

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

**SÜREKLİ CAM FİBER TAKVİYELİ POLİPROPİLEN KOMPOZİTLERİN  
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

**DUYGU GÜLFEM BAYDAR**

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

**DANIŞMAN  
PROF. DR. AHMET ÜNAL**

**İSTANBUL, 2011**

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜREKLİ CAM FİBER TAKVİYELİ POLİPROPİLEN KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ  
VE KARAKTERİZASYONU**

Duygu Gülfem BAYDAR tarafından hazırlanan tez çalışması 20.06.2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

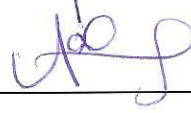
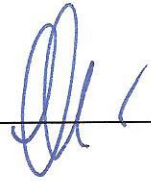
Prof. Dr. Ahmet ÜNAL  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Ahmet ÜNAL  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU  
İstanbul Üniversitesi

Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER  
Yıldız Teknik Üniversitesi

  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_

Bu alışma, Mir Araştırma Geliştirme A.ř. (Dizayn Grup Teknoloji) tarafından yürütülen 3080574 numaralı TÜBİTAK TEYDEB 1501 projesi tarafından desteklenmiştir.

## ÖNSÖZ

---

Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı Malzeme Programı'na bağlı olarak yapılan tez çalışmasında; gelişen dünyanın öne çıkan mühendislik malzemelerinden termoplastik matrisli kompozitleri temel alan, TÜBİTAK TEYDEB 1501 projesinin alt çalışma gruplarından biri olan polipropilen matrisli kompozitlerin, laboratuvar ölçekli üretimi ve karakterizasyonu yapılmıştır.

Bu tez çalışması toplam altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde konuya genel bir giriş yapılarak konunun literatürdeki yeri belirtilmiş, proje kapsamında bu tez çalışması için belirlenen amaca ve proje bitiminde elde edilmesi beklenen proje çıktılarına değinilmiştir.

İkinci bölümde; kompozitlerin mikromekaniği ve makromekaniği konularının ayrıntılı teorik bilgileri ile kompozitlere uygulanan fiziksel ve mekanik testlerin kısa bir özeti yer almaktadır.

Üçüncü bölümde kompozit çeşitlerinden polimer matrisli kompozitler matris, fiber ve ara yüzey alt konularıyla birlikte verilirken; dördüncü bölümde polimer matrisli kompozitlerin üretim yöntemlerinden kısaca bahsedilmiştir.

Tezin beşinci bölümü deneysel çalışmalar olup, kullanılan yöntem ve malzemeler detaylı olarak anlatılmış, deney sonuçları Çizelge ve grafiklerle verilmiştir. Tezin son bölümünde ise; deney sonuçları ayrıntılı olarak anlatılmış ve değerlendirilmiştir.

İki yıl boyunca süren tez çalışmalarım esnasında beni hep destekleyen ve bana her koşulda yol gösteren, çok saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet ÜNAL'a en derin şükranlarımı sunarım.

Proje kapsamında makine, teçhizat ve laboratuvar kullanımı ile gerekli olan malzemelerin teminini sağlayan, başta bu imkanı bana sunan Mir Holding Yönetim Kurulu Başkanı Sayın İbrahim Mirmahmutoğulları, Mir Ar-Ge Müdürü Sayın Dr. Zafer GEMİCİ ve Ar-Ge Uzmanı Kim. Yük. Müh. Mustafa DOĞU olmak üzere bütün Mir Araştırma Geliştirme Tic. A.Ş. çalışanlarına, saygılarımı ve teşekkürlerimi iletirim.

Çalışmalar esnasında hep birlikte hareket ettiğimiz, beraber çalışmaktan çok mutlu olduğum Arş. Gör. Aylin (ALTINBAY) BEKEM'e ve sevgili ekip arkadaşım Tuğçegöl GÜMÜLCİNE'ye bütün yardımlarından dolayı; bu aşmada yaşadığım her türlü sıkıntıda yanımdan hiç eksik olmayan sevgili anneme ve desteklerini benden esirgememiş olan tüm herkese teşekkür ederim.

Mayıs, 2011

Duygu Gülfem BAYDAR

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

|                                                                         |       |
|-------------------------------------------------------------------------|-------|
| SİMGE LİSTESİ.....                                                      | x     |
| KISALTMA LİSTESİ.....                                                   | xi    |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                      | xii   |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                                                   | xv    |
| ÖZET .....                                                              | xvi   |
| ABSTRACT.....                                                           | xviii |
| BÖLÜM 1                                                                 |       |
| GİRİŞ.....                                                              | 1     |
| 1.1    Literatür Özeti .....                                            | 1     |
| 1.2    Tezin Amacı .....                                                | 6     |
| 1.3    Hipotez .....                                                    | 6     |
| BÖLÜM 2                                                                 |       |
| KOMPOZİT MALZEMELER TEORİSİ .....                                       | 7     |
| 2.1    Kompozitlerin Mikromekaniği.....                                 | 7     |
| 2.1.1    Eş Yönlü Fiberlerde Özelliklerin Analizi.....                  | 7     |
| 2.1.2    Fiberlerin Yöne Bağlı Olarak Özelliklerinin Değişimi .....     | 13    |
| 2.1.3    Fiber Sonlarında Gerilme Dağılımları .....                     | 14    |
| 2.1.4    Fiberlerin Dokuda Dağılımının Analizi .....                    | 16    |
| 2.1.5    Isıl ve İmalat Gerilmeleri ile Isıl Genleşme Katsayıları ..... | 17    |
| 2.1.6    Minimum Hacim Oranları .....                                   | 18    |

|                                           |                                                                       |           |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.1.6.1                                   | $\epsilon_f^* > \epsilon_m^*$ Koşulu .....                            | 18        |
| 1.1.1.1                                   | $\epsilon_m^* > \epsilon_f^*$ Koşulu .....                            | 19        |
| 2.1.7                                     | Maksimum Hacim Oranı Ve Geometrik Diziliş .....                       | 20        |
| 2.1.8                                     | Ağırlık ve Hacim Oranları Arasındaki Bağlantılar .....                | 23        |
| 2.2                                       | Kompozitlerin Makromekanığı .....                                     | 23        |
| 2.3                                       | Kompozit Karakteristiklerinin Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi ..... | 31        |
| <b>BÖLÜM 3</b>                            |                                                                       |           |
| <b>POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER .....</b> |                                                                       | <b>34</b> |
| 3.1                                       | Polimer Matrisler .....                                               | 34        |
| 3.1.1                                     | Termosetler .....                                                     | 35        |
| 3.1.1.1                                   | Epoksi Reçineler .....                                                | 36        |
| 3.1.1.2                                   | Doymamış Polyester Reçineler .....                                    | 38        |
| 3.1.1.3                                   | Vinilesterler .....                                                   | 38        |
| 3.1.1.4                                   | Fenolik Reçineler .....                                               | 39        |
| 3.1.2                                     | Termoplastikler .....                                                 | 39        |
| 3.1.2.1                                   | Poliamitler .....                                                     | 41        |
| 3.1.2.2                                   | Polieterler .....                                                     | 42        |
| 3.1.2.3                                   | Poliiolefinler .....                                                  | 43        |
| 3.1.3                                     | Polipropilen (PP) .....                                               | 45        |
| 3.1.3.1                                   | Homopolimer PP .....                                                  | 46        |
| 3.1.3.2                                   | Kopolimer PP .....                                                    | 46        |
| 3.1.3.3                                   | Elastomerle Modifiye Edilmiş PP .....                                 | 48        |
| 3.2                                       | Fiberler .....                                                        | 48        |
| 3.2.1                                     | Sürekli Fiberler .....                                                | 49        |
| 3.2.2                                     | Cam Fiberler .....                                                    | 51        |
| 3.2.2.1                                   | E-camı Fiberler .....                                                 | 53        |
| 3.2.2.2                                   | S-Camı Fiberler .....                                                 | 53        |
| 3.2.2.3                                   | Cam Fiber Üretimi .....                                               | 54        |
| 3.2.3                                     | Karbon/Grafit Fiberler .....                                          | 55        |
| 3.2.4                                     | Aramid Fiberler .....                                                 | 57        |
| 3.3                                       | Ara Yüzey .....                                                       | 59        |
| 3.3.1                                     | Yapışma Teorisi .....                                                 | 59        |

|                                 |                                                                      |     |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.2                           | Yapıştırıcılar.....                                                  | 62  |
| 3.3.3                           | Cam Elyafı Üzerine Uygulanan Bağlayıcılar.....                       | 63  |
| 3.3.3.1                         | Dolgulu Polipropilen Kompozitlerde Yapışma .....                     | 63  |
| 3.3.3.2                         | Sürekli Cam Fiber Takviyeli Polipropilen Kompozitlerde Yapışma ..... | 65  |
| <b>BÖLÜM 4</b>                  |                                                                      |     |
| KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMLERİ..... |                                                                      | 68  |
| 4.1                             | El Yatırması Yöntemi (Hand Lay-up).....                              | 69  |
| 4.2                             | Püskürtme Yöntemi (Spray-up) .....                                   | 70  |
| 4.3                             | Reçine Enjeksiyonu Yöntemi (RTM) .....                               | 71  |
| 4.4                             | SMC/BMC Hazır Kalıplama .....                                        | 72  |
| 4.5                             | Elyaf Sarma Yöntemi .....                                            | 73  |
| 4.6                             | Savurma Döküm Yöntemi.....                                           | 74  |
| 4.7                             | Profil Çekme (Pultuzyon).....                                        | 75  |
| 4.8                             | Devamlı Levha Üretim Yöntemi .....                                   | 77  |
| 4.9                             | Termoplastik Enjeksiyon/Ekstrüzyon Yöntemi.....                      | 77  |
| 4.10                            | Prepreg Üretimi.....                                                 | 78  |
| <b>BÖLÜM 5</b>                  |                                                                      |     |
| DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....       |                                                                      | 80  |
| 5.1                             | Malzemeler.....                                                      | 80  |
| 5.2                             | Kullanılan Cihazlar ve Yöntem .....                                  | 81  |
| 5.2.1                           | Numunelerin Hazırlanması .....                                       | 82  |
| 5.2.2                           | Çekme Deneyi .....                                                   | 87  |
| 5.2.3                           | Kalsinasyon Deneyi .....                                             | 89  |
| 5.2.4                           | Yoğunluk Testi.....                                                  | 91  |
| 5.2.5                           | Numunelerin İncelenmesi.....                                         | 92  |
| 5.3                             | Deney Sonuçları.....                                                 | 94  |
| 5.3.1                           | Çekme Testi Sonuçları.....                                           | 97  |
| 5.3.2                           | Kalsinasyon Testi Sonuçları .....                                    | 100 |
| 5.3.3                           | Yoğunluk Testi Sonuçları.....                                        | 103 |
| 5.3.4                           | Mikroskopik İnceleme.....                                            | 109 |



## BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER .....111

KAYNAKLAR .....116

EK A:

TS EN IS 527-5 .....120

EK :B

TS 1177 EN ISO 1172 .....130

EK C:

TS EN ISO 1183-1 .....139

ÖZGEÇMİŞ .....148

## SİMGE LİSTESİ

---

|            |                              |
|------------|------------------------------|
| $\alpha$   | Isıl genleşme katsayısı      |
| C          | Karbon                       |
| $CH_3$     | Metil                        |
| $d_t$      | Teorik yoğunluk              |
| dd         | DeneySEL Yoğunluk            |
| E          | Elastiklik Modülü            |
| $\epsilon$ | Gerinim                      |
| G          | Kayma modülü                 |
| H          | Hidrojen                     |
| HDPE       | Yüksek yoğunluklu polietilen |
| LDPE       | Alçak yoğunluklu polietilen  |
| lc         | Kritik boy                   |
| $\eta_0$   | Yön etki faktörü             |
| $\rho$     | Yoğunluk                     |
| s          | Fiberler arası uzaklık       |
| S          | Compliance matris            |
| $\sigma$   | Gerilim                      |
| $\tau$     | Kayma gerilmesi              |
| v          | Poisson oranı                |
| Vf         | Fiber hacim oranı            |
| Vv         | BoşlukHacmi                  |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|                     |                                                                           |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| ABS                 | Akrilonitril bütadiyen sitiren                                            |
| aPP                 | Ataktik Polipropilen                                                      |
| BMC                 | Bulk Mould Compound                                                       |
| CTP                 | Cam Takviyeli Plastik                                                     |
| DY                  | Deneysel Yoğunluk                                                         |
| HDPE                | High Density Polyethylene                                                 |
| IFSS                | Inter Facial Surface Strength                                             |
| iPP                 | İztaktik Polipropilen                                                     |
| LDPE                | Low Density Polyethylene                                                  |
| MAH                 | Maleik anhidrit                                                           |
| MFR                 | Melt Flow Rate                                                            |
| MMK                 | Metal Matrisli kompozit                                                   |
| PA                  | Poliamid                                                                  |
| PAN                 | Poliakrilonitril (Polyacrylonitrile)                                      |
| PBT                 | Polibütilenteraftalat (Polybutylene teraphthalate)                        |
| PC                  | Polikarbonat (Polikarbonat)                                               |
| PE                  | Polietilen                                                                |
| PEEK                | Polietereterketon                                                         |
| PET                 | Polietilenteraftalat (Polyethylene teraphthalate)                         |
| PMMA                | Polimetilmetakrilat (Polymethylmethacrylate)                              |
| PMK                 | Polimer Matrisli Kompozit                                                 |
| POM                 | Poliasetal (Polyacetale)                                                  |
| PP                  | Polipropilen                                                              |
| PP <sub>g</sub> AA  | Acrylic acid grafted Polypropylene (Akrilik asit aşılı Polipropilen)      |
| PP <sub>g</sub> MAH | Maleicanhydrite grafted Polypropylene (Maleikanhidrit aşılı Polipropilen) |
| PPH                 | Homopolimer Polipropilen                                                  |
| PPO                 | Polyphenyleneoxide (Polifenilenoksit)                                     |
| PPR                 | Random Kopolimer Polipropilen (Random Copolymer Polypropylene)            |
| PS                  | Polisitiren (polystyrene)                                                 |
| RTM                 | Resin Transfere Method (Reçine Enjeksiyon Yöntemi)                        |
| SMK                 | Seramik Matrisli Kompozit                                                 |
| TY                  | Teorik Yoğunluk                                                           |

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

|            |                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1  | şekline göre kompozit çeşitleri a) Partikül takviyeli kompozit, b) Yonga takviyeli kompozit, c) Fiber takviyeli kompozit .....                                                                                                                      | 1  |
| Şekil 2.1  | Eş yönlü plakalarda yönler ve gösterilimleri .....                                                                                                                                                                                                  | 8  |
| Şekil 2.2  | Polyester reçine ve sürekli E-camı fiberli kompozit plakada zorlamaların analitik ifadesi: (a) İzostrein zorlama, (b) izostress zorlama.....                                                                                                        | 10 |
| Şekil 2.3  | Gerinim yığılmasının kare dizilişteki modeli .....                                                                                                                                                                                                  | 11 |
| Şekil 2.4  | Gerinim yığılmasının fiber hacim oranı ile değişimini gösteren grafik ( $V_f=0.785$ ) .....                                                                                                                                                         | 12 |
| Şekil 2.5  | E-camı takviyeli ( $V_f=0,30$ ) polyester kompozitte elastik modülün yöne göre değişimi .....                                                                                                                                                       | 14 |
| Şekil 2.6  | Fiber sonlarında gerilme dağılımı a) şematik gösterim, b) grafiksel gösterim .....                                                                                                                                                                  | 15 |
| Şekil 2.7  | (a) $\varepsilon_f^* > \varepsilon_m^*$ için fiber ve matrise ait gerilme-gerinim eğrileri, (b) eş yönlü plakada kopma dayancının $V_f$ ile değişimi .....                                                                                          | 18 |
| Şekil 2.8  | Eş yönlü plakada (a) fiberlere paralel yönde yapılan zorlamalar, (b) $\varepsilon_f^* > \varepsilon_m^*$ koşulu, (c) $\varepsilon_f^* \gg \varepsilon_m^*$ koşulu, (d) $\varepsilon_m^* > \varepsilon_f^*$ koşulundaki kırılma oluşum tipleri ..... | 19 |
| Şekil 2.9  | (a) $\varepsilon_m^* > \varepsilon_f^*$ için fiber ve matrise ait gerilme-gerinim eğrileri, (b) Eş yönlü plakalarda kopma dayancının $V_f$ ile değişimi .....                                                                                       | 20 |
| Şekil 2.10 | (a) Eş yönlü sürekli fiberli plaka kesiti, (b) Bu plakada fiberlerin altıgen ve kare dizilişleri .....                                                                                                                                              | 21 |
| Şekil 2.11 | Fiber hacim oranına göre, s/r oranının değişimi.....                                                                                                                                                                                                | 22 |
| Şekil 2.12 | Fiber-matris ikili kullanımında kompozit yapılara geçişin şematik gösterimi .....                                                                                                                                                                   | 24 |
| Şekil 2.13 | İzotropi ve ortotropi kavramlarının şematik ifadeleri (a) izotropik malzeme, (b) anizotropik malzeme, (c) ortotropik malzeme .....                                                                                                                  | 25 |
| Şekil 2.14 | Birim küpteki gerilme bileşenleri .....                                                                                                                                                                                                             | 25 |
| Şekil 2.15 | x-y koordinat sisteminde $\theta$ açısı kadar dönüş yapan (1) ve (2) düzlemindeki gerilmelerin şematik gösterimi .....                                                                                                                              | 29 |
| Şekil 2.16 | Sarmal dokunmuş iç basınca maruz kap .....                                                                                                                                                                                                          | 31 |
| Şekil 3.1  | Termosetlerin kimyasal gösterimlerinin örnekleri: a) Epoksi, b) doymamış polyester, c) fenolik reçine, d) vinilester .....                                                                                                                          | 36 |

|            |                                                                                                                                              |    |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.2  | Termoplastiklerde elastiklik modülünün (E) sıcaklığa göre değişimi.....                                                                      | 41 |
| Şekil 3.3  | Propilen ve etilen monomerlerinin kimyasal gösterimi.....                                                                                    | 43 |
| Şekil 3.4  | a) İzotaktik polipropilen (i-PP), b) ataktik polipropilen (a-PP) .....                                                                       | 46 |
| Şekil 3.5  | a) Random kopolimer PP (PPR), b) blok kopolimer PP .....                                                                                     | 47 |
| Şekil 3.6  | Sürekli fiberlerin üretim akış şeması.....                                                                                                   | 50 |
| Şekil 3.7  | a) Reçine emdirilmiş fiberlerin çekme dayanımı, b) fiberlerin çekme modülü (elastiklik modülü).....                                          | 54 |
| Şekil 3.8  | Cam fiber üretiminin şematik gösterimi .....                                                                                                 | 55 |
| Şekil 3.9  | Katı fiber üzerindeki sıvı polietilen damlanın oluşturduğu temas açısı .....                                                                 | 61 |
| Şekil 3.10 | Farklı oranlarda, uyumlu ve uyumsuz silan kaplı ve ayrıca %10 PPgAA kaplı fiberlerden üretilen kompozitlerin çekme dayanımı .....            | 64 |
| Şekil 3.11 | İki kaplama elemanından farklı oranlarda kullanılması sonucu kompozitte oluşan çekme dayanım değerleri .....                                 | 65 |
| Şekil 3.12 | Maleik anhidrit ile modifiye edilmiş PP matris ve silan kaplama elemanı ile işlenmiş bir cam fiber arasındaki tipik kimyasal reaksiyon ..... | 66 |
| Şekil 3.13 | Cam fiberin apreleme işlemi sırasındaki kimyasal reaksiyonları .....                                                                         | 67 |
| Şekil 3.14 | (a) Homo-PP matrisli ve (b) Modifiye-PP matrisli numunenin gerilim-uzama eğrileri .....                                                      | 67 |
| Şekil 4.1  | Kompozit üretim yöntemlerinin şematik gösterimi.....                                                                                         | 68 |
| Şekil 4.2  | El yatırması (hand lay-up) yöntemi .....                                                                                                     | 69 |
| Şekil 4.3  | Püskürtme yöntemi.....                                                                                                                       | 70 |
| Şekil 4.4  | Püskürtme yöntemiyle yapılan bir hücm bot gövdesi .....                                                                                      | 71 |
| Şekil 4.5  | Reçine enjeksiyon yöntemi .....                                                                                                              | 72 |
| Şekil 4.6  | SMCve BMC (sırasıyla) hazır kalıplama yöntemi.....                                                                                           | 73 |
| Şekil 4.7  | Elyaf sarma yöntemi .....                                                                                                                    | 74 |
| Şekil 4.8  | Savurma döküm yöntemi.....                                                                                                                   | 75 |
| Şekil 4.9  | Pultrüzyon yöntemi.....                                                                                                                      | 76 |
| Şekil 4.10 | Devamlı levha üretim yöntemi .....                                                                                                           | 77 |
| Şekil 4.11 | Termoplastik ekstrüzyon yöntemi .....                                                                                                        | 78 |
| Şekil 4.12 | Prepreg üretim şeması .....                                                                                                                  | 79 |
| Şekil 5.1  | Jelimat sistemi.....                                                                                                                         | 82 |
| Şekil 5.2  | Gerilen fiberlerin matris plakaları arasına yerleştirilmesi.....                                                                             | 84 |
| Şekil 5.3  | a) Sıcak izotermal presleme, b) soğuk izostatik presleme .....                                                                               | 84 |
| Şekil 5.4  | Presten alınan kompozit plakasının gergin hali .....                                                                                         | 85 |
| Şekil 5.5  | a) Çekme standardındaki kesme numunesi çizimi, b)deneylerde numune kesmek için kullanılan kesme bıçağı ve kesilmiş kompozit numune .....     | 86 |
| Şekil 5.6  | a) Uç desteği kalıbı, b) çekme testi numunesi .....                                                                                          | 87 |
| Şekil 5.7  | Çekme cihazı .....                                                                                                                           | 88 |
| Şekil 5.8  | Çekme testindeki kompozit bir numunenin kopma anı.....                                                                                       | 89 |
| Şekil 5.9  | Kül fırını .....                                                                                                                             | 90 |
| Şekil 5.10 | Kalsinasyon testi sonrası krozelerde kalan cam fiberler.....                                                                                 | 90 |
| Şekil 5.11 | Yoğunluk kiti.....                                                                                                                           | 91 |
| Şekil 5.12 | Karakterizasyonda kullanılan stereo ışık mikroskobu.....                                                                                     | 93 |
| Şekil 5.13 | Karakterizasyonda kullanılan SEM .....                                                                                                       | 93 |
| Şekil 5.14 | Dayanım (MPa)-Uzama (%) cinsinden cihaz tarafından çizilen PPH grafiği .....                                                                 | 98 |
| Şekil 5.15 | Dayanım (MPa)-Uzama (%) cinsinden cihaz tarafından çizilen PPR grafiği .....                                                                 | 98 |

|            |                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.16 | Dayanım (MPa)-Uzama (%) cinsinden cihaz tarafından çizilen %10 Y01 yapıştırıcısı içeren PPR grafiği .....                                                                                                                                         | 99  |
| Şekil 5.17 | Dayanım (MPa)-Uzama (%) cinsinden cihaz tarafından çizilen %10 Y05 yapıştırıcısı içeren PPR grafiği .....                                                                                                                                         | 99  |
| Şekil 5.18 | PPH ile PPR'nin karşılaştırılması .....                                                                                                                                                                                                           | 101 |
| Şekil 5.19 | PPR-Y01 numunelerine ait çekme dayanımı – hacim oranı eğrileri.....                                                                                                                                                                               | 102 |
| Şekil 5.20 | PPR-Y05 numunelerine ait çekme dayanımı – hacim oranı eğrileri.....                                                                                                                                                                               | 102 |
| Şekil 5.21 | PPH kompozitlerin $d_t$ ve $d_d$ değerlerinin karşılaştırılması .....                                                                                                                                                                             | 104 |
| Şekil 5.22 | PPR kompozitlerin $d_t$ ve $d_d$ değerlerinin karşılaştırılması .....                                                                                                                                                                             | 104 |
| Şekil 5.23 | Yapıştırıcısız kompozitlerde boşluk hacminin fiber hacmine göre değişimi ...                                                                                                                                                                      | 105 |
| Şekil 5.24 | Y01 kompozitlerin teorik yoğunluk değerlerini karşılama oranları.....                                                                                                                                                                             | 106 |
| Şekil 5.25 | Y05 kompozitlerin teorik yoğunluk değerlerini karşılama oranı.....                                                                                                                                                                                | 106 |
| Şekil 5.26 | Yapıştırıcılı numunelerde yoğunluk değerlerinin hacim oranına göre değişim grafikleri .....                                                                                                                                                       | 107 |
| Şekil 5.27 | Y01 grubu kompozitlerin boşluk oranının fiber hacim oranına göre değişimi .....                                                                                                                                                                   | 108 |
| Şekil 5.28 | Y05 kompozitlerde boşluk oranının fiber hacim oranına göre değişimi.....                                                                                                                                                                          | 108 |
| Şekil 5.29 | Yapıştırıcısız kompozitli numunelerin mikroskop görüntüleri ( $V_f$ :%10): a) PPH kompozit - stereo ışık mikroskobu, b) PPH kompozit - SEM, c) PPR kompozit – stereo ışık mikroskobu, d) PPR kompozit - SEM .....                                 | 109 |
| Şekil 5.30 | Yapıştırıcı oranı %40 olan kompozit numunelerin mikroskop görüntüleri ( $V_f$ :%10): a) Y01 kodlu kompozit – stereo ışık mikroskobu, b) Y01 kodlu kompozit-SEM, c) Y05 kodlu kompozit – stereo ışık mikroskobu, d) Y05 kodlu kompozit - SEM ..... | 110 |

## ÇİZELGE LİSTESİ

|             | Sayfa                                                                                                         |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Çizelge 1.1 | Matris malzemesi, takviye elemanı ve kompozit yapı tipleri..... 2                                             |
| Çizelge 2.1 | Kompozitlere uygulanan deneyler ve standartları..... 33                                                       |
| Çizelge 3.1 | Çeşitli fiberler ile takviyelendirilmiş epoksilerin karşılaştırılması (0°-90°)... 37                          |
| Çizelge 3.2 | Ticari poliolefinlerin tipik özellikleri ..... 44                                                             |
| Çizelge 3.3 | En çok kullanılan cam fiberlerin kimyasal kompozisyonları..... 52                                             |
| Çizelge 3.4 | Karbon fiberlerin özellikleri ..... 56                                                                        |
| Çizelge 3.5 | Kevlar fiberlerin tipik özellikleri ..... 58                                                                  |
| Çizelge 3.6 | Silan tipinin tek fiber sıyrılmasından dolayı oluşturduğu arayüzey dayanımı (IFSS) üzerindeki etkisi ..... 64 |
| Çizelge 5.1 | Yapıştırıcısız kompozitten 1 adet test numunesi üretmek için gerekli süre ..... 94                            |
| Çizelge 5.2 | Yapıştırıcılı kompozitten 1 adet test numunesi üretmek için gerekli süre ..... 96                             |
| Çizelge 5.3 | Tek bir numuneye ait test süreleri ..... 97                                                                   |
| Çizelge 5.4 | Her numune grubuna ait çekme dayanımları ve yük değerleri ..... 100                                           |
| Çizelge 5.5 | Numune gruplarına ait doğru denklemleri ve $r^2$ değerleri ..... 100                                          |

## **SÜREKLİ CAM FİBER TAKVİYELİ POLİPROPİLEN KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Duygu Gülfem BAYDAR

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet ÜNAL

Kimyasal ve/veya fiziksel özellikleri açısından birbirinden farklı iki veya daha fazla malzemenin aralarında ara yüzey oluşturarak, kimyasal bağ yapmaksızın meydana getirdikleri yeni malzeme grubuna kompozit malzemeler denir. Kompozitlerin en önemli avantajı kompozit malzemenin özelliklerinin, kendisini oluşturan diğer bileşenlerden üstün olmasıdır. Oluşturulan kompozit malzemelerin dayanım değerleri, kompoziti oluşturan bileşenlerin dayanım değerleri arasında kalmaktadır.

Kompozit malzemeler matrislerine göre plastik, metal ve seramik matrisli olarak gruplanmakta olup, dünya üzerindeki kompozit kullanımının %80'ini plastik matrisli kompozitler oluşturmaktadır. Plastik kompozit günümüz uygulamalarında termoset plastikler tercih edilmektedir. Bunun nedeni termosetlerin fiber malzemelerine yapışmasının kolaylıkla gerçekleşmesi; dolayısıyla fiber-matris arayüzey bağlantısının kuvvetli olmasının sağlanmasıdır.

Ancak son zamanlarda hafif konstrüksüyon uygulamalarını arttırmaya doğru bir yönelme söz konusu olduğundan, termoplastik matrisli kompozitlerin kullanım fikri yaygınlaşmıştır. Bunun başlıca sebebi olarak termoplastiklerin daha düşük yoğunluğa, daha yüksek kimyasal dayanıma, yüksek gerinime sahip olması ve daha hafif, daha esnek ve geri dönüşebilir olması gibi avantajları gösterilebilir. Ancak bunlarda yaşanan başlıca problem arayüzey oluşumunu gerçekleştirecek yapışmanın sağlanamamasıdır.



Bu çalışmada termoplastik grubu bir polimer olan polipropilen (PP), bükümlü sürekli E-camı fiber ile takviyelendirilerek üretilmiştir. Matris olarak iki farklı tür polipropilen kullanılarak optimum sonuç veren polimer türünde, PP kompozitlerde ortaya çıkan yapışma sorununu çözmek için iki farklı üretici firmaya ait yapıştırıcı alternatifleri, farklı oranlarda, PP ile harmanlanarak üretimler gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozitlerin mekanik ve fiziksel karakterizasyonları yapılmıştır. Mekanik karakterizasyon için kompozitler çekme testine tabi tutulmuş ve dayanım değerleri saptanarak kopma şekilleri gözlenmiştir. Fiziksel karakterizasyonda ise önce fiber hacim oranının etkisini saptayabilmek için numuneler kalsinasyon testine tabi tutulmuştur.

Çalışma sonucunda yapıştırıcı tatbikinin kompozitin dayanımını, yapıştırıcısız kompozite göre %80-85 arttırdığı saptanmıştır ve bu yapıştırıcı etkisi stereo mikroskobu fotoğraflarında da görülmüştür. Ancak ıslatma problemine bağlı olarak belirli bir fiber hacim oranından sonra mekanik özelliklerin düştüğü gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Polipropilen kompozitler, ara yüzey, mekanik karakterizasyon, fiziksel karakterizasyon

**PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF CONTINUOUS GLASS FIBER  
REINFORCED POLYPROPYLENE COMPOSITES**

Duygu Gülfem BAYDAR

Department of Metalurgy and Materials Science Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Ahmet ÜNAL

Composites are the new materials composed from two or more materials, which show different chemical and / or physical features from each other, forming the interface between them without chemical bonding. The most important advantage of the composite materials is the properties of composites are superior to their components. The strength of produced composite materials is between the strength values of its components.

Composite materials are grouped according to the matrix as plastic, metal and ceramic matrix. The plastic matrix composites are used 80 % in the world composite usage. In today's plastic matrix applications, thermoset plastic matrix is generally preferred. This is because thermoset materials can easily adhere to the fibers, so strong fiber-matrix interface are provided.

However, the idea of using thermoplastic matrix composites is grown up recently, due to the increasing tendency of lightweight construction applications. The main reason of this is the advantages of thermoplastics that are lower density, higher chemical resistance, higher strain, lighter, more flexible and being recyclable. However the major problem in these is the adhesion, that forms the interface, could be not provided.

In this study, polypropylene (PP), a group of thermoplastic polymer, was reinforced with the roving continuous E-glass fiber. Two different types of polypropylene were

used as the matrix polymer and features of created composites were optimized. The type with the optimum properties was produced by blending two commercially available adhesives at different concentrations to solve adhesion problem which occurs at PP composites.

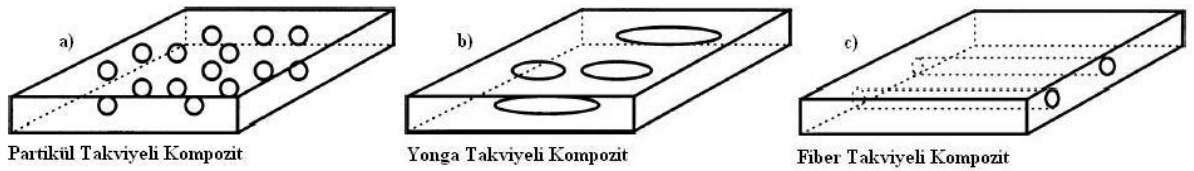
As a result, the application of bonding adhesive increased the strength of composite by 80-85%, and the adhesive effect was observed in stereo microscope photographs. However it was observed that mechanical properties decreased over a certain fiber volume ratio, because of nonwetting.

**Key words:** Polypropylene composites, interface surface, mechanical characterization, physical characterization

#### 1.1 Literatür Özeti

Birbiri içinde çözünmeyen iki ya da daha fazla malzemenin, aralarında bir ara yüzey oluşturmak koşuluyla, kimyasal bağ yapmaksızın meydana getirdikleri yeni malzeme grubuna kompozit malzemeler denir [1]. Kompozit malzemelerin en önemli avantajı, sergilediği özelliklerin kendini oluşturan bileşenlerinkinden üstün olmasıdır. Kompozit malzemelerin oluşturulmasıyla malzemede dayanım, tokluk, korozyon direnci, aşınma dayanımı, hafiflik, yorulma ömrü, ısıya bağlı davranışlar, termal yalıtım, termal iletkenlik, akustik yalıtım gibi özellikler iyileştirilebilmektedir [2].

Kompozit malzemeler makroskobik düzeyde birbirleriyle birleşmiş, matris ve takviye elemanı olmak üzere 2 ana bileşenden oluşmaktadır. Takviye elemanı güçlendirici, yük taşıyıcı faz olarak görev almakta olup, matris içine gömülmüş durumda yer almaktadır. Takviye elemanı çeşitli formlarda olabilirken, matris malzemesi genellikle sürekli formdadır ve metal, polimer veya seramik olabilir.



Şekil 1.1 Takviye şekline göre kompozit çeşitleri a) Partikül takviyeli kompozit, b) Yonga takviyeli kompozit, c) Fiber takviyeli kompozit

Kompozitin istenilen özelliğinin iyileştirilmesi amacıyla bileşenlerin malzemesi, şekli, boyutları ve kompozit yapının şeklinde değişikliklerin yapılması mümkündür.

Dolayısıyla kompozitler fiberlerin geometrisine (Şekil 1.1) veya matris malzemesine göre Çizelge 1.1'deki gibi sınıflandırılmaktadırlar [1].

Çizelge 1.1. Matris malzemesi, takviye elemanı ve kompozit yapı tipleri [3]

| Matris Malzemeleri | Takviye Elemanları | Kompozit Yapının Şekli   |
|--------------------|--------------------|--------------------------|
| Polimerler         | Fiberler           | Tabakalar                |
| Metaller           | Partikül           | Kaplamalar               |
| Seramikler         | Yonga              | Bal peteği               |
|                    |                    | Filaman Sarılmış Yapılar |

Takviye elemanının geometrisi kadar, boyutları ve matris içindeki yönlenmesi de doğrudan kompozitin mekanik değerlerini etkilemesi bakımından önem taşımaktadır. Partikül takviyeli kompozitler, alaşımlar ve seramikler gibi matrisin içine daldırılmış parçacıklardan oluşmaktadır. Çoğunlukla izotropiktirler, çünkü parçacıklar rastgele eklenmiştir. Partikül takviyeli kompozitlerin gelişmiş dayanım, yükseltilmiş işlem sıcaklıkları, oksidasyon dayanımı gibi avantajları vardır. Yonga takviyeli kompozitler ise düz tabaka halindeki takviyelerden oluşmaktadır. Tipik yonga malzemeleri cam, mika, alüminyum ve gümüşdür. Yonga kompozitler yüksek eğme modülü, yüksek dayanım ve düşük maliyet sağlamaktadır. Ancak yongalar kolay yönlenemez ve sınırlı sayıda malzemede kullanılabilir [1].

Günümüz uygulamalarında ise en çok kullanılan kompozitler fiber takviyeli kompozitlerdir. Fiber takviyeli kompozitlerde fiberler sürekli ve süreksiz formlarda olup, süreksiz fiberler kısa süreksiz ve uzun süreksiz fiber olmak üzere ikiye ayrılır. Sürekli fiber takviyeli kompozitlerin temel birimi; bükümlü veya bükümsüz fiberlerin tek yönlü, dokuma ya da örgü olarak matris içinde dizilmesiyle oluşan tabakalardır. Tabakalar birbirleri üzerinde çeşitli açılarda istiflenerek çok yönlü tabakaları oluşturmaktadır. Her bir fiber diziliminin olduğu tabaka kendine ait özellikler taşımakla birlikte, bir bütün halinde kompozitin özelliklerini iyileştirmektedir [1], [4].

Kompozitlerin mühendislik özellikleri fiber uzunluğu, yönlenmesi (oryantasyonu) malzemesi ve hacim oranı ile yönetilir [4]. Fiberler uzun ya da kısa olabilmektedir. Uzun, sürekli fiberleri yönlendirmek ve proses etmek kolaydır, fakat kısa fiberlerde tam bir yönlendirme bütünüyle kontrol edilemez. Uzun fiberlerin kısa fiberlere göre pek çok yararı vardır. Bunlar arasında darbe dayancı, düşük çekme (büzülme), gelişmiş son yüzey kararlılığı ve boyutsal kararlılık vardır. Fakat kısa fiberler düşük maliyet sağlar, çalışılması kolaydır ve hızlı üretim sürelerine sahiptir. Kısa fiberler daha az kusur içerir ve bu yüzden dayanımları daha yüksektir. Fiberler tek yönde yönlendiklerinde o yönde çok yüksek rijitlik ve dayanıma sahip olurlar. Keçe gibi birden fazla yönde yönlenirlerse de yüksek rijitlik ve dayanım oluşmakta; fakat, aynı fiber hacim oranındaki tek yönlü kompozitlerin değerleri ile karşılaştırılamayacak düzeyde olmaktadır. Tek yönlü kompozit keçe tarzı süreksiz fiberli bir kompozite göre çok daha yüksek dayanım değerlerine sahiptir. Fiberlerin malzemesi doğrudan kompozitin mekanik performansını etkilemektedir. Fiberlerin genellikle yüksek elastik modüle ve dayanıma sahip olması beklenmektedir. Bu beklenti ve maliyet kompozitler için fiber pazarına hakim olan grafit, aramid ve camın seçiminde kilit faktörlerdir [1].

Kompozitin mekanik performansı üzerinde matrisin de önemli bir etkisi vardır. İpler haricinde fiberlerin tek başına kullanımı sınırlıdır ve bu yüzden fiberler matrisin takviyelendirilmesinde kullanılmaktadır. Matrisin görevleri arasında fiberleri bir arada tutmak, fiberleri çevresel etkilerden korumak, tutma sırasında oluşabilecek hasarlardan muhafaza etmek ve fiberlere yükü dağıtmak vardır. Fiberlerle karşılaştırıldıklarında matrisler genellikle düşük mekanik özelliklere sahip olsalar da kompozitin pek çok mekanik özelliklerini matris etkiler. Bu özellikler; enine modülü ve dayanımı, kesme modülü ve dayanımı, basma dayanımı, tabakalar arası (interlaminar) kesme dayanımı, ısı genleşme katsayısı ve yorulma dayanımını içermektedir [1]. Matrisin kompozit malzeme içindeki görevleri aşağıdaki gibi sıralanabilir [5]:

- Matris malzemesi fiberleri bir arada tutar ve yapıya gelen yükü fiberlere aktarmaktadır. Dolayısıyla yapıya rijitlik ve şekil kazandırmaktadır.
- Fiberleri izole etmektedir, böylece fiberler birbirlerinden ayrı hareket edebilir; bu da çatlak ilerlemesini durdurmakta veya yavaşlatmaktadır.

- İyi yüzey kalitesi sağlamak ve **“near net shape”** (son hale yakın) parçaların üretimini gerçekleştirmektedir.
- Matris fiberleri kimyasal saldırı ve aşınma gibi mekanik hasarlara karşı korumaktadır.
- Seçilen matris malzemesine bağlı olarak süneklik, darbe dayanımı, vb. gibi performans karakteristikleri etkilenmektedir. Sünek bir matris, yapının tokluğunu arttırmaktadır. Yüksek tokluk gerektiğinde termoplastik esaslı kompozitler seçilmelidir.
- Hasar türü, kullanılan matrisin fiber ile uyumu kadar matris malzemesinin türünden de etkilenmektedir.

Kompozit malzemeleri matris türüne göre 3 ana grupta incelenmektedir: Polimer matrisli kompozitler (PMK), metal matrisli kompozitler (MMK) ve seramik matrisli kompozitler (SMK) [4].

En çok kullanılan ileri teknoloji kompozitleri, ince çaplı fiberler (cam, karbon, aramid, vb.) ile takviyelendirilmiş polimerlerden (epoksi, polyester, üretan, vb.) oluşan plastik matrisli kompozitlerdir (PMK) [1]. Plastikler hafiflikleri, kolay üretilmeleri, iyi korozyon dayanımı gibi özellikleri sayesinde kompozit uygulamalarında daha sık kullanılmakla birlikte; insan dokuları ile uyum sağlayan ve sertlik derecesi ayarlanabilen yapay doku ve organlar gibi uygulamalarda, optik elyaf ve basınç ile elektrik üretebilen piezoelektrik özellikli sistemlerin yapımında da metal ve seramiklerin yerine tercih edilmektedir [6]. Plastikler düşük ergime sıcaklıklarına sahip olduğundan üretimleri kolaydır ve çok iyi yüzey kalitesi sağlanabilmektedir. Bu sayede hem **“near net shape”** parça üretimi sağlanmakta, hem de talaşlı işleme gerek olmadığından üretim maliyetleri düşmektedir. Bu sayede üretilen fiber takviyeli kompozitler metallerden daha kolay üretilmekte ve aynı zamanda metallerle yarışır ölçüde yüksek dayanım sağlamaktadır [5]. Örneğin, grafit/epoksi kompozitleri çeliklerden 5 kat daha fazla dayanıklıdır. PMK’ların genel olarak dezavantajı düşük işlem sıcaklıkları, yüksek ısı genleşme katsayısı ve nem genleşmesi ve belirli yönlerde düşük elastik özelliklerdir [1].

Endüstriyel alanda kullanımları giderek artan kompozitlerin PMK'lerden sonra en çok kullanılan türü metal matrisli kompozitlerdir (MMK). MMK'ler ana yapıyı metal veya alaşımlarının oluşturduğu ve takviye olarak, genellikle, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> ve MgO gibi seramik esaslı malzemelerin kullanıldığı kompozit türüdür [7]. Hafif metaller, kompozitler için matris malzemesi olarak çok cazip olmaktadır. Bunlar plastiklerden daha yüksek elastiklik modülü, dayanım ve tokluğa sahip olup yüksek sıcaklıklarda özellikleri de daha iyidir. Ancak metal matrisli kompozit üretimi daha zordur. Bunlar her elyafı iyi ara yüzey bağlantısı oluşturmazlar. Kullanım alanı olarak günümüzde üç çeşit metal matrisli kompozit bulunmaktadır. Bunlar; parçacık takviyeli MMK, kısa fiber veya whiskers ile takviyelendirilmiş MMK, sürekli fiber ile ya da levha halinde takviyelendirilmiş MMK'lerdir. Metal matrisli kompozitlerde birçok metal veya metal alaşımları kullanılmaktadır. Bunların kullanım yerleri ve amaca uygun kullanımları kompozit hazırlamada önemli bir yer tutmaktadır. En çok tercih edilen metal matris malzemeleri düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet sağlayan alüminyum ve alaşımları, yüksek korozyon direncine sahip titanyum ve alaşımları, çok hafif bir metal olan magnezyum ve alaşımları ile kolay şekillendirilebilen ve yüksek iletkenliğe sahip bakır ve alaşımlarıdır. Bunların yanı sıra, kompozite yüksek mukavemet ve oksidasyon direnci sağlamak amacıyla intermetalik bileşikler de matris malzemesi olarak kullanılabilmektedir [8].

Plastik matrisli kompozitlerin yapılarından dolayı çalışabilecekleri sıcaklıklar limitlidir. Bu nedenle yüksek sıcaklıkta yüksek dayanım istenen uygulamalardaki alternatif metal matrisli kompozitler ile seramik matrisli kompozitler olmaktadır (SMK). Monolitik seramiklerin, yüksek sıcaklık mukavemeti, düşük yoğunluk, kimyasal kararlılık ve iyi aşınma direnci gibi kendilerine özgü özelliklerine rağmen; yapısal hatalara karşı olan duyarlılıkları ve gevrek kırılma sergilemeleri nedeniyle ciddi askeri ve uzay uygulamalarında kullanımı sınırlanmıştır. Seramikler bu tip olumsuz özelliklerinden dolayı liflerle, partiküllerle ve yongalarla takviyelendirilerek kullanılmaktadırlar. Seramik matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve B<sub>4</sub>C yaygın olarak kullanılmakta olup, takviye olarak ise SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramiklerinin lif formundan yararlanılmaktadır [9].



## **1.2 Tezin Amacı**

Bu çalışmaya başlanırken öncelikli olarak, ülkemizde ve dünyada üzerinde az çalışma yapılmış olan termoplastik kompozitlerin avantajlarından faydalanmak ve dezavantajlarını olabildiğince ortadan kaldırmak hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda; yüksek mekanik performans göstermesi beklenen yüksek hacim oranına sahip, eş yönlü fiber takviyeli polipropilen kompozitlerin laboratuvar ölçekli üretimi amaçlanmıştır. Bu amaca uygun olarak, mekanik değerlerin artmasını sağlamak hedefiyle matris fiber arasındaki yüzey bağlanama sorununu gidermek için iki farklı üreticiye ait yapıştırıcı denenecek ve numunelerin karakterizasyonundan elde edilecek bilgilerden yola çıkılarak en uygun fiber-matris-yapıştırıcı oranı tespit edilecektir.

## **1.3 Hipotez**

Kompozit teorisi ve farklı üretim yöntemi kullanarak, termoplastik matrisli ve E-camı destekli kompozitin yapılması; üretim parametrelerinin belirlenip, ürün karakterizasyonunun yapılması çalışmanın temel amacıdır. Bu amaçtan hareketle yeni jenerasyon plastik matrisli kompozit olan nihai ürün için temel kavramlardan yola çıkılarak; iyi fiber-matris uyumu, düşük su absorpsiyonu, takviyesiz polimerlere göre yüksek dayanım, ince cidarlı ürün üretimine imkan sağlamasından kaynaklanan malzeme tasarrufu ve düşük üretim maliyeti sağlayan termoplastik matrisli kompozitlerin, çoğu uygulamada termoset matrisli kompozitlerin yerini alacağı düşünülmektedir.

### KOMPOZİT MALZEMELER TEORİSİ

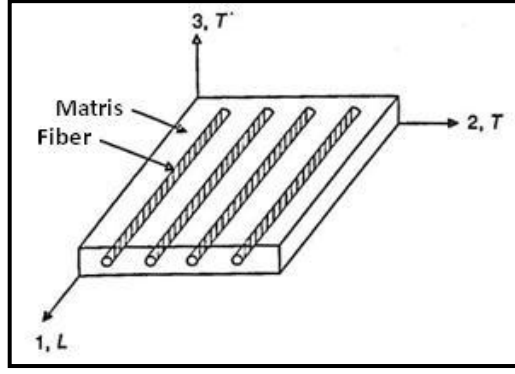
Birden fazla (en az iki) malzemenin aralarında bir kimyasal bağ yapmaksızın oluşturdukları yeni malzeme olarak tanımlanan kompozit malzemeler, matematiksel olarak iki aşamada incelenmektedir: 1. Mikromekanik, 2. Makromekanik. Dolayısı ile tez çalışmasının bu bölümünde kompozitlerin mikromekaniği ve kompozitlerin makromekaniği iki başlık halinde incelenecektir.

#### 2.1 Kompozitlerin Mikromekaniği

Matris olarak isimlendirilen ana dokuda; fiber veya dolguların dağılımı ve özelliklere etkisi göz önüne alındığında; kompozitlerin mikromekaniği konusu ortaya çıkmaktadır.

##### 2.1.1 Eş Yönlü Fiberlerde Özelliklerin Analizi

Mikromekanik konusunun temeli, eş yönlü sürekli fiberli bir kompozit plakada elastik özelliklerin analizi olarak tanımlanır.  $c$  kompoziti,  $m$  matrisi,  $f$  fiber veya filleri tanımlayacak şekilde bir notasyon kullanılarak kompozit malzemelere matematik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Şekil 2.1’de söz konusu notasyonların yöne bağlı olarak kullanımı şematik olarak verilmiştir. Fiberler paralel yön (1, //, L), dik yön (2,  $\perp$ , T) notasyonları ile gösterilirler. Düzlemsel 1 ve 2 yönlü plakalar kalınlığı boyunca incelmeye alındığında sadece (3) notasyonu ile gösterilirler [2].



Şekil 2.1 Eş yönlü plakalarda yönler ve gösterimleri [2]

Fiberler paralel yönde (1 yönündeki) zorlamalarda; elastik alanda; fiber, matris ve kompozit üzerindeki gerinimler eşit olduğundan; bu koşula kısaca **“Eşit Gerinimler (izostrain) Koşulu”** denir [10-19]. Fiberlerin elastiklik modülleri matrisinkinden daha büyükse  $E_f \gg E_m$ ;

$$\varepsilon_c = \varepsilon_1 = \varepsilon_f = \varepsilon_m \quad (2.1)$$

şeklinde gösterilir. Bu takdirde kompozitin (1) yönündeki Elastiklik modülü;

$$E_1 = E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (2.2)$$

şeklinde yazılır. Eşitlikte  $V_f$  ve  $V_m$  sırasıyla fiber ve matrisin hacim oranıdır. Böylece;

$$V_f + V_m = 1 \quad (2.3)$$

veya,

$$\%V_f + \%V_m = \%100 \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilir. (2.2) eşitliği **“Karışımlar Kuralı”** olarak da bilinir ve “n bileşenli” bir kompozit için elastiklik modülü;

$$E_c = E_1 \cdot V_1 + E_2 \cdot V_2 + \dots + E_n \cdot V_n \quad (2.5)$$

ya da;

$$E_c = \sum_{i=1}^n E_i V_i \quad (2.6)$$

Şeklinde genelleştirilir. (2.2) ve (23) eşitlikleri kullanılarak sadece fiber hacim oranı cinsinden karışımlar kuralı;

$$E_c = E_1 = E_f.V_f + E_m.(1-V_f) \quad (2.7)$$

şeklinde yazılır. Eşitlik 2.7 sadece fiber-matris ara yüzeyinin mükemmel düzeyde yapışmış olduğu ve fiberlerin eş yönlü ve hatasız biçimde dizildiği öngörülerek; doğru sonuçlar vermektedir. Bu koşullardan hareketle çekme dayanımı ve poisson oranı;

$$\sigma_c = \sigma_1 = \sigma_f.V_f + \sigma_m.(1-V_f) \quad (2.8)$$

$$\nu_c = \nu_1 = \nu_f.V_f + \nu_m.(1-V_f) \quad (2.9)$$

benzeşimi ile yazılabilir. Ancak ister fiber-matris ara yüzeyi yeteri kadar ideal olmasın, ister fiberler hatasız dizilmesin, karışımlar kuralının hatasız sonuç verdiği durum; yoğunluğun bulunması için kullanılan halde mevcuttur [10-19]:

$$\rho_c = \rho_f.V_f + \rho_m.(1-V_f) \quad (2.10)$$

(2.2) ve (2.7) eşitlikleri  $y = m.x + n$  gibi bir doğru denklemi olup  $V_f = 0$  ile  $V_f = 1,0$  arasında değişim göstermektedir [10] .

Fiberlere dik yönde (2 yönünde) bir zorlama yapıldığında; elastik alanda fiber üzerindeki gerilmeler, matris üzerindeki gerilmeler ve kompozit üzerine gelen gerilmeler ( $\sigma_c = \sigma_2 = \sigma_f = \sigma_m$ ) eşit olacaktır. Bu zorlama türü **“Eşit Gerilme (izostress) Koşulu”** olarak tanımlanır ve bu durumda 2 yönündeki Elastiklik modülü [11-14];

$$E_2 = \frac{E_f.E_m}{E_f.(1-V_f) + E_m.V_f} \quad (2.11)$$

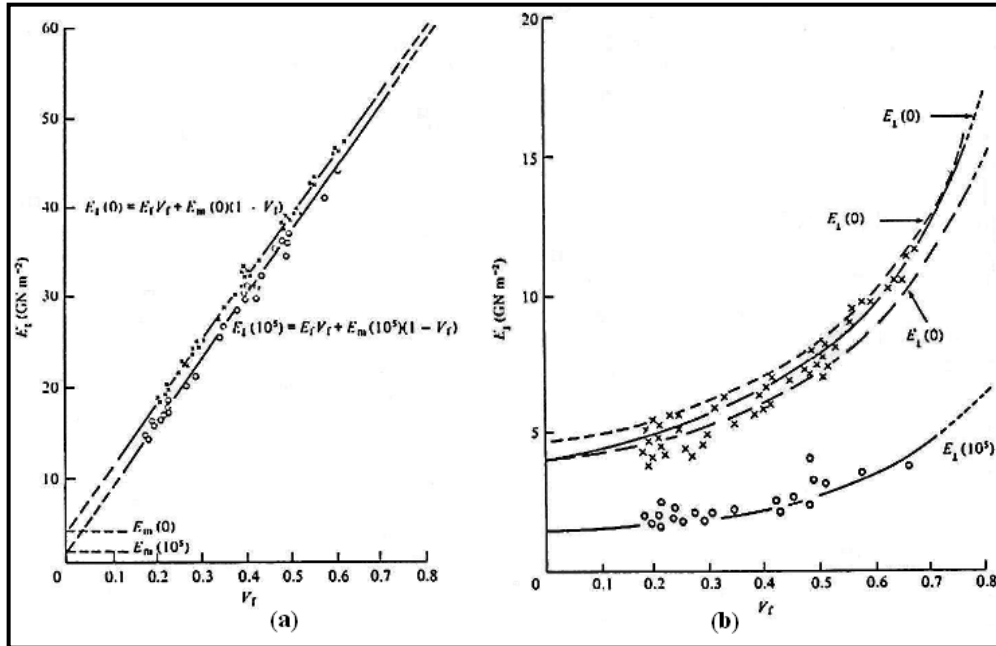
eşitliği ile bulunur. Eşitlikte  $V_f = 0$  olarak alınırsa  $E_2 = E_m$  bulunur ki bu da eşitliğin doğruluğunu kanıtlar. Dik yönde zorlama, konstrüktif açıdan açıdan istenmez. Ancak çok katlı yapılarda ve farklı yönlenmiş tabakalarda (laminat) bilinmesi gereken, önemli bir husustur. Eğer fibere göre aşırı plastik olan kalın cidarlı bir uygulama söz konusu ise; bu takdirde (2.11) eşitliği  $E'_m$  gibi bir düzeltme faktörü kullanılarak daha gerçekçi eşitlikler elde edilir. Bu eşitlikte matrisin poisson oranı etkin olmuştur. Uygulamaları, göreceli olarak yüksek sıcaklık ve sürekli yük altında çalışan termoplastik matrisli kompozitlerde görülmektedir [10-19].

$$E_2 = \frac{E_f \cdot E'_m}{E_f \cdot (1 - V_f) + E'_m \cdot V_f} \quad (2.12)$$

Şeklinde olan eşitlik 2.12'de  $E'_m$ ;

$$E'_m = \frac{E_m}{1 - \nu^2} \quad (2.13)$$

dir. Şekil 2.2a ve 2.2b'de eşgerinim (izostrain) ve eşgerilim (isostress) zorlamalarının analitik ifadeleri gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Polyester reçine ve sürekli E-camı fiberli kompozit plakada zorlamaların analitikifadesi: (a) İzostrain zorlama, (b) izostress zorlama [11]

(2) yönünde zorlamalar için Halpin-Tsai çok amaçlı kullanılabilen ve kendi adı ile anılan eşitliği geliştirilmiştir. Eşitlik;

$$\frac{M}{M_m} = \frac{(1 + \xi \cdot \eta \cdot V_f)}{(1 - \eta \cdot V_f)} \quad (2.14)$$

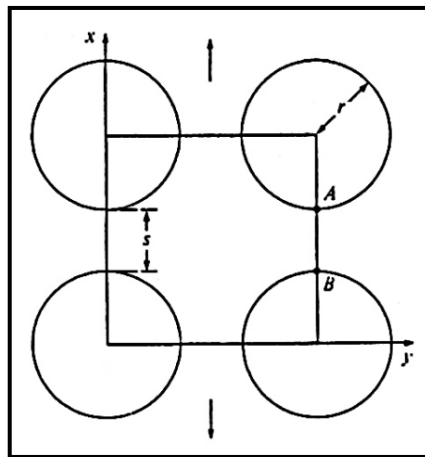
olup, burada

$$\eta = \frac{(M_f / M_m) - 1}{(M_f / M_m) + \xi} \quad (2.15)$$

dir. Eşitlikte  $M$  genel anlamı ile **modül (özellik)** olarak tanımlanmakta ve

- $M \Rightarrow E_2, G_2, \nu_2$
- $M_f \Rightarrow E_f, G_f, \nu_f$
- $M_m \Rightarrow E_m, G_m, \nu_m$

yukarıda belirtilen özelliklerin bulunmasında kullanılmaktadır. Burada  $G$  **kayma modülüdür**. (2.15) eşitliğindeki en önemli parametre  $\xi$  olup, Halpin ve Tsai tarafından plastik matrisli kompozitlerde  $\xi=0,2$  olarak bulunmuştur. Bu tür zorlamada, matriste fiberlerin dizilimi dolayısı ile oluşan **gerinim yığılması** konusu ikincil olarak kendini göstermektedir. Kies, Şekil 2.3'te gösterilen model üzerinde, AB noktaları arasında oluşan gerinim yığılmasını, fiberlerin geometrik oranları cinsinden ifade etmiştir [10-19].

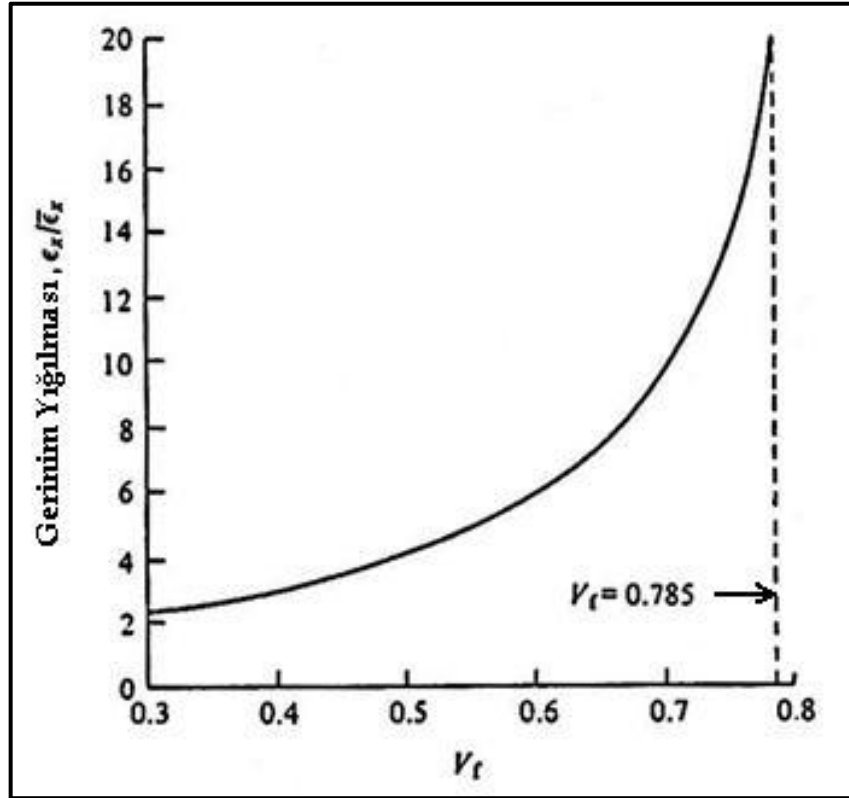


Şekil 2.3 Gerinim yığılmasının kare dizilişteki modeli [11]

Eşitlik 2.16’da,  $s$  fiberler arası uzaklık,  $r$  fiber yarıçapı,  $\bar{\epsilon}_x$  ortalama çekme gerinimi ve  $\epsilon_x$  yığılmış (artmış) gerinimi simgelediğinde, kare diziliş için [11];

$$\frac{\epsilon_x}{\bar{\epsilon}_x} = \frac{\left(2 + \frac{s}{r}\right)}{\left[\frac{s}{r} + 2\left(\frac{E_m}{E_f}\right)\right]} \quad (2.16)$$

Eşitliği ile gerinim yığılması elde edilmiştir. Yığılmanın fiber hacim oranı ile değişimi ise Şekil 2.4’te verilmiştir.



Şekil 2.4 Gerinim yığılmasının fiber hacim oranı ile değişimini gösteren grafik ( $V_f=0.785$ ) [11]

### 2.1.2 Fiberlerin Yöne Bağlı Olarak Özelliklerinin Değişimi

Eş yönlü fiberlerde, fiberlere paralel yönde yapılan zorlama (2.7) eşitliği, dik yönde yapılan zorlama (2.11) eşitliği ile verilirken; paralel yön ile  $\theta$  açısı yapan yöndeki elastik özellikler de bulunmak istenebilir. Konunun daha da ilerletilmiş hali sürekli fakat; düzlemsel gelişigüzel dağılmış plakaların ortalama (ya da etkin) elastiklik özelliklerinin bulunmasıdır. Nielsen ve Chen her iki hususu da [12-16] ;

$$\bar{E} = 2\pi \int_0^{\pi/2} E(\theta) d\theta \quad (2.17)$$

eşitliği ile kuramsal olarak tanımlanmışlardır.  $\bar{E}$  **düzlemsel gelişigüzel plakadaki ortalama elastiklik modülü**,  $E(\theta)$ , **asal eksenle  $\theta$  açısı yönündeki elastik modülü**dür. Laminasyon teorisinden hareketle  $E(\theta)$  mühendislik olarak (2.7) ve (2.11) eşitliklerinden elde edilen sabitler cinsinden [11-16];

$$\frac{1}{E(\theta)} = \frac{1}{E_1} \cdot c^4 + \left( \frac{1}{G_1} - \frac{\nu_1}{E_1} \right) c^2 \cdot s^2 + \frac{1}{E_2} \cdot s^4 \quad (2.18)$$

eşitliği ile verilmektedir. Eşitlikte  $c = \cos\theta$ ,  $s = \sin\theta$  'dir. Aksaka da (2.7) ve (2.11) eşitliklerini kullanarak, düzlemsel dağılımlı plakada ortalama elastiklik modülü, kayma modülü ve poisson oranını aşağıdaki gibi elde etmiştir [11-16]:

$$\bar{E} = \left[ \frac{E_1 + E_2 + 2\nu_1 \cdot E_2}{1 - \nu_1 \cdot \nu_2} \right] \left[ \frac{E_1 + E_2 - 2\nu_1 \cdot E_2 + 4(1 - \nu_1 \cdot \nu_2)G}{3(E_1 + E_2) + 2\nu_1 \cdot \nu_2 + 4(1 - \nu_1 \cdot \nu_2)} \right] \quad (2.19)$$

$$\bar{G} = \frac{E_1 + E_2 - 2\nu_1 \cdot E_2}{8(1 - \nu_1 \cdot \nu_2)} + \frac{1}{2} \cdot G_1 \quad (2.20)$$

$$\bar{\nu} = \frac{\bar{E}}{2 \cdot \bar{G}} - 1 \quad (2.21)$$

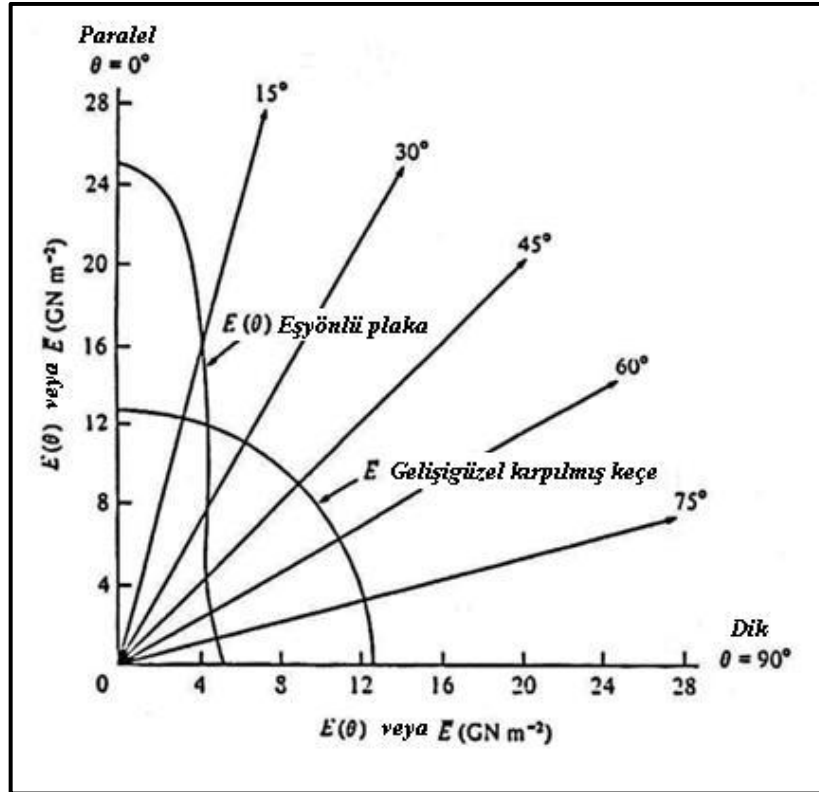
(2.19) ve (2.20) eşitlikleri uzun ve karışık olduğundan uygulamada bunların yerine aşağıdaki eşitlikler kullanılır [11-16].



$$\bar{E} = \frac{3}{8}.E_1 + \frac{5}{8}.E_2 \quad (2.22)$$

$$\bar{G} = \frac{1}{8}.E_1 + \frac{1}{4}.E_2 \quad (2.23)$$

(2.18) ve (2.19) eşitlikleri ile elde edilen elastiklik modülünün yöne bağımlı olan ifadeleri Şekil 2.5'teki gibi analitik olarak ifade edilmiştir.



Şekil 2.5 E-camı takviyeli ( $V_f=0,30$ ) polyester kompozitte elastik modülün yöne göre değişimi [13]

### 2.1.3 Fiber Sonlarında Gerilme Dağılımları

Fiber-matris ara yüzeyinin mükemmel olması durumunda dahi; sürekli eş yönlü fiberlerin, süreksiz eş yönlü koşuluna geçişteki hali de dahil olmak üzere yapılan deneysel gerilme analizlerinde; fiberlerin sonlarında çekme dayancının sıfır olduğu, ancak kayma dayancının maksimuma ulaştığı saptanmıştır. Şekil 2.6'da verilen modelde fiberlere paralel yönde zorlama yapıldığında, **fiber boyunca oluşan çekme gerilmesi** [12-19];

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_m \cdot \left[ \frac{1 - \cosh \beta \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot l - x \right)}{\cosh \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot l} \right] \quad (2.24)$$

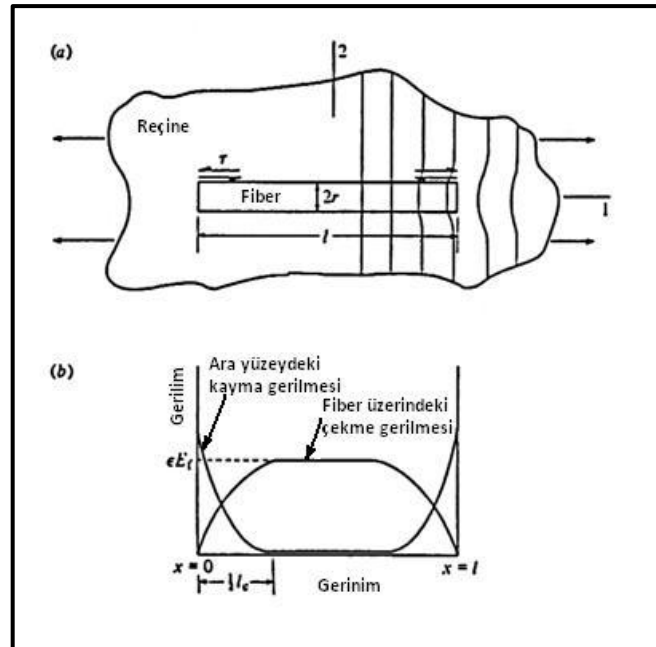
şeklindedir. Eşitlikteki  $\beta$ ;

$$\beta = \left[ \frac{2 \cdot G_m}{E_f \cdot r^2 \cdot \ln \left( \frac{R}{r} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.25)$$

olup,  $l$  fiber boyu,  $2R$  fiberler arası uzaklık,  $2r$  fiber çapıdır. Benzer şekilde **fiber-matris ara yüzeyinde oluşan kayma gerilmesi**;

$$\tau = E_f \cdot \varepsilon_m \cdot \left[ \frac{G_m}{2 \cdot E_f \cdot \ln \left( \frac{R}{r} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\sin \zeta \cdot \beta \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot l - x \right)}{\cos \zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot l} \quad (2.26)$$

şeklinde ifade edilmektedir.



Şekil 2.6 Fiber sonlarında gerilme dağılımı a) şematik gösterim, b) grafiksel gösterim [13]

Uygulamada bu çekme ve kayma gerilmesi değerlerinin yeterli uzunluktaki fiberler için maksimum değerlerinin oranı kullanılır. (2.24) ve (2.26) eşitliklerinde gerekli düzenlemeler yapılarak [10-19];

$$\frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\max}} = \left[ \frac{G_m}{2.E_f \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right)} \right]^{1/2} \quad (2.27)$$

(2.27) eşitliği elde edilir. Bu durumda fiberlerin sonlarında  $l_c$  yük taşımayan **kritik boyun** ifadesi gereklidir.  $2r$  çapında  $l_c$  kritik boyunda bir fiberin matris içinden sıyrılması söz konusu olduğunda; sınır koşulda [10-19];

$$\sigma_f \cdot (\pi \cdot r^2) = \tau \cdot (2 \cdot \pi \cdot r \cdot l_c) \quad (2.28)$$

eşitliğinden;

$$\frac{l_c}{r} = \frac{\sigma_f}{2 \cdot \tau} \quad (2.29)$$

sonucu elde edilir ki  $(l_c/r)$  **fiber şekil oranı** olarak tanımlanır.

#### 2.1.4 Fiberlerin Dokuda Dağılımının Analizi

Fiberlerin boyları ve dokuda dağılış biçimlerinin karışımlar kuralını doğrudan etkileyeceği görüşünden hareketle, (2.7) eşitliğinin fiber bileşeni modifiye edilerek daha gerçekçi yaklaşımlar geliştirilmiştir. (2.7) eşitliği genişletilerek [10-12];

$$E_c = \eta_0 \cdot \eta_l \cdot E_f \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f) \quad (2.30)$$

şeklinde yazılır. Eşitlikte  $\eta_0$ , **yön etki faktörü**;  $\eta_l$ , **boy etki faktörü** olarak tanımlanır.

Krenchel ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda boyu 10 mm'nin üzerinde cam ve karbon fiberlerde  $\eta_0 = 0,99$  (sürekli fiberlerde 1,0) alınabileceğini saptamışlardır.  $\eta_l$  yön etki faktörünü ise deneysel olarak şu şekilde elde etmişlerdir [10-19]:

- Sürekli fiberli plakada, fiberlere paralel yönde;  $\eta_l = 1,0$
- Sürekli fiberli plakada, fiberlere dik yönde;  $\eta_l = 0$
- Düzlemsel gelişigüzel dağılımlı plakada;  $\eta_0 = \frac{3}{8}$
- Kalınlığı olan gelişigüzel dağılımlı plakada;  $\eta_0 = \frac{1}{5}$

### 2.1.5 Isıl ve İmalat Gerilmeleri ile Isıl Genleşme Katsayıları

Fiberler ile matris arasında farklı ısı genleşme katsayıları nedeniyle, imalat ve uygulama aşamalarında ara yüzeyde ısı ya da imalat gerilmeleri oluşur. Bu gerilmeler matrinden fibere doğru basma gerilmesi şeklinde oluşursa genelde sorun oluşturmazlar. Ancak fiberden matrise çekme gerilmesi oluşturursa bu takdirde fiber-matris ara yüzeyi ayrılması çalışma koşulları esnasında kaçınılmaz olarak oluşur. Schaprey, Şekil 2.1’de verilen model üzerinde; eş yönlü fiberli bir kompozit fiberlere paralel yöndeki ısı genleşme katsayısını [10-19];

$$\alpha_1 = \frac{E_f \cdot \alpha_f \cdot V_f + E_m \cdot \alpha_m \cdot (1 - V_f)}{E_f \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f)} \quad (2.31)$$

şeklinde bulmuştur. (2.31) eşitliğini kullanarak, dik yöndeki ısı genleşme katsayısını ise;

$$\alpha_2 = (1 + \nu_m) \alpha_m \cdot (1 - V_f) + (1 + \nu_m) \alpha_f \cdot V_f - \alpha_1 \cdot [\nu_f \cdot V_f + \nu_m \cdot (1 - V_f)] \quad (2.32)$$

şeklinde elde etmiştir. Eşitliklerde  $\alpha_f$  ve  $\alpha_m$  sırasıyla **fiber ve matrisin ısı genleşme katsayılarıdır**. (2.31) ve (2.32) eşitlikleri kullanılarak Halpin tarafından gelişigüzel dağılımlı bir plakada **ortalama ısı genleşme katsayısı** aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{2} \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) + \frac{\frac{1}{2} \cdot (E_1 - E_2)}{E_1 + (1 + 2 \cdot \nu_1) \cdot E_2} \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \quad (2.33)$$

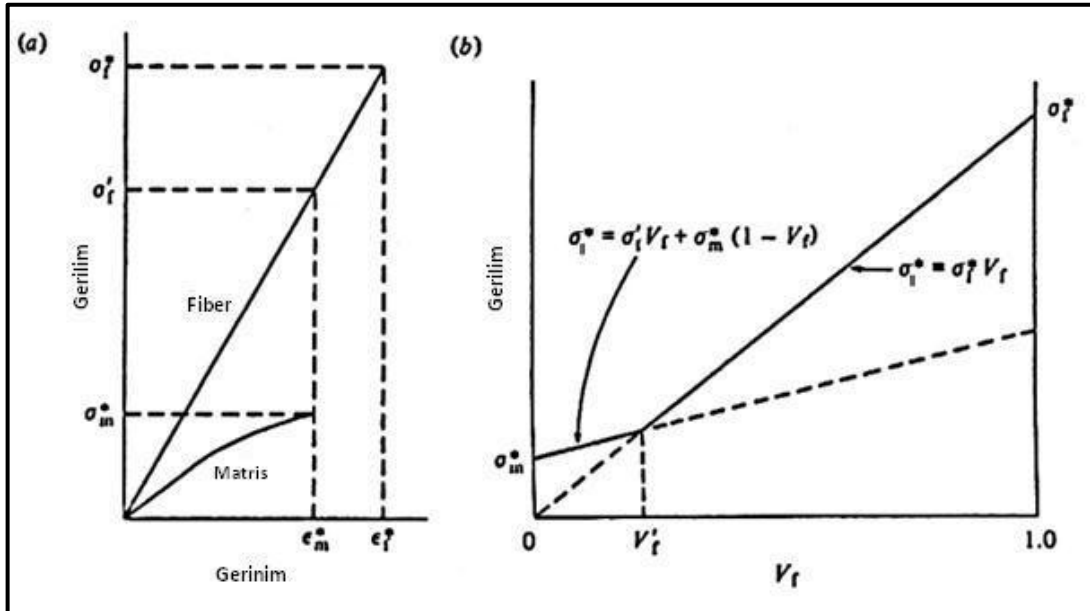
Bu konu ile ilgili her üç eşitlikte sabit hacim oranları için geçerlidir [10-19].

### 2.1.6 Minimum Hacim Oranları

Bir kompozitin oluşabilmesi ve istenilen yönde özelliklerin elde edilebilmesi açısından; matrise katılacak fiber veya dolguların sınır değerinin bilinmesi gereklidir. Sınır değerlerinin minimum değeri doğru bir kompozit imalatı açısından alt sınır değer kabul edilir. Bu değerın saptanması için iki koşuldan (gerinim koşulları) hareket edilir [10].

#### 2.1.6.1 $\varepsilon_f^* > \varepsilon_m^*$ Koşulu

Aşağıdaki Şekil 2.7’de gösterildiği gibi, söz konusu durumda hacim oranı  $V_f'$ ’ye bağlı iki sınır durum ele alınacaktır. İndisleme için, “c” kompozit indisinde kullanıldığından, kritik ya da kopan değer olarak “\*” gösterilimi kullanılmıştır [10-19].



Şekil 2.7 (a)  $\varepsilon_f^* > \varepsilon_m^*$  için fiber ve matrise ait gerilme-gerinim eğrileri, (b) eş yönlü plakada kopma dayancının  $V_f$  ile değişimi [11]

Düşük  $V_f$  değerlerinde fiberler yeterli desteklendirme görevini göremeyecekler ve kırılma ya da kopma, karışımlar kuralına göre;

$$\sigma_1^* = \sigma_f' \cdot V_f + \sigma_m^* (1 - V_f) \quad (2.34)$$

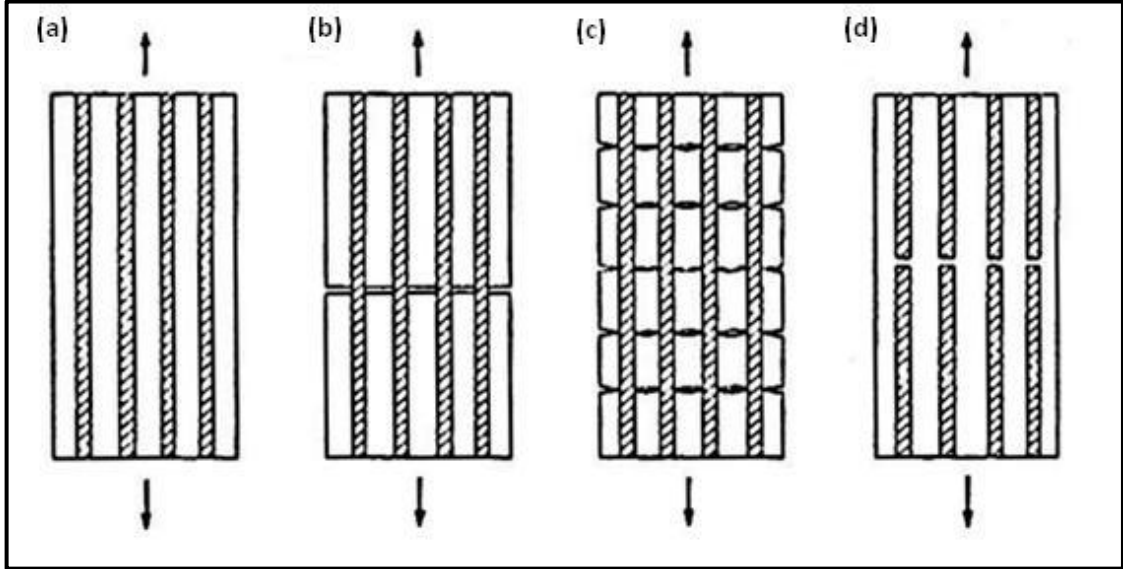
eşitliği uyarınca olacaktır. Benzer şekilde, dokuda yeterli  $V_f$  değerleri varsa;  $V_f'$  nin etkin olduğu koşul gereği kopma ya da kırılma [10-19];

$$\sigma_1^* = \sigma_f^* \cdot V_f \quad (2.35)$$

eşitliği uyarınca olur. Böylece (2.34) ve (2.35) eşitliklerinin ortak çözümü ile;

$$V_{\min} = \frac{\sigma_m^*}{(\sigma_f^* - \sigma_f' + \sigma_m^*)} \quad (2.36)$$

minimum hacim oranı olarak bulunur. Bu konuda cam-polyester reçine kompozitinde yapılan çalışmalarda  $V_{\min}=0.11$  bulunmuştur. Aveston ve Kelly bu ve bundan sonraki koşul için kırılma modellerini şekillerini (kırılmanın oluşum tiplerini) Şekil 2.8'deki gibi modellemişlerdir [10-14].



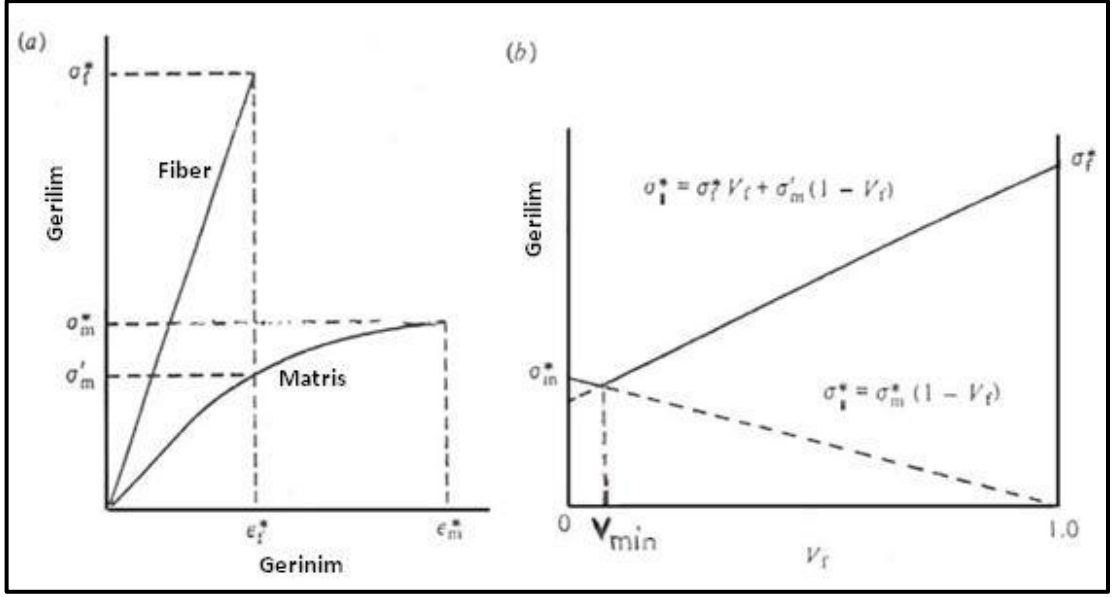
Şekil 2.8 Eş yönlü plakada (a) fiberlere paralel yönde yapılan zorlamalar, (b)  $\varepsilon_f^* > \varepsilon_m^*$  koşulu, (c)  $\varepsilon_f^* \gg \varepsilon_m^*$  koşulu, (d)  $\varepsilon_m^* > \varepsilon_f^*$  koşulundaki kırılma oluşum tipleri [11]

#### 2.1.6.2 $\varepsilon_m^* > \varepsilon_f^*$ Koşulu

Şekil 2.9'dan görüleceği gibi, iki sınır durumdan hareketle,  $V_f$ 'in yetersiz olduğu destekleme durumunda kırılma ya da kopma;

$$\sigma_1^* = \sigma_m^* \cdot V_m = \sigma_m^* \cdot (1 - V_f) \quad (2.37)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir [10-19].



Şekil 2.9 (a)  $\varepsilon_m^* > \varepsilon_f^*$  için fiber ve matrise ait gerilme-gerinim eğrileri, (b) Eş yönlü plakalarda kopma dayanıcının  $V_f$  ile değişimi [11]

$V_f$ 'nin yeterli olduğu durumda kopma;

$$\sigma_1^* = \sigma_f^* \cdot V_f + \sigma_m' \cdot (1 - V_f) \quad (2.38)$$

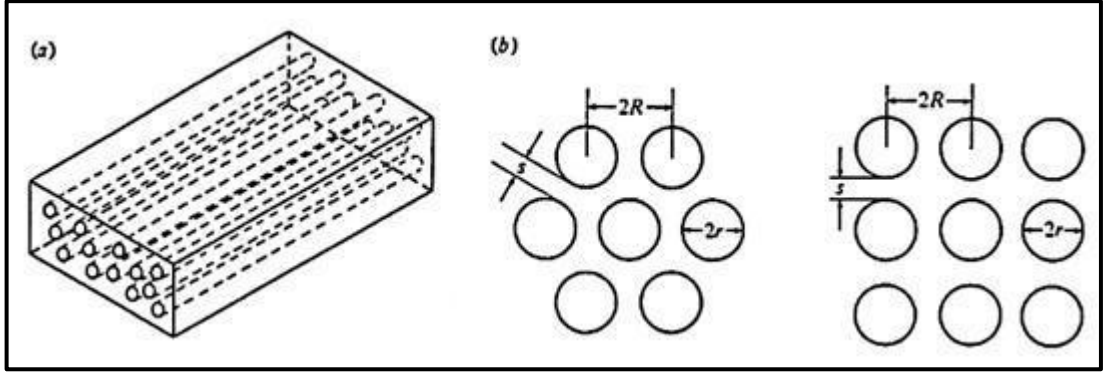
eşitliği doğrultusunda olur. (36) ve (37) eşitliklerinin ortak çözümü ile

$$V_{\min} = \frac{(\sigma_m^* - \sigma_m')}{(\sigma_f^* + \sigma_m^* - \sigma_m')} \quad (2.39)$$

minimum hacim oranı bulunur. Karbon fiber-epoksi matris için eş yönlü plakalarda yapılan çalışmalarda  $V_{\min} = 0,026$  bulunmuştur. Bu durum termoplastik matrisli-cam, karbon, vb. fiber destekli kompozitlerde de görülmektedir [10-19].

### 2.1.7 Maksimum Hacim Oranı ve Geometrik Diziliş

Şekil 2.10'da gösterildiği gibi sürekli fiberlerin kesitine dik yönde bir inceleme yapıldığında, doğanın temel kurallarından biri olan temel dizilim prensibi ortaya çıkar. Fiberlerin altıgen ya da kare biçiminde dizildikleri görülmektedir [10-19].



Şekil 2.10 (a) Eş yönlü sürekli fiberli plaka kesiti, (b) Bu plakada fiberlerin altıgen ve kare dizilişleri [12]

$2R$  fiber merkezleri arası uzaklık,  $2r$  fiber çapı,  $s$  fiberler arası uzaklık olduğunda bu geometrik oranlar cinsinden, hacim oranları;

Altıgen: 
$$V_f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left( \frac{r}{R} \right)^2 \quad (2.40)$$

Kare: 
$$V_f = \frac{\pi}{4} \left( \frac{r}{R} \right)^2 \quad (2.41)$$

şeklinde elde edilmektedir. Benzer şekilde fiberler arası uzaklık;

Altıgen: 
$$s = 2 \cdot \left[ \left( \frac{\pi}{2\sqrt{3} \cdot V} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \cdot r \quad (2.42)$$

Kare: 
$$s = 2 \cdot \left[ \left( \frac{\pi}{4 \cdot V} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \cdot r \quad (2.43)$$

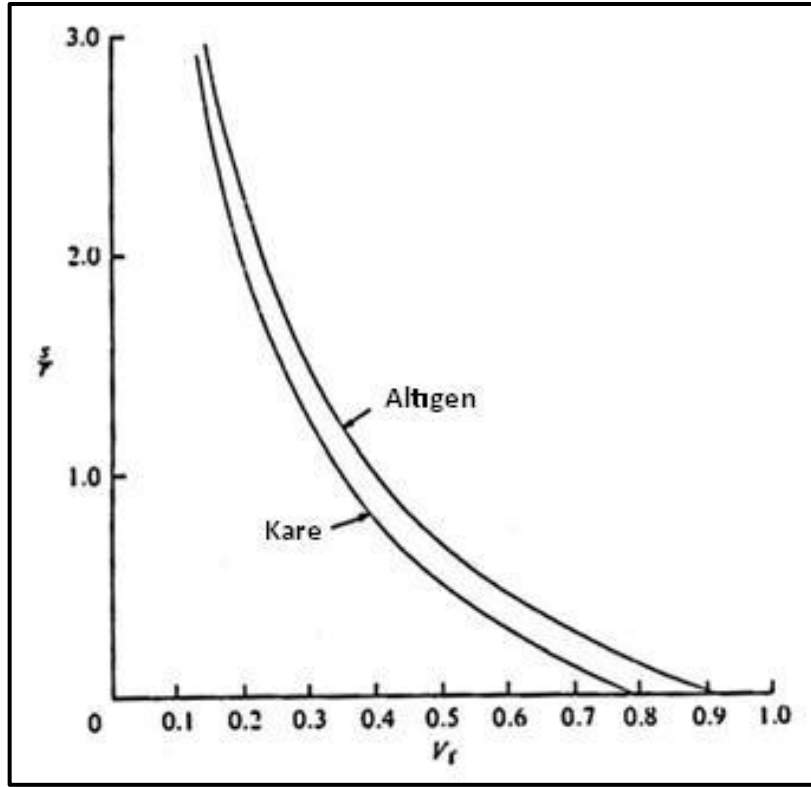
elde edilir. (2.40) ve (2.41) eşitliklerinde  $r = R$  olursa maksimum hacim oranı elde edilir. Buna göre;

Altıgen: 
$$V_f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0,907 \quad (2.44)$$

Kare: 
$$V_f = \frac{\pi}{4} = 0,786 \quad (2.45)$$



değerleri elde edilir ki bu değerlerin üzerindeki çaplarda fiber dizilimi imkansızdır [10-19]. Diğer taraftan (2.42) ve (2.43) eşitliklerindeki  $s/r$  oranı  $V_f$ 'ye karşılık gelecek şekilde bir eğri çizilmek istenirse, Şekil 2.11'deki karakteristik eğriler elde edilir.



Şekil 2.11 Fiber hacim oranına göre,  $s/r$  oranının değişimi [13]

Burada anlatılan durumlar ideal dizilimler söz konusu olduğunda geçerlidir. Ancak, özellikle plastik matrisli kompozitlerde, imalat koşulları nedeni ile dizim kusurları oluşur. Bu kusurlar kompozit malzeme terminolojisinde **boşluk** olarak tanımlanır. Boşluk yüzdesi kesite dik yönde yapılan incelemelerle saptanır.  $V_f$  ve  $V_m$  sırasıyla fiber ve matrisin hacim oranları ise **boşluk hacim oranı**;

$$V_v = 1 - (V_f + V_m) \quad (2.46)$$

ifadesi ile tanımlanır.  $V_v = 0$  olduğunda  $V_f + V_m = 1$  olmaktadır.

### 2.1.8 Ağırlık ve Hacim Oranları Arasındaki Bağlantılar

Kompozit malzeme çalışmalarında; kuramsal yaklaşımlarda V hacim oranı, deneysel çalışmalarda W ağırlık oranı kullanılmaktadır. Her ikisi arasındaki geçişler [10-19]:

- $V_1, V_2, \dots, V_n$  = Hacim oranları,
- $W_1, W_2, \dots, W_n$  = Ağırlık oranları,
- $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  = Yoğunluklar ise;

$$V_1 = \frac{\frac{W_1}{\rho_1}}{\frac{W_1}{\rho_1} + \frac{W_2}{\rho_2} + \dots + \frac{W_n}{\rho_n}} \quad (2.47)$$

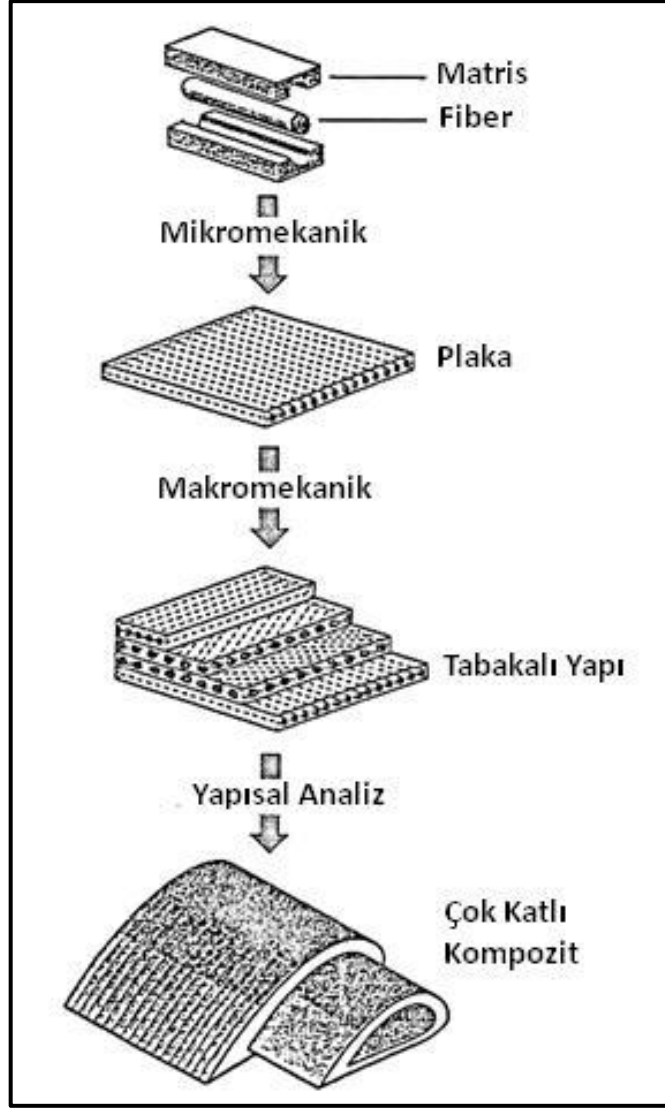
$$W_1 = \frac{\rho_1 \cdot V_1}{\rho_1 \cdot V_1 + \rho_2 \cdot V_2 + \dots + \rho_n \cdot V_n} \quad (2.48)$$

şeklinde ifade edilir.

## 2.2 Kompozitlerin Makromekaniği

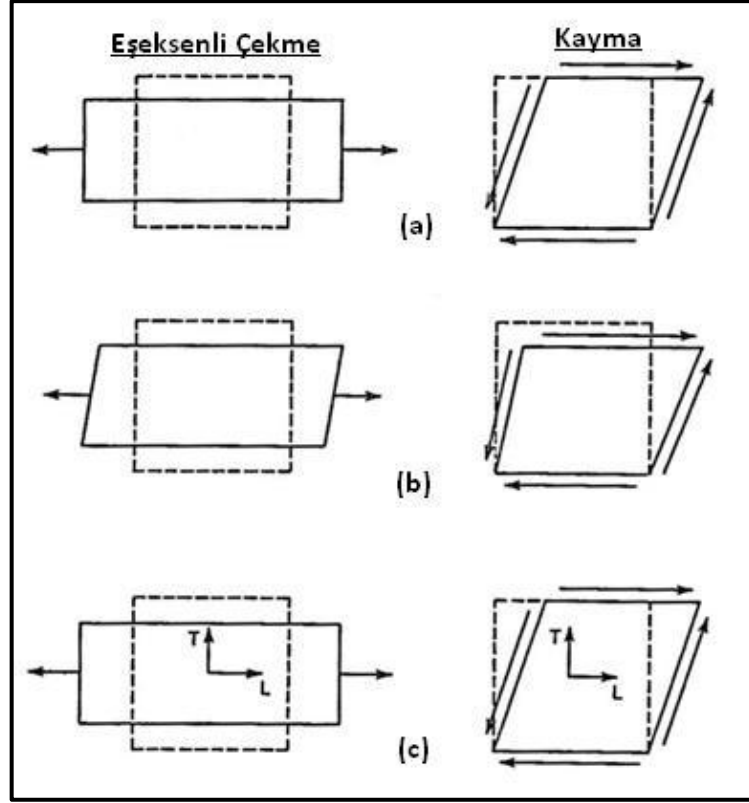
Mikromekanik analizlerden hareketle çok katlı tabakalar, izotropik ve ortotropik plakalar söz konusu olduğunda ise kompozitlerin makromekaniği konusu ortaya çıkmaktadır [7].

Tasarım uygulamalarında; fiber-matris ikili bileşeninden **plaka**, plakaların birlikte kullanımı ile **tabakalı yapılar**, sonucunda da **çok katlı kompozitler** elde edilir. Fonksiyonel olarak kullanımı optimum çözümler sağlayan yapının, izotropi göstermesi nedeniyle, elastik özelliklerin saptanması için matematik modeller geliştirilmiştir [10-19]. Şekil 2.12’de bu gelişim şematik olarak verilmiştir.



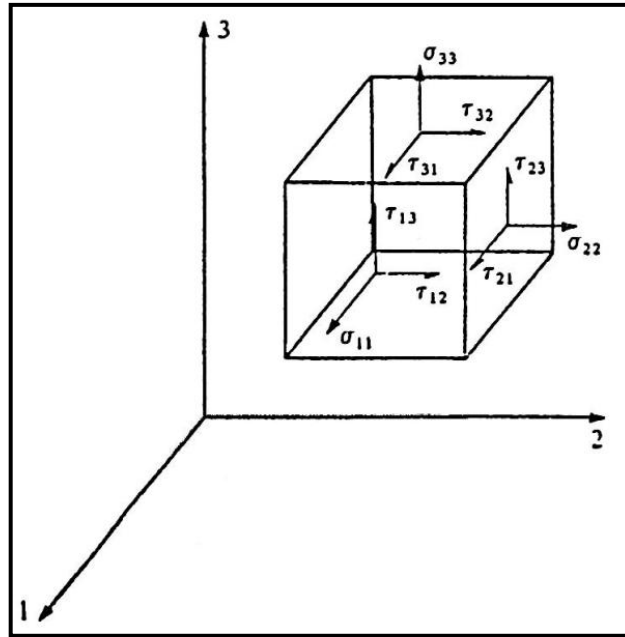
Şekil 2.12 Fiber-matris ikili kullanımında kompozit yapılara geçişin şematik gösterilimi [15]

Mühendislik malzemeleri; elastik özelliklerinin incelenmesi aşamasında; izotropik malzemeler ve ortotropik malzemeler olarak iki alt başlıkta incelenir. İzotropik cisimler (burada plaka) Şekil 2.13'te de şematik olarak gösterildiği gibi her yönde (L paralel yönü, T dik yönü ifade etmektedir) aynı elastik özellikleri gösteren cisimdir. Ortotropik cisimler ise farklı yönde farklı özellikler gösteren cisimlerdir. Kompozitler, özellikle tabaka yapılı kompozitler ortotropik plakalara tipik birer örnektir. Bu cisimlerin özelliklerinin yöne bağlı olduğu, konumuzda ise fiber oryantasyonuna bağlı olduğu açıktır. Ortotropinin de kendi içinde gerilme veya gerinimlerden birinin sıfır olduğu koşulları incelenebilmektedir [10-19].



Şekil 2.13 İzotropi ve ortotropi kavramlarının şematik ifadeleri (a) izotropik malzeme, (b) anizotropik malzeme, (c) ortotropik malzeme [10]

Şekil 2.14'te verilen birim küpte 1, 2, 3 yönünde üç boyutlu olarak çekme ve kayma gerilmeleri incelenmesi ile; elastik çözümler bulunur.



Şekil 2.14 Birim küpteki gerilme bileşenleri

Çekme gerilmeleri pozitif, basma gerilmeleri negatif olacak şekilde dokuz adet gerilme bileşeni görülmektedir. Bunlar;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_{23}, \sigma_{31}, \sigma_{12}, \sigma_{32}, \sigma_{13}$  ve  $\sigma_{21}$  olup simetriden dolayı  $\sigma_{23} = \sigma_{32}, \sigma_{31} = \sigma_{13}$  ve  $\sigma_{12} = \sigma_{21}$ 'dir. Tek eksenli çekmede, eksen yönünde oluşan gerilme; **Hooke Kanunu** olarak bilinir ve

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (2.49)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikte  $E$ , **Elastiklik modülü**;  $\varepsilon$ , **gerinimdir**. İzotropik bir malzemede  $E$  ve  $\varepsilon$  gerinimi ile oluşan  $\nu$  Poisson oranı, uygulanan gerilmeden bağımsızdır. Benzer şekilde **kayma gerilmesi**;

$$\tau = G.\gamma \quad (2.50)$$

olup;  $G$ , **kayma modülü**;  $\gamma$ , **kayma gerinimidir**. İzotropik bir malzemede  $G$  ve  $E$  iki özel özellik arasında;

$$G = \frac{E}{2.(1 + \nu)} \quad (2.51)$$

bağıntısı vardır. Hooke kanunu kısaltılmış notasyonlarla en genel biçimiyle

$$\sigma_i = \sum_{j=1}^G C_{ij} . \varepsilon_j \quad (2.52)$$

olarak yazılır.  $i, j = 1, \dots, G$  olup  $C_{ij}$ 'ye **stiffness matrisi** denir.  $C_{ij} = C_{ji}$  olduğundan (2.52) eşitliği açık biçimde

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

yazılır. Örneğin buradan  $\sigma_1$  ve  $\sigma_2$  gerilmesi;

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= C_{11} \cdot \varepsilon_1 + C_{12} \cdot \varepsilon_2 + C_{13} \cdot \varepsilon_3 + C_{14} \cdot \gamma_{23} + C_{15} \cdot \gamma_{31} + C_{16} \cdot \gamma_{12} \\ \sigma_2 &= C_{12} \cdot \varepsilon_1 + C_{22} \cdot \varepsilon_2 + C_{23} \cdot \varepsilon_3 + C_{24} \cdot \gamma_{23} + C_{25} \cdot \gamma_{31} + C_{26} \cdot \gamma_{12}\end{aligned}\quad (2.54)$$

şeklinde açınımla bulunur. İzotropik bir malzemede **stiffness matrix** ve elastik özelliklerin her yönde aynı olması nedeniyle daha da basit olarak yazılır. (2.53) eşitliği

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11}-C_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11}-C_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11}-C_{12}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

halini alır. Bu eşitlikler gerinime karşı gerilmeler şeklinde yazılmak istendiğinde;

$$\varepsilon_i = \sum_{j=1}^G S_{ij} \cdot \sigma_j \quad (\text{Eşitlik 2.56})$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada  $S$  , **compliance matrix** olarak tanımlanır. (2.56) eşitliği daha açık biçimde;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{11}-S_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11}-S_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11}-S_{12}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

şeklinde yazılır. **Compliance** mühendislik sabitlerini içeren kavram olup, (2.57) eşitliği aşağıdaki hali alır:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

(2.57) ve (2.58) eşitliklerden görülebileceği üzere izotropik malzemelerden  $S_{11}$  ve  $S_{12}$  compliansları;  $E$ ,  $\nu$  ve  $G$ 'ye karşılık gelir ki bu da Eşitlik 2.51'de verilmiştir. Örneğin tek eksenli bir gerilmede  $\sigma_2 = \sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = \tau_{12} = 0$  olacağından (2.58) eşitliği

$$\varepsilon_1 = (1/E) \cdot \sigma_1 \quad (2.59)$$

olur ve sonra

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -(\nu/E) \cdot \sigma_1 \quad (2.60)$$

halini alır. İnce cidarlı tabakalarda  $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = 0$  olduğundan düzlem gerilmesini ifade eden (2.58) eşitliği

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & 0 \\ -\nu/E & 1/E & 0 \\ 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

şeklinde yazılır. Benzer şekilde gerilme eşitliği ise;

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E/(1-\nu^2) & \nu E/(1-\nu^2) & 0 \\ \nu E/(1-\nu^2) & E/(1-\nu^2) & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

olur. Ortotropik bir plakada her yönde özellikler farklı olacağından (2.61) eşitliği;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

şeklinde yazılır. Burada  $S_{11} = 1/E_1$ ,  $S_{22} = 1/E_2$ ,  $S_{66} = 1/G_{12}$  ve  $S_{12} = -\nu_{12}/E_2$  'dir. Gerilme eşitliği;

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

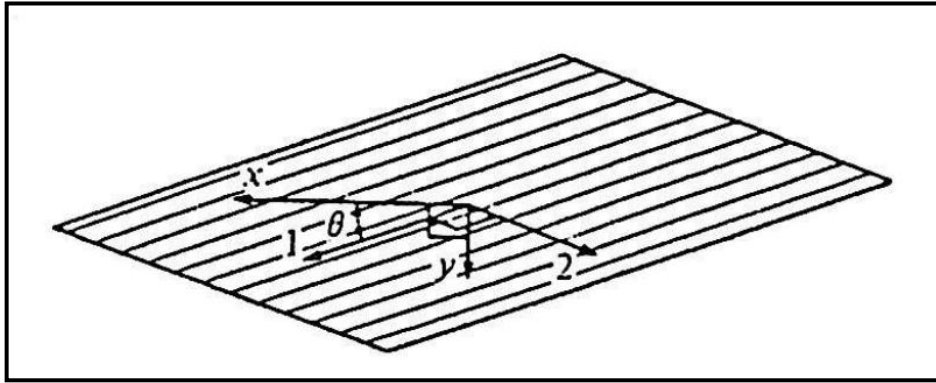
olup;  $Q_{11}$ ,  $Q_{12}$ ,  $Q_{22}$  ve  $Q_{66}$  **dönüştürülmüş stifness matrisi** olarak tanımlanır. Burada

$$\begin{aligned}
Q_{11} &= C_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \\
Q_{12} &= C_{12} = \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} = \frac{\nu_{21} \cdot E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \\
Q_{22} &= C_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \\
Q_{66} &= \frac{1}{2} (C_{11} - C_{12}) = G_{12}
\end{aligned} \tag{2.65}$$

dir. Burada dört tane bağımsız sabit olduğu görülmektedir. Böylece ortotropik malzemelerde örneğin (1) yönünde bir çekme gerilmesi söz konusu olduğunda, burada kayma gerilmesinin olmadığı, ancak  $G_{12}$  kayma modülünün dik yönde etkidiği görülmektedir. Özellikle bu tür plakalarda fiberlerin dizildiği x-y düzlemi ile  $\theta$  açısı yapan yöndeki gerilmeler (Şekil 2.15) bulunmak istendiğinde, gerilme eşitliği;

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \tag{2.66}$$

biçimde yazılır.  $\bar{Q}_{xy}$  **dönüştürülmüş ters stiffness matrisidir** [10-19].



Şekil 2.15 x-y koordinat sisteminde  $\theta$  açısı kadar dönüş yapan (1) ve (2) düzlemindeki gerilmelerin şematik gösterimi

Bu şekilde dönüşüm ve anizotropik özelliklerin matematiksel olarak ifade edilmesinde kullanılan tensör notasyonu ile  $\sigma_x$  gerilmesi sonucu oluşan x yönündeki gerilme  $\sigma_x \cdot \cos^2 \theta$  ve bu yöndeki kayma gerilmesi de  $\sigma_x \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta$  olacaktır [10-19].



$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2.\sin \theta.\cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & +2.\sin \theta.\cos \theta \\ \sin \theta.\cos \theta & -\sin \theta.\cos \theta & \cos^2 \theta.\sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \tau_{x'y'} \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

Buradan düzlemdeki çözümlere geçilirse x-y koordinat sistemi ile  $\theta$  açısı söz konusu olduğunda; çekme ve kayma gerilmeleri;

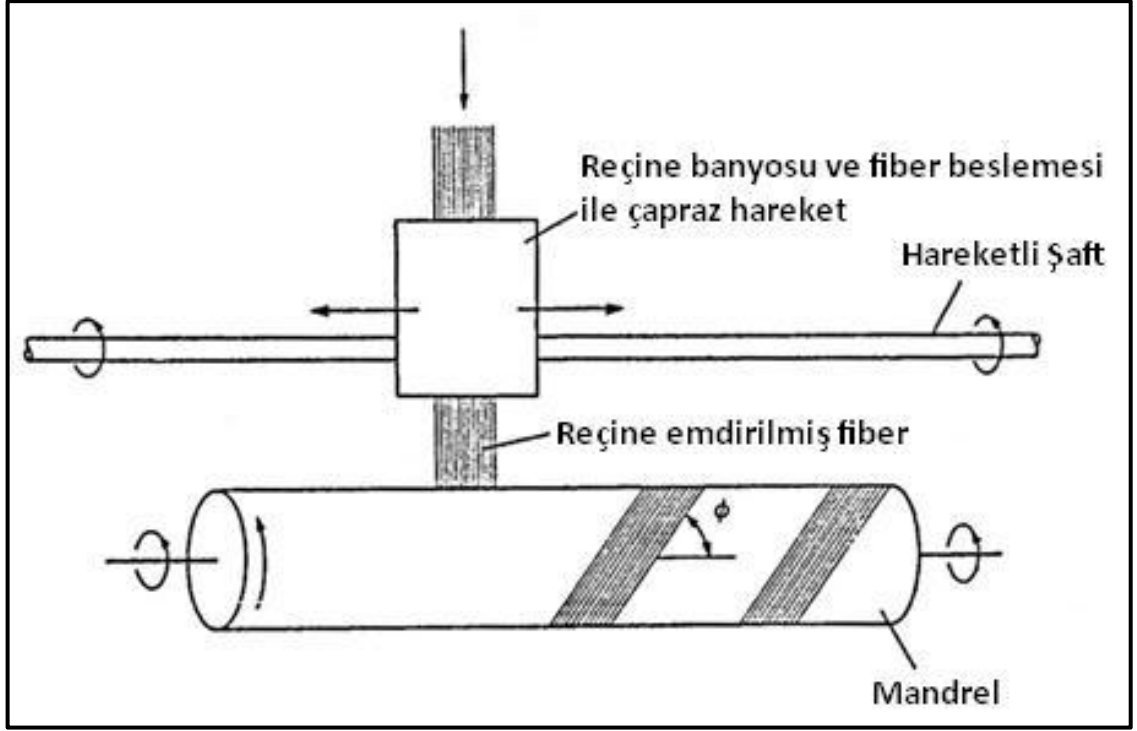
$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_\theta.\cos^2 \theta \\ \sigma_2 &= \sigma_\theta.\sin^2 \theta \\ \tau_{12} &= -\sigma_\theta.\sin \theta.\cos \theta \end{aligned} \quad (2.68)$$

olarak yazılır. Buradan açılı dokunmuş kumaşlı ya da eşyönlü fiber takviyeli iç basınca maruz yapılara geçiş yapılabilir. Genel anlamada iç basınç altındaki borular ve basınçlı kaplarda; boru veya kap eksenine ile  $\theta$  açısı yapan fiber oryantasyonunun dayanıma etkisi konusu ortaya çıkmaktadır.  $2r$  çap ve  $t$  kalınlığındaki bu kaptaki oluşan  $\sigma_H$ , **çevresel gerilmeler**;  $\sigma_A$ , **eksenel gerilmeler**

$$\sigma_H = P \left( \frac{2r+t}{2t} \right) \cong \frac{P.r}{t} \quad (2.69)$$

$$\sigma_A = P \left( \frac{\pi.r^2}{2.\pi.r.t} \right) = \frac{P.r}{2t} \quad (2.70)$$

olup, burada  $P$  iç basınçtır. (2.69) ve (2.70) eşitliklerinden  $\sigma_H/\sigma_A = 2$  olduğu görülmektedir. Şekil 2.15'te  $\theta$  açısı ile sarmal dokunmuş iç basınca maruz kabın yapımı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.16 Sarmal dokunmuş iç basınca maruz kap [12]

$\sigma_y = \sigma_H$  ve  $\sigma_x = \sigma_A$ ,  $\sigma_H / \sigma_A = 2$  gösterimi ve Eşitlik 2.68'in

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_H = \sigma_1 \cdot \cos^2 \theta \\ \sigma_y &= \sigma_A = \sigma_1 \cdot \sin^2 \theta \\ \sigma_{xy} &= \sigma_1 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta\end{aligned}\tag{2.71}$$

şeklinde düzeltmesi ile;

$$\frac{\sigma_1 \cdot \sin^2 \theta}{\sigma_1 \cos^2 \theta} = 2\tag{2.72}$$

eşitliğinden (2.72)  $\tan^2 \theta = 2$  ve buradan da  $\theta = 54^\circ, 74' \cong 55^\circ$  bulunur ki; buna kısaca **ideal açı** denir.

### 2.3 Kompozit Karakteristiklerinin Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi

İmal edilmiş kompozitin özelliklerinin belirlenmesi amacı ile uygulanan deneyler; birinci aşamada; elastik sabitlerin, ikinci aşamada mekanik özelliklerin ve üçüncü aşamada fiziksel özelliklerin saptanmasında kullanılır. Gerçekten de malzeme bilimi araştırmaları

öncelikle Elastik Modülü ( $E$ ,  $E_L$ ,  $E_T$ ), Kayma Modülü ( $G$ ,  $G_{TL}$ ) ve Poisson Oranı ( $\nu_{LT}$ ) gibi elastik sabitlerin belirlenmesi ile başlar. İkinci aşamada; mekanik tutumunun belirlenmesi amacı ile gerilme-gerinim, kayma gerilmesi-kayma gerinimi vb. eğrilerden yola çıkılarak dayanç (çekme dayancı, basma dayancı, eğme dayancı, burulma ve kayma dayancı) ve gerinim değerleri saptanır. Elde edilen veriler doğrudan mühendislik hesaplamalarda kullanılan, gerçek değerlerdir. Söz konusu veriler eğer doğrudan tasarım ya da dayanç hesaplarında kullanılmıyorsa; sınır değer olan minimum koşulları sağlayıp sağlamadığı araştırılır. Dayançta ve doğal olarak da elastik tutumda söz konusu koşullar sağlandıktan sonra; fiziksel özelliklerin saptanmasına geçilir. Örneğin yoğunluk; doğru kompozit üretiminin göstergesi olan en basit deneylerden biridir ve öncelikle yapılacak deneyler arasındadır. Benzer şekilde elektrik iletkenliği, ısı ve ses yalıtkanlığı da uygulamada gerekli olan deneyler arasındadır.

Dördüncü ve son grup deneyler arasında; sonucu doğrudan uygulama alanlarında kullanılacak deneyler mevcuttur. Bunlara kısaca Mekanik-Teknolojik deneyler de denir. Su ve nem absorpsiyonu, fiber hacim oranının saptanması, yanmazlık ya da kendi kendini söndürebilirlik, UV dayancı, kaynak edilebilirlik, vb. bunlar arasında sayılabilir. Mekanik-teknolojik deneylerin bir grubu da; bitmiş mamulün tümüne uygulanan deney grubudur. Bunlar arasında basınç deneyleri, yük altında eğme vb. deneyler söz konusudur. Ayrıca çeşitli kimyasallara karşı dayanım, sıcakta ve korozif ortamlarda yük taşıyabilme gibi özel amaçlara yönelik deneyler de bu grupta ele alınabilir. Mekanik deneylerin özel türleri de mevcuttur. Darbe deneyleri, kırılma tokluğu deneyleri, özel kayma ya da kesme koşullarını içeren deneyler, tabaka ayrılması vb. bu grupta sayılabilir.

Dokudaki fiberlerin dağılımı, parça geometrisine göre fiberlerin dizilimi, fiber-matris ara yüzeyinin incelenmesi ve bağlantının belirlenmesi de optik çalışmalarla belirlenir. Fiberlerin dağılımı, dizilimi vb. çalışmalarda stereo mikroskopik incelemelerden yararlanır. Fiber matris ara yüzey analizleri içinde; kırık yüzeydeki SEM görüntüleri incelenir. Çizelge 2.1’de kompozitlere uygulanan deneyler ve bu deneylerde kullanılan standartlar listelenmiştir [1], [10], [19].

Çizelge 2.1 Kompozitlere uygulanan deneyler ve standartları

| DENEYİN TÜRÜ                                               | DENEYİN ADI                       | DENEY STANDARTI     |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| <b>Fiziksel Özelliklerin Tayininde Kullanılan Deneyler</b> | Yoğunluk Deneyi                   | TS EN ISO 1183-1    |
|                                                            |                                   | ASTM D792-00        |
|                                                            | Kalsinasyon Deneyi                | TS 1177 EN ISO 1172 |
|                                                            |                                   | ASTM D2584-02'      |
|                                                            | Boşluk Tayini                     | ASTM D2734-94       |
|                                                            | Yayınma Gücü ve Nem Absorpsiyonu  | ASTM D5229          |
|                                                            | Isıl Genleşme Katsayısının Tayini | ASTM E289-04        |
|                                                            |                                   | ASTM E831-03        |
| <b>Mekanik Özelliklerin Tayininde Kullanılan Deneyler</b>  | Çekme Deneyi                      | TS EN ISO 527-4     |
|                                                            |                                   | TS EN ISO 527-5     |
|                                                            |                                   | ASTM D3039M-00      |
|                                                            | Basma Deneyi                      | ASTM D3410M-03      |
|                                                            |                                   | ASTM D6641-01       |
|                                                            | Eğme Deneyi                       | ASTM D790-03        |
|                                                            |                                   | ASTM D6272-02       |
|                                                            |                                   | TS EN ISO 14125     |
|                                                            |                                   | TS EN ISO 14130     |
|                                                            | Darbe Deneyi                      | ASTM D3763-02       |
| <b>Özel Deneyler</b>                                       | Borularda Burulma Deneyi          | ASTM D5448-93       |
|                                                            | Iosipescu Kayma Deneyi            | ASTM D5379M-98      |
|                                                            | Kırılma Deneyi                    | ASTM E1922-97       |
|                                                            | Tabaka Ayrılması Deneyi           | ASTM D2344          |
|                                                            |                                   | ASTM D3846-2        |
|                                                            |                                   | ASTM D5528-01       |

### POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Polimer matrisli kompozitlerin üretilmeye başlanmasıyla birlikte, kompozit malzemeler 1960'lı yıllardan itibaren endüstrinin ilgisini çekmeye başlamıştır. Bu zamandan beri polimer matrisli kompozitler (PMK) ortak mühendislik malzemesi haline gelmiştir ve spor eşyaları, tüketim malları, otomotiv, havacılık ve uzay, denizcilik ve petrol taşıma sektörleri için tasarlanıp üretilmektedir. Bu endüstrilerde yaygın olarak kullanılan kompozit türü polimer matrisli kompozitlerdir [5].

Polimer matris ara yüzey özelliklerinin etkisiyle fiberlere yapışarak, kompozite gelen yükün fiberlere aktarılmasını sağlamakta ve fiberleri çevresel etkilerden korumaktadır [4]. PMK'lerin ana dezavantajı düşük çalışma sıcaklıkları, yüksek termal genleşme katsayıları, nem tutması (absorblaması) ve belirli yönlerde düşük elastik özellik göstermesidir [1].

#### 3.1 Polimer Matrisler

PMK'lerin matris malzemesi termoset veya termoplastik reçine olabilmektedir. Reçine, polimerizasyon reaksiyonlarının katalizörlerini, çeşitli katkı madelerini ve kimyasal olarak reaktif bileşenlerin bir karışımını veya formülasyonunu içerebilen polimeri belirtmek için kullanılan genel bir terimdir. Reçinenin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri, doğrudan kompozit malzemenin işleme, imalat ve son ürün özelliklerini etkilemektedir. Reçinenin kompozisyonu, fiziksel durumu veya morfolojisi ile kirlerin (empürite=impurity) veya kirleticilerin (contaminant) varlığı, reçinenin işlenebilirliğini,

lamina ve laminatların özelliklerini ve kompozit malzemenin performansı ile birlikte uzun vadeli dayanımını etkileyebilmektedir [19].

### 3.1.1 Termosetler

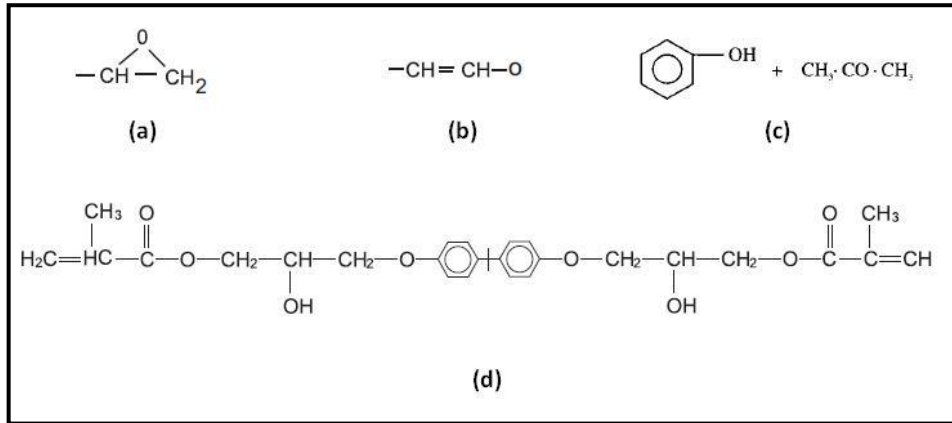
Termoset reçineler genellikle düşük molekül ağırlıklı monomerler (bir zincirdeki ortalama monomer sayısı düşük olan) ve çapraz bağlanma reaksiyonlarına öncülük eden fonksiyonel gruplara sahip oligomerlerden oluşmaktadır. Bu reçinelerin çapraz bağlanmaları kondensasyon, polimerizasyon ya da kütleme reaksiyonlarıyla gerçekleşir ve reaksiyonlar sırasında uçucu özelliğe sahip molekül oluşumu gerçekleşmez. Bu reçinelerin çapraz bağ oluşumu geri dönüşümü olmayan bir şekilde sertleşen sıvı ya da yarı-katı öncü maddelerin (precursor) ilave edilmesi ile de gerçekleşebilir [20,21]. Çapraz bağları oluşturan, bağların uzunluğunu ve yapının yoğunluğunu belirleyen moleküler birimler, malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Bununla birlikte oluşan ağ çeşidi ve ağın uzunluğu malzemenin kimyasını etkileyen en önemli faktör iken; çapraz bağlanma oranı da kütleme derecesini belirler [20].

Kondensasyon reaksiyonları sonucu oluşan üç boyutlu ağ yapısı yüksek oranda çapraz bağlar içermekte ve bu nedenle organik çözücülerin çoğunda eritilememekte ve çözünmemektedir. Kalıplanacak olan parçalarda boşluk oluşmaması için, kütleme esnasında uçucu moleküller meydana getirmeyecek reçinelerin kullanımı istenmektedir [20].

Termoset reçineler temel molekül yapılarına bağlı olarak düşük ya da yüksek viskoziteli sıvı veya katı olabilmektedirler. Düşük viskoziteli reçinelerde, yüksek basınç ya da yüksek sıcaklığa gerek duyulmadan fiberlerin reçine tarafından iyi ıslatılması sağlanabilmektedir. Yüksek viskoziteli reçinelerin fiberlere emdirilebilmesi için ise, yüksek sıcaklık ve basınç kullanılmaktadır. Genellikle reçinelerin viskozitelerini azaltmak için reaktif seyrelticiler yapılarına ilave edilir. Katı reçinelerde sıvı haldeki viskozite (sıvı akışkanlığı) veya kaynama sıcaklığı düşük organik solventlerdeki (çözeltilerdeki) çözünürlüğü, reçine işlemleri (process) için çok önemlidir. Eğer reçinenin ergime derecesi ve ergiyik haldeki viskozitesi yüksek ise reçine sadece yüksek sıcaklıklarda akışkanlık kazanmakta; bu da kompozit üretimi ve işlenmesi aşamalarında sorunlara

neden olmaktadır. Ürünün imalatını, tasarımını ve performans denetimini sağlayabilmek için geniş bir işleme penceresi (örneğin reçinenin ergime noktasıyla kürleme başlangıç sıcaklığı arasındaki fark gibi) arzu edilmektedir [20].

Kompozitlerde ve yapısal uygulamalarda en çok kullanılan termoset çeşitleri epoksiler, vinilesterler, doymamış polyesterler ve fenoliklerdir [21].



Şekil 3.1 Termosetlerin kimyasal gösterimlerinin örnekleri: a) Epoksi, b) doymamış polyester, c) fenolik reçine, d) vinilester [20], [22]

### 3.1.1.1 Epoksi Reçineler

Epoksi reçineler, “oksiren (oxirane)” olarak da bilinen üç elemanlı ve halka yapısı içeren fonksiyonel gruba sahip, çapraz bağlı polimerlerdir. Polyesterlerde ve ek poliimidlerde doymamış gruplar çapraz bağlanma reaksiyonlarına girerken; epoksi reçinelerde bu görev geniş bir kürleme ajanı grubuyla reaksiyona girebilen oksiren fonksiyonel grubuna aittir [20], [23].

Epoksi reçineler genellikle aminler, anhidritler, asitler, siyanatlar vb. ile kürlenmektedirler [20]. Kürleme reaksiyonları, düşük molekül ağırlıklı reçineyi çok önemli özelliklere sahip olan üç boyutlu termoset yapılara dönüştürür [23].

Göreceli olarak daha düşük molekül ağırlığına sahip olan epoksi reçineler, çok çeşitli koşullar altında işlenebilme özelliğine sahiptir ve çapraz bağlı yapısı sayesinde her türlü kimyasal ve korozyon ortamına karşı dayanıklıdır. Ayrıca mekanik dayanımları, termal ve elektriksel özellikleri iyi olup, üstün yapışma özelliği sergilerler. Kürleme reaksiyonlarında istenmeyen boşluk ya da hava kabarcığı oluşumuna neden olabilecek

hiçbir uçucu yan ürün meydana gelmemektedir. Epoksilerin doymamış polyesterle göre üstün olan çok önemli iki özelliği vardır: 1) Epoksi reçineler kısmen kürlenebilir ve bu durumda saklanabilirler, 2) kürlleme esnasında düşük büzülme gösterdiğinden boyutsal olarak daha kararlıdır.

Ancak, geleneksel epoksi reçinelerin viskoziteleri yüksektir ve polyester reçinelere göre daha pahalıdır. En büyük dezavantajı ise yüksek kürlleme sıcaklıkları ve sıcak-ıslak ortamlardaki kötü performansdır. Üretilen epoksi reçinelerin yaklaşık %45'i kaplamalarda kullanılırken, geri kalanı laminat (tabaklar) ve kompozitler gibi yapısal uygulamalarda, takım ve kalıp yapımında, döküm ve inşaatlarda, yapıştırıcılarda vb. alanlarda kullanılmaktadır [11], [20].

Aşağıdaki Çizelgede (3.1) çeşitli fiberler ile takviyelendirilmiş epoksi reçinelerin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Çizelge 3.1 Çeşitli fiberler ile takviyelendirilmiş epoksilerin karşılaştırılması (0°-90°)[24]

| Malzeme           | Hacim Oranı<br>( $V_f$ ) | Yoğunluk<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | Çekme Dayanımı<br>(MPa) | Elastiklik Modülü<br>(GPa) |
|-------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Epoksi            | -                        | 1200                            | 70                      | 6                          |
| Epoksi-<br>ECamı  | 0.57                     | 1970                            | 570                     | 22                         |
| Epoksi-<br>Kevlar | 0.60                     | 1400                            | 650                     | 40                         |
| Epoksi-<br>Karbon | 0.60                     | 2000                            | 380                     | 106                        |
| Epoksi-Bor        | 0.58                     | 1540                            | 380                     | 80                         |



### 3.1.1.2 Doymamış Polyester Reçineler

Organik asit ile alkolün reaksiyonu sonucu bir ester monomeri oluşmaktadır [12]. Polyesterler genellikle düşük polimerizasyon derecesine sahip açık sarı renkli oligomerlerdir. Oligomerin kimyasal kompozisyonuna ve moleküler ağırlığına bağlı olarak polyeseterler, viskoz sıvı ya da rijit katı formunda olabilmektedir [20].

Doymamış polyesterler, serbest radikal üreten peroksitlerin, fitalik veya maleik anhidritler ile glikollerin (propilen glikol, etilen glikol, dipropilen glikol) polikondensasyonunu başlatmasıyla meydana gelmektedirler [23]. Doymamış polyesterler üzerine yapılan ilk çalışmalarda, reaktif çift bağları olmasına rağmen, etkili katalizörler ilave edildiğinde bile kürlenme işlemi için yüksek sıcaklık ve süre gerekmiştir. 1937’de Ellis’in yaptığı çalışma sonrası ilk defa polyester sitiren ile reaksiyona sokulmuş ve kürlenme derecesi ile sıcaklığı önemli oranda düşürülmüştür. Doymamış polyesterler, sitiren gibi doymamış reaktörlerin %30-50 arası bir oranda ilave edilmesiyle kürlenmektedirler [25]. Bu kürlenme işlemi sonucunda çapraz bağ oluşumu sağlanır ve termoset bir reçine olan doymamış polyester reçine üretilmiş olur.

Doymamış polyesterlerdeki gelişmeler 1940’lı yıllarda ivme kazanarak günümüze kadar gelmiştir. Amerika Birleşik Devletleri hükümetinin **sitiren bütadiyen kağıtuğun** üretimine sponsor olmasıyla sitiren düşük maliyetli olarak elde edilebilir hale gelmiştir. Buna bağlı olarak polyester reçineler, epoksi reçinelere göre maliyet açısından daha avantajlı olmaktadır [4], [5]. Polyester reçinelerin düşük maliyet avantajına ilaveten kolay kürlenmeleri, kolay kalıplanmaları, özelliklerinin istenilen doğrultuda değiştirilebilmesi, teknoloji ve dizayn parametrelerinin yeterli bilgi birikimi ile bilinmesi diğer avantajlarıdır. Polyester malzemeler özellik ve üretim bakımından göreceli olarak düşük dayanım, gevreklik ve hava kirliliğine sebep olma yönünden dezavantajlara sahiptir [15].

### 3.1.1.3 Vinilesterler

Vinilester reçineler termoset polimerler ailesinin en yeni üyelerinden sayılabilmektedir. Her ne kadar 1950’lerde küçük miktarlarda sentezlenmiş de olsalar, ticarileşmeleri 1960’larda Shell ve Dow Chemical sayesinde gerçekleşmiştir [4].

Vinilester, bisfenol-A gibi bir epoksi reçine ile doymamış karboksilik asitlerin (özelikle metakrilik asit) reaksiyonu sonucu oluşan doymamış reçinedir. Vinilester reçineleri önemli kılan özelliklerin başında temel zincir yapısında yüksek molekül ağırlıklı epoksi reçinenin varlığı gelmektedir. Yapıdaki epoksi, tokluk ve esneklik ile birlikte mükemmel mekanik özellikler sağlar. Buna ilaveten, zincir yapısının sonunda bulunan doymamış yapı, vinilesterleri çok reaktif yapmakta ve vinilesterler sitirende bile çözünebilmektedir. Bu sayede geleneksel bir doymamış polyester gibi kürlenebilmekte ve hızlıca ham dayanım (green strength) kazanmaktadır. Son olarak vinilesterlerin, temel zincir yapısındaki epoksiyle birleşen ester bağlarının görece az olması, bu reçine türüne üstün kimyasal dayanım sağlamaktadır [24].

#### **3.1.1.4 Fenolik Reçineler**

Benzen halkarı üzerinde boş pozisyonlar olduğunda, fenol ve formaldehit birleşerek kondensasyon ürünlerini (fenolformaldehit+su) oluştururlar. Formaldehit en reaktif bileşen olmasına rağmen, neredeyse sadece ticari uygulamalarda kullanılmaktadır. Reaksiyon sonrasında çıkacak olan ürün, büyük bir oranda katalizör tipine ve reaktantların mol oranına bağlıdır. Her ne kadar fenolik reçine kimyasında 4 temel reaktant varsa da, fenolik kalıplama bileşikler olarak en çok “resole” ve “novalac” reçineler kullanılmaktadır. Fenolik reçineler bakalit olarak da bilinmektedirler ve kimyasal dayanımları ile boyutsal kararlılıkları iyidir; buna karşın gevrektiler. Fenoliklerin %10’u kalıplamada kullanılırken; geri kalanı tahta yapıştırıcısı, fren balatası, aşındırıcı volan ve kompozit üretimi gibi alanlarda kullanım imkanı bulmaktadır [23].

#### **3.1.2 Termoplastikler**

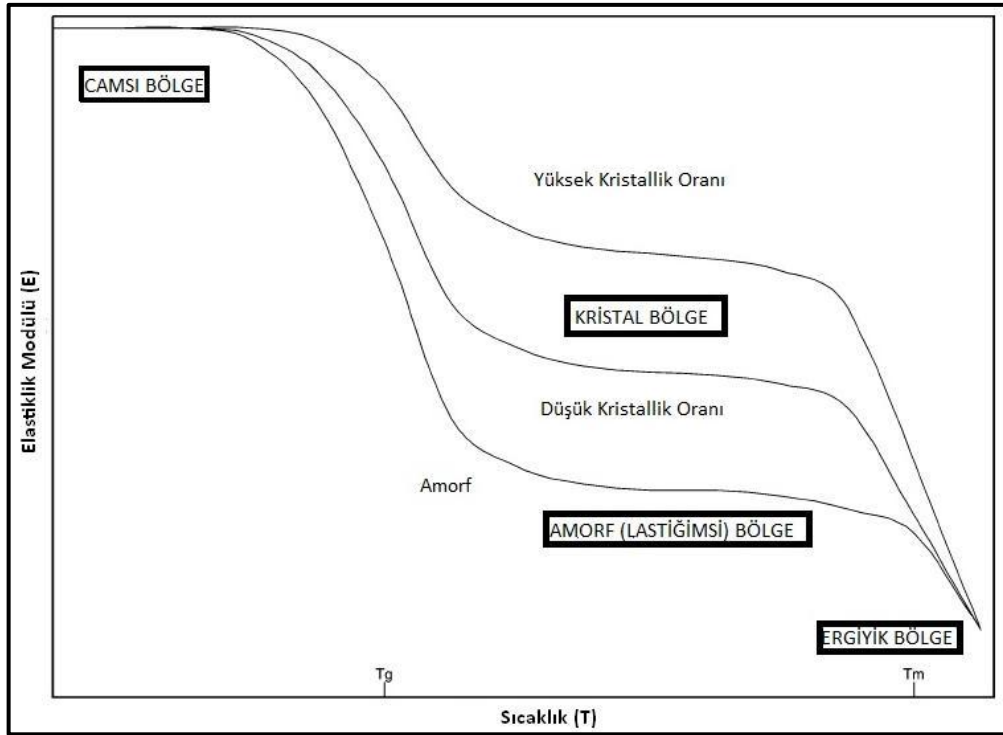
Termoplastik polimerlerinin çeşitlerinin çok fazla olmasına rağmen matris olarak kullanılanları sınırlıdır. Bu durumun başlıca nedeni üretimindeki zorlukların yanı sıra bazı hammaddelerinin yüksek maliyetidir. Oda sıcaklığında düşük işleme kalitesine sahip olduklarından üretiminde zaman kaybına neden olmaktadır. Bazı termoplastikleri istenilen şekillerle sokabilmek için çözücülere ihtiyaç duyulabilmektedir [6].

Termosetlere göre matris olarak kullanımları daha az olmakla birlikte üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geridönüşüm kapasitesi ve sertleşme prosesi için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Termoplastikler düşük sıcaklıklarda sert halde bulunmakta ve ısıtıldıklarında yumuşamaktadırlar. Bu özellikleri sayesinde şekil verilmiş bir termoplastik parça, işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilmektedir. Termoplastik matris genel olarak çoğu termoset reçineden daha toktur ve gelişmiş sıcak/ıslak direnç sağlamaktadır. Kopmadaki yüksek uzamalarından dolayı, termoform işlemine ve diğer hızlı üretim yöntemlerine uygun olan tek matris türüdür. Termosetlerin aksine termoplastiklerin çoğu kalıplama öncesi sınırsız raf ömrüne sahip olduğundan ve ısı-basınç uygulanarak tekrar kalıplanabildiklerinden, daha düşük üretim maliyetlerine sahiptirler. Bununla birlikte, pek çok sistemde tekrarlanan sıcaklık çevrimleriyle çapraz bağlanma veya termal bozunma dikkate alınması gereken bir dezavantajdır [4], [6].

Termoplastik polimerler görece daha zayıf Van der Waals bağlarıyla bir arada tutulan zincirli moleküllerdir. Ancak, zincir boyunca kimyasal değerlik bağları (chemical valance chains) çok kuvvetli olduğundan, dayanımları ve sertlikleri monomerlerinin doğal özellikleri ve çok yüksek moleküler ağırlıklarından kaynaklanmaktadır. Bu polimerler ya yüksek moleküler düzeni ile kristal yapıda ya da zincir içi veya zincirler arası dolaşmaların ve bükülmelerin (entanglement) sonucunda amorf yapıda olmaktadır. Amorf termoplastiklerin sahip olduğu gelişigüzel dizilmiş molekül zincirlerinin ısıtma esnasında açılması ve dolaşmasının ortadan kalkması sonucunda, yapı viskoz bir sıvıya dönüşürken; ısı kristal polimerleri amorf sıvıya dönüştürmektedir. Ancak, molekül zincirlerinin karmaşık fiziksel yapısı nedeniyle saf kristal yapıya sahip bir polimer üretmek zordur. Dolayısıyla, kristal termoplastikler içlerinde hem kristal hem de amorf yapıyı barındıran **yarı-kristal** yapıdadırlar [21].

Polimerlerin mekanik özellikleri sıcaklık değişimlerine karşı duyarlı olup, termoplastiklerin sıcaklığa bağlı olarak elastiklik modülündeki değişimi Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Camı geçiş sıcaklığının ( $T_g$ ) altındaki bir amorf termoplastiğin elastiklik modülü 2,8 GPa civarındayken;  $T_g$ ’nin üzerindeki sıcaklıklarda bu değer

yaklaşık 0.28 GPa değerine kadar düşebilmektedir. Eğer polimerin moleküler ağırlığı yüksek ise;  $T_g$  değerinin 100°C üzerindeki sıcaklıklarda polimer viskoelastik bir sıvıya dönüşür. Bu sıcaklıklarda polimer ergiyik gibi işlenebilmektedir. Kristal yapıdaki polimerin elastiklik modülü de  $T_g$ 'nin altında amorf polimerinki gibi bir davranış sergiler. Kristallik oranına bağlı olarak  $T_g$ 'nin altında polimer, orta değerlerde, amorfa göre yüksek, elastiklik modülüne sahiptir [20].



Şekil 3.2 Termoplastiklerde elastiklik modülünün (E) sıcaklığa göre değişimi [11]

Termoplastikler poliamitleri (PA, N6, N66, vb), polieterleri (PEEK, POM, vb), poliolefinleri (PE, PP, PB vb) akrilikleri (PMMA), polisitrenleri (PS, ABS, vb), polivinilleri (PVC) ve diğer pek çok malzemeyi kapsamaktadır. Çoğu termoplastikler az miktarda su absorbe eder, ancak kristal olmayan termoplastiklerde solvent dayanımı dikkat edilmesi gereken bir alandır [6].

### 3.1.2.1 Poliamitler

Asit ve amin grubundan oluşan monomerlerin birlerine peptid bağlarıyla bağlanmalarıyla oluşan polimerler poliamit sınıfına girerler. Poliamitler naylon6 (N6), naylon66 (N66), naylon11 (N11), naylon12 (N12), poliamitimit (PAI) ve benzeri

polimerlerden oluşmaktadır. Naylon ismiyle bilinen sentetik poliamitler, mühendislik polimerleri içinde birçok farklı uygulamada kullanılan polimerlerdir: Halı ve giyim gibi tekstil endüstrisinde, müzik aletlerinin tellerinde, ve iplik endüstrisinde kullanımı yaygındır. Çoğunlukla elyaf olarak üretilen poliamitlerin en karakteristik özellikleri; yıpranmaya ve aşınmaya karşı dirençli olmaları, yüksek sıcaklıklarda bile iyi mekanik özelliklere sahip olmaları, düşük gaz geçirgenliğine sahip olmaları ve kimyasallara karşı dirençli olmalarıdır. Mühendislik saflığında (Engineering Grade) üretilen naylon ekstrüzyon, dökme kalıplama ve enjeksiyon kalıplama yöntemleriyle proses edilir. Bazı uygulamalarda cam parçacıklar ya da elyaflarla güçlendirilen naylon kompozitler, daha yüksek yapısal mukavemet, darbe dayanımı ve sertlik sunarlar. %25 oranında cam elyafla güçlendirilen naylon kompozitler yüksek ısı direnci sayesinde otomotiv endüstrisinde, emme manifoldu gibi motor yarı elemanları olarak kullanılır. Poliamit sınıfına giren diğer bir naylon türü ise *aramid* ticari polimeridir. Aramidlerin naylon6 gibi naylonlardan farkı, zincir omurgasında bulunan aromatik gruplardır. Balistik uygulamalarında kullanılan aramid elyaflar istisnai mukavemet gösteren polimerlerdir. Piyasada *Kevlar* ve *Nomex* adıyla bilinen aramid elyafları, yinelenen birimlerinde bulunan aromatik grupları sayesinde, mükemmel ısı ve yangın dayanımı gösterirler; ve bozunma sıcaklıklarının bile üzerinde olan çok yüksek erime noktaları (>500°C) vardır. Ayrıca amidler yüksek mukavemet ve young modülüne sahiptir. Poliamitlerin zincir omurgasının düzenli ve simetrik yapısı kolayca kristalleşmelerini sağlar. Naylon66 polimeri orta derecede kristallığe sahiptir. Amorf halde bulunan zincirler de olduğu için poliamitler yarı-kristal polimerlerdir. Normal üretimi sonucu %50'ye yakın kristal yapı elde edilirken, mekanik çekme ile yönlendirme uygulaması altında elde edilen elyaflarda ise (polimer zincirleri belirli bir düzene zorlandığı ve yönlendirildiği için) kristal yapı oranı artar [20], [23].

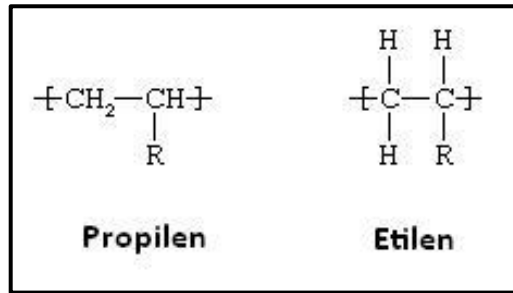
### 3.1.2.2 Polieterler

Polieterlerin içinde poliasetal (POM), polikarbonat (PC), polifenilenoksit (PPO) sayılabilir ancak en bilineni polietereterketondur (PEEK). Polikarbonatlar aleve dayanıklı, besin maddeleri ve ilaçlarla direkt temasları iyi olan, havaya ve ultraviyole ışınlara dayanıklı, darbe mukavemeti parça kalınlığına bağlı olan, kalınlık arttıkça azalan

ancak 6,5 mm kalınlıkta bile hala mukavemetini koruyan bir malzemedir. Endüstriyel anlamda plastiklerden beklenen tüm dayanım özelliklerin en üst noktada birleştiği bir malzemedir. PEEK yüksek sıcaklıklarda dahi (sürekli 250°C, kısa süreli 310°C) muhteşem mekanik özellikleri olan semi kristalin yapıda bir termoplastiktir. Özel uygulamalar için karbon, cam elyafı vb. takviyeli kompozitleri üretilebilmektedir. PEEK birçok ortamda (alkalinler, aromatik hidrokarbonlar, alkoller, gresler, yağlar ve halojenli hidrokarbonlar gibi) çok iyi kimyasal dayanım göstermektedir. Ancak, asitlere karşı dayanımı oldukça düşüktür [22], [23].

### 3.1.2.3 Poliolefinler

Olefinlerin polimerizasyonu sonucu oluşan bütün sentetik reçinelere poliolefin denir. Olefinler karbon atomu çifti içeren hidrokarbonlardır. Çoğunlukla doğal gaz veya düşük molekül ağırlıklı petrol bileşenlerinden oluşmaktadırlar ve en bilinenleri etilen ve propilendir. Etilen ve propilen tek molekülde bir çift karbon (C) bulundurdıklarından **düşük yoğunluklu olefinler (lower polyolefins)** olarak adlandırılmaktadırlar. Düşük yoğunluklu olefinler kimyasal olarak  $CH_2 = CHR$  olarak ifade edilmekte olup; “R” polietilende hidrojeni (H), polipropilen de ise metil ( $CH_3$ ) grubunu temsil etmektedir (Şekil 3.3). Aradaki çift bağ kimyasal katalizör etkisinde, ısı ve basınç altında açılmakta, başka moleküllerle bağ oluşumu sağlamaktadır [26], [27].



Şekil 3.3 Propilen ve etilen monomerlerinin kimyasal gösterimi [27]

Polipropilenin su buharı bariyer özelliği iyi (AYPE ve YYPE arasında) ancak gaz ve aromayı geçirmeme özelliği vasattır. 165°C gibi polietilene oranla daha yüksek olan ergime sıcaklığı nedeni ile yaklaşık 100°C'a kadar kullanılabilir. Kristalleşmenin ani soğutma ile engellenebilmesi durumunda, ışık geçirgenliği de polietileninkinden oldukça büyüktür. PP ucuz, düşük yoğunluklu, çok yönlü bir plastiktir ve pek çok

derecede ve kopolimer (etilen/propilen) olarak bulunabilmektedir. Tüm termoplastikler içinde en düşük yoğunluğa (0.9 g/cm<sup>3</sup>) sahip olanıdır ve iyi dayanım, rijitlik, kimyasal dayanım ve yorulma dayanımı sağlamaktadır. Ayrıca çeşitli takviyelerle pultruze edilerek PP makine parçaları, otomobil bileşenleri, ev aletleri, petro-kimya ve boru ürünlerinde kullanılmaktadır [27, 28].

Bir diğer poliolefin olan polietilen çok ucuz, kimyasal olarak kararlı, kaynak yapılması nispeten kolay, gerilmeye karşı mukavemetli ve dayanıklı olup; düşük sıcaklıklara hassas değildir. Geniş bir sıcaklık aralığında kullanılmasının yanı sıra su buharına karşı mükemmel bir bariyerdir. Buna karşılık, gaz, aroma ve yağ geçirgenliği açısından vasat özelliktedir. Yoğunluğun artmasıyla birlikte artan kristal derecesi, dayanıklılık, sertlik ve ergime sıcaklığına bağlı olarak artmaktadır. Buna karşın yoğunluğun artması; darbe dayanımını, ışık geçirgenliğini, düşük sıcaklıklara olan hassasiyeti ve gerilim çatlamları değerlerini olumsuz yönde etkilemektedir [29]. Polietilen düşük yoğunluklu (LDPE) ve yüksek yoğunluklu (HDPE) olara iki grupta incelenir. Çizelge 3.2’de ticari poliolefinlerden LDPE, HDPE ve PP’nin tipik özellikleri listelenmiştir.

Çizelge 3.2 Ticari poliolefinlerin tipik özellikleri [29]

| Özellikler                         | HDPE      | LDPE            | PP        |
|------------------------------------|-----------|-----------------|-----------|
| Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> ) | 0,94-0,96 | 0,91-0,92       | 0,90-0,91 |
| Kırılma indisi                     | 1,54      | 1,51            | 1,49      |
| Kopma dayanımı                     | 22-39     | 7-16            | 30-40     |
| Uzama (%)                          | 15-100    | 90-650          | 250-700   |
| Elastik Modülü (MPa)               | 560-1050  | 120-245         | 900-1400  |
| Çentikli darbe dayanımı (Nm/cm)    | 0,80-6,4  | >8,6            | 0,32-3,2  |
| Yanma hızı                         | Çok yavaş | Çok yavaş       | Yavaş     |
| Güneş ışığının etkisi              | Etkilenir | Yüzeyde çatlama | Etkilenir |
| Kuvvetli asit-baz etkisi           | Dayanıklı | Dayanıklı       | Dayanıklı |
| Saydamlık                          | Opak      | Opak            | Opak      |

### 3.1.3 Polipropilen (PP)

Yarı kristalin bir termoplastik olan PP, stereospesifik Ziegler-Natta katalizörlerini kullanarak propilen monomerinin polimerizasyonu ile homopolimer şeklinde üretilmektedir [23]. Katalizör sistem, polimerik zincirin her bir propilen birimindeki metil grubunun pozisyonunu kontrol etmesinden dolayı **stereospesifik** olarak tanımlanır. Tipik bir katalizör sistemi, titanyum triklorür ile tribütil alüminyum veya başka türlerinin birleştirilmesiyle hazırlanabilmektedir. Ticari olarak en sık tercih edilen PP ise izotaktik PP (i-PP), yani kristalize olabilen polipropilendir [30], [31].

Moleküler ağırlık, moleküler ağırlık dağılımı (zincirlerin ortalama uzunluğunun çeşitliliği) ve kopolimerleşen monomerin tipi ve miktarı, PP'nin fiziksel özelliklerini ve proses karakterlerini belirlemektedir. PP'nin kristallik derecesi de, fiber, film veya çeşitli geometrik şekillerde üretilen nihai ürünün, üretimi (ekstrüzyon, termoforming, kalıplama, vb.) esnasındaki davranışları üzerinde oldukça etkilidir [30]. Belirli bir uygulama için doğru derecede **(grade)** PP seçimi şunları içermektedir [32]:

- homopolimer ve kopolimer arasında seçim,
- bir reaktör veya reoloji derecesi **(grade'i)** seçim,
- gerekli eriyik akış hızı ve uygun katkı sistemi belirleme.

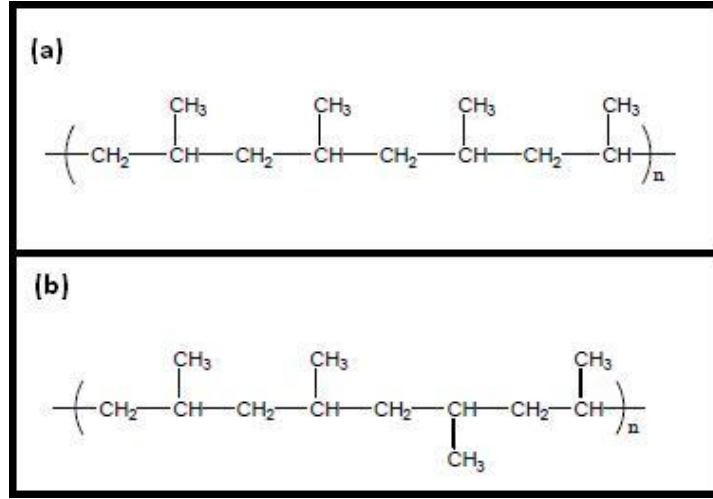
Ancak üretim teknolojisindeki değişimler, çalışma koşulları ve katalizör sistemleri, homopolimer ve kopolimer özellikleri arasındaki geleneksel farklılıklar kesin değildir. Bundan dolayı belirli bir uygulama için ideal bir derece tercihinde geniş düşünmek gerekmektedir [33].

Polipropilen oda sıcaklığındaki uygulamalarda kullanıldığında mükemmel fiziksel, mekanik ve termal özellikler sergilemektedir. Nispeten daha sert ve düşük yoğunluktadır, yüksek erime noktasına sahiptir ve darbelere karşı iyi direnç gösterir. PP'nin bu özellikleri zincirin yönlenmesi (tacticity), içeriği ve dağılımı, ortalama zincir uzunluğu ve/veya kimyasal formülasyonu değiştirilerek çeşitlendirilebilmektedir [30].



### 3.1.3.1 Homopolimer PP

Homopolimer PP (PPH), propilenin bir stereospesifik katalizör varlığında polimerize edilmesiyle elde edilmektedir. Homopolimerler, kopolimerlere göre daha rijittir ve yüksek sıcaklıklara karşı dirençleri daha iyidir. Fakat sıfırın altındaki sıcaklıklarda darbe dirençleri sınırlıdır. Homopolimer PP kristalin ve kristalin olmayan (noncrystalline) bölgeler içeren iki-fazlı bir sistemdir, yani yarı-kristalindir (semi-crystalline). Kristalin olmayan, yani amorf bölgeler, izotaktik PP (i-PP) ve ataktik PP'den (a-PP) oluşmaktadır. Amorf bölgedeki i-PP kristalize olabilmekte, kristalleşme zincir dolaşmasının ve bükülmesinin izin verdiği ölçüde yavaş bir şekilde gerçekleşmektedir [30]. Şekil 3.4'te i-PP ve a-PP'nin kimyasal formülü şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.4 a) İzotaktik polipropilen (i-PP), b) ataktik polipropilen (a-PP) [31]

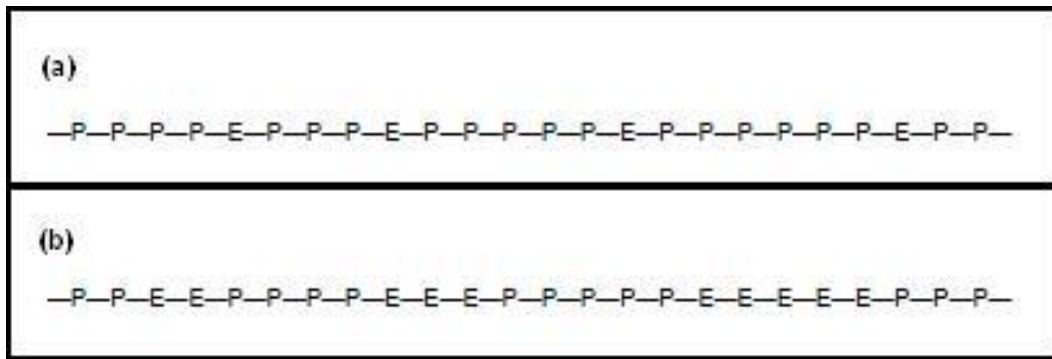
Homopolimer PP'lerin tipik uygulamaları; araç ön camı, yıkama tankları, vantilatör mahfazaları ve direksiyon kolonları, saç kurutma makineleri, sterilizatörler, ütüler, kahve makineleri, tost makineleri, vb. gibi ev aletleri olup; homopolimer PP fiberleri ve filamentleri ekstrüze edilerek halıcılık, mefruşat, giyim, geotekstil, çocuk bezi, medikal sargı ve otomobil iç döşemelerinde kullanılmaktadır [33].

### 3.1.3.2 Kopolimer PP

PPH çeşitli özellikler kazandırmak için kopolimerize edilmektedir. PP'nin özellikleri komonomerin türü ve miktarına bağlıdır. PP'nin kopolimerizasyonunda genellikle etilen kullanılmakta olup, etilen ile kopolimerize edilmiş PP daha tok ve daha esnek bir hale

gelmektedir. Bu durum PP'nin mühendislik plastiği olarak kullanımını sağlamakta ve PP'yi ABS ile yarışır hale getirmektedir [33].

İki temel tür kopolimer söz konusudur: Random kopolimer ve blok (heterofazik) kopolimer. Random ve blok kopolimer arasındaki temel farklılık blok kopolimerin yayılmış bir kauçuk faz şeklinde komonomer içermesidir. Random ve blok kopolimerize edilmiş PP yapıları Şekil 3.5'te şematik olarak gösterilmekte olup, P ve E sırasıyla propilen ve etilen monomerlerini temsil etmektedir [34].



Şekil 3.5 a) Random kopolimer PP (PPR), b) blok kopolimer PP [33]

Kopolimerize edilmiş PP, homopolimere göre film ve fiber ürünlere daha yumuşak bir his vermektedir. Ancak PP kopolimerler homopolimerlerden daha pahalıdır. Kopolimerize edilmiş PP'nin tipik uygulamaları; akü kutuları, tampon dayanakları, araç iç aksamaları, torpido gözü, arka konsol, pencere pervazları, video kaset kutuları, büro koltukları, tek kullanımlık konteynerler, kutular ve ev aletleridir.

**Random Kopolimer:** PP'nin random kopolimer zincirleri, propilen birimleri arasına gelişigüzel dağılmış az sayıda (~%1.5-6) etilen veya yüksek olefin birimleri (bütilen, heksan, vb.) içermektedir. Polimer zincirinde etilen varlığı kristalleşme eğilimini azaltmakta ve bunun sonucu olarak darbe dayanımı geliştirmekte, yumuşak bir his vermekte, geniş aralıkta ısı tutabilme kapasitesine sahip olmakta, buruşmaya dirençli olmakta ve yüksek berraklık kazandırmaktadır. Homopolimerin doğal rijitliği kopolimerizasyon ile yok olmaktadır. Düşük kristallilikten dolayı random kopolimerler daha düşük ergime derecesine ve özgül ağırlığa sahiptir. Bu kombinasyon enjeksiyon kalıplaması ile üretilen ev eşyaları, ısıl şekillendirme (thermoforming), germe-üfleme kalıplamaları ve filmler için kopolimerleri cazip kılmaktadır [23]. Random kopolimer

grade yiyecek paketlenme ve kirtasiye uygulamalarında PVC, PS ve PET'in yerine kullanılabilmektedir.

**Blok Kopolimer PP:** PP homopolimeri etilen ile kopolimerize edilmektedir. Blok kopolimerlerde, etilen içeriği random kopolimerlere göre daha yüksektir. Kopolimerize edilmiş malzeme lastiğimsidir ve PP matris içinde ayrı dağılmış bir faz oluşturmaktadır. Artan etilen oranı PP'nin kristalleşmesini azalttığı için blok kopolimer PP homopolimer PP'den daha toktur ve düşük sıcaklıklarda daha yüksek darbe dayanımına sahiptir. Fakat etilen, transparanlığını ve camsı geçiş sıcaklığını ( $T_g$ ) azaltmaktadır. Blok kopolimerize edilmiş PP'nin başlıca uygulama alanları darbe özelliklerinin çok kritik olmadığı durumlarda elastomer ile modifiye edilmiş PP'ye benzemektedir [34], [35].

### 3.1.3.3 Elastomerle Modifiye Edilmiş PP

Düşük sıcaklıklarda olağanüstü derece yüksek tokluk PP'nin elastomerlerle modifiye edilmesiyle sağlanabilmektedir. Bunun için PPH ile PPR ağırlıkça %6-15 arasında etilen içerecek şekilde polimerize edilir. Burada yapıya yüksek tokluk kazandıran en önemli faktör etilen miktarı olmakla birlikte, molekülün büyüklüğü, şekli ve PPR'nin yapıdaki dağılımı da etkilidir [36].

## 3.2 Fiberler

Kompozit bileşenleri (fiber ve matris) sahip oldukları elastiklik modülüne (E) ve sünekliklerine göre kolaylıkla sınıflandırılabilir. Kompozitlerde fiberler; sürekli fiberler (bükümlü veya bükümsüz ip, kumaş) ve süreksiz fiberler (keçe veya kırılmış fiber) şeklinde olabilir. Ayrıca fiberler çeşitli derecelerde veya rastgele yönlenmiş durumda dizilmiş olabilirler [26].

Kompozitin mekanik performansına etki eden 4 tane fiber faktörü vardır [1]:

- **Uzunluk:** Fiberler uzun ya da kısa olabilmektedir. Uzun, sürekli fiberleri yönlendirmek ve proses etmek kolaydır, fakat kısa fiberlerde tam bir yönlendirme bütünüyle kontrol edilemez. Uzun fiberlerin kısa fiberlere göre pek çok yararı vardır. Bunlar arasında darbe dayancı, düşük çekme (büzülme), gelişmiş son yüzey ve boyutsal kararlılık vardır. Fakat kısa fiberler düşük maliyet sağlar, çalışılması kolaydır ve hızlı üretim periyotlarına sahiptir. Kısa fiberler daha az kusur içerir ve bu yüzden dayanımları daha yüksektir.
- **Yönlenme:** Fiberler tek yönde yönlendiklerinde o yönde çok yüksek rijitlik ve dayanıma sahip olurlar. Keçe gibi birden fazla yönde yönlenirlerse yüksek rijitlik ve dayanım oluşmaktadır. Fakat aynı fiber hacim oranındaki tek yönlü kompozitlerin rijitlik ve dayanımları ile karşılaştırılmaz. Tek yönlü kompozit keçe tarzı süreksiz fiberli bir kompozite göre çok daha yüksek dayanım değerlerine sahiptir.
- **Şekil:** Fiberlerin en genel şekli yuvarlaktır, çünkü bunları tutması ve üretimi kolaydır. Altıgen ve kare kesitli fiberler mümkündür, fakat dayanımdaki avantajları ve yüksek paketlenme faktörleri, tutma ve üretimdeki zorlukları karşılamamaktadır.
- **Malzeme:** Fiberlerin malzemesi doğrudan kompozitin mekanik performansını etkilemektedir. Fiberlerin genellikle yüksek elastik modüle ve dayanıma sahip olması beklenmektedir. Bu beklenti ve maliyet kompozitler için fiber pazarına hakim olan grafit, aramid ve camın seçiminde kilit faktörlerdir.

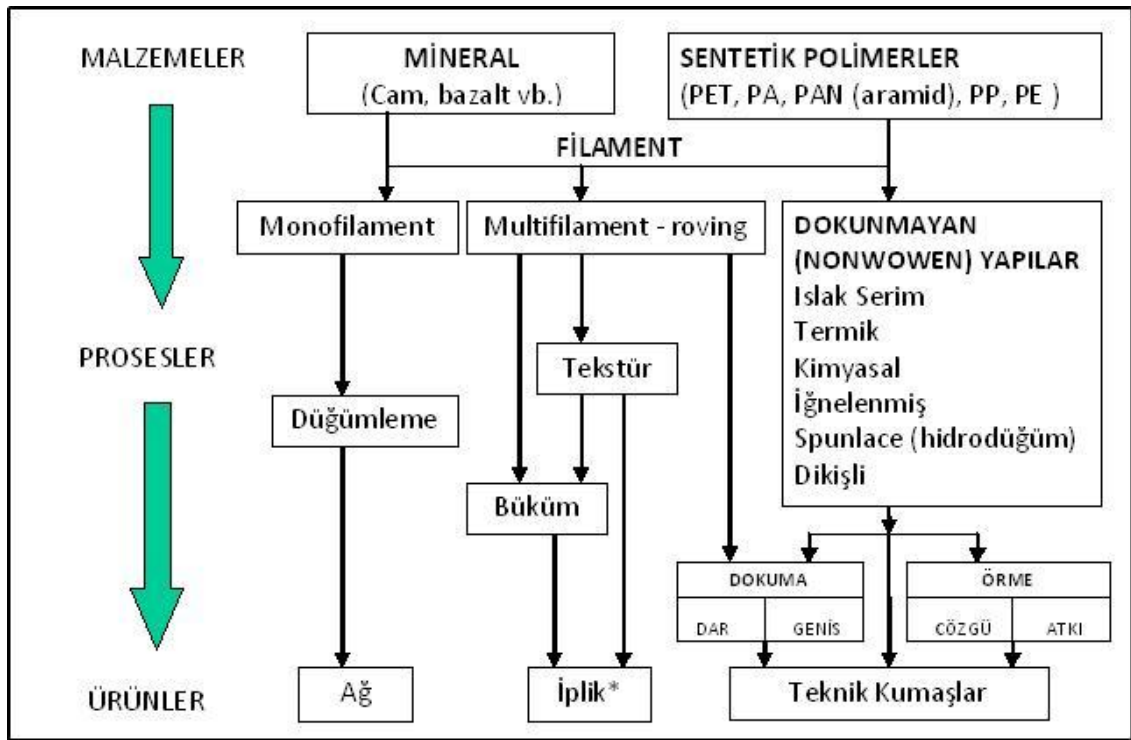
Günümüzde en sık kullanılan fiberler cam, karbon/grafit, kevlar (aramit), bor ve çeşitli organik fiberlerdir. Ayrıca bu fiberlerden iki veya fazla çeşidinin birlikte kullanılmasıyla hibrit kompozitler üretilmektedir [1], [15].

### 3.2.1 Sürekli Fiberler

Sürekli fiberler kompozit malzemeye en yüksek dayanım değerlerini veren fiber türüdür. Genellikle tek yönde yüklemeye maruz kalan yapılarda, o yöndeki darbe dayanımını arttırmak amacıyla sürekli fiberlerden yararlanılır. Bu nedenle yüksek iç

basınca maruz borularda kullanılması gereken fiber türünün bu yapıda olması zorunludur. Sürekli fiberler uzun ya da kısa olabilmekle beraber; kısa fiberli kompozitlerde birbirine paralel ve eşyönlü fiber dağılımı sağlamak oldukça zordur. Sürekli uzun fiberlerin paralel yerleşmesiyle fiber yönünde yüksek mukavemet sağlanır [36], [37].

Şekil 3.6’da sürekli fiber malzemelerine uygulanan işlemler ve bunların sonucunda elde edilen sürekli yapıdaki ürünler görülmektedir. Sürekli fiber malzemeleri mineral veya sentetik polimerler şeklinde iki grup oluşturacak şekilde sınıflandırılabilir. Bu malzemelerin filament oluşturma kadarki üretim süreçleri farklı olmasına rağmen filament oluşturdan sonraki üretim akışları aynıdır.



Şekil 3.6 Sürekli fiberlerin üretim akış şeması [28]

Oluşturulan filamentler ya tek filamentler şeklinde döğümleme yapılarak, ağ yapısı kazandırılmakta; ya da pek çok filament bir araya getirilip çeşitli işlemlerden geçirilerek ürün eldesi sağlanmaktadır.

Eğer bir araya getirilen filamentler birbirlerine paralel, bükümsüz şekilde tutulursa bu yapıya “roving” adı verilmektedir. Rovingler bükülerek iplikleri oluşturmaktadırlar. Yine rovinglere hava üflenerek filamentlerin kabartılması ile elde edilen tekstür formundaki

yapı da iplik oluşturmaktadır. Oluşturulan iplikler, kompozitlerde fiber olarak kullanıldığı gibi, dokuma ve örme üretiminde de kullanılmaktadır [38].

Ayrıca rovinglerden dokuma da yapılabilir. Bu durumda ortaya teknik kumaşlar çıkmaktadır. Bunların dışında teknik kumaş elde etmek için dokunmamış yapılara ıslak serim, termik, kimyasal işlemler yapılarak, ıgnelenerek, dikilerek veya su jetiyle ile düğümlenerek (spunlace) de yapılabilir. Bu yapılar dokuma ve örmeye de uygundur. Bu sebepten bunlara dokuma veya örme uygulanarak da teknik kumaşlar üretilmektedir [38].

### **3.2.2 Cam Fiberler**

Cam fiberler, silika, kolemanit, alüminyum oksit, soda, magnezyum oksit gibi inorganik minerallerden üretilmektedir ve polimer matrisli kompozitlerde en çok kullanılan fiber türüdür. Bunun nedeni görece daha düşük maliyetli olup, çok iyi mekanik özellikler sergilemeleridir. Cam fiberle takviyelendirilmiş polyester reçineler, düşük maliyetinden dolayı ticari pazara hakim iken; yüksek mekanik özelliklerin istendiği askeri uygulamalarda cam fiber takviyeli epoksiler kullanılmaktadır [39]. Cam fiberlerin avantajları: Yüksek dayanımları, düşük maliyetleri, yüksek kimyasal dirençleri ve iyi yalıtım özellikleridir. Dezavantajları ise düşük elastik modül, polimerlere zayıf yapışma, yüksek yoğunluk, aşınmaya hassaslık ve düşük yorulma dayanımıdır [1].

Cam fiberler sahip oldukları çeşitli özelliklere göre farklı isimler almaktadırlar. Bunların başlıcaları E-camı, S-camı ve C-camıdır. E-camı (elektrik dirençli) çok az alkali içeren borosilikat camıdır ve çok üstün mekanik özellikleri vardır. Günümüzde en çok kullanılan cam türüdür. S-camı, E-camından çok daha pahalıdır, ancak yüksek elastiklik modülüne sahiptir ve yüksek sıcaklıklara dirençlidir. Uçak sanayi, roket motoru yapımı gibi yüksek modülün istendiği özel uygulamalarda kullanılmaktadır. C-camının kimyasal korozyon dayancısı E-camından daha yüksektir, fakat daha pahalıdır ve daha düşük dayanım değerlerine sahiptir. Depolama tankaları gibi kimyasal ortamların bulunduğu yerlerde kullanılmaktadır [11], [31]. Çizelge 3.3'te en çok kullanılan cam fiberlerin kimyasal kompozisyonları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Ticari olarak kullanılan diğer cam türleri R-camı, A-camı, D-camıdır. R-camı, inşaat sektörü gibi yapısal uygulamalarda, D-camı (dielektrik) radar tertibatları gibi düşük dielektrik sabitleri gerektiren uygulamalar için ve A-camı (alkali) yüzey görünümünü arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca hem elektrik hem de korozyon direncine sahip ECR-camı ve alkali dirençli AR-camı gibi kombine camlar da ticari olarak mevcuttur [1].

Çizelge 3.3 En çok kullanılan cam fiberlerin kimyasal kompozisyonları [11]

|                                                                 | E-cam (%) | C-cam (%) | S-cam (%) |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>SiO<sub>2</sub></b>                                          | 52,4      | 64,4      | 64,4      |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 14,4      | 4,1       | 25,0      |
| <b>CaO</b>                                                      | 17,2      | 13,4      | -         |
| <b>MgO</b>                                                      | 4,6       | 3,3       | 10,3      |
| <b>Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O</b>                          | 0,8       | 9,6       | 0,3       |
| <b>Ba<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>                              | 10,6      | 4,7       | -         |
| <b>BaO</b>                                                      | -         | 0,9       | -         |

Tüm cam fiberler üretildikten hemen sonra aprelenmek zorundadır. Apre, takviye ürünleri için kullanılmaktadır ve camı aşınmadan korumaktadır. Kalıplama sırasında prosese yardımcıdır, bu yüzden reçineyle uyumlu olmak zorundadır. Apre, organik silikon bileşiği gibi reçine matris ile takviye cam arasında yapışmayı sağlayan anahtar bir eleman, polivinil asetat benzeri bir film oluşturucu, bir asit amit lubrikant ve anti-statik özellikler veren diğer malzemeleri içermektedir. Cam fiberler yalnızca bu apreleme işleminden geçtikten sonra çeşitli şekillerde proses edilerek plastik matrise uygun takviye malzemesi olarak kullanılabilir [41].

### **3.2.2.1 E-camı Fiberler**

Sürekli filamentler halinde üretilen camlar büyük oranda E-camdır. Bu bir soda-alumina-borosilikat camıdır. Hem yüksek elektrik direncine hem de yüksek yüzey direncine sahiptir. Ayrıca iyi fiber oluşturma özellikleri vardır. E-camın tek belirli bir kompozisyonu yoktur. Kompozisyon her üretici tarafından hammadde teminlerinde ve üretim proseslerinde ekonomiklik açısından uygun şekilde değiştirilmektedir. Kompozisyonda belirli sınırlarda yapılan küçük değişiklikler E-camının elektrik yalıtkanlığı ya da yüksek dayanım gibi önemli özelliklerini etkilememektedir [40].

Özellikleri açısından son derece iyi davranışlar sergileyen E-camının önemli bazı mekanik değerleri şu şekildedir: Çekme dayanımları ort. 2000 MPa ve elastiklik modülleri 80 GPa civarındadır, yoğunluğu  $2,54 \text{ g/cm}^3$  tür. Avantajları; düşük maliyet, yüksek dayanım, yüksek rijitlik, kısmen düşük yoğunluk, ısıya karşı dayanım, iyi kimyasal dayanım, kısmen neme duyarlı olmama, iyi elektrik yalıtımı sağlamasıdır. Dezavantajları; düşük modülü, uygun işlem görmezse kendi kendini aşındırma ve bunun sonucu dayanımının azalması, kısmen düşük yorulma dayancı, karbon ve organik fiberlerle karşılaştırıldığında yüksek yoğunluğa sahip olmasıdır. [11], [28]

Polimer matrisli kompozitlerde E-camın takviye olarak kullanımı çok yaygındır. En iyi dayanım özelliklerini; düz, sürekli fiberler tek bir doğrultuda paralel dizilince kazanmaktadırlar. Diğer yönlerde dayanımı arttırmak için sürekli fiberler diğer yönlerde sıralanarak laminat yapıları kurulabilmektedir. Bunlar depolama tankları ve benzer yapılarda kullanılmaktadır [39], [40].

E-camı sürekli fiber olarak kullanımının dışında farklı takviye şekillerinde de uygulaması bulunmaktadır. Rastgele yönlü E-camı keçe ve dokunmuş E-camı kumaşlar da kompozit panel üretiminde sıkça kullanılmaktadır [39].

### **3.2.2.2 S-Camı Fiberler**

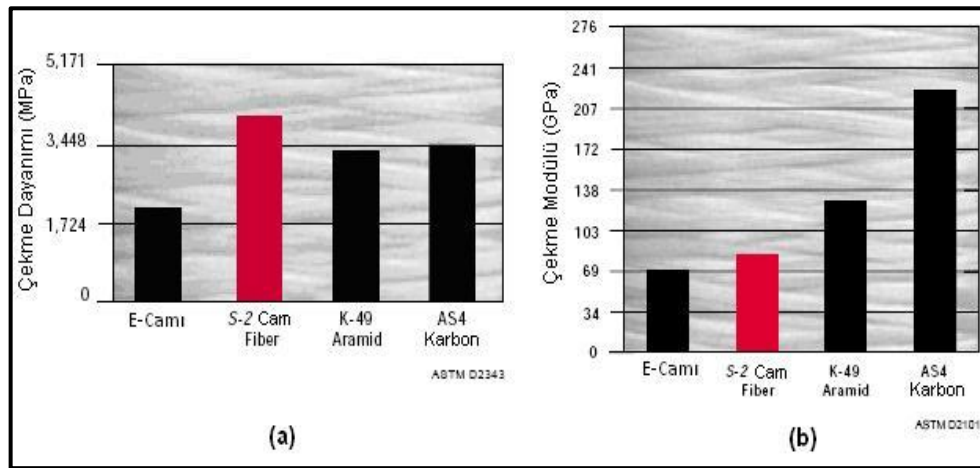
S-camı, yüksek dayanım ve elastik modülüne sahip, ticari olarak fiber çekilebilen bir camdır. Yüksek sıcaklıklarda dayanımını kaybetmeme özelliği vardır. %65  $\text{SiO}_2$ , %25



$\text{Al}_2\text{O}_3$  ve %10 MgO kompozisyonuna sahiptir. Yüksek silika ve cama dayanım veren alümina gibi diğer katkıları sayesinde en yüksek dayanıma sahip cam türüdür.

Yoğunluğu 2.48 ila 2.49 g/cm<sup>3</sup> arasındadır ve E-camınınkinden %2 daha düşüktür. Çekildiği şekliyle S-camının elastik modülü 85.5 GPa'dır ve E-camından modülce %18 ve modülün yoğunluğa oranı bakımından %20 gelişme sağlamaktadır. Yeni çekilmiş S-camının çekme dayanımı ortalama 4.8 MPa'dır ve E-camın değerine göre %40 daha fazladır [39], [40].

Şekil 3.7a'da görüldüğü üzere S-camı; E-camı, aramid ve karbon fiberlere göre daha yüksek dayanım değerleri vermiştir. Ancak aramid ve karbon fiberlerin yoğunlukları daha az olduğundan S-camının modülü Şekil 3.7b'de görüldüğü gibi düşük kalmaktadır.



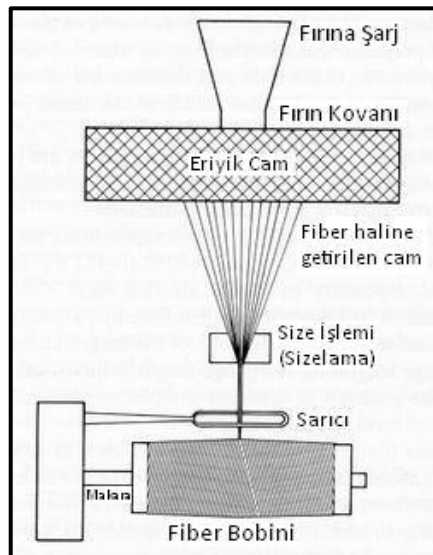
Şekil 3.7 a) Reçine emdirilmiş fiberlerin çekme dayanımı, b) fiberlerin çekme modülü (elastiklik modülü) [42]

### 3.2.2.3 Cam Fiber Üretimi

Cam fiberler silika, kolemanit, alüminyum oksit, soda gibi cam üretim maddelerinden üretilmektedir. Cam elyafı, elyaf takviyeli kompozitler arasında en bilineni ve sık kullanılanıdır. Cam fiberler, özel olarak tasarlanmış ve dibinde küçük deliklerin bulunduğu özel bir ocaktan eritilmiş camın itilmesiyle üretilir. Bu ince lifler soğutulduktan sonra makaralara sarılarak kompozit hammaddesi olarak nakliye edilir. Özellikle cam fiber ile matris arası yapışma gücünü arttıran ve fiber üzerinde ince film oluşturan silan bazlı kimyasalların kullanımı (apreleme) sonrasında sahaları artmıştır. Bağlayıcı görevi gören silanlar elyaf ile matris arasındaki ara yüzey bağlantısını sağlar.

Cam elyaf kumaşları genellikle sürekli cam fiberler ile üretilmektedir çünkü cam fiberin eldesi daha ekonomiktir. Ayrıca cam, ince çapa çekilince amorf yapıdan kristal yapıya döner ve buna bağlı olarak dayanım değerleri ile esnekliği artar; bunlar da cam fiberin tercih edilme sebeplerini oluşturur [5], [15], [40].

Üretim esnasında; hammadde bileşimi, çok ince öğütülerek, homojen bir karışım elde etmek üzere karıştırılır ve yaklaşık 1600°C sıcaklıkta çalışan bir ergitme fırınına beslenir. Fırın içinde, karışım yavaşça sıvı hale geçer. Sıvı hale geçen karışım çok ince delikleri olan kovandan geçerek fiber halini alır (Şekil 3.8). Çoklu fiberler bir toplayıcı yardımıyla bir araya getirilerek fiber demeti oluşturulur ve eş zamanlı olarak apreleme, size işlemi, gerçekleştirilir. Aprelenen fiberler soğutulduktan sonra bobinlere sarılır [24], [30].



Şekil 3.8 Cam fiber üretiminin şematik gösterimi [35]

İşlemler sırasında değişik kimyasalların eklenmesi ve bazı özel üretim yöntemleri ile farklı türde cam fiberler üretilebilmektedir. Fiberler işlem sırasında dayanıklılıklarının %50'sini kaybetmelerine rağmen son derece sağlamdırlar [43].

### 3.2.3 Karbon/Grafit Fiberler

Karbon fiberler organik fiber çıkış maddelerinin termal olarak karbonlanmasıyla elde edilmiş karbon yüzdesi kütlece en az % 90 olan fiber türüdür [11]. Çekme dayanımları 3500-3900 MPa arasındadır. Pahalıdır. Estetik değere sahip tüketim ürünlerinde kullanılır.

Karbon fiberler üç farklı yöntem kullanılarak üretilmekte ve fiber üretim yöntemine göre adlandırılmaktadır. Her bir yöntemin fiyat ve özellik üzerinde farklı avantajları ve dezavantajları vardır. PAN karbon fiberlerin maliyetleri daha düşüktür ve iyi özelliklere sahiptir. Yapısal karbon fiberler grubuna dahil olup; askeri havacılıkta, füzelerde ve uzay araçlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Pitch karbon fiberleri, daha yüksek rijitlik ve ısı iletkenliğe sahiptirler ve nedenle uydu yapıları ve uzay radyatörleri ve elektronik muhafazaları gibi ısı-yönetim uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Rayon karbon fiberleri yapısal uygulamalarda kullanılmamaktadır, fakat düşük ısı iletkenlikleri onları roket nozulları, roket uçlarında ve ısı kalkanları gibi yalıtım ve yön verici uygulamalarda kullanışlı yapmaktadır. Çizelge 3.4'te karbon fiber sınıfının tipik özellik aralıkları verilmiştir [36], [15].

Çizelge 3.4 Karbon fiberlerin özellikleri[36]

| Özellik, birim                | Yöntem         |               |           |
|-------------------------------|----------------|---------------|-----------|
|                               | PAN            | Pitch         | Rayon     |
| Çekme dayanımı, MPa           | 1925-6200      | 2275-4060     | 2070-2760 |
| Çekme modülü, GPa             | 230-595        | 170-980       | 415-550   |
| Yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>   | 1.77-1.96      | 2.0-2.2       | 1.7       |
| Uzama, %                      | 0.4-1.2        | 0.25-0.7      | -         |
| Isl genişleme katsayısı       |                |               |           |
| Eksenel, 10 <sup>-6</sup> /°C | -0.75 ila -0.4 | -1.6 ila -0.9 | -         |
| Enine, 10 <sup>-6</sup> /°C   | 7-10           | 7.8           | -         |
| Isıl iletkenlik, W/mK         | 20-80          | 400-1100      | -         |
| Fiber çapı, µm                | 5-8            | 10-11         | 6.5       |

Karbon fiberler, üretim prosesiyle (örneğin; ısıtım işlem sıcaklığı) yapıları kontrol edilerek özelliklerinin kolaylıkla değıştirilebilir olmasından dolayı çok çeşitli özelliklerde bulunabilmektedir. Fiber özellikleri harmandan harmana ve ayrıca üreticinin fiber teknolojisini geliştirmesine bağılı olarak değışmektedir. Özel fiberler ve bunların gerçık özellikleri için üreticinin en son verilerine danışılmalıdır [10].

Cam fiberler gibi çoğı karbon fiberler de kırılımandır. Proses edilebilmeyi arttırmak için filamentlerin birbirlerine yapışmasını sağlamak için apreler kullanılmaktadır. Ayrıca karbon fiberler iletken olduklarından elektrikli ve elektronik proses ekipmanlarının korunması gerekmektedir [28].

Karbon fiberlere çok benzeyen bir başka yapı ise grafit fiberlerdir. Karbon fiberler %93 ile %95 arasında karbon ihtiva ederken, grafit fiberler %99'dan daha yüksek karbon içeriğıne sahiptir. Ayrıca grafit fiberler çok daha yüksek sıcaklıklarda üretildiğınden karbon fiberden daha pahalıdır [1].

Grafit fiberler genellikle uçak parçaları gibi yüksek modül ve yüksek dayanım uygulamalarında kullanılmaktadır. Avantajları yüksek özgül dayanım ve modül, düşük ısıtım genleşme ve yüksek yorulma dayanımıdır. Dezavantajları ise yüksek maliyet, düşük darbe dayanıcı ve yüksek elektrik iletkenliğı olarak sıralanmaktadır [1].

#### **3.2.4 Aramid Fiberler**

Amid ve imidler üzerinden bağlanmış aromatik gruplardan oluşan doğrusal makromoleküllerden meydana gelmiş, iki aromatik halkaya direk olarak bağlanmış amid ve imid grupları en az %85 olan ve varsa imid bağlarının sayısı amid bağlarının sayısını geçmeyen lifler, aramid fiberlerdir [11].

Bir aramid fiber karbon, hidrojen, oksijen ve azottan yapılmış aromatik organik bir bileşiktir. Avantajları düşük yoğunluk, yüksek çekme dayanımı ve yüksek darbe direncidir. Dezavantajları ise düşük basma özellikleri ve güneş ışığında bozulmalarıdır. Ticari olarak mevcut tüm fiberlerin içinde en yüksek çekme modülüne sahip olan sürekli fiber türüdür. Bununla birlikte en yüksek fiyatlı fiberdir [20].

Nomex ve Kevlar, DuPont firmasının iyi bilinen ticari aramid fiberlerdir. Yüksek dayanım ve gerilime, çoğu kimyasallara ve yüksek sıcaklığa dirençlidir. Aramid fiberler cam gibi diğer yüksek performanslı fiberlerden daha esnektir, bu sebepten ileriki işlem kademesi olan dokunarak, örülerek veya dikilerek kumaş yapma prosesine daha uygundur. Fakat diğer tekstil ürünlerinden çok daha dayanıklı ve uzayabilir olduğundan kumaş yapımı zordur [36].

Kevlar fiberler eşsiz özellikler sunmaktadır. Çekme dayanımı ve modülü çok yüksektir ve fiber uzaması diğer organik fiberler içinde en az olanıdır. Kevlar fiberlerin basma karakteristikleri zayıftır: basma dayanımları, çekme dayanımlarının sekizde biri kadardır. Bu onların anizotropik yapısından kaynaklanmaktadır. Bu sayede basmada kolay bölgesel eğilme, burulma, kıvrılma yapmasına izin vermektedir. Cam ya da grafit fiberler kadar kırılğan değildir ve geleneksel kumaş dokuma tezgahlarında dokunabilmektedirler. Kevlar fiberlerin tipik özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir[10].

Çizelge 3.5 Kevlar fiberlerin tipik özellikleri [10]

| Özellik, birim                         | Kevlar 29 | Kevlar 49 | Kevlar 129 | Kevlar 149 |
|----------------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|
| Çap, $\mu\text{m}$                     | 12        | 12        | -          | -          |
| Yoğunluk, $\text{g/cm}^3$              | 1.44      | 1.44      | 1.44       | 1.44       |
| Çekme dayanımı, MPa                    | 2760      | 3620      | 3380       | 3440       |
| Çekme modülü, GPa                      | 62        | 124       | 96         | 186        |
| Uzama, %                               | 3.4       | 2.8       | 3.3        | 2.5        |
| Isıl genleşme katsayısı                |           |           |            |            |
| (0-100°C), $\text{m/m/}^\circ\text{C}$ |           |           |            |            |
| Eksenel, $10^{-6}/^\circ\text{C}$      | -2        | -2        | -2         | -2         |
| Radyal, $10^{-6}/^\circ\text{C}$       | 60        | 60        | -          | -          |

### 3.3 Ara Yüzey

Bir kompozitin özellikleri bileşen parçalarına olduğu kadar, takviye ve matrisi birbirine bağlayan arayüze de bağlıdır. Kompozitin dayanımı, tokluğu, yorulma direnci ve ortalama ömrü özellikle arayüzeylerin kararlılığına ve dayanımına duyarlıdır. Örneğin, fiber ve matris arasında yapışmanın var olmaması her zaman düşük dayanıma sebep olmaktadır. Ayrıca, fazlar arasında kimyasal bağ kuvvetli olmazsa su gibi çevresel etkenler arayüze girerek içsel yapışmaya zarar verebilmekte ve dayanım özelliklerinin düşmesine sebep olmaktadır [44].

Fiber takviyeli kompozitlerin anizotropik doğası geleneksel izotropik malzemelerde her zaman bulunmayan özelliklere sahip olmasını sağlamaktadır. Fiberler rastgele yönlenseler bile tek fiberler etrafındaki bölgelerde bölgesel anizotropi gözlenirken, genel olarak malzeme makroskobik ölçekte izotropiktir. Dayanım ve rijitlik fiber eksenine paralel yönde yüksektir, fakat eksene dik yönde düşüktür. Özelliklerin açığa olan bağlılıkları büyük oranda iki faz arasındaki yapışmaya bağlıdır. Genellikle yüksek performans ve uzun süreli kararlılık sağlamak için fiber ve plastik bileşenleri arasında yüksek dayanıma sahip, kimyasal olarak kararlı arayüzeyler oluşturmak önemlidir. Bu nedenlerden ötürü bir kompozit malzemede fiberlerin matrise iyi bir şekilde yapışması çok büyük önem arz etmektedir [45].

#### 3.3.1 Yapışma Teorisi

İnorganik ve organik katıların arayüzeyde polimerlerle yapışması plastik matrisli kompozitlerin özelliklerini belirleyen ana faktörlerden birisidir. Yapışmanın prensipleri kimyasal, fiziksel ve mekanik yönü olan karmaşık bir konudur. Bu konuda üretilmiş pek çok teori bulunmaktadır. Ancak hiçbirisi gerçek yapışma dayanımının hesaplanmasını mümkün kılmamaktadır, yalnızca nitel tahminler yapılmasına müsaade etmektedirler. Aynı zamanda “bir nesneyi bir nesneye yapıştıran madde” olarak tanımlanmaktadırlar. Fakat bu tanım gerçek yapışma olayını anlaşılması için çok dar bir tanımdır. Hâlbuki yapışma arayüzey ve yüzey olaylarıyla bağlantılı çok karmaşık bir olgudur [45].

Yapışma iki gövdenin değişmeyen veya sabit bir bağlantısıdır. Termodinamik olarak adhezyon işi tarafından karakterize edilmektedir. Arayüzeydeki moleküler kuvvetlerin

hareketi altlık ve yapıştırıcı arasındaki yapışma kuvvetleri için temel sebepleri oluşturmaktadır. Yapışmanın termodinamik tanımları için ilk terimler, temas halinde olan iki gövde arası arayüzeydeki yüzey gerilmesi ve arayüzey gerilmesi olan iki yüzey karakteristikleridir. En basit durum olan  $\gamma_{11}$  ve  $\gamma_{12}$  yüzey gerilimine sahip iki sıvıda, arayüzeydeki yüzey gerilimi, buhar ile ıslatılmış arayüzeydeki en yüksek yüzey gerilimden her zaman düşüktür [45].

$$\gamma_{112} = \gamma_{11} - \gamma_{12} \quad (3.1)$$

Ampirik bir eşitlik olan, Eşitlik 3.1 **Antonov Kuralı** olarak bilinmektedir. İki yüzeyin birbirinden ayrılması (arayüzeye dik yönde birbirlerinden kopmaları) birim yüzey alanı başına işi ( $W_a$ ) gerektirmektedir [44]:

$$W_a = \gamma_{11} + \gamma_{12} - \gamma_{112} \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2, bir bileşenin katı olduğu her durumda kullanılabilir. Buna göre kohezyon işi, bir gövdeyi yok etme işi veya bu gövdedeki bir birim yüzey alanı oluşturmak için gereken iştir. Eğer buradaki tek izotermal proses, gövdenin  $2 \text{ cm}^3$  yeni yüzey alanı oluşumuysa;  $\gamma$  yüzey gerilimine sahip termodinamik kohezyon işi şu şekilde ifade edilebilmektedir [45]:

$$W_c = 2\gamma \quad (3.3)$$

Islatmada bir damla sıvı, katı üzerinde belirli bir temas açısı oluşturmaktadır. Yüzey üzerinde damlanın mekanik durumu şu şekilde belirlenmektedir [45]:

$$\gamma_s = \gamma_{sl} + \gamma_l \cos \Theta \quad (3.4)$$

Burada indeksler arayüzeyde katının (s) yüzey geriliminin, sıvı (l) ve arayüzeyin (sl) arayüzey gerilmesinden oluştuğunu belirtmektedir. Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.4'in birleşmesi sıvı ve katı arasındaki termodinamik adhezyon işini vermektedir [45]:

$$W_a = \gamma_l (1 + \cos \Theta) \quad (3.5)$$

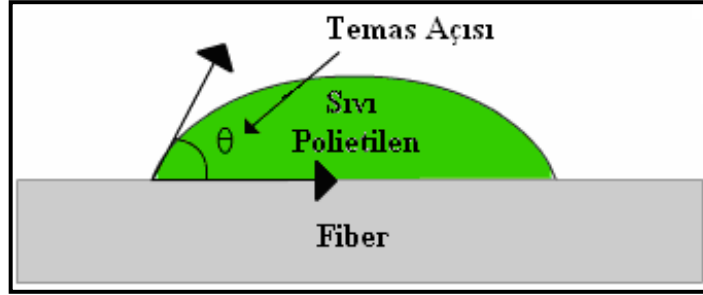
Bu eşitlik (3.5) Dupre-Young eşitliği olarak geçmektedir.  $\Theta = 0$  olduğunda damlanın davranışı şu durum tarafından belirlenmektedir [45]:

$$W_a = 2\gamma_l \quad (3.6)$$

Eğer  $\gamma_s > \gamma_{ls} + \gamma_l$  ise  $W_a$ ,  $2\gamma_{sl}'$  den büyüktür ve bu durumda damla yüzeye yayılmaktadır. Yayılma koşulları  $W_a > 2\gamma_l$  olduğunda gerçekleşmektedir [45].

Yüzey gerilimi ve yüzey enerjisi bir sıvının bir yüzey üzerindeki davranışını belirleyen kuvvetlerdir. Bu kuvvetler sayesinde malzemeye yüzeyi sıvı tarafından ıslatılmakta ya da ıslatılamamaktadır. Yüzeyde ıslanmanın olup olmayacağını belirleyen, kohezyon ve adhezyon kuvvetleri arasındaki etkileşimdir. Kısa ve genel bir tanım ile adhezyon, iki farklı maddenin molekülleri arasındaki çekim kuvvetine verilen isimdir. Kohezyon ise, maddenin kendi molekülleri arasındaki çekim kuvvetidir [46]. Sıvı-katı arayüzeyinde, sıvının moleküllerinin birbirlerini çekimi sıvı moleküllerinin katı yüzeyin moleküllerini çekiminden büyükse (adhesif kuvvetler kohesif kuvvetlerden güçlüdür), yüzeyin ıslanması gerçekleşmektedir. Eğer sıvı moleküller birbirlerini katı yüzeyin moleküllerinden daha kuvvetli çekerse (kohesif kuvvetler adhesif kuvvetlerden daha kuvvetlidir), sıvı yuvarlaklaşmakta ve yüzeyi ıslatmamaktadır.

Bir sıvının yüzey ıslatma karakteristiklerini tanımlamanın bir yolu bir nesnenin yüzeyine yerleştirilen sıvı damlasının temas açısını ölçmektir. Temas açısı katı/sıvı ve sıvı/gaz ara yüzeyi tarafından oluşturulup sıvı bölgesinden ölçülen açıdır (Şekil 3.9). Sıvı yüzeyi temas açısı  $90^\circ$ 'den küçük olduğunda ıslatma gerçekleşmektedir [44].



Şekil 3.9 Katı fiber üzerindeki sıvı polietilen damlanın oluşturduğu temas açısı [44].

Bir sıvının ıslatma kabiliyeti katı-gaz, sıvı-gaz ve katı-sıvı arayüzeylerinin yüzey enerjilerinin bir fonksiyonudur. Bir ara yüzey boyunca yüzey enerjisi veya arayüzeydeki yüzey gerilimi, arayüzeyde bir birim alan yeni yüzey oluşturmak için gerekli enerji ölçüsüdür. Bir sıvının molekülleri arasında moleküller arası bağ veya kohesif kuvvetler yüzey gerilimine sebep olmaktadır. Sıvı başka bir madde ile karşılaştığında, genellikle iki malzeme arasında bir çekim oluşmaktadır. Sıvı ve ikinci madde arasındaki adhesif



kuvvetler sıvının kohesif kuvvetlerine karşı yarışmaktadır. Zayıf kohesif bağlı ve diğer malzemeye kuvvetli çekimiyle sıvılar (veya adhesif bağlar yaratma isteğinde), malzeme üzerinde yayılma eğilimindedir. Kuvvetli kohesif bağlı ve zayıf adhesif kuvvetli sıvılar başka bir malzeme ile temas halinde olunca yuvarlaklaşma veya bir damla oluşturma eğilimine girmektedir [46], [47].

Teorik bilgilerden anlaşılacağı üzere kompozitlerde Şekil 3.8’de oluşan  $\Theta$  temas açısının sıfıra olabildiğince yakın olması ve yüzeyde yayılması istenmektedir. Bu sayede katı fiberin yüzeyi sıvı polimer ile iyice ıslanacak ve bunun sonucunda iyi bir yapışma sağlanmış olacaktır. Termodinamik olarak bakıldığında ise adhezyon kuvvetinin yüksek olması iyi ıslatma sağlayacağından, bu değerin yüksek olması istenmektedir [47].

### **3.3.2 Yapıştırıcılar**

Fiberlerin yüzeylerindeki hidroksil grupları nedeniyle sahip oldukları hidrofilik (su seven) doğaları, hidrofobik (su sevmeyen) termoplastik matrise yapışmada tersine etkide bulunmaktadır ve sonuç olarak fiber/matris yapışması zayıf olmaktadır. Yapışmayı artırmak için reçine veya takviye arası arayüzeye köprü olabilecek fonksiyonel grupları içeren bir bağlama elemanı ile fiberlerin işlenmesi gerekmektedir [47].

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin fiziksel özellikleri; polimer matrisin gerilimleri fibere aktarma ve fiberleri hasarlardan koruma yeteneğine bağlıdır. Bu karakteristiklerini arttırmak için üretim sırasında fiberler apre (sizing) ve kaplama elemanları (coupling agents) karışımlarıyla işlenmektedirler [48].

Kaplama elemanları, organofonksiyonel silanlar, hidroksil ve R grupları (methacrylate=metakrilat, cationic styryl=katyonik stiril, vb.) içermektedir. Bunlar önceden minerale bağlı olan, sonrasında reçineyle kovalent bağlar oluşturabilen veya PP gibi reaktif olmayan reçinede yapışmayı arayüzey bölgesinde sahte birbirine geçmiş polimer ağı oluşumu sağlayabilmektedirler. Silandaki R grupları PP’e uyumu sağlarken, hidroksil grupları minerallere, yani cama, bağlanmaktadır. Böylelikle silan bileşikler sayesinde yüzeyine hidrofobik özellik kazandırılan işlenmiş fiberler, polimerik matriste daha kolay ıslanmakta ve bunun sonucu olarak da arayüzey yapışması artmaktadır [49].

### **3.3.3 Cam Elyafı Üzerine Uygulanan Bağlayıcılar**

Cam elyafı üzerine uygulanan bağlayıcı 4 değişik ana maddeden oluşmaktadır [49]:

- 1) Reçinenin bağlanmasını sağlayan kaplama elemanı (genellikle silikon bileşiği veya silandır)
- 2) Bir film oluşturunca polimer (genellikle polivinil asetat emülsiyonudur)
- 3) Bir yağlayıcı madde (genellikle bir asit amiddir)
- 4) Elyafa özellik katan diğcr maddeler (antistatik özellik vb.)

Yukarıdaki gruplandırmalar günümüzde yoğun olarak kullanılan termoset reçinelere uygun bağlayıcı içerikleridir, bu yüzden örnek olarak verilen maddeler termoplastik reçinelere uyum sağlayamayabilmektedir. Uyumlu olup olmadığı deneysel çalışmalar sonucunda ortaya konmaktadır.

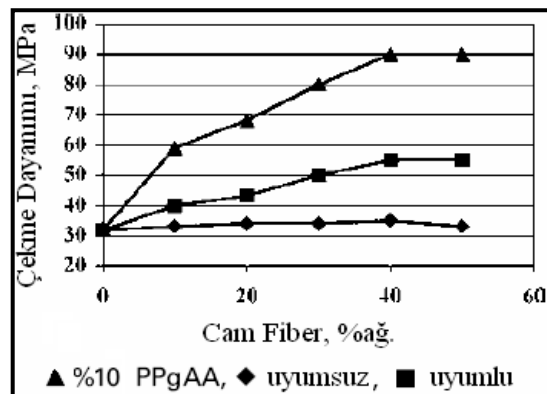
#### **3.3.3.1 Dolgulu Polipropilen Kompozitlerde Yapışma**

Karian'ın "Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites" kitabının üçüncü bölümünde görülmüştür ki; yapılan çalışmalarda polipropilen reçineye en iyi yapışmayı amino silanlar sağlamakta ve bu yüzden polipropilen matrisle sıklıkla aminosilanlar kullanılmaktadır. Bunları vinil ve kloro silanlar izlemektedir. Çizelge 3.6'da cam fiber üzerine uygulanan ticari silan türleri bunların sıyrılma dayanım değerleri verilmiştir [50].

Çizelge 3.6 Silan tipinin tek fiber sıyrılmasından dolayı oluşturduğu arayüzey dayanımı (IFSS) üzerindeki etkisi [50].

| Silan tipi | Fiber çapı (μm) | IFSS (MPa) |
|------------|-----------------|------------|
| Silansız   | 10,9            | 3,6        |
| Amino      | 18,0            | 4,5        |
| Metakril   | 18,5            | 3,5        |
| Epoksi     | 15,7            | 3,1        |
| Kloro      | 16,8            | 3,7        |
| Propil     | 16,9            | 3,1        |
| Vinil      | 9,6             | 3,9        |

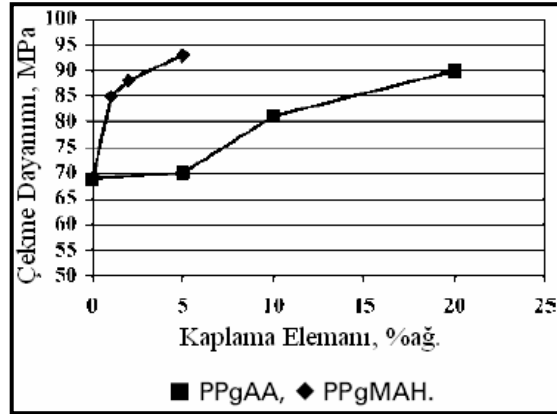
Apres; oksitlenmiş poliolefin, polimerik film oluşturucu, organofonksiyonel silan ve organik asit içermektedir. Oksitlenmiş poliolefin Epolene E-43 (Eastman) bu çalışmada kullanılmıştır. Bu malzeme düşük moleküler ağırlıklı PP'dir. 4.489.131 nolu patentte organik aside ihtiyaç olduğu ve bunun tercihen teraftalik asit olduğu ortaya konulmuştur [51].



Şekil 3.10 Farklı oranlarda, uyumlu ve uyumsuz silan kaplı ve ayrıca %10 PPgAA kaplı fiberlerden üretilen kompozitlerin çekme dayanımı [50]

Şekil 3.10'da %50'ye kadar farklı oranlarda cam fiber kullanımıyla üretilmiş kompozitlerin çekme dayanım değerleri görülmektedir. Bu fiberlerin bir grubunda

uyumsuz silan kullanılmış ve bunun sonucu hiç etkilemediği görülmüştür. Bir grupta uyumlu silanlar kullanılmış ve sonuç 25 MPa artmıştır. Diğer bir grupta ise uyumlu silan ile birlikte %10 PPgAA (acrylic acid grafted PP) kullanılmıştır ve bunun sonucu 60 MPa arttırdığı bulunmuştur. Buradan matrise uyumlu bir silan kullanımı ve buna ilaveten bir kaplama elemanı kullanımının dayanımı ciddi şekilde arttırdığı söylenebilmektedir.



Şekil 3.11 İki kaplama elemanından farklı oranlarda kullanılması sonucu kompozitte oluşan çekme dayanım değerleri [50]

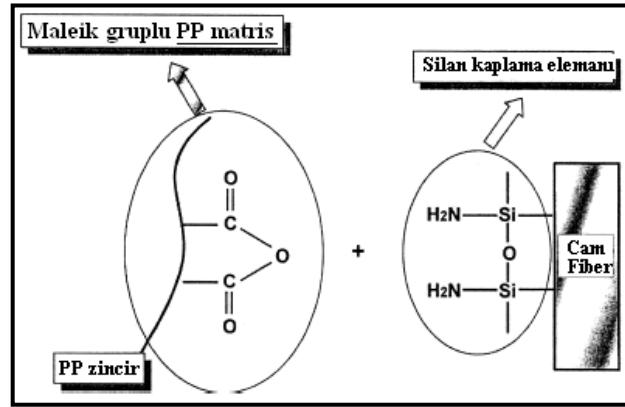
PPgAA (acrylic acid grafted PP) ve PPgMAH (maleik anhydrid grafted PP) kaplama elemanı olarak polipropilen reçinelerde etkin olarak kullanılan maddelerdir. Şekil 3.11’de ise bunların yüzde etkileri verilmiştir. PPgMAH’in, PPgAA’e oranla çok daha az miktarlarda kullanılması sonucu benzer çekme dayanımı değerlerini verdiği görülmüştür. Bu da ekonomik açıdan PPgMAH kullanımını cazip kılmaktadır [50].

### 3.3.3.2 Sürekli Cam Fiber Takviyeli Polipropilen Kompozitlerde Yapışma

Apreleme koşullarının sürekli cam fiber takviyeli polipropilen kompozitlerin eğme özellikleri üzerindeki etkisi adlı, Composites: Part A 31 (2000) 979–990’da yayınlanan makalede; sürekli cam fiber takviyeli polipropilen kompozitlerin bağlama elemanları kullanarak arafaz yapımını önermektedir [53]. Çalışmada iki çeşit bağlama elemanı maleik anhidrit ile modifiye edilmiştir, düşük ve yüksek molekül ağırlıklı PP bağlayıcılar kullanılmıştır. Amino silan kaplama elemanları da ayrıca cam fiberin aprenmesinde kullanılmıştır.

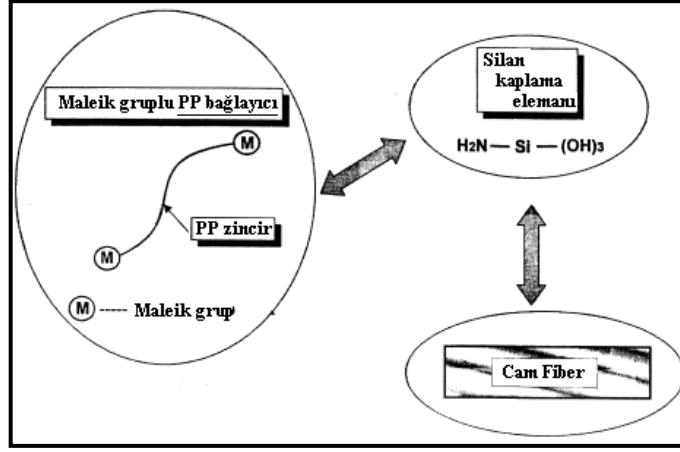
İlk olarak bağlama elemanları varlığı ve yokluğunun apreleme koşullarının eğme özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak en yüksek eğme dayanımı elde etmek için düşük moleküler ağırlıklı bir PP bağlayıcının uygun olduğu bulunmuştur.

Cam fiberler üretildiklerinde bir silan kaplama elemanı ve bir bağlayıcı eleman içerikli solüsyon kullanılmaktadır. Genellikle PP matris modifikasyonu için maleik anhidrit kullanılmaktadır ve bir silan kaplama elemanı ile işlenmiş cam fiberler ve PP matris arasında kimyasal bir reaksiyon olduğu düşünülmektedir (Şekil 3.12).



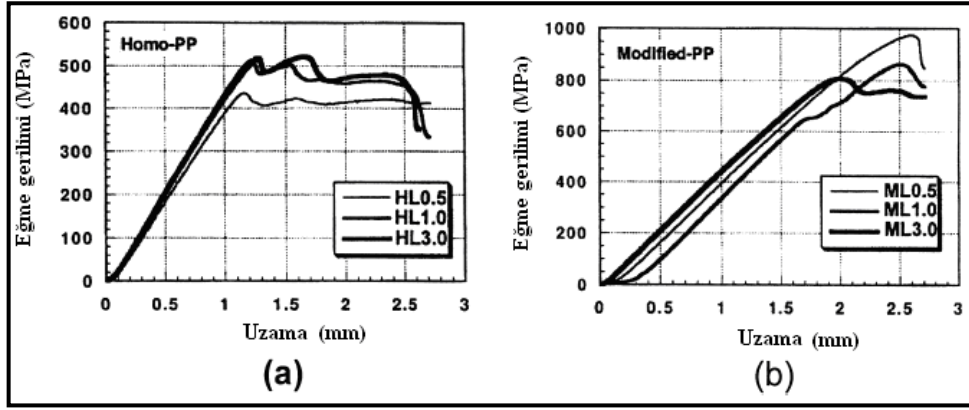
Şekil 3.12 Maleik anhidrit ile modifiye edilmiş PP matris ve silan kaplama elemanı ile işlenmiş bir cam fiber arasındaki tipik kimyasal reaksiyon [52]

Amit grupları, PP matris içindeki maleik grubu ve silan kaplama elemanı içindeki amino grup arasındaki reaksiyon sebebiyle oluşmaktadır. Fakat bu çalışmada maleik anhidrit PP bağlayıcılar için kullanılmıştır. Bu yüzden cam fiberlerin yüzeyindeki kimyasal reaksiyonlar farklı olabilmektedir. Kaplama elemanı ve cam fiberler arasındaki ve PP bağlayıcı ve kaplama elemanı meydana geldiği düşünülen kimyasal reaksiyonlar Şekil 3.13'te görülmektedir.



Şekil 3.13 Cam fiberin apreleme işlemi sırasındaki kimyasal reaksiyonları [52]

Daha sonra eğme özellikleri üzerinde PP bağlayıcı etkisini belirlemek için düşük moleküler ağırlıklı PP bağlayıcı konsantrasyon oranı üç basamakta çeşitlendirilmiştir (Şekil 3.14).

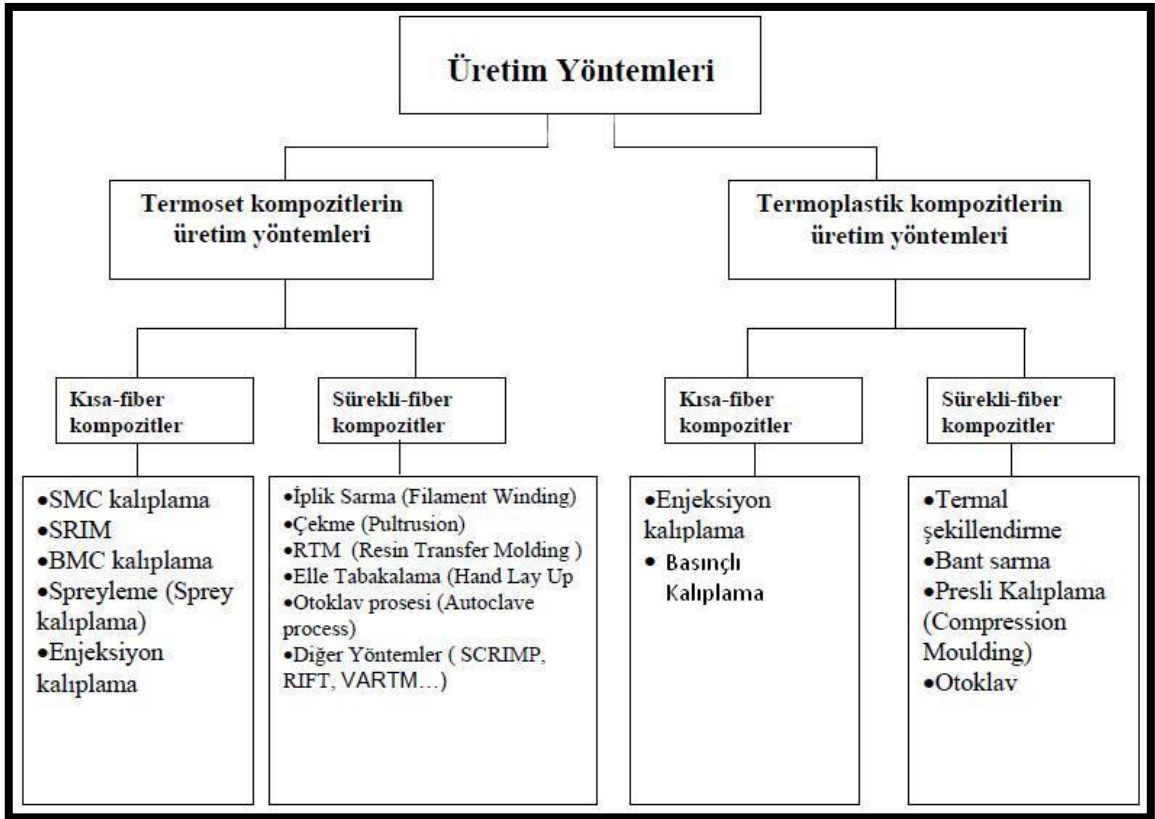


Şekil 3.14 (a) Homo-PP matrisli ve (b) modifiye-PP matrisli numunenin gerilim-uzama eğrileri [52]

Modifiye edilmiş PP matristen alınan numunelerin (ML türü numuneler-modifiye edilmiş düşük moleküler ağırlıklı PP) eğme dayanımları PP bağlayıcı elemanın artan konsantrasyonu ile düşmüştür. Diğer yandan PPH türü numuneler artan konsantrasyon oranı ile doymuştur. Yüksek eğme dayanımı elde etmek için PP bağlayıcının, konsantrasyonunun bir optimumu olduğu sonucuna varılmıştır. Optimum konsantrasyonun ayrıca PP matrisin kimyasal durumuna da bağlı olduğu vurgulanmıştır. Şekil 3.14'te ayrıca homo ve modifiye edilmiş PP matrisler karşılaştırılmıştır. Bunlara göre yüksek dayanımı maleik anhidrit ile modifiye edilmiş matrisler vermiştir [52].

**KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMLERİ**

İstenilen mekanik özellikteki kompozitleri üretmenin bir çok yöntemi vardır. Tezin bu bölümünde sadece polimer matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan yöntemler anlatılmakta olup, aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir (Şekil 4.1):

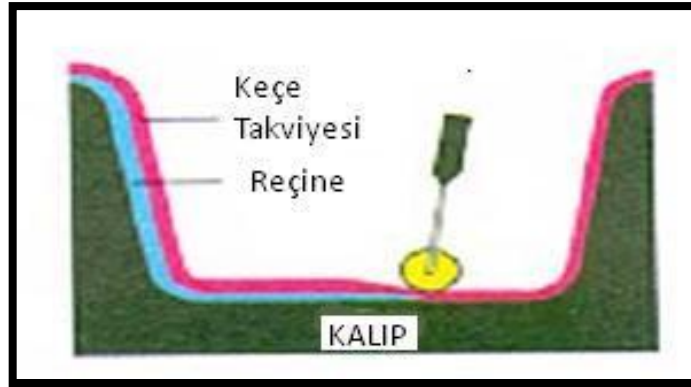


Şekil 4.1 Kompozit üretim yöntemlerinin şematik gösterimi [5]

Kompozitlerin üretim yöntemleri farklı da olsa kompozit bir parça üretilirken önce şekil verilir, sonra parça işlenir, en son da birleştirme ve bitiş işlemleri gerçekleştirilir. Bu dört kompozit üretim kademesinin hepsinin aynı anda olması gerekmemektedir [5].

#### 4.1 El Yatırması Yöntemi (Hand Lay-up)

Geniş yüzeyli CTP (Cam Takviyeli Plastik) kalıplaması için en çok kullanılan metottur. Yöntem; bir kalıba elle yerleştirilen kumaşlara (elyaf) bir rulo veya fırça ile reçinenin emdirilmesi esasına dayanır. Kumaşlar kalıba, önce kalıp ayırıcı ardından jelkot uygulandıktan sonra yerleştirilir. Daha sonra reçine emdirilmiş kumaşlar oda sıcaklığı ve atmosferik basınç altında veya farklı sıcaklık ve basınçlar altında pişmeye/kurumaya bırakılır [31], [53] . Reçineler kumaşlara kat kat yedirilebildiği gibi kumaşın özelliklerine bağlı olarak çok katmana aynı anda da reçine sürülebilir (Şekil 4.2).



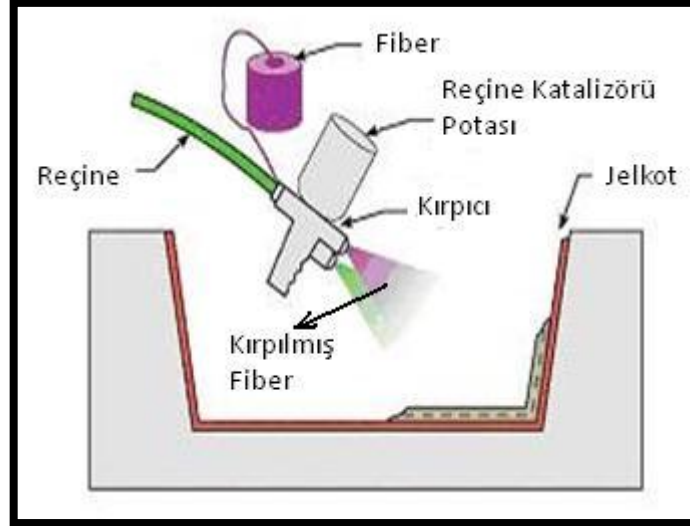
Şekil 4.2 El yatırması (hand lay-up) yöntemi [54]

Düşük sabit sermaye yatırımı gerektiren bir kalıplama yöntemi olan el yatırması ile %25-35 oranında cam elyafı ile takviyeli polyester ürün elde edilebilir. Fiber oranı düşük olduğu için elde edilen kompozit malzemenin mekanik değerleri de düşüktür, ancak; daha yüksek fiber oranlarında reçine fiberlere yeterince emdirilemez. Fiber oranını arttırmak için reçine oranı düşük tutulmak istendiğinde ise, yüksek oranda hava boşlukları ve ıslanmayan bölgeler meydana gelebilmektedir. Emek-yoğun bir üretim metodu olduğundan kapasite, emek ve kalıp adedine bağlıdır. Bir kalıptan günde ortalama 2 ürün alınabilir. Yatırım maliyeti en düşük olan ve uygulanması esnasında çok fazla proses bilgisi gerektirmeyen bir yöntemdir. Ancak; bu yöntemde kullanılan reçinelerin yoğunluğu ve viskozitesi düşük olduğundan, bu tür reçineler insan sağlığı açısından ağır moleküllü reçinelere oranla daha zararlıdır. Pahalı havalandırma sistemleri olmaksızın polyester ve vinilester kullanılırken havaya karışan stiren konsantrasyonunu yasal sınırlarda tutmak zordur. Genellikle tekneler, yüzme havuzları, depolar, vb gibi az sayıda imal edilecek geniş yüzeyler için kullanılır [39], [44].



#### 4.2 Püskürtme Yöntemi (Spray-up)

Püskürtme yöntemi elle yatırma yönteminin daha gelişmiş ve aletli halidir. Kırpılmış elyaflar kalıp yüzeyine, içine sertleştirici katılmış reçine ile birlikte özel bir tabanca ile püskürtülür. Sürekli fiber halinde tabancaya gelen elyafların kırılma işlemi tabanca üzerinde bulunan ve bağımsız çalışan bir kırıcı sayesinde yapılır. Püskürtme işlemi sonrası yüzeyin bir rulo ile düzeltilmesiyle ürün hazırlanmış olur.

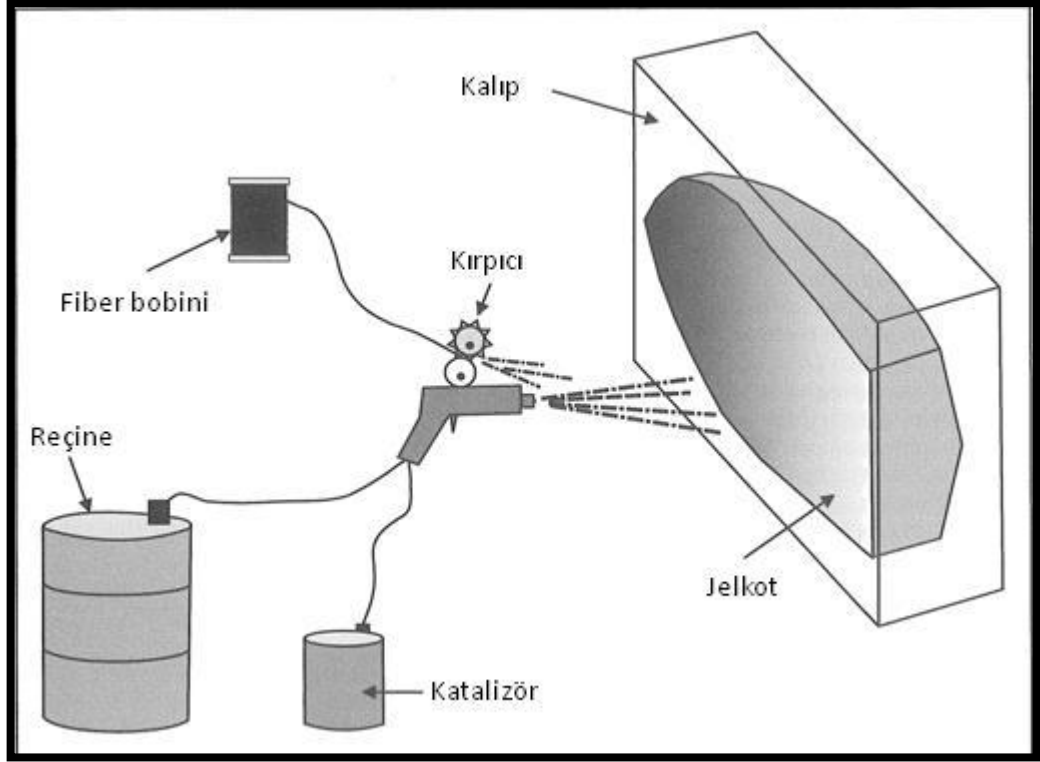


Şekil 4.3 Püskürtme yöntemi [54]

Bu yöntemle kısa sürede düşük maliyetli ürün üretilebilmektedir. Ayrıca yöntemin uygulanması basittir. Ancak bu yöntemde püskürtme tabancası ayarı ve operatörün tecrübesi doğrudan ürün kalitesini etkiler ve el yatırmasında da olduğu gibi, sağlıklı çalışma koşulları yaratmak zor olmaktadır. Bununla birlikte kırık elyaflı kompozit üretimi söz konusu olduğundan mekanik değerler sınırlıdır [4].

Bu yöntemde herhangi bir termoset reçine kullanılabilmekte, fiber olarak cam, karbon ve aramid gibi ticari olarak bilinen fiberler tercih edilmektedir. Fakat aramid gibi yoğun kumaşların bu yöntemle ıslatılması zordur.

Bu yöntemle genellikle basit şekilli ve yük taşımanın esas olmadığı yapılar üretilmekte olup, havacılık ve spor endüstrisinde büyük parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Şekil 4.4'te püskürtme yöntemi kullanılarak yapılan bir hücum botunun üretimi gösterilmektedir [39], [44].



Şekil 4.4 Püskürtme yöntemiyle yapılan bir hücm bot gövdesi [15]

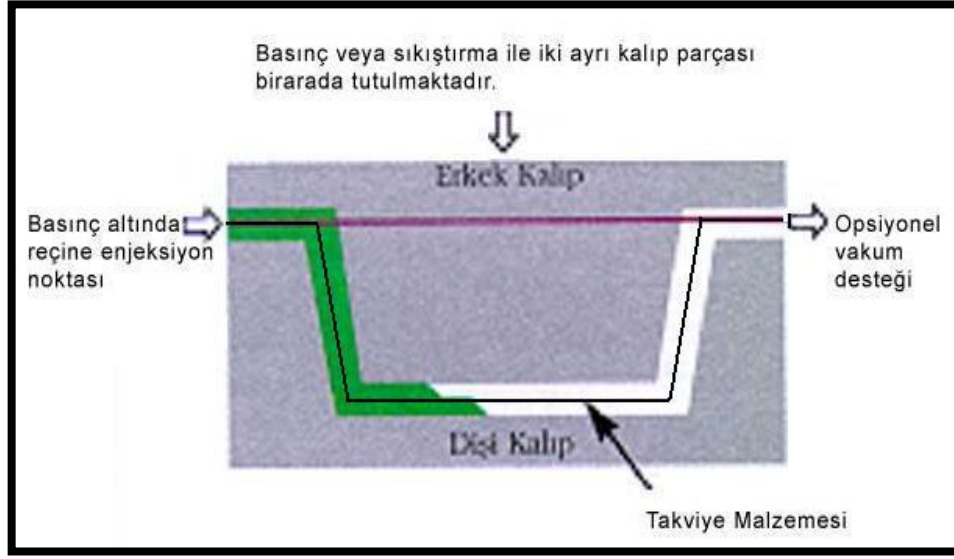
#### 4.3 Reçine Enjeksiyonu Yöntemi (RTM)

Bu üretim metodunda dişi ve erkek olmak üzere iki kalıp kullanılarak iki yüzü düzgün ürün elde edilir. Bu yöntemde kullanılan kalıbın kompozit malzemeyle yapılması çelik kalıp maliyetine göre daha düşük kalmasına neden olmaktadır. Takviye malzemesi kuru olarak keçe, kumaş veya ikisinin kombinasyonu kullanılır.

Reçine enjeksiyonu için üretilmiş olan özel cam keçe (devamlı keçe) kalıp üzerine yerleştirilir ve kalıplar kapatılır. Fiberlerin üzeri matris içinde geç çözünen reçinelerle kaplanarak kalıp içerisinde sürüklenmesi önlenir. Önceden hazırlanmış olan reçine enjeksiyon noktasından, basınç altında kalıp içine enjekte edilir. Bu süreç daha fazla zaman ister. Matris enjeksiyonu soğuk, ılık veya en çok 80°C'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Bu yöntemde içerideki havanın dışarı çıkarılması ve reçinenin elyaf içine iyi işlemesi için vakum kullanılabilir [11], [53].

Elyafın kalıba yerleştirilmesini gerektirmesinden dolayı uzun sayılabilecek bir işçilik gerektirir. Kalıp kapalı olduğu için ise zararlı gazlar azalır. Dolayısıyla; gözeneksiz ve el yatırması yöntemine göre daha kaliteli ürün elde edilebilir. Bu yöntemle karmaşık

parçalar üretilebilir. Conrode uçaklarında, F1 arabalarında, vb. bazı parçalar bu yöntemle hazırlanır [55].



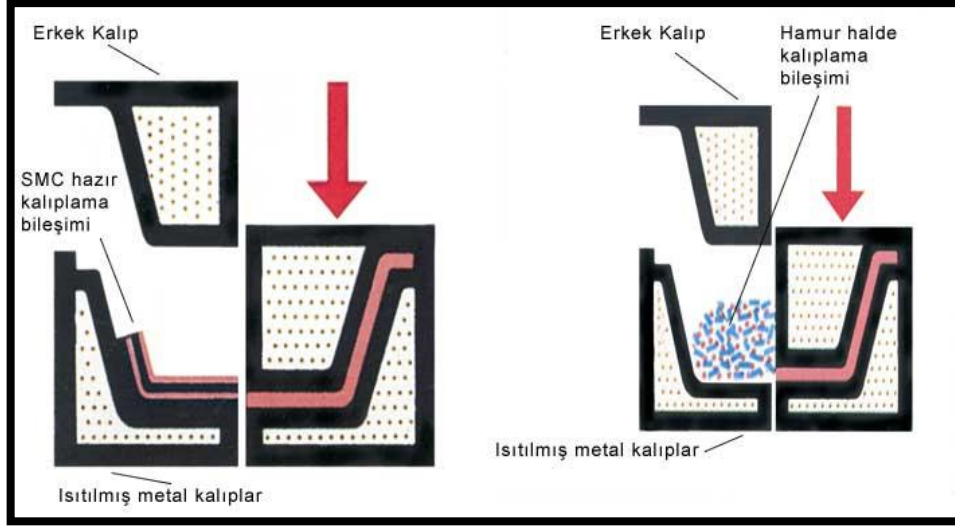
Şekil 4.5 Reçine enjeksiyon yöntemi [54]

#### 4.4 SMC/BMC Hazır Kalıplama

Ürün boyutuna göre 3-6 dakikalık bir kalıplama süresi sağlayan hızlı, seri bir kalıplama metodudur. Önceden hazırlanmış pestil veya hamur haldeki cam elyafı, polyester, dolgu ve katkı malzemeleri karışımının 150-170°C sıcaklıkta, 50-120 kgf/cm<sup>2</sup> basınç altında çelik kalıplarda şekillendirilmesi metodudur [55].

- **SMC** : SMC takviye malzemesi olarak kırılmış lif ile dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan pestil biçiminde malzemedir. Sürekli lifler, 25-50 mm kırılmış olarak ve kompozitin toplam ağırlığının %25-30 oranında kullanılır. Genellikle 1 m genişliğinde ve 3 mm kalınlığında üretilir.
- **BMC** : BMC takviye malzemesi olarak kırılmış lif ve dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan hamur biçiminde malzemedir.

Yöntem iki aşamada gerçekleştirilir; birinci aşamada karışım hazırlanır ve polietilen filmler arasında katılmış pestil veya hamur olarak elde edilir ve ikinci aşamada ise, dijital olarak kesilip tartılan hazır kalıp bileşeni sıcakta preslenir.



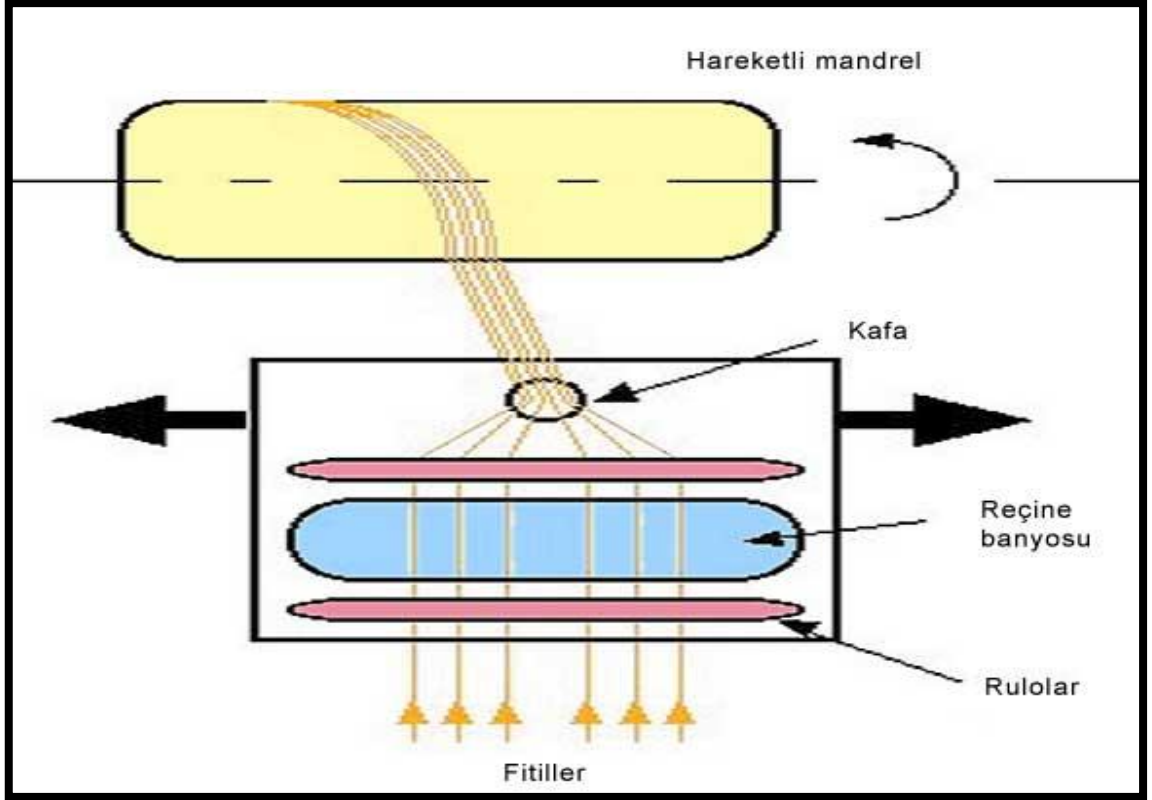
Şekil 4.6 SMC ve BMC (sırasıyla) hazır kalıplama yöntemi [54]

Bu iki hazır kalıplama yönteminin karmaşık şekillerin üretilebilmesi, metal parçaların bünye içine gömülebilmesi, farklı cidar kalınlıkları eldesi gibi avantajları bulunmaktadır. Ayrıca ürünün iki yüzü de kalıp ile şekillenmektedir [12]. Diğer kompozit malzeme üretim tekniklerinin olanak vermediği delik gibi karmaşık şekiller elde edilebilmektedir. Iskarta oranı düşüktür. Bu yöntemin dezavantajları kalıplama bileşimlerinin buzdolaplarında saklanması gerekliliği, kalıpların metal olmasından dolayı diğer kalıplardan daha maliyetli olması ve büyük parçaların üretimi için büyük ve pahalı preslere ihtiyaç olmasıdır [55], [56].

#### 4.5 Elyaf Sarma Yöntemi

Elyaf sarma yöntemi sürekli fiberlerin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek dönen bir mandrel üzerine sarılmasıdır. Sürekli liflerin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklerde ürünler elde edilebilmektedir. Yeterli sayıda elyaf katının sarılmasıyla işlem tamamlanmış olmaktadır. Oda sıcaklığında ya da bir fırın içinde kurutma işlemi gerçekleştirilir, ardından döner kalıp ayrılır [39].

Bu yöntemle yapılan ürünler genellikle silindirik borular, araba şaftları, yüksek basınca dayanıklı tanklar, yat direkleri, dairesel basınç tankları vb. ürünlerdir.



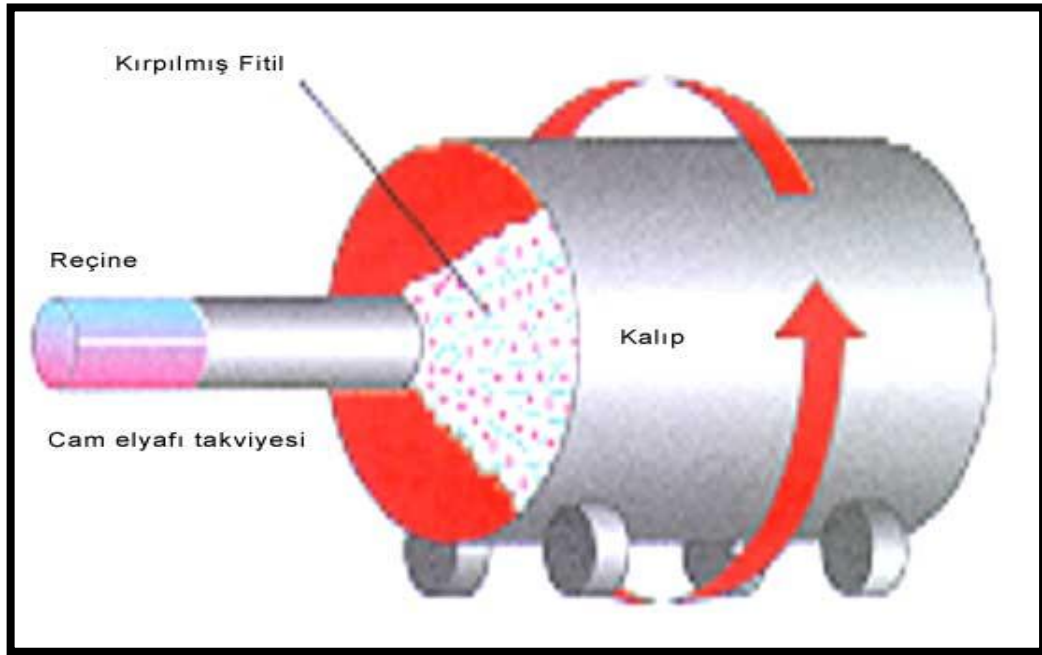
Şekil 4.7 Elyaf sarma yöntemi [54]

Malzeme sarımı hızlı ve ekonomik bir yöntemdir. Reçine oranı el yatırması yöntemine göre daha iyi kontrol edilebilmektedir. Bobine sarılı lifler ikinci bir işlemden geçip kumaş haline getirilmediği için maliyet minimize edilmiş olmaktadır. Her katmanda farklı yönlerde sarım yapma imkanı olacağı için değişik yüklemeler yapı tarafından karşılanabilmektedir. Öte yandan kompozit üretimi konveks parçalarla sınırlıdır ve düzgün yüzey eldesi için kurutma/kürleme işleminden sonra parçanın işlenmesi gerekebilmektedir. Ayrıca büyük parça üretimi söz konusu olduğunda, mandrelin fiyatının yükselmesi nedeniyle prosesin maliyeti artmaktadır [15], [58]. Düşük viskoziteli reçinelerin üretimde kullanılması çeşitli sağlık sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Bu yöntemde sürekli tarzda fiberler kullanılmaktadır, yöntem kumaş tarzındaki elyeflerin kullanımı için uygun değildir [58].

#### 4.6 Savurma Döküm Yöntemi

Santrifüj döküm prosesi, güçlendirici elyafların ve reçinenin dönen bir kalıbın içine yerleştirilmesini içerir. Dönme sırasında oluşan merkezci kuvvetler kompozit

malzemenin kalıbın iç duvarına preslenmesine neden olarak, buranın tamamen kaplanmasına ve reçinenin polimerizasyonundan sonra da sert boru duvarının oluşumuna neden olmaktadır. Dönme ve dökme hızı dökümün boyutuna ve şekline bağlı olarak değişebilmekte, fiber boyu püskürtme esnasında kesilerek ayarlanabilmektedir. Santrifüj dökümde, elyaf ve reçinenin dökülmesinden sonra kalıp kendi ekseninde yüksek hızda yaklaşık 900 ile 2400 rpm arasında döner (Şekil 4.8). Bu hızlar altında, kompozit kalıbın iç yüzeyini tamamen kaplayabilmektedir [56], [57].



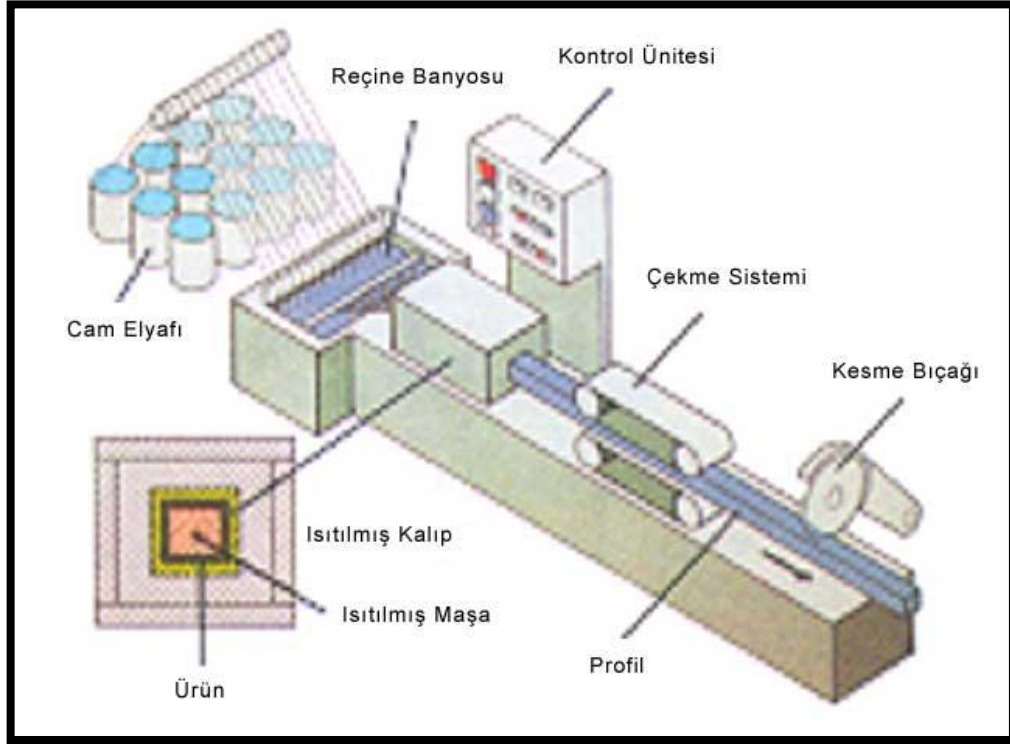
Şekil 4.8 Savurma döküm yöntemi [59]

Bu yöntemle sadece silindirik şekiller elde edilebilmektedir, dolayısıyla sadece boru, depo, direk gibi silindirik ürünlerin yapımında kullanılmaktadır.

#### 4.7 Profil Çekme (Pultrüzyon)

Pultrüzyon, sürekli uzunluklara ve sabit kesitlere sahip olan parçaların (profil, boru, çubuk vs.) üretilmesinde kullanılır. Bu metod sürekli bir procestir ve oluşan atıkların oranı oldukça düşüktür. Termoset reçineler için pultrüzyon prosesinde, güçlendirici fiberler reçineyle kaplanmak üzere reçine emdirme banyosu içerisinde geçirilerek çekilir. Reçine ile ıslatılmış fiber/fiber demeti daha sonra şekillendirilmek için bir kalıba sokulur. Şekillendirilmiş demet, reçinenin polimerize olması için ısıtılmış diğer bir

kalıptan geçirilir. İstenen şekil ve boyutta sertleşen parça herhangi başka bir işleme gereksinim olmadan kalıptan çıkarılır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Pultrüzyon yöntemi [59]

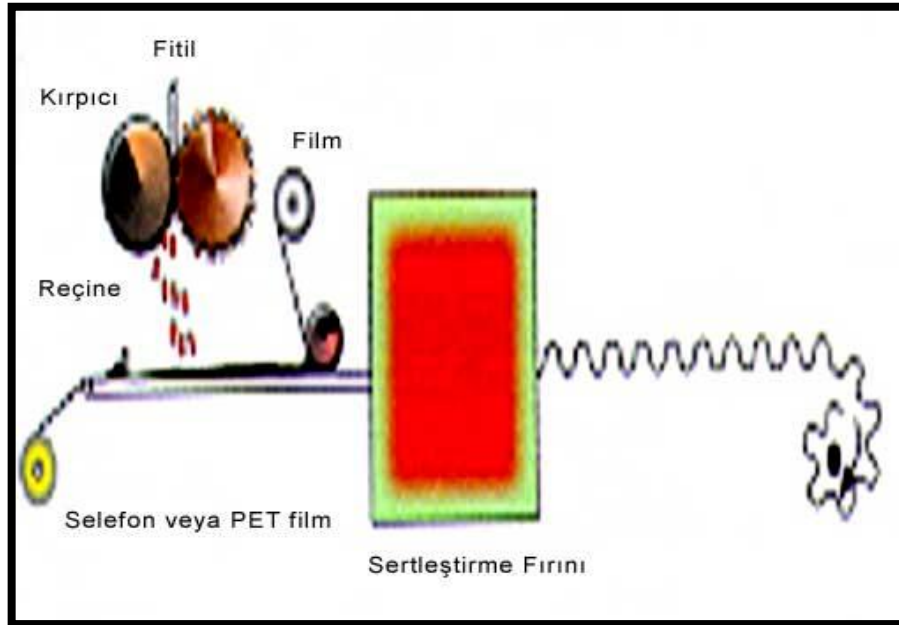
Bu proses basit görünmesine rağmen, çekme hızı, kalıp sıcaklığı, fiber/reçine ıslatma kalitesi ve fiber hacmi gibi bir çok proses değişkeni pultrüzyon metoduyla elde edilmiş kompozitin kalitesini etkileyebilir [55-57].

Pultrüzyon metodu ekstrüzyona benzemektedir. Ancak ekstrüzyonda üretilecek parçanın hammaddesi kalıba itilir, pultrüzyonda ise kalıba çekilir. Pultrüzyon metodu ile PMK üretmede sertleşme (polimerizasyon) işlemi radyo frekansı, enfraruj veya mikro dalga enerjisi ile ısıtma teknikleri kullanılmaktadır. Elyaf sarma yönteminde olduğu gibi yaş ve kuru pultrüzyon teknikleri ayrı ayrı uygulanmaktadır. Yaş pultrüzyonda reçine tankından geçirilen fiberler hemen kalıplanıp sertleştirilmekte iken, kuru pultrüzyonda tavlانیp yumuşayan PMK malzeme bu halde iken şekillendirilir [15], [55]. Yaş yöntem düşük maliyetin önemli olduğu durumlarda, kuru yöntem ise yüksek mukavemetin önem kazandığı uygulamalarda kullanılmaktadır.

Başta polyesterler olmak üzere epoksi, poliamid, polisülfon reçineleri cam ve grafit takviyelerle birlikte pultrüzyon tekniğinde kullanılmaktadırlar. Yüksek korozyon dayanımının istendiği bir alanda vinilester matrisli kompozit, yüksek mekanik mukavemet ve elektrik iletkenliği istenen alanlarda ise epoksi matris tercih edilmektedir [57].

#### 4.8 Devamlı Levha Üretim Yöntemi

Cam elyafı takviyesinin katalist sistemi katılmış polyester ile birlikte iki plastik film arasında sıkıştırılarak çekilirken fırınlanması ile iki yüzü düzgün, oluklu, şeffaf veya opak levha üretimi sağlanır [53].



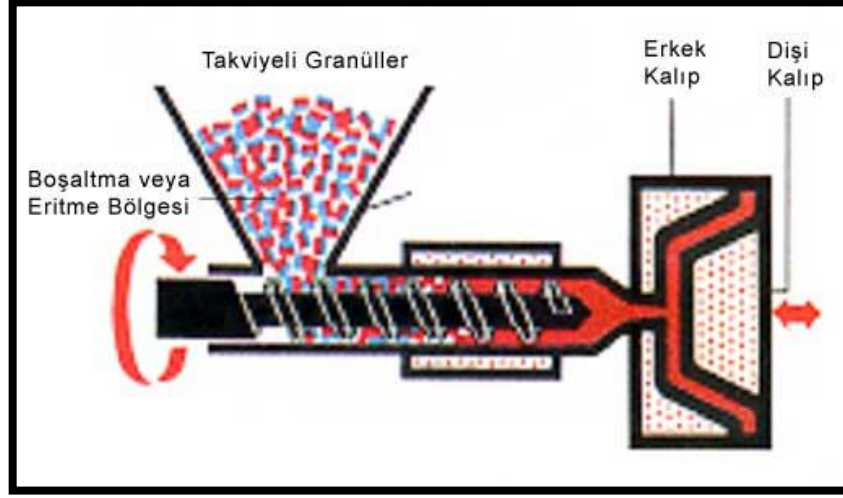
Şekil 4.10 Devamlı levha üretim yöntemi [54]

#### 4.9 Termoplastik Enjeksiyon/Ekstrüzyon Yöntemi

Enjeksiyon ve ekstrüzyon makineleri prensip olarak benzer şekilde çalışmaktadır. Granül halinde besleme haznesinden makine içine verilen reçine, bir ısıtma bölgesinde ısıtılarak akışkan hale getirilmekte ve burğu yivleri ile bir taraftan homojen karışım sağlanırken, diğer taraftan çıkış ucuna doğru taşınmaktadır. Ekstruderlerde çıkış ucuna yerleştirilen, kalıp içinden basınç etkisi ve çekme aparatları yardımı ile kalıp şekline uygun şekilde profiller çekilirken; enjeksiyon makinelerinde çıkış memesinin hemen



yanında bulunan kapalı kalıp içine akışkan hale getirilmiş termoplastik reçine enjekte edilir ve kapalı kalıp içinde soğuması ve sertleşmesi sağlanır [23].

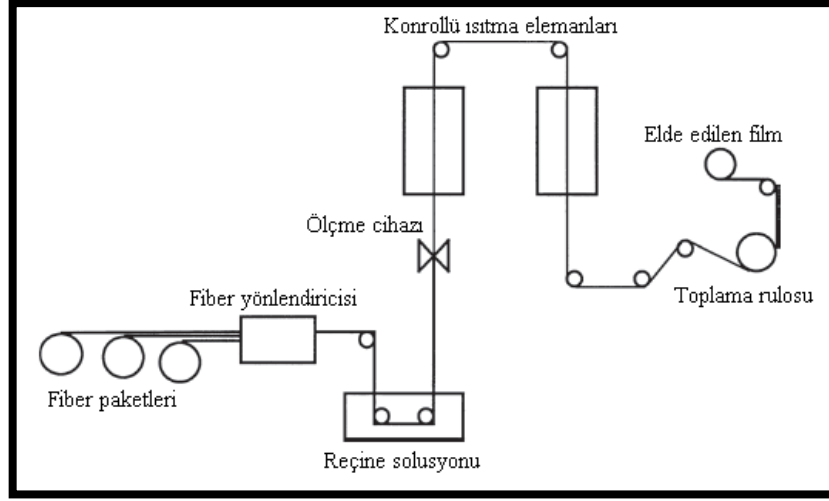


Şekil 4.11 Termoplastik ekstrüzyon yöntemi [54]

#### 4.10 Prepreg Üretimi

Prepregler bir polimer matriste fiberlerden oluşmuş hazır yapılmış bantlardır. 76 mm ile 1270 mm arasında standart genişlikte bulunmaktadır. Polimer matrisin termoset ya da termoplastik olmasına bağlı olarak buzdolabında veya oda sıcaklığında tutulmaktadır. Bu bantlar manuel veya mekanik olarak çeşitli yönlendirmelerde kompozit yapı elde etmek için tabakalar halinde kullanılabilirler. Yüksek basınçlarda ve sıcaklıklarda vakumlama ve kürleme izlenebilir [1].

**Prepreg;** sonradan el yatırması veya kalıplama işlemlerinde kullanılmak için üretilen reçine emdirilmiş fiber, kumaş veya keçedir. 0° ile yönlendirilmiş ve reçineyle ön emdirmesi yapılmış fiberlere **tek yönlü bant** denir. Tek yönlü bant, dokuma kumaş bant ve roving gibi çeşitli prepreg türleri mevcuttur. Şekil 4.12’de tek yönlü prepreg bant yapımı gösterilmektedir. Tek yönlü bant kompozitin özelliklerini istenen yöne uyarlama yeteneği sağlamaktadır.



Şekil 4.12 Prepreg üretim şeması [1]

Prepreglerin metallere göre avantajları daha yüksek özgül rijitlik, özgül dayanım, korozyon direnci ve hızlı üretimidir. Başlıca dezavantajları ise yüksek maliyetleridir. Prepreg malzeme ile yapılan ürünler filament sarma ve pultrüzyonla yapılmışlara göre daha yüksek fiber hacim oranına sahip olurlar. Ayrıca prepregler diğer kompozit ürünlere göre daha kontrollü özellikler ve yüksek rijitlik ve dayanım özellikleri sağlamaktadırlar [5].

Prepregler hem termoset hem de termoplastik matristen yapılabilmektedir. Termoplastik prepregler oda sıcaklığında sınırsız raf ömrüne sahiptirler ve genellikle reçinenin ergime sıcaklığında proses edilmektedirler. Termoplastikler için proses çevrim süresi termoset kompozitlere göre çok daha kısadır. Bu yeni bir teknolojidir ve termoset prepreglere göre pek çok proses ve tasarım avantajları sağlamaktadır. Bunların başında; termoplastik prepreglerin tekrar şekillendirebilmeleri dolayısıyla geri dönüştürülebilmeleri ve tamir edilebilme potansiyellerinin yüksek olması gelmektedir. Ayrıca daha yüksek darbe direnci ve tokluk sağlamaktadırlar [5], [15].

Termoplastik prepreglerin dezavantajları proses için yüksek sıcaklık ve basınçlar gerektirmesidir. Zayıf yapışma kabiliyetlerinden ötürü bazı proses zorlukları ile karşılaşilmektedir. Termoplastik prepregler termoset prepreg üretimine benzer şekilde solvent emdirme ve sıcak eriyik kaplama teknikleri ile üretilmektedirler. Ancak termoplastikler yüksek kimyasal direnç gösterdiklerinden sıcak eriyik kalıplama yöntemiyle üretilmeleri tercih edilmektedir [1], [5].

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 5.1 Malzemeler

Bu çalışmada matris malzemesi olarak olefin grubu termoplastiklerden polipropilen (PP) seçilmiştir. Homopolimer ve kopolimer olmak üzere iki tür PP kullanılmıştır. Homopolimer PP (PPH), kalıplanabilir özellikte olup, 3.4 g/10 dakika (230°C/2.16 kg) kütleli akış hızına (Melt Flow Rate = MFR) sahiptir. DSC sonuçlarına göre %43 kristallik oranına sahip ve 172°C ergime sıcaklığı olan bir malzemedir. Çekme dayanımı ise 32 MPa'dır.

Random kopolimer PP (PPR) olarak, MFR değeri 0.28 g/10 dakika (230°C/2.16 kg) olan bir polimer kullanılmıştır. Bu polimerin kristallik oranı %30 civarında iken ergime sıcaklığı 152°C'dir. Düşük MFR değerine sahip bu grade, özellikle yüksek basınçlı boru ekstrüzyonu ve bağlantı enjeksiyonu için uygun olup; işleme kolaylığı ve üstün mekanik özellikler sağlamaktadır. Yapılan çekme testleri sonucunda ise çekme dayanımı 30 MPa olarak belirlenmiştir.

Bu verilere dayanarak çalışma sıcaklığı homopolimer PP için 190°C, kopolimer (random) PP için ise 170°C olarak belirlenmiştir.

Takviye malzemelerinin seçimi ise kompozitin mekanik performansına etki eden 4 faktör dikkate alınarak yapılmıştır. Bunlar takviyenin şekli, uzunluğu, yönlendirilmesi ve malzemesidir. Bu etkenlerden ilk üçü geometrik faktör, sonuncusu ise malzeme faktörü olarak tanımlanır.

Takviye malzemesi şekli yönünden ele alındığında, kompozit malzemeye uygulanacak yükün tüm malzeme boyunca taşınabilmesi açısından, partikül ya da yonga türü yerine, fiber türü seçilmiştir. Fiberler çok ince silindirik yapılardır. Kullanılan fiberlerin uzunluğu ve yönlenmesinin kompozitlerin özelliklerine etkisi dikkate alındığında; tek eksenli fiberlerin o yönde maksimum dayanım özellikleri vermesinden hareketle tek eksenli yönlendirilmiş sürekli fiberler çalışma için seçilmiştir. Üretilecek kompozitin hedef kullanım alanı özel bir uygulama olmadığından, mekanik özellik ve maliyet açısından optimum değerlere CamElyaf A.Ş.'den alınan E-camı fiberler uygun takviye malzemesi olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan E-camı demet ağırlığı 1200 tex (g/1000mm) olup, 13 µm fiber çapına sahiptir ve Bölüm 3'te verilen PP uyumlu silan ile kaplamıştır.

Fiberlerin yüzeylerindeki hidroksil grupları nedeniyle sahip oldukları hidrofilik (su seven) doğaları, hidrofobik (su sevmeyen) termoplastik matris ara yüzey oluşumunda ters etkiye bulunmaktadır. Bunun sonucunda termoplastik matris fiberleri ıslatamamakta ve fiber/matris yapışması zayıf olmaktadır. Yapışmayı artırmak için reçine, yapıştırıcı veya takviye arası arayüzeye köprü olabilecek fonksiyonel grupları içeren bir bağlama elemanı ile fiberlerin işlenmesi gerekmektedir. Bu durum göz önünde alındığında, PP kompozitlerle cam fiberlerin ara yüzey sorununu ortadan kaldırmak için 2 farklı üreticiye ait maleik anhidrit (MAH) aşılı PP'ler yapıştırıcı olarak kullanılmıştır. Bunlardan Y01 kodlu yapıştırıcının MFR değeri 13.0 g/10dk (230°C, 2.16 kg) iken Y05 kodlu yapıştırıcı 200 g/10dk (230°C, 2.16 kg)'lık MFR değerine sahiptir. Y01 kodlu yapıştırıcının çekme dayanımı 25 MPa, Y05 kodlu yapıştırıcınıniki ise 22 MPa olarak saptanmıştır. Aynı zamanda bu değerler üretici firmanın verdiği değerlerle de örtüşmektedir.

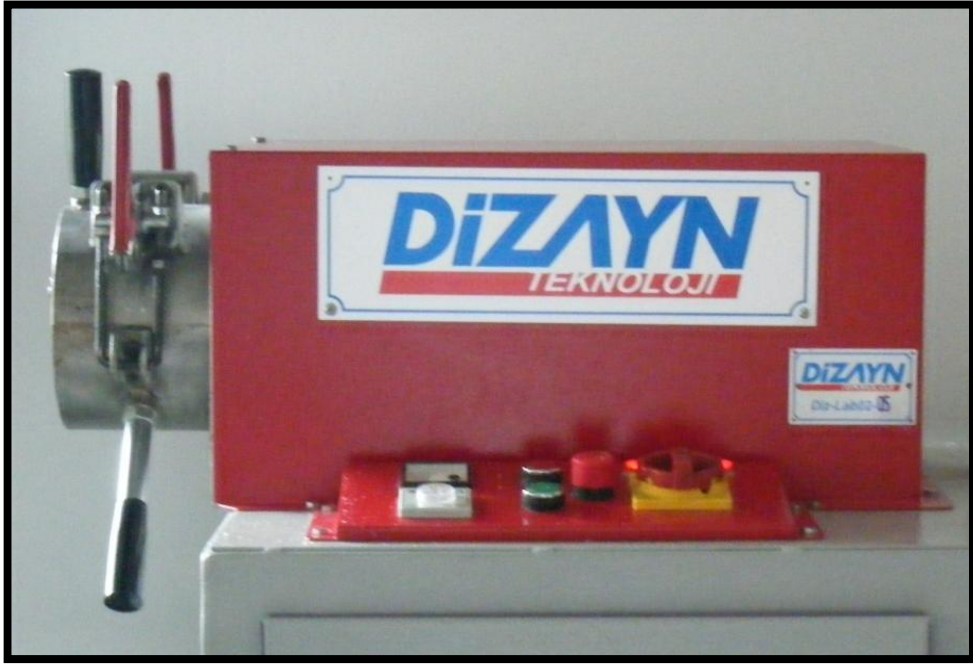
## **5.2 Kullanılan Cihazlar ve Yöntem**

Bu çalışma esas olarak iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama kompozit numune üretimi, ikinci aşama ise mekanik ve fiziksel özelliklerin belirlenmesi, yani karakterizasyon işlemidir.

### 5.2.1 Numunelerin Hazırlanması

Birinci aşama olan kompozit numune üretimi için, birbirleriyle sürekli çalışabilecek şekilde tasarlanmış iki adet cihaz kullanılmıştır. Bunlar; termokinetik bir mikser olan jelimat ve sıcak-soğuk izostatik prestir.

Jelimat sistemi zor gerçekleştiren uyumlaştırma uygulamaları için özel olarak tasarlanmış olup; malzemeleri birkaç dakika içinde ısıtmak ve homojen bir şekilde karışmalarını sağlamak amacıyla kullanılır. Jelimatta yüksek hızda dönen bir şafttaki bıçaklar, haznedeki polimer granüllerinin dönüşünü hızlandırarak bu granüllere yüksek kinetik enerji yüklemektedir. Kinetik enerji yüklü partiküllerin hazne duvarına çarpmasıyla kinetik enerji ısı enerjisine dönüşmekte ve granül halindeki termoplastik hammadde preslenebilir hamur kıvamına gelmektedir. Haznesi ve mikseri paslanmaz çelikten olup, 4500 devirde çalışmaktadır (Şekil 5.1).



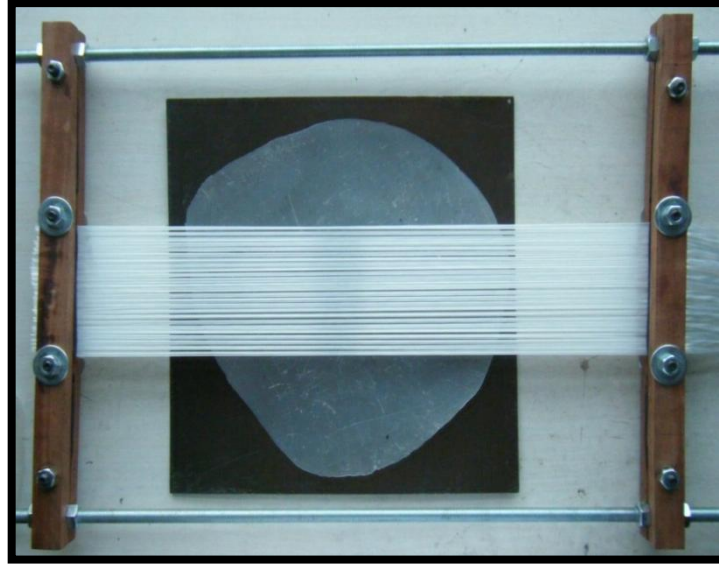
Şekil 5.1 Jelimat sistemi

Numunenin ergime sıcaklığının biraz üstüne çıkacak değere kadar sürede cihaz çalıştırılmıştır. 100 gr'lık PP için cihazın çalışma süresi 25-28 saniye olarak optimize edilmiştir. Mikserin çalışma süresini belirleyen en önemli faktör beslenen hammaddenin miktarıdır. Beslenen miktar yükseldikçe kinetik enerji artması ve dolayısıyla kinetik enerjinin ısı enerjisine dönüşmesi daha çabuk gerçekleşmektedir.

Böylelikle hammadde daha kısa sürede istenen kıvama yani kolayca preslenebilir hale gelmektedir. Deneylerde kullanılan jelimat Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

Termokinetik mikserden alınan preslenebilir kıvamdaki PP, teflon kaplı paslanmaz çelik plakalar arasına alınmış ve ısı kaybını önlemek için mümkün olan en kısa sürede (deneylerde 1 dakikanın altındaki süre) sıcak izostatik prese alınarak polimer cinsine göre belirlenen sıcaklıkta 2 dakika preslenmiştir. 100 barlık basınç uygulayan pres, izostatik olduğundan numunenin her yerine eş basınç uygulanmıştır. Aynı zamanda sıcaklık presin her noktasına eşit dağıldığı için matris yapısının her noktada homojen olması sağlanmıştır. Belirlenen süre sonunda plakalar soğuk preste 2 dakika soğutulduktan sonra dışarı alınmıştır. Polimer malzemenin düzgün katılaşmasını temin etmek için mümkün olduğunca matris numuneleri plakalar arasında tutulmuştur. Aksi halde soğuma esnasında PP’nin yüksek oranda çekme göstermesinden ötürü şekil bozuklukları ve kesitin homojenliğinin bozulması ile karşılaşılabilir. Plakalar soğuduktan sonra matris plakası elde edilmiştir. Bir adet kompozit numune için 2 adet matris plakasına gereksinim olduğundan, bu işlem iki kere tekrarlanmıştır.

İki adet matris plakasının elde edilmesinden sonra kompozitin üretim aşamasına geçilmiştir. Kompozitin çekme yönündeki dayanımını ve rijitliğini yükseltmek amacıyla fiberlerin çekme yönünde, sürekli ve birbirlerine paralel olarak (eş yönlü fiberler) yönlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla demetler halindeki bükümsüz E-camı fiber demetleri bir gerdirme aparatı kullanılarak paralel şekilde dizilmiştir. Tüm demetlerin eş yönlü dizilimini ve eşit gerilme koşulunu sağlamak amacıyla her birinin ucuna, bu deneyler için tasarlanıp imal edilen 250 gramlık standart ağırlıklar asılmıştır. Bu şekilde fiberler deney amacına uygun biçimde Şekil 5.2’de gösterildiği gibi dizilmiştir.



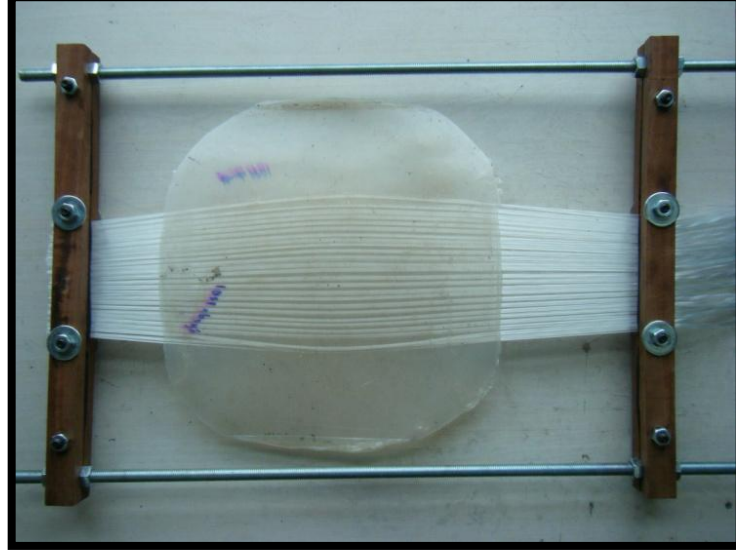
Şekil 5.2 Gerilen fiberlerin matris plakaları arasına yerleştirilmesi

Fiberler uygun bir şekilde dizildikten sonra gerdirme aparatı 2 matris plakasının arasına konularak, 180 derecede 3 dakika preslenmiştir. Presleme işlemi Şekil 5.3a'da verilmiştir. Bu süre seçilirken matris plakalarının eriyik veya akıcı hale gelip, fiber demetlerinin arasından geçip diğer matris plakası ile buluşması için gerekli süre optimizasyonu yapılmıştır. Daha sonra 3 dakika soğuk preste preslendikten (Şekil 5.3b) sonra soğuk hava üflenerek soğutulmuştur. Tam soğuma gerçekleşmeden kompozit numune plakalardan alınmamış ve fiber gerginliği bozulmamıştır.



Şekil 5.3 a) Sıcak izotermal presleme, b) soğuk izostatik presleme

Bu şekilde hazırlanan yapıştırıcısız numunelerden sonra yapıştırıcılı kompozitler benzer şekilde üretilmiştir. Polipropilen matris ile yapıştırıcı hammadde halindeyken harmanlanarak ergitilip, matris plakaları şeklinde hazırlanmıştır. Ardından dizili halde fiberler ile birlikte basılarak yapıştırıcılı kompozit plakalar oluşturulmuştur. Şekil 5.4'te preslenmiş ve soğutulmuş bir kompozit plakanın gergin hali görülmektedir.

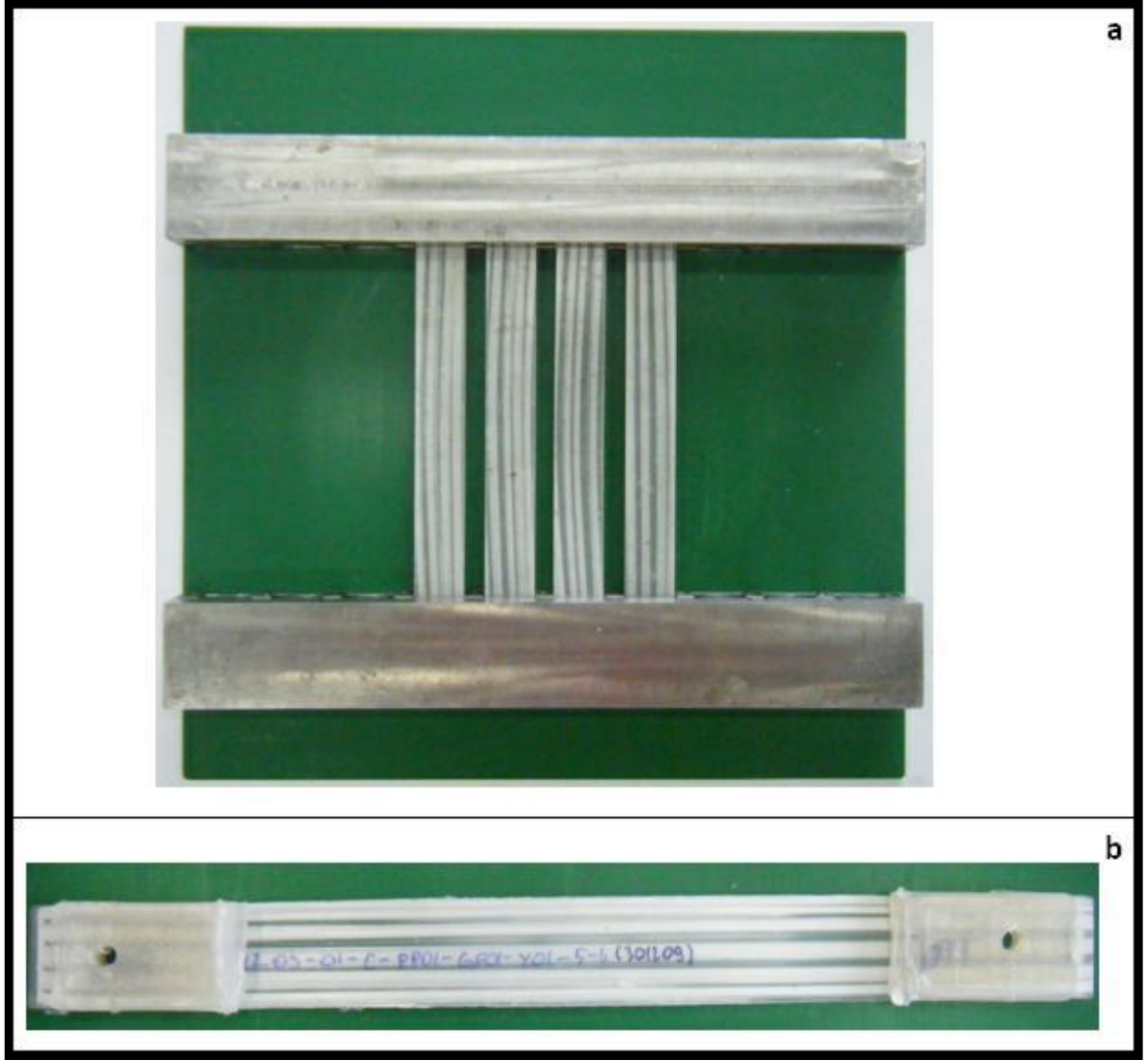


Şekil 5.4 Presten alınan kompozit plakasının gergin hali

Kompozit plakalarının hazırlanmasıyla çalışmanın ikinci aşamasına geçilmiştir. Numunelere ilk önce çekme testi daha sonra da kalsinasyon testi uygulanmıştır. Kompozit numuneler fiber yönüne paralel şekilde TS EN ISO 527-5'e göre çekme testine numune oluşturmak amacıyla kesilmiştir (Şekil 5.4a). Çekme numuneleri, standardın tek eksenli numuneler için önerdiği 250mm x 15mm boyutlarında, bu çalışma için özel olarak tasarlanan paslanmaz çelik kesme bıçağı ile Şekil 5.4b'de gösterildiği gibi düz tarzda elde edilmiştir.







Şekil 5.6 a) Uç desteği kalıbı, b) çekme testi numunesi

### 5.2.2 Çekme Deneyi

Çekme testi standartlarına uygun olarak hazırlanan numune çekme cihazına yerleştirildikten sonra yine standartta belirtilen 5mm/dakika hızda çekilmiştir. Şekil 5.7’de gösterilen MARES marka ve TST-SE-J-2T model çekme cihazı 20 kN yük kapasiteli olup,  $\pm\% 1$  N hassasiyete sahip ve kalibreli. Bilgisayar kontrollü olan çekme cihazı mekanik olarak çalışmaktadır. Teste başlamadan önce test hızı, ön yük miktarı, ön yük hızı ve numune boyutları programa girilerek, gerekli hesaplamalar test programı tarafından bu veriler doğrultusunda otomatik olarak hesaplanmaktadır. Çekme cihazı ısı altındaki mekanik davranışların karakterize edilmesinin ihtiyaç duyulduğu durumlarda kullanılmak üzere, 80°C’ye çıkabilen bir ısı kabinine sahiptir.



Şekil 5.7 Çekme cihazı

Program test bitiminde otomatik olarak çekme eğrisini çizmekte ve maksimum yükü, kopma anındaki yükü, %uzamayı ve kopma dayanımını vermektedir. Malzemenin taşıyabileceği yükü bulabilmek için, cihazın hesaplamış olduğu çekme dayanımı (MPa) kesit alanı ile çarpılarak yük (N) değeri hesaplanmıştır (Eşitlik 5.1).

$$\sigma = \frac{F}{mm^2} \quad (5.1)$$

Cihazda yapılan çekme testi esnasında bir numunenin kopma anı Şekil 5.8’de gösterilmektedir.



Şekil 5.8 Çekme testindeki kompozit bir numunenin kopma anı

### 5.2.3 Kalsinasyon Deneyi

Fiber hacim oranını saptamak amacıyla uygulanan kalsinasyon deneyi Şekil 5.9’da gösterilen Proterm Marka PLF 120/5 Model kül fırını kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Etkin ısı yalıtımının sağlandığı kül fırınında, seramik bazlı malzemedan oluşan iç hücre birinci yalıtım kademesini, dış kasa ile iç hücre arasında kalan hava ise ikinci yalıtım kademesini sağlamaktadır. Maksimum sıcaklığı 1200°C olan kül fırını yukarı doğru açılan kapak sistemine sahip olduğundan, yüksek sıcaklıklardaki çalışmalarda operatörü sıcaklıktan korumaktadır. İç hacmi 6 litre olan fırının rezistansları Kental A1 kalite olup, fırının her 2 yanında asılı olarak bulunmaktadır.



Şekil 5.9 Kül fırını

Polimer matrisli kompozitlerde fiber hacim oranları TS 1177 EN ISO 1172’de (EK-2) tanımlanan kalsinasyon testi ile belirlenmektedir. Kalsinasyon testi için numune, çekme testi uygulanmış numunelerin hasar görmemiş kısımlarından kesilerek krozelere alınmıştır. Krozelerin ağırlıkları numuneler konulmadan önce ve sonra tartılmıştır. Tartılan krozeler 650°C’deki kül fırınında yarım saat süre ile kalsine edilmiştir.

Kalsinasyon sonrası numuneler tekrar tartılarak; kalsinasyon öncesi ve sonrası kütle farkından yola çıkarak yanmayan madde, yani cam fiber içeriği kütle oran olarak (5.2) eşitliğinin yardımıyla bulunmuştur.

$$\%M_{Cam\ fiber} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (5.2)$$

Bu bağıntıda  $m_1$  kuru krozenin başlangıç kütleini (g),  $m_2$  kuru krozenin ve kurutulmuş numunenin başlangıç kütleini (g),  $m_3$  kroze ve kalsinasyon işleminden sonraki kalıntının son kütleini (g) ifade etmektedir.



Şekil 5.10 Kalsinasyon testi sonrası krozelerde kalan cam fiberler

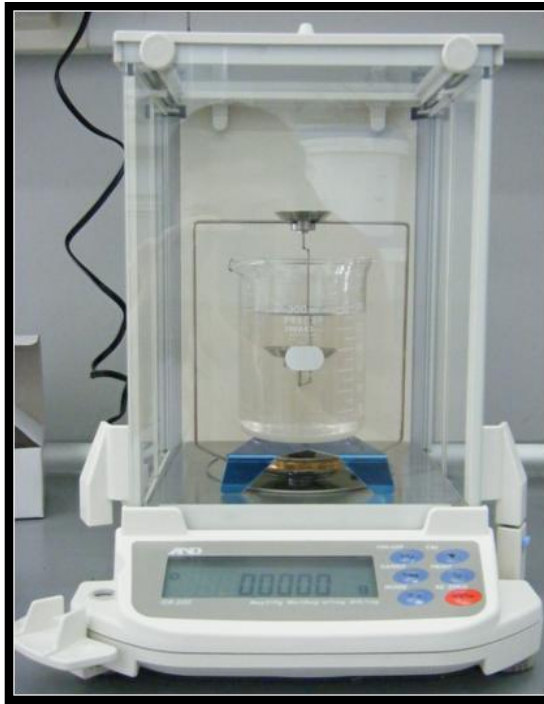
Matris ve fiber yoğunlukları da hesaba katılarak Eşitlik 5.2 kullanılarak kütle oranından, hacimsel orana ulaşılmıştır.

$$\% V_{fiber} = \frac{\frac{m_f}{\rho_f}}{\frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m}} \times 100 \quad (5.3)$$

Eşitlikteki  $\rho_f$  ve  $\rho_m$  sırasıyla fiber ve matrisin yoğunluklarını,  $m_f$  ve  $m_m$  sırasıyla fiber ve matrisin ağırlıklarını ifade etmektedir. Böylelikle kalsinasyon testi sonucunda, numunenin çekme değerini veren hacim oranı kesin olarak elde edilir. Bu hacim oranlarından hareketle kompozitin karakterizasyonu yapılmıştır.

#### 5.2.4 Yoğunluk Testi

Çekme testi sonrasında kesilen numunelerden ayrılan yoğunluk numuneleri TS EN ISO 1183-1'e (EK-3) göre yoğunluk testine tabi tutulmuştur. Yoğunluk testi için 210 gram kapasiteli AND marka GR200 model hassas terazi ve yoğunluk kiti kullanılmıştır. LCD göstergeli hassas terazi 0,001 hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir. Cihaz ortamdaki sıcaklık değişikliklerinde kendiliğinden devreye giren otomatik kalibrasyon fonksiyonuna sahiptir.



Şekil 5.11 Yoğunluk kiti

Deney numuneleri polimer olduğu için daldırma sıvısı olarak numunelerin batabileceği bir sıvı olarak etil alkol seçilmiştir. Kullanılan etil alkolün yoğunluğu deney öncesinde ortam sıcaklığına bağlı olarak bir kereye mahsus olmak üzere ölçölüp terazinin hafızasına kaydedilerek, deney süresince gerçekleşen ortam sıcaklığındaki değişimlere göre alkolün yoğunluk değişimi cihaz tarafından otomatik olarak değişmiştir.

Standartta belirtildiği gibi numunenin önce havadaki ağırlığı sonra bir daldırma sıvısı (etil alkol) içerisindeki ağırlığı ölçölmüştür. Yoğunluk değeri ise cihaz tarafından otomatik olarak hesaplanmıştır.

Yoğunluk testi sonucu elde edilen değerler ile karışımlar kuralından hesaplanan yoğunluk değerleri Eşitlik 5.4'teki formölde yerine konularak kompozit numunelerin boşluk hacmi ( $V_v$ ) değerlerine ulaşılmıştır.

$$V_v = \frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_t} \quad (5.4)$$

Förmölde  $V_v$ ,  $\rho_t$ ,  $\rho_d$  sırasıyla boşluk hacmini, teorik yoğunluğu (hesaplanan yoğunluk) ve deneysel olarak ölçölen yoğunluğu ifade etmektedir.

#### 5.2.5 Numunelerin İncelenmesi

Dayanım değerleri ve fiber hacim oranları belirlenen kompozitlerin kırık kesitleri muhafaza edilmiş ve çalışmanın sonunda stereo ışıık mikroskobunda ve SEM'de ayrı ayrı incelenmiştir. Bu inceleme Nikon SMZ645 marka stereo ışıık mikroskobunda gerçekleştirilmiştir. Gözlemin stereo mikroskobunda yapılmasının sebebi üç boyutlu görüntü vermesidir.





Şekil 5.12 Karakterizasyonda kullanılan stereo ışık mikroskobu

SEM incelemesi için JEOL marka JSM – 5410LV model tarama elektron mikroskobu kullanılmıştır. Numuneler 20 kV’da ve düşük vakum altında incelenmiştir.



Şekil 5.13 Karakterizasyonda kullanılan SEM



### 5.3 Deney Sonuçları

Bu tez çalışması kapsamında ilk önce kompozit plakalar üretilmiş, daha sonra bu kompozit plakalardan çekme deneyi numuneleri çıkarılmıştır. Çekme testi numuneleri standart numuneler olduğu için, daha fazla numune üretmemizi sağlayan en önemli kademe kompozit plaka üretimidir. Çizelge 5.1’de bir adet yapıştırıcısız kompozit numune üretmek için yapılan işlem kademeleri süreleriyle verilmiştir.

Çizelge 5.1 Yapıştırıcısız kompozitten 1 adet test numunesi üretmek için gerekli süre

| İş Kademeleri          | Yapılan İş                   | Süre (dk) | Sayı (adet) | Toplam Süre (dk) |
|------------------------|------------------------------|-----------|-------------|------------------|
| 1. Kademe              | Matris Plakası Üretimi       | 8         | 2           | 16               |
| 2. Kademe <sup>1</sup> | Fiberlerin Dizilmesi         | 25        | 30 (Ort.)   | 25               |
| 3. Kademe <sup>1</sup> | Fiberlerin Gerilmesi         | 40        | 30 (Ort.)   | 40               |
| 4. Kademe              | Kompozit Üretimi             | 15        | 1           | 15               |
| 5. Kademe              | Numune Kesimi                | 2         | 1           | 2                |
| 6. Kademe <sup>2</sup> | Uç Desteği Kesimi ve Üretimi | 12+4      | 12          | 16               |
| 7. Kademe              | Nihai Test Numunesi Üretimi  | 10+20     | 1           | 30               |
| 8. Kademe              | Numunelerin Temizlenmesi     | 2         | 1           | 2                |
| NET SÜRE               |                              |           |             | 146              |

<sup>1</sup>Tablodaki 2 ve 3’üncü iş kademelerinde bir kompozit numunesi üretimi için gerekli ortalama fiber adeti belirtilmekte ve kullanılan tüm fiberlerin tek bir işi göstermektedir.

<sup>2</sup>Bu kademede bir adet test numunesi üretmek için gerekli olan 12 adet uç desteği üretiminin toplam süresi verilmiştir.

Yapıştırıcılarla uyumlaştırılmış olan numunelerde ise; 1. Kademe yapıştırıcı ile PP'nin harmanlanması, matris plakalarının üretimi ve jelimatın temizlenmesi olmak üzere 3 aşamada gerçekleştirileceğinden yapıştırıcılı numune üretimi daha uzun süremektedir. Yapıştırıcılı matris plakalarının üretimi de yapıştırıcısızlarda olduğu gibi 16 dakika sürmekte olup; bu kademenin süresi esas olarak yapıştırıcı miktarına ve cinsine bağlı olduğundan, süreyi jelimatta yapılan uyumlaştırma aşaması belirlemektedir. Yapıştırıcı oranının daha az olduğu (%5 ve %10) numunelerde cihazın temizlenme işlemi PP hammaddesinde olduğu gibi sürmekte olup matris plakası üretimi içinde 16 dakika olarak belirlenmiş, bu süreye yapıştırıcı ve PP harmanlanması için 2 dakika eklenerek toplam süre 18 dakika olarak tespit edilmiştir. Ancak daha yüksek yapıştırıcı oranlarında ve özellikle Y05 kodlu yapıştırıcı kullanıldığında bu süre 30 dakikaya kadar çıkabilmektedir. Sonuç olarak, yapıştırıcılı kompozitlerden bir adet test numunesi elde etmek için geçen süre 143-165 dakika arasında değişmektedir (Çizelge 5.2).

Numune hazırlanmasından sonra delaminasyon ve fiber sıyrılması, ya da üretim prosesine bağlı olarak matrisin aşırı gözenekli olması ve fiberlerin süreksizliklerinin yüksek olması gibi çeşitli hataların gözlemlendiği numuneler en başta (çekme testine tabi tutulmadan) elenmiştir. Bunun yanı sıra numunelere uç desteği takılması esnasında, numunede işlemin kendisine veya operatöre bağlı olarak bozulmaların gerçekleştiği numuneler de iptal edilmiştir.

Çizelge 5.2 Yapıştırıcılı kompozitten 1 adet test numunesi üretmek için gerekli süre

| İş Kademeleri   | Yapılan İş                   | Süre (dk) | Sayı (adet) | Toplam Süre (dk) |
|-----------------|------------------------------|-----------|-------------|------------------|
| 1. Kademe       | Matrisin Harmanlanması       | 1         | 2           | 2                |
| 2.Kademe        | Matris Üretimi               | 8         | 2           | 16               |
| 3. Kademe       | Jelimatın Temizlenmesi       | 1-12      | 2           | 2 - 24           |
| 4. Kademe       | Fiberlerin Dizilmesi         | 25        | 30 (Ort.)   | 25               |
| 5. Kademe       | Fiberlerin Gerilmesi         | 40        | 30 (Ort.)   | 40               |
| 6. Kademe       | Kompozit Üretimi             | 10+5      | 1           | 15               |
| 7. Kademe       | Numune Kesimi                | 2         | 1           | 2                |
| 8. Kademe       | Uç Desteği Kesimi ve Üretimi | 10+4      | 6           | 14               |
| 9.Kademe        | Nihai Test Numunesi Üretimi  | 10+15     | 1           | 25               |
| 10. Kademe      | Numunelerin Temizlenmesi     | 2         | 1           | 2                |
| <b>NET SÜRE</b> |                              |           |             | <b>143 - 165</b> |

Çekme testi numunesi üretildikten sonra; numunenin o çekme değerine ait fiziksel özelliklerini tespit edebilmek amacıyla, aynı numuneden kalsinasyon ve yoğunluk numunesi çıkarılmıştır. Bu çalışmanın ilk etabı olan numune üretim aşamasından sonra mekanik ve fiziksel test aşamasına geçilmiştir. Çizelge 5.3'te tek bir numuneye ait test süreleri verilmiştir.

Çizelge 5.3 Tek bir numuneye ait test süreleri

| Yapılan                        | Süre (dk) | Toplam Süre (dk) |
|--------------------------------|-----------|------------------|
| Çekme Testi <sup>1</sup>       | 5 + 10    | 15               |
| Kalsinasyon Testi <sup>2</sup> | 120+45    | 165              |
| Yoğunluk Testi                 | 10        | 10               |
| Mikroskobik İnceleme           | 15 + 15   | 30               |
| NET SÜRE                       |           | 210              |

Çizelge 5.3'ten de görüleceği gibi tek bir numunenin teste tabi tutulması ve mikroskobik olarak incelenmesi 210 dakika sürmektedir.

#### 5.3.1 Çekme Testi Sonuçları

Çekme testi yapılırken, programın çizmesi istenilen grafiğin düşey ekseninin birimi MPa, yatay ekseninin birimi % olarak seçildiğinden; test bitiminde program otomatik olarak Dayanım (MPa) – Uzama (%) eğrisini çizmiştir. Aşağıdaki şekillerde sırasıyla PPH (Şekil 5.14), PPR (Şekil 5.15), %10 Y01 içeren PPR (Şekil 5.16) ve %10 Y05 içeren PPR (Şekil 5.17) numunelerine ait olan eğrilerin grafikleri verilmiştir.

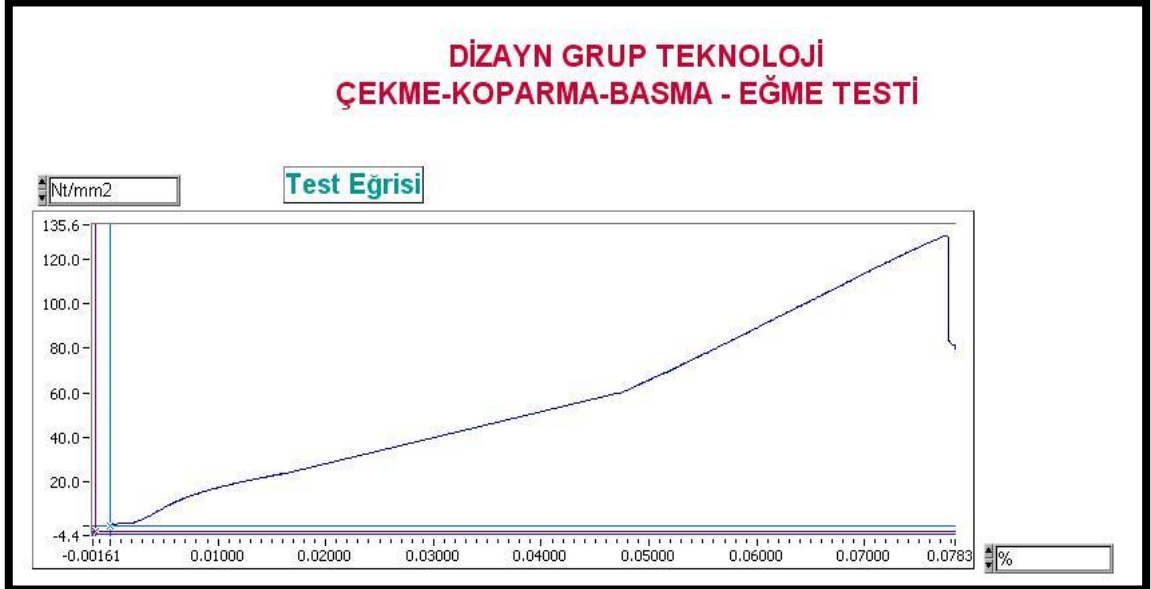
---

<sup>1</sup> Çekme testi için verilen ilk süre çekme testinin, ikinci süre ise çekme testi sonrası numuneden çıkarılan kalsinasyon ve yoğunluk numunelerinin hazırlanmasını göstermektedir.

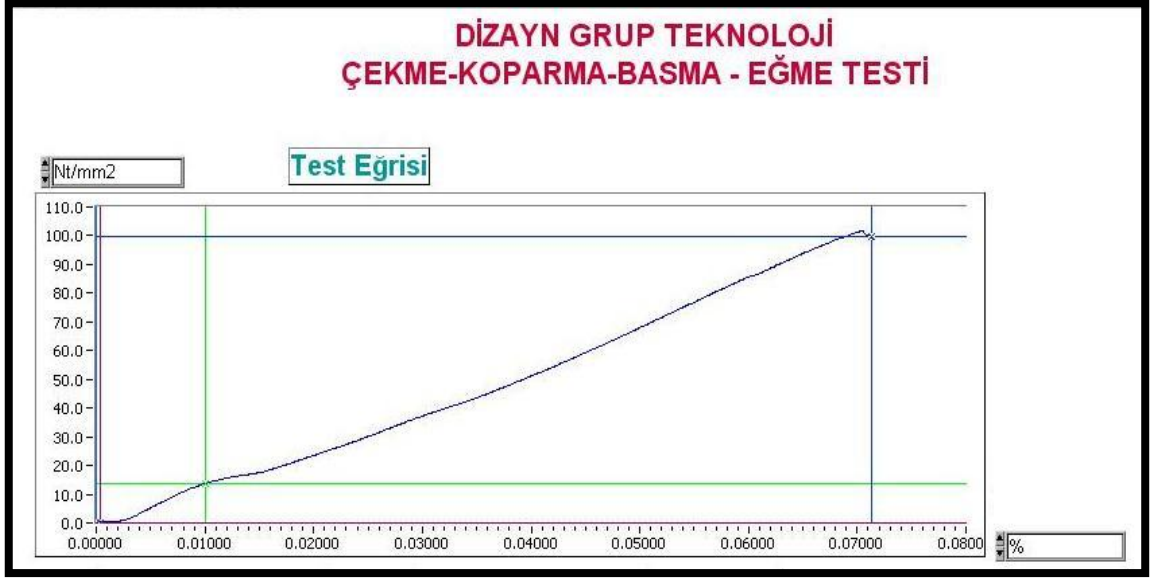
<sup>2</sup> Kalsinasyon testi esnasında fırına tek seferde 16 adet numune yerleştirilmektedir. Tabloda verilen süreler tek seferde yapılan kalsinasyon testine aittir, birim kalsinasyon süresi bulmak istenirse, toplam kalsinasyon süresi "16"ya bölünmelidir. Verilen sürelerden ilki kalsinasyon testi sırasında, ikincisi ise test sonrası fırının soğuması esnasında geçen süreleri belirtmektedir.



Şekil 5.14 Dayanım (MPa)-Uzama (%) cinsinden cihaz tarafından çizilen PPH grafiği



Şekil 5.15 Dayanım (MPa)-Uzama (%) cinsinden cihaz tarafından çizilen PPR grafiği



Şekil 5.16 Dayanım (MPa)-Uzama (%) cinsinden cihaz tarafından çizilen %10 Y01 yapıştırıcısı içeren PPR grafiği



Şekil 5.17 Dayanım (MPa)-Uzama (%) cinsinden cihaz tarafından çizilen %10 Y05 yapıştırıcısı içeren PPR grafiği

Çizelge 5.4'te her numune grubundan bir örneğe ait çekme dayanımlarını ve Eşitlik 5.1'e göre hesaplanan Newton (N) cinsinden elde edilen yük değerleri Çizelge 5.4'te örnek olarak verilmiştir.

Çizelge 5.4 Her numune grubuna ait çekme dayanımları ve yük değerleri

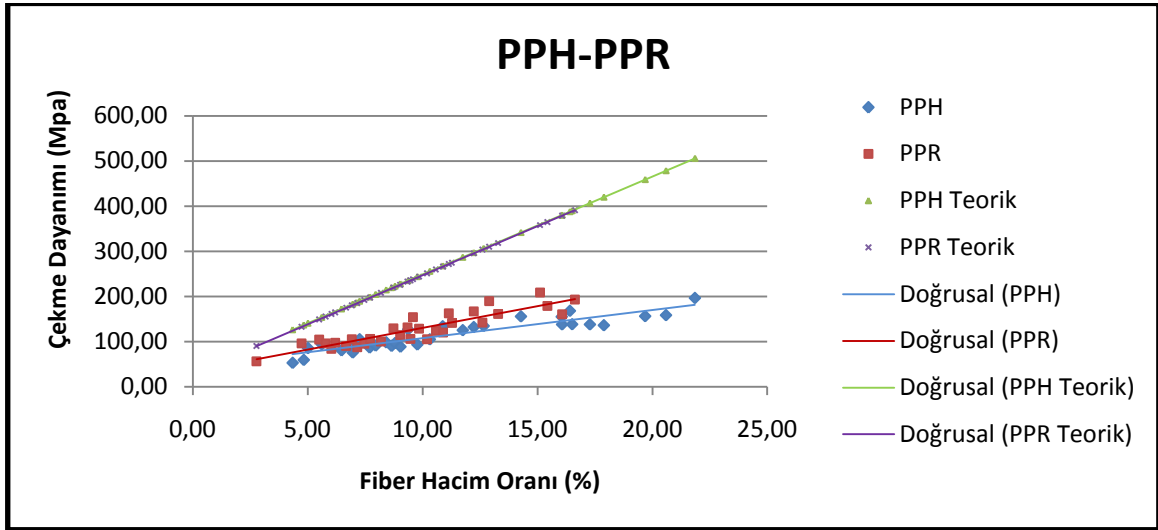
| Numune Kodu    | Genişlik<br>(mm) | Kalınlık<br>(mm) | Çekme Dayanımı<br>(Mpa) | Yük<br>(N) |
|----------------|------------------|------------------|-------------------------|------------|
| PPH-N05        | 15               | 1,25             | 82,21                   | 1541,438   |
| PPR-N08        | 15               | 2,23             | 55,92                   | 1870,524   |
| PPR-Y01-05-N08 | 15               | 1,02             | 121,94                  | 1865,682   |
| PPR-Y01-10-N06 | 15               | 1,35             | 121,67                  | 2463,818   |
| PPR-Y01-15-N01 | 15               | 1,07             | 138,68                  | 2225,814   |
| PPR-Y01-20-N04 | 15               | 1,31             | 143,33                  | 2816,435   |
| PPR-Y01-30-N02 | 15               | 1,35             | 135,83                  | 2750,558   |
| PPR-Y01-40-N07 | 15               | 1,49             | 139,77                  | 3123,86    |
| PPR-Y05-05-N01 | 15               | 1,37             | 80,22                   | 1648,521   |
| PPR-Y05-10-N05 | 15               | 1,12             | 134,66                  | 2262,288   |
| PPR-Y05-15-N03 | 15               | 1,11             | 100,18                  | 1667,997   |
| PPR-Y05-20-N05 | 15               | 1,46             | 112,11                  | 2455,209   |
| PPR-Y05-30-N01 | 15               | 0,90             | 197,91                  | 2671,785   |
| PPR-Y05-40-N06 | 15               | 0,77             | 351,64                  | 4061,442   |

Mekanik özelliklerle ilgili sağlıklı yorum yapabilmek için kompozitteki fiberin hacimce oranı bilinmelidir. Dolayısı ile kalsinasyon testi sonuçları olmadan çekme dayanımı hacim oranları ile birlikte ifade edilemez.

### 5.3.2 Kalsinasyon Testi Sonuçları

Yapılan kalsinasyon testi sonucunda her grup için Çekme dayanımı (MPa) – Fiber hacim oranı (%) grafikleri çizilmiştir ve hacim oranı arttıkça dayanım değerlerinin de arttığı gözlenmiştir. Laboratuar ölçekli, tek yönlü sürekli fiberli kompozit üretiminde üretim öncesinde fiber hacim oranını hesaplayabilmek mümkün değildir. Dizim esnasında daha seyrek veya sık dizilimler gerçekleşebilmektedir. Ayrıca ortalama aynı veya birbirine yakın fiber dizilimleri olduğu kabul edilse bile bu durumda fiber hacim oranını belirleyen faktör matris plakasının inceliği olacaktır. Bunun dışında preste kompozit plakayı oluştururken, presin yüksek basıncı ve sıcaklığın etkisinde matris plakalarının

merkezden dışa doğru eriyik akışı her ne kadar gergin durumda durursa dursun içteki fiberleri merkezden dışa doğru itmektedir. Dolayısıyla fiberler arasında açılmalar gerçekleşmekte ve buna bağlı olarak oluşan kompozitin hacim oranı da düşmektedir. Bu nedenle gerek kompozit plakalar gerekse aynı kompozit plakadan çıkan numunelerin her birinde farklı hacim oranları oluşmaktadır. Şekil 5.18’de yapıştırıcısız kompozit numunelerin kalsinasyon deneyi sonuçları çekme değerleri ile karşılaştırılmaktadır.

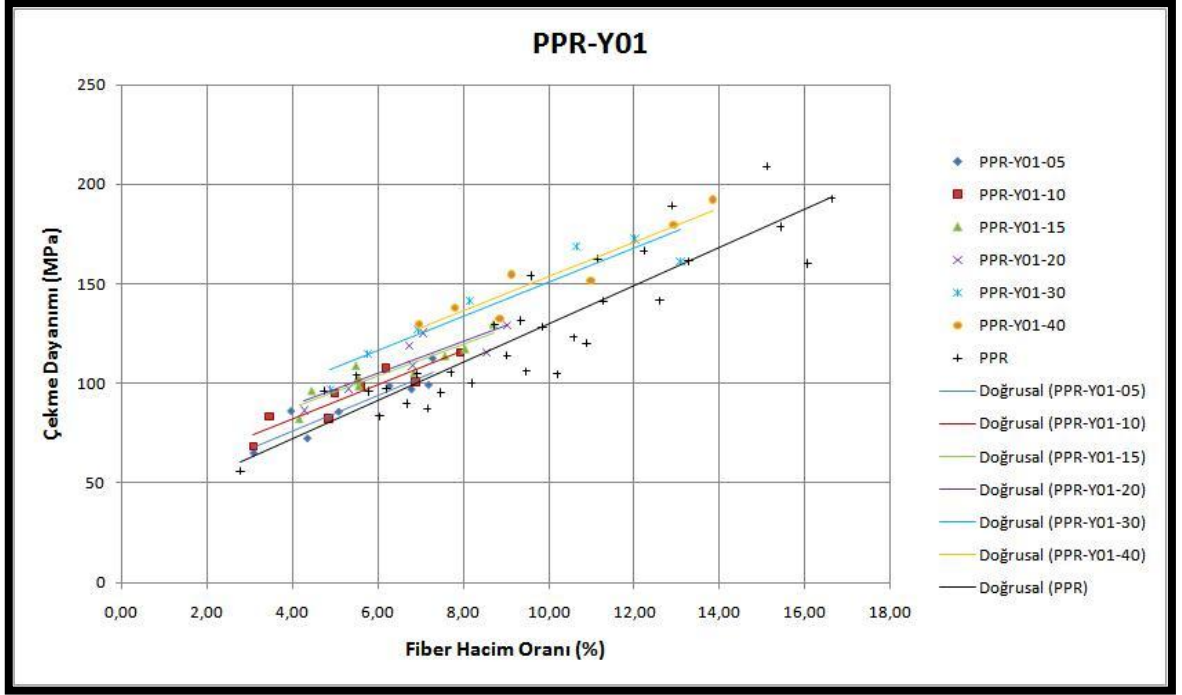


Şekil 5.18 PPH ile PPR'nin karşılaştırılması

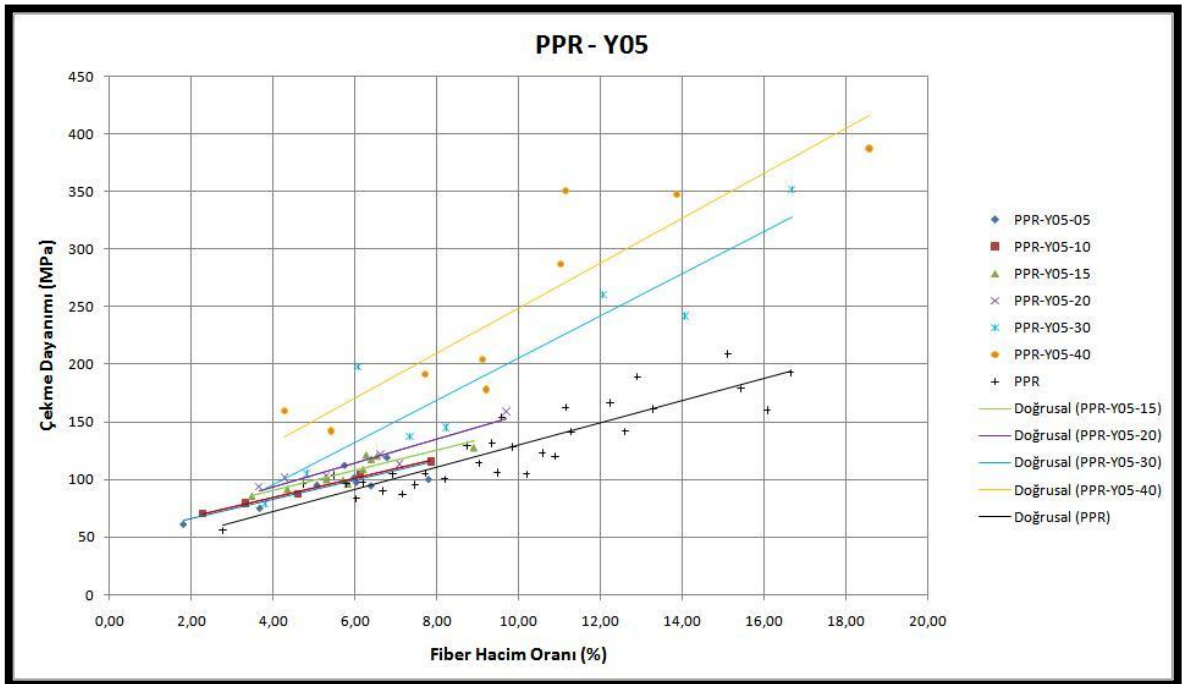
Yukarıdaki grafikten de görüleceği üzere PPH ve PPR kompozitlerin teorik dayanım değerlerini gösteren eğriler çakışmıştır. Bunun sebebi; kompozitte yükü taşıyan eleman olan fiberlerin dayanım değerinin termoplastik matrise göre çok yüksek olması sonucu, plastiğin kendi dayanımının, kompozit yapının dayanımı üzerinde etkili olmamasıdır. Bununla birlikte grafikte verilmiş olan teorik dayanım değerleri tam ıslatmanın gerçekleştiği durumlarda geçerlidir. Dolayısıyla deneysel çalışmalarda %100 ıslatma söz konusu olmadığından; bu çalışmanın sonunda teorik değerlere en çok yaklaşan matris-fiber çifti tespit edilecektir.

Deneylerin ilk aşamasından elde edilen sonuçlarda PPR'nin PPH'den daha iyi sonuç vermesinden dolayı, ikinci aşamada PPR yapıştırıcılarla harmanlanmıştır. Şekil 5.19'da ve Şekil 5.20'de sırasıyla, PPR'nin Y01 ve Y05 yapıştırıcılarıyla harmanlanmasıyla üretilen kompozitlerin **Dayanım-Hacim Oranı eğrileri**, PPR'ninkiyile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.





Şekil 5.19 PPR-Y01 numunelerine ait çekme dayanımı – hacim oranı eğrileri



Şekil 5.20 PPR-Y05 numunelerine ait çekme dayanımı – hacim oranı eğrileri

Bu bilgilerden yola çıkılarak PPR ile harmanlandığında en iyi sonuç veren yapıştırıcı türü ve oranı belirlenmiştir.

Çizelge 5.5'te çizilmiş olan grafiklerdeki doğruların denklemi, eğimi ve belirlilik katsayısı ( $r^2$ ) değerleri, 14 deney grubu için de verilmiştir.

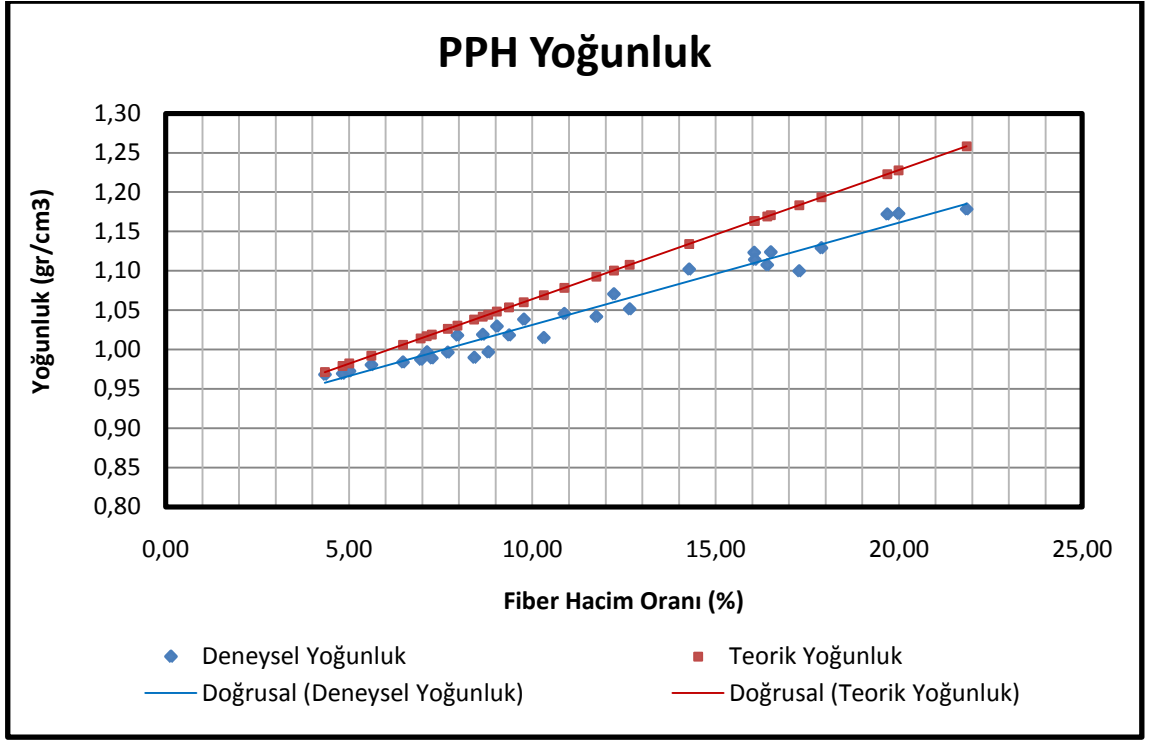
Çizelge 5.5 Numune gruplarına ait doğru denklemleri ve  $r^2$  değerleri

| NUMUNE | DOĞRU DENKLEMİ     | DOĞRUNUN EĞİMİ | $R^2$  |
|--------|--------------------|----------------|--------|
| PPH    | $y=6,2553x+44,625$ | 6,2553         | 0,8450 |
| PPR    | $y=9,6006x+34,087$ | 9,6006         | 0,8179 |
| Y01-05 | $y=8,9356x+40,685$ | 8,9356         | 0,8446 |
| Y01-10 | $y=8,6125x+47,802$ | 8,6125         | 0,8595 |
| Y01-15 | $y=7,8432x+56,825$ | 7,8432         | 0,8460 |
| Y01-20 | $y=7,9791x+57,267$ | 7,9791         | 0,7569 |
| Y01-30 | $y=8,5228x+65,671$ | 8,5228         | 0,8850 |
| Y01-40 | $y=8,6896x+66,74$  | 8,6896         | 0,8965 |
| Y05-05 | $y=8,3857x+49,398$ | 8,3857         | 0,7102 |
| Y05-10 | $y=8,278x+51,575$  | 8,2780         | 0,9914 |
| Y05-15 | $y=8,786x+55,204$  | 8,7860         | 0,7884 |
| Y05-20 | $y=10,225x+53,171$ | 10,2250        | 0,9128 |
| Y05-30 | $y=18,175x+24,287$ | 18,1750        | 0,8625 |
| Y05-40 | $y=17,944x+54,339$ | 17,9440        | 0,8947 |

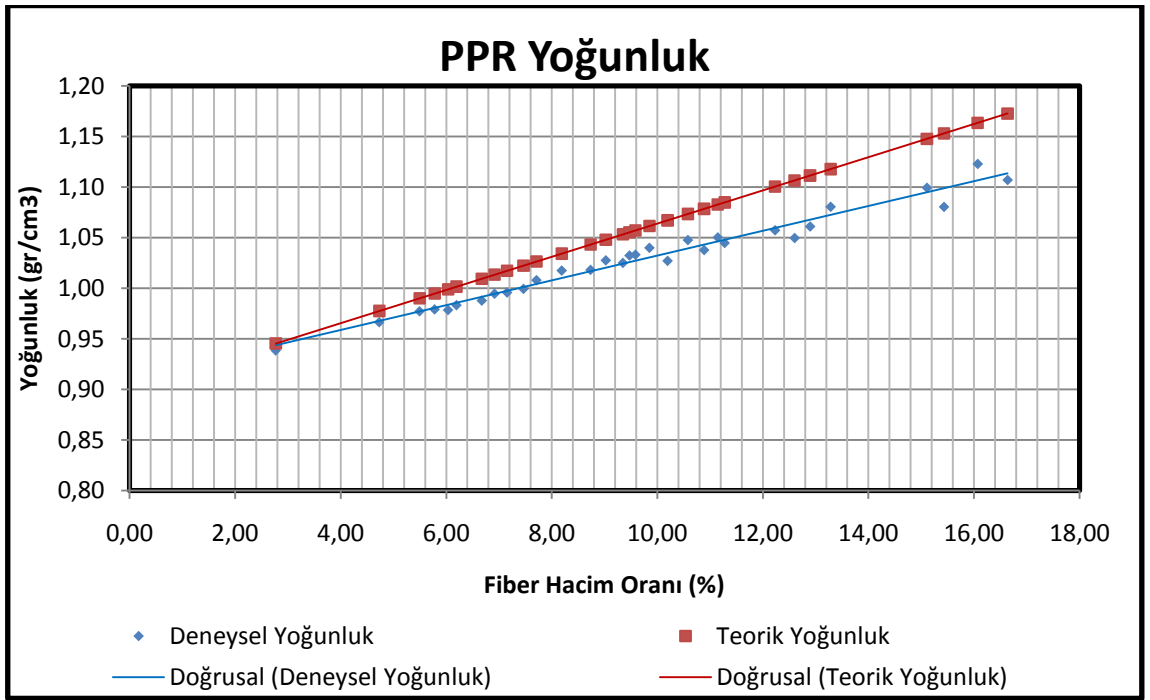
Bu değer bağımlı değişkenlerdeki değişimin bağımsız değişkence açıklanabilme oranını ifade eder. Burada hacim oranı bağımsız, çekme dayanımı bağımlı değişkenlerdir. Bu iki değer arasındaki ilişkinin uyumunu gösteren  $R^2$  değerinin 1'e yaklaşması, değerlerin kendi içinde uyumlu olduğunu göstermektedir. Bu da deney sonuçlarının başarılı olduğunu ifade eder.

### 5.3.3 Yoğunluk Testi Sonuçları

Kompozitlerin fiziksel karakterizasyonu için yoğunluk testi yapılmış; test sonrası elde edilen yoğunluk değeri ( $DY=d_{\text{deney}})$  ile Bölüm 2'de verilen karışımlar kuralına göre hesaplanan yoğunluk değeri ( $TY=d_{\text{teorik}}$ ) ile karşılaştırılmıştır. Aradaki fark boşluk hacmi olarak tanımlanmış ve kompozit numunelerin teorik yoğunluk değerlerine yaklaşma oranı irdelenmiştir. Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'de sırasıyla PPH ve PPR kompozitlerin  $d_t$  ve  $d_d$  değerleri, artan fiber hacim oranına göre kıyaslanmış, hacim oranı arttıkça teorik değerlerden uzaklaştığı görülmüştür.

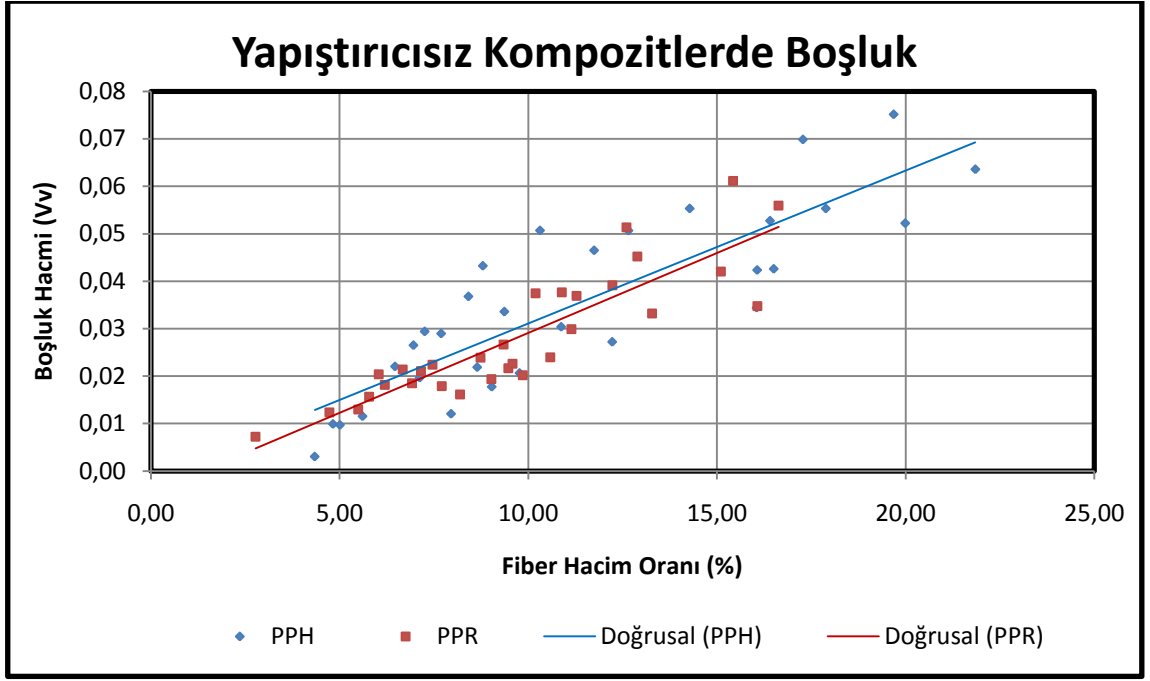


Şekil 5.21 PPH kompozitlerin  $d_t$  ve  $d_d$  değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 5.22 PPR kompozitlerin  $d_t$  ve  $d_d$  değerlerinin karşılaştırılması

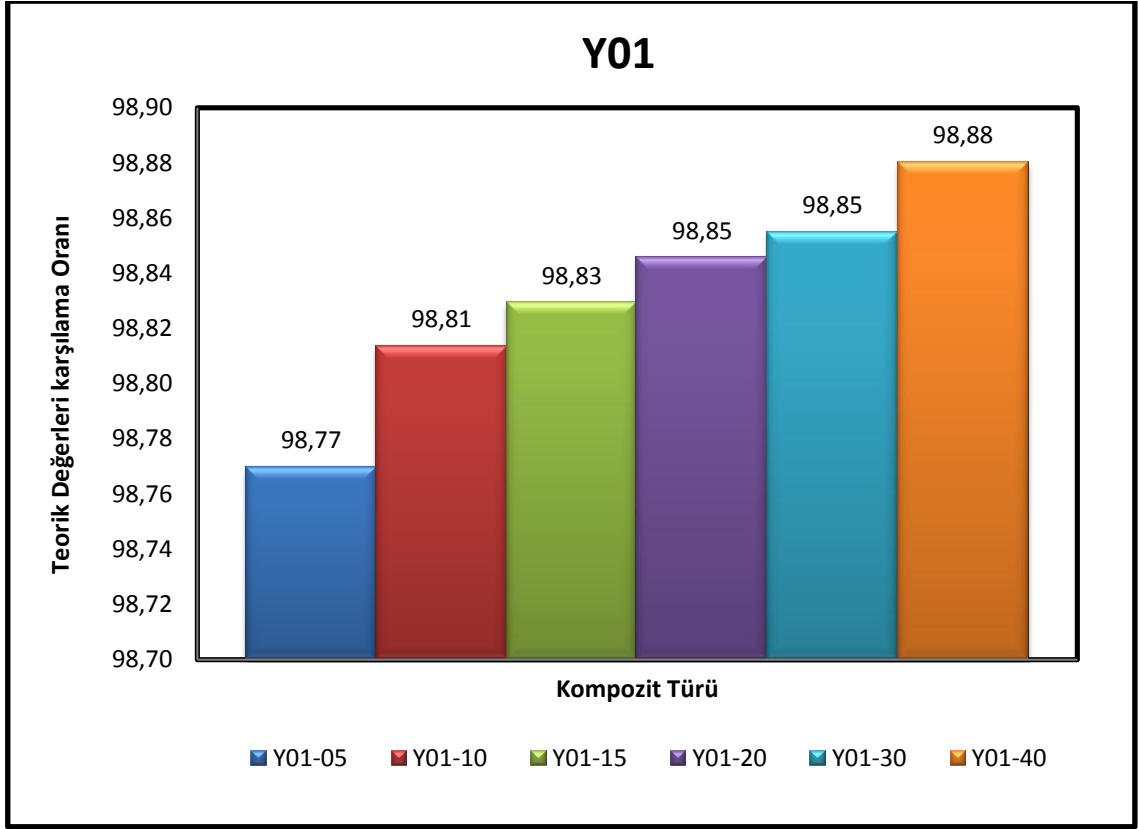
Şekil 5.23'te, yapıştırıcısız, yani PPH ve PPR kompozitlerde boşluk hacminin, kompozitin fiber hacim oranına göre değişimine ait grafik verilmiş; iki değer arasında doğrusal artan bir durum gözlenmiştir.



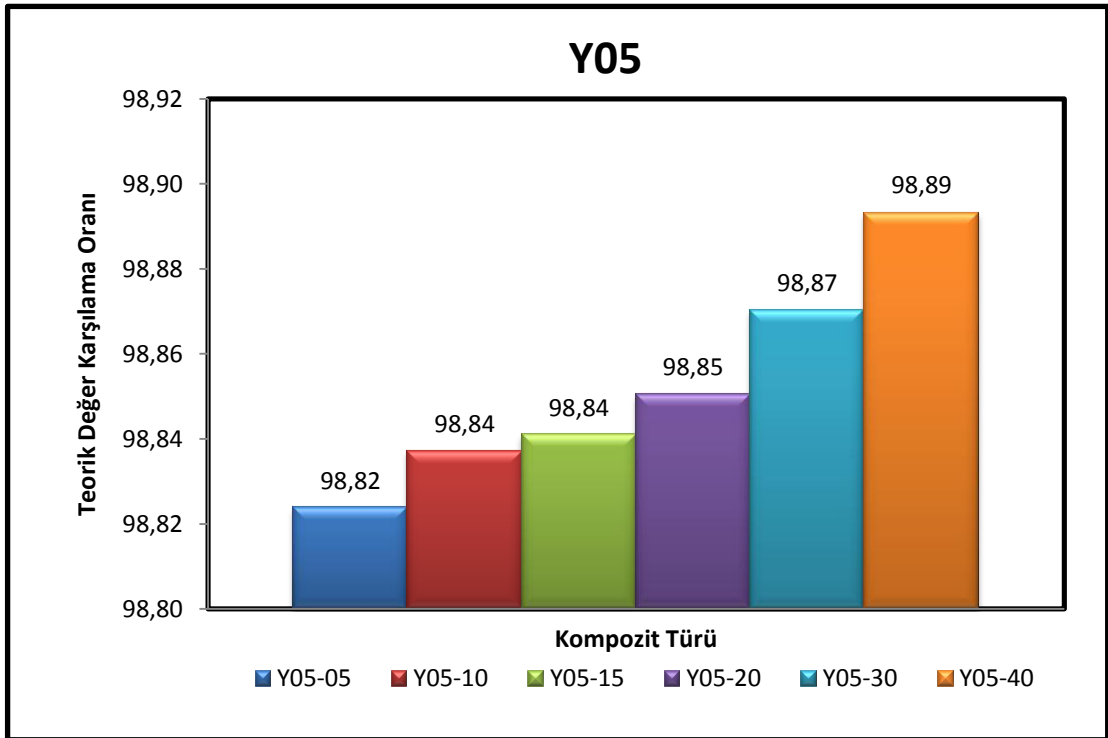
Şekil 5.23 Yapıştırıcısız kompozitlerde boşluk hacminin fiber hacmine göre değişimi

Yapıştırıcısız numunelerle yapılan çalışmalarda; artan fiber hacim oranıyla birlikte kompozit yapıdaki boşluk miktarının da arttığı, PPH kompozitin PPR kompozitten daha yüksek boşluk hacmine sahip olduğu görülmüştür.

Benzer şekilde yapıştırıcılı numunelerin de  $d_t$  ve  $d_d$  değerleri her iki yapıştırıcı grubunun her altı grubu içinde karşılaştırılmış, sonucunda numunelerin teorik değerleri karşılamalarına ilişkin grafikler elde edilmiştir. Şekil 5.24 ve Şekil 5.25 sırasıyla, Y01 ve Y05 kodlu kompozitlerin yapıştırıcı oranına göre teorik yoğunluk değerlerini karşılama oranları verilmiştir.

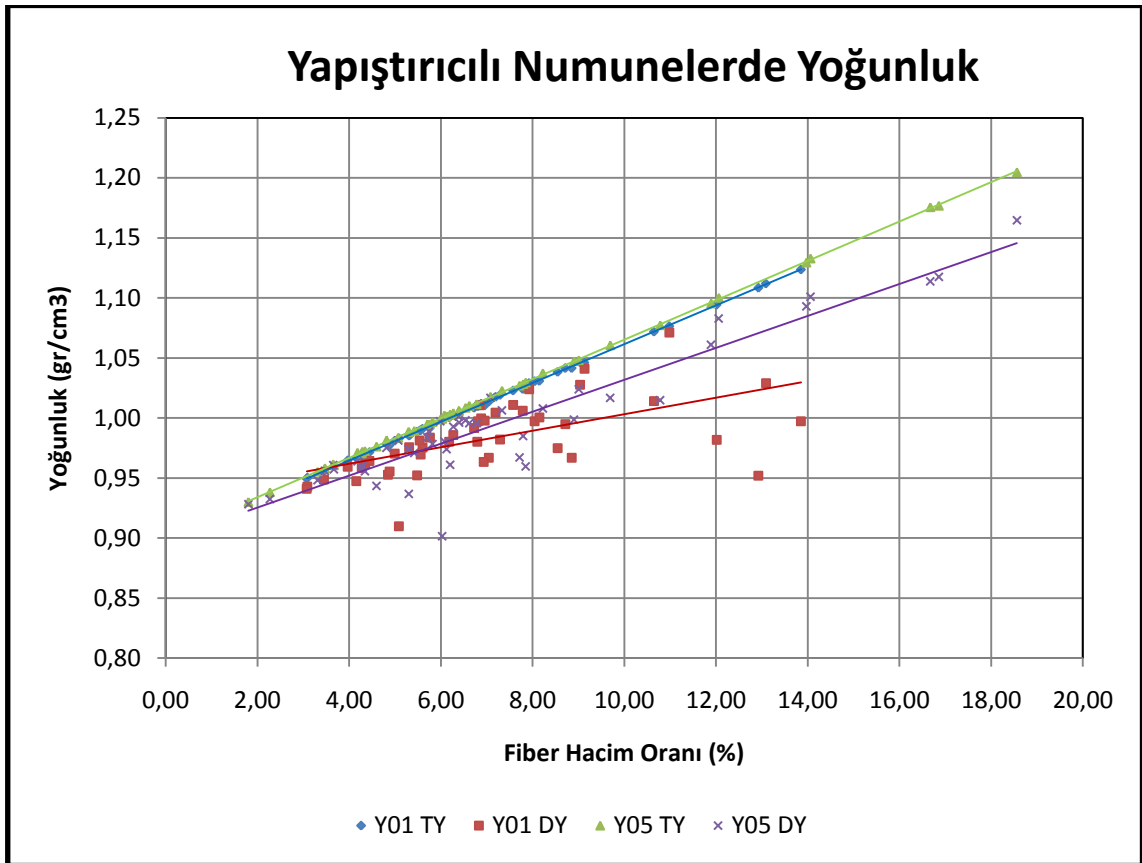


Şekil 5.24 Y01 kompozitlerin teorik yoğunluk değerlerini karşılama oranları



Şekil 5.25 Y05 kompozitlerin teorik yoğunluk değerlerini karşılama oranı

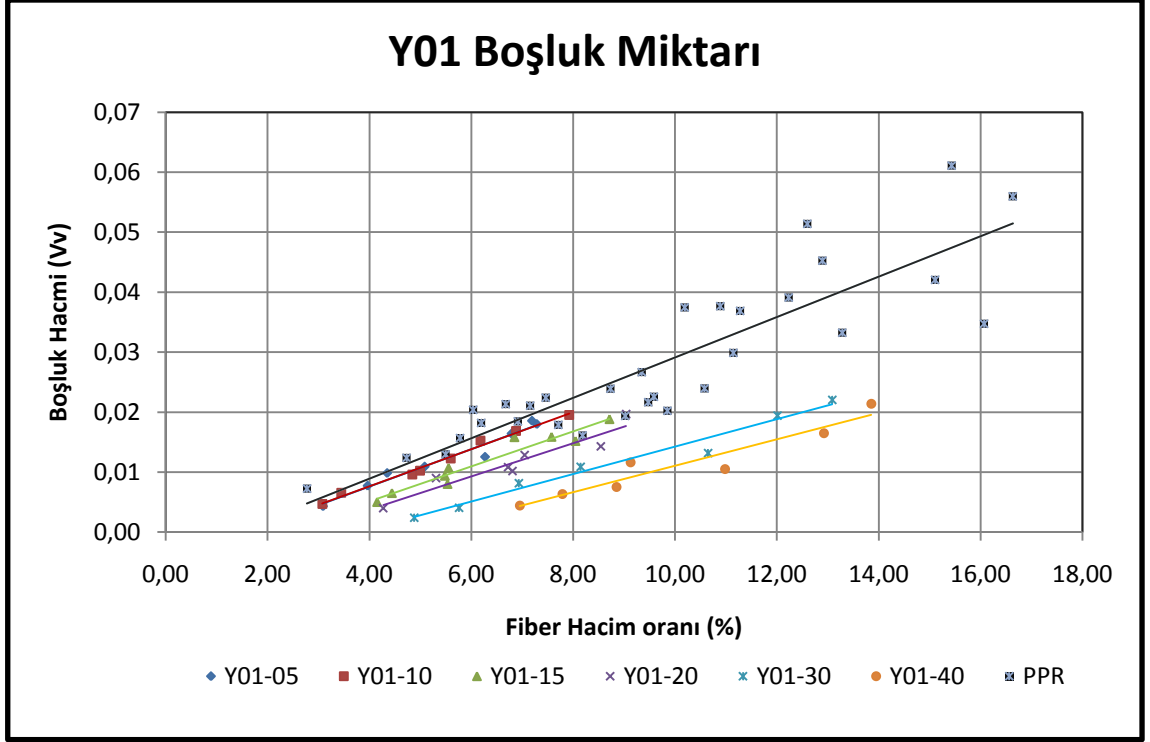
Şekil 5.24 ve 5.25'ten elde edilen sonuçlar doğrultusunda yapıştırıcı oranının,  $d_t$  ve  $d_d$  değerleri arasındaki ilişkide ihmal edilebilir olduğu gözlenmiştir. Buradan yola çıkılarak; yapıştırıcılı numuneler için yoğunluk değerlerinin hacim oranına göre değişimi irdelenirken, yapıştırıcı oranları dikkate alınmamıştır. Şekil 5.26'daki grafikte Y01 ve Y05 kodlu numunelerin teorik ve deneysel yoğunluk değerlerinin hacim oranına göre değişimleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafikte TY teorik yoğunluğu ( $d_{\text{teorik}}$ ), DY deneysel yoğunluğu ( $d_{\text{deneysel}}$ ) ifade etmektedir.



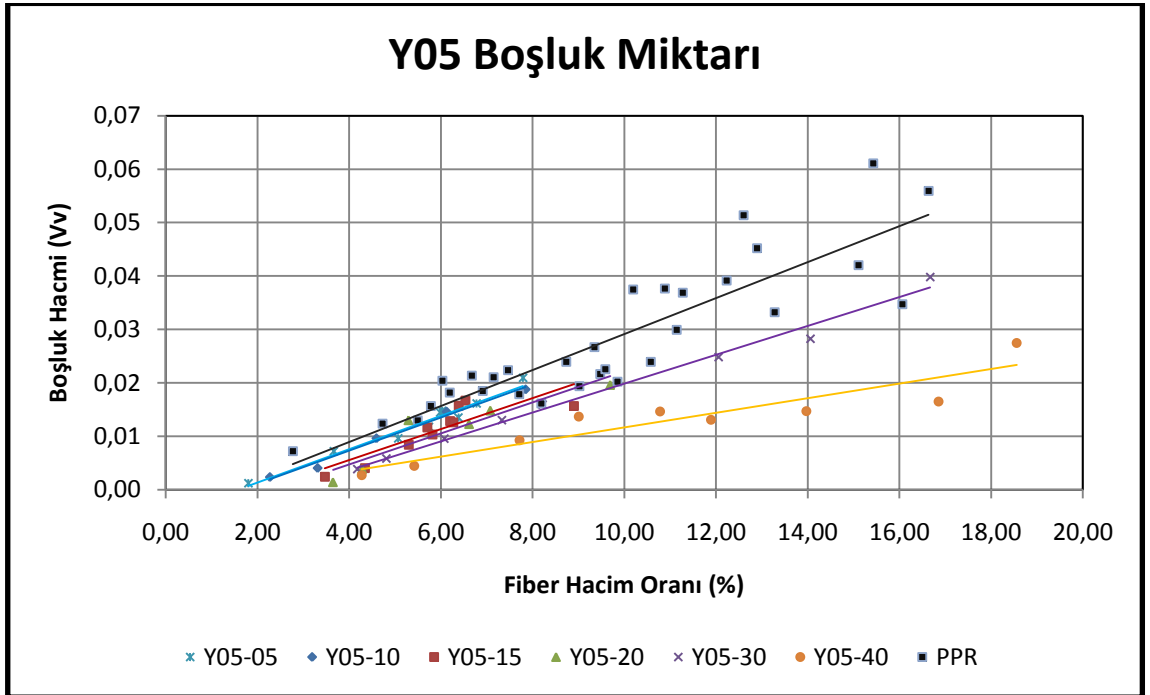
Şekil 5.26 Yapıştırıcılı numunelerde yoğunluk değerlerinin hacim oranına göre değişim grafikleri

Teorik yoğunluk ile deneysel yoğunluk arasındaki fark, kompozitin içerdiği boşluk miktarından kaynaklanmaktadır. Yapıdaki boşluk fiber-matris ara yüzeyinde oluşacağı için; fiberlerin matris tarafından ıslatılma durumları boşluk oluşumunu doğrudan etkileyecektir. Dolayısıyla, PPH ve PPR matriste karşılaşılan yüksek boşluk hacimlerini azaltmanın hedeflenmiş olduğu yapıştırıcılı numunelerde; yapıştırıcı oranı, boşluk hacmini etkileyecektir.

Yapıştırıcılı kompozitlerde bu durumu daha detaylı inceleyebilmek amacıyla yapıştırıcı oranlarına ait Boşluk Hacmi-Fiber Hacim Oranı grafikleri çizilmiştir. Şekil 5.27 ve 5.28’de sırasıyla Y01 ve Y05 kodlu numunelere ait grafikler verilmiştir.



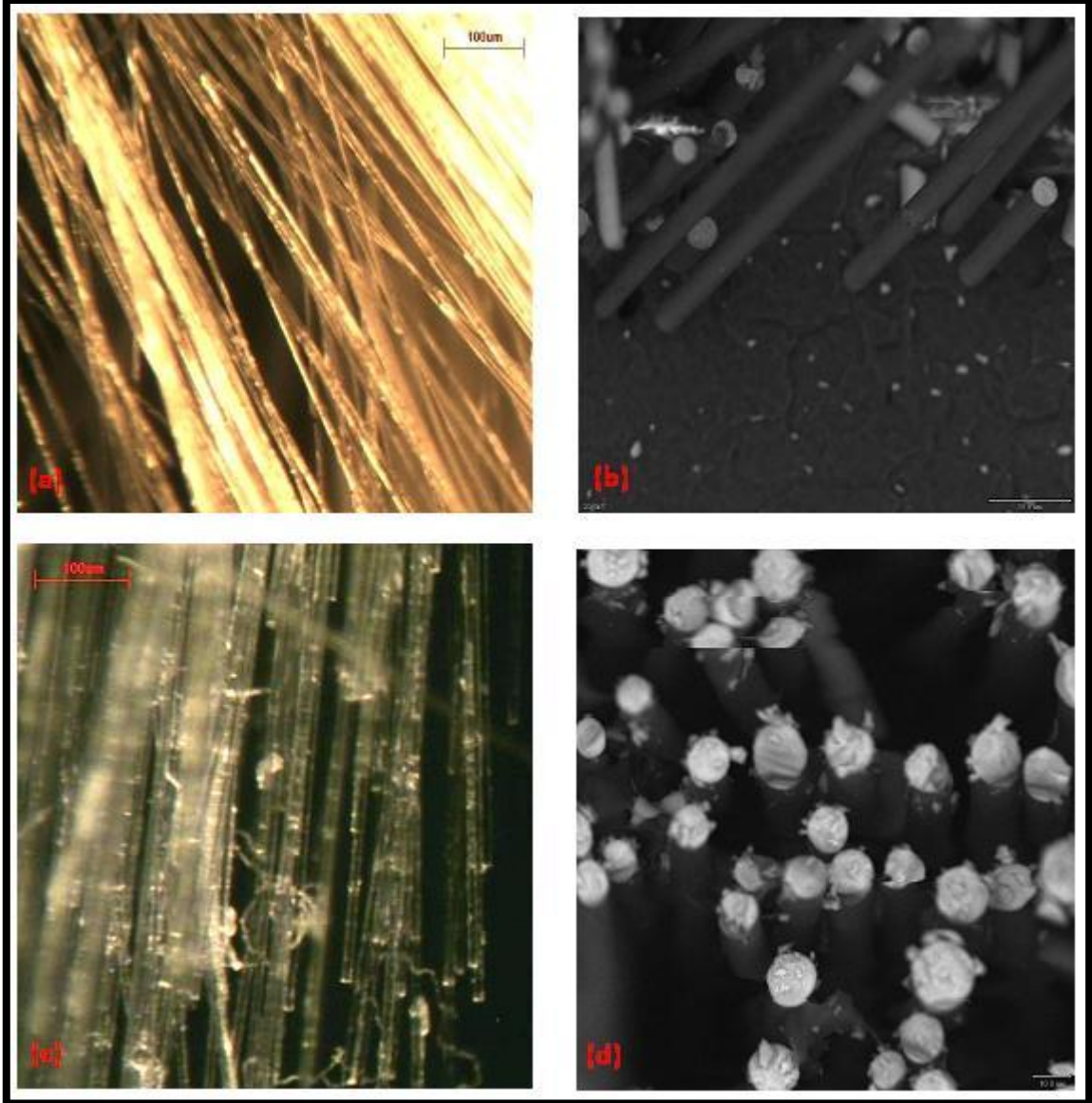
Şekil 5.27 Y01 grubu kompozitlerin boşluk oranının fiber hacim oranına göre değişimi



Şekil 5.28 Y05 kompozitlerde boşluk oranının fiber hacim oranına göre değişimi

### 5.3.4 Mikroskopik İnceleme

Şekil 5.29'da %10 hacim oranındaki PPH ve PPR kompozitlerin stereo ışık mikroskobu ve SEM görüntüleri verilmiştir.

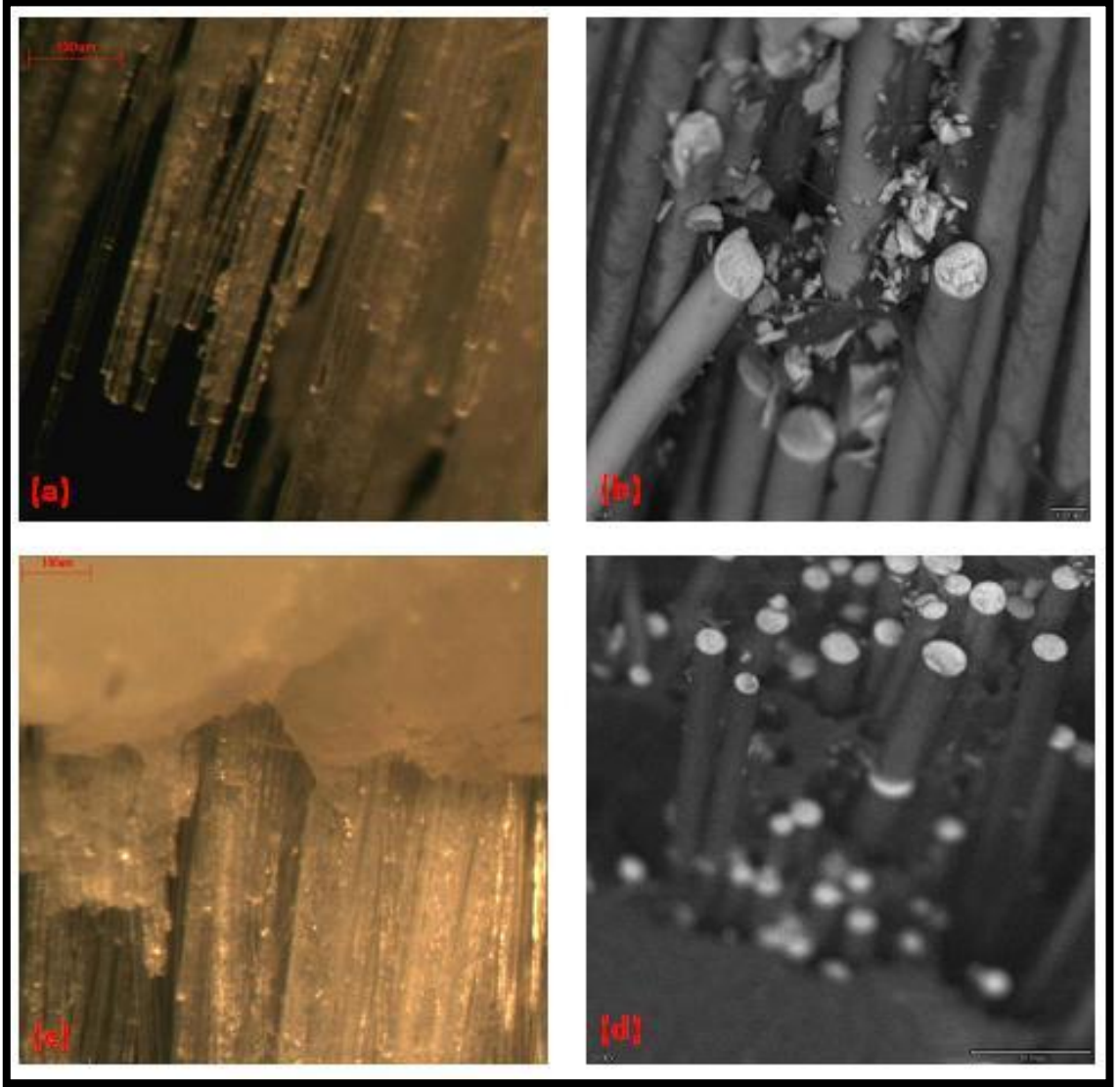


Şekil 5.29 Yapıştırıcısız kompozit numunelerin mikroskop görüntüleri ( $V_f$ :%10): a) PPH kompozit - stereo ışık mikroskobu, b) PPH kompozit - SEM, c) PPR kompozit – stereo ışık mikroskobu, d) PPR kompozit - SEM

Mikroskopik inceleme sonucunda, daha akışkan olan PPH matrisin dayanım değerlerinin daha düşük çıkmasının ıslatma probleminden kaynaklandığı teyit edilmiştir. Şekil 5.29a ve 5.29b'de görüldüğü üzere PPH matris fiber demetinin içine nüfus ettiği halde fiberlere sağlam yapışma sağlanamamıştır. PPR kompozitte ise



yapışmanın daha iyidir. Şekil 5.30'da ise %10 fiber hacim oranına sahip ve yapıştırıcı oranı %40 olan Y01 ve Y05 kodlu kompozitlerin mikroskop görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.30 Yapıştırıcı oranı %40 olan kompozit numunelerin mikroskop görüntüleri (Vf:%10): a) Y01 kodlu kompozit – stereo ışık mikroskobu, b) Y01 kodlu kompozit-SEM, c) Y05 kodlu kompozit – stereo ışık mikroskobu, d)Y05 kodlu kompozit - SEM

Şekil 5.29'daki yapıştırıcısız kompozitlerle aynı oranda fiber içeren iki farklı çeşit yapıştırıcıyla uyumlaştırılmış PPR kompozitlerin mikroskop görüntülerinde; yapışmanın daha iyi olduğu fiberler etrafındaki matris parçalarına bakılarak anlaşılabilmektedir. Yapışmanın daha iyi olduğu Y05'te, fiberler matrisin hemen koptuğu yerden kopmuş, matristen sıyrılmamıştır (fiber pull-out). Elde edilen bu görüntüler testlerin sonuçlarını doğrular niteliktedir.

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneylerde E-camı ile takviyelendirilmiş PPH ve PPR matris kullanılmıştır. Deneylerin ilerleyen aşamaları için 2 farklı üreticiye ait olmak üzere toplam 2 tür ticari yapıştırıcı seçilmiş, her bir yapıştırıcı türü için 6 adet yapıştırıcı oranı belirlenerek PPR matris harmanlanmıştır.

PPR için yapıştırıcılı 12 deney grubu (numune türü), yapıştırıcısız olarak (kontrol grubu) PPH ve PPR olmak üzere 2 deney grubu; toplamda 14 adet deney grubu oluşturulmuştur. Yapıştırıcı harmanlamasının PPR matris için yapılmasının temel çıkış noktası; PPR'nin PPH'ye göre teoriğe daha yakın dayanım değerleri olmasının saptanmasıdır. Yapılan deneysel çalışmalarla elde edilen eğriler ve ışık ve SEM mikroskobu görüntüleri de incelenerek aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Bölüm 5'te gösterilmiş olan Şekil 5.18'teki grafikte PPR kompozitlerde çekme dayanımı değerlerinin PPH kompozite göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak; kullanılan PPH'nin daha yüksek MFR (3.4 g/10dk) değerine sahip olması nedeniyle, sıcaklık ve basınç altında MFR değeri 0.28 g/10dk olan PPR'den daha fazla akış göstererek, fiberler üzerinde daha fazla yayılması ve fiberleri daha fazla ıslatması böylece daha yüksek dayanım değerlerine ulaşılması beklenmiştir. Ancak sonuçların bu beklentiyi karşılamamasından yola çıkılarak, PPR matrisin fiberlerin yüzey silanı ile daha iyi uyduğu sonucuna varılmıştır. Bu durumu destekler görüntü SEM fotoğraflarıyla da doğrulanmıştır. Öte yandan, PPH'nin daha akışkan olması nedeniyle, PPH kompozitlerde PPR kompozitlere göre daha yüksek hacim oranlarına ulaşılmıştır. Yüksek fiber

hacim oranları ise matrisin fiberleri ıslatmadığı görüldüğünden daha düşük dayanım değerleri elde edilmiştir.

2. MFR değeri düşük olan Y01 kodlu numunelerde; yapıştırıcısız olanlarda doğal olarak en düşük dayanç değerleri elde edilmiştir. %5 yapıştırıcı oranına sahip numunelerde (Y01-05), dayançta belirgin bir artış gözlenmemiş ve hacim oranı da %3-8 arasında elde edilmiştir. %10 yapıştırıcılı numunelerde (Y01-10), dayançtaki artışlar yapıştırıcısız numunelere göre daha belirgin olup (ortalama %5-10 artış), %3-8 arasında hacim oranına ulaşmıştır. Belirgin ve anlamlı artışlara %15 yapıştırıcı oranında ulaşmıştır. %15 ve %20 yapıştırıcılı numunelerin (Y01-15 ve Y01-20) dayanç değerleri birbirleriyle örtüşmekte olup, yapıştırıcısız numuneye göre yaklaşık %15-20 daha fazladır. Bu numunelerde elde edilen hacim oranları %4-9 arasındadır. Benzer şekilde %30 ve %40 yapıştırıcı oranlarında hazırlanmış (Y01-30 ve Y01-40) numunelerde de örtüşen sonuçlar elde edilmiştir. Bunlardaki artış ortalama %30 dolaylarında olup diğerine göre yüksek sayılan hacim oranına (%3-15) ulaşmıştır. En yüksek dayanım değerlerine %40 yapıştırıcı oranında ulaşılması ve %30 yapıştırıcılı numunelerin de çok az bir düşüş göstererek buna yakın sonuçlar vermesinden hareketle; Y01 kodlu yapıştırıcı için bu yapıştırıcı oranlarının optimum koşulları elde etmek için yeterli olduğu kanısına varılmıştır. Böylece; Y01 kodlu yapıştırıcının PPR ile harmanlanmasıyla üretilcek olan kompozitlerde tavsiye edilebilecek yapıştırıcı oranlarının %30-40 arasında olduğu sonucuna varılmıştır.
3. Y05 kodlu numuneler MFR değerleri daha yüksek numunelerdir. Burada da Y01 yapıştırıcılı numunelerin sonuçlarına benzer sonuçlar elde edilmiştir. %5 ve %10 oranlı yapıştırıcılar (Y05-05 ve Y05-10) için sonuçlar birbirinin benzeri olup, yapıştırıcısız kompozitlere göre dayanımdaki artış %5 civarındadır. Bunlarda elde edilen hacim oranları %2-8 arasındadır. %15 ve %20 oranlı yapıştırıcılar (Y05-15 ve Y05-20) için de yakın sonuçlar gözlenmiş, yapıştırıcısız numuneye göre %15 artış sağlanmıştır. Burada elde edilen hacim oranları ise %3-10 arasındadır. Esas artışlar %30 ve %40 yapıştırıcı oranlarında (Y05-30 ve Y05-40) gözlenmiştir. Burada, örneğin %12 hacim oranı için %100'e varan artışlar

izlenmiştir. Söz konusu oranlar için numunelerde elde edilen hacim oranları ise %4-18 arasındadır. Sonuç 2'ye benzer şekilde burada da en iyi sonuçlar %40 yapıştırıcı oranında elde edilmiş olup, %30 yapıştırıcı oranında elde edilen sonuçlardan %17 daha yüksek olduğu saptanmıştır.

4. Yapılan deneyler sonucunda Y05 kodlu numunelerin çekme dayanımlarının Y01'e göre daha yüksek olduğu ve her iki yapıştırıcı grubunda da en iyi değerleri %40 yapıştırıcı oranının verdiği görülmüştür. Örneğin %40 yapıştırıcı oranı için %10 hacim oranında; Y05 için 250 MPa, Y01 için 150 MPa elde edilmiştir. Benzer şekilde %15 hacim oranında Y05'te 350 MPa, Y01'de 180 MPa dayanım değerlerine ulaşılmıştır. Dayanımdaki bu artışlar göreceli olarak %80-90 arasındadır.
5. Deneyde kullanılan PP'lerin yoğunluğu ortalama  $0,90 \text{ gr/cm}^3$ , E-camının yoğunluğu ise  $2,54 \text{ gr/cm}^3$ 'tür. Karışımlar kuralı kullanılarak, PP matrisin içine katılan yapıştırıcının türü ve oranına göre, yoğunluğun değişim gösterdiği aralık  $0,8960\text{-}0,9036 \text{ gr/cm}^3$  olarak hesaplanmıştır. Bu küçük değişimlerin matris yoğunluğunu çok etkilemediği görülmüş, böylece elde edilen kompozitin yoğunluğuna etkisinin ihmal edilebilir düzeyde küçük olduğu belirlenmiştir. Buradan hareketle kompozitlerin esas yoğunluğunu fiberlerin belirlediği söylemi geçerli olmaktadır. Yapıştırıcılı ve yapıştırıcısız tüm deney parçalarında; hacim oranının artmasıyla yoğunluğun arttığı görülmektedir. Bu zaten karışımlar kuralına göre beklenen doğal sonuçtur.
6. Deneysel yoğunluğun teorik yoğunluğa göre düşüş göstermesinin nedeni, hacim oranına bağlı ıslatma probleminden kaynaklanan boşluk oluşumu ile açıklanabilir. PPH ve PPR numunelerin her ikisinde de %6 hacim oranına kadar belirgin farklar görülmemiştir. %6-20 aralığında ise; hacim oranının artmasıyla teorik yoğunluk ile deneysel yoğunluk arasındaki farkın arttığı gözlenmiştir. Bu artışın nedeni; termoplastik matrisli kompozitlerde fiber hacim oranının artmasına bağlı olarak matrisin tüm fiber yüzeylerine ulaşamayıp (infusion), net yapışmaların tam olarak gerçekleşememesi ile açıklanır. Net veya tam yapışmama durumu fiber matris ara yüzeyinde boşluk oluşumuna neden

olmaktadır. Deney sonuçlarındaki boşluk hacminin fiber hacim oranına göre değişimi gösteren grafikler göz önünde bulundurulduğunda; grafiklerin sonuçları doğrular nitelikte olup, artan hacim oranıyla birlikte arttığı gözlenmektedir.

7. Yapıştırıcılı numunelerde de deneysel yoğunluk değerleri yapıştırıcısızlara benzer bir eğilim göstermektedir. Numunelerin yoğunluğu fiber hacim oranı arttıkça artmakta; artan fiber hacim oranıyla birlikte olması gereken yoğunluk değerlerinden (teorik yoğunluk) uzaklaşmaktadır. Ancak Y05 kodlu numuneler deneylerde teorik değerlere daha yakın sonuçlar vermiştir. Özellikle %6 hacim oranından sonra, Y01 kodlu numunelere göre çok daha iyi sonuçlar sergilediği saptanmıştır. Yapıştırıcılı numunelerde teorik yoğunluk ile deneysel yoğunluk karşılaştırılması yapılmadan önce, her yapıştırıcı grubu kendi içinde kıyaslanmıştır. Hem Y01 hem de Y05 numunelerinde teorik değerleri karşılama oranı en yüksek olan yapıştırıcı oranı %40 olarak tespit edilmiş olmakla birlikte; aradaki farkın çok olmadığı dikkat çekmiştir. Buradan yola çıkılarak, teorik yoğunluk ile deneysel yoğunluk karşılaştırılırken yapıştırıcı oranının etkisi olmadığı söylenebilir.
8. Yapıştırıcı oranın önem kazandığı nokta ise boşluk hacminin incelemesi esnasında karşımıza çıkmaktadır. Burada da, yapıştırıcısız numunelerde olduğu gibi, artan hacim oranıyla birlikte boşluk hacmi de artış göstermektedir. Bu durum termoplastik matrisin yüksek hacim oranlarında fiberleri yeterince ıslatamamasından kaynaklanmaktadır. Ancak; yapıştırıcı oranının artmasıyla aynı fiber hacim oranlarında daha düşük boşluklar elde edilmiştir. Örneğin; Y01 numunelerinde %8 hacim oranında boşluk hacmi; Y01-05'te ve Y01-10'da 0,02 değerini, Y01-15'te ve Y01-20'de 0,02 ile 0,01 arasında değerler, Y01-30'da 0,01 değerini ve Y01-40'da 0,01'den düşük değerler almıştır. Dolayısıyla en az boşluk hacmi %40 yapıştırıcı oranında elde edilmiştir.
9. Y05 kodlu numuneler için de aynı durum geçerli olmakta olup; %40 yapıştırıcılı Y01 numuneleri 0,02 boşluk hacmine %14 fiber hacminde ulaşırken, bu değer Y05 numuneleri için %16 fiber hacim oranını bulmaktadır. Y05 kodlu

numunelerin daha iyi sonuçlar vermesi, Y05'in MFR değerin daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. MFR'ın yüksek olması akıcılığın göstergesi olduğundan; Y05'in, özellikle artan yapıştırıcı oranlarında, fiber demetinin içine işlemesi daha kolay olmaktadır. Sonuçta en az boşluk hacmine %40 Y05 ilave edilmiş kompozitlerde ulaşılmıştır.

10. Elde edilen deney sonuçları stereo ışık mikroskobu ve SEM görüntüleri ile de desteklenmiştir. Çalışmalarda ilk sonuçlar için stereo ışık mikroskobu görüntüleri fiber bazında yardımcı olurken; detaylı sonuçlar için SEM fotoğraflarının gerekliliği görülmüştür. SEM fotoğraflarında yapışmanın ne oranda gerçekleştiği daha gerçekçi bir şekilde görülebilmektedir.

Bu çalışmanın çıktıları laboratuvar ölçekli olmasına karşın; sonuçlar doğrudan endüstriyel ölçekli üretime dönüştürülebilir niteliktedir. Böylece iç basınç etkisi altındaki kaplar, tanklar, borular vb. uygulamalarda kullanılabilir. Ayrıca günümüz teknolojinin önemli iki cazip konusu olan; rüzgar türbünü ve insansız hava taşıtı uygulamaları için de temel oluşturacak niteliktedir.

Yapılan yüksek lisans tezi; daha sonra içinden yeni bir konu ya da konular doğuracak şekilde ucu açık deneysel esaslara dayalı, sonuçları uygulamaya yönelik bir çalışmadır. Daha sonraki aşamlarda yöntem ve gerekli donanımlar aynı kalarak, değişik termoplastik seçenekleri ile hem E-camının değişik türleri (keçe, dokuma, çok katlı tabakalar), hem de çeşitli fiberler denenerek yeni çalışmalara kolayca geçilebilir.

## KAYNAKLAR

---

- [1] Kaw, A.K., (2006), Mechanics of Composite Materials, 2nd Edition, Taylor&Francis Group, USA.
- [2] Jones, R.M., (1999), Mechanic of Composite Materials, 2nd Edition, Taylor&Francis Inc., USA.
- [3] Solmaz, M.Y. ve Gür, M., (2007), “Tabakalı kompozit Plakalarda Takviye Malzemesi ve Oryantasyon Açısının Gerilme Analizine Etkisi”, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, sf. 16-26, Elazığ.
- [4] Peters, S.T., (1998), Handbook of Composites, 2nd Edition, Chapman&Hall, Cambridge.
- [5] Mazumdar, S.K., (2002), Compoziters Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering, CRC Press LLC, Florida, USA.
- [6] Er, Ütgm. U., (2003). Havacılık Sanayinde Kullanılan Plastik Matrisli Kompozit Malzemeler, HUTEN, Hava Harp Okulu.
- [7] Şahin, Y., (2000), Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, Ankara.
- [8] Eserci, D., (2007), Alümina, Zirkonya ve Alümina-Zirkonya Kompozit Malzeme Üretimi, Karakterizasyonu ve Etkin Difüzyon Sabitinin Bulunması, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- [9] ABD Savunma Bakanlığı, (2002), Composite Materials Handbook Volume 5: Ceramic Matrix Composites, Yayın No:17-5, USA.
- [10] Agarwal B.D., Broutman L.J. ve Chandrashekhara K., (2006), Analysis and Performans of Fiber Composites, John Wiley&Sons Inc., Massachusetts, USA.
- [11] Derek H., (1991), An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [12] Chawla K.K, (1997), Composite Materials Science and Engineering, Springer-Verlag, New York, USA.
- [13] Gibson R.F., (1994), Principles of Composite Materials Mechanics, Mc Graw-Hill Inc., New York, USA.
- [14] Daniel I.M. ve Ishai O., (1994), Engineering Mechanics of Composite Materials, Oxford University Pres, Oxford, UK.

- [15] Strong A.B., (2008), Fundamentals of Composite Manufacturng Materials, Methods, and Applications, Society of Manufacturing Engineers, Michigan, USA.
- [16] Vinson J.R. ve Sierakowski R.L., (2002), The Behavior of Structures Composed of Composite Materials, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Hollanda.
- [17] Dave S.R. ve Loos A.C., (2000), Processing of Composites, Hanser/Gardner Publications Inc., Munich, Almanya.
- [18] Haris B., (1986), Engineering Composite Materials, The Institute of Metals, London, UK.
- [10] Jones R.M., (1999), Mechanics of Composite Materials, Taylor&Francis Inc., Philadelphia, USA.
- [19] Kollar L.P ve Springer G.S., (2003), Mechanics of Composite Structures, Cambridge University Pres, Cambridge, UK.
- [18] David, C.N. ve Clifford, G.H.,A Criteria and Indicators Approach to Community Development, <http://sfm-1.biology.ualberta.ca>, 21 Mart 2008.
- [19] ABD Savunma Bakanlığı, (2002), Composite Materials Handbook Volume 3: Polymer Matrix Composite Materials – Usage, Design and Analysis, Yayın No: MIL-HDBK 17-3F, USA.
- [20] Kelly, A. ve Zweben, C. H., (2000), Comprehensive Composite Materials (6 Volume Set) – 2: Polymer Matrix Composites, Pergamon Press, London, UK.
- [21] Hollaway, L. C. ve Head, P.R., (2001), Advanced Polymer Composites and Polymers in the Civil Infrastructure, Elsevier, USA.
- [22] Brydson, J. A., (1999), Plastic Materials 7th Edition, Butterworth-Heinmann, London, UK, 20-772.
- [23] Harper, C. A., (2004), Handbok of Plastics, Elastomers and Composites, 4th Edition, McGraw-Hill, New York, USA, 112-321.
- [24] Crawford, R. J., (2002), Plastics Engineering, 3rd Edition, Butterworth-Heinmann, London, UK, 168-182.
- [25] Ellis, C., (1937), “Chemistry of Polyester Resins”, US Patent No: 2.255.313, USA.
- [26] Polyolefin, Encyclopedia Britannica, <http://www.britannica.com>, 15.01.2011.
- [27] Fink, J. K., (2010), Handbook of Engineering and Speciality Thermoplastics – Vol 1: Polyolefins and Styrenics, Wiley&Sons Inc., Massachussetts, USA, 43-84.
- [28] Harrocks, A. R. Ve Anand, S. C., (2000), Handbook of Technical Textiles, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK.
- [29] Ekrem, M., (2006), Cam Kumaş Takviyeli Temoplastik Kompozitlerin Mekanik Özellikleri ve Kırılma Davranışları, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 13-14.



- [30] Kissel, W. J., Han, J. H. ve Meyer, J. A., (1999), "Polypropylene: Structure, Properties, manufacturing", Derleyen: Karian, H. G., (2003), Handbook Of Polypropylene and Polypropylene Composites 2nd Edition (Revised and Expanded), Marcel Dekker Inc., New York, USA, 10-16.
- [31] Tripathi, D., (2002), Practical Guide to Polypropylene, Rapra Technology Ltd. Shrewsbury, UK, 9-16.
- [32] Folland, R. ve Karlsson, H., (1996), "High Performance Polypropylene for Thermoforming", Kunststoffe Plast Europe, 86(8):1150-1152.
- [33] Mappleston, P., (1995), "Liquid Injection Opens Medical and Technical Markets", Modern Plastic International, 25(3):44-47.
- [34] Maier, C. ve Calafut, T., (1998), Polypropylene: The Definitive User's Guide and Databook, William Andrew Publishing, New York, USA, 14-20.
- [35] Paulik, C., Gahlietner, M. ve Neissel, W., (1996), "Flexible, tough and Resilient Polypropylene Copolymers", Kunststoffe Plast Europe, 86(8):1144-1147.
- [36] Baker, A., Dutton, S. ve Kelly, S., (2004), Composite Materials for Aircraft Structures 2nd Edition, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Virginia, USA.
- [37] Demirel, A., (2007), Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 5-18.
- [38] Thomanson, J.L., "Mechanical And Thermal Properties Of Long Glass Fiber Reinforced Polypropylene", Derleyen: Karger-Kocsis, J., (1999), Polypropylene: An A – Z Reference, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Hollanda, 407-414.
- [39] ABD Savunma Bakanlığı, (1991), Military Handbook: Plastic Matrix Composites with Continuous Fiber Reinforcement, Yayın No: MIL-HDBK 754AR, USA, 61-80.
- [41] AGY, (2004), "E-Glass Product Information", South Carolina, USA, <http://www.ayg.com>, 23 Eylül 2009.
- [42] Horne, D. F., (1986), Aircraft Production Technology, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [42] AGY,(2004), "S2 Glass Product Information", South Carolina, USA, <http://www.agy.com>, 23 Eylül 2009.
- [43] Philips N. L.,(1989), Design with Advance Composite Materials, Springer-Verlag, The Design Council, UK., Derleyen: Younnossi O., Kennedy M., Graser J. C. I., (2001), Military Airframe Costs The Effects of Advanced Materials and Manufacturing Processes, Project Air Force, RAND, Pittsburg, USA.
- [53] ASM International Handbook Comitee, (2001), ASM Handbook 21: Composites, USA.
- [54] Cam Elyaf Takviyeli Plastikler, <http://www.makine model.com>, (Ekim 2010).

- [55] Johnson, A. F., (1986), Engineered Design and Properties of GRP, The British Plastics Federation, London, UK.
- [56] Aström, B. T., (1997), Manufacturing of Polymer Composites, Chapman&Hall, London, UK.
- [57] Hull D. ve Clyne T., (1996), An Introduction To Composite Materials, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [58] Mantell, S.C. ve Cohen, D., (2000), "Filament Winding", Derleyen: Dave, R. S. ve Loos, A. C., (2000), Processing of Composites, Hansen, Munich, Almanya, 388-418.
- [59] Kompozit Üretim Yöntemleri, [www.globalcomposites.com](http://www.globalcomposites.com), (Ekim 2010).

**TEK YÖNLÜ ELYAF TAKVİYELİ PLASTİK KOMPOZİTLER İÇİN DENEY ŞARTLARI****Ön söz**

Bu standard, CEN tarafından hazırlanan EN ISO 527-5:1997 standardı esas alınarak, TSE Petrokimyaİhtisas Grubu’nca hazırlanmış ve TSE Teknik Kurulu’nun 27 Şubat 2007 tarihli toplantısında TürkStandardı olarak kabul edilerek yayımına karar verilmiştir.

- EN ISO 527 standardı, “Plâstikler – Çekme özelliklerinin tayini” genel başlığı altında, aşağıdakibölümlerden meydana gelmiştir.
- Bölüm 1 – Genel prensipler
- Bölüm 2 – Kalıplama ve ekstrüzyon plâstikleri için deney şartları
- Bölüm 3 – Levha ve film için deney şartları
- Bölüm 4 – İzotropik ve ortotropik elyaf takviyeli plâstik kompozitler için deney şartları
- Bölüm 5 – Tek yönlü elyaf takviyeli plâstik kompozitler için deney şartları
- Ek A bu standardın ayrılmaz bir parçasıdır.
- Ek B sadece bilgi için verilmiştir.
- Atıf yapılan uluslar arası standartlar Ek ZA’da verilmiştir.
- Bu standardda kullanılan bazı kelime ve/veya ifadeler patent haklarına konu olabilir. Böyle bir patenthakkının belirlenmesi durumunda TSE sorumlu tutulamaz.

**1 Kapsam**

**1.1** Bu standard, EN ISO 527-1’de verilen genel prensipler esas alınarak hazırlanan tek yönlü elyaftakviyeli plâstik kompozitlerin çekme özelliklerinin tayini için deney şartlarını kapsar.

**1.2** EN ISO 527-1, Madde 1.2’ye bakınız.

**1.3** Deney metodu kopma deneyi dâhil, bu standardda verilen özellikleri sağlayan tek yönlü elyaftakviyeli bütün polimer matriks sistemler için uygundur.

Deney metodu ön emprenye edilmiş (prepregs) malzemeler dâhil, termoplastik veya termoset matrikslikompozitler için uygundur. Takviye malzemeleri, karbon elyaf, cam elyaf, aramid elyaf ve diğer benzerelyafları kapsar. Takviye malzemesi geometrisi, tek yönlü (tam olarak yönlendirilmiş) elyaf ile fitil ve tek yönlükumaşlar ile bantları ihtiva eder.

Metot, normal olarak, farklı açılarda tek yönlü katlardan meydana gelen çok yönlü malzemeler için uygundur (bk.ISO 527-4).

**1.4** Deney metodu, elyaf yönüne (bk.Madde 6) bağlı olarak uygulanan gerilme yönü esas alınarak iki ayrıtip deney parçasından biri kullanılarak gerçekleştirilir.

**1.5** EN ISO 527-1, Madde 1.5'e bakınız.

## 2 Atıf yapılan standard ve/veya dokümanlar

Bu standardda, tarih belirtilerek veya belirtilmeksizin diğer standard ve/veya dokümanlara atıf yapılmaktadır.Bu atıflar metin içerisinde uygun yerlerde belirtilmiş ve aşağıda liste hâlinde verilmiştir. Tarih belirtilenatıflarda daha sonra yapılan tadil veya revizyonlar, atıf yapan bu standardda da tadil veya revizyon yapılmasışartı ile uygulanır. Atıf yapılan standard ve/veya dokümanın tarihinin belirtilmemesi hâlinde en son baskısıkullanılır.

| EN, ISO, IEC vb. No | Adı (İngilizce)                                                                                                                            | TS No <sup>1)</sup>    | Adı (Türkçe)                                                                                                                                           |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EN ISO 527-1        | Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles                                                                | TS 1398-1 EN ISO 527-1 | Plastikler - Çekme özelliklerinin tayini - Bölüm 1: Genel prensipler                                                                                   |
| EN ISO 527-4        | Plastics - Determination of tensile properties - Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites | TS EN ISO 527-4        | Plastikler - Çekme özelliklerinin tayini - Bölüm 4:- İzotropik ve ortotropik elyaf takviyeli plastik kompozitler için deney şartları                   |
| ISO 1268*           | Preparation of glass fibre, reinforced, resin bonded, low-pressure laminated plates or panels for test purposes                            | TS 3783                | Plastikler - Cam elyaf ile pekiştirilmiş, reçine bağlayıcıllı alçak basınçta katı olarak imal edilmiş plâka veya levhaların deneyler için hazırlanması |
| ISO 2818            | Plastics - Preparation of test specimens by machining                                                                                      | TS 3779 EN ISO 2818    | Plastikler - Deney parçalarının makina ile işlenerek hazırlanması                                                                                      |
| ISO 3534-1          | Statistics - Vocabulary and symbols - Part 1: Probability and General Statistical Terms                                                    | TS 11633 ISO 3534-1    | İstatistik - Terimler ve semboller - Bölüm 1: Olasılık ve genel istatistik terimleri                                                                   |
| ISO 9291            | Textile-glass-reinforced plastics - Rovings - Preparation of unidirectional panels by winding.                                             |                        |                                                                                                                                                        |

## 3 Prensip

EN ISO 527-1, Madde 3'e bakınız.

## 4 Tarifler

Bu standardın amacı bakımından aşağıdaki tarifler uygulanır.

**4.1 Ölçme uzunluğu:** EN ISO 527-1, Madde 4.1'e bakınız..

**4.2 Deney hızı :** EN ISO 527-1, Madde 4.2'e bakınız.

**4.3 Çekme gerilmesi,  $\sigma$  (mühendislik):** EN ISO 527-1, Madde 4.3'e bakınız. Ancak  $\sigma$ , Tip A deney parçaları için  $\sigma_1$  ve Tip B deney parçaları için  $\sigma_2$  olarak verilir (Tip A ve Tip B deney parçalarının ayrıntıları için Madde 6'ya bakınız).

**4.3.1 Çekme mukavemeti,  $\sigma_M$ :** EN ISO 527-1, Madde 4.3.3'e bakınız. Ancak  $\sigma_M$ , Tip A deney parçaları için  $\sigma_{M1}$  ve Tip B deney parçaları için  $\sigma_{M2}$  olarak verilir.

**4.4 Çekme uzaması,  $\epsilon$ :** Başlangıçtaki ölçme uzunluğu birimi başına meydana gelen uzunluk artışıdır.

$\epsilon$ , Tip A deney parçaları için  $\epsilon_1$ , Tip B deney parçaları için  $\epsilon_2$  olarak verilir.

Çekme uzaması boyutsuz bir oran olarak veya yüzde, %, olarak ifade edilir.

**4.5 Çekme mukavemetinde çekme uzaması; kopma uzaması,  $\epsilon_M$ :** Deney parçasının çekme mukavemetine karşılık gelen noktadaki çekme uzaması.

$\epsilon_M$ , Tip A deney parçaları için  $\epsilon_{M1}$ , Tip B deney parçaları için  $\epsilon_{M2}$  olarak verilir.

Kopma uzaması boyutsuz bir oran olarak veya yüzde, %, olarak ifade edilir.

**4.6 Gerilmede elastiklik modülü; Young modülü  $E$ :** EN ISO 527-1, Madde 4.6'ya bakınız. Ancak  $E$ , Tip A deney parçaları için  $E_1$ , Tip B deney parçaları için  $E_2$  olarak verilir.

Malzeme veya teknik spesifikasyonlarda alternatif değerler verilmemişse, kullanılacak uzama değerleri EN ISO 527-1'de verilen, örneğin  $\epsilon' = 0,0005$  ve  $\epsilon'' = 0,0025$  (bk. Şekil 1) değerlerdir.

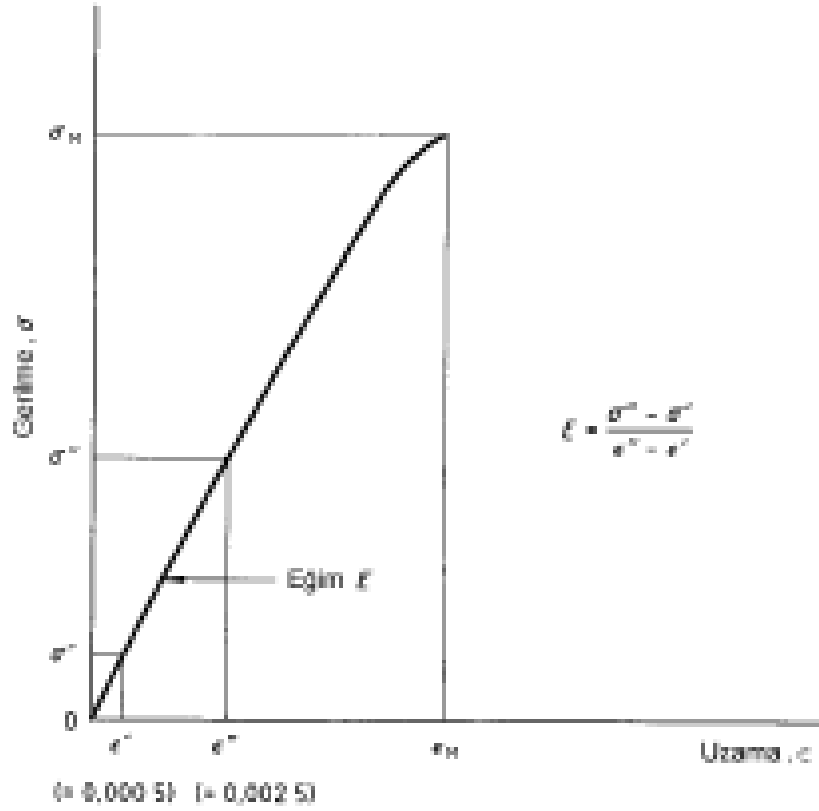
**4.7 Poisson oranı,  $\mu$ :** EN ISO 527-1, Madde 4.7'ye bakınız. Ancak  $\mu_b$  ve  $\mu_h$  değerleri, Şekil 2'de verilen koordinat eksenlerine uygun olarak Tip A deney parçaları için sırasıyla  $\mu_{12}$  ve  $\mu_{13}$  olarak, Tip B deney parçaları için ise sırasıyla  $\mu_{21}$  ve  $\mu_{23}$  olarak verilir.

**4.8 Deney parçasının koordinat eksenleri:** Deneye tâbi tutulan malzeme için koordinat eksenleri Şekil 2'de tanımlanmıştır. Elyaf eksenine paralel olan yön, "1" işaretli yön, dik olan yön ise (elyaf düzleminde) "2" işaretli yön olarak tanımlanır.

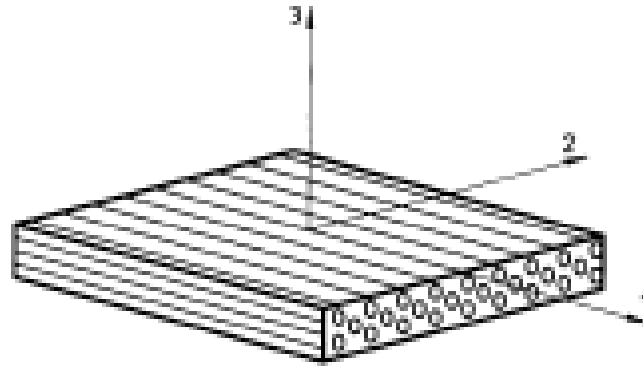
**Not** - "1" işaretli yön  $0^\circ$  veya uzunlamasına yön, "2" işaretli yön ise  $90^\circ$  veya enine yön olarak tanımlanabilir.

---

1) **TSE Notu:** Atıf yapılan standartların TS numarası ve Türkçe adı 3. ve 4. kolonda verilmiştir. \* işaretli olanlar bu standardın yayımlandığı tarihte İngilizce metin olarak basılmış olan Türk Standardlarıdır.



**Şekil 1 – Gerilme – uzama eğrisi**



**Şekil 2 – Simetri eksenleri gösterilmiş tek yönlü takviyeli plastik kompozit**

## 6 Deney parçaları

### 6.1 Şekil ve boyutlar

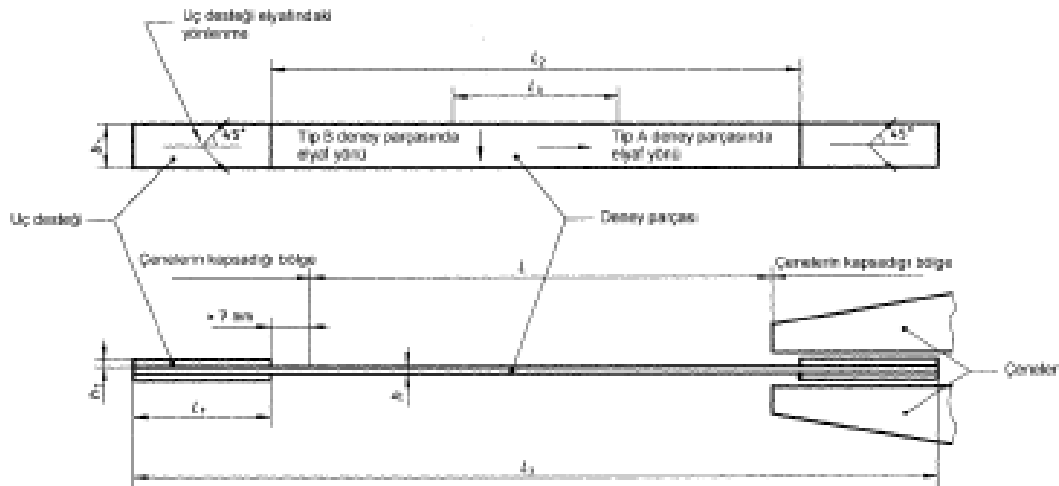
Ayrıntıları Şekil 3'te verildiği gibi, elyaf yönüne bağlı olarak farklı deney yönü için, bu standardda tanımlanan iki tip deney parçası kullanılmalıdır.

#### 6.1.1 Tip A deney parçası (uzunlamasına yön için)

Tip A deney parçasının genişliği  $15 \pm 0,5$  mm, toplam uzunluğu 250 mm ve kalınlığı  $1 \text{ mm} \pm 0,2$  mm olmalıdır. Deney parçasının kenarları  $\pm 0,2$  mm toleransla birbirine paralel olmalıdır.

### 6.1.2 Tip B deney parçası (enine yön için)

Tip B deney parçasının genişliği  $25 \text{ mm} \pm 0,5$  mm, toplam uzunluğu 250 mm ve kalınlığı  $2 \text{ mm} \pm 0,2$  mm olmalıdır. Her bir münferit deney parçasının kenarları  $\pm 0,2$  mm toleransla birbirine paralel olmalıdır. ISO 9291'e göre hazırlanmış filâman sargılı panellerden alınmış Tip B deney parçaları için deney parçasının uzunluğu 200 mm olabilir.



|       |                                                     | Ölçüler mm'dir |                   |
|-------|-----------------------------------------------------|----------------|-------------------|
|       |                                                     | Tip A          | Tip B             |
| $L_3$ | Toplam uzunluk                                      | 250            | 250 <sup>1)</sup> |
| $L_2$ | Uç destekleri arasındaki mesafe                     | $150 \pm 1$    | $150 \pm 1$       |
| $b_1$ | Genişlik                                            | $15 \pm 0,5$   | $25 \pm 0,5$      |
| $h$   | Kalınlık                                            | $1 \pm 0,2$    | $2 \pm 0,2$       |
| $L_5$ | Ölçme uzunluğu (uzama ölçerler için tavsiye edilen) | $50 \pm 1$     | $50 \pm 1$        |
| $L$   | Çeneler arasındaki başlangıç mesafesi (nominal)     | 136            | 136               |
| $L_7$ | Uç desteklerinin uzunluğu                           | $\geq 50$      | $\geq 50^{1)}$    |
| $h_7$ | Uç desteklerinin kalınlığı                          | 0,5 - 2        | 0,5 - 2           |

Not - Deney parçasının kalitesi ve paralellikle ilgili şartlar Madde 6'da verilmiştir.

1) ISO 9291'e göre hazırlanmış filâman sargılı panellerden alınmış deney parçaları için uç desteklerinin uzunluğu 25 mm ve toplam uzunluk 200 mm alınabilir.

Şekil 3 - Tip A ve Tip B deney parçaları

## 6.2 Deney parçalarının hazırlanması

### 6.2.1 Genel

Kalıplama ve lâminasyon malzemeleri durumunda, ISO 1268'e göre veya tanımlanan/mutabakata varılan bir başka metoda göre bir panel hazırlanır. Deney panelinden tek tek veya gruplar hâlinde deney parçası kesilir (Bk. Ek A).

Mamuller durumunda, (meselâ, teslimatta veya imalât esnasında kalite kontrolü için) mamullerin düzyerlerinden deney parçaları alınır. Deney parçaları, eksenleri ortalama elyaf eksenine 0,5°'lik bir tolerans içinde kalacak şekilde alınmalıdır.

Deney parçasının işlenmesiyle ilgili parametreler EN ISO 2818'de verilmiştir. Deney parçasının kesilmesiyle ilgili daha geniş bilgi Ek A'da verilmiştir.

#### **6.2.2 Uç destekleri malzemesi**

Deney parçalarının uçları, tercihan çapraz katlı veya cam elyaf dokuma/reçine lâminat ikilisiyle imal edilmiş uç desteklerle takviye edilmiş olmalıdır. Elyafın eksenine deney parçasının eksenine  $\pm 45^\circ$ 'lik bir açı bulunmalıdır. Uç desteklerinin kalınlığı 0,5 mm ilâ 2 mm arasında olmalı ve deney parçasının uzunlama eksenine 90°'lik bir açı yapılmalıdır (köşeli olmamalı).

Alternatif destek düzenlemelerine müsaade edilebilir. Ancak, yapılan düzenlemelerin, kullanımından öncetavsiye edilen destek malzemesinin mukavemet değerine eşit veya daha yüksek bir mukavemet değeri göstermeleri ve tavsiye edilen destek malzemesinin varyasyon katsayısından daha küçük bir katsayıya (EN ISO 527-1, Madde 10.5 ve ISO 3534-1) sahip oldukları gösterilmelidir. Muhtemel alternatifler olarak; deneye tâbi tutulan malzemeden yapılan destekler, mekanik olarak sıkıştırılmış destekler, pürüzlü malzemelerden yapılmış ve yapıştırılmamış destekler (zımpara ve pürüzlü yüzeylere sahip çenelerin kullanımı gibi) sayılabilir.

Deney, uç destekleri olmayan deney parçalarıyla yapılacaksa çeneler arasındaki mesafe kaba olarak yapılmış uç destekli deney parçalarının destekleri arasındaki mesafeyle aynı olmalıdır.

#### **6.2.3 Uç desteklerinin uygulanması**

Uç destekleri, yüksek uzama değerine sahip yapıştırıcılar kullanılarak Ek A'ya göre deney parçasına yapıştırılır.

Not - Ayır ayrı deney parçaları veya deney parçası grupları için aynı işlem kullanılır.

#### **6.3 Ölçme uzunluğunun işaretlenmesi**

EN ISO 527-1, Madde 6.3'e bakınız.

#### **6.4 Deney parçalarının kontrol edilmesi**

EN ISO 527-1, Madde 6.4'e bakınız.

#### **7 Deney parçalarının sayısı**

EN ISO 527-1, Madde 7.1 ve 7.3'e bakınız. (Madde 7.2 uygulanmaz)

#### **8 Şartlandırma**

EN ISO 527-1, Madde 8'e bakınız.

#### **9 İşlem**

##### **9.1 Deney atmosferi**

EN ISO 527-1, Madde 9.1'e bakınız.



## 9.2 Deney parçasının boyutlarının ölçülmesi

EN ISO 527-1, Madde 9.2'ye bakınız. Ancak kalınlık 0,01 mm doğrulukla ölçülür ve Not 3 ve Not 4 uygulanmaz.

## 9.3 Deney parçasının cihazın çenelerine yerleştirilmesi

EN ISO 527-1, Madde 9.3'e bakınız. Şekil 3'te görüldüğü gibi, uç destekleri çenelerin arasına  $\geq 7$  mm girecek şekilde yerleştirilir.

## 9.4 Öngerilmeler

EN ISO 527-1, Madde 9.4'e bakınız.

## 9.5 Uzama ölçerlerin (Ekstensometrenin) ve boyut değişimi ölçerinin yerleştirilmesi, ölçüm işaretlerinin konulması

EN ISO 527-1, Madde 9.5'e bakınız. Ölçme uzunluğu % 1 veya daha iyi doğrulukla ölçülür.

## 9.6 Deneydeki çekme hızı

Deney hızı Tip A deney parçası için 2,0 mm/dak ve Tip B deney parçası için 1,0 mm/dak olmalıdır.

## 9.7 Verilerin kaydedilmesi

EN ISO 527-1, Madde 9.7'ye bakınız.

## 10 Hesaplama ve sonuçların gösterilmesi

Madde 4'te verilen tarifler geçerlidir ve uzama değerleri üç anlamlı rakamla verilmelidir. Bu hususlar hariç, EN ISO 527-1 Madde 10'a bakınız.

## 11 Kesinlik

Lâboratuvarlararası veriler mevcut olmadığından bu metodun kesinliği bilinmemektedir. Bu veriler elde edildiğinde kesinlik değerlendirmesi sonraki revizyonda eklenecektir.

## 12 Deney raporu<sup>2)</sup>

Deney raporunda aşağıdaki bilgiler yer almalıdır:

a) Aşağıdaki örneğe göre yazılmış deney parçasının tipi ve deney hızıyla birlikte bu standardın numarası.

|                       |                  |
|-----------------------|------------------|
| Çekme deneyi          | EN ISO 527-5/A/2 |
| Deney parçasının tipi | _____            |
| Deney hızı, mm/dak    | _____            |

b) ilâ q) Deney raporunda b'den q'ya kadar olan maddeler için EN ISO 527-1, Madde 12'ye bakınız. 12 b)'de elyafın tipi, elyaf muhtevası ve elyaf geometrisi (meselâ; tekyönlü şerit) verilmelidir.

---

2) **TSE Notu** : Deney raporu, burada istenilen bilgilere ilâveten, TS EN ISO/IEC 17025'de verilen bilgileri de ihtiva edecek şekilde düzenlenebilir

## Ek A

### Deney parçasının hazırlanması

#### A.1 Deney parçalarının makine ile işlenmesi

İşlemenin her kademesinde aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

❑ Deney parçasında önemli miktarda ısı birikimine sebep olacak çalışma şartlarından kaçınılmalıdır. Bunun için, bir soğutucu kullanılması tavsiye edilir. Bir sıvı soğutucu kullanılırsa, işlenmeyi müteakip deney parçaları hemen kurutulur.

❑ Deney parçalarının kesilmiş yüzeyleri üzerinde işleme kusurları olup olmadığı kontrol edilir.

#### A.2 Uç destekleri yapıştırılmış deney parçalarının hazırlanması

Tavsiye edilen bir metot aşağıda verilmiştir:

Deneye tâbi tutulan malzemeden, deney parçasının uzunluğuna eşit uzunlukta ve ihtiyaç duyulan deney parçası sayısına yetecek büyüklükte bir genişliğe sahip levha şeklinde bir parça kesilerek çıkarılır.

Ortalama elyaf eksenini, deney panelinin kenarları yarıp elyaflar incelenerek tayin edilebilir. Bu işlem, yönüyle ilgili olmak için birkaç numunede bir tekrarlanır. Katlar veya tabakalar arasındaki düzensizlik nedeniyle yarma işlemi düzgün bir kenar oluşturmuyorsa, panel belirli prosesi veya mamulü temsil etmediği müddetçe kullanılmamalıdır.

Uç destekleri oluşturmak için, istenilen genişlik ve uzunluğa sahip dikdörtgen şekilli şeritler kesilir. Şeritler levhaya aşağıdaki gibi tutturulur:

a) Gerekirse, yapıştırıcı uygulanacak bütün yüzeyler ince bir zımpara kağıdıyla veya kum püskürtülerek temizlenir.

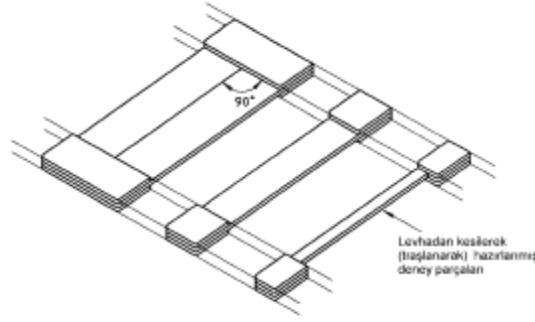
b) Yüzeydeki tozlar uzaklaştırılır ve uygun bir çözücüyle temizlenir.

c) Şeritler, birbirlerine paralel ve deney parçasının uzunluğu yönüne dik olacak şekilde, Şekil A.1'e göre levhaya yapıştırılır. Yapıştırma, imalatçı talimatlarına tamamıyla uymak kaydıyla yüksek uzamalı bir yapıştırıcı kullanılır.

**Not** - İnce taşıyıcı film yapıştırıcıların kullanılması tavsiye edilir. Yapıştırıcı tercihan 30 MPa'dan daha büyük yırtılma mukavemetine sahip olmalı. Kullanılacak yapıştırıcının esnek bir yapıya sahip olması ve kopma uzamasının deneye tâbi tutulan malzemeninkinden daha büyük olması arzu edilir.

d) Yapıştırılan parçalar, yapıştırıcı imalatçısı tarafından tavsiye edilen süre boyunca imalatçı tarafından tavsiye edilen basınç ve sıcaklıkta tutulur.

e) Levhalardan, uç desteklerini meydana getiren şeritleri de ihtivâ edecek şekilde, deney parçaları kesilerek çıkarılır (bk. Şekil A.1).



Şekil A.1 - Deney parçası hazırlamak için üzerine destekler yerleştirilmiş plâka

## EK B

### (Bilgi için)

#### Deney parçalarının yerleştirilmesi ve hizalanması

Deney parçası ile uzama deneyi cihazının hizalanması ölçme uzunluğu merkezinde kontrol edilmesi tavsiye edilir. Bunun için deneye tâbi tutulacak aynı malzemeden yapılmış boyut değişimi ölçer bulunduran bir deney parçası (kupon) kullanılır. Deney parçalarının çeneler arasına aynı şekilde yerleştirilebilmesini temin edecek bir cihaz veya işlem kullanılır. Kupon üzerine Şekil B.1’de görüldüğü gibi, boyut değişimi ölçerler yerleştirilir. Kuponun bir yüzeyine iki adet (SG1, SG2) arka yüzeyine bir adet (SG3) olmak üzere toplam üç adet boyut değişimi ölçer yerleştirilir. Arka yüzeyde yer alan bir adet boyut değişimi ölçer (SG3) kuponun tam merkezinde desteklerin arasında ortaya yerleştirilir. Diğer iki boyut değişimi ölçer ise, (SG1,SG2), uzun kenarlardan itibaren genişliğin yaklaşık 1/8’ine eşit uzaklıklara ve çeneden itibaren destekler arasındaki mesafenin yarısına eşit bir uzaklığa yerleştirilir.

Young modülünün ölçülmesinde kullanılan uzama aralığının orta noktasında (Madde 4.6’da verilen uzama değerleri için bu değer 0,0015’dir) boyut değişimi ölçerlerdeki değerler birbirleriyle mukayese edilir. Aşağıda tanımlanan (B.1) ve (B.2) eşitlikleri kullanılarak sırasıyla genişlik ( $B_b$ ) ve kalınlık ( $B_h$ ) yönlerinde bükülme boyut değişimi hesaplanır ve % olarak verilir.

$$B_b = \frac{4 |e_2 - e_1|}{3 e_{ort}} \times 100 \quad (B1)$$

$$B_h = \frac{|e_{ort} - e_3|}{e_{ort}} \times 100 \quad (B2)$$

Burada;

$e_1$ ,  $e_2$  ve  $e_3$  sırasıyla SG1, SG2 ve SG3 numaralı boyut-değişimi ölçerlerde kaydedilen uzama değerleridir.

$$e_{ort} = \left( \frac{e_1}{4} + \frac{e_2}{4} + \frac{e_3}{2} \right)$$

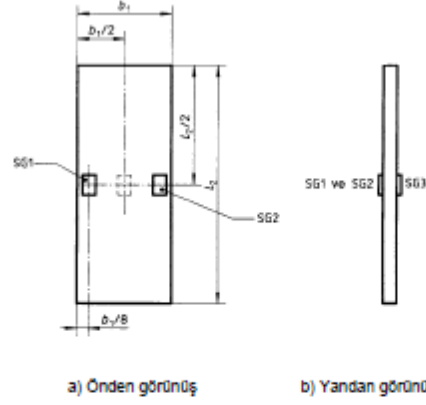
Bükülmeyle boyut değişimi ( $B_b + B_h$ ) B3 eşitsizliğinde verilen durumu sağlamalıdır.

$$B_b + B_h \leq \% 3,0 \quad (B3)$$

Notlar:

1 - Yanlış hizalamanın muhtemel sebeplerinin tamamını kontrol etmek için çenelere yakın yerlerde de boyut-değişimi ölçerlerin kullanımı gereklidir.

2 - Münferit numunelerin hizalanması genişlik yönünde kontrol edilebilir. Bu amaçla deney parçasının bir kenarı için uzunluğuna boyut değişimi çıktısı veren kısıkaçlı bir ekstensometre kullanılır.



Şekil B.1 - Sistem çakışmasının kontrolü için yerleştirilen boyut-değişimi ölçerlerin konumu (SG1, SG2 ve SG3)

## Ek ZA

### Atıf yapılan uluslar arası standardlar ve bunların karşılığı olan Avrupa standardları

Bu standardda, tarih belirtilerek veya belirtilmeksizin diğer standard ve/veya dokümanlara atıf yapılmaktadır.

Bu atıflar metin içerisinde uygun yerlerde belirtilmiş ve aşağıda liste hâlinde verilmiştir. Tarih belirtilen

atıflarda daha sonra yapılan tadil veya revizyonlar, atıf yapan bu standardda da tadil veya revizyon yapılması

şartı ile uygulanır. Atıf yapılan standard ve/veya dokümanın tarihinin belirtilmemesi hâlinde en son baskısı

kullanılır.

#### Standardı Yılı - Başlığı - EN Karşılığı Yılı

ISO 527-1 - 1993 Plastics – Determination of tensile properties – Part 1: General principles

EN ISO 527-1 - 1996

ISO 527-4 1997 Plastics – Determination of tensile properties – Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibrereinforced plastic composite

## TS 1177 EN ISO 1172

**TEKSTİL - CAM TAKVİYELİ PLÂSTİKLER – PREPREGLER, KALIPLAMA HAMURLARI VE  
LÂMİNATLAR – TEKSTİL - CAM VE MİNERAL DOLGU MUHTEVASININ TAYİNİ –  
KALSİNASYON METOTLARI**

**Ön söz**

- Bu standard; CEN tarafından kabul edilen EN ISO 1172: 1998 standardı esas alınarak TSE PetrokimyaHazırlık Grubu’nca TS 1177: 1973’ün revizyonu olarak hazırlanmış ve TSE Teknik Kurulu’nun 21 Nisan2004 tarihli toplantısında Türk Standardı olarak kabul edilerek yayımına karar verilmiştir.
- Bu standardın daha önce yayımlanan baskıları geçersizdir.

**Uyarı - Bu standard sağlık ve güvenlikle ilgili alınması gereken tedbirlerin ayrıntılarını vermez. Tanımlanan deney metotları, yüksek sıcaklık ve derişik asit kullanılmasını gerektirir. Sağlık ve güvenlikle ilgili mevzuata uygun tedbirlerin alınması analizcinin sorumluluğundadır.**

**1 Kapsam**

Bu standard, cam takviyeli plâstiklerin tekstil cam ve mineral dolgu muhtevasının tayini için iki kalsinasyonmetodunu kapsar.

Metot A: Mineral dolgu maddesinin bulunmadığı durumlarda tekstil cam muhtevasının tayini için.

Metot B: Tekstil cam ve mineral dolgu maddelerinin her ikisinin de mevcut olduğu durumlarda her ikisininintayini için.

Bu standard aşağıdaki malzeme tiplerine uygulanır:

- İplik, fitil, şeritler veya kumaşlardan yapılan prepregler1),
- SMC, BMC ve DMC kalıplama hamurları,
- Tekstil cam takviyeli termoplâstik kalıplama malzemeleri ve granüller

- Termosetting veya termoplâstik reçineler ile yapılan dolgulu veya dolgusuz tekstil cam laminantlar

Bu metot aşağıda belirtilen takviyeli plâstik tiplerine uygulanmaz:

- Tekstil camın dışında takviye malzemeleri ihtiva edenler,
- Deney sıcaklığında tamamen yanmayan malzeme ihtiva edenler (örneğin silikon reçine esaslı),
- En düşük kalsinasyon sıcaklığı altındaki sıcaklıklarda bozunan mineral dolgu ihtiva edenler.

Yukarıda belirtilen malzemeler için "ISO 11667, Fibre-reinforced plastics - Moulding compounds and prepregs - Determination of resin, reinforcement - fibre and mineral - filler content – Dissolutionmetod" kullanılabilir.

## 2 Atıf yapılan standard ve/veya dokümanlar

Bu standardda tarih belirtilerek veya belirtilmeksizin diğer standard ve/veya dokümanlara atıf yapılmaktadır. Bu atıflar metin içerisinde uygun yerlerde belirtilmiş ve aşağıda liste hâlinde verilmiştir. Tarih belirtilen atıflarda daha sonra yapılan tadil veya revizyonlar, atıf yapan bu standardda da tadil veya revizyon yapılması şartı ile uygulanır. Atıf yapılan standard ve /veya dokümanın tarihinin belirtilmemesi hâlinde en son baskısı kullanılır.

| EN, ISO, IEC vb. No | Adı (İngilizce)                                                                         | TS No. <sup>2)</sup>           | Adı (Türkçe)                                                                           |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| ISO 472:1988        | Plastics - Vocabulary                                                                   | TS 1699: 1974<br>TS 2380: 1991 | Plâstikler - Tekstil terimlerin tarifleri<br>Plâstikler - Terimler ve tarifler         |
| ISO 4793:1980       | Laboratory sintered (fritted) filters; Porosity grading, classification and designation | TS ISO 4793: 1997              | Sinterlenmiş lâboratuvar süzgeçleri - Gözeneklilik derecesi, sınıflandırma ve gösterim |
| ISO 8604:1988       | Plastics; prepregs; definitions of terms and symbols for designations                   | -                              | -                                                                                      |

## 3 Tarifler

Bu standardın amaçları bakımından ISO 472 ve ISO 8604' te verilen tarifler kullanılır.

## 4 Prensip

Deney numuneleri tartılır ve hemen ardından tanımlanan sıcaklıkta kalsine edilir. Deney numuneleri sonratekrar tartılır ve kalsinasyon işleminden önce ve sonraki deney numunelerinin kütle farkından belirlenen yanmayan madde muhtevası (cam + dolgu maddeleri), aşağıdaki yollardan biriyle belirlenir.

1) Takviye malzemesinin kalıplanmadan önce, bileşenlerden biri olan reçinenin tümüyle Karıştırılmış hâlde olduğu durumu ifade eden, takviyeli plâstikler alanında kullanılan bir terimdir.

2) **TSE Notu:** Atıf yapılan standartların TS numarası ve Türkçe adı 3. ve 4. kolonda verilmiştir.

a) Malzemenin dolgu maddesi ihtiva etmemesi durumunda cam muhtevası doğrudan kütle farkındanyararlanılarak hesaplanır (Metot A),

b) Cam ve dolgu maddelerinin her ikisinin de bulunması durumunda kalsinasyon işleminden sonrakalan cam ve dolgu, dolgu maddelerinin hidroklorik asit içerisinde çözülmesiyle ayrılır. Kalsinasyonişleminden önceki kütle ile asit ile reaksiyonun ardından deney numunesinin kurutulmasındansonraki kütle arasındaki fark, cam muhtevasını ölçmek için kullanılır. Dolgu muhtevası, deneynumunesinin kalsinasyon işleminden sonraki kütlesi ile asit ile reaksiyona sokulduktan vekurutulduktan sonraki kütlesi arasındaki farkın hesaplanması ile elde edilir(Metot B).

Deney metodu, tekrarlanan kalsinasyon ve/veya kurutma işlemlerinden sonraki bütün tartımların sabittartımda yapılmasını gerektirir. Bilinen malzemelerin düzenli deneye tâbi tutulması gibi durumlardanumunenin sabit tartıma gelmesi için kalsinasyon ve kurutma basamakları için gerekli en az süre tecrübe ilebelirlenebilir.

### **Notlar**

1 Deneye tâbi tutulan malzeme, deney şartlarında yanabilen reçine ve/veya kalsinasyon ile bozunmayandolgu içeriyorsa, kızdırma kaybı reçine muhtevasına eşittir. Bu yolla hesaplanan reçine muhtevasınınbileşendeki yanabilir diğer bileşenleri (cam parça, pigment vb.) ihtiva ettiği bilinmelidir, ancak bugenellikle reçine muhtevasına göre daha azdır.

2 Deney sıcaklığında bozunan dolgu maddelerinin bulunması durumunda cam, reçine veya dolgumiktarını doğru olarak tayin etmek mümkün değildir.

### **5 Numune alma**

**5.1** Cam ve dolgu muhtevasının tayini, birbirine benzer özellikte iki deney numunesi üzerinde paralelolarak yapılır. Deney sonucu, iki ölçme sonucu arasındaki fark % 5'ten daha az olmak şartıyla iki deneynumunesi ile yapılan ölçmelerin ortalaması olarak alınır. İki ölçme arasındaki bu fark % 5' ten daha fazlaysabu iki deney numunesine mümkün olduğu kadar benzer özellikte bir üçüncü deney numunesi deneye tâbitutulmalıdır. Bu üç değer deneyin sonucunu hesaplamak için kullanılır.

**5.2** Bir değerlendirme yapabilmek amacıyla en küçük birimin veya lâboratuvar numunesinin cam vedolgu muhtevasını en iyi temsil eden değer incelenir. Bu inceleme işleminin deneye tâbi tutulan en küçükbirimin belirli kısımlarında birkaç defa tekrar edilmesi gerekebilir. Tekrar sayısı ve deneyin gerçek uygulanmayerleri ya mamul şartnamesinde veya analizin yapılmasını isteyen kişi tarafından belirtilmelidir. Analizinyapılmasını isteyen kişinin belirlemesi durumundan deney sayısı ve deneyin uygulanma gerçek yerlerideneyimler veya daha önce yapılan işlemlere göre belirlenir.

**5.3** En küçük birimle yapılan deneyler dışındaki bütün deneyler için, mümkün olduğu kadar deneye tâbitutulan malzemeyi temsil eden deney numuneleri alınmalıdır.

### **6 Deney numunelerinin hazırlanması**

Deney numuneleri, lâboratuvar numunesini veya partiyi tam olarak temsil etmelidir. Numuneler, Madde 5' euygun olarak alınmalıdır.

Deney numuneleri, aksi belirtilmedikçe, silisyum dioksit kayıkçık veya porselen kroze içine yerleşebilecek boyutta kesilerek alınmalıdır.

Her bir deney numunesinin kütlesi aşağıda belirtilen aralıklarda olmalıdır:

Prepregler ve kalıplama hamurları için 2 g - 20 g

Laminatlar için 2 g –10 g.

Her deney sonucu için en az iki deney numunesi kullanılır.

Çözücü içeren veya serbest monomer ihtiva eden prepregler ve kalıplama hamurlarının uçucu madde kaybını önlemeye dikkat edilmelidir. SMC'ler için deneye başlayıncaya kadar lâboratuvar numunesinden veya deney numunesinden koruyucu band film çıkarılmamalıdır. Bütün prepregler ve kalıplama hamurları lâboratuvar malzemeleri, SMC'ler dâhil, lâboratuvar numuneleri alındıktan hemen sonra buhar geçirmez birplâstik torba içinde muhafaza edilmelidir.

## **7 Tayin**

Cam ve dolgu muhtevasını tayin etmek için kullanılacak metot dolgu maddelerinin mevcut olup olmamasına bağlıdır. Bu standardda tanıtılan metotlar aşağıda verilmiştir.

Metot A: Dolgu maddesinin olmaması durumunda cam muhtevasını tayin etmek için kullanılan metot,

Metot B: Her iki bileşenin de olması durumunda cam ve dolgu muhtevasını tayin etmek için kullanılan metot.

### **7.1 Metot A**

#### **7.1.1 Reaktifler**

Metot A için reaktif gerekli değildir.

#### **7.1.2 Cihazlar**

Deneylerde normal lâboratuvar malzemeleri ve aşağıda belirtilenler kullanılır.

##### **7.1.2.1 Terazî, 0,1 mg doğrulukla tartabilen**

**7.1.2.2 Silisyum dioksit kayıkçık veya porselen kroze,** içine deney numunesinin konulması için uygun boyutta.

**7.1.2.3 Kül fırın,** çeker ocak altına yerleştirilmiş ve seçilen sıcaklığı (Madde 7.1.3.2)  $\pm 20^{\circ}\text{C}$  yaklaşımla sabit tutabilen.

**7.1.2.4 Desikatör,** uygun bir kurutucu ihtiva eden (örneğin silika jel).

**7.1.2.5 Havalandırmalı kurutma etüvü,** sıcaklığı  $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 'ye ayarlanabilen

### **7.1.3 İşlem**

Her bir deney numunesi için aşağıdaki işlemler takip edilir.

#### **7.1.3.1 Kayıkçık veya krozenin hazırlanması**

Boş ve temiz bir kayıkçık veya kroze (Madde 7.1.2.2) terazî (Madde 7.1.2.1) üzerinde 0,1 mg doğrulukla tartılır. Belirlenen sıcaklığa (Madde 7.1.3.2) ayarlı kül fırına (Madde



7.1.2.3) yerleştirilir ve 10 dakika bekletilir. Bir desikatörde (Madde 7.1.2.4) ortam sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra kütlesi tartılır. Küttelede herhangi bir değişiklik varsa bu işlemler numune sabit tartıma gelinceye kadar tekrar edilir.

#### 7.1.3.2 Kalsinasyon

Boş ve temiz bir kroze veya kayıkçık Madde 7.1.3.1’de belirtildiği gibi hazırlanır. Kroze ve kauçuğun kütlesigram cinsinden m1 olarak kaydedilir.

Deney numunesi, kayıkçık veya kroze yerleştirilir ve sıcaklığı 105 OC olan havalandırmalı etüvde (Madde7.1.2.5) kütlesi sabit tartıma gelinceye kadar kurutulur.

Kroze ve muhtevası ortam sıcaklığına kadar bir desikatör içinde soğutulur ve tekrar tartılır. Tartım sonucugram cinsinden m2 olarak kaydedilir.

Deney numunesinin uçucu madde içermesi durumunda uçucu maddelerin kaybolmamasına dikkat edilmelidir.

Uçucu madde varsa, kurutma işlemi iptal edilebilir. Deney numunesi buhar geçirmez torbadan çıkarılır ve varsa band film uzaklaştırılır. Deney numunesi kayıkçık veya kroze içine yerleştirilir , tartılır ve kütlesi gramcinsinden m6 olarak kaydedilir.

Deney numunesini içeren kayıkçık veya kroze sıcaklığı daha önceden 625 OC’a ayarlanmış kül fırınayleştirilir ve sabit tartıma gelmesi için ısıtılır.

Bu kalsinasyon sıcaklığına dayanamayacak cam veya dolgu takviyeli ürünler için cam ve dolgular ile ilişilıştırnameye uygun olarak 500 OC - 600 OC arasında bir sıcaklık kullanılabilir. Seçilen sıcaklığın ± 20 OC’ tamuhafaza edilmesi gereklidir.

Kayıkçık veya kroze içindeki kalıntılarla birlikte bir desikatörde ortam sıcaklığına kadar soğutulur ve tekrartartılır. Kroze ve muhtevasının kütlesi gram cinsinden m3 olarak kaydedilir.

#### 7.1.4 Hesaplama ve sonuçların gösterilmesi

Her numune için cam muhtevası M<sub>cam</sub>, başlangıç kütlesinin yüzdesi olarak aşağıdaki eşitlik(1) kullanılarakhesaplanır.

$$M_{cam} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

Burada;

m1: Kuru kayıkçık veya krozenin başlangıç kütlesi, g

m2: Kuru kayıkçık veya krozenin ve kurutulmuş numunenin başlangıç kütlesi, g

m3: Kayıkçık veya kroze ve kalsinasyon işleminden sonraki kalıntının son kütlesi, g’dir.

Deney numunesinin uçucu madde içerip kurutma işleminin iptal edildiği durumlarda, eşitlik (1)’de m2, kurukayıkçık veya krozenin ve kurutulmamış deney numunesinin gram cinsinden başlangıç kütlesini ifade edenm6 ile yer değiştirilir.

Münferit ölçümler arasındaki fark % 5’ ten fazlaysa en küçük birim veya lâboratuvar numunesinin aynıbölgesinden alınan üçüncü bir deney numunesi ile ilave bir tayin yapılır.

Deneyin sonuçları iki (veya üç ) münferit ölçmenin ortalaması olarak verilir.

## **7.2 Metot B**

### **7.2.1 Reaktifler**

Metot B için aşağıdaki reaktifler gereklidir.

**7.2.1.1 Hidroklorik asit**, hacimce %35 (V/V), ticarî saflıkta.

**7.2.1.2 Denature etanol.**

**7.2.1.3 Kromik asit karışımı**, temizleme için.

Karışımın tavsiye edilen bileşimi derişik sülfirik asit içerisinde % 7 sodyum dikromatın çözünmesiyle elde edilir.

### **7.2.2 Cihazlar**

Madde 7.1.2’de verilen cihazlar ve aşağıda verilenler kullanılır

**7.2.2.1 40 mm çapında sinterlenmiş camsüzgeç**, gözenekliliği P 160, örneğin; 100 µm-160 µm (ISO4793).

**7.2.2.2 Beher**, 250 mL kapasiteli

**7.2.2.3 Vakum uygulanabilen süzme kabı**

**7.2.2.4 Baget (Cam çubuk)**

**7.2.2.5 Pens**

### **7.2.3 İşlem**

Her bir deney numunesi için aşağıdaki işlemler takip edilir.

#### **7.2.3.1 Kayıkçık veya krozenin hazırlanması**

Madde 7.1.3.1’de verilen işlemler takip edilir.

#### **7.2.3.2 Sinterlenmiş cam süzgecin hazırlanması**

Her deneyden önce sinterlenmiş cam süzgeç (Madde 7.2.2.1) kromik asit karışımı (Madde 7.2.1.3) içinedaldırılarak temizlenir. Süzgeç nuçe erleni (Madde 7.2.2.3) üzerine yerleştirilir, vakum uygulanılarak süzgeçilk önce sıcak su ile daha sonra denature etanol (Madde 7.2.1.2) ile yıkanır. Süzgeç, etüvde (Madde 7.1.2.5)sabit tartıma gelinceye kadar kurutulur. Kütle gram cinsinden m4 olarak kaydedilir.

#### **7.2.3.3 Kalsinasyon**

Madde 7.1.3.1’de verilen işlemler takip edilir.

#### **7.2.3.4 Dolgu maddesinin hidroklorik asit içerisinde tamamen çözünmesi durumunda camve dolgu maddelerinin ayrılması**

Dolgu maddeleri camdan aşağıda belirtildiği gibi ayrılır.

Kalsinasyon işleminden sonra 250 mL’lik beher (Madde 7.2.2.2) içine kroze veya kayıkçık içinde kalankütlenin her bir gramı için 5 mL hidroklorik asit (Madde 7.2.1.1) konur.

Kayıkçık veya kroze içindeki kalıntı cam baget ile yavaş yavaş beher içindeki asit içine ilâve edilir. Kalıntının tamamının asit ile reaksiyona girdiğinden emin olununcaya kadar dikkatlice karıştırılır. Bu sırada asidinkarbonatlı dolgu maddesi ile reaksiyonun sebep olduğu köpürmenin beherden dışarıya sıçramamasına dikkat edilir.

Köpürme bittikten sonra kayıkçık veya krozenin 3/4' ü su ile doldurularak 250 mL'lik behere dökülür. Bu işlem, gerekirse, kalıntının tamamı beher içine alınuncaya kadar tekrarlanır. Behere fazladan 50 mL su ilave edilir.

Madde 7.3.2.2'de tanıtilan kuru ve kütlesi tartılmış süzgeç nuçe erleni ağzına yerleştirilir ve vakumuygulanılarak süzme işlemi yapılır. Süzgeç üzerindeki cam kalıntı üzerine yavaş yavaş asit dökülür. Beher su ile çalkalanır ve su süzgeç üzerine dökülür, sonra beher denature alkol ile çalkalanır, cam baget ile karıştırılır ve alkol süzgeç üzerine dökülür.

Bu işlem beher tamamen temizleninceye kadar 4-5 defa tekrarlanır. Cam, baget ve denature alkolün püskürtülmesi ile süzgeç üzerine alınır. Denature alkol ile iki defa çalkalanır. Süzgeç sabit tartıma gelinceye kadar etüvde kurutulur.

Bir desikatör içinde ortam sıcaklığına kadar soğutulur ve tartılır. Kütle g cinsinden m5 olarak kaydedilir. Alternatif olarak, elyaf uzunluğu 12 mm'den fazla ise Ek A'da belirtilen işlemler kullanılabilir. Bununla birlikte Madde 7.2.3.4' te verilen işlem daima referans metot olarak kullanılabilir.

#### **7.2.3.5 Dolgu maddesi tam olarak hidroklorik asit içinde çözünmemesi durumunda cam ve**

##### **dolgu maddesinin ayrılması**

Dolgu maddesi hidroklorik asit içinde çözünmeyip süzme işlemi sırasında süzgeç üzerinde kalırsa kütle m5 Madde 7.2.3.4' e belirtildiği şekilde tayin edilir ve aşağıdaki işlem uygulanır:

Cam, pens (Madde 7.2.2.5) kullanılarak süzgeç üzerinden alınır. Süzgeç, üzerindeki çözünmeyen dolgu maddesi ile birlikte tartılır. Kütle gram cinsinden m7 olarak kaydedilir.

**Not** – Cam filâmanlar çok kısa ise bunları dolgu maddelerinden el ile ayırmak imkânsız olabilir. Budurumda cam ve dolgu maddesinin muhtevası beraber tayin edilebildiği hâlde bu standardda verilen metotla cam ve dolgu muhtevasını ayrı ayrı tayin etmek mümkün değildir.

#### **7.2.4 Hesaplama ve sonuçların gösterilmesi**

Her numune için cam muhtevası  $M_{cam}$  ve dolgu muhtevası  $M_{dolgu}$ , başlangıç kütlelerinin yüzdesi olarak eşitlik (2) ve eşitlik (3) kullanılarak ayrı ayrı hesaplanır.

$$M_{cam} = \frac{m_5 - m_4}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (2)$$

$$M_{dolgu} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} - \frac{m_5 - m_4}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (3)$$

Burada;

m1: Boş kayıkçık veya krozenin ilk kütlesi, g,

m2: Boş kayıkçık veya kroze ve kurutulmuş numunenin başlangıç kütlesi, g,

m3: Kalsinasyon işleminden sonra kayıkçık veya kroze ve kalıntının son kütlesi, g,

m4: Kuru süzgecin kütlesi, g,

m6: Kalıntının asit ile reaksiyonundan sonra süzgeç ve muhtevasının kütlesi, g'dır.

Uçucu madde ihtiva eden kalıplama hamurlarının deneye tâbi tutulması durumunda, kurutma işlemi iptaledildiği zaman eşitlikteki m2, kuru kayıkçık veya krozenin ve kurutulmamış deney parçasının gram cinsinden kütlesini ifade eden m6 ile yer değiştirilir.

Süzme işleminden sonra süzgeç üzerinde hidroklorik asit içerisinde çözünmeyen dolgu maddesi varsa, eşitlik(2) ve eşitlik (3)'deki m4, kuru süzgeç ve çözünmeyen mineral dolgu maddesinin gram cinsinden kütlesini ifade eden m7 ile yer değiştirilir.

Münferit ölçümler arasındaki fark % 5'ten fazlaysa en küçük birim veya lâboratuvar numunesinin aynı bölgesinden alınan üçüncü bir deney numunesi ile ilâve bir tayin yapılır.

Deneyin sonuçları iki (veya üç) münferit ölçmenin ortalaması olarak verilir.

### **8 Kesinlik**

Lâboratuvarlar arası veriler temin edilemediğinden bu metodun kesinliği bilinmemektedir. Lâboratuvarlar arası veriler sağlandığında, kesinlik durumu bir sonraki revizyona eklenecektir.

Not – Lâboratuvarlar arası denemeler, Madde 7.2.3.4 ve Ek A'da verilen işlemlerin bağlı kesinliğinin araştırılmasını içerecektir.

### **9 Deney raporu<sup>3)</sup>**

Deney raporu en az aşağıdaki bilgileri ihtive etmelidir:

- a) Bu standardın işareti ve numarası (TS 1177 EN ISO 1172 şeklinde),
- b) Metot A veya Metot B'den hangisinin kullanıldığı,
- c) Deneye tâbi tutulan malzemenin tam olarak tanıtılması için gerekli bütün ayrıntılar,
- d) Kullanılan numune alma metodu,
- e) Deneye tâbi tutulan numune sayısı,
- f) Deney numunelerinin boyutları ve/veya kütlesi,
- g) 625 OC  $\pm$  20 OC' tan farklıysa, kalsinasyon sıcaklığı,
- h) Tekstil - cam muhtevasına ait deney sonuçları,
- i) Metot B kullanılmışsa mineral dolgu muhtevasına ait deney sonuçları,

---

3) **TSE Notu:** Deney raporu, burada istenilen bilgilere ilâveten, TS EN ISO/IEC 17025' te verilen bilgileri de ihtiva edecek şekilde düzenlenebilir.

j) Deney tarihi,

k) Deneyde karşılaşılan, sonuçlar üzerinde etkisi muhtemel olan durumların ayrıntıları, özellikle;

1. Çözünmeyen dolgu maddesinin varlığı,

2. Tekstil - cam veya çözünmeyen dolgu maddesinin el ile ayrılmasında karşılaşılan zorluklar.

## **Ek A**

### **(Bilgi için)**

#### **Kesilmiş cam elyafın mineral dolgu maddesinden ayrılması için alternatif metot**

Deneye tâbi tutulan malzeme en az 12 mm uzunluğunda kesilmiş iplik içerdiğinde, aşağıdaki farklı metot kullanılabilir.

Bu metot için cibinliğe benzer dokumadan yapılmış 15 cm genişliğinde 16 cm uzunluğunda (torba serilmiş halde iken ölçülen) bir torba kullanılır.

Cibinlik cm’de yaklaşık 7 iplik olacak şekilde dokunmuş PVC kaplı ipliklerden yapılmıştır.

Numune kalsinasyon işleminden sonra ortam sıcaklığında tartılır.

Numune cibinlik tipi kumaştan imâl edilen torbaya yerleştirilir.

Torba hidroklorik asit ihtiva eden bir beherin içine (torba yatay kalacak şekilde) yerleştirilir.

Köpürme tamamıyla bittikten sonra torba beherden çıkarılır ve taze asit ihtiva eden başka bir beherine içine yerleştirilir (Hidroklorik asit bir çok deney için kullanılabilir).

Köpürme bittikten sonra torba beyazlayıncaya kadar su ile yıkanır.

Deney numunesi torbadan çıkarılır, sıkılır ve bütün dolgu maddesinin uzaklaştırıldığından emin olunur.

Deney numunesi 105 0C ta 30 dakika kurutulur.

## TS EN ISO 1183-1

**PLASTİKLER - GÖZENKSİZ PLÂSTİKLER – YOĞUNLUKTAYIN METOTLARI - BÖLÜM 1:  
DALDIRMA METODU, SIVIPIKNOMETRE METODU VE TİTRASYON METODU****Ön söz**

- Bu standard, CEN tarafından kabul edilen EN ISO 1183-1: 2004 standardı esas alınarak TSE Petrokimyaİhtisas Grubu’nca hazırlanmış ve TSE Teknik Kurulu’nun 07 Aralık 2006 tarihli toplantısında TürkStandardı olarak kabul edilerek yayımına karar verilmiştir.
- EN ISO 1183 standard serisi, "Plâstikler – Gözeneksiz plâstikler – Yoğunluk tayin metotları" genel başlığıaltında aşağıda verilen bölümlerden meydana gelmiştir:
- Bölüm 1: Daldırma metodu, sıvı piknometre metodu ve titrasyon metodu
- Bölüm 2: Gradyen yoğunluk kolonu metodu
- Bölüm 3: Gaz piknometre metodu
- Bu standardda kullanılan bazı kelime ve/veya ifadeler patent haklarına konu olabilir. Böyle bir patent hakkının belirlenmesi durumunda TSE sorumlu tutulamaz.

**İKAZ – Bu standardda verilen metodun uygulanması sırasında tehlikeli maddelerin ve teçhizatınkullanımı ve işlemlerin uygulanması söz konusudur. Bu standard, kullanımından doğabilecek bütüngüvenlik önlemleriyle ilgili bilgiyi kapsamaz. Bu standardda verilen yöntemin uygulanmasından önceuygun sağlık ve güvenlik önlemlerinin alınması ve yasal sınırlamaların uygulanabilirliğinin tespitikullanıcının sorumluluğundadır.**

**1 Kapsam**

Bu standard serisi, toz, granül ve pul şeklinde olanlar da dahil olmak üzere, kalıplanmış veya ekstrüzyonlahazırlanmış, boşluk ihtiva etmeyen mamul halindeki gözeneksiz plâstiklerin yoğunluk tayini için uygulanan üçfarklı metodu kapsar.

- **Metot A : Daldırma metodu**, boşluk ihtiva etmeyen katı plâstikler için (tozlar hariç).
- **Metot B : Sıvı piknometre metodu**, tanecikler, tozlar, pullar, granüller veya tamamlanmış mamüllerinküçük parçaları için.

– **Metot C : Titrasyon metodu**, boşluk ihtiva etmeyen her tür plâstik için.

**Not** - Bu standardda verilen metot, boşluk ihtiva etmemeleri halinde tabletlere de uygulanabilir. Yoğunluk,plâstik maddelerin bileşimi veya fiziksel yapısındaki değişiklikleri takip etmek için sıklıkla kullanılır.Yoğunluk, numunelerin homojenliğini değerlendirmek için de kullanılabilir. Plâstik maddelerinyoğunluğu, sıklıkla seçilen numune hazırlama metoduna bağlıdır. Bu durumda, numune hazırlamametodunun ayrıntıları uygun malzeme şartnamesine eksiksiz olarak dâhil edilmelidir. Bu not üç metotiçin de geçerlidir.

## 2 Atıf yapılan standard ve/veya dokümanlar

Bu standardda, tarih belirtilerek veya belirtilmeksizin diğer standard ve/veya dokümanlara atıf yapılmaktadır.Bu atıflar metin içerisinde uygun yerlerde belirtilmiş ve aşağıda liste hâlinde verilmiştir. Tarih belirtilenatıflarda daha sonra yapılan tadil veya revizyonlar, atıf yapan bu standardda da tadil veya revizyon yapılmasışartı ile uygulanır. Atıf yapılan standard ve/veya dokümanın tarihinin belirtilmemesi hâlinde ilgili standardın son baskısı kullanılır.

| EN, ISO, IEC vb. No | Adı (İngilizce)                                            | TS No <sup>1)</sup>         | Adı (Türkçe)                                                                    |
|---------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| ISO 31-3            | Quantities and units – Part 3 : Mechanics                  | TS 296 ISO 31-3             | Uluslararası birimler sistemi (SI) – Büyüklükler ve birimler – Bölüm 3: Mekanik |
| ISO 291:1977        | Plastics-Standard atmospheres for conditioning and testing | TS EN ISO 291 <sup>1)</sup> | Plâstikler - Şartlandırma ve deney için standard atmosfer şartları              |
| ISO 472:1999        | Plastics-Vocabulary                                        |                             |                                                                                 |

## 3 Terimler ve tarifler

Bu standardın amacı bakımından, ISO 472’ de verilenlerle birlikte aşağıdaki terimler ve tarifler uygulanır.

### 3.1 Kütle

Yekpare bir cismin içerdiği madde miktarı.

**Not** - Bu standardda, kütle kilogram (kg) veya gram (g) olarak ifade edilmiştir.

### 3.2 Görünür kütle

Bir cismin, kalibre edilmiş uygun bir terazi kullanılarak ölçülmesiyle elde edilen kütlesi.

**Not** - Bu standardda, görünür kütle kilogram (kg) veya gram (g) olarak ifade edilmiştir.

### 3.3 Yoğunluk, $\rho$

Bir maddenin kütlesinin ( $m$ ) hacmine ( $V$ ) oranı ( $t$  sıcaklığında) olup, kg/m<sup>3</sup>, kg/dm<sup>3</sup> (g/cm<sup>3</sup>) veya kg/L (g/mL)olarak ifade edilir.

**Not** - ISO 31-3’ten alınan aşağıdaki terimler bir açıklık getirmek için verilmiştir.

<sup>1)</sup> **TSE Notu:** Atıf yapılan standartların TS numarası ve Türkçe adı 3. ve 4. kolonda verilmiştir. \* işaretli olanlar bu standardın basıldığı tarihte İngilizce metin olarak yayımlanmış olan Türk tandardlarıdır.

**Çizelge 1 – Yoğunluk terimleri**

| Terim       | Sembol | Formül              | Birimler                                                                                       |
|-------------|--------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Yoğunluk    | $\rho$ | $m/V$               | $\text{kg/m}^3$<br>$\text{kg/dm}^3$ (g/cm <sup>3</sup> )<br>$\text{kg/L}$ (g/mL)               |
| Özgöl hacim | $v$    | $V/m$ ( $=1/\rho$ ) | $\text{m}^3/\text{kg}$<br>$\text{dm}^3/\text{kg}$ (cm <sup>3</sup> /g)<br>$\text{L/kg}$ (mL/g) |

Deney atmosferi ISO 291'e uygun olmalıdır. Genelde, tayin işlemi sırasında numunenin sıcaklığının deneyortamının sabit sıcaklığına gelmesi nedeniyle, numuneleri önceden sabit bir sıcaklığa şartlandırmak gereklidir.

Deney esnasında yoğunluk tayin metodunun beklenen doğruluğundan daha büyük bir değere kadaryoğunluğu değişebilen numuneler, tayin öncesinde, malzemeye uygun standarda veya şartnameye göre şartlandırılmalıdır. Yoğunluğun zamanla veya atmosfer şartlarıyla değişimi ölçmelerin öncelikli amacıysa, numuneler uygun malzeme standardında tarif edildiği gibi, uygun bir malzeme standardı yoksa ilgili taraflar arasında varılan anlaşmaya göre şartlandırılmalıdır.

## 5 Metotlar

### 5.1 Metot A – Daldırma metodu

#### 5.1.1 Teçhizat

**5.1.1.1 Analitik terazi veya yoğunluk ölçmek için özel olarak tasarlanmış cihaz**, 0,1 mg hassaslıkta.

**Not** - Otomatik bir cihaz kullanılabilir. Yoğunluk hesaplaması bir bilgisayar kullanılarak da yapılabilir.

**5.1.1.2 Daldırma kabı**, daldırma sıvısının konulduğu uygun büyüklükte bir beher veya geniş ağızlı bir kap.

**5.1.1.3 Sabit destek**, daldırma kabını terazi kefesinin üzerinde tutmak için, örneğin bir üçayak.

**5.1.1.4 Termometre**, 0,1 °C aralıklarla taksimatlandırılmış, 0 °C ilâ 30 °C aralığında ölçme yapabilen.

**5.1.1.5 Tel** (gerektiğinde), numuneleri daldırma sıvısı içerisinde tutmak için korozyona dayanıklı ve çapı 0,5mm'den büyük olmayan.

**5.1.1.6 Kurşun ağırlık**, numunenin yoğunluğu daldırma sıvısından daha küçük olduğunda kullanılan venumunenin sıvının içerisine tamamıyla daldırılmasına yetecek uygun kütlede olan.

**5.1.1.7 Piknometre**, daldırma sıvısının su olmadığı durumlarda sıvının yoğunluğunu tayin etmek için, yantarafında ince taşma kolu olan. Piknometre 0,1 °C aralıklarla taksimatlandırılmış, 0 °C ilâ 30 °C aralığınıölçen bir termometreyle teçhiz edilmelidir.

**5.1.1.8 Sıvı banyo**, daldırma sıvısının yoğunluğunu tayin ederken kullanılan, termostatla sıcaklığı  $\pm 0,5$  °C hassaslıkla kontrol edilebilen.



### 5.1.2 Daldırma sıvısı

Hava kabarcıklarını uzaklaştırmak için % 0,1'den az ıslatma maddesi (yüzey aktif madde) ihtiva eden tazedamıtık su veya deiyonize su veya diğer uygun bir sıvı kullanılır. Deney numunesinin içine daldırıldığı vedeney süresince temas halinde olduğu sıvı veya çözelti numuneyi etkilememelidir.

Damıtık su dışındaki daldırma sıvılarının yoğunluklarını, akredite bir kaynaktan temin edilmeleri ve belgeliolmaları halinde, tayin etmeye gerek yoktur.

### 5.1.3 Numuneler

Numuneler, toz halindekiler hariç, boşluk içermeyen yapıda olmalıdır. Numuneler, daldırma kabıylaaralarında yeterli açıklık kalacak uygun boyutta ve tercihan en az 1 g kütleli olmalıdır.

Numuneler büyük malzemelerden kesilerek hazırlandığında, malzemenin karakterisitik özelliklerindeki değişmeden kalmasını sağlayacak uygun bir cihaz kullanılmalıdır. Numunenin yüzeyi daldırma sıvısınadaldırıldığında hava kabarcıklarının hapsolmasına yol açacak çukurlar içermemeli ve düzgün olmalıdır. Aksitaktirde, bu durum hatalı ölçmeye yol açar.

### 5.1.4 İşlem

**5.1.4.1** Numune, azami çapı 0,5 mm olan bir telle havada asılı şekilde tartılır. Kütlesi 10 g'a eşit veya küçükolan numuneler 0,1 mg doğrulukla tartılır. Kütlesi 10 g'dan büyük olan numuneler 1 mg doğrulukla tartılır.Numunenin kütlesi bir yere kaydedilir.

**5.1.4.2** Numune, destek (Madde 5.1.1.3) üzerinde bulunan daldırma kabı (Madde 5.1.1.2) içerisindekidaldırma sıvısına (Madde 5.1.2), tel üzerinde asılı bir şekilde daldırılır. Daldırma sıvısının sıcaklığı  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  (veya  $27^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ) olmalıdır. Numune yüzeyine tutunan hava kabarcıkları bir tel yardımıyla uzaklaştırılır. Daldırılmış numune 0,1 mg doğrulukla tartılır.

Ölçme bir sıcaklık kontrolü yapılan odada gerçekleştiriliyorsa, daldırma sıvısı ve teçhizatın tamamının sıcaklığı  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (veya  $27\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) aralığında olmalıdır.

**5.1.4.3** Sudan başka bir daldırma sıvısı kullanıldığında, gerekiyorsa, yoğunluğu aşağıdaki gibi tayin edilir.Piknometre (Madde 5.1.1.7) önce boş olarak, sonra da taze damıtılmış su veya deiyonize su konularak,  $23^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (veya  $27\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) sıcaklıkta tartılır. Aynı piknometre boşaltılıp, kurutulduktan sonra daldırma sıvısıyla doldurulup [ $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (veya  $27\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) sıcaklıkta] tartılır. Tayin esnasında su ve daldırma sıvısının sıcaklığını doğru sıcaklıkta tutmak için sıvı banyo (Madde 5.1.1.8) kullanılır. Daldırma sıvısının  $23^{\circ}\text{C}$  (veya  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ )' taki yoğunluğu,  $\rho_L$ , g/cm<sup>3</sup> olarak aşağıdaki eşitlikle hesaplanır :

$$\rho_L = \frac{m_L}{m_W} \times \rho_W \quad (1)$$

Burada;

$m_{IL}$  : daldırma sıvısının kütlesi, g,

$m_W$  : suyun kütlesi, g,

$\rho_W$  : suyun 23 °C (veya 27 °C)'taki yoğunluğu, g/cm<sup>3</sup>'tür.

**5.1.4.4** Numunenin 23 °C (veya 27 °C)'daki yoğunluğu,  $\rho_S$ , g/cm<sup>3</sup> olarak aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$\rho_S = \frac{m_{S,A} \times \rho_{IL}}{m_W - m_{S,IL}} \quad (2)$$

Burada;

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

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

$\rho_{IL}$  : tedarikçi tarafından beyan edilmiş veya Madde 5.1.4.3'te belirtildiği gibi tayin edilmiş, daldırma sıvısının 23 °C (veya 27 °C)'taki yoğunluğu, g/cm<sup>3</sup>'tür.

Daldırma sıvısından daha düşük yoğunluğa sahip numuneler için, aşağıdaki durum dışında, deney yukarıda tarif edilen metodun hemen hemen aynı şekliyle gerçekleştirilir. Bir kurşun ağırlık veya başka bir yüksek yoğunluklu madde, daldırma süresince numune ve kurşun ağırlık sıvı seviyesinin altında kalacak şekilde birtelele tutturulur. Kurşun ağırlık daldırma telinin bir parçası olarak düşünülebilir. Bu durumda, numunenin yoğunluğunu hesaplamak için Eşitlik (2) yerine daldırma sıvısı tarafından kurşun ağırlık üzerine uygulanacak kaldırma kuvvetinin de dikkate alındığı aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$\rho_S = \frac{m_{S,A} \times \rho_{IL}}{m_{K,IL} + m_{S,IL} - m_{S+K,IL}} \quad (3)$$

Burada;

$m_{K,IL}$  : daldırma sıvısında kurşun ağırlığın görünür kütlesi, g,

$m_{S+K,IL}$  : numunenin ve kurşun ağırlığın daldırma sıvısında görünür kütlesi, g, dir.

Daldırma telinin hava tarafından kaldırılması normalde dikkate alınmaz, fakat havanın kaldırma kuvveti içindüzeltme Madde 6'da verilmiştir.

**5.1.4.5** Deney en az üç numune ile gerçekleştirilir ve sonuçların ortalaması hesaplanıp virgülden sonra üçhane olacak şekilde verilir.

## **5.2 Metot B – Sıvı piknometre metodu**

### **5.2.1 Teçhizat**

**5.2.1.1 Terazı,** 0,1 mg hassaslıkta tartım yapabilen.

**5.2.1.2 Sabit destek,** (Madde 5.1.1.3).

**5.2.1.3 Piknometre,** (Madde 5.1.1.7).

**5.2.1.4 Sıvı banyo,** (Madde 5.1.1.8).

**5.2.1.5 Desikatör,** bir vakum sistemine bağlı.

### **5.2.2 Daldırma sıvısı**

Madde 5.1.2’de belirtildiği gibi.

### **5.2.3 Numuneler**

Toz, granül ve pul halindeki numuneler, temin edildikleri şekilde deneye tâbi tutulur. Numune kütlesi 1 g ilâ 5g arasında olmalıdır.

### **5.2.4 İşlem**

**5.2.4.1** Piknometre (Madde 5.2.1.3) kuru ve boş olarak tartılır. Plâstik maddeden uygun bir miktarpiknometreye konur ve tartılır. Deney numunesini örtecek kadar daldırma sıvısı (Madde 5.2.2) ilave edilir,piknometre desikatöre (Madde 5.2.1.5) yerleştirilir ve vakum uygulanarak havası boşaltılır. Vakum kaldırılırve piknometre daldırma sıvısıyla tamamına yakın doldurulur. Piknometre ve muhtevası bir sıvı banyoda(Madde 5.2.1.4) tutularak sabit sıcaklığa [23 °C ± 0,5 °C (veya 27 °C ± 0,5 °C)] getirilir. Bundan sonra

piknometre sıvı kapasitesinin tamamına kadar doldurulur.

Numune ve doldurma sıvısını ihtiva eden piknometre silinerek kurulanır ve tartılır.

**5.2.4.2** Piknometre muhtevası boşaltılır ve temizlenir, sonra havası giderilmiş, damıtılmış su veya deiyonizesu ile doldurulup yukarıda bahsedildiği gibi sıkışan hava çıkartılır. Piknometre ve muhtevasının kütlesi deneyısıcaklığında tartılır.

**5.2.4.3** Sudan farklı bir daldırma sıvısı kullanılmışsa bu işlem kullanılan daldırma sıvısı ile tekrarlanır ve busıvının yoğunluğu Madde 5.1.4.3’te belirtildiği gibi tayin edilir.

**5.2.4.4** Numunenin 23 °C (veya 27 °C)’taki yoğunluğu,  $\rho_s$ , g/cm<sup>3</sup> olarak aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$\rho_s = \frac{m_s \times \rho_L}{m_1 - m_2} \quad (4)$$

Burada;

$m_s$  : numunenin görünür kütlesi, g,

$m_1$  : boş piknometreyi doldurmak için gerekli sıvının görünür kütlesi, g,

$m_2$  : numune bulunan piknometreyi doldurmak için gerekli sıvının görünür kütlesi, g,

$\rho_L$  : tedarikçi tarafından beyan edilmiş veya Madde 5.1.4.3’de belirtildiği gibi tayin edilmiş, daldırma sıvısının 23 °C (veya 27 °C)’taki yoğunluğu, g/cm<sup>3</sup>,

tür.

**5.2.4.5** Deney en az üç numune ile gerçekleştirilir ve sonuçların ortalaması hesaplanıp virgülden sonra üçhane olacak şekilde verilir.

## **5.3 Metot C – Titrasyon metodu**

### **5.3.1 Teçhizat**

**5.3.1.1 Sıvı banyo,** (Madde 5.1.1.8).

**5.3.1.2 Cam silindir,** 250 mL kapasitede.

**5.3.1.3 Termometre,** 0,1 °C aralıklarla taksimatlandırılmış, çalışılan deney sıcaklığını ölçmeye uygunaralığa sahip.

**5.3.1.4 Ölçülü cam balon (balon joje),** 100 mL'lik.

**5.3.1.5 Düz uçlu cam baget karıştırıcı.**

**5.3.1.6 Büret,** 25 mL kapasiteli, 0,1 mL'ye taksimatlandırılmış ve sıvı banyoya daldırılacak birtasarımda.

### **5.3.2 Daldırma sıvıları**

Farklı yoğunluklarda ve birbiriyle karışabilen iki sıvı gereklidir. Bu sıvılardan birinin yoğunluğu deney malzemesinin yoğunluğunun hemen altında, diğerinki ise yüksek olmalıdır. Ek A'da yol göstermesi içindeğişik sıvı karışımlarının yoğunlukları verilmiştir. Gerekirse, birkaç mL sıvı ile hızlı bir ön deneme yapılabilir.

Ölçme esnasında numuneyle temas halinde olacak sıvı, numune üzerinde herhangi bir olumsuz etkiye sahip olmamalıdır.

### **5.3.3 Numuneler**

Numuneler, boşluk içermeyen uygun bir yapıda olmalıdır.

### **5.3.4 İşlem**

**5.3.4.1 Ölçülü cam balon** (Madde 5.3.1.4) vasıtasıyla, daha az yoğunlukta olan sıvıdan (Madde 5.3.2) 100mL dikkatli bir şekilde ölçülüp temiz, kuru bir 250 mL'lik cam silindire (Madde 5.3.1.2) konur. Cam silindir, sıcaklığı  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (veya  $27\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 'ta kontrol edilen sıvı banyoya (Madde 5.3.1.1) yerleştirilir.

**5.3.4.2** Deney numunesi parçaları silindir içerisine konur. Bu parçalar hava kabarcıkları ihtiva etmemeli vesilindir tabanına kadar inmelidir. Silindir ve muhtevası, arada karıştırılarak sıcaklığının banyo sıcaklığındakararlı hale gelmesi sağlanır.

**Not –** Termometrenin (Madde 5.3.1.3) sürekli olarak sıvı içerisinde tutulması tavsiye edilir. Böylece, ölçme anında termal dengenin sağlanıp sağlanmadığı ve özellikle seyrelme ısısının dağılıp dağılmadığının kontrol etme imkanı sağlar.

**5.3.4.3** Sıvının sıcaklığı  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (veya  $27\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) olduğunda, daha yoğun olan daldırma sıvısını ihtiva eden büretten (Madde 5.3.1.6) bir mililitre hacimlerde yoğun sıvıdan eklenir. Her bir katmadan sonracam baget dik olarak tutulup hava kabarcıkları oluşturmayacak şekilde silindirdeki sıvı karıştırılır.

Daha yoğun sıvının her ilavesi ve karıştırmadan sonra, deney numunesi parçalarının durumu gözlenir. Başlangıçta, parçalar hızla dibe düşecekler, fakat, daha yoğun olan sıvı ilavesi arttıkça deney parçalarının düşme hızı daha yavaş olacaktır. Düşme hızı yavaşlamaya başladığında, yoğun sıvı ilavesi 0,1 Ml hacimlerde yapılır. Deney numunesi parçalarının en hafif olanlarının, karıştırma sonucunda, en az bir dakika aşağı yukarı hareket etmeden sıvı içerisinde asılı kaldığı ana kadar katılan yoğun sıvının toplam miktarı belirlenir. Titrasyonun bu noktasında, gerekli yoğun sıvı miktarı kaydedilir. Bu noktada sıvı karışımının yoğunluğu deney numunesinin yoğunluğunun en düşük sınırına karşılık gelir.

Deney numunesinin en ağır parçalarının sıvı içerisinde en az bir dakika sabit bir seviyede asılı kaldığı anakadar daha yoğun olan sıvıdan eklemeye devam edilir. Gerekli olan yoğun sıvının miktarı kaydedilir.

Her sıvı çifti için, ilave edilen daha yoğun sıvı miktarı ve oluşan karışımın yoğunluğu arasındaki ilişkilendirilip, bu ilişki bir grafik haline getirilir.

Grafiğin her bir noktasına karşılık gelen sıvı karışımı yoğunluğu piknometre metoduyla tayin edilebilir.

## 6 Havanın kaldırma kuvveti için düzeltme

Tartma işlemlerinin havada yapıldığı yerlerde, elde edilen “görünür kütle” değerleri, numune ve kullanılabilecek ağırlıklar üzerindeki havanın kaldırma etkisini karşılayacak şekilde düzeltilmelidir. Sonuçların doğruluğunun % 0,2 ve % 0,05 arasında olması gerektiği hallerde bu düzeltme yapılmalıdır. Gerçek kütle,  $m_T$ , aşağıdaki eşitlik kullanılarak gram cinsinden hesaplanır:

$$m_T = m_{App} \times \left[ 1 + \frac{\rho_{Hava}}{\rho_s} - \frac{\rho_{Hava}}{\rho_L} \right]$$

Burada

$m_{App}$  : Görünür kütle, g,

$\rho_{Hava}$  : Havanın yoğunluğu, g/cm<sup>3</sup>, (23 °C ve 27 °C’te yaklaşık 0,0012 g/cm<sup>3</sup>),

$\rho_s$  : Numunenin 23 °C (veya 27 °C)’te yoğunluğu, g/cm<sup>3</sup>,

$\rho_L$  : Kullanılan kütelerin yoğunluğu, g/cm<sup>3</sup>,

tür.

Daha ileri seviyede doğruluk gerektiğinde, havanın yoğunluğunun basınç ve sıcaklıkla ilişkisi de dikkate alınmalıdır:

$$\rho_{Hava} = \frac{0,00131}{(1 + 0,00367 \times t)} \times \frac{1}{P}$$

Burada

$t$  : Deney sıcaklığı, °C,

$P$  : Atmosfer basıncı, bar,

dir.

## 7 Deney raporu2)

Deney raporu aşağıdaki bilgileri ihtiva etmelidir :

- Bu standardın işareti ve numarası (TS EN ISO 1183-1 şeklinde),
- Numune hazırlama metodu ve ön işlem de (uygunsa) dahil olmak üzere, deneye tabi tutulan malzemenin tam bir tanıtımı için gerekli bütün ayrıntılar,
- Kullanılan metot (A, B veya C),
- Kullanılan daldırma sıvısı (sıvıları),

---

2) **TSE Notu** : Deney raporu, burada istenilen bilgilere ilaveten, TS EN ISO/IEC 17025’de verilen bilgileri de ihtiva edecek şekilde düzenlenebilir.

- e) Deney sıcaklığı,
- f) Yoğunluğun münferit ve aritmetik ortalama değerleri,
- g) Havanın kaldırma etkisi için bir düzeltme yapıp yapılmadığı, yapılmışsa, ne tür bir düzeltme yapıldığının beyanı.

## Ek A

### (Bilgi için)

#### Metot C’de kullanmaya uygun sıvı karışımları

**İKAZ** – Aşağıdaki kimyasal maddelerden bazıları sağlığa zararlı olabilir.

**Çizelge A.1 – Metot C için sıvı karışımları**

| Sistem                                                                                     | Yoğunluk aralığı<br>g/cm <sup>3</sup> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Metanol/benzil alkol                                                                       | 0,79 – 1,05                           |
| İzopropanol/su                                                                             | 0,79 – 1,00                           |
| İzopropanol/dietilen glikol                                                                | 0,79 – 1,11                           |
| Etanol/su                                                                                  | 0,79 – 1,00                           |
| Toluen/karbon tetraklorür                                                                  | 0,87 – 1,60                           |
| Su/sodyum bromürün sulu çözeltisi <sup>a</sup>                                             | 1,00 – 1,41                           |
| Su/kalsiyum nitratın sulu çözeltisi                                                        | 1,00 – 1,60                           |
| Etanol/çinko klorürün sulu çözeltisi <sup>b</sup>                                          | 0,79 – 1,70                           |
| Karbon tetraklorür/1,3-dibromopropan                                                       | 1,60 – 1,99                           |
| 1,3-Dibromopropan/etilen bromür                                                            | 1,99 – 2,18                           |
| Etilen bromür/bromoform                                                                    | 2,18 – 2,89                           |
| Karbon tetraklorür/bromoform                                                               | 1,60 – 2,89                           |
| İzopropanol/metilglikol asetat                                                             | 0,79 – 1,00                           |
| <sup>a</sup> 1,41 yoğunluk değeri, kütleye % 40’lık sodyum bromür çözeltisine eş değerdir. |                                       |
| <sup>b</sup> 1,70 yoğunluk değeri, kütleye % 67’lik çinko klorür çözeltisine eş değerdir.  |                                       |

Aşağıda verilen sıvılar da değişik karışımlarda kullanılabilir:

|                 | Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-----------------|-------------------------------|
| n-Oktan         | 0,70                          |
| Dimetilformamit | 0,94                          |
| Tetrakloreten   | 1,60                          |
| Etil iyodür     | 1,93                          |
| Metilen iyodür  | 3,33                          |

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Duygu Gülfem Baydar  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 30.08.1987 - Fatih  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : duygugulfem@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

| Derece | Alan                              | Okul/Üniversite            | Mezuniyet Yılı |
|--------|-----------------------------------|----------------------------|----------------|
| Lisans | Metalurji ve Malzeme Mühendisliği | Yıldız Teknik Üniversitesi | 2009           |
| Lise   | Fen/Matematik                     | FMV Nişantaşı Işık Lisesi  | 2005           |

### İŞ TECRÜBESİ

| Yıl       | Firma/Kurum                              | Görevi              |
|-----------|------------------------------------------|---------------------|
| 2010 -    | Mir Araştırma Geliştirme Tic. A.Ş.       | Araştırma Mühendisi |
| 2007-2008 | Akmetal Metalurji Endüstri A.Ş.          | Stajyer             |
| 2006-2007 | SARKUYSAN Elektrolitik Bakır Sanayi A.Ş. | Stajyer             |

## **YAYINLARI**

### **Makale**

1.Baydar, D.G., Bekem, A., Doğu, M., Gemici, Z. Ve Ünal, A., (2011), “Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu”, YTÜD Sigma (Basım aşamasında)