncesi ve (b) test sonrası kopma noktası

### CE300/PETG

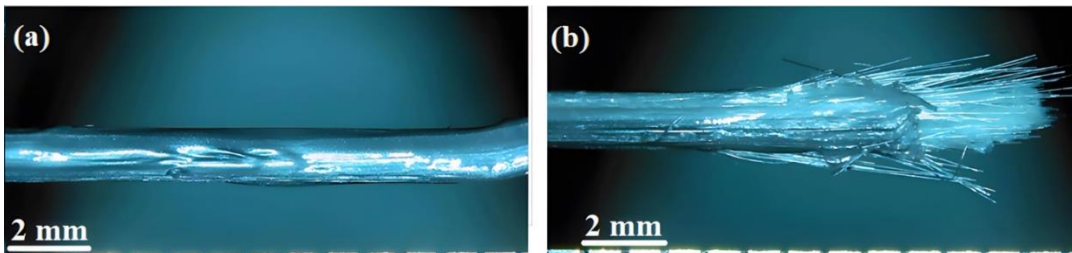
Şekil 6.37’de kompozit iplerin hasar görmemiş hallerinin ve kopma noktasının optik görüntüsü verilmiştir. Nozul çapı 1.00 mm nozul kullanılarak üretilen kompozit iplerin çapı  $\text{ØD}_{ki} \approx 0.541$  mm olarak tespit edilmiştir. Üretilen kompozit iplerin kesiti ise  $A_{ki} \approx 0.2290$  mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.37: CE300/PETG ipin (a) test öncesi ve (b) test sonrası kopma noktası

### CE600/PETG

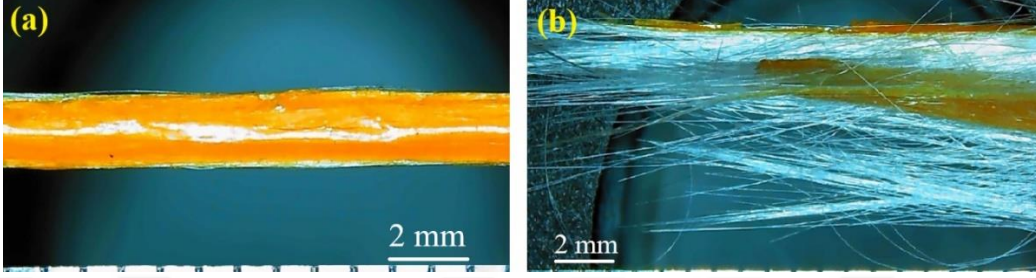
Şekil 6.38’de kompozit iplerin hasar görmemiş halinin ve kopma noktalarının optik görüntüsü verilmiştir. Nozul çapı 1.50 mm nozul kullanılarak üretilen kompozit iplerin çapı  $\text{ØD}_{ki} \approx 0.984$  mm olarak tespit edilmiştir. Üretilen kompozit iplerin kesiti ise  $A_{ki} \approx 0.760$  mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.38: CE600/PETG ipin (a) test öncesi ve (b) test sonrası kopma noktası

## CE1200/PETG

Şekil 6.39’da kompozit iplerin hasar görmemiş halleri ve kopma noktalarının optik görüntüsü verilmiştir. Nozul çapı 1.50 mm nozul kullanılarak üretilen kompozit iplerin çapı  $\text{ØD}_{ki} \approx 1.080$  mm olarak tespit edilmiştir. Üretilen kompozit iplerin kesiti ise  $A_{ki} \approx 0.916$  mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.39: CE1200/PETG ipin (a) test öncesi ve (b) test sonrası kopma noktası

## 6.8 Kompozit İplerin Kaynağı (Birleştirme) Ve Kaynak Mukavemeti

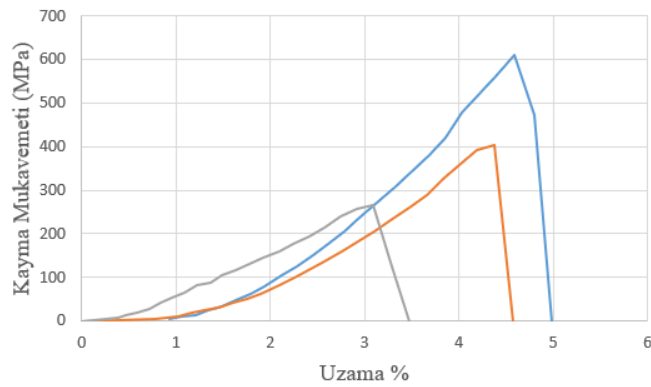
Kompozit iplerin tek bindirmeli kaynak kabiliyetleri test edilmiştir. Bunun için kompozit ipler Şekil 5.10’da görseli verilen kaynak kalemi kullanılarak birleştirilmiştir. Tablo 6.6’da verilen nozul sıcaklıkları ve 7.77 – 24.4 mm<sup>2</sup> arasında değişen farklı kaynak yüzey alanlarına ( $A_{kya}$ ) göre birleştirilmiştir. Kaynakla birleştirilen kompozit iplerin çekme/kayma mukavemeti hesabında ise tek bindirmeli birleşme bölgesindeki kayma gerilmeleri esas alınmıştır. Bu kapsamda kompozit ip numunelerinin birleştirilen yüzey alanları ve kaynak (nozul) sıcaklıkları Tablo 6.6’de verilmiştir. Kompozit iplerdeki kaynağın (birleşmenin) mekanik özellikleri ise Tablo 6.7’de verilmiştir. Şekil 6.40 – 6.48 arasında ise kompozit iplerin kayma mukavemeti – uzama (%) eğrileri görülmektedir.

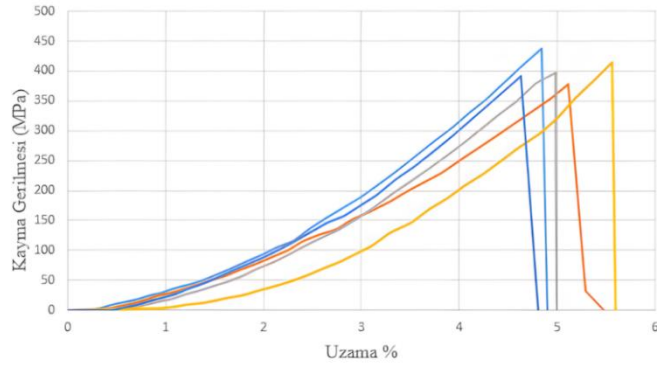
**Tablo 6.6:** Kaynaklı birleştirme işlemindeki proses parametreleri

Kompozit ip	Kaynaklanan yüzey alanı ( $A_{kya}$ , mm <sup>2</sup> )	Kaynak sıcaklığı ( $T_{kay}$ , °C)
CE300/PLA	8.36	230
CE600/PLA	22.0	230
CE1200/PLA	24.0	230
CE300/TPU	7.77	260
CE600/TPU	17.5	260
CE1200/TPU	25.7	260
CE300/PETG	8.0	245
CE600/PETG	18.0	245
CE1200/PETG	24.4	245

**Tablo 6.7:** Kompozit iplerdeki kaynağın (birleşmenin) mekanik özellikleri

Kompozit ip	Kaynaklı kompozit iplerin çekme/kayma testi verileri			
	Mukavemet (MPa)	Modül (MPa)	Maks. uzama (%)	Süre (s)
CE300/PLA	426 ± 173	10267 ± 3405	4.1	2.1
CE600/PLA	390 ± 24	7855 ± 694	5.0	2.5
CE1200/PLA	757 ± 29	12726 ± 956	5.9	2.4
CE300/TPU	490 ± 86	8762 ± 933	5.6	2.8
CE600/TPU	493 ± 63	10434 ± 836	4.9	2.9
CE1200/TPU	877 ± 37	13151 ± 2139	6.7	3.6
CE300/PETG	481 ± 53	12657 ± 1950	3.8	2.2
CE600/PETG	450 ± 8	9629 ± 1165	4.6	3.0
CE1200/PETG	638 ± 38	8461 ± 1036	7.6	3.5

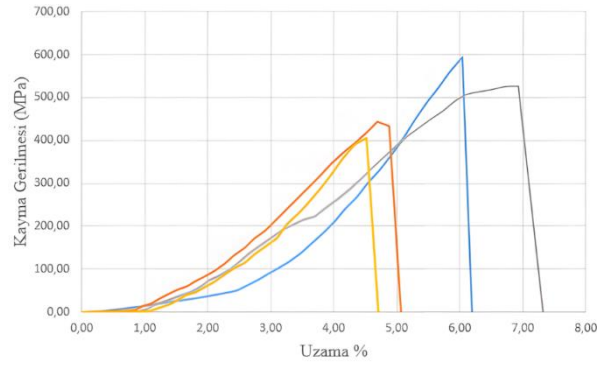
**Şekil 6.40:** Kaynak bölgesinin kayma mukavemeti–uzama (%) eğrileri (CE300/PLA)



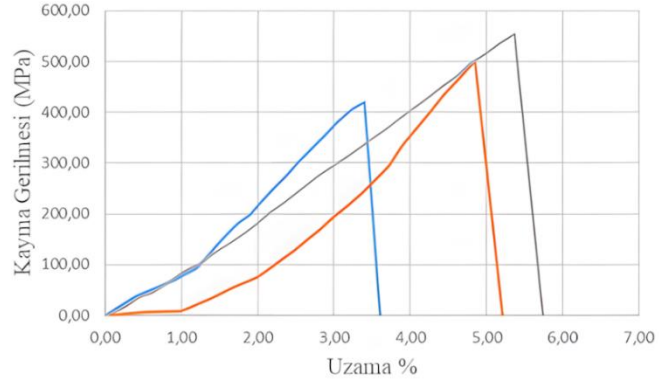
Şekil 6.41: Kaynak bölgesinin kayma mukavemeti–uzama (%) eğrileri (CE600/PLA)



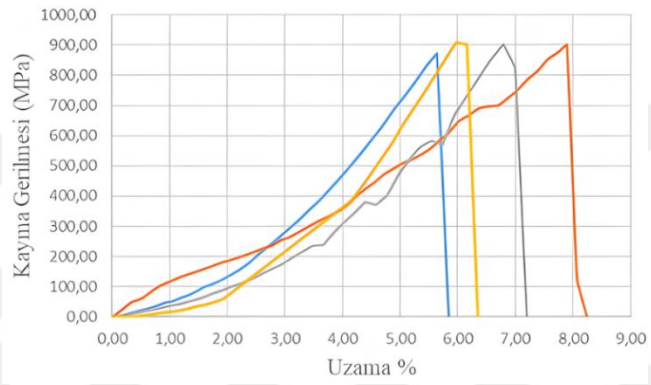
Şekil 6.42: Kaynak bölgesinin kayma mukavemeti–uzama (%) eğrileri (CE1200/PLA)



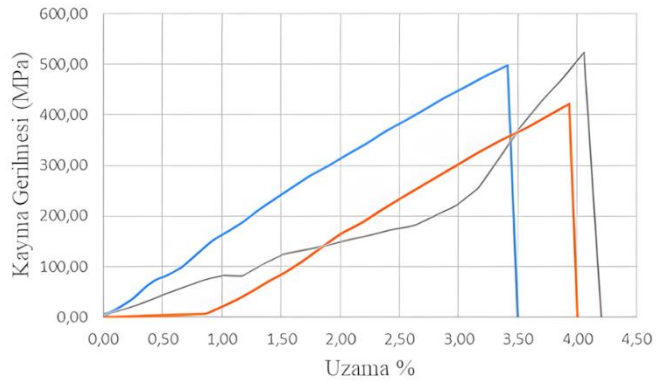
Şekil 6.43: Kaynak bölgesinin kayma mukavemeti–uzama (%) eğrileri (CE300/TPU)



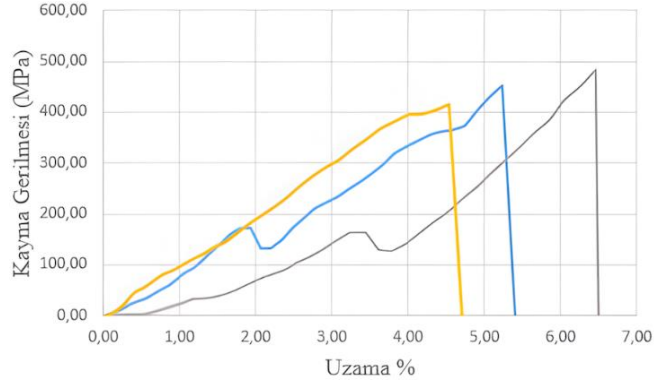
Şekil 6.44: Kaynak bölgesinin kayma mukavemeti–uzama (%) eğrileri (CE600/TPU)



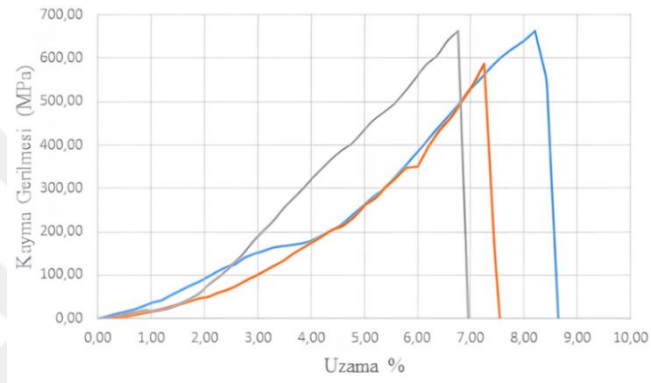
Şekil 6.45: Kaynak bölgesinin kayma mukavemeti–uzama (%) eğrileri (CE1200/TPU)



Şekil 6.46: Kaynak bölgesinin kayma mukavemeti–uzama (%) eğrileri (CE300/PETG)



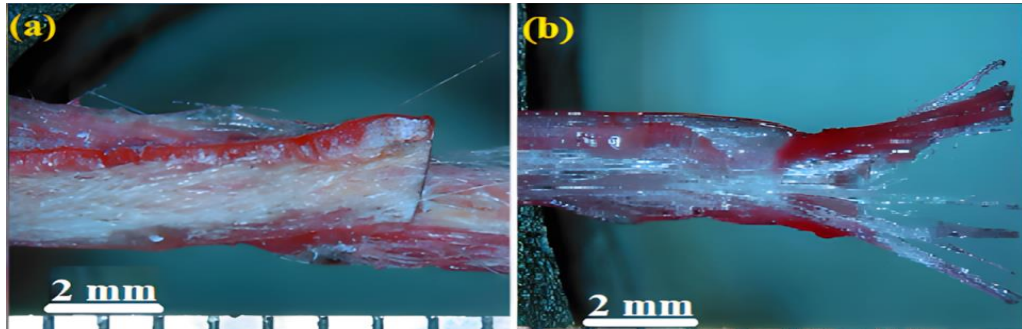
Şekil 6.47: Kaynak bölgesinin kayma mukavemeti-uzama (%) eğrileri (CE600/PETG)



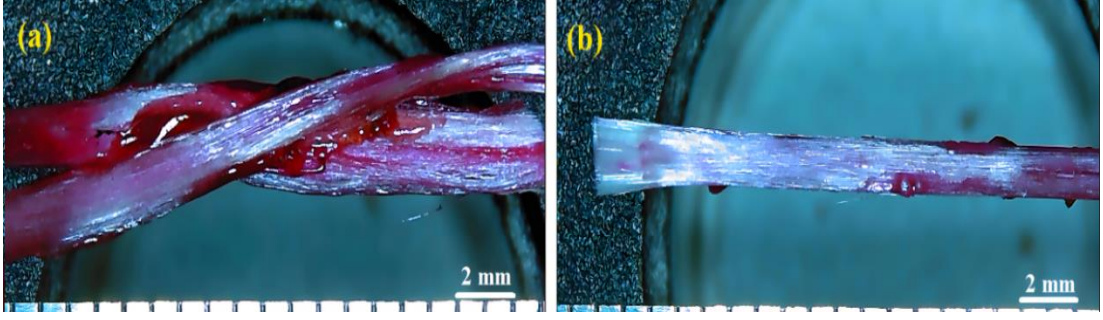
Şekil 6.48: Kaynak bölgesinin kayma mukavemeti-uzama (%) eğrileri (CE1200/PETG)

### 6.9 Kaynaklı Kompozit İplerin Çekme/Kayma Testleri Sonrası Optik Görüntüleri

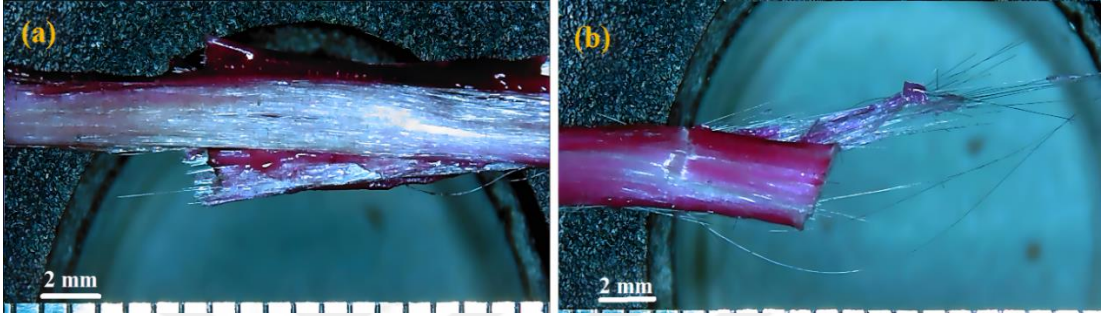
Kompozit iplerin tek bindirmeli kaynağında; 300 tex elyaf takviyeli ipler için 1 numaralı nozul (Ø2.0 mm), 600 tex elyaf takviyeli ipler için 2 numaralı nozul (Ø2.5 mm) ve 1200 tex elyaf takviyeli ipler için 3 numaralı nozul (Ø3.0 mm) kullanılmıştır (Şekil 5.11). Kompozit iplerin kaynak bölgesi ve çekme/kayma testi sonrası sıyrılma/kopma bölgelerini gösteren optik görüntüler sırasıyla Şekil 6.49 – 6.57 arasında verilmiştir.



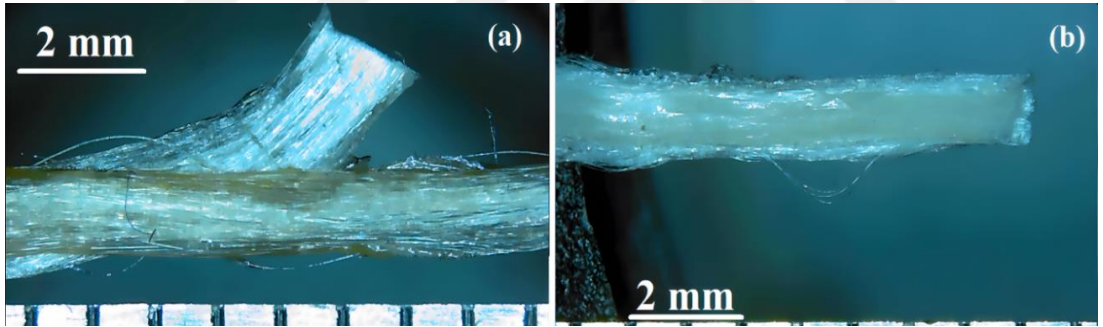
Şekil 6.49: CE300/PLA ipin (a) kaynak ve (b) sıyrılma/kopma bölgesi



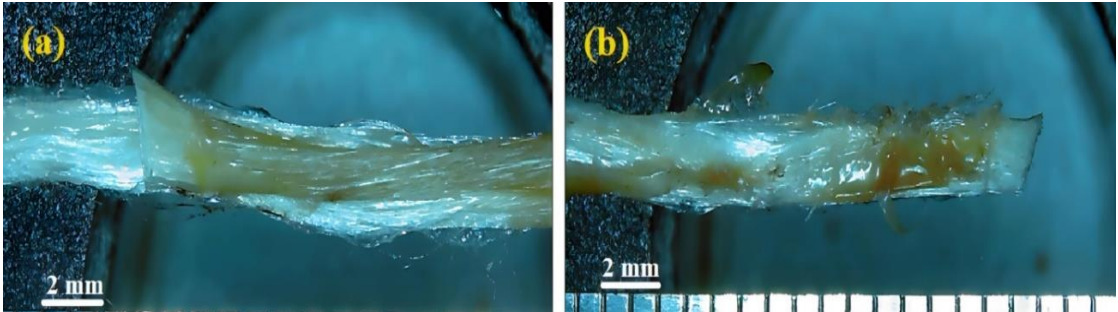
Şekil 6.50: CE600/PLA ipin (a) kaynak ve (b) sıyrılma/kopma bölgesi



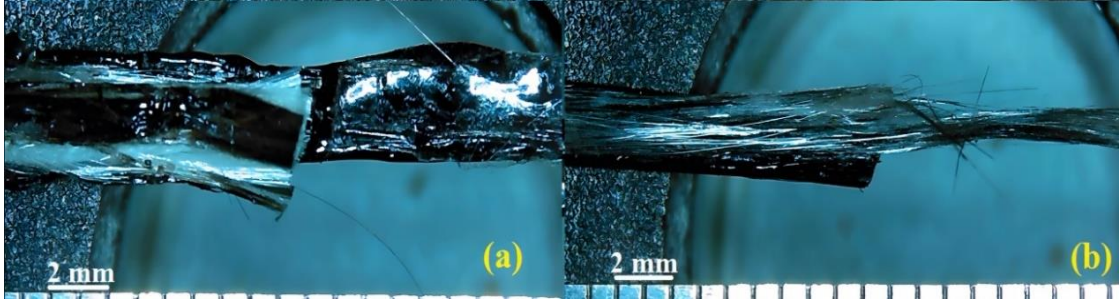
Şekil 6.51: CE1200/PLA ipin (a) kaynak ve (b) sıyrılma/kopma bölgesi



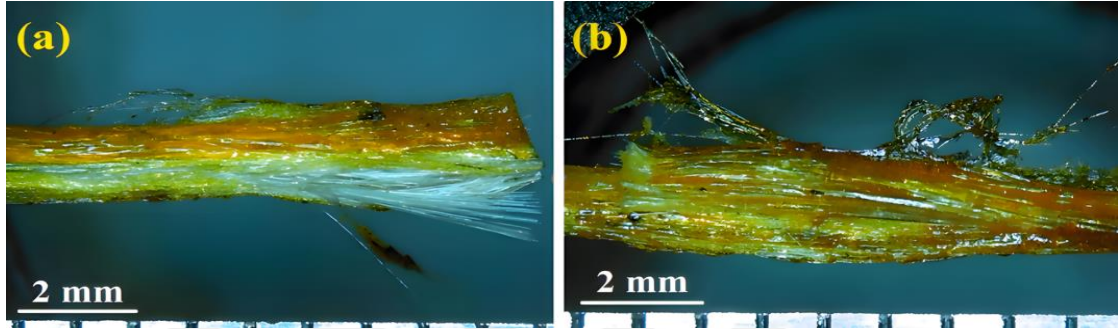
Şekil 6.52: CE300/TPU ipin (a) kaynak ve (b) sıyrılma/kopma bölgesi



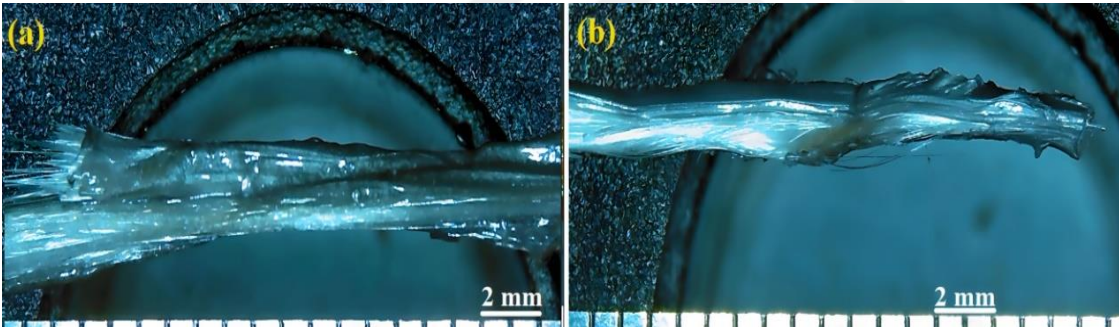
Şekil 6.53: CE600/TPU ipin (a) kaynak ve (b) sıyrılma/kopma bölgesi



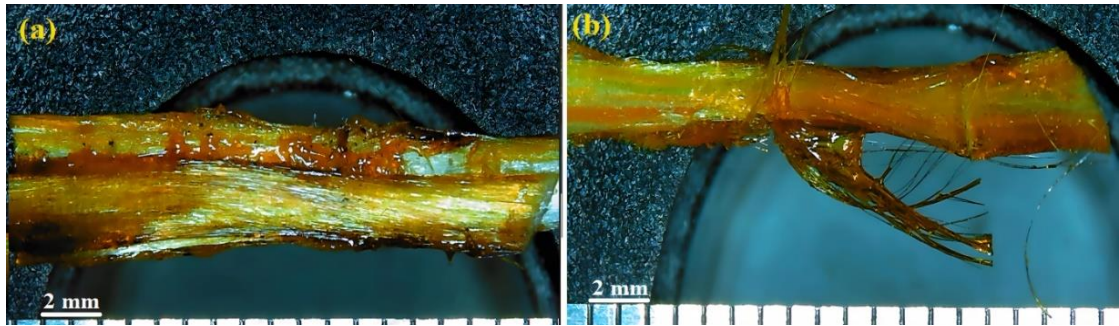
Şekil 6.54: CE1200/TPU ipin (a) kaynak ve (b) sıyrılma/kopma bölgesi



Şekil 6.55: CE300/PETG ipin (a) kaynak ve (b) sıyrılma/kopma bölgesi



Şekil 6.56: CE600/PETG ipin (a) kaynak ve (b) sıyrılma/kopma bölgesi



Şekil 6.57: CE1200/PETG ipin (a) kaynak ve (b) sıyrılma/kopma bölgesi

## 6.10 Tartışma

Üretimi gerçekleştirilen 300 tex, 600 tex ve 1200 tex cam elyaflarının; PLA, TPU ve PETG malzemeler ile kombinasyonlarının optik görüntüleri incelendiğinde, PLA yapılı malzemenin cam elyafını kaplama konusunda uygun olmadığı gözlemlenmiştir. Optik görüntülerde de görüldüğü üzere, PLA malzemelerde kaplanamamış yüzeylerin uzun şeritler şeklinde olduğu tespit edilmiştir. PETG ve TPU malzemelerde ise kaplama kalitesinin birbirine oldukça yakın olduğu izlenmiş; bu iki malzeme kullanılarak stabil kaplamalar elde edilebileceği düşünülmüştür.

300 tex, 600 tex ve 1200 tex kaplamalar ayrı ayrı incelendiğinde, 600 tex kaplamaların; 300 tex ve 1200 tex'e göre stabilitesini bir miktar kaybettiği görülmüştür. 300 tex ve 1200 tex deneylerinde elyaf hacim oranları %44–52 aralığında iken; 600 tex deneylerinde bu oran %31–36 seviyelerinde kalmıştır. Elyaf oranındaki azalma, doğal olarak matris oranındaki artışa ve termoplastiklerin birbirine yapışma eğiliminden dolayı bazı bölgelerde yığılmalara sebep olmuş; bu durum da cam elyafının kaplanmasını olumsuz yönde etkilemiştir.

300 tex cam elyafın, 600 tex'e göre daha yüksek; 600 tex'in ise 1200 tex'e göre daha yüksek mukavemete sahip olduğu tespit edilmiştir. Cam elyaflarında tex miktarı arttıkça cam elyaf içerisinde mikro kusur ihtimali artmakta, bu da yükün elyaflar arasında eşit dağılmasını engellemektedir. Zayıf liflerin bulunduğu bölgeler erken koparak genel mukavemetin düşmesine neden olabilir. Bu doğrultuda, 300 tex cam elyafı daha ince ve homojen yapısıyla, yükün lifler arasında daha dengeli dağılmasını sağlamaktadır. Buna karşılık, 1200 tex cam elyafı kalın yapısına rağmen içsel kusurlar, heterojenlik ve yönelim bozuklukları nedeniyle daha yüksek çekme kuvveti taşıyabilse de, çekme mukavemeti daha düşük çıkmaktadır. Bu durum, İstatistiksel Zayıflık İlkesi (Weibull Teorisi) ile de açıklanabilir: “Ne kadar çok lif varsa, zayıf bir lifin bulunma olasılığı o kadar artar ve sistem en zayıf halkası kadar güçlüdür.”

Testleri gerçekleştirilen kompozit iplerin uzama oranları incelendiğinde, elyaf hacim oranı ve kaplamanın stabil olması, uzama oranını etkileyen en önemli faktörler olarak gözlemlenmiştir. 300 tex'in uzama oranı, 600 tex'e göre daha düşük; 600 tex'in uzama oranı ise 1200 tex'e göre daha düşüktür. Bu durum, sadece cam elyaflar üzerinde yapılan testlerde de görüldüğü üzere, tex miktarı arttıkça gerilme değerlerinin düşmesiyle açıklanabilir. Aynı zamanda, testler incelendiğinde 300, 600 ve 1200 tex kompozit kaplamaların mukavemet ve

uzama oranlarındaki artışın, PLA, TPU ve PETG kaplamalarda birbirine yakın değerlere sahip olduğu ve uzama oranının daha çok kullanılan cam elyaf oranına bağlı olduğu gözlemlenmiştir.

Testleri gerçekleştirilen kompozit iplerin özgül ağırlıkları incelendiğinde, fiber hacim oranının özgül ağırlığı en çok etkileyen faktör olduğu gözlemlenmiştir. Kullanılan malzemelerin özgül ağırlıkları ayrı ayrı incelendiğinde TPU malzemelerin özgül ağırlığının daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bu yüzden TPU kaplı kompozit iplerin özgül ağırlığı diğer kaplı kompozit iplere göre daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Kompozit iplerin kaynağı incelendiğinde kaynak prosesinde en önemli etkenin yapışma yüzey alanı ve yapışma kalitesi olduğu görülmüştür. Kaynak prosesinde kullanılan PETG, PLA ve TPU termoplastiklerin hepsi yeterli seviyede mukavemet ve uzama oranı göstermiştir. Bütün termoplastikler ile yapılan uygulamalardaki veriler beğenilmesine rağmen TPU filament ile yapılan kaynak işlemleri incelendiklerinde TPU filamentin elastik yapısından dolayı kaynak işlemine daha fazla uyum sağladığı gözlemlenmiştir.

### **6.11 Optimum Proses Parametreleri**

Kullanılan E-cam elyaf tipleri ve termoplastik tipleriyle üretimi sağlanan kompozit iplerin üretimleri için belirlenen nozul çapları, fiber hacimleri, ekstrüzyon sıcaklığı, ekstrüzyon besleme hızı, motor redüktör hızı ve ortam sıcaklığı parametreleri Tablo 6.9'da belirtilmiştir.

**Tablo 6.8:** Optimum proses parametreleri

Termoplastik filament tipi	Cam-elyaf (tex)	Test edilen ve hesaplanan parametreler		Optimum parametreler			Ortam sıcaklığı (°C)
		Nozul çapı ( $\text{ØD}_{nz}$ ) (mm)	Fiber hacmi ( $\%V_f$ )	Ekstrüzyon sıcaklığı (°C)	Ekstrüzyon besleme hızı (mm/dak)	Motor redüktör (dev/dak)	
PLA	300	1.0	44.35	230	500	3-5	22-25
	600	1.5	34.68	230			
	1200	1.5	45.00	230			
TPU	300	1.0	47.15	260			
	600	1.5	36.40	260			
	1200	1.5	43.80	260			
PETG	300	1.0	46.30	245			
	600	1.5	31.80	245			
	1200	1.5	52.30	245			

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Literatürde uygulamalar için cam ve karbon elyafların polimerler ile kaplanmasıyla ilgili farklı proseslere değinilmiştir. Ancak çalışmadaki prototipin daha da geliştirilmesini tavsiye etmekle birlikte en basit ve maliyeti en az olan bir proses olduğu savunulmaktadır. Literatürde çoğu zaman E-cam elyafların çekme mukavemeti 2300–3500 MPa, elastisite modülü ise 69–82 GPa olarak değerlendirilmektedir (Demirok, 2022; Sakin, 2015). Ancak bu çalışmada, cam elyafların çekme mukavemeti literatürdeki verilerin ortalamalarından sırasıyla 300,600 ve 1200 tex için %50, %58 ve %70 kadar daha düşüktür. Bu bulguları destekleyici şekilde Tong ve arkadaşları yaptıkları çalışmada 300 tex E-cam elyafların çekme mukavemetini 1190 MPa (%59 daha düşük) olarak hesaplamışlardır. Bilge (2012) ve Yılmaz (2017) bu çalışmadan tek farkı matris olarak doymamış vinilester termoset reçine (VE-676-03) kullanarak yaptıkları çalışmada, elyaf hacim oranı %48 ve 13.74 µm lif çapındaki 300 tex E-cam elyaflarını tek yönlü (UD) kullanarak sağladıkları kompozitte çekme mukavemetini 758 MPa, elastisite modülünü ise 38.5 GPa olarak bulmuşlardır.

Tablo 7.1’de bu çalışmadaki yöntemle benzer şekilde üretilen, sektörde kullanım alanları belirtilen bazı sentetik ve kompozit iplerin teknik verileri ile bu çalışmadaki sonuçlarla kıyaslanmıştır. Tablo 7.1’de görüldüğü gibi, bu çalışmada çekme mukavemeti ve elastisite modülü açısından literatürdeki bazı iplerin mekanik özelliklerinden daha yüksek değerler elde edilmiştir. Özgül ağırlık açısından da literatürden biraz daha yüksek sonuç bulunduğu görülmektedir.

**Tablo 7.1:** Bazı sentetik ve kompozit kaplı iplerin mekanik ve fiziksel özellikleri

Kullanım yerleri	İp/halat malzemesi	Cam elyaf Takviye	Çekme mukavemeti (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	Nihai uzama (%)	Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Referans
Denizcilik (balık ağı)	Polipropilen ağ	Takviyesiz	257–480	2000	30–92	0.940	(Azhar and Mon, 2022; Bertelsen and Ottosen, 2022)
İnşaat sektörü (perde duvar onarımı, sıva)	Polipropilen ağ	Takviyesiz	≥ 500	4000	15–20	0.910	(Mustafaraj et al., 2020) (Tian-Yi-Engineering, 2024)
Su ürünleri (kafes ağı)	Naylon PA6	Takviyesiz	76	2900	15–25	1.158	(Myrli and Khawaja, 2019)
Su ürünleri (kafes ağı)	PET	Takviyesiz	152	3000	3.50–5.83	1.380	(Myrli, 2017; Myrli and Khawaja, 2019)
Su ürünleri (kafes ağı)	Naylon PA6	%30.00	180	9800	3.0	1.350	(Myrli and Khawaja, 2019)
Otomotiv ve ev eşya endüstrisi	PET	%30.00	175	10600	2.5	1.550	(Akro-Plastic, 2024)
Su ürünleri (kafes ağı)	Ester bazlı TPU elastomer	%30.00	72	3100	20	1.476	(Myrli and Khawaja, 2019)
Genel	300 tex cam elyaf – TPU	%47.15	744	11761	6.66	1.768	Bu çalışma
Genel	300 tex cam elyaf – PLA	%44.35	824	13080	6.3	1.820	Bu çalışma
Genel	300 tex cam elyaf – PETG	%46.30	774	12100	6	1.843	Bu çalışma
Genel	600 tex cam elyaf – TPU	%36.40	457	4722	9.6	1.610	Bu çalışma
Genel	600 tex cam elyaf – PLA	%34.68	366	5719	6.4	1.690	Bu çalışma
Genel	600 tex cam elyaf – PETG	%31.80	337	5525	6.1	1.652	Bu çalışma
Genel	1200 tex cam elyaf – TPU	%43.80	454	4365	10.4	1.724	Bu çalışma
Genel	1200 tex cam elyaf – PLA	%45.00	444	4530	9.8	1.880	Bu çalışma
Genel	1200 tex cam elyaf – PETG	%52.30	550	4068	13.8	1.919	Bu çalışma

**Tablo 7.2:** Kompozit ip ve kompozit ip kaynağın mekanik özelliklerinin karşılaştırması

Kompozit ip	Kompozit iplerin çekme testi verileri			Kaynaklı kompozit iplerin çekme/kayma testi verileri						
	Mukavemet (MPa)	Modül (MPa)	Maks. Uzama (%)	Mukavemet (MPa)	Fark (%)	Modül (MPa)	Fark (%)	Maks. Uzama (%)	Fark (%)	Kaynak yüzey alanı (mm <sup>2</sup> )
CE300/PLA	824	13080	6.30	426	48↓	10267	22↓	4.1	35↓	8.36
CE600/PLA	367	5719	6.40	390	6↑	7855	37↑	5.0	22↓	22.00
CE1200/PLA	444	4530	9.88	757	70↑	12726	181↑	5.9	40↓	24.00
CE300/TPU	774	11761	6.66	490	37↓	8762	25↓	5.6	16↓	7.77
CE600/TPU	457	4722	9.68	493	8↑	10434	121↑	4.9	49↓	17.53
CE1200/TPU	454	4365	10.40	877	93↑	13151	201↑	6.7	36↓	25.70
CE300/PETG	726	12100	6.00	481	34↓	12657	5↑	3.8	37↓	8.00
CE600/PETG	338	5525	6.10	450	33↑	9629	74↑	4.6	25↓	18.00
CE1200/PETG	560	4068	13.80	638	14↑	8461	108↑	7.6	45↓	24.40

Bu çalışmadaki kompozit iplerin ve kaynaklı kompozit iplerin çekme verilerinin; mukavemet, elastisite modülü ve uzama oranları karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 7.2’de verilmiştir.

Üretimini yapmış olduğumuz kompozit iplerin kullanılabilirlikleri diğer alanlar düşünüldüğü zaman kompozit iplerin öncelikle üretim kalitesi arttırılırsa 3D Printer yardımı ile 3D baskı alınması için kullanılabilir olduğu öngörülmektedir. Eğer 3D baskı süreçlerinde kullanılır ise eklemeli imalat yöntemi ile daha mukavemetli malzemeler elde edilebileceği düşünülmekte olup birçok eklemeli imalat prosesinin düşük mukavemet değerlerinden dolayı nihai ürün olarak kullanılamama sorununun önüne geçilebilir. Bu şekilde yüksek kalıp maliyetlerinden kurtulunup eklemeli imalat ile nihai ürüne gidilebilir.

Kompozit iplerin, ergonomik bir kaynak kalemi üretimi sağlandıktan sonra birçok malzemenin kaynağı için kullanılabilirliği düşünülmektedir. Kaynak kalemi ile kapatılan çatlak noktaları veya kopma yüzeyleri birçok yapıştırıcıya oranla daha mukavemetli olacaktır. Üretilen bu tarz bir kalemin özellikle bazı düşük mukavemet değerleri sağlayan kompozit malzemelerin ve plastik malzemelerin çatlayan ya da kırılan yüzeylerinin onarılabilmesi için piyasada kendisine yer bulabileceği düşünülmektedir.

## 8.KAYNAKLAR

- Ahrabi, A., İ. Bilici, A.Y. Bilgesü.** (2012). Pet atıkları kullanılarak kompozit malzeme üretiminin araştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(3).
- Akro-Plastic.** (2024). Akro Plastic Compounds GmbH, <https://akro-plastic.com/en/product/precite-e-gf-30-natural-7303-en>, (Erişim 14.08.2024).
- Asi, D.** (2008). Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Aşınma Performansının İncelenmesi (Yüksek lisans tezi), *Erişim adresi: https://tez.yok.gov.tr*.
- ASTM-D2256.** (2002). Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method.
- Azhar, A.F., S.Z.K. Mon.** (2022). The Effect of The Environment Condition on The Strength of Fishing Net, *Progress in Engineering Application and Technology*, 3(1): 780-85.
- Balasubramanian, M.** (2014). *Composite materials and processing* (CRC press Boca Raton).
- Bertelsen, I., L. Ottosen.** (2022). Recycling of waste polyethylene fishing nets as fibre reinforcement in gypsum-based materials, *Fibers and Polymers*, 23(1): 164-74.
- Bezerra, R.M.** (2018). "Modelling and simulation of the closed injection pultrusion process", KIT-Bibliothek,
- Bilge, K.** (2012). "Multi-scale nature of composite materials: Three case studies", MSc Thesis, Graduate School of Engineering and Natural Sciences, Sabancı University, İstanbul, Türkiye,
- Chalioris, C.E., P.-M.K. Kosmidou, N.A. Papadopoulos.** (2018). Investigation of a new strengthening technique for RC deep beams using carbon FRP ropes as transverse reinforcements, *Fibers*, 6(3): 52.
- Chandra, R., S. Singh, K. Gupta.** (1999). Damping studies in fiber-reinforced composites— a review, *Composite Structures*, 46(1): 41-51.
- Chawla, K.K.** (2012). *Composite materials: science and engineering* (Springer Science & Business Media).
- Chawla, K.K., K.K. Chawla.** (2012). Ceramic matrix composites, *Composite Materials: Science and Engineering* 249-92.
- Chawla, N., Y.L. Shen.** (2001). Mechanical behavior of particle reinforced metal matrix composites, *Advanced Engineering Materials*, 3(6): 357-70.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Conner, B.P., G.P. Manogharan, A.N. Martof, L.M. Rodomsky, C.M. Rodomsky, D.C. Jordan, J.W. Limperos.** (2014). Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services, *Additive Manufacturing*, 164-76.
- Demirok, G.** (2022). "Usability of polylactide biopolymer as thermoplastic matrix for woven fiber composite laminates", Middle East Technical University,
- Donald, I., P. McMillan.** (1976). Ceramic-matrix composites, *Journal of Materials Science*, 11949-72.
- Eisen, W., B. Ferguson, R. German, R. Iacocca, P. Lee, D. Madan, K. Moyer, H. Sanderow, Y. Trudel.** (1998). Powder metal technologies and applications.
- Gülsever, C.S., Y. Güzel.** (2024). "Temperature control across the mold with pre-heated closed bath system in pultrusion method." In *16th International Istanbul scientific research congress on life, engineering, architecture, and mathematical sciences proceedings book*, edited by Raul D. F. Moreira. İstanbul: BZT Akademi Yayınevi.
- Gür, Y., S. Çelik, R. Sakin.** (2024). Tensile behaviour of continuous carbon fibre reinforced composites fabricated by a modified 3D printer, *Materials Research Express*, 11(7): 075305.
- Halabi, Y., H. Xu, Z. Yu, W. Alhaddad, I. Dreier.** (2023). Experimental-based statistical models for the tensile characterization of synthetic fiber ropes: a machine learning approach, *Scientific reports*, 13(1): 17768.
- Harris, B.** (1999). Engineering composite materials.
- Heins, K., S. Lesker, J. Pütz, M. Hüntemann, T. Gries.** (2023). Effect of thermoplastic impregnation on the mechanical behaviour of textile reinforcement for concrete, *SN Applied Sciences*, 5(3): 93.
- Hu, Q., Y. Duan, H. Zhang, D. Liu, B. Yan, F. Peng.** (2018). Manufacturing and 3D printing of continuous carbon fiber prepreg filament, *Journal of Materials Science*, 531887-98.
- Hussain, Q., A. Ruangrassamee, S. Tangtermsirikul, P. Joyklad, A.C. Wijeyewickrema.** (2021). Low-cost fiber rope reinforced polymer (FRRP) confinement of square columns with different corner radii, *Buildings*, 11(8): 355.
- Jacobsen, S., H. Fritz, P. Degée, P. Dubois, R. Jérôme.** (1999). Polylactide (PLA)—a new way of production, *Polymer Engineering & Science*, 39(7): 1311-19.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Karagöz, İ.** (2014). "*Termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynak özellikleri*", Marmara Üniversitesi (Turkey),
- Lorenz, N., P. Stolz, D. Rosenbach, N. Gerber, S. Sell, A. Zoller, D. Foerges, M. Schön, C. Hopmann.** (2024). "Manufacturing hybrid thermoplastic fiber reinforced profiles with thermoplastic coating layer–Process development and mechanical recycling." In *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing.
- Maier, A., R. Schledjewski.** (2016). "Study on parameters affecting the mechanical properties of dry fiber bundles during continuous composite manufacturing processes." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012034. IOP Publishing.
- Mallick, P.K.** (1997). *Composites engineering handbook* (CRC Press: New York).
- Mansouri, K., H. Djebaili, M. Brioua.** (2020). Mechanical Behavior of Particle Reinforced Thermoplastic Matrix Composites Using Finite Element Modeling.
- Matsuzaki, R., M. Ueda, M. Namiki, T.-K. Jeong, H. Asahara, K. Horiguchi, T. Nakamura, A. Todoroki, Y. Hirano.** (2016). Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation, *Scientific reports*, 6(1): 23058.
- MatWeb.** (2024). Material Property Data, <https://matweb.com/>, (Erişim 15.08.2024).
- Mihara, T., I. Yoshitake, T. Kitada, M. Ono.** (2023). Pull-out test of carbon-fiber composite cable (CFCC) tendon for an internal anchorage, *Case Studies in Construction Materials*, 18e02029.
- Morampudi, P., K.K. Namala, Y.K. Gajjela, M. Barath, G. Prudhvi.** (2021). Review on glass fiber reinforced polymer composites, *Materials Today: Proceedings*, 43314-19.
- Mustafaraj, E., Y. Yardim, M. Corradi, A. Borri.** (2020). Polypropylene as a retrofitting material for shear walls, *Materials*, 13(11): 2503.
- Myrli, O., H. Khawaja.** (2019). Fluid-structure interaction (FSI) modelling of aquaculture net cage, *The International Journal of Multiphysics*, 13(1): 97-112.
- Myrli, O.E.L.** (2017). "*Finite element analysis of materials for aquaculture net cages. FEA of materials for aquaculture net cages using ANSYS Workbench*", UiT The Arctic University of Norway,

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Naito, K., H. Oguma, C. Nagai.** (2020). Temperature-dependent tensile properties of hybrid carbon/glass thermoplastic composite rods, *Polymer Composites*, 41(10): 3985-95.
- Navarro, R., S. Ferrándiz, J. López, V.J. Seguí.** (2008). The influence of polyethylene in the mechanical recycling of polyethylene terephthalate, *Journal of Materials Processing Technology*, 195(1-3): 110-16.
- Onur, Y.A.** (2010). Halat ömrüne etki eden parametrelerin teorik ve deneysel olarak incelenmesi.
- Özer, H.** (2015). "Sürekli cam elyaf takvyeli termoplastik kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi", Bursa Uludag University (Turkey),
- Quan, H., B.-q. Zhang, Q. Zhao, R.K. Yuen, R.K. Li.** (2009). Facile preparation and thermal degradation studies of graphite nanoplatelets (GNPs) filled thermoplastic polyurethane (TPU) nanocomposites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(9): 1506-13.
- Roh, S., M. Seong, H. Cho, S. Lee, B. Kim, H. Lee.** (2023). Quality characteristics of glass fiber reinforced polymer (GFRP) rebar products based on curing agents, heating temperature and production speed, *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 14(4): 534-42.
- RTP-Company.** (2024). Ester-Based Thermoplastic Polyurethane Elastomer Compounds, <https://www.rtpcompany.com/technical-info/data-sheets/series-1200-s/>
- Sakin, R.** (2015). Relationship between Barcol hardness and flexural modulus degradation of composite sheets subjected to flexural fatigue, *Steel and Composite Structures*, 19(6): 1531-48. Neslihan Doğan Sağlamtimur. İstanbul, Türkiye.
- Sakin, R.** (2024b). Kompozit levhaların mekanik özelliklerindeki değişkenliği üzerinde üretim prosesi ve malzeme parametrelerinin etkisinin incelenmesi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26(2): 441-54.
- Sihn, S., R.Y. Kim, K. Kawabe, S.W. Tsai.** (2007). Experimental studies of thin-ply laminated composites, *Composites Science and Technology*, 67(6): 996-1008.
- Sood, A.K., R.K. Ohdar, S.S. Mahapatra.** (2010). Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts, *Materials & Design*

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Strong, A.B.** (2008). *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications* (Society of manufacturing engineers).
- Şişecam.** (2024). Şişecam Tek Uçlu Fitol, <https://www.sisecam.com.tr/sites/catalogs/tr/Documents/buss-seg/Cam-Elyaf/tek-uclyu-fitil/sisecam-WR6.pdf>, (13.01.2025).
- Tábi, T., I. Sajó, F. Szabó, A. Luyt, J. Kovács.** (2010). Crystalline structure of annealed polylactic acid and its relation to processing, *Express Polymer Letters*, 4(10).
- Tayyar, A.E., G. Alan.** (2007). Sentetik liflerden üretilen halat yapıları ve kullanım performansları, *Tekstil ve Mühendis*, 14(68): 1-12.
- Tian-Yi-Engineering.** (2024). Net Polypropylene Fiber, Changzhou Tian Yi Engineering Fiber Co.,Ltd, <http://www.tianyi-fiber.com/products/89>, (Erişim 15.08.2024).
- Türkoğlu, İ.K.** (2020). "3 Boyutlu Eklemeli Üretim Yöntemiyle Üretilmiş Termoplastik Esaslı Ökzetik Çekirdek Geometrilili Sandviç Yapıların Statik ve Dinamik Yükler Altında Davranışının İncelenmesi", Bursa Uludağ University (Turkey),
- Ueda, M., D. Nakayama, N. Katsuta, M. Okoshi.** (2023). High-throughput 3D printing of continuous carbon fiber–reinforced Polyamide 6/Maleic Anhydride-modified Polypropylene/polypropylene composite by a multifilament feeder, *Composites and Advanced Materials*, 3226349833231158395.
- Vaneker, T.** (2017). Material extrusion of continuous fiber reinforced plastics using commingled yarn, *Procedia CIRP*, 66317-22.
- Vatandaş, B.B., A. Uşun, N. Yıldız, C. Şimşek, Ö.N. Cora, M. Aslan, R. Gümrük.** (2023). Additive Manufacturing of PEEK-Based Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Composites with High Mechanical Properties, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*107434.
- Wang, R.-M., S.-R. Zheng, Y.G. Zheng.** (2011). *Polymer matrix composites*
- Yılmaz, B.** (2017). "Tracing visual and acoustic signatures of mechanical behavior of composite materials",
- Zhang, Z., Q. Ji, Z. Guo, C. Li, R. Guo, J. Tian, Z. Zhang, T. He, G. Xian.** (2024).
- Zhang, H.** (2019). *Shock wave overpressure testing system based on double external cavity fabry-perot interferometer. 14th (ICEMI).*
- Zhou, J., X. Wang, J. Xie, R. Wu, H. Huang, W. He, Z. Wu.** (2024). A novel fiber-reinforced polymer rope: Concept design and experimental evaluation, *Engineering Structures*, 305117775.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Ahmet Göktuğ KIZILÇAOĞLU

Doğum tarihi ve yeri :

E-posta :

### Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2025
Lisans	Uludağ Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2022
Lise	Balıkesir Fatma Emin Kutvar Anadolu Lisesi	2016