



**T.C.  
YALOVA ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**FOTOPOLİMERİZASYON YÖNTEMİYLE CAM ELYAF TAKVİYELİ  
DOYMAMIŞ POLYESTER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SERHAT DURAK**

**DANIŞMAN: PROF. DR. MEHMET ATILLA TAŞDELEN**

**YALOVA  
KASIM 2023**





T.C.  
YALOVA ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

FOTOPOLİMERİZASYON YÖNTEMİYLE CAM ELYAF TAKVİYELİ  
DOYMAMIŞ POLYESTER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SERHAT DURAK  
2181150001

DANIŞMAN: PROF. DR. MEHMET ATILLA TAŞDELEN

YALOVA  
KASIM 2023



## ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “Fotopolimerizasyon Yöntemiyle Cam Elyaf Takviyeli Doymamış Polyester Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Serhat DURAK



## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, akademik anlamda bana her zaman destek olan ve doğru yolu gösteren saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Mehmet Atilla TAŞDELEN'e teşekkür ederim. Her zaman yanımda olduklarını bildiğim, her kararında görüşlerini bildiren ve destekleyen eşim Cansu'ya ve sevgili aileme teşekkür ederim.

Tez çalışması sırasında tesislerinde var olan her imkânı kullanımına sunan SAZCILAR A.Ş. firmasına teşekkür ederim.

Bu tez çalışması desteklenmesine olanak sağlayan Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine (Proje No: 2022/YL/0013) teşekkür ederim.

Kasım – 2023

Serhat DURAK





## İÇİNDEKİLER

|  |      |
|--|------|
| SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....   | ix   |
| TABLolar LİSTESİ.....  | xi   |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....   | xiii |
| FOTOPOLİMERİZASYON YÖNTEMİYLE CAM ELYAF TAKVİYELİ<br>DOYMAMIŞ POLYESTER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE<br>MEKANİK ÖZELLİKLERİNİ İNCELENMESİ ..... | xix  |
| ABSTRACT.....  | xxi  |
| 1. GİRİŞ .....   | 1    |
| 1.1. Literatür Taraması .....  | 1    |
| 1.2. Tezin Amacı .....   | 2    |
| 2. TEORİK KISIM.....   | 5    |
| 2.1. Elyaf Takviyeli Kompozitler.....  | 7    |
| 2.1.1. Elyaf tanımı ve özellikleri .....   | 9    |
| 2.1.2. Matris özellikleri.....   | 13   |
| 2.1.3. Elyaf-matris arayüzey özellikleri.....  | 22   |
| 2.1.4. Elyaf formları ve özellikleri.....  | 24   |
| 2.2. Tabakalı Kompozitler.....   | 25   |
| 2.2.1. Çok eksenli kumaşlar.....   | 28   |
| 2.3 Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri .....  | 30   |
| 2.3.1 Vakum infüzyon .....   | 32   |
| 2.3.2. İnfüzyon stratejisi .....   | 34   |
| 3. DENEYSEL ÇALIŞMA .....  | 37   |
| 3.1. Malzemeler.....   | 37   |
| 3.2. Cihazlar .....  | 38   |
| 3.3. Kompozit Test Plakalarının Üretimi .....  | 40   |
| 3.4. Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi .....  | 46   |
| 3.4.1. Çekme testi .....   | 47   |
| 3.4.2. Eğme testi .....  | 49   |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....  | 51   |
| 4.1. Çok Yönlü Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Özellikleri .....   | 51   |
| 4.1.1. Çekme özellikleri.....  | 51   |
| 4.1.2. Üç nokta eğme özellikleri.....  | 54   |
| 4.2. Tek Yönlü Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Özellikleri.....  | 56   |
| 4.2.1. Çekme özellikleri.....  | 56   |



|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 4.2.2. Üç nokta eğme özellikleri..... | 57 |
| 4.3. Proses Karşılaştırma .....       | 58 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....         | 61 |
| KAYNAKLAR .....                       | 63 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                        | 71 |





## SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

### SİMGELER

|     |                         |
|-----|-------------------------|
| °C  | : Santigrat Derece      |
| b   | : Genişlik              |
| d   | : Kalınlık              |
| kg  | : Kilogram              |
| nm  | : nanometre             |
| GPa | : Gigapaskal            |
| VOC | : Uçucu Organik Bileşik |

### KISALTMALAR

|     |  |
|-----|--|
| CFM | : Sürekli Elyaf Formu                      |
| CSM | : Kırpılmış Keçe Elyafı                    |
| CTP | : Cam Elyaf Takviyeli Polimer              |
| FRP | : Elyaf Takviyeli Plastik                  |
| HLU | : Islak Serim yöntemi – El Yatırma Yöntemi |
| IR  | : Infrared                                 |
| KN  | : Kilo Newton                              |
| LED | : Işık Yayan Diyot                         |
| NCF | : Kıvrımsız kumaş                          |
| NM  | : Nanometre                                |
| RTM | : Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi        |
| UV  | : Ultraviyole                              |
| VIP | : Vakum İnfüzyon Yöntemi                   |



## TABLULAR LİSTESİ

|   |    |
|---|----|
| Tablo 2.1. Cam elyafın fiziksel ve mekanik özellikleri [42].....                        | 10 |
| Tablo 2.2. Çeşitli cam elyaf sınıflarının fiziksel özellikleri [42] .....               | 13 |
| Tablo 2.3. Reçinelerin mekanik özellik kıyaslamaları [46] .....                         | 14 |
| Tablo 2.4. Katmanların yönlenme açısının düzenlemelerinin örnek gösterimi<br>[44] ..... | 27 |
| Tablo 4.1. Süre bakımında proses karşılaştırması.....                                   | 58 |
| Tablo 4.2. Maliyet bakımında proses karşılaştırması.....                                | 59 |





## ŞEKİLLER LİSTESİ

|   |    |
|---|----|
| Şekil 2.1. Kompozitlerin takviye çeşidine göre sınıflandırılması: a) elyaf takviyeli, b) tabakalı, c) parçacık takviyeli [25].....                                      | 6  |
| Şekil 2.2. Kompozit, matris ve elyafın temel gerilim-gerinim grafiği gösterimi [32] .....   | 8  |
| Şekil 2.3. Kompozitlerin elyaf yönleri ve formları:(a) sürekli ve yönlendirilmiş, (b) süreksiz ve yönlendirilmiş, (c) süreksiz ve gelişigüzel yönlendirilmiş [37] ..... | 9  |
| Şekil 2.4. Cam elyafın farklı uygulamalarının sektörteki pazar payı oranı [44].....   | 11 |
| Şekil 2.5. Cam elyaf üretimine bir bakış [46] .....   | 12 |
| Şekil 2.6. Cam elyaf üretimine bir bakış [47] .....   | 12 |
| Şekil 2.7: Polyester polimerin çapraz bağ ağının gösterimi [49].....  | 15 |
| Şekil 2.8. Kurlanmış polyesterin gösterimi [46] .....   | 16 |
| Şekil 2.9. Fotopolimerizasyonun genel gösterimi [65] .....  | 20 |
| Şekil 2.10. Elektromanyetik spektrum [68] .....   | 20 |
| Şekil 2.11. Spektrum gösterimleri sırasıyla (a) LED 365 nm, (b) 532 nm diod lazer, (c) 635 nm diod lazer [71] .....   | 21 |
| Şekil 2.12. Kompozit malzemenin fazları [73] .....  | 22 |
| Şekil 2.13. Islak (A) ve ıslak olmayan (B) yüzeylerin gösterimi. S: katı, l: sıvı ls: sıvı-katı arafaz, $\theta$ : kontakt açısı [74] .....                             | 23 |
| Şekil 2.14. Tek bir elyaftan tekstil malzemesine geçiş gösterimi [46] .....   | 25 |
| Şekil 2.15. Laminat ve ply (kat) gösterimi [46] .....   | 26 |
| Şekil 2.16. Çeşitli elyaf formlarının polar diagram gösterimi [46].....   | 29 |
| Şekil 2.17. Çok yönlü (multiaxial) kıvrımsız cam kumaşların şematik gösterimi [86] .....  | 30 |
| Şekil 2.18. Açık ve kapalı kalıplama yöntemlerinde kompozit malzemelerin üretim yöntemleri .....  | 31 |
| Şekil 2.19. Farklı CTP üretim yöntemlerinin karşılaştırılması [89].....   | 32 |
| Şekil 2.20 Vakum prosesi için yardımcı malzemelerin gösterimi [46].....   | 33 |
| Şekil 2.21. İnfüzyon prosesinin simülasyonu [95].....   | 35 |
| Şekil 3.1. Keçe, cfm ve quadaxial cam elyaflarının gösterimi .....  | 37 |
| Şekil 3.2. LED UV ile kurlanan doymamış polyester reçine .....  | 38 |
| Şekil 3.3. SHIMAZDZU mekanik test cihazı .....  | 38 |
| Şekil 3.4. Çalışmalarda kullanılan LED foto reaktör .....   | 39 |
| Şekil 3.5. İnfüzyon yönteminde kullanılan vakum pompası.....  | 39 |
| Şekil 3.6. Dik işleme merkezi .....   | 40 |
| Şekil 3.7. Laminasyon planları ve cam elyaf sıralamaları .....  | 40 |



|  |    |
|--|----|
| Şekil 3.8. Kalıp yüzeyinin kalıp ayırıcı ile parlatılması.....   | 41 |
| Şekil 3.9. Cam çevresine sızdırmazlık macunu uygulaması .....  | 41 |
| Şekil 3.10. Elyafların laminasyon planına göre serilmesi.....  | 42 |
| Şekil 3.11. Ayırıcı film ve akış filesi serimi .....   | 42 |
| Şekil 3.12. T bağlantı ve spiral boruların yerleşimi .....   | 43 |
| Şekil 3.13. Vakum naylonunun serilmesi .....   | 43 |
| Şekil 3.14. Sistemin vakum altına alınması .....   | 44 |
| Şekil 3.15. İnfüzyon prosesi ve reçinenin ilerlemesi .....   | 45 |
| Şekil 3.16. İnfüzyon sonra UV ile kürlendirme .....  | 46 |
| Şekil 3.17. Kompozit test numunelerinin hazırlanması .....   | 47 |
| Şekil 3.18. Sırasıyla dört eksenli kumaştan 90° yönünde, 0° yönünde ve karışık formdaki fotobaşlatıcı mekanik test numuneleri..... | 47 |
| Şekil 3.19. Çekme testi numunelerinin ölçümü .....   | 48 |
| Şekil 3.20. Foto kür numunesi çekme testi .....  | 48 |
| Şekil 3.21. Kumpas ile ölçülen üç nokta eğme testi numuneleri .....  | 49 |
| Şekil 3.22. Cam elyaf takviyeli kompozit numuneler için üç nokta eğme testi.....   | 49 |
| Şekil 4.1. İki numaralı laminasyon yapısına ait fotobaşlatıcı plaka için 90° yönelimli çekme gerilimi grafiği.....                 | 51 |
| Şekil 4.2. İki numaralı laminasyon yapısına ait referans plaka için 90° yönelimli çekme gerilim grafiği.....                       | 52 |
| Şekil 4.3. Çekme testi sonrası 90° yönelimli foto kür ve referans test numuneleri.....   | 52 |
| Şekil 4.4. İki numaralı laminasyon yapısına ait fotobaşlatıcı plaka için 0° yönelimli çekme gerilimi grafiği.....                  | 53 |
| Şekil 4.5. İki numaralı laminasyon yapısına ait referans plaka için 0° yönelimli çekme gerilimi grafiği .....                      | 53 |
| Şekil 4.6. Çekme testi sonrası 0° yönelimli foto kür ve referans test numuneleri .....   | 54 |
| Şekil 4.7. Foto kürlenmiş ve referans kompozitlerin 0° yönelimli eğilme dayanımı karşılaştırması.....                              | 54 |
| Şekil 4.8. Mekanik testler sonrasında çok yönlü (0°) foto kür ve referans cam elyaf takviyeli kompozitler.....                     | 55 |
| Şekil 4.9. Foto kürlenmiş ve referans kompozitlerin 90° yönelimli eğilme dayanımı karşılaştırması.....                             | 55 |
| Şekil 4.10. Mekanik testler sonrasında çok yönlü (90°) foto kür ve referans cam elyaf takviyeli kompozitler.....                   | 55 |
| Şekil 4.11. Fotobaşlatıcı çekme gerilimi grafiği.....  | 56 |
| Şekil 4.12. Referans çekme gerilimi grafiği.....   | 56 |



|  |    |
|--|----|
| Şekil 4.13. Çekme testi sonrası foto kür ve referans test numuneleri .....                               | 57 |
| Şekil 4.14. Bir numaralı laminasyona ait eğilme dayanım karşılaştırması .....                            | 57 |
| Şekil 4.15. Mekanik testler sonrası foto kür ve referans cam elyaf takviyeli<br>kompozit numuneleri..... | 58 |





# FOTOPOLİMERİZASYON YÖNTEMİYLE CAM ELYAF TAKVİYELİ DOYMAMIŞ POLYESTER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİ İNCELENMESİ

## ÖZET

Kompozit malzeme iki veya daha fazla malzemenin mekanik olarak birbirine bağlanmasıyla oluşan uniform olmayan bir malzemedir. Kompozit içerisindeki her bir malzeme kendi özelliklerini korur ve birbirlerine bağlandıklarında bütünleşik katı olarak özellikleri daha iyi hale gelir. Matris ve takviye edici kompoziti oluşturur. Cam elyaf takviyeli polyester, polyester reçine matrisinde sürekli elyafli takviyelendirilmiş polyester kombinasyonlarından en bilinen çeşididir. Düşük üretim maliyeti ve kolay ulaşılabilir olmasının yanında teorik seviyelere yakın takviye içermesi cam elyaf takviyeli polyesterlerin geliştirilmesinde rol oynamaktadır. Polyester reçinelerin ısı olarak kürlenmiş cam elyaf takviyeli polyester reçinelerin büyüyen pazarı göz önüne alındığında, fotopolimerizasyon yöntemi ile kısa sürede küreleştirilebilmesi sınırlı kalıp geliştirilmesi gereken bir konudur.

Tez çalışmamızda; üretim endüstrisinde en sık kullanılan polyester reçinenin fotopolimerizasyon yöntemi ile oda sıcaklığında dakikalar içerisinde küreleştirilmesi üzerine çalışılacak ve bu amaca uygun farklı laminasyonlar ile farklı üretim teknikleri kullanılacaktır. Endüstride ısı olarak küreleşen cam elyaf takviyeli kompozitlerin özellikleri ile karşılaştırılacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Fotopolimerizasyon, Cam elyaf, Doymamış polyester reçine, Mekanik özellikler, Kompozitler



# **PRODUCTION OF GLASS FIBER REINFORCED UNSATURATED POLYESTER MATRIX COMPOSITES VIA PHOTOPOLYMERIZATION AND INVESTIGATION OF THEIR MECHANICAL PROPERTIES**

## **ABSTRACT**

Composite material is a non-uniform material that made by two or more materials which is bonded mechanically. Each material in the composite maintains its own characteristics and these materials bonded to each other, it's properties improve. Composite made from matrix and reinforcement. Glass fiber reinforced polyester is the most well-known variety of continuous fiber reinforced polyester matrix. Besides of low production cost and easy accessibility, big role is belong to reinforcement to reach contains reinforcement almost theoretical level.

Curing via photopolymerization in a short time that need to be improved considering the growing market of thermally cured glass fiber reinforcement polyester resin.

In this project, it is aimed to curing of well-known polyester resin used in the production industry via photopolymerization method in minutes at room temperature. Expedient to curing via photopolymerization, different production method will be used with variant of lamination structures. In addition, the comparison of cured via thermally and photopolymerization will also be the main objectives of the thesis study.

**Keywords:** Photopolymerization, Glass fiber, Unsaturated polyester resin, Mechanical properties, Composites



## 1. GİRİŞ

Elyaf takviyeli kompozitler uzay, otomobil ve rüzgâr türbin kanatlarının üretimi gibi uygulamalarda metal yapıların yerini almada büyük bir potansiyele sahiptir. Cam elyaf, otomobil gövdeleri, ısıl ve elektriksel yalıtım, çeşitli spor malzemeleri, ev eşyalarında ve birçok endüstriyel uygulamada öne çıkan malzemelerden birisidir. Cam elyafın kendi içinde bakıldığında düşük üretim maliyeti karbon ve bazalt gibi diğer elyaf çeşitlerine göre avantaj gibi görünse de yine de üretim maliyetini düşürmenin yöntemleri bulunmaktadır.

### 1.1. Literatür Taraması

Literatürde; polyester reçinelerin fotopolimerizasyon yöntemi ile kürlendiği çalışmalar genellikle sadece bir üretim metodu ile üretilen kompozitlere aittir [1]. Çeşitli cam elyaf formları kullanılarak farklı kompozit parça üretim yöntemleriyle üretilmiş kompozitlerin karşılaştırmasına rastlanmamıştır.

Crivello ve arkadaşlarının [2] yaptığı öncü çalışmada; cam elyaf takviyeli kompozitler onyum tuzu esaslı katyonik fotobaşlatıcı içeren epoksidize bitki yağlarının (keten ve soya) ultraviyole (UV) ışık etkisiyle kürlenmesi sonucu elde edilmiştir. Sikloalifatik epoksi reçine ve epoksidize bitki yağlarının çeşitli karışımları (100:0, 60:40, 40:60, 0:100) el yatırması yöntemi ile cam elyaf kumaşlara nüfuz ettirilmiştir. Elde edilen kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan testler sonucu UV ışık ile kürlenmiş cam elyaf takviyeli epoksi esaslı kompozitlerin düşük performans uygulamaları (boru, menfez, tekne, çatı vb.) için yeterli mekanik özelliklere sahip olduğu, yüksek performans uygulamaları için ise geliştirilmesi gerektiği tespit edilmiştir.

P. Compston ve arkadaşlarının [3] yaptığı çalışmada ise UV ışık etkisiyle kürlenmiş cam elyaf takviyeli vinilester kompozitlerin mekanik özellikleri ve stiren emisyonları incelenmiştir. UV ışık ile kürlenmiş cam elyaf takviyeli vinilester kompozit geleneksel yöntemlerle oda sıcaklığında ısıl olarak kürlenmiş kompozitler ile karşılaştırılmıştır. UV ışık etkisiyle kürlenmiş kompozit 10 dakika boyunca oda sıcaklığında UV ışığa maruz bırakılmıştır. Çekme ve eğme dayanımları her bir kompozit için karşılaştırılmıştır. Ek olarak, UV etkisiyle kürlenmiş kompozit ısıl olarak kürlenmiş açık kalıplamaya göre dört kat daha az stiren salınımı göstermiştir. UV etkisiyle kürlenmiş

kompozitlerin üretim süresinin azalmasıyla birlikte yüksek mekanik özellikler sergilediği sonucuna ulaşılmıştır.

Literatür taraması sonucu bu konunun oldukça yeni olduğu ve yalnızca birkaç çalışmanın literatüre kazandırıldığı görülmüştür. İncelenen çalışmalarda aşağıdaki eksiklikler tespit edilmiştir;

1) Fotopolimerizasyon reaksiyonları için genellikle UV ışınları kullanılmış olup yalnızca tek bir çalışmada [4] görünür bölge ışınları kullanılmıştır. Ancak bu çalışmanın devamında kürlenme için dışarıdan ısıda uygulanarak ekstra enerji harcanmıştır.

2) Bu çalışmalarda, kullanılan elyaf takviyeler hakkında teknik bilgiler (kumaş özellikleri, gramaj, katman sayısı, elde edilen kalınlık vb.) yetersiz kalmıştır.

3) Ayrıca bu çalışmalarda elyaf takviyeli kompozitlerin üretim aşaması el yatırması yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem ile düşük elyaf oranlı kompozitler elde edilmesinden dolayı performans özellikleri sınırlı olmaktadır.

Polyester reçinede kullanılacak fotobaşlatıcı kompleksi görünür bölge ışınları ile aktifleşebilecek özellikte olacaktır. Görünür bölge ışınları sayesinde derin bölgelerdeki fotobaşlatıcılar aktifleşebilecek ve parça kalınlığı boyunca etkin bir kürlenme sağlanabilecektir. Çalışmalarda çift taraflı (alttan ve üstten) ışıklandırma uygulanacak olup, birkaç dakika içerisinde kürlenmeye başlayan numuneler üretilecektir. Ayrıca LED (Işık Yayan Diyot) ışık kaynağı ile daha yüksek dalga boyuna sahip görünür bölge ışınları kullanılacağı için ışığın daha derinlere etki etmesi mümkün olacaktır.

## **1.2. Tezin Amacı**

Fotopolimerizasyon yöntemi ile endüstride büyük hacim kaplayan ısı kaynağı fırınlar yerine UV ışığıyla birlikte çok kısa sürede kürlenme sağlanabilir. Fotopolimerizasyon ile cam elyaf takviyeli kompozitlerin yüksek üretilebilirlik, yüksek hız, yüksek güvenilirlik, düşük enerji tüketimi ve düşük çevresel etkiler sağlamaktadır. Örnek verilecek olursa endüstride saatler alan polimerizasyon UV ışınları sayesinde dakikalar mertebesine inecek ve bunun sonucu olarak toplam süreç yönetimi kısalmaktadır. Bununla birlikte laminasyon işlemi ve kürlenme süreci boyunca doğaya salınan stiren süresi azalmaktadır.

“Fotopolimerizasyon Yöntemiyle Cam Elyaf Takviyeli Doymamış Polyester Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı tez çalışmasının amacı; uzun sürelerde kürleşen polyester reçineyi fotopolimerizasyon yöntemiyle hızlı ve etkin bir şekilde kürleştirerek çevreye daha az zararlı, toplam maliyet açısından ve seri üretime uygun elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanmaktır.

Tezin ikinci kısmında tabakalı kompozitler, elyaf takviyeli kompozitler ve bu kompozitlerin üretim metodları olarak teorik bilgilere yer verilmiştir. Üçüncü kısımda ise cam elyaf takviyeli kompozitlerin üretimiyle birlikte kompozitlerin mekanik karakterizasyonlarına ait malzeme sınıflandırılması ve yöntemleri ortaya konmuştur. Mekanik testlere ait sonuçlar ise dördüncü bölümde yer almaktadır. Değerlendirme bölümü ise aynı zamanda son bölüm olan beşinci bölümde yer almaktadır.



## 2. TEORİK KISIM

Modern bilim ve teknolojinin hızlı gelişimi ile malzeme teknolojisi de aynı şekilde gelişmiştir. Kullanım çeşidi olarak daha karmaşık hale geldikçe, insanların malzemelere ihtiyacı giderek artmaktadır [5].

Yaygın olarak malzeme sınıflandırması;

- 1) Metal malzemeler,
- 2) İnorganik metal olmayan malzemeler,
- 3) Polimer malzemeler şeklinde yapılmaktadır.

Metal malzemeler kimyasal olarak stabil ve yüksek yoğunluklu fakat işlenmesi ve şekillendirilmesi zor malzemelerdir. İnorganik metal olmayan malzemeler kararlı özelliklere, korozyon direncine ve yüksek sıcaklık dayanımına sahip olmasına karşın baskı gerilimine karşı dirençliken, çekme gerilimi ve eğilme dayanımı zayıftır. Bu durum kırılma bir yapıda olmalarına sebep olur. Polimer malzemeler ise yüksek tokluğa ve iyi yorulma direncine sahipken yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı değildir. Bu nedenle, farklı malzemelerin üstün özelliklerinin çok işlevli yeni malzemeler hazırlamak üzere birleştirilmesi çözülmesi gerek acil bir sorun ve akademik araştırmalarda önemli bir alan haline gelmiştir [6-7].

Bilinen malzemeler ile karşılaştırıldığında kompozit malzemeler birçok üstün özelliklere sahiptirler. Kompozit malzemelerin tek görevi her bir bileşenin özelliklerini korumakla sınırlı olmadığı gibi, aynı zamanda bir malzemenin zayıf yönünü de geliştirebilir. Malzemelerin birleşimi tokluk, süneklik, hafiflik ve yanmazlık direnci gibi yeni özellikler kazandırır [8-10].

Elyaf takviyeli yapısal uygulamaların ilk olarak 1949 yılında ortaya çıkmasıyla birlikte yaklaşık olarak 4,5 kilogram (kg) tüketim düzeyi, devam eden on yıllar boyunca artarak yeni bir plastik uygulama alanı haline dönüşüp sırasıyla 453 bin ton ile 907 bin ton tüketim seviyesine ulaşacaktır. Kompozit malzemelerin düşük ağırlık/yüksek dayanım özelliği sebebiyle tüketim miktarı hala bir çok uygulama alanında kullanılmakta ve giderek artmaktadır [11].

Termoset matriks oda sıcaklığı seviyesinden başlayıp 100 santigrat derece (°C) seviyelerinde ki yüksek sıcaklıklar ile sertleşebilen ve sertleştikten sonra ısıyla

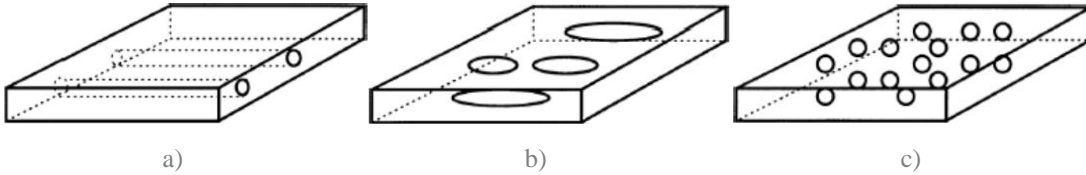
yeniden şekillendirilemeyen kompozit matrisler olarak tanımlanır. Genellikle iki veya daha fazla malzeme içeren, sertleştirici ajan ile reçine matrisinin oda sıcaklığında polimerize olması yada reçine matrisinin ve sertleştirici ajanın yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında polimerize olması ve kurlenmesini ifade eder [11].

Termoset polimerler mühendislik bileşenlerinde, yapıştırıcılarda ve bu çalışmada asıl konusu olan elyaf takviyeli kompozitlerde matris olarak oldukça geniş bir alanda kullanılmaktadır [12].

Raylı sistemler sektöründe kompozit malzemelerin yapısal alanda ve demiryolu araç parçalarında kullanımına yönelik bir çok yenilikçi aksiyonlar bulunmaktadır [13].

Malzemenin matrisine göre kompozit malzemeler metal kompozitler ve metal olmayan kompozitler olarak ayrılabilir. Metal kompozit malzemeler çoğunlukla alüminyum [14-17], paslanmaz çelik [18-21], titanyum [22-24] içerir. Metal olmayan kompozit malzemeler ise reçine matrisli kompozit malzemeler ve seramik matrisli kompozit malzemelere ayrılabilir. Daha geniş bir tanımda kompozit malzemeleri sınıflandırsak;

- 1) Elyaf takviyeli,
- 2) Parçacık takviyeli,
- 3) Tabakalı kompozit malzemeler olarak ayrılabilir [25].



Şekil 2.1. Kompozitlerin takviye çeşidine göre sınıflandırılması: a) elyaf takviyeli, b) tabakalı, c) parçacık takviyeli [25]

Tüm bu belirtilen çeşitler içinde elyaf takviyeli malzemeler en yaygın kullanılan ve üretim bakımından en fazla yer tutan çeşittir. Özgül ağırlık, spesifik dayanım, çekme dayanımını ve kompozit malzemenin rijitliğini önemli oranda arttıran yüksek modül, düşük çekme oranı ve yüksek ısıl bozunma sıcaklığı bu malzemenin önemli karakteristiklerindedir.

## 2.1. Elyaf Takviyeli Kompozitler

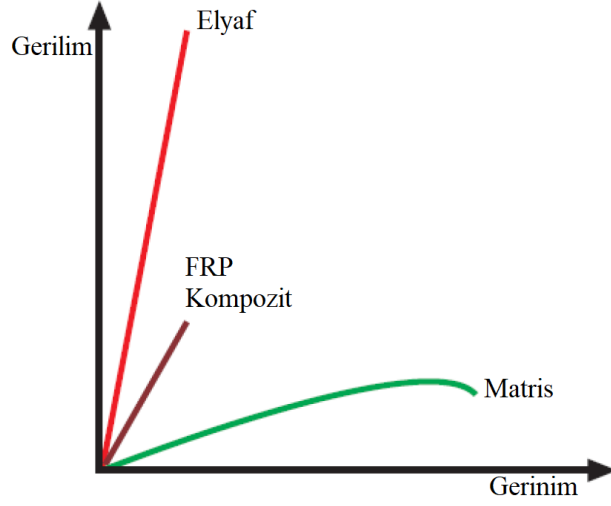
Uzay ve havacılık endüstrisi elyaf takviyeli kompozit malzemelerin yararlarını ve faydalarını ilk fark eden endüstrilerden olmuştur [26]. Geleneksel üretim yöntemlerinden olan ıslak serim yöntemi (HLU) ve reçine transfer kalıplama (RTM) kompozit üretiminde daha çok öne çıkan üretim yöntemlerindedir. Yakın bir geçmişe kadar parça kalitesini ve proses kontrollerini iyileştirmeye birlikte proses zamanını azaltmak üzerine çalışmalar yapılmıştır [12].

Pratik uygulamalarda, kompozit bir malzemenin performansı büyük ölçüde elyafların özelliklerine ve miktarına bağlı olduğu bilinmektedir. Cam elyaf, aramid, karbon gibi elyaflar ve basalt elyaf en yaygın olarak kullanılan elyaf takviyeli malzemelerdir. Havacılık, elektriksel aletler ve inşaat mühendisliği gibi farklı çeşitli alanlarda kullanılmakta ve her bir elyaf çeşidi bir karakteristik sergilemektedir [27-28].

Polimerik matriks içinde yer alan elyaf takviyesi polimerik malzemeye hafiflik, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, dış ortam dayanımını, boyutsal stabilite gibi birçok avantajın yanında düşük bakım maliyeti ve kişiye özel malzeme özelliğini beraberinde getirmektedir [29].

Bunula birlikte istenilen uygulama gerekliliğine uygun özellikte kompozitler elde etmek için mekanik, tribokojik ve su soğurmasına katkı sağlayan çeşitli elyaflar farklı polimerlerde denenmiştir. Elyafların tek yönlü ve neredeyse sonsuz uzunlukta (sürekli elyaf) olması sebebiyle mükemmel sonuçlar elde edilmesi tahmin edilebilir. Diğer bakımdan, daha fazla anizotropik ve daha kısa elyaf seçimi mekanik performansı düşürecektir. Elyafın uzunluğu, yönü ve tipiyle ilgili yapılan gözlemler elyaf takviyeli kompozitlerin (FRP) uygulama alanını arttırmaktadır. İleride, herhangi bir proje özelinde spesifik mekanik ihtiyaca yönelik tamamen özel olarak kompozit üretilebilirken aynı zamanda son uygulamada verimliliği artırıcı etki edecektir.

Elyaf takviyeli kompozitlerde ürün üstüne gelen yükleri karşılayacak temel bileşen elyaftır. Polimer matrisin ana görevi ise elyafları belirli biçimde bir arada tutacak ortamı oluşturmaktır [30]. Tüm bu sebeplerden dolayı kullanılacak elyafın mekanik dayanımı matristen büyük ölçüde yüksek olarak seçilmelidir [31].



Şekil 2.2. Kompozit, matris ve elyafın temel gerilim-gerinim grafiği gösterimi [32]

Genel olarak kompoziti ifade eden bazı özellikler vardır.

Bunlar;

- Elyafın özellikleri,
- Matris özelliği,
- Elyaf & matris oranı,
- Elyafın yönlenme şeklidir [32].

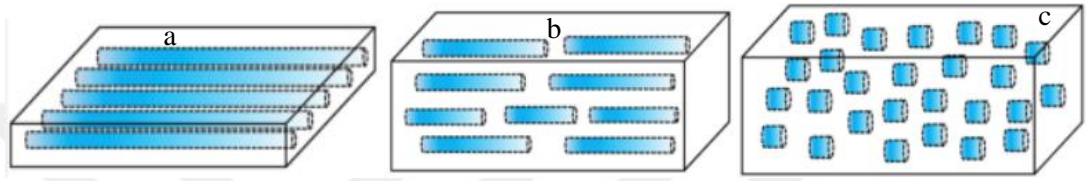
Seçilen üretim tekniğiyle birlikte temelde belirtilen dört ana nokta kompozitin mekanik ve fiziksel özelliklerini belirlemektedir.

Son zamanlarda kullanılan en yaygın elyaflar cam elyaflar, karbon elyaflar, aramid elyaflar ve doğal elyaflardır. Belirtilen tüm elyaflar görece daha düşük yoğunluğa sahipken, matriksin daha yüksek dayanım ve sertlik sağlamasına yardımcı olur. Doğal elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri sentetik elyaf kompozitlerden farklı olduğu için, üretim süreçlerindeki zorlukların üstesinden gelmek için araştırmalar yapılmaktadır [33].

İstenilen karakteristik kompozit üretiminde matriks ile kombinasyonu ile elyaf matriks fazı içinde kendi özellikleriyle yer alır. Elyaf tipi, elyaf boyutu, matriks içindeki elyaf yönü, yüzey durumu, kimyasal kompozisyonu gibi özellikler mukavemet, tokluk, rijitlik, korozyon direnci gibi mekanik özelliklerin belirlenmesinde çok büyük rol oynamaktadır [34].

Darbe dayanımı, ısıl genleşme ve ısıl iletkenlik gibi davranışlar da benzer şekilde elyafların yönlenme eksenine açısal olarak bağlıdır. Elyaflarla takviyeli kompozitlerde, elyaf yönlenmesi düzenlenerek sözü edilen özelliklerin yöne bağlı kontrolü sağlanır [35].

Kompozitte yer alacak elyafların fiziksel biçimleri, meydana gelecek yeni malzemenin özellikleri bakımından oldukça önem arz etmektedir. Elyaf takviyeleri ise kendi içlerinde fiziksel tiplerine göre; yönlendirilmiş kısa elyaflar, sürekli ve kırpık kısa elyaflar olarak ayrılmaktadır [36].



Şekil 2.3. Kompozitlerin elyaf yönleri ve formları:(a) sürekli ve yönlenmiş, (b) süreksiz ve yönlenmiş, (c) süreksiz ve gelişigüzel yönlenmiş [37]

Yük yönündeki mukavemet ve sertliğe bağlı olarak ileri kompozit tabakası uyarlanabilir. Bunu gerçekleştirmek için tabaka (laminasyon) adı verilen tek yönlü malzeme yük gereksinimini karşılayacak şekilde yönlendirilir. Bu laminasyon elyaflar ve matriksten oluşur. Yönlü tabakaların kullanılmasıyla birlikte, yapının çekme, eğilme ve burulmalı kesme özellikleri golf sopasında olduğu gibi eğilme ve çekme mukavemetinde değişim olmadan burulma mukavemetinin bir dereceye kadar değişmesi gibidir. Ayrıca elyaflar laminasyon içerisinde aynı malzemeden veya çeşitli elyaf karışımlarından (hibrit) oluşabilir [38]. Tabakalı kompozitler kısmında detaylı olarak takviyelendirme malzemelerine yer verilecektir.

### 2.1.1. Elyaf tanımı ve özellikleri

Elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri gerilimin iletimiyle doğrudan ilişkili olup elyaf mukavemeti, matriks mukavemeti ve elyaf/matriks ara yüzey dayanımına bağlıdır [39].

Yıllar içinde, cam, karbon, aramid, bazalt gibi birçok elyaf çeşidi bulunmuş ve ileri FRP kompozitlerin üretiminde hala kullanılmaktadır. Genellikle, elyaf lifleri çeşitli fazdaki ham maddenin küçük boyutlu deliklerden geçirilmesi, katılaşması ve liflerin

çekilmesi ile elde edilir [40]. Çalışmamızda elyaf takviyesi olarak cam elyaf ve cam elyafın farklı çeşitleri kullanılmıştır.

### Cam elyaf

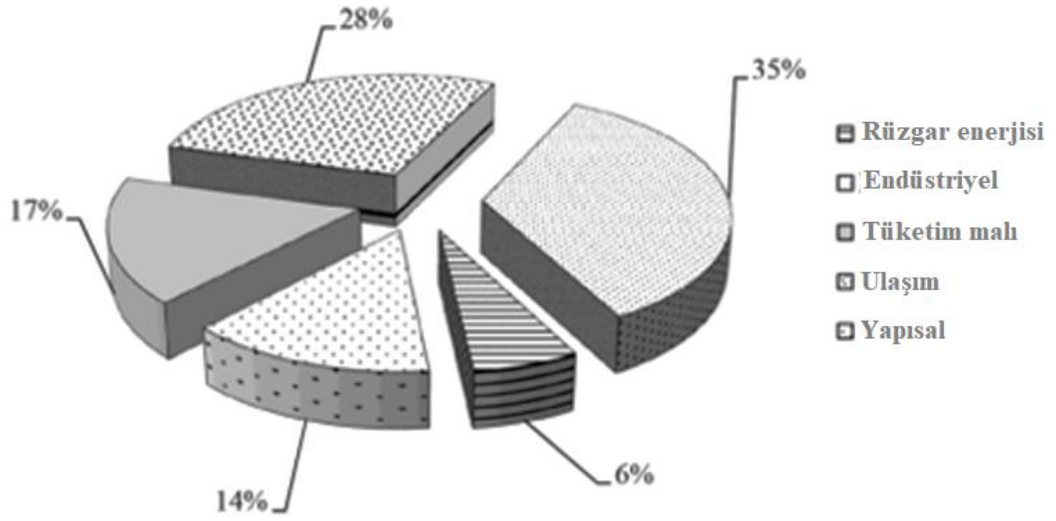
Modern zamanların keşfedilen en ünlü icatlarından bir tanesidir. Cam elyaf ilk olarak 1930 yılında yüksek ısıya maruz kalan elektriksel uygulamalarda yalıtkan olarak kullanılması için üretilmiştir [34].

Kompozitlerde en çok kullanılan ve en uzun periyotta gelişmesi devam eden elyaf türü cam elyafıdır. Bu süre içerisinde, artık üretilmeyen yada tedariği sınırlı olarak sağlanan camlar gibi birçok farklı cam geliştirilmiştir. Kompozit yapılarda kullanılmaya devam eden cam türleri Tablo 2.1’de verilmiştir [41].

Tablo 2.1. Cam elyafın fiziksel ve mekanik özellikleri [42]

| Tip    | Çekme gerinimi (GPa) | Young modülü (GPa) | Uzama (%) | Yoğunluk (g/m <sup>3</sup> ) |
|--------|----------------------|--------------------|-----------|------------------------------|
| E camı | 3.445                | 72.3               | 4.8       | 2.58                         |
| C camı | 3.310                | 68.9               | 4.8       | 2.52                         |
| S camı | 4.890                | 86.9               | 5.7       | 2.46                         |
| A camı | 3.310                | 68.9               | 4.8       | 2.44                         |
| R camı | 4.135                | 85.5               | 4.8       | 2.54                         |

Cam elyaf silis kumu, kireç taşı, borik asit ve diğer bileşenlerin karıştırılıp, eritildikten (yaklaşık 1250°C) sonra lif formuna getirilmesiyle meydana gelir. Cam elyafı, fitil demeti, tek yönlü kumaş, dikişli dokuma ve preform şekilde sektörde yapısal kullanımdadır [43]

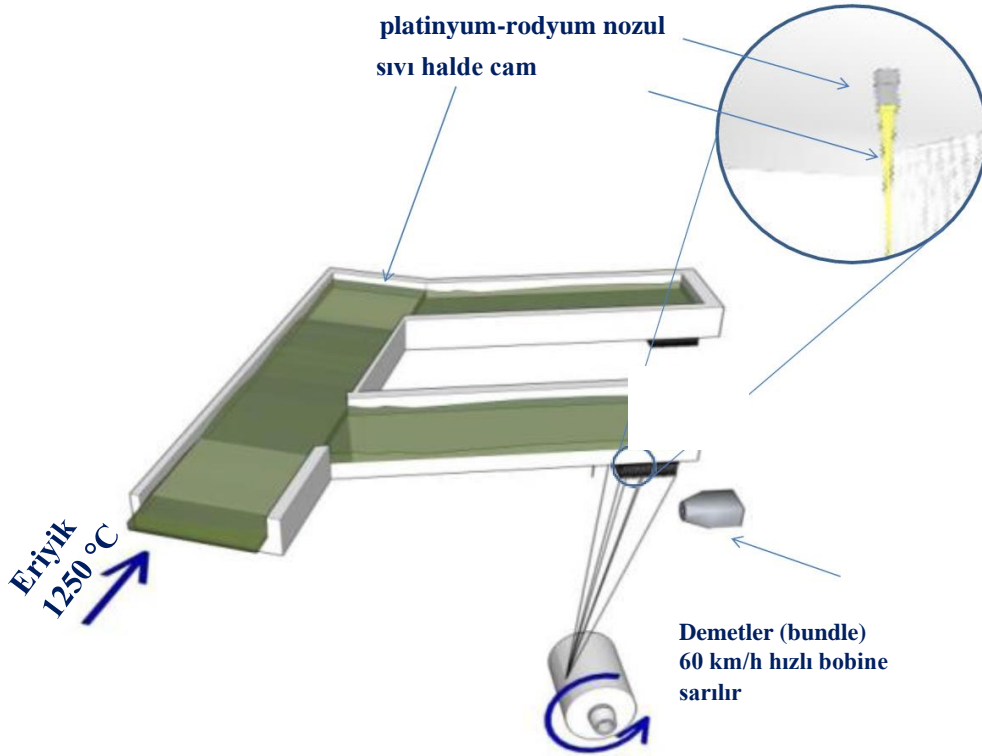


Şekil 2.4. Cam elyafın farklı uygulamalarının sektördeki pazar payı oranı [44]

Kompozitlerin takviyesinde kullanılan cam elyaflar çoğunlukla 9 ile 23 mikron seviyesindedir. Çok yönlü takviye ürünleri, sürekli elyafın dokunması, örülmesi yada dikilmesiyle kumaş veya tabaka şekline getirilen farklı türlerinden meydana gelmektedir. Tek yönlü takviye ürünlerin muhteviyatı ise; demetler, şeritler, tek yönlü kumaşlar, tek ya da çok uçlu fitillerdir. Cam elyafın üretilme prosesi üç aşamada gerçekleştirilmektedir.

Bunlar;

1. Bushing: Cam elyaf lifleri elektrik vasıtasıyla ısıtılmış platinyum ve rodyum alaşımı, üzerinde binlerce deliklere sahip kovanlardan (bushing), yüksek (60 km/h) hızlarla çekilmektedir.
2. Demet eldesi: Kovanlar, cam liflerinin serbest bir halde aktığı, 4000'i aşabilen sayılarda delik sayısına sahiptir. Serbest akışta olan cam filamentlerinin bir araya gelmesiyle demet elde edilir.
3. Bağlayıcı: Kovanlardan akan filamentlerin sıcaklık seviyesi hava ve su yardımıyla soğutularak düşürülmektedir. Sonrasında ise, kimyasal bir bağlayıcı vasıtasıyla kompozit laminatını özelliklerinin artırılması ve cam filamentlerinin korunması için kaplanmaktadır. Bağlayıcı cam elyafların kalıplanabilme özelliğini ve elyaf-matris uyumunu da belirlemektedir [45].



Şekil 2.5. Cam elyaf üretimine bir bakış [46]



Şekil 2.6. Cam elyaf üretimine bir bakış [47]

Cam elyaf en yaygın olarak kullanılan polimer takviyelerinden biridir ve tüm FRP'lerin yaklaşık %90'ı cam elyaftan yapılmıştır. Cam elyaf sınıflarından en eskisi ve en revaçta olanı E camıdır [42].

Tablo 2.2. Çeşitli cam elyaf sınıflarının fiziksel özellikleri [42]

| Tip    | Fiziksel özellikler                            |
|--------|--|
| A camı | Yüksek dayanıklılık, güç ve elektriksel direnç |
| C camı | Yüksek korozyon dayanımı                       |
| D camı | Mükemmel dielektrik özelliği                   |
| E camı | Yüksek dayanıklılık ve elektriksel direnç      |
| R camı | Yüksek dayanıklılık ve asit-korozyon direnci   |
| S camı | Yüksek çekme gerinimi                          |

Cam elyaf takviyeli polimerlerin (CTP) matriksleri termoset olan polyester ve vinil esterden termoplastiğe, fenolik ve ayrıca epoksiye kadar değişkenlik gösterir. Bu çalışmada da kullanılan matriks sistemi olan doymamış polyester ilerideki bölümlerde detaylı olarak incelenecektir.

### 2.1.2. Matris özellikleri

Kompozitlerde elyaflar, matris adı verilen bir polimer içine gömülmüştür. Çoğu üretim methodunun bir kısmında temel olarak kompozite mümkün olduğu kadar az polimer dahil edilmesi beklenir. Bunun en önemli ve en bariz sebebi ise polimerin liflerini bir arada tutması ve adeta bir yapıştırıcı gibi davranmasıdır [46].

Matris malzemenin işlevleri ve gereksinimleri 4 bölüme ayrılabilir.

Bunlar;

- Yükleri dağıtmaya veya aktarmaya yardımcı olur
- Filamentleri korur
- Kompozitin elektriksel ve kimyasal özelliklerini kontrol eder
- Ara yüzey kesmeyi

Yapının amacına göre matriks malzemenin istenilen özellikleri oldukça değişkenlik gösterecektir.

Bu değişkenlikler yedi maddeyi sağlamalıdır. Bu maddeler ise;

- Nem absorpsiyonunu azaltma
- Düşük çekme oranı

- Elyafı ıslatma ve bağlama
- Düşük ısıl genişleme katsayısı
- Elyaf liflerine tamamen nüfuz etmesi ve kürleşme/sertleşme esnasında boşluklara izin vermemesi
- Kabul edilebilir seviyede mukavemet, modül ve uzamaya sahip olması
- Yükü elyaflara transfer ederken elastik davranış [41].

Organik polimerler termoplastikler ve termosetler olarak ikiye ayrılırlar. Doymamış polyester ve vinilester gibi termoset polimerler termoset polimerlerdir ve kimyasal olarak kürlendikten sonra tekrar sıvı hale dönmezler. Diğer yaygın olan termoset reçineler ise epoksi ve fenolik reçinelerdir. Günümüzde ise takviyeli polimer kompozit endüstrisinde polyester ve vinil ester reçinelerinden termoset plastikler oldukça büyük pay almaktadır [38].

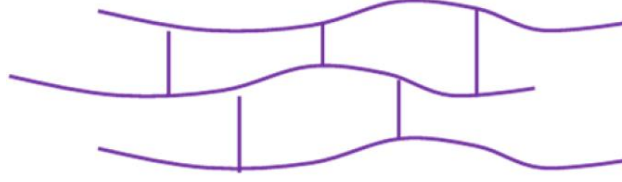
Tablo 2.3. Reçinelerin mekanik özellik kıyaslamaları [46]

| Özellik                       | Polyester | Vinil ester | Epoksi    |
|-------------------------------|-----------|-------------|-----------|
| Rijitlik (GPa)                | 2.4-4.6   | 3-3.5       | 3.5       |
| Kopma dayanımı (MPa)          | 40-85     | 50-80       | 60-80     |
| Kopma uzaması (%)             | 1.2-4.5   | 5           | 3-5       |
| Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ) | 1150-1250 | 1150-1250   | 1150-1200 |
| Çekme oranı (%)               | 6-8       | 5-7         | <2        |

Termoplastik polimerler belirli sıcaklık değerlerinde yumuşar ve sertleşir. Şekillenmiş bir termoplastik polimer malzemenin ısıtılmasıyla birlikte yeniden şekillendirilmesi mümkün hale gelmektedir.

Bu çalışmanın da konusu olan termoset polimerler oda sıcaklığında sıvı olmasıyla birlikte daha düşük enerji tüketiminde kullanılabilmesi nedeniyle termoplastiklere göre çok fazla tercih edilmelerine sebep olmaktadır. Sıvı monomerler kimyasal tepkime (polimerizasyon) sonucunda sertleşerek (kürleşerek) uzun ve aralarında

kuvvetli bağlar oluşturan katı polimerler haline gelirler. Sertleşme esnasında molekül zincirleri, Şekil 2.7’de gösterildiği gibi çapraz bağlanma yaparlar. Çapraz bağlanmış moleküller bu nedenle termoplastiklerde olduğu gibi yüksek sıcaklık ile eritilip tekrar tekrar şekil verilemez. Termoplastik ile termosetleri birbirinden ayıran ana fark tekrar kullanılıp kullanılmama durumudur. Malzemenin çapraz bağlanma seviyesi ne kadar fazla ise malzemenin rijiditesi ve ısıl stabilitesi de o kadar yüksek olmaktadır [48].



Şekil 2.7: Polyester polimerin çapraz bağ ağının gösterimi [49]

Hem termoplastik hem de termoset polimerler elyaf takviyeli kompozitlerin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Takviye elyafları polimer matrisine mukavemet verirken, matrikte elyafın kendisini bir arada tutar ve kompozitin tokluk değerini arttırmaktadır. Elyaflar ve polimer arasındaki bu karşılıklı ilişki kompozitin eşsiz özellikte olmasını sağlamaktadır [50].

### **Polyester**

Reçine sistemlerinin her biri, tasarım ve üretim planlarında dikkate alınması gereken dezavantajlara sahiptir [41].

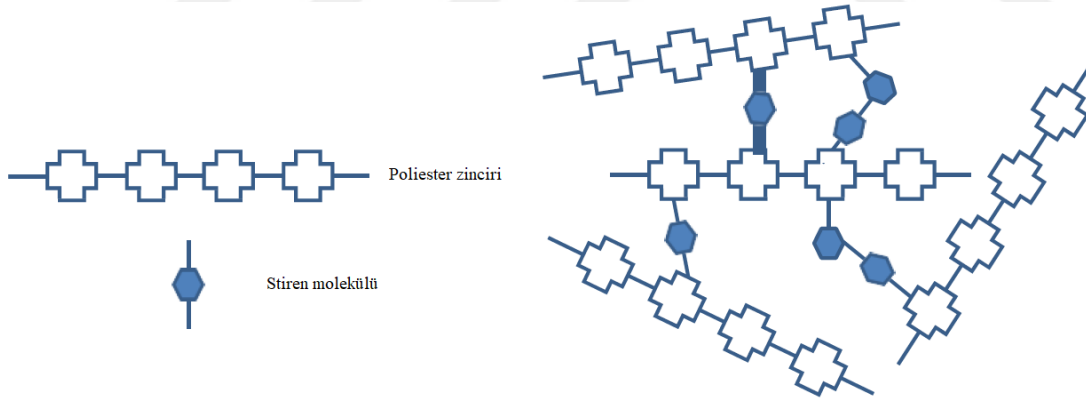
Polyester kompozitler düşük birim fiyatından dolayı geniş bir alanda kullanılmaktadır [46]. Polyester matrisler ise uzun zamandır çok büyük bir alanda ve çeşitlilikte kullanılmaktadır. Bu yapılar arasında depolama tankları, küçük balıkçı teknelerinden ya da sürat teknelerinden büyük mayın tarama gemilerine kadar birçok deniz taşıtı bulunmaktadır.

Ulaşılabilir olan polimerler, ağırlıkça %50’ye kadar doymamış monomerler ve stiren gibi çözücüler içerebilir. Bunlar matrisin kürlenmesinde önemli bir çekmeye neden olurlar. Polyester katalizör vasıtasıyla (genellikle peroksit) ekzotermik bir tepkime sonucu kürlenir. Bu tepkime oda sıcaklığında gerçekleşebilir. Genellikle fazlaca çekme oranından dolayı yüksek modüllü elyaflar polyester matrisler ile kullanılmazlar [43].

Doymamış polyester yaklaşık %35 stiren içinde çözülür. Kürleşme sırasında, stiren yapıları polyester zincirindeki doymamış reçineyi çapraz bağlı hale getirir. Stirenin büyük çoğunluğu (>%95) bu tepkimede yer alır. Tepkime sırasında stirenin bir kısmı (<%5) ise buharlaşır. Bu durum düşük koku eşiği nedeniyle kolayca farkedilir. Polyesterin işlendiği bir fabrika sadece koku alma yetisiyle bile kolayca bulunabilir [46].

Polyester reçineler arzu edilen spesifikasyonların eldesi ve hangi tip kalıplama yöntemiyle uyumlu olması talep ediliyorsa buna göre formülize edilirler. Polyesterlerin çok yönlü olması ve polimer zincirlerinin oluşumu sırasında modifikasyon ve biçimlendirilebilme imkânı sayesinde kompozit sektörünün hemen hemen bütün kollarında daimi kullanım imkanına sahip olduğu görülmektedir. Polyester esaslı reçinelerin en belirgin avantajları mekanik, elektriksel ve kimyasal özellikler, boyutsal stabilite, maliyeti düşürme ve kullanım kolaylığı gibi özellikleri arasındaki kurulan dengeden ileri gelmektedir.

Polyesterin moleküler zincir yapısı çeşitli reaktif gruplar içermektedir. Kürlenmiş polyester Şekil 2.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Kürlenmiş polyesterin gösterimi [46]

Doymamış polyester reçineler, düşük viskoziteye sahip, güçlendiricilerle ve yüksek miktarda dolgu maddeleriyle karıştırılabilen malzemelerdir. Doymamış polyesterler %80'e ulaşabilen oranlarda cam elyaf lifiyle güçlendirilebilirler. Bu takviyelendirilmiş doymamış polyester reçineler çapraz bağlarını oluşturduklarında iyi darbe mukavemetine, 172 MPa ile 344 MPa arasında dayanıma ve ayrıca kimyasal dirence sahip olurlar.

## UV ile kürlenene polyester

Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitlerin üretim süreçleri, çok sayıda üretim aşaması, uzun çevrim süreleri ve zararlı kimyasal emisyonları ile öne çıkmaktadır. Termoset reçineler genellikle peroksit katalizörleri ile kürlenirler. Bu reçineler çoğu durumda oda sıcaklığında kürlenmeye başlamakla birlikte kabul edilebilir seviyedeki özellik artışı için fırınlama (post kür) ihtiyacı duymaktadırlar. Bu işlem saatler almaktadır. Kompozitler, düşük yoğunlukları, yüksek spesifik dayanımları ve mukavemetleri nedeniyle mühendislik yapılarında kullanımları için ilgi çekmektedir. Ancak, kullanımlarını arttırmak için daha temiz ve daha hızlı üretim süreçlerine ihtiyaç vardır [51]. Bu nedenle son çalışmalar, kompozit malzemeler için ışık ile kürlendirme teknolojisinin kullanımını arttırmıştır.

Fotopolimerizasyon mekanizması ile kürlenene polyesterlere verilen addır. Fotopolimerizasyon, ışığa duyarlı bileşikler (fotobaşlatıcılar) tarafından başlatılan zincir reaksiyonlar ile bir monomeri ya da oligomeri polimere dönüştüren bir polimerizasyon yöntemidir [52]. Daha basit bir ifadeyle fotopolimerizasyon, ışıkla başlatılan zincir reaksiyonlar ile bir polimerin elde edilmesi işlemidir. Fotopolimerizasyonu klasik radikal, katyonik veya anyonik polimerizasyon tekniklerinden ayıran tek faktör, başlatıcı türleri oluşturmak için ışık enerjisinin kullanılmasıdır. Bu yöntem sıvı reçine sistemlerinden yüksek oranda çapraz bağlı termoset polimerin hızlı bir şekilde üretilmesinde oldukça etkilidir. Foto kürlenebilen reçine formülasyonları genellikle çok işlevli monomerler veya oligomerlerden oluşurlar ve ışınlanmaya maruz kaldıklarında reaktif türler oluşturan az miktarlarda fotobaşlatıcı içerirler [53]. Foto kürlenebilen polimerlerin nihai özelliklerini büyük ölçüde etkileyen çapraz bağlanma yoğunluğu, başta fotobaşlatıcının tipi ve konsantrasyonu olmak üzere ışımanın yoğunluğuna ve süresine bağlıdır [54-55].

Bu teknoloji ilk olarak 1940'lı yıllarda patentlenmiş ve 1960'lara gelindiğinde mobilya endüstrisinde ticarileşerek kaplamalar için üretim hatlarında kullanılmıştır. 1970'lerde sektörün öne çıkan kimyasal firmalarının fotobaşlatıcılar üretmesiyle endüstri için çok daha geniş fotobaşlatıcı seçenekleri ortaya çıkmış ve fotopolimerizasyon teknolojisi hızla ilerlemeye başlamıştır [56]. 1980'lerde foto kürlenebilen reçinelerin geliştirilmesiyle birlikte polimerlerde büyük bir buluş meydana geldi [57]. Günümüzde hem akademik hem de endüstriyel açıdan

fotopolimerizasyonun katkıda bulunabileceği yeni malzemeler, yeni süreçler ve yeni uygulamalar araştırılmaya devam etmektedir. Şu anda kullanımda olan çok çeşitli fotobaşlatıcılar enerjinin UV ve görünür spektrum boyunca absorblanabileceğini göstermiştir ve özel ürün formülasyonlarına imkan tanımıştır [56].

UV ışık ile kürleştirme teknolojisi kaplama ve mürekkep endüstrilerinde iyi bilinmektedir [58]. Reçine, UV ışığa maruz kaldığında hızlı bir şekilde çapraz bağlanma mekanizması başlatan bir fotobaşlatıcı ile formüle edilmiştir. Bu teknoloji belirtilen endüstrilere bazı avantajlar sağlamıştır. Bunlar;

- kontrol ve formülasyon prosesinin kolaylığı,
- düşük maliyet,
- hızlı üretim süreleridir.

Bunula birlikte foto kürlenme çalışma ortamını kirleten ve bazı durumlarda kansorejen olabilen uçucu organik bileşiklerin (VOC) emisyonlarını azaltabilmektedir [59-60].

Elyaf takviyeli kompozit endüstrilerinin karşılaştığı en büyük zorluk, daha temiz ve daha uygun maliyetli üretim süreçlerine olan ihtiyaçtır [61]. Foto kürlenme teknolojisi ile hızlanan kürlenme süreci iki konuya eğilmektedir. Bunlar; üretkenlikten iyileştirmelerin maliyeti azaltması ve stiren gibi VOC'lerin yayılma sürelerinin azalmasıdır. Fotobaşlatıcı ile formülasyonu hazırlanmış reçinenin kürlenmesi yalnızca UV ışığa maruz kaldığında başlayacaktır. Bu nedenle jel süresinden kaynaklı elyafın doğru olarak yerleşimi, elyafların ıslatılabilmesi ve elyaf lifleri arasında kalan havanın tahliyesi gibi kısıtlamalara zaman kazandırmakta olup laminat kalitesinin iyileşmesine sebep olmaktadır.

Bazı araştırmacılar fotopolimerizasyon ile kürlenmiş kompozitler üzerine çalışmalar yapmışlardır. Li ve arkadaşları [62] UV ile kürlenmiş epoksi reçine matrisli kompozit üzerinde yaptığı çalışmada ortam sıcaklığında kürlenmeye göre hızlı, sağlam, dayanımı yüksek ve uygun maliyetli bir alternatif olduğunu göstermişlerdir. Shi ve Ranby [63] ise UV ile kürlenmiş polyester matrisli kompozitlerin epoksi matrisli kompozite benzer sonuçlar verdiği sonucuna varmışlardır. Pang ve arkadaşlarının [57] kompozit boru birleşimi üzerine yaptıkları çalışmada UV ile kürlenmiş birleşimlerin oda sıcaklığında kürlenmiş birleşimlere göre tatmin edici mekanik özellikler sergilediği rapor edilmiştir. Compston ve arkadaşlarının [3] yaptığı cam elyaf takviyeli vinilester

matrisli kompozit çalışmasında ise sadece 10 dakika UV ışığa maruz bırakılan kompozitin, oda sıcaklığında 24 saat ve 90 °C’de 4 saat fırınlama (post kür) ile kürlenene kompozitlere göre mükemmel çekme dayanımını, eğilme ve kesme dayanımının özellikleri gösterdiği belirtilmiştir. Kürlenme süreleri dikkate alındığında, bu sonuçlar UV kürlenme potansiyelinin kompozit üretiminde verimlilik sağladığına vurgu yapmaktadır.

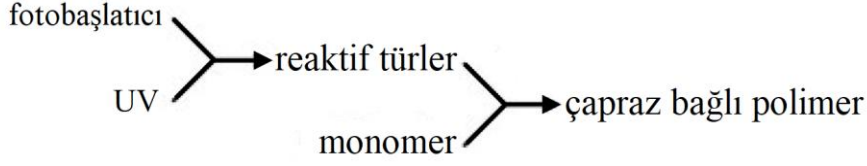
### **Çalışma mekanizması**

Fotobaşlatıcılar monomerler, oligomerler, kıvam arttırıcılar gibi temel reçine kimyasal bileşenlerine katılmaktadır. Reaksiyonu başlatma mekanizmalarına göre fotopolimerizasyon sistemleri “serbest radikalik başlatma sistemleri” ve “iyonik başlatma sistemleri” olarak iki gruba ayrılır [64]. Fotobaşlatıcılar, ultraviyole ışına maruz kaldıklarında uyarılan organik moleküllerdir. Uyarılan moleküllerin bozulmasıyla monomerlerin ve oligomerlerin polimerizasyonunu başlatan serbest radikaller oluşur. Kürlenme süresini 30 dakikanın altından 1 dakikanın altına kadar düşüren bazı etmenler vardır.

Bunlar;

- Monomer
- Fotobaşlatıcı
- Işık yoğunluğu

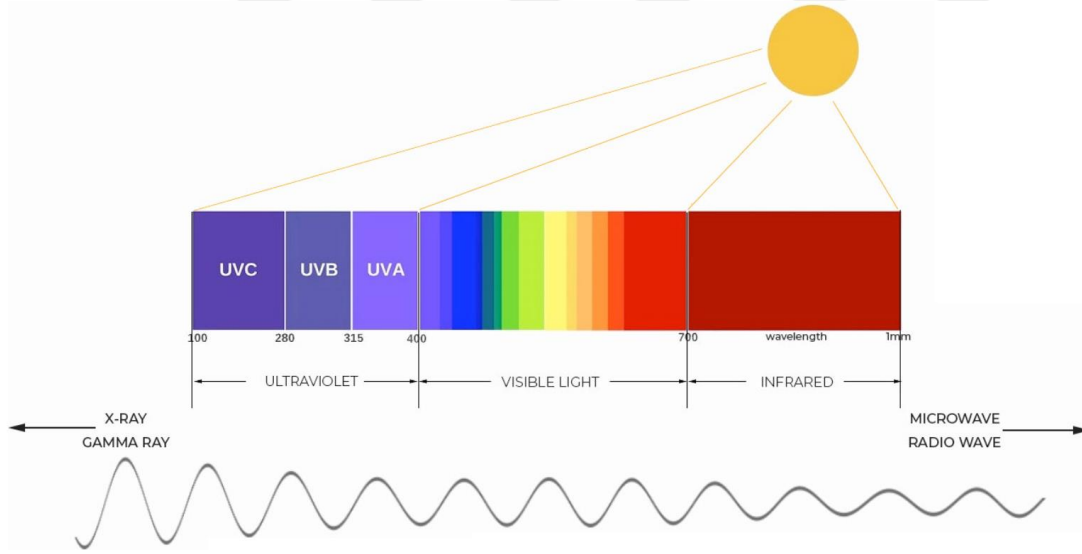
Tüm serbest radikal polimerizasyon mekanizmalarının önündeki bir engel oksijen inhibisyonudur. Oksijenin etkisi olarak serbest radikallerin etkisiz hale getirilmesiyle polimerizasyon sonlanır yada yavaşlar. Bununla birlikte UV ile kürlenene reçineler için serbest radikaller ışık yoğunluğunun artmasıyla birlikte çift bağların dönüşümünü de arttırırlar. Bu durum yüzeyde hızlı kürlenmeyi (yüzey sızdırmazlığı) sağlar. Oksijen tüketim oranını arttır ve polimerizasyon mekanizmasına olumsuz etkileri olan oksijeni azaltır. Diğer bir ifadeyle, ışık yoğunluğunun artmasıyla kürlenme süresi azalır ve polimerizasyonun oksijen inhibasyonu azalmaktadır [57].



Şekil 2.9. Fotopolimerizasyonun genel gösterimi [65]

### Işık kaynakları

Fotopolimerizasyon için güçlü bir emisyon kaynağına ihtiyaç vardır ve bu teknolojinin başlangıcından bu yana genellikle UV bölgede ışınım yapan orta basınçlı civa lambaları kullanılmaktadır. Endüstriyel fotobaşlatıcıların çoğu bu civa lambaları ile birlikte UV'ye hassas sistemler olarak geliştirilmiştir [66]. Başlatıcı radikaller veya katyonlar oluşturmak için emisyon spektrumunun sadece dar bir kısmı kullanıldığından bu oldukça enerji yoğun bir proses olmaktadır, ayrıca UV kaynağında tüketilen gücün çoğusu ısı olarak salınır. UV ışınlar yüksek enerjileri nedeniyle tehlikeli olarak kabul edilirler. Bu ışınlar plastikler, boyalar ve pigmentler gibi malzemelere zarar verebildiği gibi insan hücrelerine ve dokularınada zarar verebilmektedir [67].



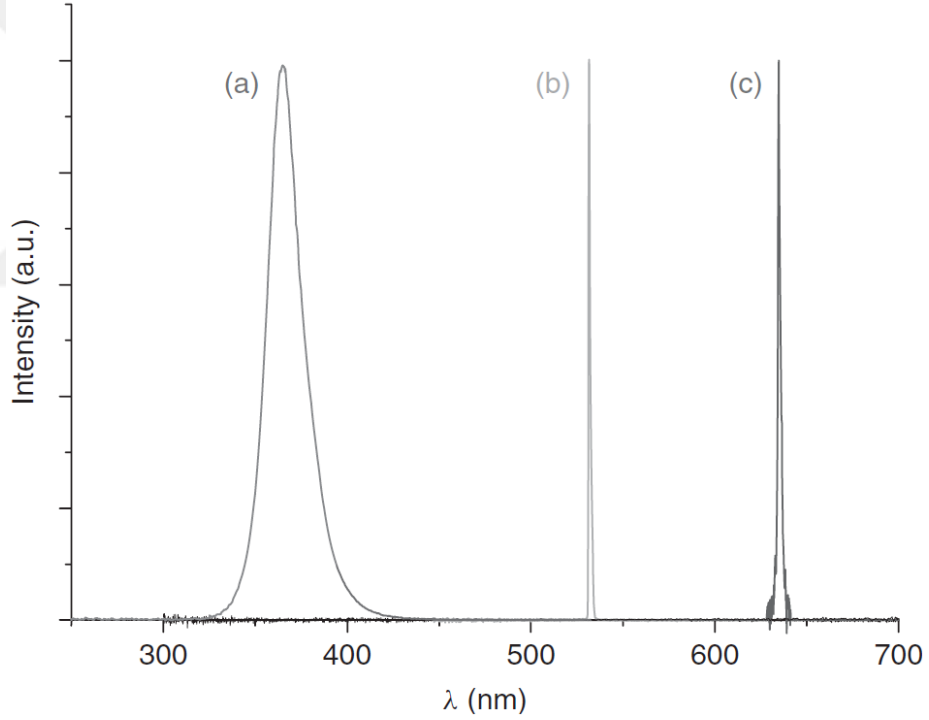
Şekil 2.10. Elektromanyetik spektrum [68]

Bu gibi sağlık tehlikelerinin yanı sıra ozon salınımı, düşük küreleme derinliği gibi UV kaynaklı fotopolimerizasyon reaksiyonları ile ilgili sorunlar UV teknolojisinin gelecek potansiyel uygulamalarını engellemektedir. Bu sorunları ele almak için 1970'lerde görünür ışık kaynaklı fotopolimerizasyon reaksiyonları önerilmiştir ve daha sonrasında ışık kaynağı olarak metal halide lamba ile sadece diş hekimliğinde ticari

olarak uygulanmıştır [64]. Metal halide lambadan gelen ışığın ihmal edilebilir seviyede radyasyon tehlikesinin yanı sıra uzun süren kürlenme işleminden sonra ısı oluşumu gibi olumsuzlukları vardır. Günümüzde LED lambalar, fotopolimerizasyonda kullanılan geleneksel lambalara alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır [69].

### LED Lambalar

LED yarı iletken malzeme cihazına dayanmaktadır [70]. Günümüzde ki teknik gelişmelere göre Şekil 2.11'de gösterildiği gibi LED ışık kaynakları 365 nanometre (nm) gibi nispeten dar bir bant genişliğinde veya 395 nm'de ışık yoğunluğu ise 10-100 mW/cm<sup>2</sup> aralığında ışık vermektelerdir . Yüksek paketleme yoğunluğu olan LED'de mümkündür (cm<sup>2</sup>'de 400 LED). Bu kadar yüksek yoğunluk ise 2 mW/cm<sup>2</sup>'de 365 nm, 8 mW/cm<sup>2</sup>'de ise 395 nm ışığa imkan vermektedir [71].



Şekil 2.11. Spektrum gösterimleri sırasıyla (a) LED 365 nm, (b) 532 nm diod lazer, (c) 635 nm diod lazer [71]

LED'lerin temel faydaları dört temel başlıkta toplanabilir.

Bunlar;

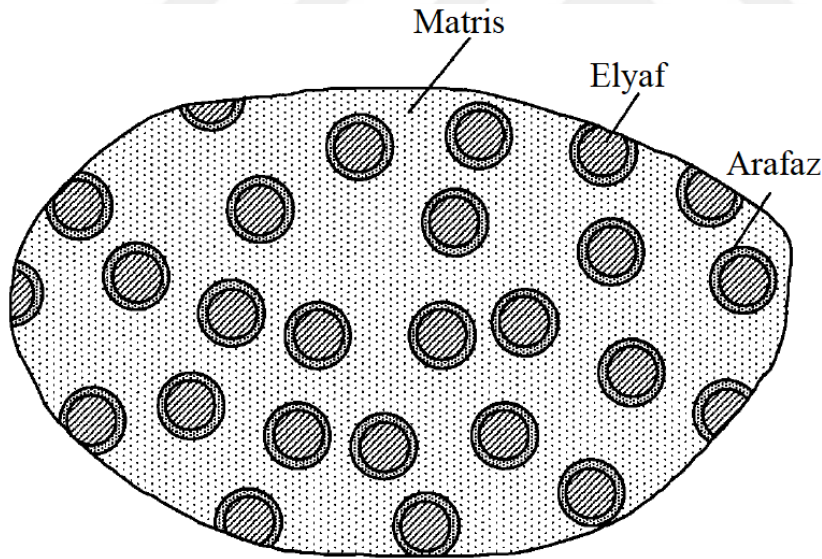
- Düşük ısı üretimi (IR ışık olmaması),
- Düşük enerji tüketimi,

- Düşük işletme ve bakım maliyeti, yaklaşık 50000 saat ömür ve taşınabilirlik,
- Karanlıkta kalan alanların kürlenmesini sağlamak için programlanmış robotlar ile lambaların hareket imkanı bulmasıdır.

LED'ler, dijital mürekkep püskürtmeli baskı, yapıştırıcı kürlenmesi, ince ısıya duyarlı plastik folyoların kürlenmesi, spesifik nokta kürlenme (otomotiv son kat onarımı) ve diş hekimliği (diş dolgusu kürlenmesi için UV tutacağı) için yüksek bir potansiyele sahiptir. LED teknolojisinin gelişimi devam eden ve büyük umut vaat etmektedir [72].

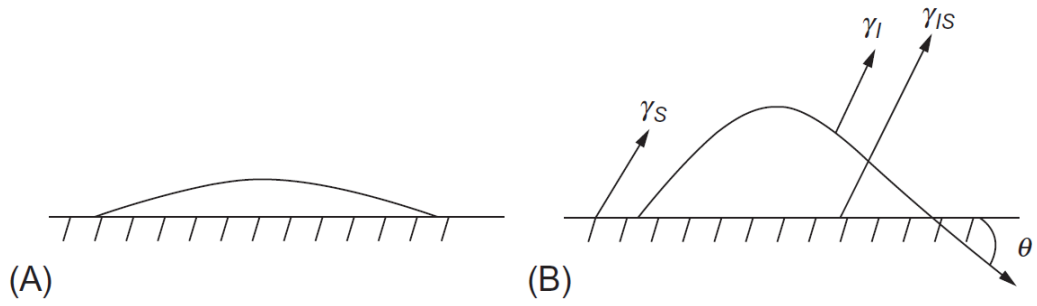
### 2.1.3. Elyaf-matris arayüzey özellikleri

CTP sektöründe üretim süreciyle ilgili farkındalığı arttıran eski bir deyiş vardır. Basitçe ifade etmek gerekirse “dünyanın en iyi reçinesini ve elyafını seçebilirsiniz. Fakat onları doğru bir şekilde bir araya getiremezseniz, muhtemelen başarısızlıkla sonuçlanacaktır” [38]. Bundan dolayı elyaf takviyeli kompozit malzemelerde elyaf-arayüzey özellikleri üretim süreciyle birlikte önem arz etmektedir.



Şekil 2.12. Kompozit malzemenin fazları [73]

Üstün bir adhezyon için hayati önem arz eden diğer koşul takviye ve matrisin termodinamik olarak uyum olmasıdır. Bu uyum ise bir ıslatma prosedürü ile içgüdüsel olarak gerçekleşebilir. Islatma prosedürünün termodinamiğini göstermek için yüzey ve arayüz enerjisi ölçülmelidir [74].



Şekil 2.13. Islak (A) ve ıslak olmayan (B) yüzeylerin gösterimi. S: katı, l: sıvı ls: sıvı-katı arafaz,  $\theta$ : kontakt açısı [74]

Çoğu elyaf takviyeli polimerik matrisli kompozitlerde elyaflar reçine tarafından ıslatılırlar. Bunun sebebi reçinenin yüzey enerjisinin çok düşük, elyafların yüzey enerjisinin yüksek olmasından dolayıdır [74].

Kompozitin amacı, matris ve takviye gibi çok fazlı malzemelerin fiziksel etkileşime sahip olacak şekilde arayüz adı verilen birbirine bağlanmasını ifade eder. Pratikte, kompozitler farklı yoğunluklarda en az iki fazın birleşmesini ifade eder. Bunlardan biri yönlenmesi olmayan matrisken diğeri çeşitli istenilen yönlenmeye eğilimli takviyedir. Takviyenin, malzemenin çekme ve kesme performansını artırması beklenir ve genellikle liflerden oluşur [50].

Elyafın üretimi sırasında, elyaf lifi ince bir film ile kaplanır. Bu film kimyasallarla birlikte elyafın reçineye iyi tutunmasını sağlar. Bu film, elyaf ile reçine arasındaki arayüzü oluşturur. Genellikle, elyafın ağırlığının yaklaşık %0,5'i kadardır. Elyaf ile reçine arasında iyi adhezyon kompozitin özelliklerini için önemlidir. Elyaf malzemelerin (dokuma kumaş, keçe vb.) farklı konfigürasyonlarına ek olarak, iyi bir adhezyon sağlamak için takviye ürün ve reçine seçiminde dikkatli olunmalıdır [46].

Arayüzeyde gerçekleşen bağlanmada; matris cam elyafları çok iyi çevrelemeli ve elyafları kolayca ıslatabilmelidir. Takviye malzemesinin ıslanması iyi bir seviyede olmazsa, zayıf bir arayüzey oluşur. Islatılabilirlik arayüzey için aranan ilk şarttır fakat iyi bir arayüzey için yeterli olmamaktadır. Arayüzey tutunması normal koşullar içinde yeterli sağlamlıkta oluşmuyorsa, çeşitli metodlar kullanılabilir.

Bunlar;

- Takviye bileşeninin yüzeyini aşındırarak, sürtünme etkisiyle mekanik bağlanmayı artırma,

- Takviye bileşeninin yüzeyini, düşük yüzey enerjisi sağlayan kimyasallar ile temizleme,
- Bağ yapıcı özelliği arttırıcı olan ek maddeler kullanma,
- Kimyasal buhar kullanımıyla güçlü bağ oluşturma metodunu uygulama,
- Matrisin modifiye edilmesi [75].

Uygulama basitliği bakımından matrisin modifiye edilmesi en çok tercih edilen metodlardan biridir. Çoğu araştırmaya göre elyaf ile matris arası arayüzey özelliklerinin iyileştirilmesi nano boyutlu parçacıkların polimer matrislere ilavesiyle birlikte görülmüştür. Neticede; elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik dayanımı, yoğunluklarına, elyaf veya elyafların özelliklerine, takviyenin yönlendirme biçimine, matrisin kimyasal kararlılığına, dayanımına ve elyaf-matris arayüzey özelliklerine bağlıdır [76].

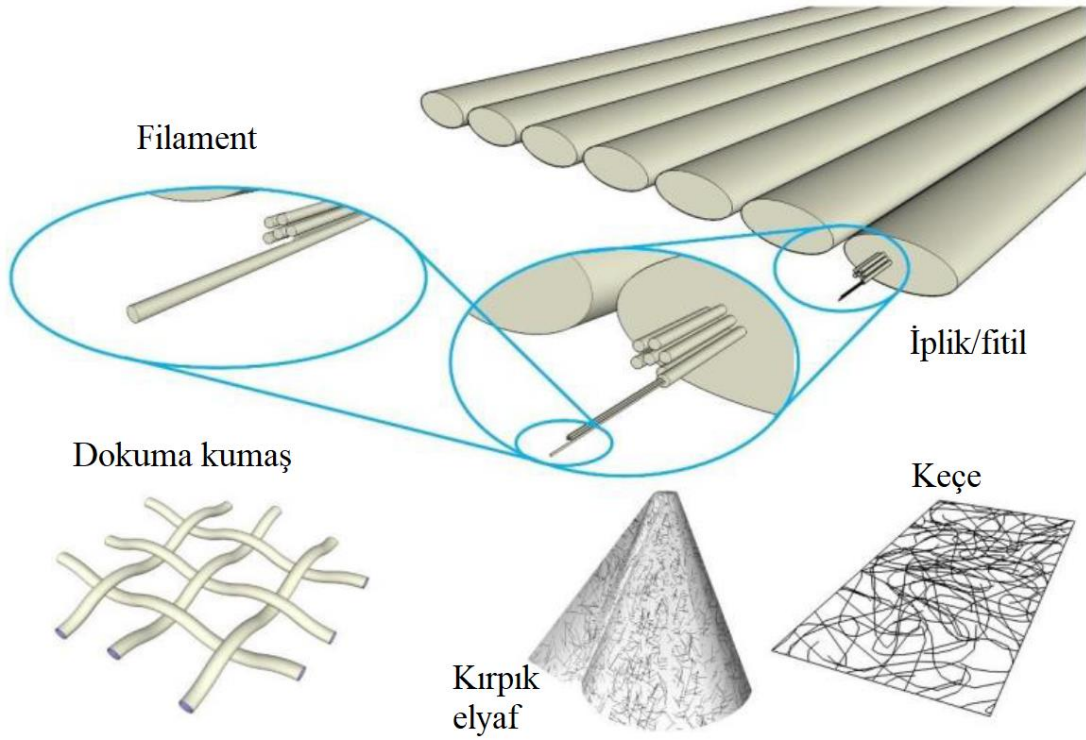
#### **2.1.4. Elyaf formları ve özellikleri**

Elyaf lar çok sayıda formda kullanılır. Bu bölümde filamentlerin nasıl bir araya getirilebileceği tartışılacaktır. Bir araya getirme süreci, kompozit malzemelerin imalat sürecini ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Kompozit imalatında uygulanacak işlem için çoğunlukla takviyenin yapısına göre belirlenir. Elyafın çeşitli tipleri vardır [74].

Bunlar;

- Elyaf: Filament şeklindeki malzemeler için kullanılan genel bir ifadedir. Genellikle, “elyaf” ifadesi “filament” ifadesiyle eş anlamlı olarak kullanılmaktadır.
- Filament : Kovan deliklerinden akan her bir cam lifine filament denir. Ürün çeşidine göre farklı kalınlıklarda olabilir. Filament çapı mikron ile ifade edilir.
- İplik/fital : Bir grup bükülmemiş filamentleri ifade eden genel bir terimdir [74].
- Tow : Sürekli filamentlerin bükümsüz demetlerini ifade etmektedir. Genellikle grafitler ve karbonlar için kullanılmakla birlikte, cam ve aramid malzemeler için de kullanılmaktadır. 140K olarak belirtilen bir tanım tow’da 140.000 adet lif bulunduğunu anlatmaktadır.

- Dokuma kumaş : Fitol yada ipliklerin, birbirleri içerisinden geçerek, birbirlerini sıkıştırması sonucunda, ađ şeklinde oluşturulmuş kumaşa verilen genel bir ifadedir.
- Keçe (CSM) : Rastgele bir dağılımla, ilerleyen bir bant üzerine kırılmış cam liflerinden oluşan ve bir bağlayıcı aracılığıyla bir arada tutularak kumaş haline getirilmiş takviye malzemesidir. Keeler; genellikle birim alan ağırlığı ile ifade edilmektedir. Örneğin 300-450 gr/m<sup>2</sup> kırılmış demetten keçenin birim alan ağırlığı 300-450 gr. olacaktır. Diğer farklılıklar keçeyi bir arada tutan bağlayıcının miktarı ve türüne göre ifade edilmektedir [45].
- Sürekli keçe elyaf (CFM): Sürekli elyaftan yapılmış, düzensiz bir şekilde birçok katman halinde bir bağlayıcı ile bir arada tutulan takviye malzemesidir.



şekil 2.14. Tek bir elyaftan tekstil malzemesine geçiş gösterimi [46]

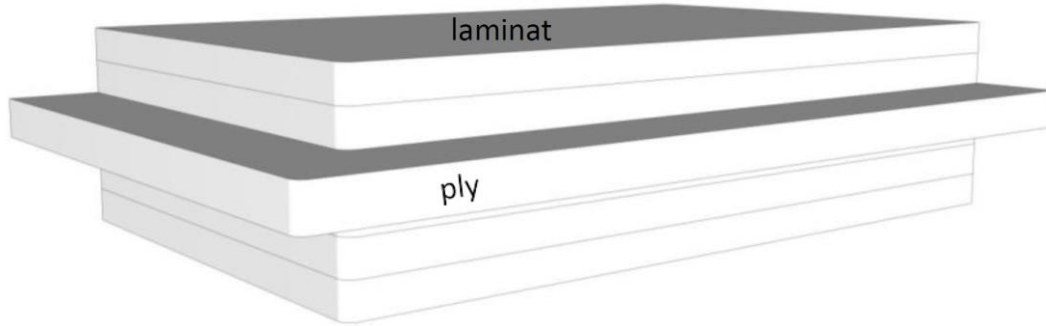
## 2.2. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozitler, değişik doğrultuda veya ana malzeme eksenini yönündeki tabaka ve katmanların yığınlar şeklinde st üstte bir araya toplanmasıyla elde edilir [77].

Diğer kompozit türlerine oranla, bu tip kompozitler yaygın ve eski kullanım alanına sahiptir. Yüksek derecede mukavemet verilerinin elde edilebilmesi farklı çeşitte elyaf

yönlenmelerinde ki tabakaların birleşmesiyle olabilmektedir. Isı ve nem dayanımları yüksektir. Metallerle karşılaştırıldığında yüksek mukavemet değerleriyle birlikte hafif olmaları nedeniyle tercih edilen malzemeler arasında yer almaktadır. Çok tabakalı kompozitler yüksek mukavemet ve düşük maliyet özelliklerini görece hafif bir yapıda sağlayabilmekte hepsine ilave olarak ısıl genleşmeye ve aşınmaya karşı dirençli son olarak ise mükemmel bir yüzey estetiğine sahiptirler. Elektriksel olarak incelendiğinde ise sırasıyla iletken ve yalıtkan plakalar üst üste getirilerek kondansatörü meydana getirip elektriği şarj eden (depolayan) katmanlı kompozitleri oluştururlar [78].

Tabakalı kompozit yapılar ilk cümlede de belirtildiği gibi en eski ve en yaygın olarak kullanılan elyaf takviyeli kompozit çeşitlerindedir. Tabakanın tanımı; matris içerisinde örülmüş elyaflar yada sadece bir doğrultuda elyaf düzlemi olarak ifade edilir. En az iki tabakanın birleşimiyle tabakalı kompozitlerin üretimi yapılabilir. Birçok yönde yüksek mukavemet değerlerine ulaşılması farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların birleşimiyle mümkündür [79]. Şekil 2.15.'de gösterildiği gibi her bir katman birleşerek bir laminatı/tabakayı oluşturmaktadır. Tabakalı kompozitler, metallere kıyasla çok daha hafif ve mukavemete sahip olmaları nedeniyle mühendislik uygulama alanında ve raylı sistem endüstrisinde mukavemet gerektirecek uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir.



Şekil 2.15. Laminat ve ply (kat) gösterimi [46]

Tabakaların yerleştirilme durumu yönlenmenin açısına, matris ve takviyenin çeşidine bağlıdır. Yönlenme açısına göre tabakaların sıralaması Tablo 2.4.'de gösterilmiştir.

Tablo 2.4. Katmanların yönlenme açısının düzenlemelerinin örnek gösterimi [44]

| Kompozit Çeşidi | Tabaka Yerleşimi                               | Optimum Tabaka Yerleşimi | İyileştirilen Parametreler                         |
|-----------------|--|--------------------------|--|
| CTP             | [+45°/0°/-45°]<br>[+30°/-30°/0°]<br>[0°/0°/0°] | [0°/0°/0°]               | Mukavemet,<br>Yorulma mukavemeti ve Kopma dayanımı |

Yönlendirme açısı ve tek yönlü kompozit iki yönlü kompozite kıyasla yüksek mekanik özelliklere sahiptir [82].

Tek tabakalı yüksek rijitliğe ve dayanıma sahip olan kompozitlerin yorulma dayanım özellikleri nispeten yüksektir. Yüksek rijitliği olan fiberler, matriste oluşabilecek şekil değişimini sınırlar ve matrisinin kendisinde çatlak oluşumunu geciktirirler. Ürünün statik dayanım oranı ne kadar artarsa yorulma dayanımı da o kadar artar. Yüksek rijidite ve dayanıma sahip fiberler sayesinde oluşan kompozitin de yorulma dayanımı artar.

Sürekli elyaf takviyeli polimerik kompozitlerin elyaf yönündeki yorulma direnci metallere oranla çok daha iyidir. Fakat kompozit malzemeler anizotrop ve heterojen özellikler içermesi nedeniyle nedeniyle yorulma davranışları izotrop ve homojen malzemelere göre kompleks özellik gösterir. Ek olarak kompoziti oluşturan elyafların yönlenme açılarına bağlı yorulma özellikleri de farklılık gösterir [83].

Kompozit bir numunenin rijitliği tabakanın kalınlığı ile orantılıdır. Kalınlık ise darbe sırasında oluşan maksimum kontakt (temas) kuvvetini değiştirir. Düşük hızlarda, numune plaka genel çerçevede eğilmeye çalışır. Bu durumda matris kırılmaları, numunenin alt tabakasında en büyük çeki gerilmeleri ve dolayısıyla alt katmandan başlamak üzere oluşur. Bu matris kırılması sonucu ise en alt ara yüzeyde delaminasyon oluşur. Farklı lif yönlenme açılarına sahip tabakaların delaminasyonu kalınlık artışıyla birlikte artar [82].

Tabakaların lif yönlenme açıları darbe sonucu meydana gelecek hasara, tabaka kalınlığından daha fazla etki eder. Benzer doğrultuda lifleri içeren tabakalı bir kompozit yapıda lif yönlenme açısı her bir tabakada değişmeyeceğinden delaminasyon oluşmaz. Eğer yakın iki tabakanın lif yönlenme açıları birbirinden farklı olursa bu iki

tabakanın ara yüzeyinde tabakaların eğilme rijidite farkından dolayı delaminasyon görülür [83].

Yapılan araştırmalar kompozit ürünlerin eksene dik yöndeki darbe yüklerine (üretim, bakım, onarım sırasındaki ufak çaplı çarpma, el aleti düşürme gibi) karşı oldukça hassas davranış sergilediklerini göstermiştir. Bunun nedeni ise enine (yatay) yönde takviye elemanı içermeyen tabakalı yapılarda (plak gibi yapılarda), malzemenin elastisite özelliğinin yatay yönde düşük olmasıdır. Hızlı olmayan darbe etkisi genellikle tabakalar arası ayrılma (delaminasyon), elemanlarda oluşan artık gerilmeler ve ürün performansının azalması gibi spesifik başlıklarla ilgilidir.

Dokunmuş cam kumaşların çok sayıda bükümlü veya bükümsüz iplikler kullanılarak üretimi de mevcuttur. Bu kumaşların farklı dokuma tipleri mevcut olup dört yönde ve farklı ağırlıklarda üretilirler. Bu kumaşlardan yönlendirilmiş mukavemet ve yüksek elyaf oranı elde edilebilir. Ek olarak, reçine elyaflara uygulandığında kumaş kalıp içerisinde kolayca harekete etmez, sabit olarak kalır. Kumaşlar takviyenin yerleşimi ve ayrıca elyaf oranı bakımından istenilen ürün özelliklerini karşılamaktadır. Çoğu kumaşta mukavemet/ağırlık oranı, keçe tip (mat) elyaflara göre elyafın devamlılık özelliği sayesinde göre daha yüksektir. Kumaşlarda kendi içerisinde iki bölüme ayrılırlar.

Bunlar; dikilmiş ve dokunmuş kumaşlardır [84].

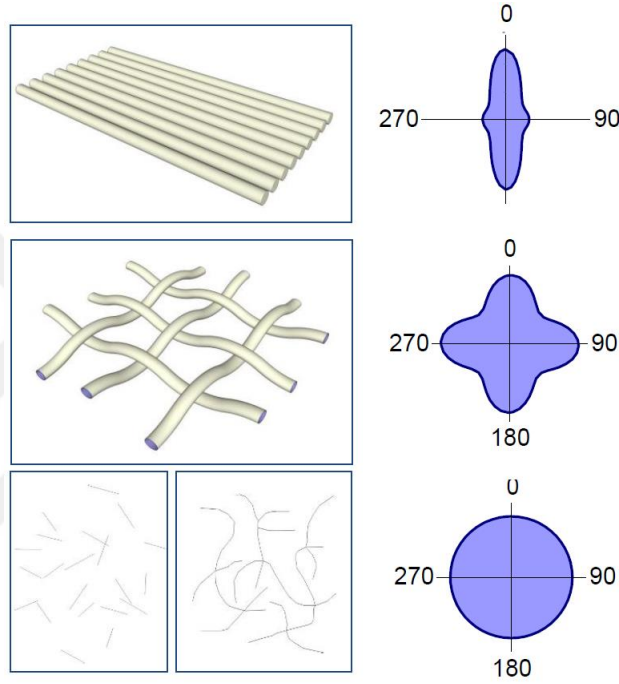
### **2.2.1. Çok eksenli kumaşlar**

Dokunmuş kumaşlar kompozit endüstrisinde yaklaşık elli yıldan bu yana yer almaktadır. Sıkı örülmüş cam elyafından, dokunmuş kumaşlar bir plaka şeklinde oluşturulur. Cam fitillerinin bükümsüz veya bobinlere sarılmadan önce kimyasal (tekstil) bağlayıcı ve devamlı cam elyafının bükümlü forma getirilmesiyle elde edilen tekstil ipliklerinin dokunmasıyla üretilen ürünlerdir. Kalıp üzerine serildikten sonra veya daha öncesinde cam lifleri reçine ile emdirilebilir. Dokunmuş kumaşlar ise dokuma çeşidine bağlı olarak farklı isimlerde alabilirler. Genellikle bir kumaşın mekanik özellikleri, dokuma biçiminden önemli ölçüde etkilenir. Örnek verilecek olursa; düz dokuma kumaşların düşük mekanik özellikleri sergilemesi içerisinde var olan çok sayıda atkı ve çözüden meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır [84].

Takviye ürünleri alanına yeni katılan bir ürün ise dikilmiş kumaşlardır. Bu kumaşlar

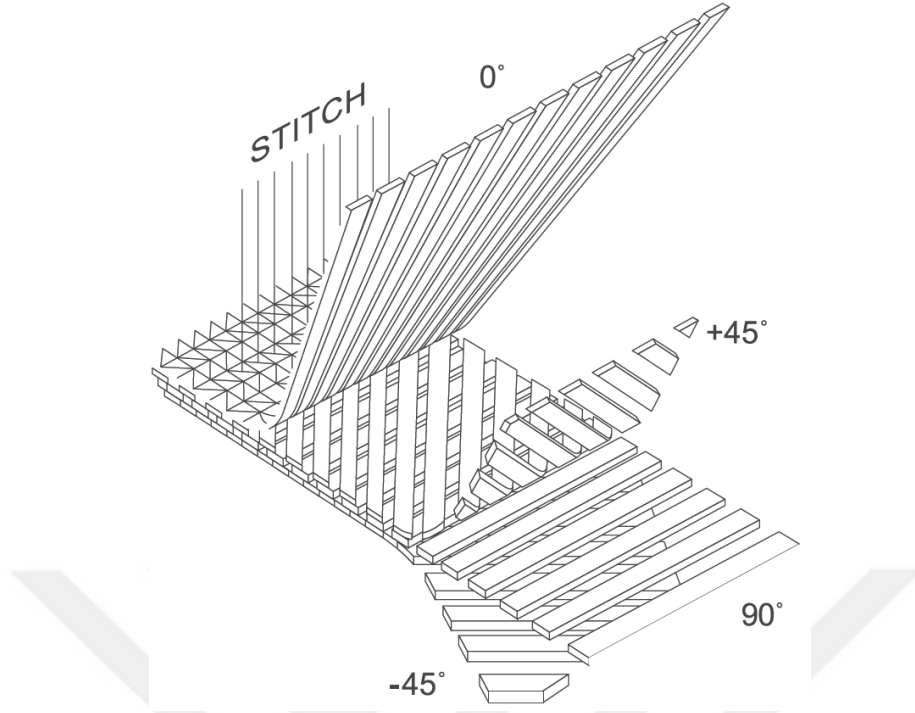
dokunmamış kumaşlar olarak da tanımlanır. Takviye gücüne katkı sağlamayan ince bir polyester iplikle farklı yöndeki elyaf kumaşların dikilmesiyle birleştirilirler. Dikilmiş kumaşlar, eşit birim ağırlıktaki dokunmuş kumaşlarla kıyaslandığında daha yüksek mekanik değerlere ve daha yüksek performansa sahiptir [45,85].

Bir kompozitin mukavemeti elyaf yönlenmesinden dolayı farklı yönlerde olabilir. Polar stifnees diagramında farklı yönlerde ki mukavemetin ilgili yönde orijinden çizgiye olan mesafesi Şekil 2.16. 'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Çeşitli elyaf formlarının polar diagram gösterimi [46]

İsminden de anlaşılacağı gibi, kıvrımsız kumaşlar (Non-crimp fabric, NCF) yapısındaki iplik grubunda herhangi bir kıvrıma sahip değildir. Tüm elyaf demetleri düz bir haldedir. Bu elyaf demetlerinin birbirine dikilmesi veya ince bir destek tabakasına dikilmesiyle elde edilir. Kumaş ana yönünün enine olacak şekilde yönlenmiş sınırlı miktarda elyafları içerir ya da ince bir tabak üzerine isteğe bağlı olarak yönlendirilmiş elyaflardan oluşur. Bu sebepten kıvrımsız kumaşlar sıklıkla Şekil 2.17.'de gösterildiği gibi dikilmiş kumaşlar olarakta adlandırılmaktadır [46].



Şekil 2.17. Çok yönlü (multiaxial) kıvrımsız cam kumaşların şematik gösterimi [86]

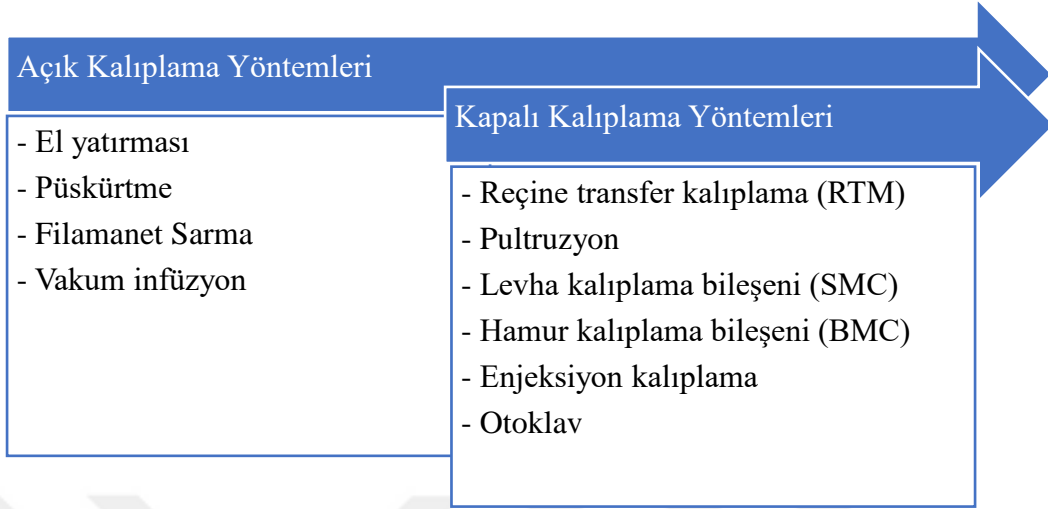
Kıvrımsız kumaşlar takviyelendirici olarak özellikle rüzgâr türbin kanatlarındaki kompozitlerde ve yüksek performanslı teknelerde kullanılmaktadır. Son yıllarda uzay ve havacılık sektörlerindeki hacmi giderek artmakta ve gelecekte bu sektörlerde kullanılan temel takviyelendirici olacağı belirtilmektedir. Bu metod ile bir seferde farklı kumaş katlarına sahip bir laminat oluşturulabildiğinden işçilikten doğan sarfiyatlar düşüktür ve dokuma kumaşlara göre çok daha kolay şekil verilebilmektedir [87].

### 2.3 Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretimleri kalıplama yöntemleriyle olmaktadır. Kalıplama yöntemleri çeşitleri malzemenin sayısına, yapısına ve malzemenin maliyetine bağlıdır. Kalıplama ham maddesi; polimer, metal, ağaç ve alçı olabilir [88].

Kompozit parçaların üretiminde istenilen çeşitli ihtiyaçları karşılayabilmek çok sayıda hibrid proses geliştirilmiş ve bir düzineden fazla bağımsız üretim metodu geliştirilmiştir. Bu proseslerin her birinin kompozit üretiminde kullanılabilecek çeşitli avantajları ve spesifik faydaları bulunmaktadır [45]. Bu nedenle son ürün kalitesini etkileyen önemli parametrelerden biri uygun üretim yöntemini bulmaktan geçmektedir.

Bu kalıplama yöntemleri;



Şekil 2.18. Açık ve kapalı kalıplama yöntemlerinde kompozit malzemelerin üretim yöntemleri

Zorlu ve sürekli büyüyen pazarın gereksinimlerini bilen kompozit yapı endüstrisi yeni reçine sistemleri, takviyeler ve bunların kombinasyonlarını geliştirerek CTP malzemelerin üretim yöntemlerini geliştirmeye zorlamaktadır. CTP üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ve otomatikleştirilmesinin temel amacı, CTP parçaların maliyetinin, işçiliğin, ağırlığın ve boyutlarının azaltılmasıdır [40].

Açık ve kapalı kalıplama teknolojileri olarak sınıflandırılmaktadır. Ayrıca üretim tekniklerinin kombinasyonunu yapmakta mümkündür [46].

Bu yöntemlerin kullanımı, CTP'nin özelliklerini, şeklini, işçilik süresini ve üretim maliyetini optimize etmeye yaramaktadır [40]. Örneğin; vakum infüzyon yöntemi kapalı kalıp yöntemleri içerisinde nispeten düşük maliyetli bir uygulama olmasıyla birlikte, teknik olarak da uygulaması kolay bir yöntemdir.

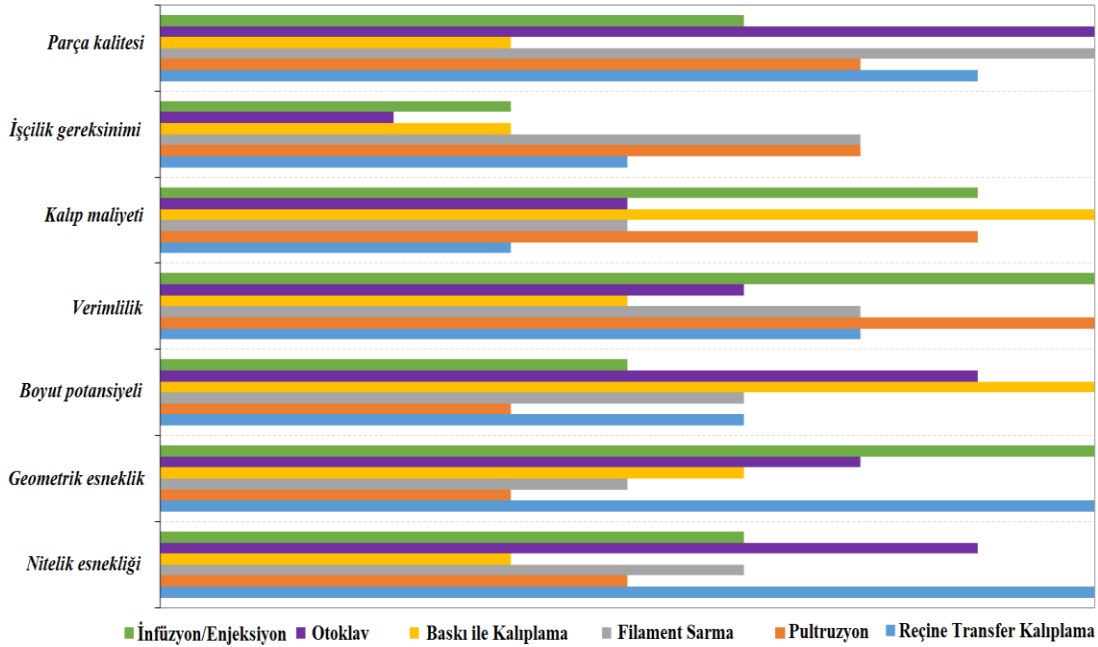
Potter'e [89] göre ideal üretim teknolojisi bazı karakteristikler ile tanımlanabilmektedir.

Bunlar;

- minimum ham madde maliyeti (düşük malzeme depolama, düşük katma değerli malzemeler ve işçilik ücreti),
- Son işlem gereksinimleri (net şekil üretimi),

- Yüksek üretim kapasitesi (düşük işçilikler, kısa üretim döngüsü),
- Maksimum geometrik ve özellik esnekliği (parçanın şekil-boyut karmaşıklığı ve matris/takviye tiplerinin seçimi, bunların özelliklerinin kontrolü)
- Güvenilir ve kaliteli üretim (düşük değişkenlik ve düşük red oranı).

Ne yazık ki, gereksinimlerin hepsini aynı anda karşılayan bir üretim teknolojisi hiçbir endüstride mevcut değildir. Şekil 2.19.'da CTP üretim yöntemlerinden en çok kullanılan 6 yöntem gösterilmiştir. En iyi verimlilik enjeksiyon/infüzyon kalıplama ve pultrüzyon yöntemlerinde bulunurken, özellik ve geometri esnekliği ise reçine transfer kalıplama yönteminde [40].



Şekil 2.19. Farklı CTP üretim yöntemlerinin karşılaştırılması [89]

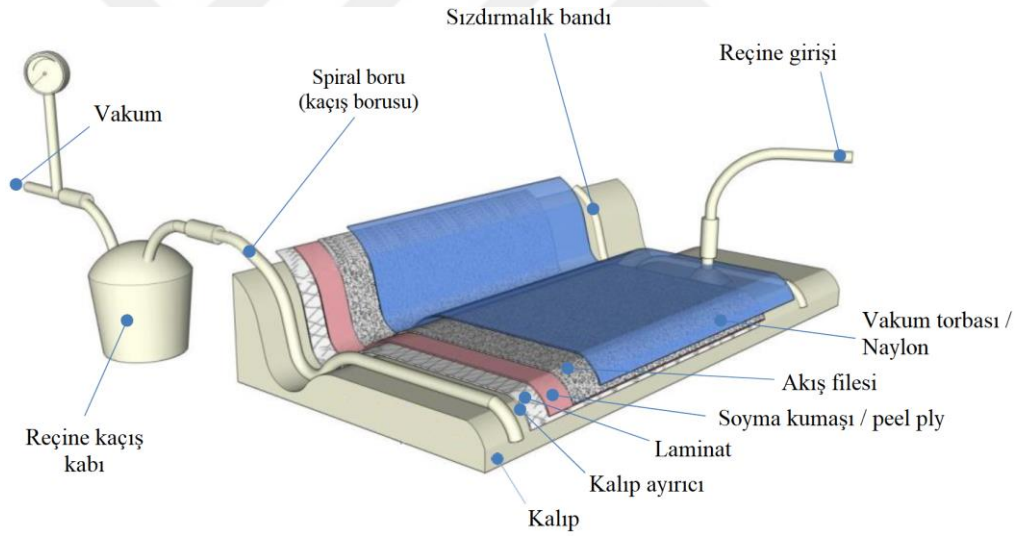
Otoklav ve filament sarma yöntemlerinin en iyi kalitede parça sunacağını fark etmek zor değilken, baskı ile kalıplama yöntemleri düşük kalıp bedeli ve boyut avantajı sunar [40].

### 2.3.1 Vakum infüzyon

Vakum infüzyon, kalıplama yöntemlerinden birisidir. VARTM (Vacuum-Assisted Resin Transfer Moulding) yada SCRIMP (Seeman's Composite Resin Infusion Moulding Process) gibi bir çok proses vakum prosesleri olarak bilinmektedirler [46].

İnfüzyon yöntemi reçine kaynağı ve vakum torbası arasındaki basınç farkı prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemde kalıbın diğer kısmı esnek bir film ile yer değiştirir ve kalıp boşluğundaki basınç ortam basıncından daha düşüktür [90].

Vakum infüzyon yönteminde ilk adım kalıba kalıp ayırıcı uygulanmasıdır. Kompozit parçanın kürlendikten sonra kalıptan ayrılmasını sağlamak için gerekli bir adımdır. Sonraki adım ise kuru elyafların hazırlanmış kalıp yüzeyine serilmesidir. Elyafların kat kat serilmesi şeklinde yada ön şekillendirilmiş (preform) elyafların tek kat serilmesi şeklinde olabilir. Serilen laminat sonrası sırasıyla soyma kumaşı (peel ply) ve akış filesi serilir. Sızdırmazlık bandı ile vakum torbasının/naylonunun hava sızdırmazlığı sağlanır. Soyma kumaşının kullanım amacı infüzyon yapılarak reçine küreleşmesinden sonra vakum torbası ve reçine kanallarının birbirinden ayrılmasını sağlamaktır [91]. Akış filesi ise basınç altındaki elyafların reçine ile kolayca ıslatılmasını ve reçinenin basınç altındaki kalıpta ilerlemesini sağlamaktadır.



Şekil 2.20 Vakum prosesi için yardımcı malzemelerin gösterimi [46]

Vakum torbası kalıp üzerinde hava geçirmezliği sağladığında düzeneğin içerisindeki ve dışarısındaki hava basıncı birbirine eşitlenir. Vakum pompası çalışır duruma getirilerek kalıp boşluğu içindeki hava çekilir ve ortamın vakum altında tutulması sağlanır. Kalıp boşluğundaki hava basıncı düştüğü için düzeneğin yüzeyinde, atmosferik basınç nedeniyle bir baskı oluşur. Teorik olarak ulaşılabilecek maksimum vakum 1 atm'dir. Bu da ortam içindeki var olan tüm havanın tahliyesi ile sağlanır [92]. Parçanın zorluk seviyesine ve şekline bağlı olarak çeşitli spiral hortumlar reçine girişi için

konumlandırılabilir. Bu konumlandırma ise tecrübeye dayanmakta veya bir akış simülasyonu ile tahmin edilebilmektedir.

### **2.3.2. İnfüzyon stratejisi**

İnfüzyon öncesinde ürün üzerindeki reçine giriş ve hava emiş konumları dikkatlice seçilmelidir. Bunlar büyük ölçüde infüzyon stratejisini belirler. Eğer yanlış bir strateji seçilirse, büyük olasılıkla iki sorun meydana gelir.

Bunlar;

- Çok uzun infüzyon yolu nedeniyle tamamlanamayan infüzyondur. İnfüzyon sırasında matris yani reçine daha yapışkan hale gelir ve ürün içinde daha yavaş ilerlemeye başlar. Eğer infüzyon yolu (reçine kaynağı ve çıkışı arasında ki mesafe) çok uzunsa, reçine ürün boyunca ilerleyemeyecektir.
- Hatalı seçilen infüzyon yolu nedeniyle tamamlanmayan infüzyondur. Akış esnasında matris besleme ve çıkış noktaları arasında ki en az dirençli yolu izleyecektir. Eğer tüm infüzyon yolu akış filesi ile kaplanırsa matris, takviye malzemesi yerine akış filesini izlemeye eğilimli olacaktır. Bu durumun sonucu olarak besleme borularının (yolluklar) arasında kalan alanda kuru bölgeler gözlemlenecektir.

İnfüzyon stratejileri sonlu eleman metodu ve Darcy yasasının kombinasyonuna bağlı bir yazılım ile tasarlanabilmektedir. İnfüzyon zamanının tahminine bağlı olarak üretim süresi tahmin edilebilir ve muhtemelen geliştirilebilir [46]. Şekil 2.21.'de bir infüzyonun simülasyon örneği gösterilmiştir.

Geçerli süre = 8.11 (dk) (%56.1 doldu)

Dolum zamanı (dk)

8.11

7.10

6.09

5.07

4.06

3.04

2.03

1.01

0.00



176 cm

Şekil 2.21. İnfüzyon prosesinin simülasyonu [95]

İnfüzyon zamanı Darcy kanunuyla aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır;

$$\theta = \frac{K}{\mu} \frac{\Delta p}{\Delta x}$$

Burada;

$\theta$  : Akış hızı [m/s]

$K$  : Geçirgenlik [m<sup>2</sup>]

$\mu$  : Vizkozite [Pa s]

$\Delta p$  : Basınç farkı [Pa]

$\Delta x$  : İnfüzyon uzunluğu [m]

Elyaf, vakum torbası ile vakum altında alınıp hava tahliye edildikten sonra, laminasyonun kalınlığı basınç farkı ile değişir. Çekilen hava sayesinde tabaka hava kabarcıklarından arınmış olur. Bu sayede üretilmiş tabakalı kompozit yapı içerisindeki

hava kabarcıklarının sebep olduğu boşluklar en düşük seviyeye indirilmekte ve potansiyel çatlak oluşma kaynakları uzaklaştırılıp yok edilerek laminatın mukavemeti önemli ölçüde arttırılmış olur.

Belingardi ve arkadaşları [94] vakum infüzyon yöntemini daha çevreci ve daha temiz bir proses olması nedeniyle el yatırma tekniğine alternatif olarak bulmuşlardır. Yuhazri ve arkadaşları da [95], vakum infüzyon tekniğinin el yatırmasına göre daha iyi mekanik özellikler sağladığını değerlendirmişlerdir.

Bu proses ile uzay-havacılık sektörünün yanı sıra yüksek teknoloji ürünler için hafif ve üstün nitelikli laminatlar elde edilmektedir [45].



### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 3.1. Malzemeler

Tez çalışmamızda takviye malzemeleri olarak sırasıyla 300 gr/m<sup>2</sup> alansal yoğunluğa sahip kırılmış cam elyaf, 300 gr/m<sup>2</sup> alansal yoğunluğa sahip M8615 sürekli cam elyaf kullanılmıştır. M8615, 30 tex %2,5 katı içeriğe sahip olup, elyaflar 3B firmasından tedarik edilmiştir. Son olarak 5200.004.113 ürün kodlu 817 gr/m<sup>2</sup> ve 5200.004.137 ürün kodlu 1350 gr/m<sup>2</sup> alansal yoğunluğa sahip dört eksenli (0°/45°/90°/-45°) kıvrımsız cam elyaf kumaşlar kullanılmış olup, Metyx Composites – Telateks A.Ş. firmasından tedarik edilmiştir.



Şekil 3.1. Keçe, cfm ve quadraxial cam elyaflarının gösterimi

Kullanılmakta olan matris sistemi doymamış polyester reçine REICHHOLD firması tarafından üretilen *UniQ-Lite 615-605* ticari adlı reçinedir. Düşük viskoziteli (250-350 cP) olan bu reçine vakum infüzyon ve RTM üretim yöntemlerinde tercih edilmektedir. Peroksit esaslı sertleştirici (kürleştiricisi) ile birlikte tedarik edilmektedir. Doymamış polyester reçine ve peroksit oranı %1'dir.

Matris sistemi olarak kullanılan şeffaf LED UV ile kürlenmiş polyester reçine TİLA Kompozit firması tarafından üretilen *UPI10* ticari adlı reçinedir. 1.11 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahip doymamış polyester fotokatalizör içermektedir. Kürleştirme işlemi için peroksit ve kobalt oktoat gibi bileşenlere gerek duymamaktadır.



Şekil 3.2. LED UV ile kürlenen doymamış polyester reçine

### 3.2. Cihazlar

#### Kürleştirme fırını

Sanayi tipi fırın polyester matrisli cam elyaf takviyeli kompozitlerin ilaveten kürlenme (post-cure) proseslerinin tamamlanmasında kullanılmıştır. 80 °C sıcaklığa ulaşabilmektedir.

#### Elektromekanik test cihazı

Hazırlanan kompozit test numunelerinin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yapılan çekme dayanım testleri *SHIMADZU AGX-V* elektromekanik test cihazında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Çekme cihazının toleransı %0,1 iken maksimum ölçüm noktası 100 kN'dir. Eğme dayanım testleri ise *ATLAS LH-EMK 20 KN* elektromekanik test cihazında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3. SHIMADZU mekanik test cihazı

## LED UV

Kürlenme reaksiyonlarını gerçekleştirmek için ışık kaynağı olarak 400 nm dalga boyunda ışık yayan  $300 \text{ mW/cm}^2$  gücünde iki adet LED lamba sistemi ile UVB bölgesinde ışık yayan 20W gücünde floresan lamba (Philips TL 20W/01-RS) kullanılmıştır. LED foto reaktör Şekil 3.3'de gösterilmiştir



Şekil 3.4. Çalışmalarda kullanılan LED foto reaktör

## Vakum Pompası

Vakum infüzyon ve RTM üretim yöntemlerinde kullanılmaktadır. 400 ve 600 nm gücünde olan vakum gücü mevcuttur.



Şekil 3.5. İnfüzyon yönteminde kullanılan vakum pompası

## CNC Router

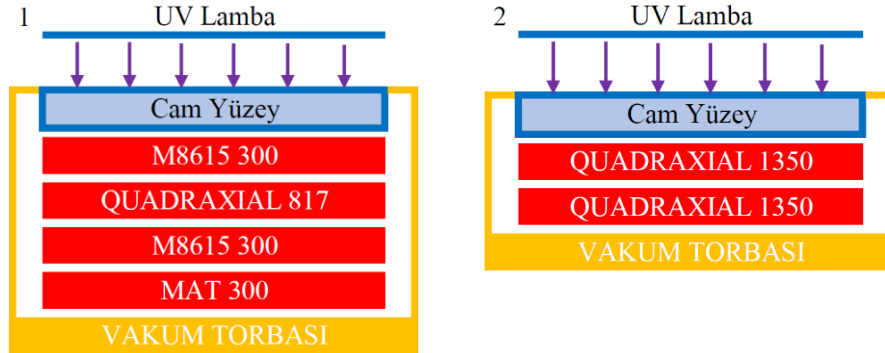
Test cihaz numunelerinin hazırlanmasında yüksek hız ve hassasiyete sahip 4 eksenli *RAPTOR ULTRA 2128* ticari adlı dik işleme merkezi kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Dik işleme merkezi

### 3.3. Kompozit Test Plakalarının Üretimi

Fotopolimerizasyon yöntemiyle kürlenmiş doymamış polyester matrisli elyaf çeşitleri ve elyaf katmanları Şekil 3.7’deki gibi seçildikten sonra cam elyaf takviyeli kompozitler ve şahit numune olarak ısı ile kürlenmiş doymamış polyester matrisli cam elyaf takviyeli kompozitler hazırlanmıştır.



Şekil 3.7. Laminasyon planları ve cam elyaf sıralamaları

Vakum infüzyon yöntemiyle üretilen kompozit test plakalarının uygulama adımları şu şekildedir;

#### 1) Kalıp ayırıcı uygulaması

Kompozit parçaların kalıptan kolayca ve hasar almadan ayrılmasını sağlayan malzemelerdir. Bu ürünler reçineye katılarak kalıba uygulanmakta veya hem kalıba sürülmekte hem de reçineye katılmaktadır [45]. Bu malzeme sıvı ya da katı vaks

şeklinde olabilir. *LOCTITE® FREKOTE 770-NC* ticari adlı şeffaf renkli sıvı kalıp ayırıcı bir bez ile iki - üç kat şeklinde kalıp yüzeyine uygulanır.



Şekil 3.8. Kalıp yüzeyinin kalıp ayırıcı ile parlatılması

### 2) Kalıp çevresine sızdırmazlık macunu (bandı) uygulanması

Siyah renk ısıya dayanıklı (150 °C - 180 °C) sızdırmazlık bandı kalıp çevresine uygulanır ve üzerine vakum torbası yapıştırıldığında sızdırmazlık sağlayan çift taraflı yapışkanlı bir malzemedir.



Şekil 3.9. Cam çevresine sızdırmazlık macunu uygulaması

### 3) Elyafın serilmesi

Daha önce denenmiş ön çalışmalarda yaklaşık 2 mm kalınlığında test plakası elde etmek için Şekil 3.5.'de verilen 4 kat ve 2 kat laminasyon yapısı kullanılması gerektiği belirlenmiştir. 50x50 cm ölçüsünde iki farklı alan ile bölünen cam yüzeye Şekil 3.7.'deki gibi sırasıyla yer alan elyaf kesilerek hazır edilmiş ve tartılmıştır.



Şekil 3.10. Elyafların laminasyon planına göre serilmesi

#### 4) *Ayırıcı film ve akış filesi serilmesi, reçine hattının uygulanması*

Elyaf katları cam yüzeye serildikten sonra vakum infüzyon yöntemine yardımcı çeşitli malzemeler (ayırıcı film, akış filesi) hazırlanmıştır. Ayırıcı film; laminatın üstüne yerleştirilen ince film şeklinde delikli bir malzemedir. Kürleşme sırasında laminatın yüzeyinden fazla reçinenin tahliyesi ve uçucu gazların tahliyesi amacıyla kullanılır. Akış filesinin temel amacı reçine akışını yüzey ve kalınlık boyunca kolaylaştırmaktır. Yüksek yoğunluklu polietilenden (HDPE) üretilen akış filesi bir kat olacak şekilde elyaf üzerine uygulanmıştır.



Şekil 3.11. Ayırıcı film ve akış filesi serimi

Reçine giriş-çıkış vanaları (T bağlantı parçası) ve reçinenin akacağı spiral boru cam yüzey üzerine elyafın sınırında olacak şekilde uygulanmıştır.



Şekil 3.12. T bağlantı ve spiral boruların yerleşimi

##### 5) Vakum naylonunun serilmesi

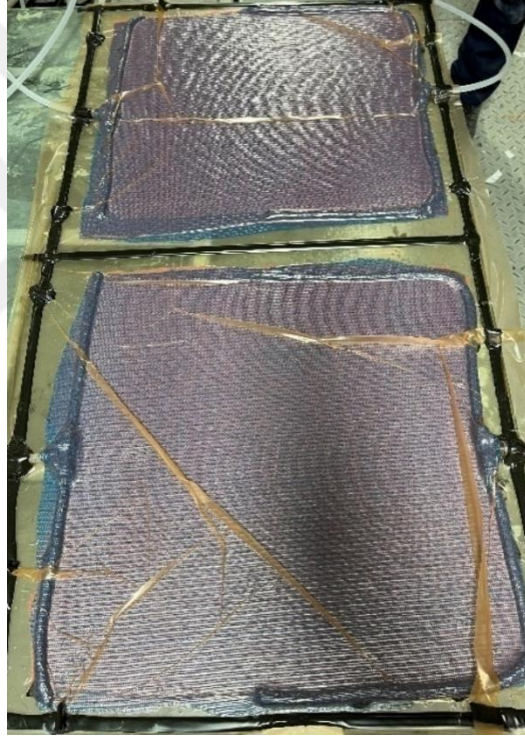
Yüksek esnekliğe sahip vakum naylonu vakum infüzyon ve otoklov yöntemlerinde kompozit parça üretiminde kullanılmaktadır. İdeal maksimum kullanım sıcaklığı 170 °C olup maksimum basınç 8 bar olmalıdır. 50-60-75 mikron kalınlığa sahip çeşitli vakum naylonlar bulunmaktadır. İlk 5 adım tamamlandıktan sonra vakum naylonu elyaf üzerine serilmiş ve sızdırmazlık bantı üzerine uygulanmıştır. Böylece sistem vakum altına alınmıştır. Bu noktada vakum naylonu RTM kalıplarda olduğu gibi üst kalıp görevi görmektedir. Vakum torbasının macunlar üzerine basınç yapılarak hava sızdırmazlığını tam olarak sağlandığına emin olunmalıdır.



Şekil 3.13. Vakum naylonunun serilmesi

### 6) Sistemin vakumlanması

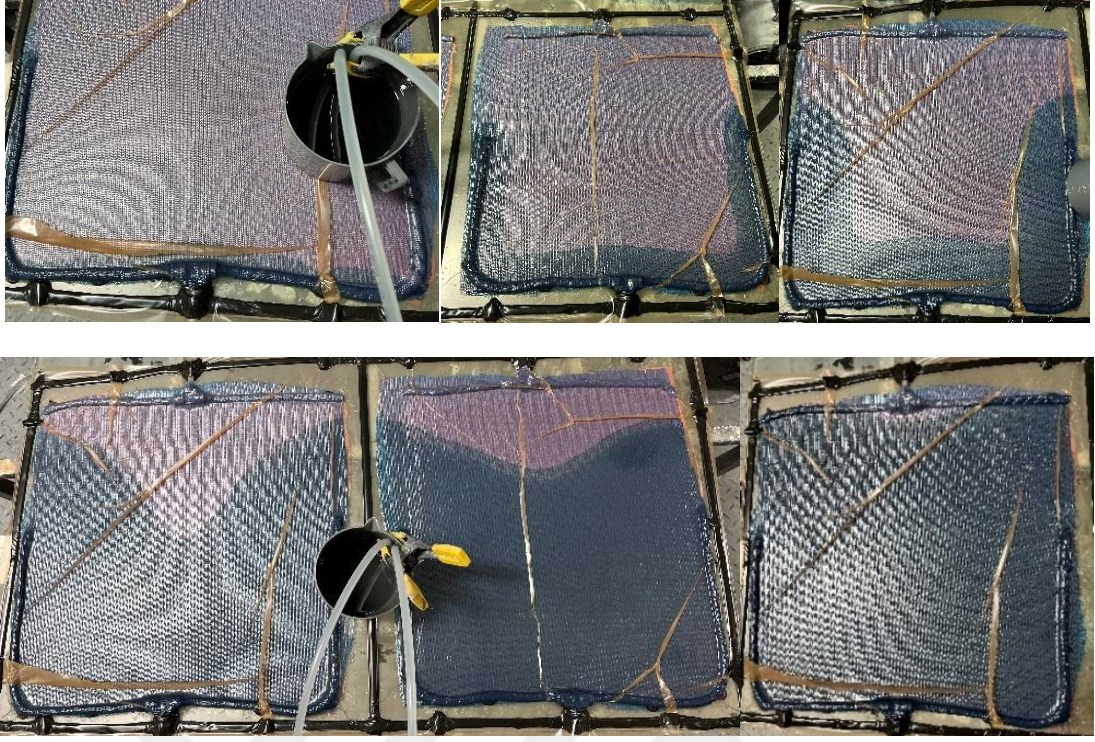
Hazırlanan düzenek bir vakum pompasına bağlanıp sistem vakum altına alınır. Böylece 1 atm'lik basınç kuvveti varlığında sistem içerisindeki reçinenin kurlenmesi gerçekleşir.



Şekil 3.14. Sistemin vakum altına alınması

### 7) Reçinenin emdirilmesi

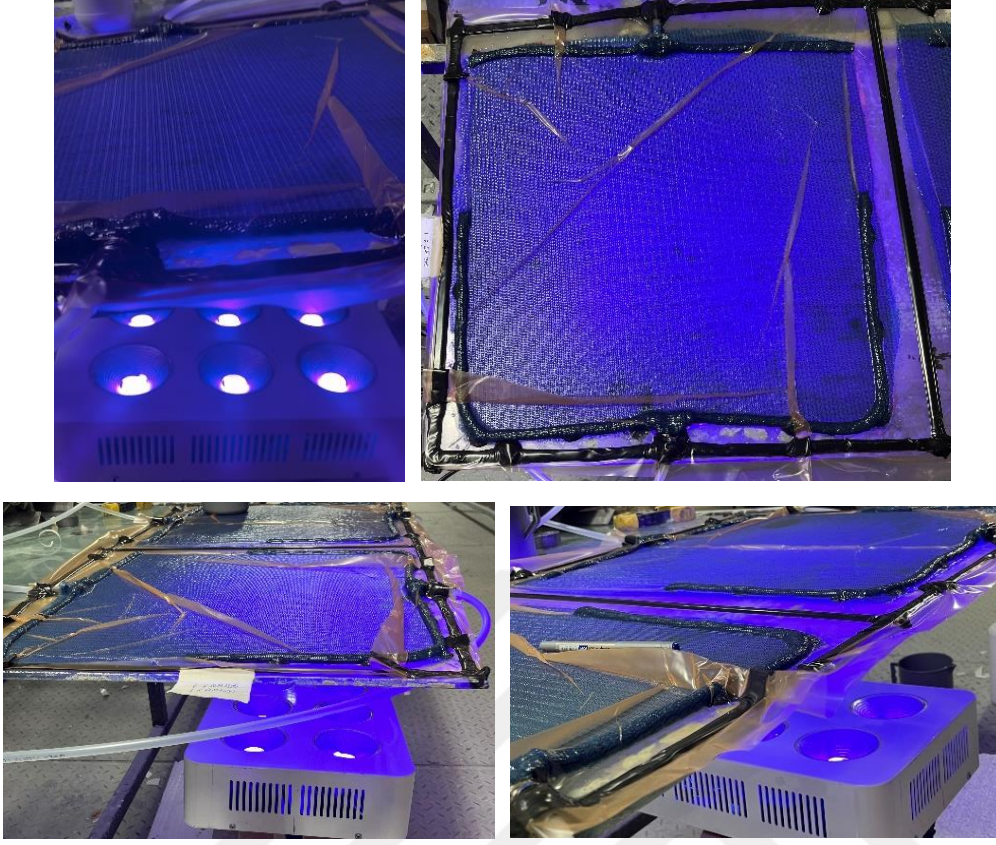
Fotobaşlatıcılı polyester reçine uygun bir kaba alınarak tartılmıştır. Tartılan reçine sertleştirici ilavesi olmadan sistem içine vakum ile çektilmiştir. Tüm elyaflar ıslatıldıktan sonra vakum kapatılmıştır. Elyaf planları kullanılarak vakum infüzyon yöntemi ile kompozit plaka üretimi gerçekleştirilmiştir. Proses sonucunda elde edilecek malzeme yüksek elyaf/reçine oranına sahip olacak ve laminasyon içerisinde hava kabarcığına yer verilmeden üretilmiş olacaktır.



Şekil 3.15. İnfüzyon prosesi ve reçinenin ilerlemesi

#### 8) *UV ile kürlendirme*

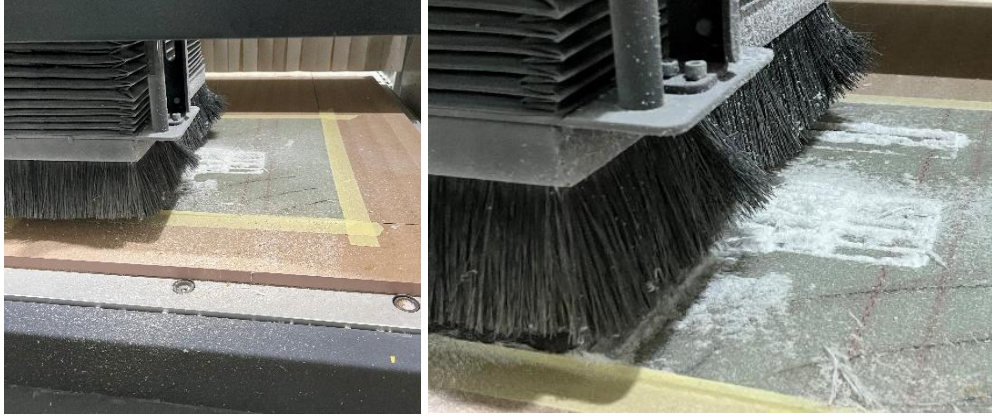
Vakum infüzyon yöntemiyle hazırlanan düzeneğe 15 dakika boyunca görünür bölge ışınları yayan LED foto reaktör ile ışıklandırılmıştır. Işıklendirme sonunda kürlenmiş kompozit plakalar cam yüzeyden ayrılarak incelenmiştir. Aynı elyaf planları ve vakum infüzyon yöntemi kullanılarak 60 °C’de 8 saat post-kür işlemi yapılan doymamış polyester matrisli referans kompozit plakalarda üretilmiştir. Ardından bu numunelerin belirtilen standartlara uygun mekanik testleri gerçekleştirilmiş ve referans kompozitler ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.16. İnfüzyon sonra UV ile kürlendirme

### 3.4. Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Fotopolimerizasyon yöntemiyle kürlendirilen doymamış polyester matrisli cam elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla mekanik karakterizasyon metodları kullanılmıştır. Tüm mekanik testler ilgili standartlara bağlı kalınarak test hızları, numune boyutları ve test ekipmanı ayarları oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Her foto kürlendirilmiş ve referans numune için en az 5 numune test edilmiş olup bunların aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır. Çekme ve eğme testleri için numuneler dik işleme merkezinde otomatik olarak kesilerek hazırlanmıştır. Geleneksel yöntem olan post-kür ile kürlendirilen kompozitler ve şahit numuneler dik işleme merkezinde otomatik olarak kesilerek hazırlanmıştır.



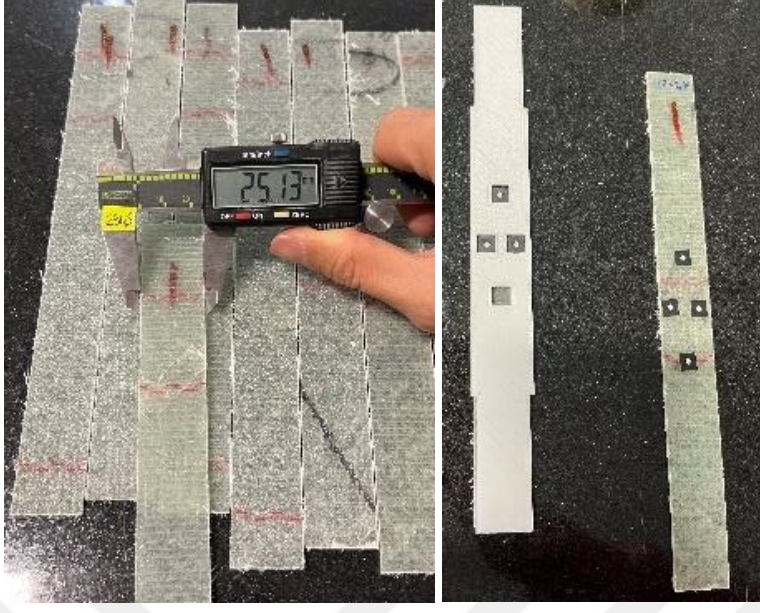
Şekil 3.17. Kompozit test numunelerinin hazırlanması



Şekil 3.18. Sırasıyla dört eksenli kumaştan 90° yönünde, 0° yönünde ve karışık formdaki fotobaşlatıcılı mekanik test numuneleri

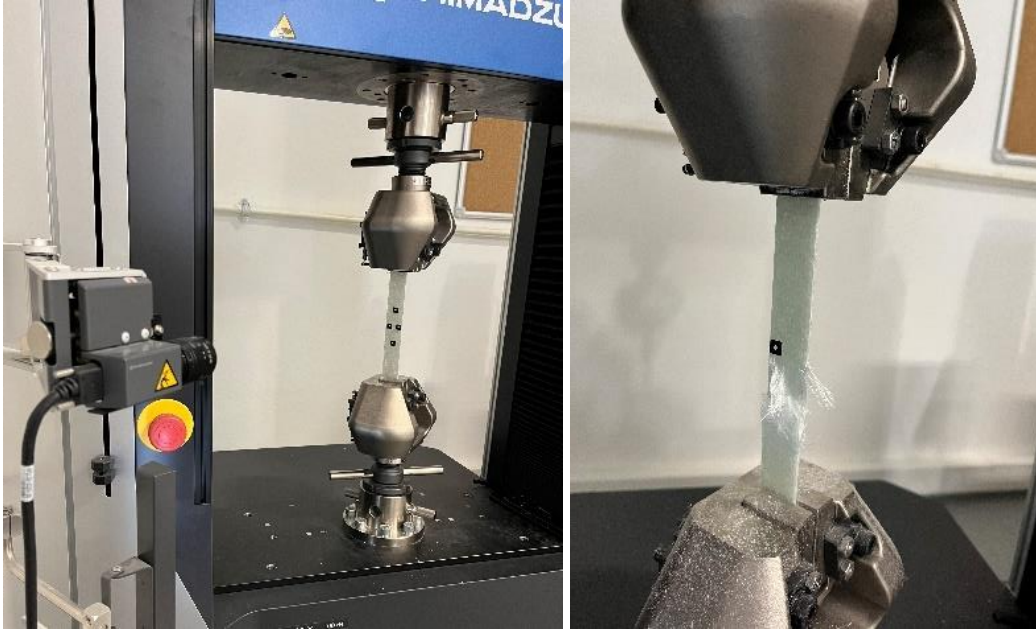
#### 3.4.1. Çekme testi

Fotobaşlatıcılı ve referans kompozitlere yapılan çekme testleri ISO 527-2 standartına uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Her bir numunenin genişlik ve kalınlık değerleri ölçülmüş ve test öncesi ölçüm sonuçları yazılıma girilmiştir.



Şekil 3.19. Çekme testi numunelerinin ölçümü

Elyaf takviyeli kompozitler için elyaf yönelimlerine dikkat edilerek;  $0^\circ$  ve  $90^\circ$ 'lik yönlere numunelerin testleri yapılmıştır.



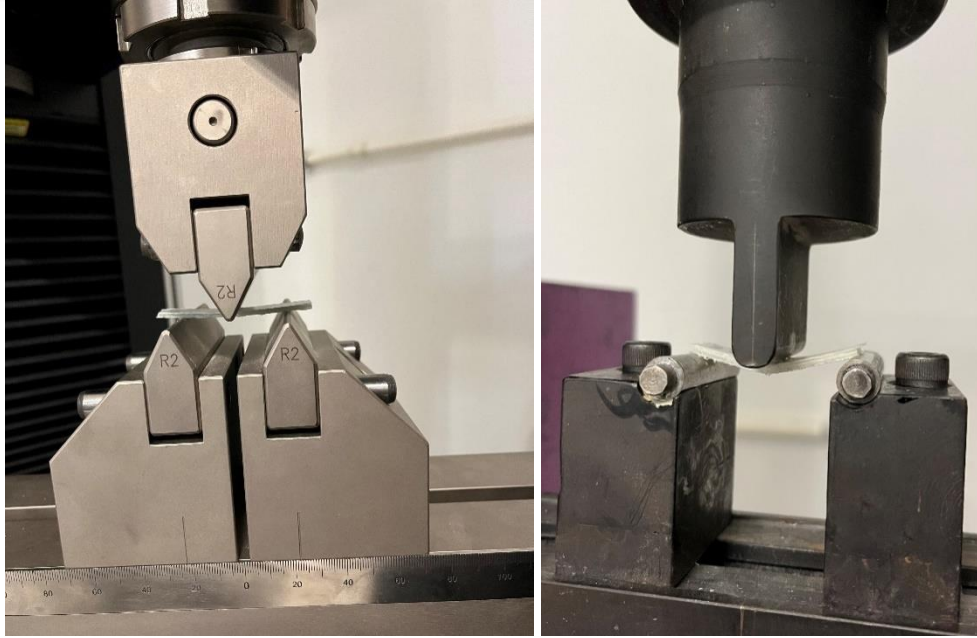
Şekil 3.20. Foto kür numunesi çekme testi

### 3.4.2. Eğme testi

Üç nokta eğme testi kompozitler için ISO 14125 standartına göre gerçekleştirilmiştir. Elyaf takviyeli kompozit numuneleri için elyaf yönelimlerine dikkat edilerek; 0° ve 90°'lik yönlerde numunelerin testleri yapılmıştır.



Şekil 3.21. Kumpas ile ölçülen üç nokta eğme testi numuneleri



Şekil 3.22. Cam elyaf takviyeli kompozit numuneler için üç nokta eğme testi



## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

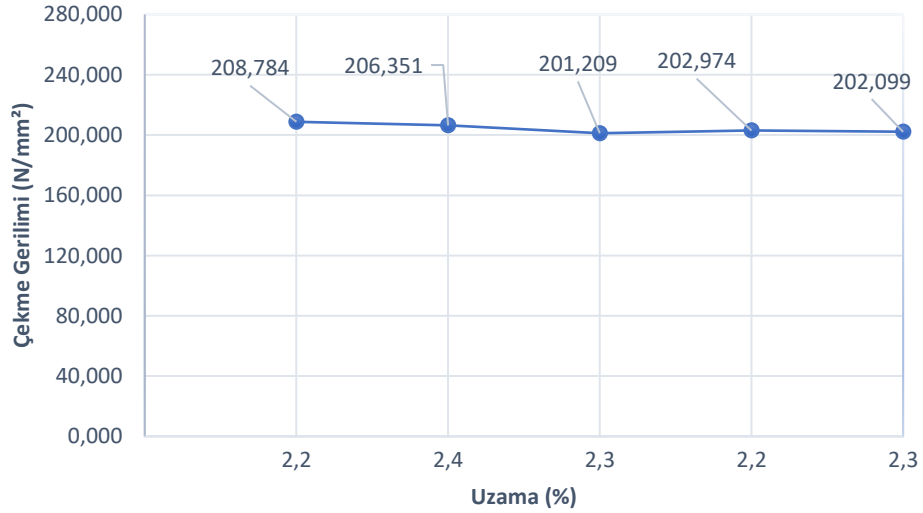
Yapılan üretim ve testler sonucu elde edilen veriler; *Çok yönlü cam elyaf takviyeli kompozitlerin özellikleri* ve *tek yönlü cam elyaf takviyeli kompozitlerin özellikleri* başlıkları altında incelenmiştir. Polyester matrisli cam elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerin mekanik özellikleri; üç nokta eğme ve çekme dayanımı testleri ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar fotobaşlatıcı içermeyen polyester matrisli cam elyaf takviyeli referans numuneye ait veriler ile karşılaştırılmıştır.

### 4.1. Çok Yönlü Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Özellikleri

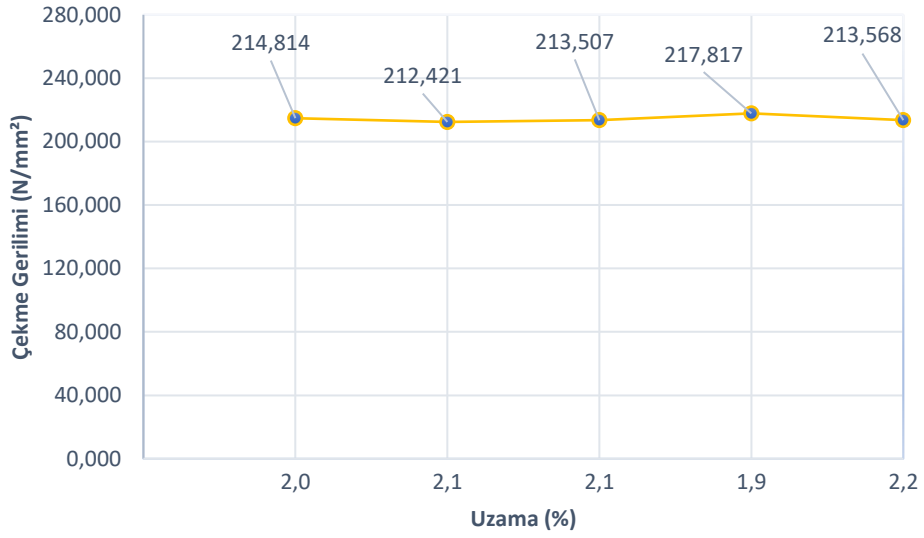
İki numaralı laminasyon yapısına ait mekanik özellikler gelecek bölümlerde incelenecektir.

#### 4.1.1. Çekme özellikleri

Elyaf yönelimleri dikkate alınarak ( $0^\circ$  ve  $90^\circ$ ) gerçekleştirilen çekme gerilim ve uzama sonuçları Şekil 4.1., Şekil 4.2., Şekil 4.4., ve Şekil 4.5.'de gösterilmiştir.

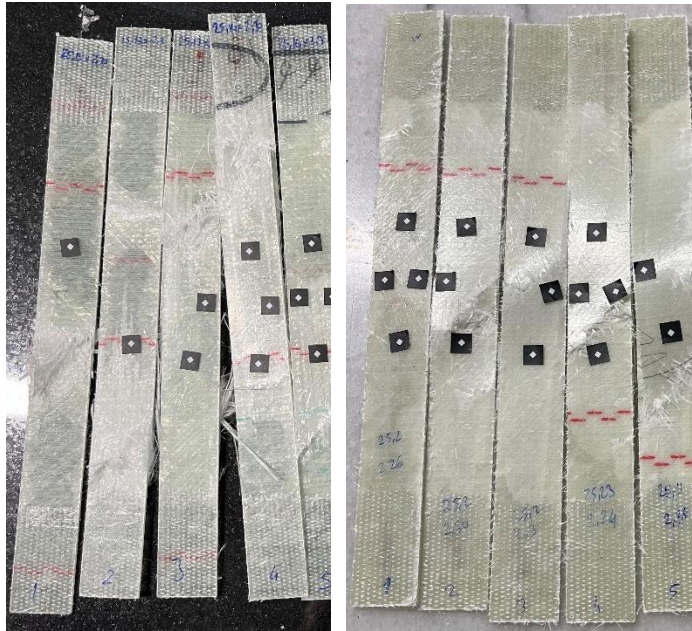


Şekil 4.1. İki numaralı laminasyon yapısına ait fotobaşlatıcılı plaka için  $90^\circ$  yönelimli çekme gerilimi grafiği

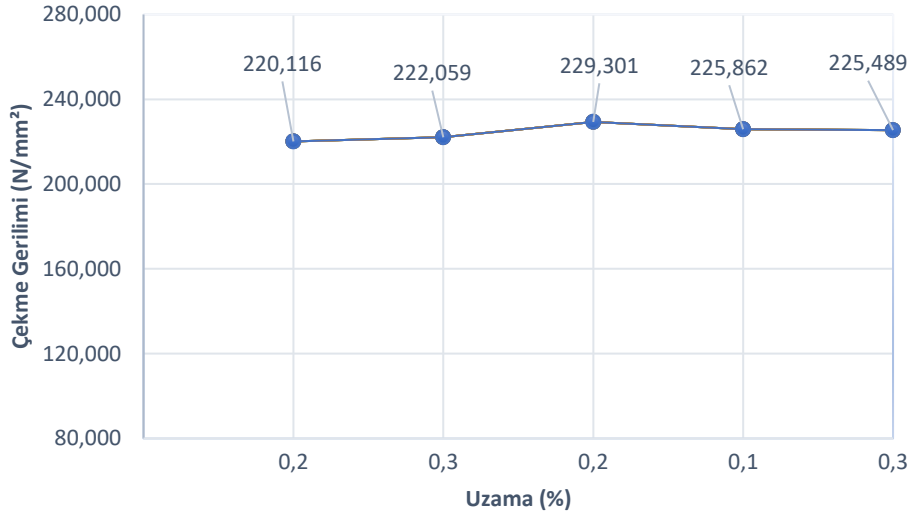


Şekil 4.2. İki numaralı laminasyon yapısına ait referans plaka için 90° yönelimli çekme gerilim grafiği

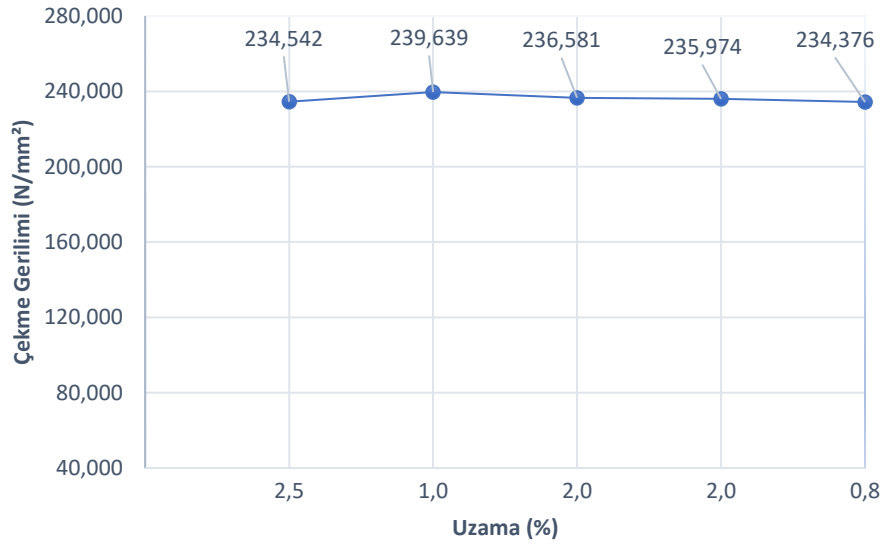
90° yönelimli fotopolimerizasyon ile kürlenen plakanın ortalama çekme gerilim değeri 204,283 N/mm<sup>2</sup> iken, post-kür uygulanan referans plakanın çekme gerilim değeri 214,425 N/mm<sup>2</sup> olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.3. Çekme testi sonrası 90° yönelimli foto kür ve referans test numuneleri



Şekil 4.4. İki numaralı laminasyon yapısına ait fotobaşlatıcılı plaka için 0° yönelimli çekme gerilimi grafiği



Şekil 4.5. İki numaralı laminasyon yapısına ait referans plaka için 0° yönelimli çekme gerilimi grafiği

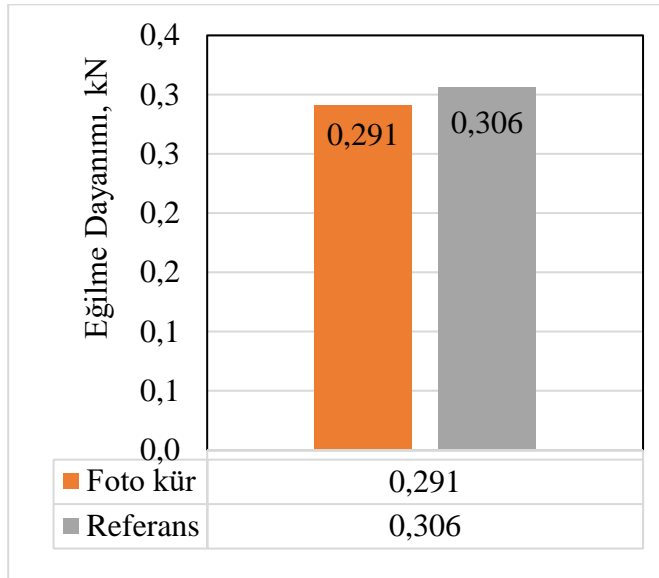


Şekil 4.6. Çekme testi sonrası 0° yönelimli foto kür ve referans test numuneleri

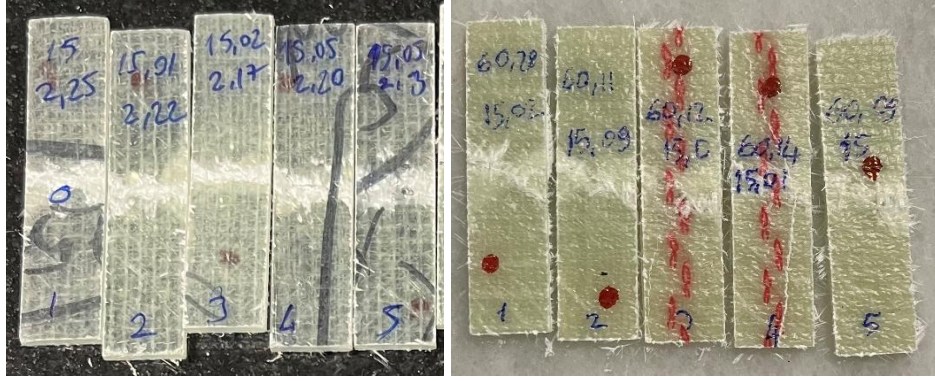
0° yönelimli fotopolimerizasyon ile kürlenmiş plakanın ortalama çekme gerinim değeri 224,565 N/mm<sup>2</sup> iken, post-kür uygulanan referans plakanın çekme gerinim değeri 236,222 N/mm<sup>2</sup> olduğu gözlemlenmiştir.

#### 4.1.2. Üç nokta eğme özellikleri

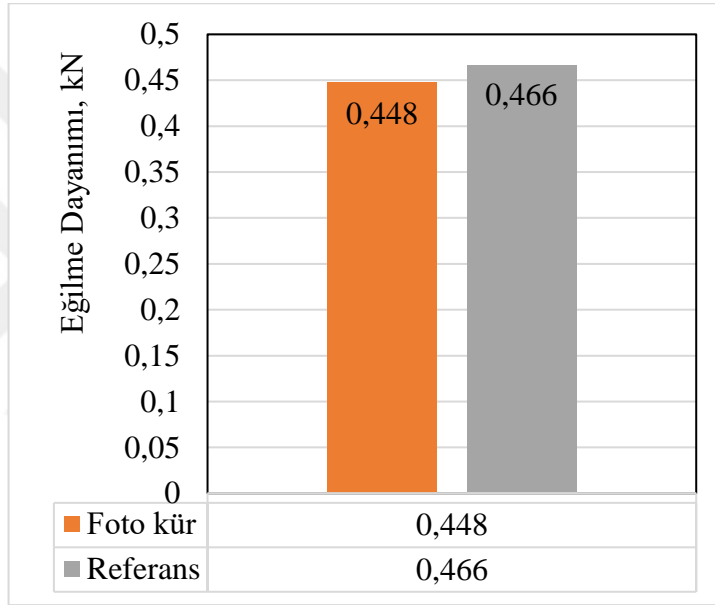
Hazırlanan kompozit plakaların üç nokta eğme testleri elyaf yöneliminin olduğu her iki ekseninde (0° ve 90°) gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen üç nokta eğme testlerine ait; eğilme dayanım sonuçları Şekil 4.7. ve Şekil 4.9.'de gösterilmiştir.



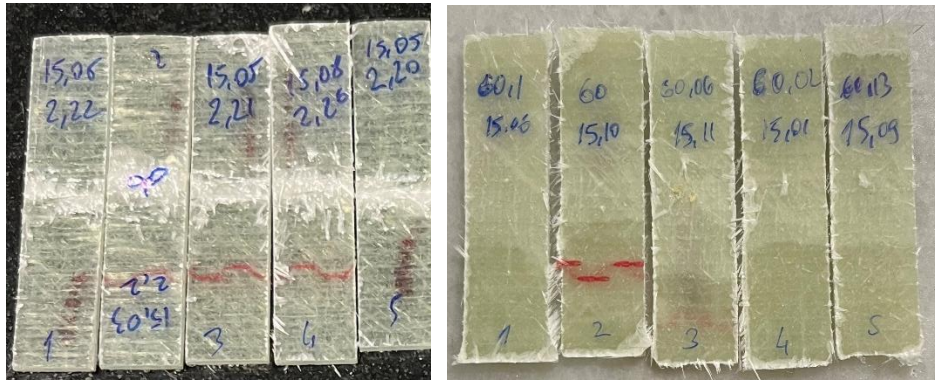
Şekil 4.7. Foto kürlenmiş ve referans kompozitlerin 0° yönelimli eğilme dayanımı karşılaştırması



Şekil 4.8. Mekanik testler sonrasında çok yönlü (0°) foto kür ve referans cam elyaf takviyeli kompozitler



Şekil 4.9. Foto kürlenmiş ve referans kompozitlerin 90° yönelimli eğilme dayanımı karşılaştırması



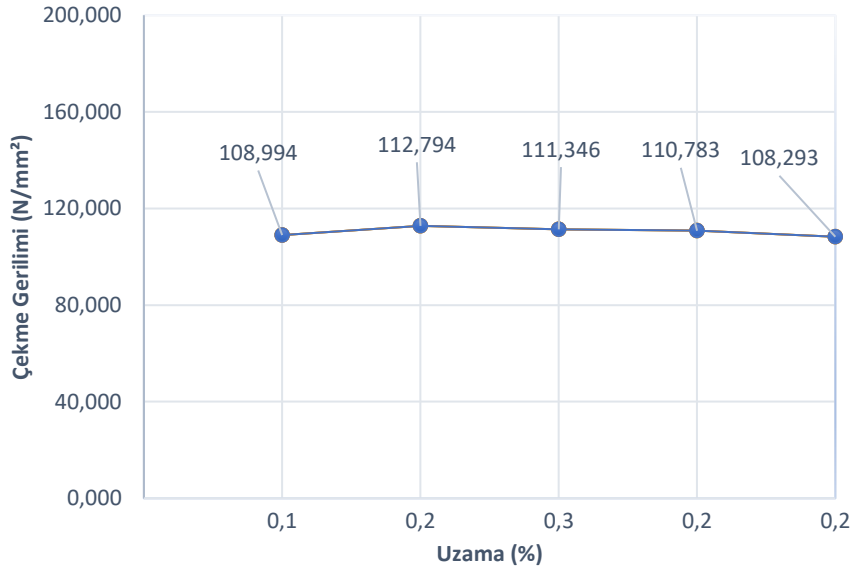
Şekil 4.10. Mekanik testler sonrasında çok yönlü (90°) foto kür ve referans cam elyaf takviyeli kompozitler

## 4.2. Tek Yönlü Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Özellikleri

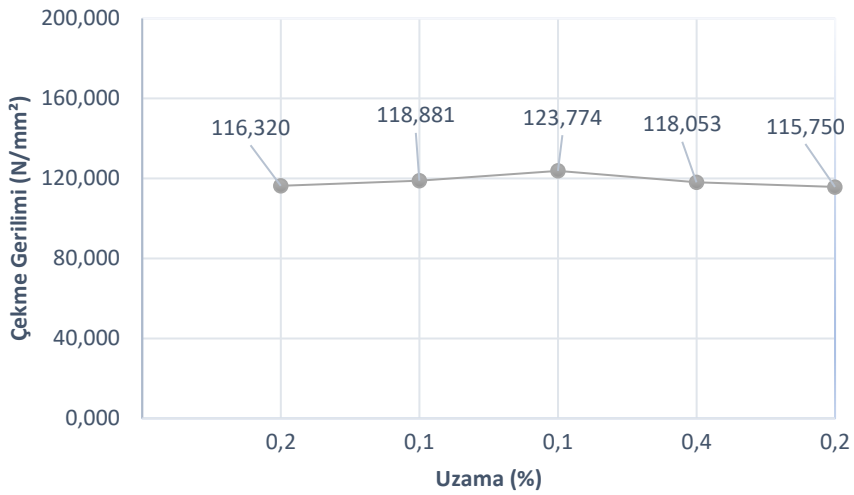
Bir numaralı laminasyon yapısına ait mekanik özellikler gelecek bölümlerde incelenecektir.

### 4.2.1. Çekme özellikleri

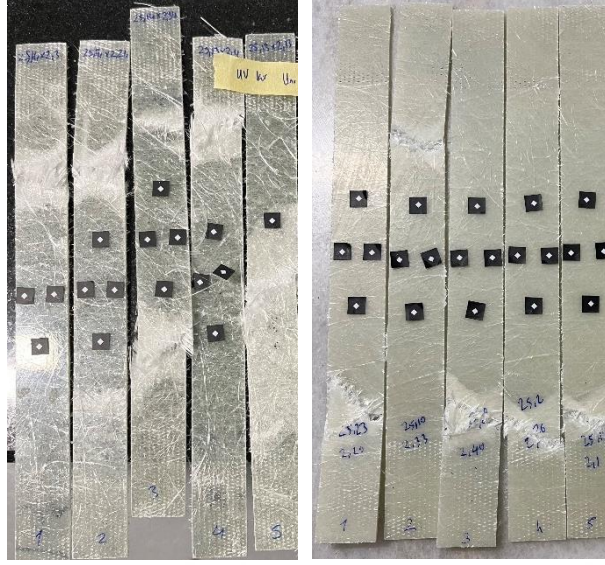
Gerçekleştirilen çekme testlerine ait; çekme gerilim ve uzama sonuçları Şekil 4.11. ve Şekil 4.12.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Fotobaşlatıcılı çekme gerilimi grafiği



Şekil 4.12. Referans çekme gerilimi grafiği

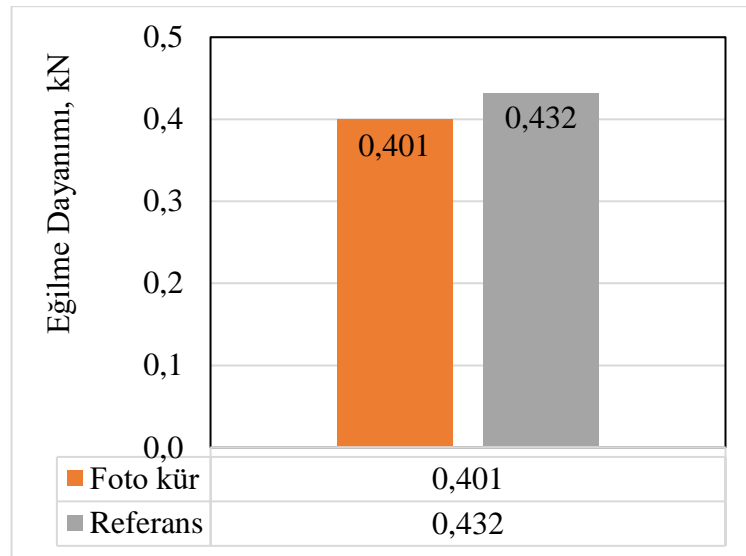


Şekil 4.13. Çekme testi sonrası foto kür ve referans test numuneleri

Fotopolimerizasyon ile kürlenen plakanın ortalama çekme gerinim değeri 110,442 N/mm<sup>2</sup> iken, post-kür uygulanan referans plakanın çekme gerinim değeri 118,555 N/mm<sup>2</sup> olduğu gözlenmiştir. Fotopolimerizasyon ile kürlenen kompozitin geleneksel yöntem olan ısı olarak kürlenen referans kompozite göre mekanik özelliklerinde yaklaşık %7'lik bir düşüş gözlemlenmiştir.

#### 4.2.2. Üç nokta eğme özellikleri

Üç nokta eğme testlerine ait; eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.14'de gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Bir numaralı laminasyona ait eğilme dayanım karşılaştırması



Şekil 4.15. Mekanik testler sonrası foto kür ve referans cam elyaf takviyeli kompozit numuneleri

### 4.3. Proses Karşılaştırma

Çalışmalar ve bulgular sonucunda fotopolimerizasyon ile kürlenmiş cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozitlerin geleneksel bir yöntem olan termal kürlenmiş referans kompozitler ile rekabet edebilecek seviyede mekanik özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir. İki kürlenme sistemi ile farklı sürelerde üretilen cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozit numunelerin proses şartları, süre ve malzeme maliyetleri açısından kıyaslanmıştır. Zaman bakımından süreç karşılaştırması Tablo 4.1’de yer almaktadır.

Tablo 4.1. Süre bakımında proses karşılaştırması

| Proses tanımı                  | Fotobaşlatıcılı | Termal Kür |
|--------------------------------|-----------------|------------|
| Elyaf, Polyester Hazırlama, dk | 45              | 47         |
| Kürleme, dk                    | 15              | 480        |
| <b>Toplam, dk</b>              | <b>60</b>       | <b>527</b> |

Kompozit plakaların üretimi için harcanan süreler karşılaştırıldığında fotokürlenmiş polyester matrisli kompozitlerin yaklaşık bir saat gibi kısa bir sürede hazır olduğu görülmüştür. Referans kompozitlerin kullanıma hazır olması ise kürlenme çevrimiyle birlikte (8 saat 60°C’de post kür) bir günü bulmaktadır. Kompozitlerin toplam üretim süresi yaklaşık 31-32 saati bulmaktadır. Fotokürlenmiş reçineyle üretilen sistem ve ısı ile kürlenmiş sistem arasında 31 kattan fazla zaman farkı olduğunu göstermektedir. Maliyet bakımından karşılaştırma ise Tablo 4.2’de yer almaktadır.

Tablo 4.2. Maliyet bakımında proses karşılaştırması

| Proses tanımı      | Fotobaşlatıcılı | Termal Kür    | Not             |
|--------------------|-----------------|---------------|-----------------|
| Reçine, TL/1000 gr | 140,74          | 88,322        | -               |
| Işıklandırma, TL   | 0,45            | -             | -               |
| Kür Fırını, TL     | -               | 680,64        | 8 saat post-kür |
| <b>Toplam, TL</b>  | <b>141,19</b>   | <b>768,96</b> | -               |

Enerji ve maliyet hesaplandığında fotopolimerizyon ile kürlenene sistemin ısı ile kürlenene sisteme göre yaklaşık %440 oranında avantaj değişimi sağladığı görülmüştür.



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kompozit malzemeleri içeren bu tez çalışmasında; elyaf takviyeli kompozitlerde çok yaygın olarak kullanılan matris malzemelerinden birisi olan doymamış polyester vakum infüzyon yöntemi ile cam elyafların çeşitli formdaki kumaşlarına nüfuz ettirilmiştir. Bu çalışmanın yapılmasındaki amaç elde edilen kompozit yapının çok kısa sürelerde üretilebilirliğinde iyileşme sağlamaktır.

Öncelikle doymamış polyester matris çeşitleri seçilmiştir. Polyester matrise uygun cam elyaf çeşitleriyle iki çeşit laminasyon planı seçilmiştir. Fotopolimerizasyon ve ısı ile kürlendirilip üretilmiş olan kompozit plakalar hazırlanmış, bunların mekanik (eğme, çekme) özellikleri incelenmiştir.

Çalışmamızda, görünür bölge ışınları ile kürlenen polyester reçine termal olarak kürlenen reçineye kıyasla mekanik özelliklerinin %5-7 oranında daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Mekanik değerler olarak bir düşüş gözlemlensede önceki bölümde yer alan Tablo 4.1. ve Tablo 4.2.'de belirtilen süreç ve maliyetler bütün olarak incelendiğinde, fotopolimerizasyon yönteminin dakikalar mertebesinde kürlenme süresi geleneksel ısı ile kürlenen kompozitlere kıyasla yaklaşık 31 kat iyileşme sağlamıştır.

Enerji ve maliyet hesaplandığında ise fotopolimerizasyon ile kürlenen sistemin ısı ile kürlenen sisteme göre yaklaşık %440 oranında avantaj sağladığı görülmüştür. Endüstriyel tip fırınlama sistemlerinden en büyük maliyet kalemi kür fırını işletme ve bakım maliyetleridir. Uzun dönem fırın bakım maliyetleri de düşünüldüğünde fotokürlenen sistemin sağladığı katkı daha çok genişleyecektir. Özet olarak kompozit ürünlerin çok kısa sürede fırına ihtiyaç duyulmadan kürlenmesi bir çevrim içindeki enerji maliyetini düşürmüştür.

Hem malzeme maliyetleri hem de üretim maliyeti açısından yapılan değerlendirmeye göre fotokürlenebilir polyester reçinenin daha avantajlı olduğu görülmüştür. Böylece polyester reçinelerin yüksek enerji gideri ve/veya süre gerektiren ısı yöntemleri yerine fotopolimerizasyon ile oda sıcaklığında kürlenebilmesi, elyaf takviyeli kompozitlerin büyük bir performans kaybına uğramadan daha az enerji ve yatırım ile kısa sürede üretilebileceğini kanıtlamıştır.

Fotokürlenene reçinenin kullanımı yüksek verimlilik, hızlı reaksiyon, güvenilirlik, düşük enerji tüketime ve düşük çevresel etki gibi önemli avantajları sayesinde elyaf takviyeli kompozitlerin hem üretim hem tamir uygulamalarında ilgi çekmesi beklenmektedir.

Son olarak, geleneksel ısı ile kürlenen polyester reçineli cam elyaf takviyeli kompozit plaka ve fotopolimerizasyonla kürlenen polyester reçineli cam elyaf takviyeli kompozit plakaların üretimi gerçekleştirilmiş ve iki sistemin proses karşılaştırılması yapılmıştır. Hem girdi maliyetleri hem de üretim uzunluğu bakımından fotokrleenebilir polyester reçine sistemin daha avantajlı olduğu görülmüştür. Yüksek enerji ve/veya zaman gerektiren termal yöntemler (otoklav, sıcak pres, kr fırını) yerine fotopolimerizasyon ile oda sıcaklığında krleenebilmesi, fotokrleenebilir elyaf takviyeli kompozitlerin daha az enerji ve yatırım ile kısa sürede imal edilebileceğini kanıtlamıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] Hasiaoui et al., “Free radical photopolymerization process for fiber-reinforced polymer: Effect on the mechanical properties”, *Polym Adv Technol*, vol. 30, no. 4, pp. 902–909, Apr. 2019.
- [2] J. V. Crivello, R. Narayan, and S. S. Sternstein, “Fabrication and mechanical characterization of glass fiber reinforced UV-cured composites from epoxidized vegetable oils”, *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 64, no. 11, pp. 2073–2087, Jun. 1997.
- [3] P. Compston, J. Schiemer, and A. Cvetanovska, “Mechanical properties and styrene emission levels of a UV-cured glass-fibre/vinylester composite”, *Composite Structures*, vol. 86, no. 1–3, pp. 22–26, Nov. 2008.
- [4] X. Wang, S. Xuan, L. Song, H. Yang, H. Lu, and Y. Hu, “Synergistic Effect of POSS on Mechanical Properties, Flammability, and Thermal Degradation of Intumescent Flame Retardant Polylactide Composites”, *Journal of Macromolecular Science, Part B*, vol. 51, no. 2, pp. 255–268, Feb. 2012.
- [5] J. N. Hahladakis, C. A. Velis, R. Weber, E. Iacovidou, and P. Purnell, “An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 344, pp. 179–199, Feb. 2018.
- [6] W.D. Callister, D.G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: an Introduction*, 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- [7] M. F. Ashby and D. Cebon, “Materials selection in mechanical design”, *J. Phys. IV France*, vol. 03, no. C7, pp. C7-1-C7-9, Nov. 1993.
- [8] Y.-P. Song, D.-Y. Wang, X.-L. Wang, L. Lin, and Y.-Z. Wang, “A method for simultaneously improving the flame retardancy and toughness of PLA: IMPROVING THE FLAME RETARDANCY AND TOUGHNESS OF PLA”, *Polym. Adv. Technol.*, vol. 22, no. 12, pp. 2295–2301, Dec. 2011.
- [9] F. Wang, L. T. Drzal, Y. Qin, and Z. Huang, “Enhancement of fracture toughness, mechanical and thermal properties of rubber/epoxy composites by incorporation of graphene nanoplatelets”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 87, pp. 10–22, Aug. 2016.
- [10] V.C. Li, Q. Zhang, Sprayable Strain Hardening Brittle Matrix Composites with Fire- Resistance and High Ductility, Google Patents, 2016.
- [11] C. A. Harper, Ed., “Chapter 3. Elastomeric Materials and Processes,” in *Handbook of plastics, elastomers, and composites*, 4th ed. in McGraw-Hill handbooks. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [12] T. R. Crompton, *Engineering Plastics*. Shawbury: Smithers Rapra, 2014.

- [13] A. B. Morgan and J. W. Gilman, “An overview of flame retardancy of polymeric materials: application, technology, and future directions: Aa Overwiev Of Flame Retardancy Of Polymeric Materials”, *Fire Mater.*, vol. 37, no. 4, pp. 259–279, Jun. 2013.
- [14] L. Ceschini et al., *Aluminum and Magnesium Metal Matrix Nanocomposites*. in Engineering Materials. Singapore: Springer Singapore, 2017.
- [15] P. Yuan, D. Gu, and D. Dai, “Particulate migration behavior and its mechanism during selective laser melting of TiC reinforced Al matrix nanocomposites”, *Materials & Design*, vol. 82, pp. 46–55, Oct. 2015.
- [16] L. Jiang et al., “Toughening of aluminum matrix nanocomposites via spatial arrays of boron carbide spherical nanoparticles”, *Acta Materialia*, vol. 103, pp. 128–140, Jan. 2016.
- [17] B. Chen et al., “An approach for homogeneous carbon nanotube dispersion in Al matrix composites”, *Materials & Design*, vol. 72, pp. 1–8, May 2015.
- [18] B. AlMangour, D. Grzesiak, and J.-M. Yang, “Nanocrystalline TiC-reinforced H13 steel matrix nanocomposites fabricated by selective laser melting”, *Materials & Design*, vol. 96, pp. 150–161, Apr. 2016.
- [19] B. AlMangour, D. Grzesiak, and Jenn-MingYang, “Selective laser melting of TiC reinforced 316L stainless steel matrix nanocomposites: Influence of starting TiC particle size and volume content”, *Materials & Design*, vol. 104, pp. 141–151, Aug. 2016.
- [20] B. AlMangour, D. Grzesiak, T. Borkar, and J.-M. Yang, “Densification behavior, microstructural evolution, and mechanical properties of TiC/316L stainless steel nanocomposites fabricated by selective laser melting,” *Materials & Design*, Jan. 2018.
- [21] S. Zhao, X. Shen, J. Yang, W. Teng, and Y. Wang, “Densification behavior and mechanical properties of nanocrystalline TiC reinforced 316L stainless steel composite parts fabricated by selective laser melting”, *Optics & Laser Technology*, vol. 103, pp. 239-250, Jul. 2018.
- [22] S. E. Shin, H. J. Choi, J. Y. Hwang, and D. H. Bae, “Strengthening behavior of carbon/metal nanocomposites”, *Sci Rep*, vol. 5, no. 1, p. 16114, Nov. 2015.
- [23] X. N. Mu et al., “Interface evolution and superior tensile properties of multi-layer graphene reinforced pure Ti matrix composite”, *Materials & Design*, vol. 140, pp. 431–441, Feb. 2018.
- [24] X. N. Mu et al., “Microstructure evolution and superior tensile properties of low content graphene nanoplatelets reinforced pure Ti matrix composites”, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 687, pp. 164–174, Feb. 2017.
- [25] F. L. Matthews and R. D. Rawlings, *Composite materials: engineering and science*, Reprinted. Cambridge: Woodhead Publ. [u.a.], 1999.

- [26] A.T. McIlhagger, S.T. Matthews, D. Brown and B. Hill in Proceedings of the IOM CAC-99 Conference, Bristol, UK, 1999, p.133.
- [27] Tang, B. M., “FRP Composites Technology Brings Advantages to the American Bridge Building Industry”, *2nd International Workshop on Structural Composites for Infrastructure Applications*, Cairo, Egypt, 2003.
- [28] T. Sathishkumar, S. Satheeshkumar, and J. Naveen, “Glass fiber-reinforced polymer composites – a review”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 33, no. 13, pp. 1258–1275, Jul. 2014.
- [29] D. Kendall, “Developments in FRP Bridge Design,” *Reinforced Plastics*, 54, pp. 38-42, 2010.
- [30] H.Y. Ersoy, *Kompozit Malzeme, Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama, San. ve Tic. Ltd. Şti.*, İstanbul, 2001.
- [31] S. Çalışkan, “Mechanical properties of non-crimp fabric (NCF) fiberglass reinforced composite materials manufacture by using vacuum infusion process”, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009, 255874.
- [32] D. M. Manohar, Introduction to composite, B.S.Abdur Rahman Crescent Institute of Science & Technology, <https://crescent.education/wp-content/uploads/2019/02/Module1-IntroductiontoComposites.pdf>, (Erişim Tarihi: 2019).
- [33] M. R. Ketabchi, M. E. Hoque, and M. Khalid Siddiqui, “Critical Concerns on Manufacturing Processes of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites,” in *Manufacturing of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites*, M. S. Salit, M. Jawaid, N. B. Yusoff, and M. E. Hoque, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 125–138.
- [34] C. I. Pruncu, S. Gürgen, and M. E. Hoque, Eds., *Fiber-reinforced polymers: processes and applications*. in Polymer science and technology. New York: Nova Science Publishers, 2021.
- [35] Saçak, M. (2002). *Polimer kimyası*, Gazi Kitabevi, Ankara, 85-89, 221-224, 275-297, 393-397.
- [36] E. Bozkurt, “Mechanical and thermal properties of non-crimp glass fiber reinforced composites with silicate nanoparticle modified epoxy matrix”, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Makine Mühendisliği, İzmir. 2006, 183483.
- [37] K. S. Ravi Chandran, “Review: Fatigue of Fiber-Reinforced Composites, Damage and Failure”, *J Indian Inst Sci*, vol. 102, no. 1, pp. 439–460, Jan. 2022.
- [38] S. T. Peters, “Introduction, Composite Basics and Road Map”, in *Handbook of Composites*, S. T. Peters, Ed., Boston, MA: Springer US, 1998, pp. 1–20.

- [39] S. Erden, K. Sever, Y. Seki, and M. Sarikanat, “Enhancement of the mechanical properties of glass/polyester composites via matrix modification glass/polyester composite siloxane matrix modification”, *Fibers Polym*, vol. 11, no. 5, pp. 732–737, Aug. 2010.
- [40] D. K. Rajak, P. H. Wagh, and E. Linul, “Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review”, *Polymers*, vol. 13, no. 21, p. 3721, Oct. 2021.
- [41] C. A. Harper, Ed., “Composite Materials and Processes,” in *Handbook of plastics, elastomers, and composites*, 4th ed. in McGraw-Hill handbooks. New York: McGraw-Hill, 2002, pp. 229-320.
- [42] P. S, S. Km, N. K, and S. S, “Fiber Reinforced Composites - A Review”, *J Material Sci Eng*, vol. 06, no. 03, 2017.
- [43] C. A. Harper, Ed., *Handbook of plastics, elastomers, and composites*, 4th ed. in McGraw-Hill handbooks. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [44] J. Singh, M. Kumar, S. Kumar, and S. K. Mohapatra, “Properties of Glass-Fiber Hybrid Composites: A Review”, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 56, no. 5, pp. 455–469, Mar. 2017.
- [45] Yurddaş Ç., Afşar E., “CTP Teknolojisi”, 4. basım, Cam Elyaf, 8-44, 2000.
- [46] R. P. L. Nijssen., “Composite Materials: An Introduction”, Inholland University of Applied Sciences, 2015.
- [47] G. Gardnier, The making of glass fiber, *Composites World Magazine*, <https://www.compositesworld.com/articles/the-making-of-glass-fiber> (Erişim tarihi: 06/01/2020).
- [48] M.S. Ersoy, “Lif takviyeli polimerik kompozit malzeme tasarımı,” Yüksek Lisans Tezi, Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş. 2005, 197461.
- [49] N. G. Pérez-de-Eulate, A. A. Iztueta, K. Gondra, and F. J. Vallejo, “Influence of the Fibre Content, Exposure Time, and Compaction Pressure on the Mechanical Properties of Ultraviolet-Cured Composites”, *J. Compos. Sci.*, vol. 4, no. 1, p. 30, Mar. 2020.
- [50] S. S. Raj, J.E.R. Dhas, “Fiber-Reinforced Polymers Processes and Applications,” *NOVA Science Publihers*, pp. 131-176, 2021.
- [51] M. Bannister, “Challenges for composites into the next millennium — a reinforcement perspective”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 32, no. 7, pp. 901–910, Jul. 2001.
- [52] A. D. Tran, T. Koch, P. Knaack, and R. Liska, “Radical induced cationic frontal polymerization for preparation of epoxy composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 132, p. 105855, May 2020.

- [53] A. Endruweit, M. S. Johnson, and A. C. Long, "Curing of composite components by ultraviolet radiation: A review," *Polym. Compos.*, vol. 27, no. 2, pp. 119–128, Apr. 2006.
- [54] A. O. Nwabuzor and O. I. Okoli, "Preliminary assessment of the ultra violet curing of composites manufactured by the resin infusion between double flexible tooling process," *Polym. Compos.*, vol. 27, no. 4, pp. 417–424, Aug. 2006.
- [55] F. Masson, C. Decker, T. Jaworek, and R. Schwalm, "UV-radiation curing of waterbased urethane–acrylate coatings," *Prog. Org. Coat.*, vol. 39, no. 2–4, pp. 115–126, Nov. 2000.
- [56] W. A. Green, *Industrial photoinitiators: a technical guide*. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [57] S.-S. Pang, G. Li, H. D. Jerro, J. A. Peck, and M. A. Stubblefield, "Fast joining of composite pipes using UV curing FRP composites," *Polym Compos*, vol. 25, no. 3, pp. 298–306, Jun. 2004.
- [58] N. S. Allen, "Photoinitiators for UV and visible curing of coatings: Mechanisms and properties", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 100, no. 1–3, pp. 101–107, Oct. 1996.
- [59] R. W. Stowe, "Key factors in the UV curing process—The relationship of exposure conditions and measurement in UV process design and process control: Part I—Introduction", *Metal Finishing*, vol. 100, no. 4, pp. 62–71, Apr. 2002.
- [60] K. Maag, W. Lenhard, and H. Löffles, "New UV curing systems for automotive applications", *Progress in Organic Coatings*, vol. 40, no. 1–4, pp. 93–97, Dec. 2000.
- [61] Bannister, "Challenges for composites into the next millennium — a reinforcement perspective", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 32, no. 7, pp. 901–910, Jul. 2001.
- [62] G. Li, N. Pourmohamadian, A. Cygan, J. Peck, J. E. Helms, and S.-S. Pang, "Fast repair of laminated beams using UV curing composites", *Composite Structures*, vol. 60, no. 1, pp. 73–81, Apr. 2003.
- [63] W. Shi and B. Rånby, "UV curing of composites based on modified unsaturated polyester", *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 51, no. 6, pp. 1129–1139, Feb. 1994.
- [64] J. Shao, Y. Huang, and Q. Fan, "Visible light initiating systems for photopolymerization: status, development and challenges", *Polym. Chem.*, vol. 5, no. 14, pp. 4195–4210, 2014.
- [65] C. Decker, "UV-radiation curing chemistry", *Pigment & Resin Technology*, vol. 30, no. 5, pp. 278–286, Oct. 2001.
- [66] A. Kocaarslan, C. Kütahya, D. Keil, Y. Yagci, and B. Strehmel, "Near-IR and UV-LED Sensitized Photopolymerization with Onium Salts Comprising Anions

- of Different Nucleophilicities,” *ChemPhotoChem*, vol. 3, no. 11, pp. 1127–1132, Nov. 2019.
- [67] H. Mokbel et al., “Copper photoredox catalyst ‘G1’: a new high performance photoinitiator for near-UV and visible LEDs,” *Polym. Chem.*, vol. 8, no. 36, pp. 5580–5592, 2017.
- [68] Kasabova, A. (2023, March 2). *UV, Visible Light & Infrared*. <https://www.lip-sunglasses.com/eye-protection-understanding-ultraviolet-and-visible-light/>
- [69] H. Mokbel et al., “Specific cationic photoinitiators for near UV and visible LEDs: Iodonium versus ferrocenium structures,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 132, no. 46, Dec. 2015.
- [70] Mills, P. (2005) Proceeding of the RadTech Europe Conference, <http://www.radtech-europe.com>.
- [71] J. P. Fouassier and J. Lalevée, *Photoinitiators for Polymer Synthesis: Scope, Reactivity and Efficiency*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012.
- [72] K. Dietliker, A. Braig, and A. Ricci, “Industrial applications of photochemistry: automotive coatings and beyond”, in *Photochemistry*, A. Albini, Ed., 1st ed. The Royal Society of Chemistry, 2010, pp. 344–368.
- [73] I. M. Daniel and O. Ishai, *Engineering mechanics of composite materials*, 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2006.
- [74] A. J. Jefferson, V. Arumugam, and H. Dhakal, *Repair of polymer composites: methodology, techniques and challenges*. in Woodhead Publishing series in composites science and engineering. Oxford: Woodhead Publishing, 2018
- [75] M. Yüksek, “Cam lifi esaslı poliester reçineli çok eksenli çözgümlü örme kompozit yapıların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011, 290408.
- [76] V. Eskizeybek, “Yüzeylerine kimyasal olarak karbon nanotüpler bağlanmış örgü cam fiber/epoksi nanokompozitlerin üretimi ve tabakalar arası kırılma davranışının incelenmesi,” Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2012, 293087.
- [77] N. Becenen, “Traktör Kaportalarında Kullanılan Plastik Matrisli Kompozit Malzemelerin Yapısal Özelliklerinin İyileştirilmesi Üzerine Bir Araştırma” Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 2008, 233256.
- [78] Çuhadar, B. (2005) *İçten basınca maruz kapların dizaynı*, Bitirme Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi. Makine Mühendisliği

- [79] A. Demirel, “Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin karakterizasyonu,” Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007, 212872.
- [80] A. K. Tanwer, “Mechanical properties testing of uni-directional and bi-directional glass fibre reinforced epoxy based composites,” *Int. J. Res. Advent Technol.* vol. 2, no. 11, pp. 34–39. 2014.
- [81] F. Aydın, “Tek yönlü hibrit CTP/Al tabakalı kompozitlerin farklı R-oranları için yorulma ömrünün belirlenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman, 2018, 506703.
- [82] S. Abrate, *Impact on Composite Structures*, 1st ed. Cambridge University Press, 1998.
- [83] Liu D., Impact Induced Delamination-A View of Bending Stiffness Mismatching, *Journal of Composite Materials*, 22, 674-92, 1988.
- [84] İ. Türkmen ve N. S. Köksal, “Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozit Malzemelerde (CTP) Elyaf Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin ve Darbe Dayanımının İncelenmesi”, Celal Bayar University, *Journal of Science*, c. 8, sayı. 2, ss. 17-30, Haz. 2012.
- [85] Greene E., - Marine Composites, Annapolis, ABD, <http://www.marinecomposites.com>, 1998.
- [86] OWENS CORNING (2020, May). *Multiaxial Non-Crimp Fabric Brochure*. <https://www.owenscorning.com/dms/10024026>.
- [87] H. D. M. Armakan, “Örme sandviç tekstillerin kompozit uygulamalarında kullanım olanaklarının araştırılması,” Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2010, 276206.
- [88] D. Gay, S. V. Hoa, and S. W. Tsai, *Composite Materials: Design and Applications*, 0 ed. CRC Press, 2002.
- [89] K. Potter, *An introduction to composite products: design, development and manufacture*, 1st ed. London ; New York: Chapman & Hall, 1997.
- [90] K. L. Forsdyke and T. F. Starr, *Thermoset resins: a Rapra market report*. Shawbury: Rapra Technology, 2002.
- [91] D. Cripps, T. J. Searle, and J. Summerscales, “Open Mold Techniques for Thermoset Composites”, in *Comprehensive Composite Materials*, Elsevier, 2000, pp. 737–761.
- [92] A. Hindersmann, “Confusion about infusion: An overview of infusion processes”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 126, p. 105583, Nov. 2019.

- [93] POLYWORX (2002, March 14). *Bolt Maritiem - Satellite 44 Vacuum Infusion - Outer skin*. <https://www.polyworx.com/apz/bolt/bmh1sk/>
- [94] G. Belingardi, M. P. Cavatorta, and D. Salvatore Paolino, “Repeated impact response of hand lay-up and vacuum infusion thick glass reinforced laminates”, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 35, no. 7, pp. 609–619, Jul. 2008.
- [95] M. Yuhazri, Y. Phongsakorn, P. T. H. Sihombing, “A comparison process between vacuum infusion and hand lay-up method toward kenaf/polyster composites,” *Int. J. Basic Appl. Sci.* vol. 10, pp. 54-57, 2010.



## ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini İstanbul’da tamamladı. 2009 yılında girdiği Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Polimer Mühendisliği Bölümünden 2014 yılında mezun oldu. 2015 yılında kompozit alanında otomotiv sektörü ile başladığı çalışma hayatına raylı sistem alanında kompozit parça üretimi yapan SAZCILAR A.Ş. firmasında Kıdemli Proje Mühendisi olarak devam etmektedir. Yüksek lisans tezi 2022/YL/0013 numaralı Yalova Üniversitesi BAPKO Lisansüstü Tez projesi kapsamında desteklenmiştir.

## TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

Durak S., Taşdelen A. M. (2023, Mayıs). *Cam elyaf takviyeli doymamış polyester matrisli kompozitlerin fotopolimerizasyon ile üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. 12. Uluslararası Lif ve Polimer Araştırmaları Sempozyumu, Yalova Üniversitesi, Türkiye.

## DİĞER YAYIN VE ESERLER

Durak S., Taşdelen A. M., Güngör S., Oran S. (2016). Karbondioksitten poliüretan sentezi. *Putech & Composites Dergisi*, 28, 26-32.