



**T.C.  
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ENDÜSTRİYEL KENEVİR LİFLERİNDEN OTOMOTİV  
SEKTÖRÜNE YÖNELİK BİYOKOMPOZİT MALZEME  
GELİŞTİRİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**MUHAMMED ALİ AYDOĞAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Danışman: Doç. Dr. Esra YILDIZ**

**TEMMUZ – 2024**

**YOZGAT**

**T.C.**  
**YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**  
**MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ENDÜSTRİYEL KENEVİR LİFLERİNDEN OTOMOTİV  
SEKTÖRÜNE YÖNELİK BİYOKOMPOZİT MALZEME  
GELİŞTİRİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**MUHAMMED ALİ AYDOĞAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Danışman: Doç. Dr. Esra YILDIZ**

**Bu çalışma Yozgat Bozok Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri  
(BAP) Koordinasyon Birimi tarafından FYL-2023-1134 kodu ile  
desteklenmiştir.**

**TEMMUZ– 2024**

**YOZGAT**



**YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**  
**LİSANSÜSTÜ TEZ ONAY FORMU**

**T.C.**

**YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

Enstitümüzün Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı öğrencisi Muhammed Ali AYDOĞAN'ın hazırladığı “**Endüstriyel Kenevir Liflerinden Otomotiv Sektörüne Yönelik Biyokompozit Malzeme Geliştirilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi**” başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince 10/07/2024 Çarşamba günü saat 11.00'da yapılmış, tezin onayına oy birliği/oy çokluğu ile karar verilmiştir.

**Başkan :**

**Jüri Üyesi :**

**Jüri Üyesi :**

**ONAY:**

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun ...../...../2024 tarih ve ..... sayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

...../...../2024

**Prof. Dr. Ümit BUDAK**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü**

## TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan eder, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğini beyan ederim.

Muhammed Ali AYDOĞAN

10/07/2024

## ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bana destek olan herkese minnettarlığımı sunmak istiyorum. Öncelikle, yüksek lisans sürecim boyunca bana yol gösteren, bilgi ve deneyimleriyle her adımda yanımda olan danışman hocam Doç. Dr. Esra YILDIZ'a en derin teşekkürlerimi sunarım. Onun sabrı, anlayışı ve bilimsel bakış açısı, bu çalışmanın şekillenmesinde ve tamamlanmasında büyük rol oynamıştır. Ayrıca, tez çalışmamın kuramsal ve deneysel süreçlerine olan desteği ile tezimin gelişimine katkıda bulunan; değerli önerileri ve eleştirileriyle çalışmama farklı bir perspektif kazandıran Dr. Öğr. Üyesi Ali YILDIZ'a da içtenlikle teşekkür ederim.

Bu süreçte, her zaman yanımda olan ve maddi manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Onların bitmeyen sabırları, fedakârlıkları ve sevgisi olmadan bu yolculuğu tamamlamam mümkün olmazdı. Özellikle, zor zamanlarda bana moral ve motivasyon kaynağı oldular.

Ayrıca, tez çalışmam sırasında fikir alışverişinde bulunduğum, beni destekleyen ve cesaretlendiren arkadaşlarıma teşekkür etmek istiyorum. Onların desteği, bu sürecin daha anlamlı ve keyifli geçmesini sağladı.

Bu tez çalışması;

Yozgat Bozok Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi tarafından FYL-2023-1134 kodu ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Yozgat Bozok Üniversitesi yönetimine teşekkür ederim.

Muhammed Ali AYDOĞAN

10/07/2024

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### ENDÜSTRİYEL KENEVİR LİFLERİNDEN OTOMOTİV SEKTÖRÜNE YÖNELİK BİYOKOMPOZİT MALZEME GELİŞTİRİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

MUHAMMED ALİ AYDOĞAN

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ESRA YILDIZ

Biyokompozit malzemelerin üretilmesinde yaygın bir şekilde kullanılan bitkisel esaslı doğal liflerin hafiflik ve ekonomiklik yönüyle sağladığı üstünlüklerin yanında biyobozunur nitelikte olmaları bu tür liflerin kullanımını öne çıkarmaktadır. Günümüzde doğal liflerin kompozit malzeme üretiminde kullanımı ekolojik ve sürdürülebilir yaklaşımlar çerçevesinde hızla artış göstermektedir. Takviye elemanı olarak kullanılan bitkisel liflerin biyolojik olarak parçalanabilir ve geri dönüştürülebilir olmasının yanında, yüksek özgül mukavemet ve düşük yoğunluk gibi özelliklerinin bulunmasına ek olarak hammadde kaynaklarının yenilenebilir ve ekonomik olması sebebiyle biyokompozitlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar büyük önem arz etmektedir. Kenevir, cannabaceae familyasından olup lif üretimi için kullanılan ve endüstriyel öneme sahip olan cinsi cannabis sativadır. Bitkinin hızlı büyümesi ve ekonomik olmasının yanında liflerinin yüksek çekme mukavemeti ve düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle kompozit malzeme üretiminde takviye malzemesi olarak kullanılması önemli avantajlar sağlamaktadır. Bunun yanında çürümeye ve yangına karşı dayanıksız olması liflerin zayıf yönlerindendir. Tez çalışmasında bu çerçevede kenevir kumaşlara borik asit katkılanarak modifiye edilen lifler, takviye malzemesi olarak biyokompozit malzeme geliştirilmesinde kullanılmıştır. Vakum infüzyon yöntemi ile biyokompozit malzemeler üretilerek karakterize edilmiştir. Biyokompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme ve eğilme testleri yapılmıştır. Isıl özelliklerinin belirlenmesi için termogravimetrik analiz (TGA/DTA) ve yanmazlık testi, lif-matris ara yüzey bağı, yüzey özellikleri ve kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi için ise taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS) kullanılarak malzemelerin özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ayrıca biyomalzeme olarak değerlendirilmesi amacıyla malzemelerin su tutma davranışları belirlenmiştir.

2024, xiv + 71 Sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Biyokompozit, Kenevir, Borik asit katkılama

# **ABSTRACT**

## **MASTER THESIS**

### **DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF PROPERTIES BIOCOMPOSITE MATERIAL FROM HEMP FIBERS FOR AUTOMOTIVE INDUSTRY**

**MUHAMMED ALİ AYDOĞAN**

**YOZGAT BOZOK UNIVERSITY**

**GRADUATE EDUCATION INSTITUTE**

**DEPARTMENT OF MECHATRONICS ENGINEERING**

**SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. ESRA YILDIZ**

The advantages of plant-based natural fibers, which are widely used in the production of biocomposite materials, in terms of lightness and economy, as well as their biodegradable nature, make the use of such fibers stand out. Today, the use of natural fibers in the production of composite materials is increasing rapidly within the framework of ecological and sustainable approaches. Studies on the development of biocomposites are of great importance because the plant fibers used as reinforcement elements are biodegradable and recyclable, have properties such as high specific strength and low density, and their raw material resources are renewable and economical. Hemp is from the Cannabinaceae family and is used for fiber production and is of industrial importance. In addition to being fast growing and economical, the use of the plant as a reinforcement material in the production of composite materials provides significant advantages due to the high tensile strength and low density of its fibers. In addition, one of the weaknesses of fibers is that they are not resistant to decay and fire. In this thesis study, fibers modified by adding boric acid to hemp fabrics were used in the development of biocomposite materials as reinforcement materials. Biocomposite materials were produced using the vacuum infusion method. Tensile and bending tests were performed to determine the mechanical properties of biocomposite materials. The properties of the materials were examined in detail using thermogravimetric analysis (TGA/DTA) and fireproofing test to determine their thermal properties, and scanning electron microscopy (SEM-EDS) to determine the fiber-matrix interface bond, surface properties and chemical compositions. Additionally, water retention behavior of the materials was determined in order to be evaluated as biomaterials.

2024, xiv + 71 Pages

**Keywords:** Biocomposite, Hemp, Boric acid doping

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

|                                                           |      |
|-----------------------------------------------------------|------|
| LİSANSÜSTÜ TEZ ONAY FORMU.....                            | ii   |
| TEZ BEYANI.....                                           | iii  |
| ÖN SÖZ.....                                               | iv   |
| ÖZET .....                                                | v    |
| ABSTRACT .....                                            | vi   |
| İÇİNDEKİLER.....                                          | vii  |
| TABLolar LİSTESİ .....                                    | x    |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                                     | xi   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....                      | xiii |
| 1. GİRİŞ.....                                             | 1    |
| 2. LİTERATÜR ÖZETİ.....                                   | 3    |
| 2.1. Kuramsal Bilgiler.....                               | 8    |
| 2.1.1. Kompozit Malzemeler.....                           | 9    |
| 2.1.2. Kompozit Malzemelerin Üstün ve Zayıf Yönleri ..... | 10   |
| 2.1.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....       | 11   |
| 2.1.3.1. Matris Malzemesine Göre Sınıflandırma .....      | 11   |
| 2.1.3.1.1. Polimer Matrisli Kompozitler.....              | 12   |
| 2.1.3.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler .....             | 13   |
| 2.1.3.1.3. Metal Matrisli Kompozitler .....               | 14   |
| 2.1.3.2. Takviye Malzemesine Göre Sınıflandırma.....      | 14   |
| 2.1.3.2.1. Parçacık (Partikül) Takviyeli Kompozitler..... | 15   |
| 2.1.3.2.2. Fiber (lif) takviyeli kompozitler .....        | 16   |
| 2.1.3.2.3. Tabakalı kompozitler .....                     | 17   |
| 2.1.3.2.4. Hibrit Kompozitler .....                       | 18   |

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri .....                     | 19 |
| 2.1.4.1. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....           | 19 |
| 2.1.4.1.1. Açık Kalıplama Yöntemleri.....                                | 20 |
| 2.1.4.1.2. Kapalı Kalıplama Yöntemleri.....                              | 22 |
| 2.1.4.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri .....            | 26 |
| 2.1.5. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları .....                     | 27 |
| 2.1.5.1. Otomotiv Endüstrisinde Kompozit Malzemelerin Kullanımı .....    | 28 |
| 2.1.6. Kompozit Malzemelerdeki Özel Uygulamalar .....                    | 31 |
| 2.1.6.1. Karbon-Karbon kompozitler .....                                 | 31 |
| 2.1.6.2. Nano-Kompozitler.....                                           | 31 |
| 2.1.6.3. Sürekli Elyafli Enjeksiyon Prosesi (CFIP).....                  | 32 |
| 2.1.7. Biyokompozitler.....                                              | 33 |
| 2.1.7.1. Doğal Lif Takviyeli Biyokompozitler .....                       | 34 |
| 2.1.8. Yeşil Kompozitler .....                                           | 35 |
| 2.1.9. Kenevir.....                                                      | 36 |
| 2.1.9.1. Kenevir Liflerinin Yapısı ve Özellikleri .....                  | 38 |
| 2.1.9.2. Kenevir Liflerinin Kompozit Malzemelerde Kullanım Alanları..... | 39 |
| 3. MATERYAL VE METOD.....                                                | 41 |
| 3.1. Kenevir Kumaşa Borik Asit Katkılanması .....                        | 41 |
| 3.2. Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Biyokompozit Üretimi .....               | 41 |
| 3.3. Mekanik Testler .....                                               | 43 |
| 3.3.1. Çekme Deneyi.....                                                 | 43 |
| 3.3.2. Üç Nokta Eğme Deneyi .....                                        | 45 |
| 3.3.3. Su Tutma Deneyi.....                                              | 47 |
| 3.3.4. UL-94 Dikey Yanma Deneyi .....                                    | 48 |
| 3.3.5. Termogravimetrik ve Diferansiyel Termal Analiz (TGA/DTA) .....    | 49 |

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.6. Taramalı Elektron Mikroskobu ile Morfolojik Analizler ..... | 50 |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....                                      | 51 |
| 4.1. TGA/DTA Analizi .....                                         | 51 |
| 4.2. SEM-EDS Analizi.....                                          | 52 |
| 4.3. Su Tutma Deneyi Sonuçları.....                                | 57 |
| 4.4. Yanmazlık Deneyi Sonuçları .....                              | 59 |
| 4.5. Çekme Deneyi Sonuçları .....                                  | 59 |
| 4.6. Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları.....                           | 60 |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                         | 63 |
| 6. KAYNAKLAR.....                                                  | 64 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

| <b><u>Tablo</u></b>                                                                        | <b><u>Sayfa</u></b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>Tablo 2.1.</b> Kompozit malzemelerin üstün ve zayıf yönleri.....                        | 10                  |
| <b>Tablo 2.2.</b> Kompozit malzemelerin kullanıldığı alanlar ve sağladığı yararlar .....   | 27                  |
| <b>Tablo 4.1.</b> Biyokompozitlerin su tutma miktarlarının zamanla değişim değerleri ..... | 58                  |
| <b>Tablo 4.2.</b> Çekme deneyi sonuçları .....                                             | 59                  |



## ŞEKİLLER LİSTESİ

| <u>Sekil</u>                                                                                                                                     | <u>Sayfa</u> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 2.1. Partikül takviyeli kompozitlere ilişkin şematik gösterim.....                                                                         | 15           |
| Şekil 2.2. Fiber takviyeli kompozitlere ilişkin şematik gösterim.....                                                                            | 16           |
| Şekil 2.3. Tabakalı kompozitlere ilişkin şematik gösterim .....                                                                                  | 18           |
| Şekil 2.4. Polimer matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri .....                                                                        | 20           |
| Şekil 2.5. El ile Yatırma yöntemi ile kompozit üretiminin şematik gösterimi.....                                                                 | 20           |
| Şekil 2.6. Püskürtme yöntemi ile kompozit üretiminin şematik gösterimi .....                                                                     | 21           |
| Şekil 2.7. Sıkıştırılmalı presle kalıplama yöntemi ile kompozit üretiminin şematik gösterimi.....                                                | 23           |
| Şekil 2.8. Reçine transfer kalıplama yöntemi ile kompozit üretiminin şematik gösterimi .                                                         | 23           |
| Şekil 2.9. Enjeksiyon kalıplama yöntemi ile kompozit üretiminin şematik gösterimi.....                                                           | 25           |
| Şekil 2.10. Elyaf sarma yöntemi ile kompozit üretiminin şematik gösterimi .....                                                                  | 25           |
| Şekil 2.11. Vakum İnfüzyon yöntemi ile kompozit üretiminin şematik gösterimi .....                                                               | 26           |
| Şekil 2.12. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri.....                                                                          | 27           |
| Şekil 2.13. Otomobil ve yarış aracı için karbon fiber kompozit kullanılarak üretilmiş karoser örnekleri .....                                    | 29           |
| Şekil 2.14. Otomobil için karbon fiber kompozit kullanılarak üretilmiş şaft örnekleri .....                                                      | 29           |
| Şekil 2.15. Doğal liflerin takviye malzemesi olarak kullanılmasıyla üretilmiş biyokompozit örnekleri; otomobil kapı kaportası ve iç paneli ..... | 29           |
| Şekil 2.16. Doğal liflerin takviye malzemesi olarak kullanılmasıyla üretilmiş biyokompozit kaput örneği .....                                    | 30           |
| Şekil 2.17. Sürekli elyafli enjeksiyon prosesi .....                                                                                             | 33           |
| Şekil 2.18. Kenevir Bitkisi .....                                                                                                                | 37           |
| Şekil 3.1. Epoksi karışımın hazırlanması .....                                                                                                   | 41           |
| Şekil 3.2. Biyokompozit numunelerin üretim aşamaları .....                                                                                       | 43           |
| Şekil 3.3. Çekme deneyi için hazırlanan numunelerin boyutları (mm).....                                                                          | 44           |

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.4.</b> Çekme deneyi için üretilen numuneler .....                                                       | 44 |
| <b>Şekil 3.5.</b> Çekme testi uygulama aşaması .....                                                               | 45 |
| <b>Şekil 3.6.</b> Üç nokta eğme deneyi için hazırlanan numunelerin boyutları (mm).....                             | 45 |
| <b>Şekil 3.7.</b> Üç nokta eğme deneyi için üretilen numuneler.....                                                | 46 |
| <b>Şekil 3.8.</b> Üç nokta eğme deneyi modeli (ölçüler mm cinsindendir) .....                                      | 47 |
| <b>Şekil 3.9.</b> Üç nokta eğme testi uygulama aşaması .....                                                       | 47 |
| <b>Şekil 3.10.</b> Biyokompozitlerin su tutma deneyi öncesi ve sonrasına ait görseller .....                       | 48 |
| <b>Şekil 3.11.</b> Yanma testi için üretilen numuneler ve UL-94 Yanma testi aşaması.....                           | 49 |
| <b>Şekil 3.12.</b> Termogravimetrik ve Diferansiyel Termal Analiz Cihazı .....                                     | 49 |
| <b>Şekil 3.13.</b> Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-ESEM).....                                        | 50 |
| <b>Şekil 4.1.</b> Katkılanmamış kenevir kumaşa ait TGA/DTA grafiği.....                                            | 51 |
| <b>Şekil 4.2.</b> %10 derişimdeki borik asit çözeltisi ile katkılanmış kenevir kumaşa ait<br>TGA/DTA grafiği ..... | 51 |
| <b>Şekil 4.3.</b> Katkısız kenevir kumaşlara ait SEM görüntüleri.....                                              | 53 |
| <b>Şekil 4.4.</b> %10 borik asit katkılı kenevir kumaşlara ait SEM görüntüleri.....                                | 53 |
| <b>Şekil 4.5.</b> Katkısız kenevir kumaşlara ait EDS sonuçları.....                                                | 54 |
| <b>Şekil 4.6.</b> %10 borik asit katkılı kenevir kumaşlara ait EDS sonuçları.....                                  | 54 |
| <b>Şekil 4.7.</b> Katkısız biyokompozitin su yutumu öncesi SEM görüntüleri .....                                   | 55 |
| <b>Şekil 4.8.</b> Katkısız biyokompozitin su yutumu sonrası SEM görüntüleri.....                                   | 56 |
| <b>Şekil 4.9.</b> Katkılı biyokompozitin su yutumu öncesi SEM görüntüleri .....                                    | 56 |
| <b>Şekil 4.10.</b> Katkılı biyokompozitin su yutumu sonrası SEM görüntüleri .....                                  | 57 |
| <b>Şekil 4.11.</b> Biyokompozit malzemelerin su tutma yüzdeleri.....                                               | 58 |
| <b>Şekil 4.12.</b> Çekme deneyi, yük-deformasyon grafiği.....                                                      | 60 |
| <b>Şekil 4.13.</b> Çekme deneyi, gerilme-gerinim grafiği .....                                                     | 60 |
| <b>Şekil 4.14.</b> Eğme deneyi, yük-deformasyon grafiği.....                                                       | 61 |
| <b>Şekil 4.15.</b> Eğme deneyi, gerilme-gerinim grafiği .....                                                      | 62 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| <b>Kısaltmalar</b> | <b>Açıklamalar</b>                                |
|--------------------|---------------------------------------------------|
| <b>ASTM</b>        | : Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu |
| <b>CCC</b>         | : Karbon - Karbon Kompozitler                     |
| <b>CF</b>          | : Karbon Fiber                                    |
| <b>CFRP</b>        | : Karbon Takviyeli Polimer                        |
| <b>CNT</b>         | : Karbon NanoTüp                                  |
| <b>TGA</b>         | : Termogravimetrik Analiz                         |
| <b>DTA</b>         | : Diferansiyel Termal Analiz                      |
| <b>EDS</b>         | : Enerji Dağılım Spektroskopisi                   |
| <b>FE-ESEM</b>     | : Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu            |
| <b>FTIR</b>        | : Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi     |
| <b>CETP</b>        | : Cam Elyaf Takviyeli Polimer                     |
| <b>GNP</b>         | : Grafen Nano Plakları                            |
| <b>MMK</b>         | : Metal Matrisli Kompozit                         |
| <b>MWCNT</b>       | : Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler                   |
| <b>PA</b>          | : Naylon                                          |
| <b>PEEK</b>        | : Polietereketoketon                              |
| <b>PEI</b>         | : Polietirimid                                    |
| <b>PHA</b>         | : Polihidroksi Asitler                            |
| <b>PHB</b>         | : Polihidroksi Bazlar                             |
| <b>PMK</b>         | : Polimer Matrisli Kompozitler                    |

|            |                                |
|------------|--------------------------------|
| <b>PP</b>  | : Polipropilen                 |
| <b>PPS</b> | : Polifenilen Sülfür           |
| <b>PS</b>  | : Polistiren                   |
| <b>PVC</b> | : Polivinil klorür             |
| <b>SMK</b> | : Seramik Matrisli Kompozitler |



## 1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, endüstriyel ihtiyacın önemli bir kısmını karşılayan ve farklı malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzeme türüdür. Bu malzemeler, takviye ve matris malzemelerinin bir araya getirilmesi ile oluşur. Günümüzde, çeşitli kullanım alanlarına sahip olmaları nedeniyle kompozit malzemeler, endüstride önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle fiber takviyeli kompozitler birçok üstün özelliği ve uygulaması nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Fiberlerin farklı polimerlerle güçlendirilmesinin kompozitlerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde arttırdığı bilinmektedir. Genel olarak uçak ve otomobil endüstrileri, polimerlerde takviye amacıyla cam ve karbon elyaf gibi sentetik elyafları kullanmayı tercih etmektedir. Fakat kullanılan kompozitlerin çoğu petrol bazlı yenilenemeyen kaynaklardan yapılmaktadır. Bu bağlamda küresel ısınma ve yenilenemeyen enerji kaynaklarındaki hızlı düşüş göz önünde bulundurulduğunda sentetik yapay malzemeler yerine ekosistemimizde bulunan doğal lif takviyeli kompozitlerin kullanımı daha da önemli hale gelmektedir. Cam, karbon lifleri ve termoset reçineler ile termoplastikler gibi malzemelerle iyi mekanik özelliklere sahip endüstriyel ürünler yapılması söz konusu olsa bile bu malzemelerin geri dönüşümü çok zor olduğundan ve üretimleri sırasında ciddi boyutlarda çevresel kirliliğe sebep olmasından dolayı doğal lif kullanımı gibi farklı çözümlerin aranmasını zorunlu hale getirmiştir. Ayrıca çevre dostu ve ekonomik olarak sürdürülebilir kompozit malzemelerin tercih edilmesi, endüstride çeşitlenmenin ve gelişmenin temelini oluşturmaktadır. Kompozit üretiminde çevreye verilen zararlı etkilerin azaltılması ve kaynakların verimli kullanımı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sayede, endüstriyel ihtiyaçlar karşılanırken çevresel sürdürülebilirlik de sağlanabilir. Dolayısıyla, kompozit malzemelerin üretiminde doğaya zarar vermeyen ve maliyet açısından avantajlı olan kaynakların kullanılması her zaman öncelikli olarak ele alınmalıdır. Bu yaklaşım, endüstride sürdürülebilirlik ve çeşitliliğin artmasına katkı sağlayacaktır.

Doğal liflerin termoset matris malzemeyle birleştirilmesi sırasında ortaya çıkan karakterizasyon zayıflıkları, kompozitin performansını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Bu zayıflıklar, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinde istenmeyen düşüşlere ve beklenen performans seviyelerine ulaşmada zorluklara neden olabilir. Bu durum, doğal liflerin kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak geniş ölçekte kullanılmasını sınırlayan önemli bir etken olarak öne çıkmaktadır. Bu sebeple, petrol bazlı

yenilenemeyen kaynak bazlı kompozitlerin yerini alabilmesi için çevre dostu biyokompozitlerin daha üstün özelliklerde üretilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, kenevir liflerine borik asit katkılanarak lif özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çevre dostu kompozit malzeme üretmek amacı ile takviye malzemesi olarak borik asit katkılanmış kenevir kumaş ve matris malzemesi olarak ise epoksi kullanılmıştır. Üretilen biyokompozitin karakterizasyonu yapılarak, özellikle otomotiv sektöründe kullanılıp kullanılamayacağını araştırılmıştır.



## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Kompozit malzemeler, en az iki farklı malzemenin karışımı olarak tanımlanır ve bu malzemeler matris fazı içerisinde destek fazının dağıtılmasıyla oluşturulur. Destek fazı, genellikle temel taşıyıcı bileşen olan matris fazı içinde yer alır ve kompozitin mukavemeti, ısı kararlılığı, yapısal özellikleri, elektriksel ve ısı iletim gibi fonksiyonel özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Matris fazı, destek malzemelerini bir arada tutar, yüklere dayanıklılığı sağlar ve takviyeleri kimyasal etkilerden ve istenmeyen hasarlardan korur. Takviye unsurları genellikle lifler, taneler veya tüy benzeri yapılardan oluşurken, matris fazları metal, polimer veya seramik gibi çeşitli malzemelerden olabilir. Bu bileşenler arasındaki uyum ve etkileşim, kompozit malzemenin nihai özelliklerini belirler. Dolayısıyla, malzeme seçimi, tasarım ve üretim süreçlerinde dikkatlice ele alınmalı ve optimize edilmelidir. Bu, kompozit malzemelerin istenen performansı sağlamasını ve belirlenen gereksinimleri karşılamasını sağlar (İbrahim, 2022)

Havacılık ve askeri alanlarda sıkça kullanılan polimerik kompozitler arasında, karbon fiber (CF) takviyeli epoksi reçineli kompozitler öne çıkmaktadır. Bu kompozitler, dayanıklı ve hafif olmalarıyla dikkat çekmektedir. Karbon fiber, güçlü mekanik özelliklerinin yanı sıra yüksek yorulma direnci ve ısı direnci sunar. Polimer matris ile birleştirildiğinde, bu kompozitler düşük büzülme, iyi yapışma, üstün mekanik özellikler ve kimyasal direnç gibi avantajlar sağlamaktadır. Bu özellikler, havacılık ve savunma endüstrilerinde kullanım için idealdir, çünkü bu sektörlerde hafiflik, dayanıklılık ve yüksek performans önemli kriterlerdir (İbrahim, 2022).

Karbon fiberin avantajlarına ek olarak, bazı dezavantajlar da bulunmaktadır. Özellikle, karbon fiberle takviye edilen kompozit laminatlar arasındaki bağlar zayıf olabilmektedir. Bu durum, yüksek çapraz bağ yoğunluğuna sahip epoksi reçinelerinin düşük kırılma tokluğuna yol açabilir. Bu soruna çözüm olarak, karbon nanotüplerin sahip olduğu üstün termal, elektriksel, mekanik ve fonksiyonel özellikler son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Özellikle, çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT), yüksek çekme mukavemetine ve Young modülüne sahip oldukları için polimer takviyeli kompozitler için ideal adaylar olarak kabul edilmektedir. Çok duvarlı karbon nanotüpler, literatürde yapılan çalışmalara göre 11-63 GPa arasında değişen yüksek çekme mukavemetine ve 1 TPa'lık Young

modülüne sahiptirler (Yu vd., 2000; Salvatat vd., 1999). Bu özellikleri, polimer takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırabilirler.

Karbon nano malzemeler, kompozit teknolojisinde önemli bir yere sahiptir. Özellikle grafen nano plakaları (GNP) ve karbon nanotüpler (CNT), uzun performanslı kompozit alanında büyük ilgi görmektedir. Bu nano malzemeler, benzersiz mekanik, termal ve elektriksel özelliklere sahip olduklarından, yeni nesil uzun performanslı kompozitlerde inovasyon için önemli adaylar arasında yer almaktadır. Grafen nano plakaları, tek atom kalınlığında karbon katmanlarından oluşur ve mükemmel mekanik dayanıklılık, yüksek termal iletkenlik ve elektriksel iletkenlik gibi özelliklere sahiptir. Bunlar, kompozit malzemelerin mukavemetini artırmak ve termal ve elektriksel performansını optimize etmek için kullanılabilirler. Karbondan yapılan nanotüpler ise, çok çeşitli yapısal ve mekanik özelliklere sahip silindirik yapılar olarak tanımlanır. Yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, termal iletkenlik ve elektriksel iletkenlik gibi özellikler, kompozit malzemelerde kullanıldıklarında performansı artırabilirler. Bu nano malzemelerin kompozitlerle birleştirilmesi, yeni ve gelişmiş malzeme yapıları ve özellikleri elde etmek için büyük bir potansiyel sunar. Bu da, havacılık, otomotiv, savunma ve diğer endüstrilerde kullanılan malzemelerin daha hafif, daha güçlü ve daha verimli hale gelmesine olanak tanır (Jojibabu vd., 2020; Reddy ve Ramji, 2020).

Büyük ölçekli kompozitlerde, özellikle CNT gibi farklı malzemelerin eklenmesi, tek bir takviye malzemesinin dezavantajlarını ortadan kaldırabilir. Örneğin, karbon elyaf kompozitlere CNT'lerin entegre edilmesi, tabakalar arası mukavemet, tokluk ve çoğalan hasar direnci gibi yapısal iyileştirmelere yol açabilir. Ancak, bu iyileştirmelerin elde edilmesi için karbon nanotüplerin matris fazı içinde homojen bir şekilde dağıtılması ve matris fazı ile CNT'ler arasındaki bağlantının sağlanması önemlidir. Bu, kompozit malzemenin istenilen özellikleri elde etmesini sağlar ve malzemenin performansını artırır. Karışımın homojenliği ve matris fazı ile CNT'ler arasındaki bağlantı, kompozit malzemenin dayanıklılığı, tokluğu ve diğer mekanik özellikleri üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, üretim sürecinde bu faktörlerin dikkatlice yönetilmesi ve optimize edilmesi önemlidir.

Karbon nanotüpler, polimer matrisli kompozit malzemelere genellikle dört farklı şekilde uyum sağlayabilir. En yaygın yöntemde, nanotüpler çeşitli yöntemlerle polimer matris içine dağıtılır ve matris ile lif arayüzey özellikleri geliştirilmeye çalışılır. Bu basit ve büyük ölçekli üretim için uygun bir yöntemdir. Ancak nanotüpleri matris içinde homojen

bir şekilde dağıtmak zorlayıcı bir süreçtir. Düşük miktarda nanotüp takviyesi verimli sonuçlar verirken, yüksek yüzey alanı, ince boy-en oranı ve küçük çap nedeniyle artan nanotüp miktarı, topaklanma eğilimi gösterir, viskoziteyi artırır ve mekanik özelliklerin düşmesine neden olabilir. Bu durum, kompozitte kullanılabilecek karbon nanotüp miktarını sınırlar. Bu sorunu çözmek için, nanotüplere çeşitli kimyasal işlemler uygulayarak yapının fonksiyonelleştirilmesi gibi birçok çalışma yapılmıştır. Ayrıca, bu yöntemin verimi kullanılan kompozit üretim yöntemine bağlı olarak değişebilir.

Polimer kompozitlerde kullanılan matrisler genellikle termoset veya termoplastik özellikte olabilir. Termoset matrisler arasında doymamış polyester reçineler, vinil ester reçineler, epoksi reçineler, bismaleimidler, poliimidler ve fenolik reçineler gibi çeşitli seçenekler bulunmaktadır (Şerçer, 2004). Özellikle epoksi reçineler, askeri ve ticari uçak alanlarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu matrisler, polimer matrisli kompozitlerde yük iletimi ve takviyelerin bağlanması için kullanılır. Isıyla sertleşen termoset polimerler, mükemmel kimyasal ve korozyon direncinin yanı sıra yüksek mukavemet ve termal özellikler gösterirler. Bu nedenle otomotiv, elektronik ve birçok uygulamada kullanılmaktadırlar (Botelho vd., 2006). Ayrıca, havacılık sanayinde yapıştırıcılar ve kompozit matrislerinde kullanılan termoset polimerler, yapısal sağlamlığı artırmak için önemli bir rol oynarlar. Bu polimerler, hafiflikleri ve yüksek performanslı özellikleri sayesinde havacılık uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir (Jin vd., 2015).

Çavdar vd. (2016), doğal liflerin plastik kompozit malzemelerde kullanımının geliştirilebilirliği üzerine kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalar doğrultusunda, doğal liflerin plastik kompozit malzemelerdeki potansiyelini araştırmış ve değerlendirmişlerdir. Yapılan deneyler ve incelemeler, doğal liflerin plastik kompozit malzemelerde kullanılabilirliğini ortaya koymuştur. Bu çalışmalar, doğal liflerin kompozit malzemelerdeki performansını artırmak için gelecekte yapılacak araştırmalar için önemli bir temel oluşturmuştur.

Mishra vd. (2003), kenavir, kenaf, keten, hint kenaviri gibi doğal liflerin termoset veya termoplastik malzemelere eklenerek elde edilen malzemelerin geniş kullanım alanlarına sahip olabileceğini belirtmişlerdir. Yapı sektörü, ulaşım ve paketleme gibi sektörlerde potansiyel uygulamaları bulunan bu malzemeler, çevre dostu ve ekonomik alternatifler sunabilir. Ayrıca, cam elyaf ve doğal liflerin bir arada kullanılmasıyla elde edilen hibrit kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmalar, doğal liflerin kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılmasının, farklı sektörlerde

alternatif ve kullanıma uygun malzeme üretimine katkı sağlayabileceğini göstermiştir. Bu bulgular, kompozit malzemelerin çeşitli uygulamalarda daha sürdürülebilir ve etkili bir seçenek olarak kullanılmasını teşvik etmektedir.

Cha vd. (2017) çalışmalarında, karbon nanotüplerin (CNT'ler) epoksi matrisinde dağılımını geliştirmek ve CNT'ler ile matris arasındaki arayüzey bağını güçlendirmek amacıyla melaminin eklenmesi yoluyla işlevsel hale getirmişlerdir. Çeşitli ağırlık fraksiyonlarındaki fonksiyonel hale getirilmiş CNT/Epoksi ve M-CNT/Epoksi nanokompozitler için çekme testleri ve tek kenar çentik bükme (SENB) testleri gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça %2 işlevsel hale getirilmiş CNT'lerin eklenmesiyle, M-CNT/Epoksi nanokompozitlerinin Young modülünde %64 ve nihai gerilme mukavemetinde %22 artış gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, ağırlıkça %2 M-CNT/Epoksi nanokompozit için kırılma tokluğunda %95 oranında önemli bir artış gözlemlendiği raporlanmıştır. Epoksi matrisindeki CNT'lerin homojenliği analiz edilerek, sonuç modül ve mukavemetin artışıyla ilişkilendirilmiştir.

Truong vd. (2019) çalışmalarında, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerindeki nanomalzemelerin gerilme davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırmada, MWCNT, GNP ve S-MWCNT-COOH olmak üzere üç farklı nanomalzeme türü değerlendirilmiştir. CFRP kompozitlerinin çekme mukavemeti, nihai mukavemeti ve tokluğunda önemli iyileşmeler olduğu ifade edilmiştir. Kullanılan nanomalzemeler arasında, S-MWCNT-COOH'un CFRP kompozitlerinin çekme mukavemetini %20,7, nihai mukavemetini %45,7 ve tokluğunu %73,8 artırarak en etkili nanomalzeme olduğu belirlenmiştir.

Mutje vd. (2007), kenevir liflerinin çekme dayanımlarını cam elyafların seviyesine getirebilmek amacıyla, kenevir liflerini termoset matris malzemeler içinde dolgu malzemesi olarak kullanmanın geliştirilmesi ve mobilya imalat sektöründe alternatif malzemeler üretme potansiyelini araştırmışlardır. Bu çalışmada, kenevir liflerinin mobilya sektöründe alternatif olarak kullanılmasının mümkün olduğunu göstermeyi amaçlamışlardır. Araştırmada, uzun boylu kenevir lifleri takviye elemanı olarak kullanılmış ve epoksi reçine matris malzeme olarak tercih edilerek doğal lif takviyeli kompozit malzeme geliştirilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, kenevir liflerinin mobilya üretim sektöründe avantajlı ve alternatif malzemelerin üretimine olanak sağlayabileceği gösterilmiştir.

Kaya vd. (2020) tarafından kenendir lifleriyle takviyeli kompozit malzemelerin üretilmesi üzerine yapılan çalışmada, kenendir liflerinin farklı işlemlere tabi tutulmasıyla elde edilen kompozit malzemelerin özellikleri incelenmiştir. Araştırmanın sonuçlarına göre, alkali işlem görmüş kenendir lifleri ile üretilen kompozit malzemelerin, işlenmemiş kenendir lifleri ile üretilen malzemelere kıyasla daha iyi eğme performansı sergilediği ifade edilmiştir. Alkali işlemin, kenendir liflerinin kompozit malzemenin özelliklerine olumlu etkiler sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, kompozit malzemenin üretim aşamalarında epoksi reçinelerin matris malzeme olarak kullanılmasının dayanım açısından olumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Muneer (2012) tarafından, kenendir lifleri ile takviye edilmiş kompozit malzemelerin performansını değerlendirmek amacıyla yapılan çalışma kapsamında, farklı işlemlere tabi tutulan kenendir lifleri ile üretilen kompozit malzemelerin özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, alkali işlem görmüş kenendir lifleri ile üretilen kompozitlerin, işlenmemiş liflerle üretilenlere göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, epoksi reçinelerin matris malzeme olarak kullanılmasının dayanım açısından olumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bu çalışma ile, kenendir liflerinin kompozit malzemelerde kullanım potansiyeli ortaya konulmuştur.

Bhoopathi vd. (2014) çalışmalarında, alternatif kompozit malzeme üretimi amacıyla matris malzeme olarak epoksi reçineyi, takviye elemanları olarak ise kenendir lifi ve cam elyafını kullanmışlardır. Çalışmada, numune üretimi için el ile yatırma yöntemi kullanılmış olup, epoksi reçine ile kenendir lifleri 5 kat olacak şekilde üretilerek kompozit numuneler üretilmiştir. Üretilen kompozit numuneler form kazandıktan sonra eğilme, çekme ve darbe testlerine tabi tutulmuştur. Darbe testi sonuçları, numunelerin darbeye karşı dayanıklılığını yansıtan değerleri içermekte olup, bu değerler 4,99 J ile 5,83 J arasında değişkenlik göstermiştir. Üç nokta eğme testi sonuçlarına göre ise 38,47 MPa ile en yüksek gerilme değerine ulaşıldığı belirtilmiştir.

Seki vd. (2017) çalışmalarında, kompozit malzeme üretiminde takviye malzemesi olarak kullanılmak üzere doğal liflere uygulanan alkali işlemin liflerin modifikasyonu sonrasında meydana gelen morfolojik ve kimyasal değişiklikleri incelemişlerdir. Çalışmada yaygın olarak kullanılan bitkisel liflerden muz, Hindistan cevizi, kenendir, sisal, jüt ve keten liflerine alkali işlem uygulanarak lif özelliklerindeki değişim ayrıntılı olarak karakterize edilmiştir.

Corbin vd. (2020), kenendir liflerinin kompozit malzeme üretiminde kullanılması amacı ile, farklı örme şekilleri ve dokuma yöntemlerinin kompozit üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla kompozit malzeme üretimindeki lif dizilimi, lamine katman sayısı ve lif açılarının malzeme performansına olan etkilerini detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Araştırma sonuçları, farklı örme şekilleri ve dokuma yöntemlerinin malzeme özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur.

Karaçor ve Özcanlı (2021), farklı matris malzemeleri kullanarak bazalt, jüt ve cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemiyle altı farklı hibrit kompozit laminat üretmişlerdir. Çalışmada, epoksi ve vinilester matris malzeme olarak tercih edilmiştir. Hibrit numunelerin mekanik özellikleri gerilme ve Vickers sertlik testleriyle belirlenirken, laminatların morfolojisi SEM analizi ile incelenmiştir. Sonuçlar, epoksi ile takviye edilmiş bazalt elyafı/cam elyafı (100 g/m<sup>2</sup>) kompozitlerin diğer tüm numuneler arasında en yüksek gerilme dayanımına sahip olduğunu, jüt/bazalt elyafı ile epoksi ile takviye edilmiş kompozitlerin ise en düşük değere sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, epoksi ile takviye edilmiş bazalt/cam elyafı (100 g/m<sup>2</sup>) kompozitlerin Vickers sertlik değerinin, vinilester ile takviye edilmiş bazalt/cam elyafı (100 g/m<sup>2</sup>) kompozitlerin 1,39 katı daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, epoksi ile üretilen tüm kompozit örneklerinin Vickers sertlik değerinin, vinilester ile üretilen örneklerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. SEM analiz sonuçları, epoksi reçinesi ile üretilen hibrit kompozitlerde daha az boşluk ve daha fazla lif kırılması olduğunu göstermiştir. Tüm test sonuçlarına göre, epoksi matris ile takviye edilmiş hibrit kompozitlerin vinilester matris ile takviye edilmiş hibrit kompozitlere göre üstün performans gösterdiği belirlenmiştir.

## **2.1. Kuramsal Bilgiler**

İleri teknoloji ürünü kompozitler, malzeme ve mühendislik çalışmaları sonucunda gelişim göstermiş olsa da, kompozit malzemelerin kullanımına çok eski dönemlerde rastlanılmaktadır. Özellikle killi toprak ve bitkisel/hayvansal liflerin biraraya getirilmesiyle hazırlanan harç ile oluşturulan kerpiç, ilk kompozit malzemelerden biri olarak kabul edilmektedir. Kerpiçte olduğu gibi insanoğlunun çevresindeki farklı malzemeleri üstün özellikleri nedeniyle birarada kullanması şeklinde geliştirdiği çözümler kompozit malzemelerin gelişim sürecine önemli katkılar sağlamıştır. Alçı ve kireç gibi doğal bağlayıcıların toprak ve/veya kum/çakıl gibi bileşenler ve su ile karıştırılmasıyla elde

edilen harçlar, benzer şekilde çimento ve agrega kullanarak oluşturulan betonlar kompozit malzemelerin kullanımına örnek olarak verilebilir. Kum/çakıl gibi grünlü haldeki malzemelerin çimento hamuru ile biraraya getirilmesi neticesinde elde edilen beton, basınç dayanımı yüksek bir kompozit malzeme olarak inşaat mühendisliği ve mimari uygulamalar için önemli gelişmelere olanak sağlamıştır. Benzer şekilde betonun içerisine eklenen çelik çubuklar ile ortaya çıkan bir kompozit malzeme olarak betonarmenin icadı ile de sınırların daha fazla geliştirilmesi mümkün olmuştur. Çekme dayanımı zayıf olan betonun içerisine yerleştirilen çelik çubuklar ile çekme, kesme, kayma gibi gerilmelerin karşılanması neticesinde çekme ve basınç mukavemeti yüksek bir mühendislik malzemesi olan betonarme icad edilmiştir. Özellikle dayanım, hafiflik, ekonomiklik, dayanıklılık, kolay işlenebilirlik, estetiklik gibi arayışlar neticesinde geliştirilen kompozit malzemeler günümüz mühendislik uygulamalarında çok geniş kullanım alanı bulmaktadır. Teknolojik gelişmelere bağlı olarak farklı üretim yöntemleri ve farklı bileşenlerin kullanımıyla yeni kompozitlerin geliştirilmesi kaynakların daha verimli kullanımına ve etkili çözümlerin geliştirilmesine imkân sağlamaktadır.

### **2.1.1. Kompozit Malzemeler**

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla malzemenin birleşimi ile oluşturulan yapıları ifade eder. Bu tür malzemeler, genellikle farklı özelliklerin bir araya getirilmesi amacıyla çeşitlendirilebilir ve geniş bir yelpazede mühendislik uygulamalarında kullanılırlar. Ancak, kullanım alanlarının farklı gereksinimlerini karşılaması nedeniyle, kompozit malzemelerde birden fazla özelliğin bir arada bulunması gerekmektedir. Bu bağlamda, tek başına istenilen özellikleri sağlayamayan polimerler, farklı özelliklere sahip liflerle karıştırılarak malzemenin belirli özelliklere adapte olması hedeflenmiştir. Kompozit malzemelerin üretimi hızla yaygınlaşmıştır. Bu malzemeler, tamamen farklı özelliklere sahip malzemelerin bir araya gelmesiyle oluşurlar ve temel olarak matris malzeme ile takviye malzemesi olarak adlandırılan iki ana bileşenin birleşiminden meydana gelirler. Kompozit malzemelerin avantajları arasında hafiflik, ısı ve elektrik iletim yetenekleri ile ekonomiklik bulunur. Bu nedenle, kompozit malzemelerin takviye elemanları ve matris malzemelerinin seçiminde belirli özellikler dikkate alınır. Takviye elemanının seçimi, malzemenin hafifliği, ısı iletimi, elektrik iletkenliği gibi özelliklerini etkilerken, matris malzemesi ise yapıya katılan liflerin korozyon direnci, darbeye dayanıklılık ve yük taşıma kapasitesi gibi özelliklerini değerlendirmek amacıyla seçilir (Kaya, 2016).

Kompozit malzemeler, farklı bileşenlerin birleşimiyle oluşturulan ve geniş kullanım alanlarına sahip olan malzemelerdir. Otomotiv sektöründen havacılık endüstrisine, savunma sanayisinden inşaat sektörüne, sağlık sektöründen rüzgâr türbinlerine kadar birçok alanda kullanılmaktadırlar. Bu malzemelerin çeşitlendirilebilir yapısı, çeşitli endüstrilerde farklı ihtiyaçları karşılamak için ideal bir seçenek sunar.

Otomotiv ve havacılık sektörlerinde kullanılan kompozit malzemeler genellikle karbon elyaf, aramid ve cam elyaf gibi sentetik liflerle üretilmektedir. Ancak son yıllarda, çevre dostu ve sürdürülebilir alternatiflere olan talep artmıştır. Bu nedenle, doğal liflerle takviyeli kompozit malzemelere olan ilgi de artmıştır. Doğal lifler, bitkilerden, hayvanlardan veya minerallerden elde edilen liflerdir. Bu liflerin kullanılması, kompozit malzemelerin çevre dostu ve yenilenebilir kaynaklardan üretilmesini sağlayabilir. Araştırma alanı, kompozit malzemelerin doğal liflerle güçlendirilmesi ve farklı endüstrilerde kullanılabilirliği üzerine odaklanmaktadır. Bu yaklaşım, hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilirlik sağlayabilir.

### 2.1.2. Kompozit Malzemelerin Üstün ve Zayıf Yönleri

Özellikle farklı malzemelerin üstün yönlerinden yararlanılması ile istenilen nitelikte malzeme geliştirilmesi amacıyla üretilen kompozit malzemeler genel olarak üstün özelliklere sahiptir. Bununla birlikte maliyet, üretim süreci, işlenebilirlik, geri dönüşüm gibi yönlerden değerlendirildiğinde zayıf yönleri bulunmaktadır (Tablo 2.1.) (Kaynak: Sert, 2024; Yorgun, 2024).

**Tablo 2.1.** Kompozit malzemelerin üstün ve zayıf yönleri (Kaynak: Sert, 2024; Yorgun, 2024)

| Üstün Yönleri                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Zayıf Yönleri                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Kırılma tokluğu yüksektir</li><li>▪ Elastisite modülü yüksektir</li><li>▪ Tasarıma uygunluk özelliği iyidir</li><li>▪ Elastisite modülü/yoğunluk oranı yüksektir</li><li>▪ Mukavemet/yoğunluk oranı yüksektir</li><li>▪ Yüksek darbe dayanımına sahiptir</li><li>▪ Yüksek ısı ve elektriksel iletkenlik özelliği vardır</li><li>▪ Değişken sıcaklıklara karşı düşük hassasiyet gösterir</li><li>▪ Tekrar üretilebilir özelliktedir</li><li>▪ Yoğunlukları düşüktür</li><li>▪ Yüzeyde oluşan çatlaklara karşı hassasiyeti düşüktür</li><li>▪ Yüksek sıcaklıktaki özellikleri iyidir</li><li>▪ Korozyon ve aşınma direnci yüksektir</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Kompozitlerin yüksek üretim maliyeti vardır</li><li>▪ Kompozitlerin bakım ve onarım işlemi, metallere göre daha karmaşıktır</li><li>▪ Mekanik karakterizasyonu metal yapılara göre daha kompleksdir.</li><li>▪ Metallere yapışmazlar. Fırınlamadan (pişirmeden) kullanılamazlar</li><li>▪ Üretimi pahalıdır.</li><li>▪ Kesme, eğilme, çekme ve basmaya ait mukavemet sonuçları benzer kompozit malzemelerde farklılık gösterir</li><li>▪ Kesme işlemi veya malzemede delik delme gibi yapılan işlemler kompozitin yapısındaki takviye malzemesinde açılmaya sebep olmaktadır</li><li>▪ Hava zerrecikleri ve nem, kompozitlerin yorulma ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkiler.</li></ul> |

**Teknoloji ve Performans Odaklı Seçim:** Kompozit malzemeler, genellikle yenilikçi teknolojilere dayanan ürünlerdir ve yüksek performans sağlar. Bu nedenle, istenilen teknik gereksinimleri karşılamak için tercih edilebilir nitelikte malzemeler geliştirilebilir.

**Özelleştirilmiş Çözümler:** Kompozit malzemeler, tasarım esnekliği sayesinde özelleştirilmiş çözümler sunabilir. Bu durum, belirli projelerde özel ihtiyaçları karşılamak için ideal çözümler sağlayabilir.

**Hafiflik ve Dayanıklılık:** Özellikle taşıma ve montaj kolaylığı sağlamak için hafif ancak dayanıklı malzemelere ihtiyaç duyulan durumlarda kompozitler tercih edilebilir.

**Uzun Ömürlü ve Bakım Gerektirmeyen Yapılar:** Kompozit malzemeler genellikle korozyona karşı dirençlidirler ve uzun ömürlü yapılar için uygun seçenekler sunar. Bu özellikleri, bakım maliyetlerini azaltabilir ve operasyonel verimliliği artırabilir.

**Maliyet Etkinliği:** Üretim teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte, kompozit malzemelerin maliyetleri düşmekte ve rekabetçi fiyatlarla temin edilebilmektedir.

### 2.1.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Malzemeler genel olarak seramik, metal ve organik malzemeler olmak üzere üç ana kategoriye ayrılabilir. Bu malzemelerin her biri farklı özelliklere sahiptir ve belirli kullanım alanlarına yöneliktir. Ancak bu malzemelerin kendi içlerinde eksik yönleri bulunabilir. Bu nedenle, avantajlı özellikleri bir araya getirerek oluşturulan kompozit malzemeler, sıklıkla bu üç ana malzeme kategorisinin kombinasyonları ile oluşturulur.

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması, genellikle matris malzemesi ve takviye malzemelerine göre yapılmaktadır. Matris malzemesi, kompozitin yapısını bir arada tutan ve takviye malzemelerini çevreleyen bileşendir. Takviye malzemeleri ise kompozitin dayanımını artıran, genellikle lif veya tanecik şeklinde olan malzemelerdir. Bu şekilde yapılan sınıflandırma, kompozit malzemelerin özelliklerini ve kullanım alanlarını daha iyi anlamamıza yardımcı olur.

#### 2.1.3.1. Matris Malzemesine Göre Sınıflandırma

Kompozit malzemeler, geniş kullanım alanları ve hedeflerine göre çeşitli kategorilere ayrılmaktadır. Bu kategoriler, genellikle metal matrisli kompozitler, seramik matrisli

kompozitler, polimer matrisli kompozitler, karbonkarbon kompozitler ve nano-kompozitler olarak sınıflandırılır (Sarıkaya, 2019). Bu sınıflandırma, kompozit malzemelerin özellikleri, bileşenleri ve kullanım amaçlarına dikkat çekmektedir. Metal matrisli kompozitler genellikle yüksek mukavemet ve sertlik gerektiren uygulamalarda kullanılırken, seramik matrisli kompozitler yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren alanlarda tercih edilir. Polimer matrisli kompozitler ise hafiflik ve esneklik gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Karbonkarbon kompozitler ise yüksek sıcaklık dayanımı ve hafiflik kombinasyonu ile öne çıkar ve genellikle uzay endüstrisi ve havacılıkta kullanılır. Son olarak, nano-kompozitler nanoteknoloji ve malzeme bilimi alanındaki gelişmelerle birlikte ortaya çıkan özel bir kategoriye temsil eder ve nanoteknolojinin avantajlarından faydalanarak üstün özelliklere sahip malzemelerin üretimine imkân tanır.

#### **2.1.3.1.1. Polimer Matrisli Kompozitler**

Polimer matrisli kompozitler (PMK'ler), polimerlerin daha kompleks bir yapıya sahip olduğu ve uzun vadeli kullanımlar için uygun bir seçenek olduğu malzemelerdir. Bu kompozitler, kolay şekillendirilebilirler ve darbeyi iyi bir şekilde absorbe edebilme özelliğine sahiptir. Ayrıca, korozyona karşı dayanıklıdır ve aşınmalara karşı direnç gösterirler. Ancak, yüksek maliyet, geri dönüşüm zorlukları ve endüstrinin bu malzemeye henüz yabancı olması gibi faktörler, PMK'lerin kullanım alanlarını sınırlamaktadır (Gülmez, 2018).

Kompozit malzeme pazarının %90'ını polimer matrisli kompozitler oluşturmaktadır. Polimer matrisli kompozit pazarının ise %85'ini camelyaf takviyeli polyester (CTP) kompozitler oluşturmaktadır. Bunun dışında partikül ve tabakalı kompozitler bu alanda yaygın olan diğer polimer matrisli kompozitler grubunu oluşturmaktadır.

Polimer matrisli kompozitler (PMK'ler), farklı yapılarına bağlı olarak iki ana gruba ayrılır: sürekli elyaf takviyeli kompozitler ve parçacık dolgulu kompozitler. Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde, polimer matrisler genellikle termoplastik veya termoset olarak sınıflandırılır ve karbon fiber, cam fiber, bor fiber ve kevlar gibi elyaflar bu matrislerle birleştirilir. Bu kompozitler, farklı endüstriyel ihtiyaçlara uygun olarak çeşitli performans özellikleri sunarlar. Parçacık dolgulu kompozitler ise matris içinde dağıtılmış parçacıkların oluşturduğu bir yapıya sahiptir. Bu parçacıkların sertliği, genellikle kompozitin mekanik özelliklerini belirler. Örneğin, plastik matris içindeki metal parçacıklardan oluşan

kompozit malzemeler, endüstride sıklıkla kullanılan bir türdür (Gülmez, 2018; Kaya, 2016; Subaşı vd., 2017).

Termoplastik matrisler, termoset matrislere kıyasla farklı bir yapıya sahiptir. Termoplastikler, başlangıçta katı bir formda bulunurlar ve ısı veya basınç altında eriyerek sıvı hale geçerler. Ardından, istenilen şekli almak için şekillendirilebilirler ve soğutulduğunda yeniden katılaşırlar. Bu özellikleri nedeniyle termoplastikler, yeniden şekillendirilebilir ve geri dönüştürülebilir malzemeler olarak bilinirler. Ancak, termoplastik matrislerin üretim maliyeti genellikle yüksektir ve üretim süreci karmaşıktır, bu da tercih edilmelerini kısıtlayan faktörlerden biridir. Bu nedenle, termoplastik matrislerin kullanımı termoset matrislere göre daha az yaygındır. (Subaşı vd., 2017).

Polimer matrisli kompozitler (PMK), ihtiyaç duyulan özelliklere ve uygulamalara göre seçilen bir takviye maddesi ile birlikte polimer reçinelerinden (termosetler, termoplastikler veya elastomerler) oluşturulur. Polimer matrisli kompozitler, en popüler kompozit türlerinden biri olup, çeşitli kompozit uygulamalarında büyük miktarlarda kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozitler genellikle düşük maliyetleri ve kolay üretim yöntemleri nedeniyle tercih edilir. Polyesterler ve vinil esterler ucuz ve genellikle cam elyaf takviyeli polimer kompozitler (CETP) için tercih edilen en yaygın polimer reçinelerdir; buna karşın, epoksi reçineler daha pahalıdır ve genellikle havacılık uygulamalarında polimer matrisli kompozitler için yaygın olarak kullanılır. Epoksiler, poliesterler ve vinil esterlere kıyasla daha iyi mekanik özellikler sağlamanın yanı sıra nem direnci de sağlarlar. Diğer yandan, polieterimid (PEI), polifenilen sülfür (PPS) ve polietereketoketon (PEEK) gibi termoplastik reçineler, gelecekte havacılık uygulamalarında kullanılmak üzere umut vadeden malzemelerdir (Callister, 2007).

#### **2.1.3.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler**

Seramik matrisli kompozitler (SMK'ler), yüksek oksidasyon dirençleri nedeniyle özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilen bir kompozit malzeme türüdür (Groover, 2016). Bu malzemelerin düşük yoğunluğa sahip olması avantaj sağlarken, düşük kırılma dirençleri önemli bir dezavantaj olarak karşımıza çıkar. Yüksek sertlikleri ve yüksek erime sıcaklıkları nedeniyle şekillendirmeleri zor olabilir. SMK'lerde yaygın olarak  $Al_2O_3$ ,  $Si_3N_4$  ve SiC gibi malzemeler takviye elemanları olarak kullanılır. Ancak, seramiklerin çatlak oluşumuna karşı hassas yapısı göz önüne alındığında, bu malzemelerin kullanımı belirli

riskleri beraberinde getirebilir. SMK'ler genellikle yüksek sıcaklık koşullarında kullanılması gereken parçalar için tercih edilirken, düşük tokluk ve süneklikleri ile ani ısı değişikliklerine karşı dayanıksız olmaları dezavantajları arasındadır (Seydibeyoğlu, 2012).

#### **2.1.3.1.3. Metal Matrisli Kompozitler**

Metal matrisli kompozit malzemeler (MMK'ler), genellikle karbürler ve metal-seramik karışımları gibi yüksek sertlik değerlerine sahip elyaflarla takviye edilmiş magnezyum veya alüminyum gibi metaller içeren yapılar olarak tanımlanır. (Groover, 2016). Genel olarak MMK'ler, temel bileşenleri metal alaşımı ve çeşitli metal türleri olan yapılar olarak tanımlanabilir. MMK'lerin takviye fazı farklı şekillerde bulunabilir. Bununla birlikte, metal matrisli kompozitler, takviye elemanlarına kıyasla üstün özelliklere sahip olan metal malzemelerdir. MMK'lerin üretimine, boron ve silikon karbür fiberlerin imalatıyla başlanmıştır. MMK'lerin avantajları arasında yüksek sıcaklık dayanımı, düşük nem emme kapasitesi, iyi elektrik ve ısı iletkenlik, yüksek rijitlik, yüksek tokluk ve dayanıklılık bulunmaktadır. Bu avantajlar, uzun süreli yorulma ve ağır kullanım koşullarında özellikle polimer matrisli kompozitlere göre MMK'leri tercih edilebilir kılmaktadır (Kalemtaş, 2015; Song, 2016). MMK'ler, otomotiv, savunma sanayii, havacılık, denizcilik gibi geniş bir kullanım yelpazesinde yer bulmuşlardır. Ancak yüksek maliyetleri ve ağır malzeme olmaları, alternatif arayışlarını gerektirmiştir. Özellikle alüminyum ile takviyelendirilmiş kompozit malzemeler, otomotiv, havacılık ve denizcilik gibi çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır (Güler, 2012).

#### **2.1.3.2. Takviye Malzemesine Göre Sınıflandırma**

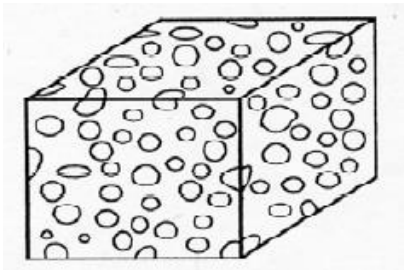
Takviye elemanları, kompozit malzemelerin kullanım alanlarındaki ihtiyaçlara yönelik olarak matris malzemesinin özelliklerini geliştirmek ve iyileştirmek için kullanılır. Bu malzemelerin aranan özellikleri arasında hafiflik, ekonomiklik, çevre dostu olma, yüksek dayanım ve yorulma direnci gibi kriterler bulunur. Bu özellikleri elde etmek için sadece matris malzemesi yeterli olmayabilir. Doğru bir şekilde takviye malzemesinin seçilmesi ve uygun üretim yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle, matris malzemesi ile birlikte uygun takviye malzemesinin kullanılması ve uygun üretim süreçlerinin uygulanması son derece önemlidir.

### 2.1.3.2.1. Parçacık (Partikül) Takviyeli Kompozitler

Endüstride, parçacık takviyeli kompozit malzemeler, matris malzemeden farklı kimyasal özelliklere ve daha sert bir yapıya sahip olan takviye fazının fiziksel yollarla bir araya gelmesi ile oluşurlar. Bu tür kompozit malzemelerde, partikül takviye elemanları matris malzeme içinde bulunur. Partikül takviyeli kompozitler, elyaf takviyeli kompozitlere kıyasla daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu durumun temel nedeni, partikül takviyeli kompozit malzemelerin üretiminin ekonomik, hızlı ve kolay olmasıdır. Bu tür kompozit yapılara "partikül takviyeli kompozit" adı verilir. Partikül takviyeli kompozitlerin önemli bir avantajı, yüksek aşınma dayanımı sergileyebilmeleridir. Bu yüksek dayanımın temelinde, takviye elemanı olarak kullanılan partiküllerin matris malzemesinden daha sert olmaları yatmaktadır. Bu özellikleri sayesinde, partikül takviyeli kompozitler genellikle aşınmaya maruz kalan endüstriyel uygulamalarda tercih edilirler.

Partikül takviyeli kompozitlerde genellikle seramik esaslı malzemeler, örneğin  $Al_2O_3$ ,  $TiB_2$  ve SiC gibi bileşenler, takviye elemanı olarak kullanılır. Bu kompozitlerde sert bir yapı elde etmek istendiğinde, partiküllerin hacimsel olarak viskoziteyi artırması yeterli olabilir. Partikül takviyeli kompozit malzemelerde ürünün çalışma performansını etkileyen faktörler arasında partiküller arası boşluklar, partikül çapı, matris malzeme içinde partikül hacimsel oranları, partiküllerin homojen dağılımı gibi unsurlar yer alır. Bu faktörlerin optimize edilmesi, istenilen mekanik özelliklerin elde edilmesi için önemlidir ve kompozitin son performansını belirler. Bu nedenle, partikül takviyeli kompozitlerin tasarımı ve üretimi sürecinde bu faktörlerin dikkatle ele alınması gerekmektedir.

Bu tür kompozit malzemelerin avantajları ve ekonomik üretim süreçleri nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir (Ahlatcı, 2003; Aydın vd., 2015).

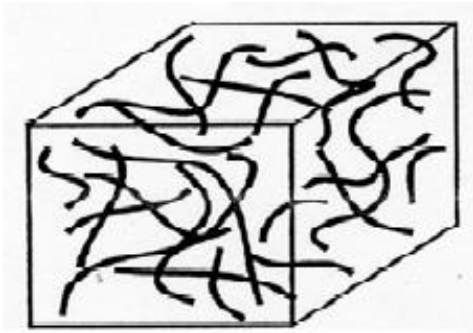


Şekil 2.1. Partikül takviyeli kompozitlere ilişkin şematik gösterim (Kaynak: Atasayar, 2023)

#### 2.1.3.2.2. Fiber (lif) takviyeli kompozitler

Bu, en yaygın olarak bilinen, üretilen ve kullanılan kompozit malzeme sistemi türüdür. Sistem, yüksek mukavemet ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklere sahip lifli malzemelerin metal, polimer veya seramik gibi bir matrisle çevrelenmesiyle bir araya getirilir. Bir kompozitin elde edilen mukavemeti ve sertliği, yalnızca kurucu malzemelerin bireysel özelliklerine değil, aynı zamanda lifli fazın uzunluk-çap oranı olarak bilinen boyutsuz bir miktara da bağlıdır (Fu ve Lauke, 1996).

Fiberler, istenen koşulları sağladıkları ve matris bileşenine mukavemet aktardıkları için önemli bir takviye sınıfıdır. Cam elyafları, bilinen en eski takviye lifleridir ve malzemeleri güçlendirmek için yaygın olarak kullanılmışlardır. Daha sonra karbon, seramik ve metal lifler bulunmuş ve kompozitlerin ısıya daha dayanıklı hale getirilmesi için sıklıkla kullanılmıştır. Fiberler, çeşitli faktörlerden dolayı ideal performanstan uzaklaşabilirler. Bir fiber kompozitin performansı, uzunluğu, şekli, yönelimi, bileşimi ve matrisin mekanik özellikleri gibi faktörlere bağlıdır. Elyafın matris içindeki yönlendirilmesi, kompozitin mukavemetinin bir göstergesidir ve en büyük mukavemet, elyafın uzunlamasına yönü boyunca meydana gelir. Ancak, yük, bu yöne dik olarak uygulandığında, boyuna liflerden optimum performans elde edilebilir. En ufak bir kayma bile, kompozitin mukavemetini büyük ölçüde azaltabilir. Fiberlerin en boy oranı yüksektir, yani uzunlukları etkin çaplarından birkaç kat daha uzundur. Bu nedenle, filamentlerin sürekli süreç kullanılarak üretilmesi yaygındır. Düz-ince filamentlerin popülerleşmesinin ardından, liflerin dikdörtgen kesitleri, yüksek mukavemetli yapılar için yeni seçenekler sunmuştur.



Şekil 2.2. Fiber takviyeli kompozitlere ilişkin şematik gösterim (Kaynak: Malzeme Bilimi, 2019)

Kompozit malzemenin yapısındaki lifler süreksiz veya sürekli olmak üzere farklı şekillerde olabilir. Takviye lifleri; dokuma kumaş, uzun liflerden veya kısa kesilmiş liflerden gibi değişik biçimlerde olabilir. Takviye olarak kullanılan elyaf malzemesi; oluşacak olan yeni

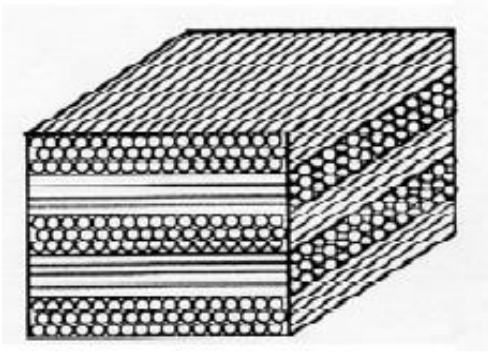
malzemenin yalnızca mukavemetinde değil, çalışma sıcaklığı, rijitlik gibi özelliklerinde de iyileşme olmasını sağlar. Elyafların matris içindeki yönelmesi yeni kompozit malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkiler.

#### **2.1.3.2.3. Tabakalı kompozitler**

Çeşitli özelliklere sahip tabakaların yan yana veya üst üste birleştirilmesi ile oluşturulan malzeme tabakalı kompozit malzeme olarak adlandırılmaktadır. Tabakalar farklı malzemelerden veya değişik şekil ve türde takviye elemanı içeren kompozit malzemelerden oluşturulabilir. Tasarım kullanım yeri ve amacına göre yapılmaktadır. Tabakalı kompozit malzemeler, her tabakası farklı fiber takviye açılarına sahip olan tabakaların bir araya getirilmesi ile de üretilbildiği için mekanik özellikleri de fiber takviye açısına göre farklılık göstermektedir. Bu farklılık malzemenin yükleme tipine daha uygun bir fiber dizilimi sağlanmasına olanak sunmaktadır. Tabakalı kompozit malzemeler, en eski ve en yaygın olarak kullanılan kompozit türlerinden birini oluşturur. Bu kompozitlerde elyaflar farklı yönlendirmelerle üretilen tabakaların farklı eksenlerde üst üste konulmasıyla oluşturulur. Bu yapı, uzun süre önceye dayanan bir kullanım geçmişine sahiptir ve mühendislik uygulamalarında sıkça kullanılır.

Tabakalı kompozit malzemelerin öne çıkan özellikleri arasında metal malzemelere kıyasla hafif olmaları ve yüksek mukavemet değerleri göstermeleri bulunmaktadır. Aynı zamanda bu kompozit yapılar, neme ve ısıya karşı dayanıklılık gösterirler. Üretim süreçleri kolay ve maliyetleri düşüktür. Darbelere karşı dirençli olmaları ve yük taşıyabilme kapasiteleri de bu kompozitlerin tercih edilme sebeplerindendir. Tabakalı kompozitler, çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta olup, bu özellikleri sayesinde birçok alanda avantaj sağlamaktadır.

Tabakalı kompozit malzemeler, çeşitli mühendislik alanlarında kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu kompozitlerin yaygın kullanımı, özellikle hafiflik, mukavemet, dayanıklılık gibi avantajlarından kaynaklanmaktadır. Bu özellikler sayesinde uygulama alanları genişler ve yapısal bileşenlerden spor malzemelerine kadar farklı alanlarda kullanılabilir (Eskizeybek, 2006; İmak, 2015).



Şekil 2.3. Tabakalı kompozitlere ilişkin şematik gösterim (Kaynak: Eskizeybek, 2006)

#### 2.1.3.2.4. Hibrit Kompozitler

Hibrit kompozitler, tek bir matris içinde iki veya daha fazla farklı tür lifin kombinasyonu olarak tanımlanabilir. Hibrit kompozitler, interply ve intraply olarak kategorize edilir. Interply hibritler, her katmanda bir tür lif içerirken, intraply hibritler en az iki tür lif içerir (Sezgin, 2018).

Hibrit kompozitler genellikle belirli gereksinimler için tasarlanmıştır. Hibrit kompozitlerin özellikleri, hibrit konfigürasyonun tasarımını değiştirerek değiştirilebilir ve geliştirilebilir. İki veya daha fazla farklı lif, her iki lifin özelliklerinden de faydalanmak amacıyla bir araya getirilir. Böylelikle, geliştirilmiş ek özelliklere sahip yeni malzemeler üretilebilir (Agarwal vd., 2014). Hibrit kompozitlerin dayanıklılığı, çeşitli faktörlere bağlıdır, bunlar lif özelliği, lif uzunluğu, lif içeriğinin en-boy oranı, lif yönelimi, lif-matris arayüzünün bağlanması gibi faktörlerdir (Jawaid ve Abdul Khalil, 2011).

Hibrit kompozit malzemelerin kullanım alanları, takviye malzemelerinin seçimini etkileyen faktörlere bağlı olarak çeşitlilik gösterir. Bu faktörler arasında maliyet, elastisite modülü, yoğunluk, malzemelerin kimyasal kararlılığı ve darbe dayanımı gibi özellikler yer alır. Hibrit kompozitler, farklı mühendislik uygulamalarında tercih edilen malzeme seçenekleri arasında yer alır ve özellikle özgün gereksinimlere sahip olan alanlarda avantaj sağlar. Hibrit kompozitler, çeşitli endüstriyel sektörlerde kullanılan ve özel performans özellikleri gerektiren uygulamalarda tercih edilen bir malzeme çeşididir. Bu özellikleri, farklı gereksinimlere uyum sağlama yeteneğiyle birleşerek, geniş bir kullanım alanı sunarlar (Kaya, 2016; Ahlatcı, 2003).

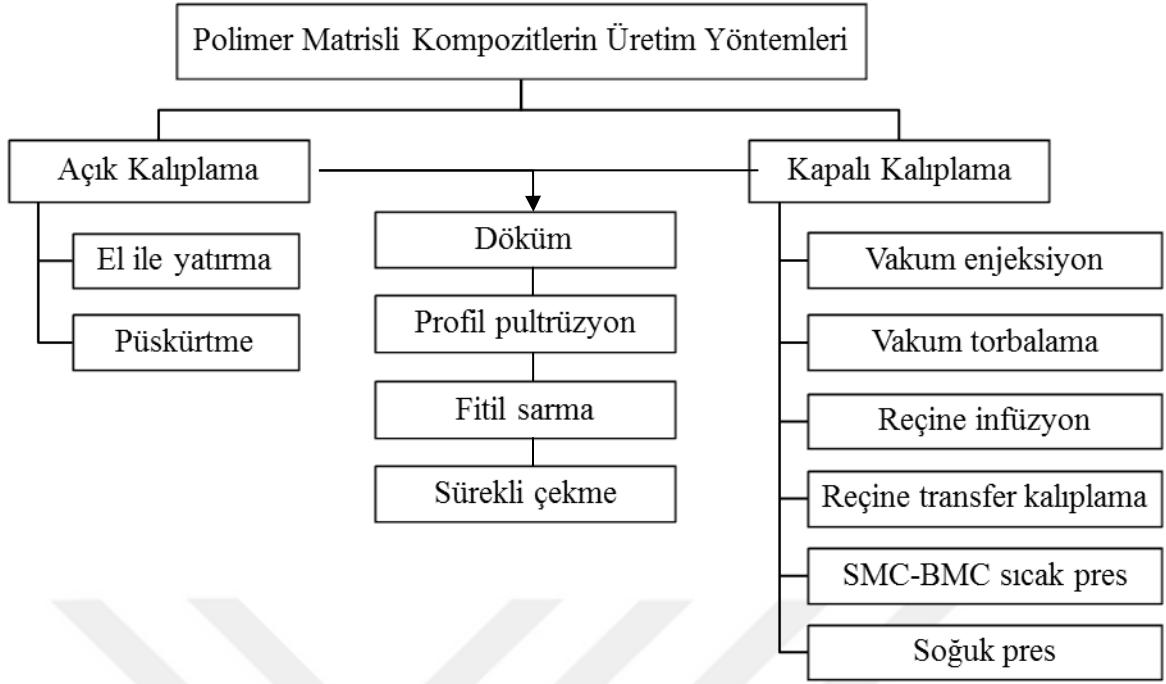
#### **2.1.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri**

Kompozit malzemelerin üretimi, çeşitli faktörlere bağlı olarak farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu yöntemler genellikle matris ve takviye malzemelerinin türüne, üretilecek kompozit malzemelerin kullanım amacına, kalite gereksinimlerine, performans beklentilerine, üretim adedine, maliyet faktörlerine ve diğer özelliklere göre şekillenir. Temel olarak, kompozit malzeme üretim yöntemlerini iki ana başlık altında toplamak mümkündür: birleştirme ve döküm yöntemleri. Bu yöntemler, çeşitli alt kategorilere ayrılabilir ve her biri farklı avantajlar ve dezavantajlar sunar. Bu nedenle, doğru üretim yönteminin seçilmesi, kompozit malzemenin özellikleri ve uygulama gereksinimlerine bağlıdır.

Kompozit üretim yöntemleri, klasik malzeme üretim yöntemleri ile kıyaslandığında; matris ve katkı elemanı arasındaki etkileşimler nedeniyle kompleks üretim gereksinimleri ve son ürün maliyetinin yüksek olması önemli dezavantajlarıdır.

##### **2.1.4.1. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri**

Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan matris ve takviye malzemelerinin fiziksel ve işlenebilirlik özellikleri genel olarak basit üretim yöntemlerinin uygulanmasına imkân sağlamaktadır. Özellikle yüksek nitelikli kompozit üretiminin ön planda olmadığı uygulamalarda basit üretim yöntemleri ile düşük maliyetli kompozitler üretilebilmektedir. İleri teknoloji ürünü polimer matrisli kompozitlerin üretimi için ise uzmanlaşmış işgücü, gelişmiş üretim tesisleri ve pahalı bileşenlere ihtiyaç duyulması nedeniyle yüksek maliyetler ortaya çıkmaktadır. Aynı zamanda büyük boyutlu polimer matrisli kompozit bileşenlerin üretim sürecinin uzun olması maliyet ve ürün kalitesi üzerinde etkili olmaktadır. Polimer malzemelerdeki çeşitlilik ve istenilen nitelikte ürün elde etme arayışları neticesinde polimer matrisli kompozit malzemelerin üretilmesi için farklı yöntemler geliştirilmiştir (Açıkbaş, 2016).

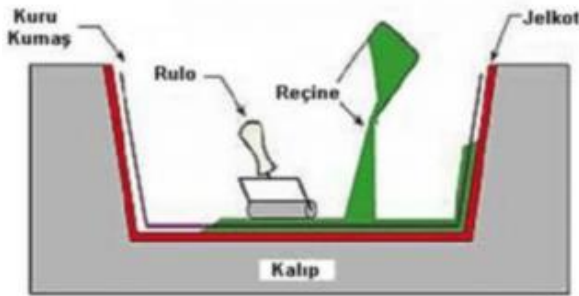


Şekil 2.4. Polimer matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri (Kaynak: Açıkbay, 2016)

#### 2.1.4.1.1. Açık Kalıplama Yöntemleri

Bu yöntemlerde, ham halde bulunan malzemelerin, yani elyaf, takviye malzemeleri ve reçineler gibi bileşenlerin sertleşme işlemi, ortamdaki hava temasıyla gerçekleştirilir.

**El ile yatırma yöntemi:** Minimum ekipman gerektirdiği için geçmişten günümüze açık kalıplama yöntemleri arasında en uygun ve en sık kullanılan yöntem olmuştur. Küçük parçaların üretimi sağlanabildiği gibi yüzeylerinde pürüzsüzlük aranan büyük boyutlardaki parçaların üretimleri de elle yatırma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Elle yatırma yöntemi sık kullanılan bir yöntem olsa da yoğun emek ve işçilik gerektirdiği için seri üretim boyutlarında parça üretimi için uygun bir yöntem değildir (Arıcasoy, 2006). Bu yöntemde ilk olarak üretilecek malzemenin kalıplaması yapılır.



Şekil 2.5. El ile Yatırma yöntemi ile kompozit üretiminin şematik gösterimi (Kaynak: Durgun, 2014)

Takviye düzenleme özellikleri, kalıp içerisinde düzgün bir şekilde yerleştirildikten sonra seçilen reçine elle kalıp içine yerleştirilir. Hava kalıntılarının ortadan kaldırılmasını önlemek için rulolar tarafından kullanılan reçine içindeki havanın dışarı atılması için çaba sarf edilir. Bu yöntemde, farklı kumaş türlerinden elde edilen örülmüş kumaşlar veya elyaf parçaları, kalıba elle yerleştirilerek kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilir. Elle yatırma yönteminin avantajları arasında düşük üretim maliyeti, esnek tasarım imkânı, boyutsal kısıtlamaların azalması ve yoğun işçilik gerekliliği bulunurken, dezavantajları arasında ise üretilen malzemelerin düzgünlüğünün kesinlikle sağlanması gerekliliği, iş gücü yoğunluğu ve ürünlerin kesilmeden kopma eğilimi yer alır. Bu yöntem genellikle otomobil gövde panelleri, küçük ev aletleri, yüzme havuzları ve tekne gövdeleri gibi çeşitli alanlarda ekipman imalatında tercih edilmektedir.

**Püskürtme yöntemi:** El ile yatırma yöntemine kıyasla işçilik yoğunluğunu azaltma ve daha homojen dağılım sağlama amacıyla geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntemde, takviye elemanları ve reçine, bir tabanca başlığı aracılığıyla kalıp içine püskürtülerek katmanlama işlemi gerçekleştirilir. Püskürtme işlemi sırasında, ayrı iki kaptan gelen reçineler, tabanca başlığından çıkarak birleşir ve bu şekilde birlikte püskürtme işlemi gerçekleştirilmesine olanak sağlar. Bu yöntem, daha hızlı üretim ve daha homojen sonuçlar elde etmek için tercih edilirken, elle yatırma yöntemine kıyasla işçilik gereksinimini azaltır ve daha kontrol edilebilir bir üretim süreci sağlar (Bedir, 2006).



Şekil 2.6. Püskürtme yöntemi ile kompozit üretiminin şematik gösterimi (Kaynak: Bedir, 2006)

Püskürtme tabancaları, iki ana gruba ayrılır: hava püskürtmeli tabancalar ve havasız tabancalar. Havasız tabancalar, daha iyi kontrol edilebilen püskürtme işlemi ve daha az dağılan parçacıklar sayesinde işçi sağlığını daha az etkiler ve bu nedenle daha yaygın olarak tercih edilir. Püskürtme yöntemi, büyük tekne gövdeleri, tanklar, nakliye ekipmanları gibi çeşitli malzemelerin üretiminde kullanılır. Elle yatırma yöntemi ile

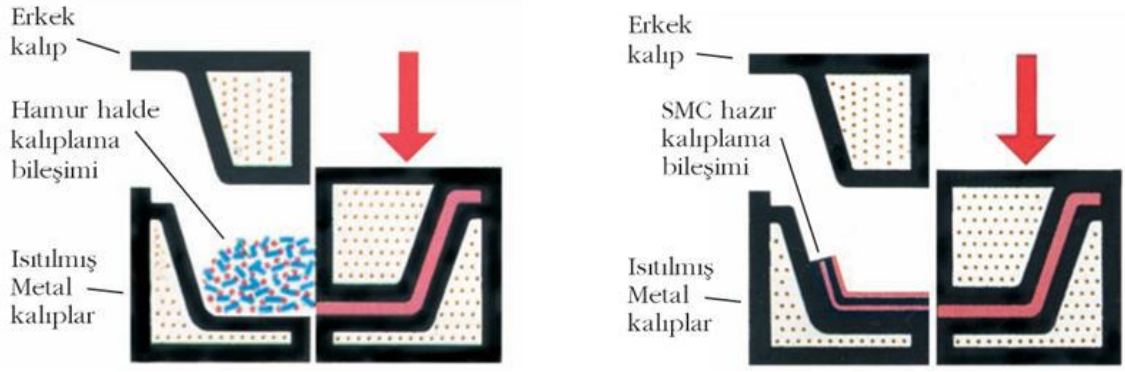
karşılaştırıldığında, püskürtmeli kalıplama yöntemi, kalıp üretim maliyetlerini düşürür ve reçine malzeme ile uygulama zamanından tasarruf sağlar.

#### **2.1.4.1.2. Kapalı Kalıplama Yöntemleri**

Kapalı kalıplama yöntemleri, açık kalıplama yöntemlerinden ayrılarak, reçineler ve fiber hammaddelerin havadan izole edildiği bir kalıp veya vakum makinesi kullanılarak gerçekleştirilir. Bu yöntemler, kompozit formunun oluşturulmasını sağlar ve malzemenin kalıp içinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. Vakum veya basınç uygulayarak, istenilen şekil ve özellikler elde edilir. Bu şekilde, daha yüksek kaliteli ve sağlam kompozit parçalar üretilir.

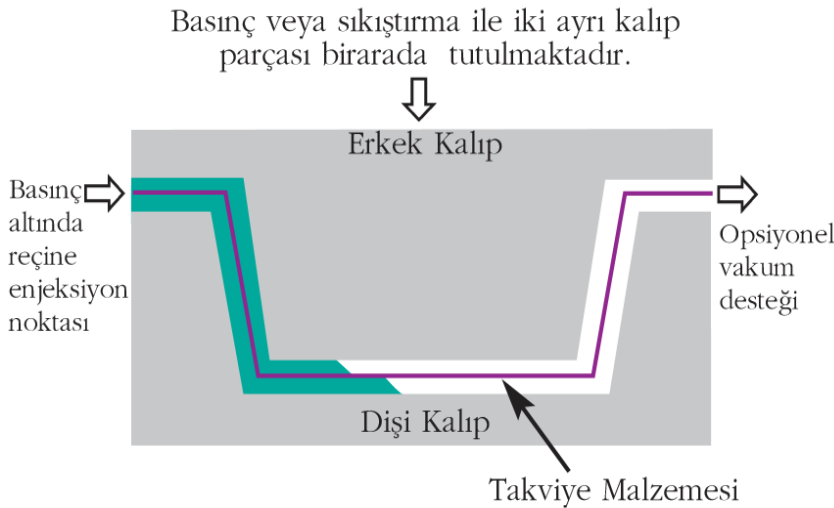
**Sıkıştırılmalı Pres ile Kalıplama:** Bu proses ısıtılmış metal kalıplarda, kompozit malzemenin istenilen şekilde, reçine sistemi sertleşene kadar 170–200 bar hidrolik basınç altında sıkıştırılması işlemidir. Bu proseste işlem görecektir polimer malzemenin türüne göre, kalıp sıcaklığı, kalıplama süresi ve kalıplama basıncı ayarlanabilmektedir. Genellikle termoset esaslı malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Üre-formaldehit, polyester esaslı malzeme reçine, granül veya preformlar şeklinde üretimde takviyeli veya takviyesiz olarak kullanılmaktadır. SMC ve BMC kalıplama malzemeleri bu alanda sıklıkla kullanılmaktadır.

Pres kalıplama yönteminde sıcaklık ve basıncın etkisi büyüktür. Ürün kalitesi açısından polimer karışımının içindeki havanın atılması gerekmektedir. Bu yöntem, ısıya ve basınca dayanıklı erkek ve dişi kalıptan oluşan bir mekanik sistemdir. Pres kalıplama yöntemi en eski polimer şekillendirme yöntemidir. El yeteneği ile uzun liflerle güçlendirildiğinden günümüzde önemi artmaktadır. Güçlendirilmiş polimerlerin özellikle otomotiv sektöründe kullanımı artmaktadır. Bu yöntemin dezavantajı kalıplar arası sızıntı olması ve ürün kalitesinin değişmesidir (Açıkbaş, 2016).



**Şekil 2.7.** Sıkıştırılmalı presle kalıplama yöntemi ile kompozit üretiminin şematik gösterimi (Kaynak: Açıkbaş, 2016)

**Reçine Transfer Kalıplama (RTM) Yöntemi:** Önceden kesilmiş ya da önceden şekillendirilmiş takviye malzemelerinin, erkek ve dişi kalıp arasında yerleştirilerek kapatıldığı, elle yatırma sistemine göre daha hızlı olan, kapalı bir kalıplama yöntemidir. Kalıp içine yerleştirilmiş takviye malzemesi üzerine reçine basınç altında pompalanır. Kalıp içindeki havanın dışarı çıkarılması ve reçinenin takviyeye daha iyi işlemesi için vakum işlemi de uygulanabilen bir tekniktir. Bu yöntemle karmaşık şekilli parçalar üretilebilir. Bu yöntemde genel olarak kullanılan matris reçineler polyester, vinil ester, epoksi ve fenoliklerdir. El yatırması yöntemine göre avantajlı yönleri homojen bir kalınlık, iki yüzeyinin de düzgün olması ve düşük gaz çıkışıdır. Daha düzgün bir yüzey kalitesi için kalıplama öncesinde kalıp yüzeyine jelkot uygulaması yapılabilir (Açıkbaş, 2016).



**Şekil 2.8.** Reçine transfer kalıplama yöntemi ile kompozit üretiminin şematik gösterimi (Kaynak: Açıkbaş, 2016)

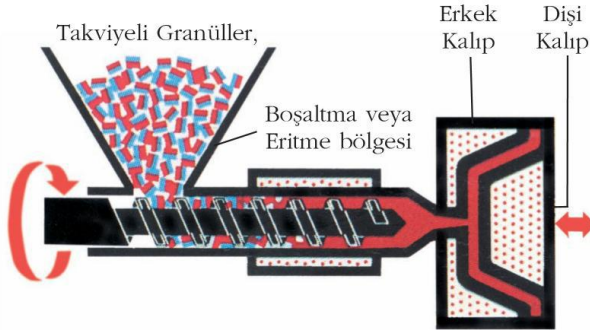
**Enjeksiyon Kalıplama:** Yüksek boyutsal stabilite gerektiren ve kompleks şekilli parçaların kalıplanmasında yaygın bir biçimde kullanılan üretim metodudur. Yüksek hacimli üretimler için uygundur. Bazı durumlarda, üretim hızı makine başına saatte binlerce adet parçaya çıkabilmektedir. Bu yöntemde elde edilen ürünlerin çoğu takviyesiz termoplastik ürünlerdir. Takviyeli termoplastiklerin kalıplanması için, ekipman ve kalıplama tekniğinde çok küçük değişiklikler yapılması yeterli olmakta hatta bazen hiçbir değişikliğe ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu yöntemin temeli, termoplastik malzemelerin ısıtıldıklarında yumuşamasına ve soğutulduklarında sertleşmesine dayanmaktadır. Çoğu enjeksiyon kalıplama sisteminde granül halindeki termoplastik malzeme besleme hunisinden, ısıtılmış metal silindirin içine bir ucundan beslenir. Silindir içinde enjeksiyon burğu yivleri ya da piston mekanizmasının hareketiyle malzeme sıcak silindir içine çekilir. Isıtma süresince malzeme yarı akışkan bir duruma gelerek, daha düşük sıcaklıktaki kalıp içine enjekte edilir. Bu metotta termoset malzemelerin de üretimi yapılmaktadır (Açıkbaş, 2016).

Enjeksiyon kalıplama, kompozit ve plastik malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemin kökenleri 1865 yılına kadar uzanmasına rağmen, yaygın kullanımı 1930'larda başlamıştır. Enjeksiyon kalıplama, genellikle çoğu termoplastik ve polimer malzemenin üretiminde tercih edilir. Bu yöntemde, katı halde bulunan termoplastik malzemenin öncelikle ısıtılarak viskoz bir hale getirilmesi ve daha sonra basınç yardımıyla kalıp içine enjekte edilip katılaşması sağlanır. İşlem, malzemenin ısıtılması, kalıp içine enjekte edilmesi ve ardından soğutulması aşamalarını içerir. Enjeksiyon kalıplama, hızlı ve hassas üretim imkânı sunması nedeniyle endüstride sıkça tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemle üretilen parçalar genellikle yüksek kalitede ve tutarlılıkta olup, seri üretim için uygundur. Bu nedenle, otomotiv, elektronik, tıbbi ve ambalaj endüstrileri gibi birçok sektörde kullanılmaktadır.

Polimerlerin malzeme üretiminde kullanılmasında genellikle iki ana kategori vardır: termoplastikler ve termosetler. Termoplastikler, normal koşullarda katı halde bulunur ve ısıya bağlı olarak form değiştirebilirler. Isıtıldıklarında erirler ve sıvı hale geçerler, bu durumda kalıp içine enjekte edilir ve soğutularak şekil alırlar. Öte yandan, termoset polimerler normal koşullarda katı veya sıvı haldedir. Kalıplanıp şekil verildikten sonra, bu malzemelerin formu ısıtılarak değiştirilemez hale getirilir. (Yumakgil, 2009).

Termoplastik ve termoset malzemeler arasındaki temel fark, termoplastiklerin yeniden ısıtılarak şekillendirilebilme özelliğine sahip olmalarıdır. Polimer malzemenin özellikleri,

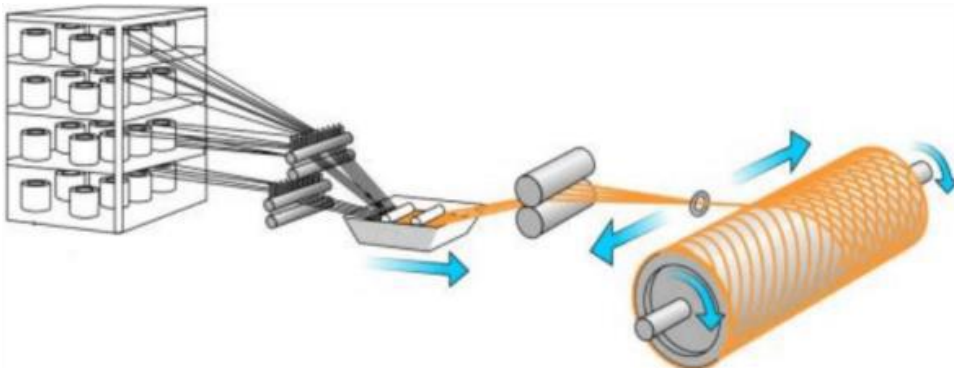
kalıbın geometrisi, enjeksiyon kalıplama işlemi sırasındaki basınç gibi faktörler, üretim aşamalarında önemli rol oynar (Gökerplast, 2022).



Şekil 2.9. Enjeksiyon kalıplama yöntemi ile kompozit üretiminin şematik gösterimi (Kaynak: Açıkbaş, 2016)

**Elyaf Sarma Yöntemi:** Elyaf sarma prosesi, belirli paternlerde dönen mandrel üzerine reçine emdirilmiş fiberlerin sarılması şeklinde uygulanan bir metottur. Bu metot homojen yapı ve dizilimi hususunda yüksek kontrol imkânı verir. Yaş metot da fiber, düşük viskoziteli bir reçine içine daldırılır. Kuru metot da ise takviye ön emdirilmiş formda kullanılır. Takviye sarıldıktan sonra kürlleme işlemi ile kompozit sertleştirilir ve kompozit mandrelden çıkarılır. Polyester, epoksi, vinil ester ve fenolik esaslı termoset reçineler elyaf sarma yönteminde kullanılan reçinelerdir (Açıkbaş, 2016).

Filament sarma, matris emdirilmiş bir sargı filamentlerle sardırılmak suretiyle basit geometri parçaları yapan mekanik olarak otomatikleştirilmiş bir işlemdir. Bu işlem, şekli kavisli (silindirik veya küresel) parçalar için çok uygundur (Çatlı, 2024).



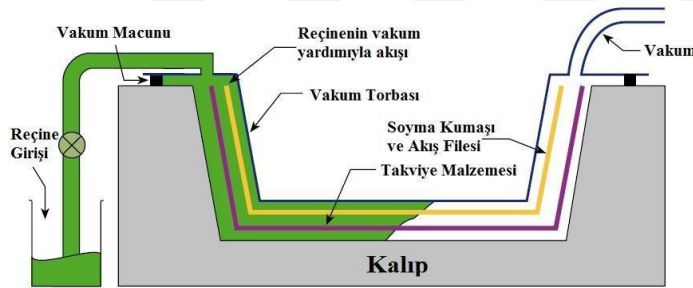
Şekil 2.10. Elyaf sarma yöntemi ile kompozit üretiminin şematik gösterimi (Kaynak: Açıkbaş, 2016)

**Vakum İnfüzyon Yöntemi:** Vakum infüzyon yöntemi, fiber takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemde, özel kalıpların içerisine ya da yüzeylere yerleştirilen fiber takviyelerin üzerinin kalıp parçaları veya vakum torbaları

ile kapatılmasının ardından sistemin vakum altına alınarak havası boşaltılır. Bu adım, malzemenin içindeki hava kabarcıklarını ortadan kaldırarak daha güçlü ve homojen bir yapı elde edilmesini sağlar.

Daha sonra, vakum altında sisteme polimer reçine enjekte edilir. Bu reçine, fiber takviyeleri saran ve parçanın dayanıklılığını artıran bir malzemedir. Reçine sistem içerisinde yayılarak takviye malzemesinin tamamen reçine ile doymun hale gelmesi sağlanana kadar sistem vakum altında tutulur. Son olarak, enjekte edilen reçine belirli bir sıcaklık ve süre boyunca sertleştirilir. Bu süreçte reçine polimerleşir ve parça istenen mukavemet özelliklerine sahip olur.

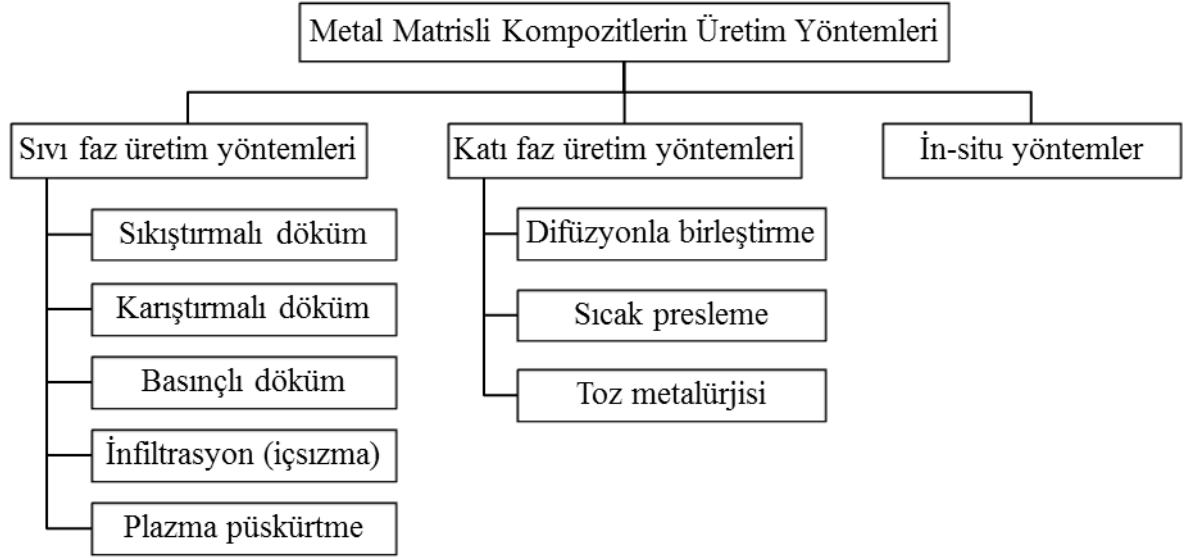
Vakum infüzyon yöntemi, kompleks geometrilere sahip ve yüksek performanslı kompozit parçaların üretiminde tercih edilen bir teknolojidir. Bu yöntem, malzemenin homojenliğini artırırken malzeme israfının azaltılmasına yardımcı olur (Doğru, 2016)



Şekil 2.11. Vakum İnfüzyon yöntemi ile kompozit üretiminin şematik gösterimi (Kaynak: Kayıkçı,2023)

#### 2.1.4.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Kompozit üretim yöntemleri, klasik malzeme üretim yöntemleri ile kıyaslandığında; matris ve katkı elemanı arasındaki etkileşimler nedeniyle kompleks üretim gereksinimleri ve son ürün maliyetinin yüksek olması önemli dezavantajlarıdır. MMK malzemenin üretim yöntemi; imal edilecek parçanın geometrisine, istenilen mekanik ve fiziksel özelliklere, matris ile katkı elemanının özelliklerine göre belirlenir. MMK malzemeleri üretmek için farklı yöntemler geliştirilmiştir (Şenbaş 2024).



Şekil 2.12. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri (Kaynak: Şenbaş 2024)

### 2.1.5. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemelerden sanayi dallarının hemen hemen tümünde yararlanılmaktadır. Bu malzemeler, birçok avantajı beraberinde getirerek tercih edilmelerini sağlamaktadır (Tablo 2.2).

Tablo 2.2. Kompozit malzemelerin kullanıldığı alanlar ve sağladığı yararlar

| Faaliyet Alanı         | Sağlanan Faydalar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ulaşım                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Havacılık: Uçak gövdeleri, kanatlar, pervaneler gibi parçalar için hafiflik ve dayanıklılık sağlar.</li> <li>– Otomotiv: Otomobil parçaları, karoseri bileşenleri ve iç kısımları için hafiflik ve mukavemet sağlar.</li> <li>– Deniz Taşımacılığı: Yatlar, tekneler, deniz altı yapıları gibi alanlarda hafiflik ve korozyon direnci sağlar.</li> <li>– Demiryolu Taşımacılığı: Tren ve vagonların iç/dış kaplamaları, karoseri ve iç kısımları için hafiflik, dayanıklılık ve mukavemet sağlar.</li> </ul> |
| İnşaat ve Altyapı      | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Taşıyıcı elemanlar için hafiflik, dayanıklılık, mukavemet ve maliyet etkinliği sağlar.</li> <li>– Kaplamalar ve cephe elemanları için aşınmaya dayanıklılık, hafiflik, estetiklik ve korozyon direnci sağlar.</li> <li>– Yalıtım malzemeleri için dayanıklılık, ekonomiklik ve geçirimsizlik sağlar.</li> </ul>                                                                                                                                                                                              |
| Savunma ve Güvenlik    | Askeri araçlar, zırhlı araçlar, uçak parçaları ve askeri ekipmanlar için hafiflik, düşük radar izi ve balistik koruma sağlar.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Uzay                   | Uzay araçlarının gövde, kanat ve türbin gibi parçaları için hafiflik ve dayanıklılık ile yüksek aşınma direnci ve yüksek termal dayanım sağlar.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Enerji                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Rüzgâr türbin kanatları, güneş enerjisi panelleri gibi yenilenebilir enerji teknolojilerinde mukavemet ve hafiflik sağlar.</li> <li>– Petrol ve gaz endüstrisinde boru hatları, depolama tankları gibi alanlarda kimyasal direnç ve uzun ömür sağlar.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                             |
| Elektronik ve Elektrik | Yüksek mukavemetli izolasyon malzemeleri olarak elektronik devre kartları ve elektrikli araç bataryaları gibi uygulamalarda yüksek yalıtkanlık sağlar.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

**Tablo 2.3.** (devam) Kompozit malzemelerin kullanıldığı alanlar ve sağladığı yararlar

|                |                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Spor           | Spor malzemeleri (kayaklar, snowboardlar, golf sopaları, tenis raketi, kasklar), bisikletler, yelkenli tekneler gibi ürünlerde dayanıklılık, dayanım, performans ve hafiflik sağlar.                                             |
| Ambalaj        | Hafiflik, düşük maliyet ve yüksek koruma sağlar.                                                                                                                                                                                 |
| Mobilya        | Ekonomiklik, estetiklik, yüksek dayanım ve hafiflik sağlar.                                                                                                                                                                      |
| Kimya          | Ekonomiklik, korozyona ve aşınma etkilerine dayanıklılık sağlar.                                                                                                                                                                 |
| Tekstil        | Ekonomiklik, dayanıklılık ve estetiklik sağlar.                                                                                                                                                                                  |
| Tıp ve Medikal | – Protez üretiminde hafiflik, doku uyumu, dayanıklılık, dayanım, estetiklik ve ekonomiklik sağlar.<br>– Tıbbi ürünlerin ekonomik, dayanıklı, sağlıklı ve sağlam olmasını sağlar.                                                 |
| Diğer          | Mutfak malzemeleri, park/bahçe ve kent mobilyaları, el aletleri ve oyuncak gibi ürünlerin üretiminde hafiflik, düşük maliyet, dayanıklılık, estetiklik, ısı etkilerine dayanım başta olmak üzere çeşitli yönlerden yarar sağlar. |

Öncelikle, kompozitlerin sağladığı hafiflik ve yüksek dayanıklılık özellikleri, birçok uygulamada önemli avantajlar sunmaktadır. Örneğin, havacılık ve uzay sanayi, otomotiv ve ulaşım sektörü gibi alanlarda hafif malzemelerin kullanımı, yakıt verimliliğini artırırken performansı da iyileştirir.

Ekonomik açıdan da önemli bir faktör olan kompozit malzemelerin maliyet etkinliği, üretim süreçlerinde atık miktarını azaltarak ve enerji tasarrufu sağlayarak maliyetleri düşürür. Bu da tüketim malları, spor ekipmanları, eğlence ekipmanları gibi geniş tüketici tabanına hitap eden sektörlerde tercih edilmelerini teşvik eder.

Kompozit malzemelerin hafifliği ve geliştirilmiş mekanik özelliklere sahip olması araçlarda bulunan şanzıman, şasi, direksiyon simidi, soğutma kanalları, kaporta, kolon, süspansiyon gibi yapıların kompozit malzemelerden üretiminin en büyük sebeplerindendir ve çelik muadilleri ile mukayese edildiğinde tartışılmaz ve ulaşılabilir fayda sağlamaktadır (Sert, 2024).

#### **2.1.5.1. Otomotiv Endüstrisinde Kompozit Malzemelerin Kullanımı**

Kompozit malzemeler, otomotiv sektöründe çeşitli avantajları nedeniyle yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle düşük maliyet, kolay şekil verilebilirlik, dayanım, dayanıklılık, hafiflik, estetiklik gibi yönlerden sağladığı yararlar nedeniyle binek araçlardan toplu taşıma ve ticari araçlara kadar birçok aracın şasi, kaporta, panel, iç kaplama ve şaft gibi çeşitli parçalarında kompozit malzemeler kullanılmaktadır (Şekil 2.17-2.20). Karbonfiber kompozitler yüksek mukavemet, dayanıklılık, hafiflik, termal dayanım, aşınma ve korozyon direnci başta olmak üzere çeşitli yönlerden üstün özelliklere sahip olması

nedeniyle araçların karoser, şasi ve güç aktarım parçalarının imalatında kullanılabilmektedir.



**Şekil 2.13.** Otomobil ve yarış aracı için karbon fiber kompozit kullanılarak üretilmiş karoser örnekleri (Kaynak:Compositesworld, Gardiner , 2014; Jec, Robathan, 2023)



**Şekil 2.14.** Otomobil için karbon fiber kompozit kullanılarak üretilmiş şaft örnekleri (Kaynak:Adente, Ot, 2024; compositesworld, Black, 2017)



**Şekil 2.15.** Doğal liflerin takviye malzemesi olarak kullanılmasıyla üretilmiş biyokompozit örnekleri; otomobil kapı kaportası ve iç paneli (Kaynak:Cannabisdigest, Walsh, 2014; İmeche, Pe, 2015)



**Şekil 2.16.** Doğal liflerin takviye malzemesi olarak kullanılmasıyla üretilmiş biyokompozit kaput örneği (Kaynak: Producer, Arnason, 2012)

Otomotiv endüstrisindeki araçların üretiminde kompozit malzemelerin kullanım amaçları ve kullanıldığı yerler genel olarak şu şekilde açıklanabilir;

1. **Hafiflik ve Dayanıklılık:** Kompozit malzemeler, karbon fiber, cam elyafı gibi takviyelerle güçlendirilmiş yapısıyla çok düşük ağırlıkta olup, aynı zamanda yüksek mukavemet sağlar. Bu özellikleri, araçların yakıt verimliliğini artırırken, güvenlik ve performansı da iyileştirir.
2. **Yapısal Parçalar:** Otomobil gövdeleri, kaputlar, çamurluklar gibi yapısal parçalar kompozit malzemelerden üretilir. Bu parçalar, çarpışma durumlarında enerji emilimini sağlayarak yolcu güvenliğini artırır.
3. **İç Döşeme ve Kaplama:** İç mekân bileşenleri olarak, koltuk sırtlıkları, kapı panelleri gibi parçalar kompozit malzemelerle üretilir. Estetik görünüm, düşük maliyet, dayanıklılık ve konfor sağlarlar.
4. **Fren ve Süspansiyon Parçaları:** Yüksek performanslı araçlarda, fren diskleri ve süspansiyon bileşenleri gibi kritik parçalarda kompozit malzemeler tercih edilebilir. Bu parçalar, daha iyi termal dayanım ve daha hafif olmalarıyla performansı artırır.
5. **Isı ve Ses Yalıtımı:** Kompozit malzemeler, araç içinde ısı ve ses yalıtımı sağlamak için kullanılabilir. Bu özellikleri, sürüş konforunu artırır ve iç mekandaki gürültü seviyelerini azaltır.
6. **Elektrikli Araçlarda Kullanım:** Elektrikli ve hibrit araçlarda, batarya koruma katmanları gibi parçalarda kompozit malzemeler tercih edilir. Bu, araç ağırlığını azaltırken enerji verimliliğini artırır.

Kompozit malzemelerin otomotiv sektöründeki geniş kullanımı, sürekli olarak gelişen teknolojiler ve sürdürülebilirlik hedefleriyle birlikte daha da artmaktadır. Bu malzemelerin,

yüksek performansa, güvenliğe ve çevresel etkilere olan olumlu özellikleri sebebi ile otomotiv üreticileri tarafından kullanımı değerlendirilmektedir.

#### **2.1.6. Kompozit Malzemelerdeki Özel Uygulamalar**

Kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinin yanında kullanılan matris ve takviye malzemelerinin türüne, şekline ve boyutlarına bağlı olarak farklı özelliklerde kompozitler geliştirilebilmektedir. Özellikle matris ve takviye malzemesinin aynı kimyasal bileşime sahip malzemelerden oluşturulduğu kompozitlerin matris ve takviye malzemesi arasında daha iyi bir birleşim sağlanması ve homojen bir yapının elde edilmesi mümkün olabilmekte; nano düzeydeki takviye ve matris malzemelerinin kullanılmasıyla da benzer nitelikte kompozitlerin üretilmesi mümkün olabilmektedir.

##### **2.1.6.1. Karbon-Karbon kompozitler**

Karbon-karbon kompozitler (CCC), karbon fiberlerin hem takviye malzemesi hem de matris malzemesi olarak kullanıldığı kompozit malzemelerdir. Bu tür kompozitler, yüksek sıcaklık ve oksijen varlığında bozulabilme riski taşırlar. Ancak, uygun işlemlerle modifiye edildiklerinde, özellikle yüksek sıcaklıklarda mükemmel performans sergileyebilirler. Özellikle 2000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara kadar dayanabilirler (Gürbüz, 2019).

Karbon-karbon kompozitlerin (CCC) oksitlenme eğilimi, koruyucu bir kaplama yapılmadığında önemli bir sorun olabilir. Bu durum, malzemenin 400-500°C gibi göreceli olarak düşük sıcaklıklarda bile oksitlenmeyle karşılaşabileceği anlamına gelir, ki bu mühendislik açısından istenmeyen bir durumdur. Ancak, CCC'lerin sahip olduğu avantajlar, onları yüksek sıcaklık ve oksijen maruziyetine dayanıklı hale getirir. Bu özellikleri sayesinde fren diskleri, roket başlıkları, sıcak presleme kalıpları, içten yanmalı motor pistonları, uzay mekiklerinin kanatları gibi birçok uygulamada kullanılabilirler. Bununla birlikte, CCC'lerin üretimindeki zorluklar nedeniyle maliyetli bir yapıya sahip olmaları dikkate alınmalıdır (Mallick, 1997).

##### **2.1.6.2. Nano-Kompozitler**

Nano kompozitler, malzemelerin özelliklerini geliştirmek için nanoteknolojiyi kullanan bir tür kompozittir. Bu malzemeler, nanometre ölçeğindeki parçacıkların bir matris malzeme

içine entegre edilmesiyle oluşur. Nanoparçacıkların kompozit malzemeye entegrasyonu, malzemenin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini önemli ölçüde artırabilir. Örneğin, nano parçacıkların eklenmesi elastiklik modülünü artırabilir, ısı direncini artırabilir, yanıcılığı azaltabilir ve gaz kaçaqlarını önleyebilir. Bu nedenle, nano kompozitler çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Sarıkaya, 2019).

Nanokompozit malzemeler, matris malzemesine göre farklı sınıflandırmalara tabi tutulabilir. Seramik matrisli nanokompozitler genellikle  $Al_2O_3/TiO_3$ ,  $Al_2O_3/SiC$ ,  $Si_3N_4/SiC$  gibi bileşenlerden oluşurken; metal matrisli nanokompozitler Fe-MgO, Fe-Cr/ $Al_2O_3$  gibi bileşenlerle elde edilir. Polimer matrisli nanokompozitler ise poliestere/ $TiO_2$  ve polimer/CNT gibi bileşenleri içerebilir. Bu nanokompozitler, birçok endüstriyel alanda kullanılmakta ve sürekli olarak üzerlerinde araştırmalar yapılmaktadır. Örneğin, çelikten daha hafif ve daha dayanıklı olan grafen malzemesinin poliestere matrisli nanokompozite eklenmesi, standart poliestere kıyasla daha üstün özellikler sergileyebilir. (Subaşı vd., 2017).

Nanokompozit malzemelerin üretiminde genellikle nanokiller, cam elyafı, karbon elyafı, karbon nanotüpler, polivinil alkoller gibi sentetik malzemeler kullanılır. Ancak bu sentetik malzemelerin çevresel etkileri (örneğin küresel ısınma), geri dönüşüm zorlukları ve yüksek maliyet gibi sorunlar nedeniyle, bitkisel bileşenlere dayalı nano malzemeler ve bunların nanokompozitlerinin üretimi için çalışmalar yapılmaktadır. Bu doğal bazlı malzemeler, çevresel etkileri azaltabilir ve geri dönüşüme daha uygun olabilir, bu da nanoteknolojinin sürdürülebilirliğini artırabilir. Bu alandaki araştırmalar, gelecekte çevre dostu ve ekonomik olarak sürdürülebilir nanokompozitlerin geliştirilmesine yol açabilir (Leja, 2010).

#### **2.1.6.3. Sürekli Elyafı Enjeksiyon Prosesi (CFIP)**

Yeni bir kompozit üretim teknolojisi olan sürekli fiber enjeksiyon prosesi, (Continuous Fiber Injection Process-CFIP) teknolojisi, Eurecat teknoloji merkezi tarafından geliştirilen ve mekanik özellikleri önemli ölçüde geliştiren bir 3B baskı sonrası işlemdir. Üretim yöntemi 3B baskı ile üretilen boru şekilli boşluklu parçaların içine sıvı reçine ile aynı anda sürekli fiberlerin enjekte edilmesine dayanmaktadır. Parça kürlendikten sonra katılaştıran reçine, fiberler ile parça arasında mekanik bir arayüz görevi görür. Patentli olan bu teknoloji, eklemeli imalat kategorisinde JEC Dünya İnovasyon Ödülü'nü almıştır (Eurecat, 2019).

CFIP teknolojisi, yüksek mekanik özelliklerin ve hafifliğin gerekli olduğu yeni uygulamalarda 3B baskının kullanılmasına olanak sağlamayı amaçlamaktadır. Yöntemin üstünlüğü, takviye elyafların her yöne yerleştirilebilmesi ve önceden hazırlanmış karmaşık rotanın izlenebilmesi ile farklı formlarda üretimlerin gerçekleştirilmesine imkân sağlamasıdır. CFIP teknolojisi ayrıca farklı parçalar arasında elyaf sürekliliğini entegre bir şekilde sağlayarak çok yüksek performanslı bağlantılar gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu sayede ultra yüksek birleştirme performansı elde edilir. Elde edilen sonuçlar, bu yenilikçi teknolojinin, plastik, metal veya seramik dahil her türlü malzemeyle üretilen parçaların güçlendirilmesine olanak tanıdığı ortaya koymaktadır (Eurecat, 2019).



Şekil 2.17. Sürekli elyaflı enjeksiyon prosesi (Kaynak: Compositesworld, Nehls, 2023)

### 2.1.7. Biyokompozitler

Biyokompozitler, kompozit malzemelerin doğal ve sürdürülebilir kaynaklardan elde edilen takviye elemanları veya matris malzemeleri ile oluşturulduğu bir türdür (Avcı vd., 2021).

Bu tür kompozitler, geleneksel kompozit malzemelere ve türevlerine alternatif olarak geliştirilmiştir. Biyokompozitler, polimer matris malzeme içerisine doğal liflerin eklenmesiyle üretilirler. Bu üretim sürecinde, temel olarak petrolden elde edilen matris malzemeleri (örneğin PP, PE, PS) veya biyopolimer türevleri (örneğin PHA, PHB) ile doğal lifler kullanılır. Eğer bir biyokompozit malzeme hem takviye elemanı hem de matris malzemesi olarak doğal kaynaklar kullanılarak üretilirse, bu malzeme yeşil kompozit olarak adlandırılır. Biyokompozit malzemeler, sadece çevre dostu olmaları nedeniyle değil, aynı zamanda petrolden türetilen kompozit malzemelerin yüksek maliyetleri ve çevresel etkileri gibi nedenlerle de yoğun bir şekilde araştırılmakta ve geliştirilmektedirler. Bu malzemeler, biyolojik olarak parçalanabilir ve geri dönüştürülebilir özelliklere sahiptir, bu da atık yönetimi ve sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunar. Ayrıca, biyopolimerlerin kullanımı, fosil yakıtlarının tüketimini azaltarak sera gazı emisyonlarını

düşürebilir ve biyoçeşitliliği koruyabilir. Bu nedenlerle, biyokompozit malzemelerin endüstriyel uygulamalarda kullanımı giderek artmaktadır.

Geleneksel olarak sıkça kullanılan karbon elyaf ve cam elyaf gibi malzemelerin, doğal liflerle üretilen biyokompozit malzemelerde de benzer mekanik özellikler sergilemesi, endüstriyel uygulamalarda doğal liflerin tercih edilmesine olanak sağlamıştır. Biyokompozitler, sadece çevre dostu olmalarıyla kalmayıp aynı zamanda insan sağlığına da olumlu katkılar sunan bir malzeme türü olarak geniş bir kullanım alanı bulmuştur. (Çelik vd., 2020).

#### **2.1.7.1. Doğal Lif Takviyeli Biyokompozitler**

İnsanoğlunun atmosfere saldıgı sera gazları, küresel ısınmanın en büyük nedenidir. Fosil yakıtların yanması ve endüstriyel faaliyetler gibi insan kaynaklı etkenler, özellikle CO<sub>2</sub>'nin atmosfere salınmasına yol açarak küresel ısınmayı tetiklemektedir. Yapılan araştırmalar, küresel ısınmanın büyük bir kısmının insan faaliyetlerine bağlı olduğunu göstermektedir. Kompozit endüstrisinde yaygın olarak kullanılan malzemeler, aramid, cam elyaf, karbon elyaf gibi yüksek performanslı lifler, güçlü ve hafif olmaları nedeniyle tercih edilir. Ancak, geri dönüşümlü olmayışları, üretim sürecinde CO<sub>2</sub> emisyonu gibi çevresel etkileri ve yüksek üretim maliyetleri nedeniyle eleştirilmektedirler. Bu durum, çevre dostu ve sürdürülebilir alternatif arayışını artırmaktadır. Bu bağlamda, doğal liflerden elde edilen doğal içerikli kompozit malzemelere olan ilgi artmaktadır. Özellikle, doğal lif takviyeli kompozit malzemeler, daha iyi mekanik özellikler sergileyebilmeleri ve geri dönüşümlü olabilmeleri nedeniyle öne çıkmaktadır. Bu malzemeler, genellikle yenilenebilir kaynaklardan elde edilen liflerin polimer matrisle birleştirilmesiyle üretilir. Doğal lifler, genellikle yenilenebilir kaynaklardan elde edilirler ve geri dönüşüme daha uygun olabilirler. Doğal lif takviyeli kompozitler, özellikle otomotiv, inşaat, ambalaj ve diğer endüstriyel uygulamalarda giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu malzemeler, çevre dostu özellikleri ve iyi performanslarıyla sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunabilirler. Bu nedenle, endüstride doğal lif takviyeli kompozit malzemelere olan ilginin artması beklenmektedir (Bulut vd., 2011; Öndürücü vd., 2018).

Bu malzemeler, kompozit endüstrisinin sürdürülebilirlik ve çevre dostu hedeflerine daha uygun bir alternatif sunmaktadır. Bu yönde yapılan araştırmalar, doğal liflerin

kullanımının, yüksek performanslı ve çevre açısından daha dostu kompozit malzemelerin üretimine olanak sağlayabileceğini göstermektedir.

Doğal liflerin kompozit malzemelerde tercih edilmesinin bir nedeni, sentetik liflere göre daha düşük yoğunluğa sahip olmaları ve insan sağlığına daha az zarar verme potansiyelleridir. Bu malzemeler genellikle termoplastik veya termoset matris içine eklenerek üretilirler. Ancak, suya karşı dayanıklılıkları genellikle düşüktür. Bununla birlikte, düşük maliyetleri ve yüksek dayanımları gibi avantajlar, bu tür kompozitlerin kullanımını artırır (Uğural, 2021). Örneğin, Airbus gibi uçak üreticileri, ürünlerinin hafifliğini artırmak ve çevresel etkileri azaltmak için doğal kompozitleri tercih edebilirler (Güneşkaya, 2017).

### **2.1.8. Yeşil Kompozitler**

Matris malzemesi olarak biyobazlı polimerlerin doğal liflerle takviye edildiği biyokompozitlere “yeşil kompozit” denilmektedir. Yeşil kompozitler, hem matristen hem de takviyenin yenilenebilir kaynaklardan türetildiği biyolojik bileşimlerdir. Doğada bulunan uygun bir elyafın belirli bir polimer için takviye olarak seçilmesi, kompozit malzeme için gerekli kompozit rijitlik ve mukavemet değerlerine göre seçilir (Değirmenci, 2020).

CO<sub>2</sub> gibi gazların atmosfere yayılmasıyla neden olduğu sera gazı etkisi konusunda artan farkındalık, tamamen yenilenebilir kaynaklara dayalı yeni malzemelerin geliştirilmesine yol açmaktadır. Petrol bazlı polimerlerin aşırı kullanımı, kaynakların kapasitesinin ciddi şekilde tükenmesine neden olmaktadır. Ayrıca, Avrupa hükümetlerin plastik atık kontrol mevzuatı ve kullanıcılar arasında sürdürülebilir ve çevresel açıdan artan ilgi, doğa dostu ürünlere perakendecileri ve üreticileri yönlendirmektedir. Küresel ısınmanın etkilerini hafifletmek için sürdürülebilir ısının kabul edilebilir maliyetle geliştirilmesi konusundaki yatırımlar çeşitlenmektedir. Bu nedenle, ayrıştırılamayan katı atıkların artması ve çevreye etkileri konusundaki kamuoyu farkındalığı, kabul edilebilir özelliklere sahip biyobozunur malzemeler alanına yeni bir ilgiyi uyandırmaktadır. Son zamanlarda, biyolojik olarak parçalanabilen malzemeler dünya çapında büyük ilgi görmeye devam etmektedir. İki veya daha fazla bitki lifinin bir matristeki kombinasyonu, hibrit yeşil bir bileşik olarak bilinir. Bu kompozitlerin yüksek mekanik özellikleri, geleneksellerin dezavantajların üstesinden geldiklerinde onları materyal tasarımında popüler hale getirmiştir. Hibrit yeşil

kompozitlerin istenen özelliklerini elde etmek için, elyaf ve matris arasındaki uyumluluk birinci derecede önemlidir. Genel olarak, bitki elyafının seçimi kompozitlerin son özelliklerini belirler. Kenaf, hindistan cevizi, bambu, sisal, keten, kenevir ve kenevir gibi lifler, tüketim mallarında, düşük maliyetli konutlarda ve yüksek yapısal özelliklerinden dolayı cam elyafına benzer özellikte olan yapısal parçalarda kullanılmıştır (Değirmenci, 2020).

Kompozit bertaraf etme seçenekleri, yakma veya toprak doldurma ile sınırlandırılmıştır. Biyolojik bozunabilirlik, örneğin dayanıklı kompozitlerin gerekli olduğu uzun süreli bina uygulamalarında olduğu gibi yeşil kompozitlerde daima gerekli olmayan bir özelliktir. Geri dönüştürülmüş ve/veya biyo bazlı ürünlerin kullanımını teşvik eden politikalar birçok gelişmiş ülkede aktiftir (Değirmenci, 2020).

Yeşil kompozitler, özellikle doğal liflerin atıklarından uygulanırsa, hafif, sürdürülebilir kompozitler olarak muazzam bir kalkınma potansiyeline sahiptir. Amaca ulaşmak için önemli faaliyetler, yeni biyolojik türevli polimerlerin tanımlanması, bunların ekonomik ve çevresel açıdan sağlam üretimi ve "geçici" kimyasal/fiziksel iyileştirmeler yoluyla bileşik arayüzey özelliklerin uygulanması olacaktır (Değirmenci, 2020).

#### **2.1.9. Kenevir**

Eski dönemlerde kenevir bitkisinin kullanım alanları oldukça geniş olup, günümüzde de bu potansiyel yeniden değerlendirilmektedir. Özellikle kompozit malzemelerde kullanımı, sürdürülebilir bir alternatif olarak kabul edilmektedir. Kenevir lifleri, dayanıklılığı ve hafifliği ile dikkat çekerken, aynı zamanda çevre dostu bir seçenek olarak da öne çıkmaktadır. Yapılan araştırmalar, kenevir liflerinin kompozit malzemelerdeki performansını değerlendirmekte ve bu alanda gelecek vaat eden gelişmelere ışık tutmaktadır (Demirbek vd., 2021).



Şekil 2.18. Kenevir Bitkisi (Kaynak: Kenevir Araştırmaları Enstitüsü, Bozok, 2023)

Kenevir bitkisi, uzun bir geçmişe sahip olan ve birçok farklı alanda kullanılan önemli bir bitkidir. Özellikle liflerinin kompozit malzemelerin üretiminde kullanılması, kenevirin endüstriyel potansiyelini vurgular. Ancak, keyif verici etkileri nedeniyle Cannabis Indica türünün yasaklanması gibi faktörler, kenevirin kullanımını sınırlamıştır. Bu durum, bitkinin faydalarının tam olarak keşfedilmesini engellemiştir (Kaya vd., 2020).

Cannabis Sativa'nın M.Ö. 2700 yıllarında Çin'de ilaç üretimi için yetiştirildiği tespit edilmiştir. Kenevirden elde edilen lifler, tarih boyunca özellikle tekstil sektöründe büyük öneme sahip olmuştur ve halen %80 gibi büyük bir oranda tekstil sektörünün ihtiyacını karşılamaktadır. Günümüzde ise artan talepler ve teknolojik ilerlemeler doğrultusunda alternatif bir malzeme olarak kullanımı yaygınlaşmıştır. Kenevir bitkisinin tohumları, hayvan yemi ve yağ elde etme gibi farklı alanlarda kullanılmakta; lifleri ise kâğıt üretiminden tekstil endüstrisine kadar geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Türkiye'de kenevir ekimi geçmişte çeşitli illerde gerçekleştirilmiş, ancak 1930 yıllarında uyuşturucu ile mücadele yasaları nedeniyle büyük ölçüde yasaklanmıştır. Son yıllarda ise savunma sanayinde sentetik liflere alternatif olarak doğal liflerin kullanımı teşvik edilmekte ve kenevir tarımı belirli bölgelerde devlet kontrolünde yeniden başlamıştır. Şu anda yasal ekim bölgeleri arasında Samsun ili, Vezirköprü ilçesi ve Kütahya ilinin bulunduğu bilinmektedir. Bu bölgelerde yetiştirilen kenevir bitkileri, liflerinden yararlanmak üzere özel olarak üretilmektedir (Kaya vd., 2020; Taşlıgil vd., 2019).

### 2.1.9.1. Kenevir Liflerinin Yapısı ve Özellikleri

Kenevir bitkileri, genellikle tek yıllık bitkilerdir ve uzun sap gövdelerine sahiptir. Bu bitkilerin hem dişi hem de erkek türleri mevcuttur. Endüstriyel amaçlar için kullanılan kenevir lifleri, genellikle bitkinin gövde bölgesinin kabuk kısmında bulunur. Her bir lif demetinde, genellikle 35 ila 50 arasında lif hücresi vardır ve bu hücreler son derece ince bir yapıya sahiptir. Özellikle tekstil ürünlerinin üretiminde kullanılan Cannabis Sativa türünün erkek eşeyli bölümü, liflerin sağlam ve dayanıklı olmasıyla bilinir ve bu nedenle kompozit malzeme üretiminde değerli bir kaynak olarak kabul edilir. Kenevir liflerinin kompozit malzeme üretiminde kullanılması sürecinde, liflerin malzemeye kattığı özelliklerin tam olarak anlaşılması önemlidir. Bu, lif yapılarının ve bileşenlerinin detaylı bir şekilde incelenmesini gerektirmektedir (Kaya vd., 2020).

Kenevir lifleri, yapılarında selülozun yanı sıra pektin, hemiselüloz, balmumu ve lignin gibi bileşenleri içermektedir. Pektin madde, kenevir liflerinin su emme özelliğine katkıda bulunan bir sebeptir. Kenevir lifleri sert liflerdir ve kırılma eğilimi gösterebilirler. Lignin maddesi, izotopik bir yapıya sahip olan ve fenilpropan türü bir bileşiktir. Kimyasal uyarıcılara karşı direnç gösterme özelliği ile bilinen lignin, güçlü bir yapıya sahip olduğundan kolayca parçalanamaz. Kenevir lifleri, doğal bir lif türü olup nefes alabilir bir yapıya sahiptir. Bu özelliği liflere, içlerinde bulunan hemiselüloz maddesi sayesinde kazandırılmıştır (Kaya vd., 2020).

Doğal lifler arasında en yüksek dayanıklılığa sahip olan lif türü ramidir. Ancak, kenevir lifleri de yüksek performans sergileyen bir diğer lif türüdür. Kenevir lifleri, sıcaklık değişikliklerinden pek etkilenmez ve yüksek sıcaklıklarda bile mukavemetlerini korurlar. Ayrıca, kenevir lifleri yüksek mukavemet değerlerine sahiptir ve nem tutma kapasiteleri oldukça yüksektir. Bu özellikleriyle kenevir lifleri, özellikle dayanıklı tekstil ürünleri için tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir. Kenevir bitkisi, yetiştirilmesi için fazla suya ihtiyaç duymayan bir türdür ve organik tarım prensipleriyle uyumlu olması toprak korumasına da katkı sağlar. Ayrıca, tarım ilaçları ve gübre kullanımına ihtiyaç duymadan yetiştirilebilir olması, çevre dostu tarım uygulamalarını teşvik eder. Bu özellikler, kenevir liflerinin ekolojik açıdan da tercih edilen bir malzeme olmasını sağlar (Göre vd., 2021).

### **2.1.9.2. Kenevir Liflerinin Kompozit Malzemelerde Kullanım Alanları**

Kenevirin geniş kullanım alanları ve çevre dostu özellikleri, endüstrideki taleplerin karşılanması ve alternatif malzemelerin geliştirilmesi için önemli bir fırsat sunmaktadır. Bu bitkiden elde edilen çeşitli bileşenler, farklı sektörlerde çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Kenevir tohumlarından elde edilen protein tozu, hayvan yemi olarak kullanılarak hayvan beslenmesine katkı sağlamaktadır. Kenevir yağı ise kozmetik, boya ve ilaç endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, kenevir lifleri de önemli bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Lifler, doğru işleme yöntemleriyle ve uygun matris malzemeleriyle birleştirilerek savunma sanayisinden otomotiv sektörüne, kâğıt üretiminden inşaat sektörüne ve tekstil endüstrisine kadar geniş bir yelpazede kullanılabilir. Kenevir liflerinin çevre dostu yetiştirilme ve işlenme süreçleri, aynı zamanda sürdürülebilirlik açısından da önemli bir avantaj sunmaktadır. Bu özellikleriyle kenevir, gelecekte endüstride daha da yaygın olarak kullanılabilir bir malzeme olarak öne çıkmaktadır (Çavdar vd., 2016; Kaya vd., 2020).

Kenevir liflerinin morfolojik yapısı, onlara bir dizi önemli özellik kazandırır. Özellikle yüksek mukavemet ve neme karşı duyarlılık gibi özellikler, bu lifleri tekstil sektöründe tercih edilen bir malzeme haline getirir. Nefes alabilme yetenekleri, giysilerde ve tekstil ürünlerinde kullanıldıklarında rahat bir kullanım sağlar. Bu özellikler, kenevir liflerinin çeşitli endüstrilerde çeşitli amaçlarla kullanılmasını sağlar ve kullanım alanlarına ve gereksinimlerine göre adapte edilebilirliklerini artırır (Gedik vd., 2010).

Kenevir liflerinin biyobozunur olması, çevresel açıdan değerli bir kaynak olarak kabul edilmesini sağlar. Bu özelliği, günümüzde giderek artan yenilenebilir kaynak arayışıyla uyumlu bir şekilde değerlendirilir. Kenevir liflerinin kompozit malzemelerde kullanılması, yüksek dayanıklılık sunarak düşük yoğunluklu malzemelerin üretimini sağlar. Ayrıca, kenevir liflerinin düşük ısı iletim katsayısına sahip olmaları, inşaat sektöründe tercih edilmelerini destekler. Yüksek mukavemet değerleri ise otomotiv sektöründe kullanılmalarını teşvik eder. Özellikle Amerika'daki otomotiv şirketleri, doğal liflerle takviye edilmiş kompozit malzemeleri araç parçalarında yaygın bir şekilde kullanmaktadır, bu da kenevirin endüstriyel uygulamalarındaki önemini vurgular (Çavdar vd., 2016).

Kenevir gibi doğal liflerle oluşturulan kompozit malzemelerin otomotiv endüstrisindeki kullanımı giderek artmaktadır. Önde gelen otomobil üreticileri, örneğin Mercedes gibi markalar, araçlarının çeşitli bileşenlerinde doğal lif takviyeli kompozit malzemeleri tercih etmektedir. Bu malzemeler, araç kapılarından çamurluk kısımlarına, tavan döşemelerinden

bagaj bölmelerine kadar çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Doğal liflerin kullanımıyla elde edilen kompozit malzemeler, hafif, dayanıklı ve çevre dostu olmalarıyla dikkat çekmektedir. Bu sayede otomotiv sektörü için daha sürdürülebilir ve çevreye duyarlı ürünler geliştirilmekte ve yenilikçi tasarımlara imza atılmaktadır.



### 3. MATERYAL VE METOD

#### 3.1. Kenevir Kumaşa Borik Asit Katkılanması

Ticari olarak satın alınan kenevir kumaş %5 NaOH çözeltisi içerisinde 5 dakika boyunca alkali işleme tabi tutulmuştur. Alkali işlemde sonra NaOH uzaklaştırana kadar saf su ile yıkama işlemi yapılmış ve kumaş 12 saat boyunca 80 °C’de kurutulmuştur. Alkali işlem uygulanan kenevir kumaşlara H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> (borik asit) bileşiği %10 oranında katkılanmıştır. Borik asit %10 derişimdeki sulu çözeltisi manyetik karıştırıcı üzerinde 70 °C’de hazır hale getirilmiştir. Daha sonra çözelti içerisine kenevir kumaşlar eklenerek 6 saat işleme tabi tutulmuştur. Son olarak kumaşlar çözelti içerisinden alınarak 100 °C sıcaklıktaki etüvde altı saat boyunca kurumaya bırakılmıştır. Ham kenevir kumaşların hem başlangıç ve hem de katkılama yapıldıktan sonraki ağırlıkları belirlenmiştir. Ham ve borik asit katkılanmış kenevir kumaşların termal davranışları termogravimetrik ve diferansiyel termal analiz (TGA/DTA), yüzey ve içyapı özellikleri ise alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FE-ESEM) ile analiz edilmiştir.

#### 3.2. Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Biyokompozit Üretimi

Tez çalışması kapsamında kenevir esaslı biyokompozit malzemeler vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Takviye malzemesi olarak kenevir kumaş ve matris malzemesi olarak ise L160 epoksi ve H160 sertleştirici karışımı kullanılmıştır. Matris malzeme karışım oranı 1/4 olacak şekilde hazırlanmıştır. Epoksi karışımına manyetik karıştırıcı üzerinde 30 dakika oda sıcaklığında işlem uygulanmıştır. Şekil 3.1’de matris malzemesi hazırlama aşaması gösterilmektedir.

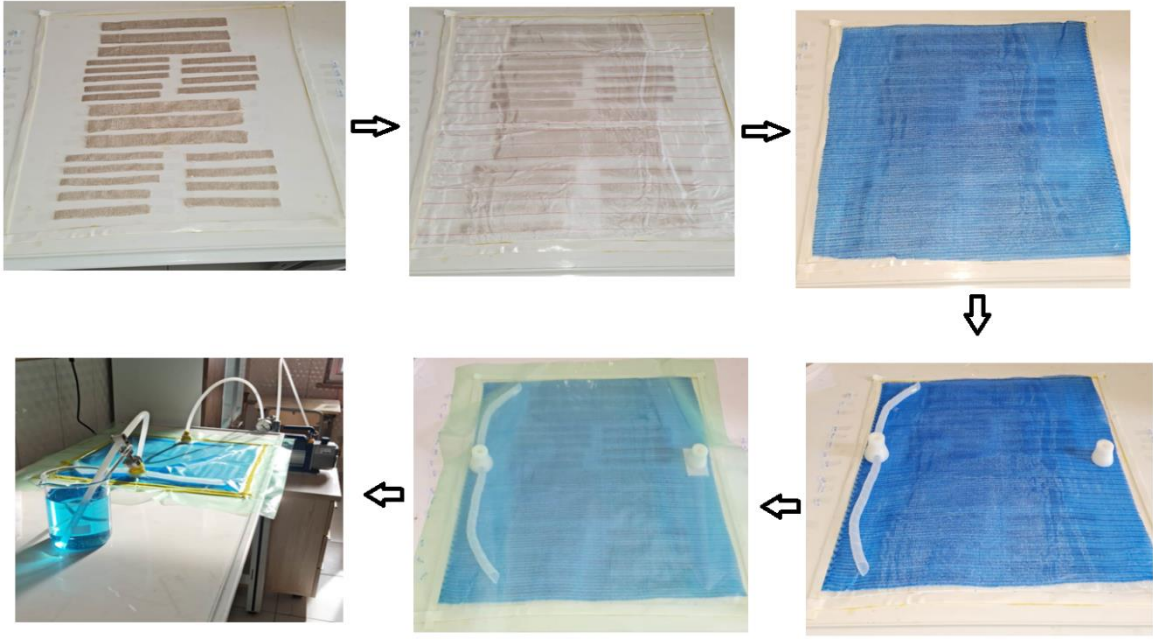


Şekil 3.1. Epoksi karışımın hazırlanması

Düz bir zemin üzerinde sızdırma olamayacak şekilde düzeneek hazırlanmıştır. Zemin üzerine kalıp ayırıcı 3 kat uygulanmasının ardından yüzey kuru bir bez ile silinmiştir. Kenar çerçeve kısımlarda ise çift taraflı yapışkan sızdırmaz bant kullanılmıştır. Sonra temiz yüzeye katkılı ve katkısız kenevir kumaşlar iki kat olacak şekilde üst üste yerleştirilmiştir. Kumaşların üzerine soyma kumaşı (peel ply) yerleştirildikten sonra üzerine reçinenin daha iyi yayılabilmesi için reçine dağıtıcı file konulmuştur. Daha sonra zemin üzerine spiral infüzyon hortumu düzeneğin giriş tarafına (alt kısım), infüzyon kanalı ise çıkış tarafına (üst kısım) yerleştirilmiştir.

Filelere reçine girişini ve çıkışını sağlamak üzere vakum hortumunun bağlantısının yapılacağı infüzyon konnektörü giriş ve çıkış kısımlarındaki infüzyon hortumu ile infüzyon kanalının üzerine yerleştirilmiştir. Son olarak düzeneğin üzeri vakum torbasıyla kapatılmıştır. İnfüzyon konnektörlerinin bulunduğu noktalara vakum hortumu yerleştirilerek etrafı sızdırmaz bant ile kapatılmıştır. Vakum tarafındaki hortumun ucu infüzyon reçine tankının giriş ucuna, infüzyon reçine tankının çıkış ucuna bağlanan vakum hortumunun bir ucu da vakum makinesine bağlanmıştır. İnfüzyon reçine tankı ile vakum makinesi tam vakum altında çalışırken sistemde oluşacak vakum basıncı kontrol edilebilmiştir.

Biyokompozit üretim aşaması için tüm kontroller yapılarak sistemin sızdırmazlığı test edildikten sonra, reçine karışımı  $-0,8$  atm vakum basıncı altında iken sisteme gönderilmeye başlanmıştır. Kenevir kumaşların tamamının matris malzemesi ile ıslanması sağlanana kadar vakum uygulanmış, ardından sistem basıncı  $-0,4$  atm değerine düşürülerek infüzyon hortum kelepçeleri kapatılmış ve kürleşme işleminin gerçekleşmesi için düzeneek bu şekilde 24 saat süresince bekletilmiştir. Biyokompozit numunelerin üretim süreci oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Üretim süreci sonunda iki tabakalı kenevir esaslı biyokompozitler elde edilerek mekanik testler ve yanma testlerinin yapılması için muhafaza edilmiştir. Biyokompozit numunelerin üretim aşamaları ayrıntılı olarak Şekil 3.2’de verilmiştir.



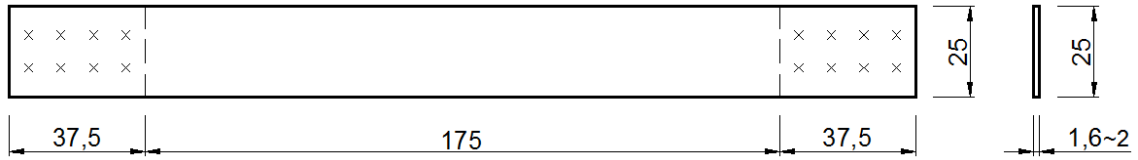
Şekil 3.2. Biyokompozit numunelerin üretim aşamaları

### 3.3. Mekanik Testler

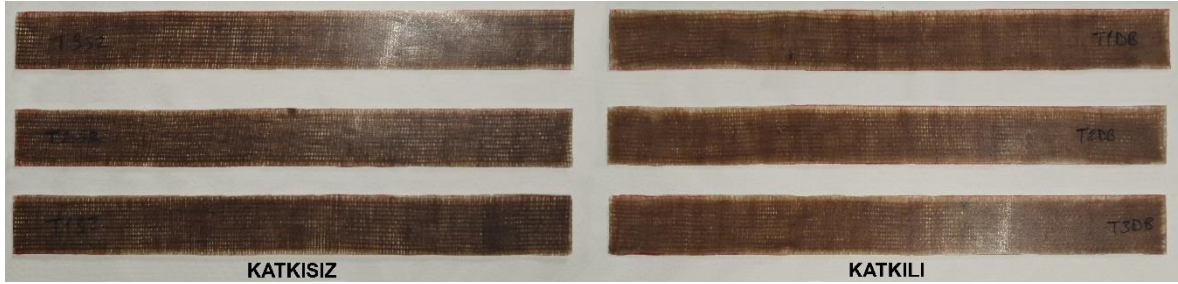
ASTM standartlara göre hazırlanan biyokompozit malzemelere uygulanan mekanik testler Yozgat Bozok Üniversitesi, Kenevir Araştırma Enstitüsü Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda numunelerin eğme ve çekme testleri maksimum yük kapasitesi 50 kN olan ve ekstansometre sistemi ile donatılmış Shimadzu AG-X serisi universal test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Basma ve çekme olmak üzere iki yönlü çalışma özelliğine sahip olan cihaz ile çekme ve üç nokta eğme testleri özel aparatlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

#### 3.3.1. Çekme Deneyi

Çekme testleri ASTM D3039 standardına göre; 1,6~2 mm kalınlığında, 25 mm genişliğinde ve 250 mm uzunluğunda üretilen test numuneleri üzerinde uygulanmıştır (Şekil 3.3). Katkısız ve katkılı kumaşlar kullanılarak üretilen üçer biyokompozit numuneye uygulanan çekme testi sonuçlarının aritmetik ortalaması ve standart sapmaları hesaplanarak kopma uzaması, gerinim yüzdesi, çekme dayanımı ve elastisite modülü belirlenmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.3. Çekme deneyi için hazırlanan numunelerin boyutları (mm)



Şekil 3.4. Çekme deneyi için üretilen numuneler

Çekme testleri oda sıcaklığında, 2 mm/dk test hızında gerçekleştirilmiş olup; numunelerin ilk ölçü boyu 175 mm olacak şekilde, her iki uçtan 37,5 mm'lik kısmı çeneler arasında yerleştirilerek kopma gerçekleşene kadar çekme kuvveti uygulanmıştır (Şekil 3.5). Numunelerin çekme dayanımı (Eşitlik 3.1), şekil değiştirme değeri (Eşitlik 3.2) ile elastisite modülü aşağıda verilen eşitliklere (Eşitlik 3.3) göre hesaplanmıştır.

$$\sigma_{\zeta} = \frac{F}{A} = \frac{F}{bd} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{\zeta} = \frac{\delta}{L} \quad (3.2)$$

$$E = \frac{\sigma_{\zeta}}{\varepsilon_{\zeta}} \quad (3.3)$$

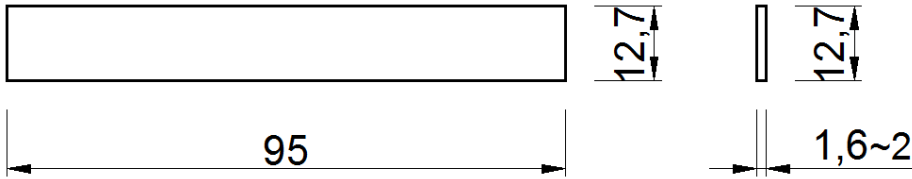
Birinci eşitlikte;  $\sigma_{\zeta}$  çekme dayanımını (gerilme değerini), F maksimum çekme kuvvetini, A numunenin kesit alanını; b numunenin genişliğini, d ise kalınlığını göstermektedir. İkinci ve üçüncü eşitliklerdeki;  $\varepsilon_{\zeta}$  numunedeki uzama değerini,  $\delta$  gerinme uzunluğunu, L numunenin ilk ölçü boyunu, E elastisite modülünü,  $\sigma_{\zeta}$  gerilme değerini ifade etmektedir.



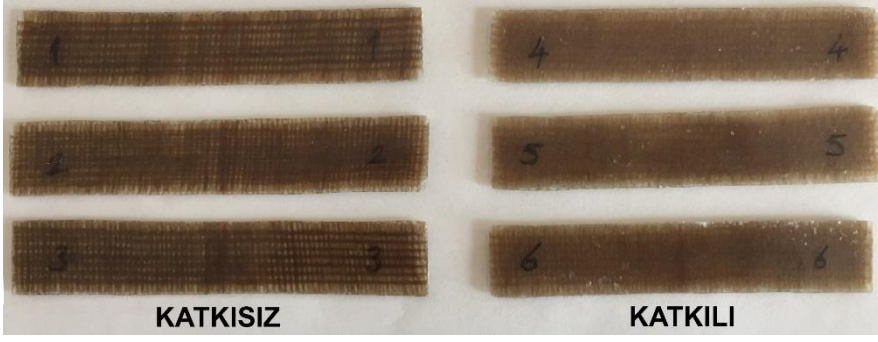
Şekil 3.5. Çekme testi uygulama aşaması

### 3.3.2. Üç Nokta Eğme Deneyi

Üç nokta eğme testleri ASTM D790 standardına göre; 1,6~2 mm kalınlığında, 12,7 mm genişliğinde ve 95 mm uzunluğunda üretilen test numuneleri üzerinde uygulanmıştır (Şekil 3.6). Katkısız ve katkılı kumaşlar kullanılarak üretilen beşer biyokompozit numuneye uygulanan eğme testi sonuçlarının aritmetik ortalaması ve standart sapmaları hesaplanarak eğme deneyi sırasındaki deformasyon miktarı, gerinim yüzdesi, eğme dayanımı ve eğme modülü belirlenmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.6. Üç nokta eğme deneyi için hazırlanan numunelerin boyutları (mm)



Şekil 3.7. Üç nokta eğme deneyi için üretilen numuneler

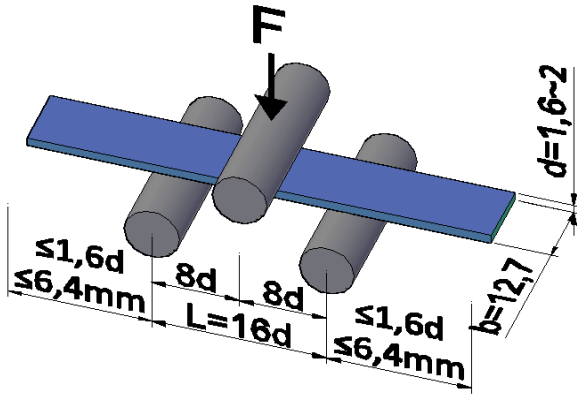
Üç nokta eğme testleri oda sıcaklığında, 2 mm/dk test hızında gerçekleştirilmiştir. Mesnet açıklığı numune kalınlıklarının 16 katı olacak şekilde belirlenen eğme test aparatına yerleştirilen numunelere orta eksenden basma kuvveti uygulanmıştır (Şekil 3.8-3.9). Numunelerin eğme dayanımı (Eşitlik 3.4), şekil değiştirme değeri (Eşitlik 3.5) ile eğme modülü aşağıda verilen eşitliklere (Eşitlik 3.6) göre hesaplanmıştır.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (3.4)$$

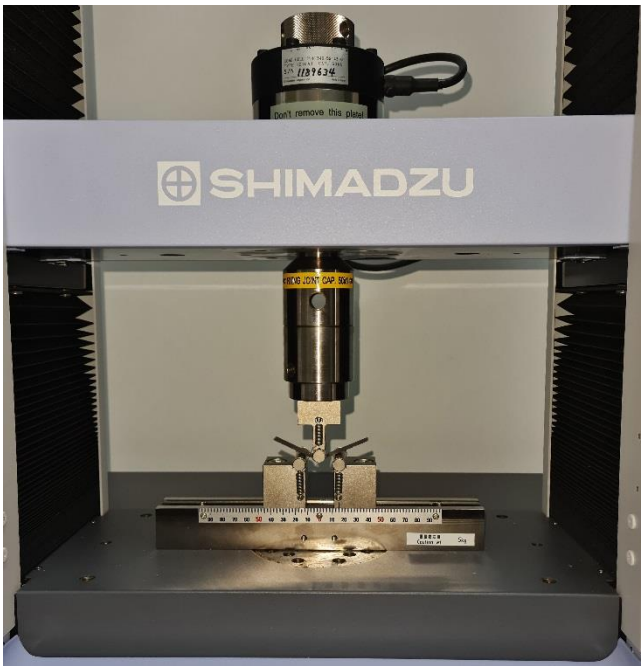
$$\epsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (3.5)$$

$$E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (3.6)$$

Eşitliklerdeki;  $\sigma_f$  eğme dayanımını, F maksimum eğme kuvvetini, L mesnet açıklığını, b numunenin genişliğini, d kalınlığını,  $\epsilon_f$  numunedeki şekil değiştirme değerini, D numunenin orta noktasındaki maksimum sehim değerini,  $E_B$  eğme modülünü, m ise yük-şekil değiştirme eğrisinin eğimini ifade etmektedir.



Şekil 3.8. Üç nokta eğme deneyi modeli (ölçüler mm cinsindendir)



Şekil 3.9. Üç nokta eğme testi uygulama aşaması

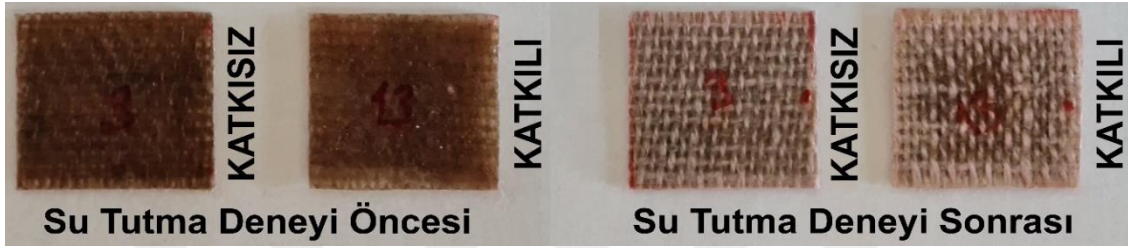
### 3.3.3. Su Tutma Deneyi

Katkılı ve katkısız kenevir kumaş kullanılarak hazırlanan biyokompozitlerin su tutma analizleri için numuneler 25x25 mm boyutlarında kesilmiş ve kalınlıkları dijital kumpas ile ölçülmüştür. Numuneler 60 °C’de 5 saat kurutularak içerisindeki nem alınmıştır. Oda sıcaklığına gelir gelmez tartımları yapılmıştır. Sonra numuneler içerisinde 30 ml saf su bulunan beher içerisinde 30 dakika bekletilmiştir. Daha sonra beher içerisinden alınan numunelerin üzerinde kalan fazla su temizlenerek tartımı alınmıştır. Bu işlemlere 24, 48, 72, 168, 192, 216, 240, 264, 360 ve 384 saatte bir tekrarlanacak şekilde 15 gün boyunca

devam edilmiştir (Şekil 3.10) Laboratuvar ortamındaki nem ise %41 olarak ölçülmüştür. % su tutma miktarı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\% \Delta w_t = \frac{w_l - w_k}{w_k} \times 100 \quad (3.7)$$

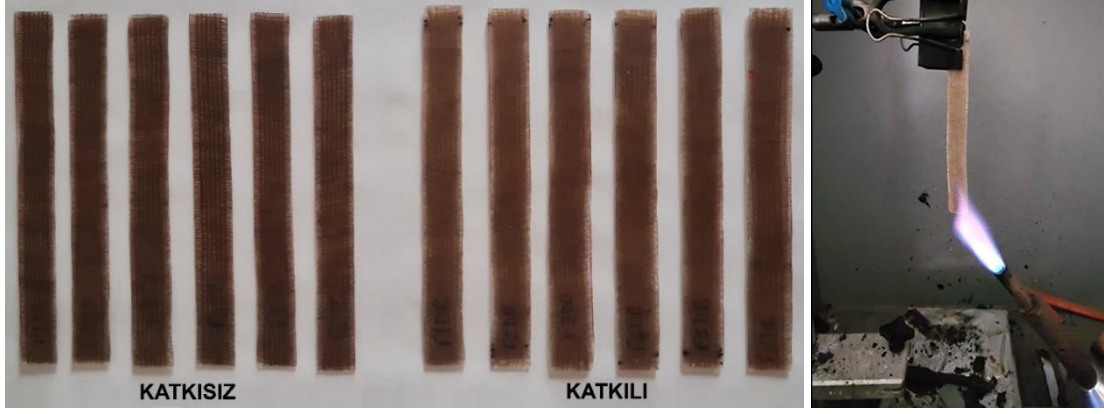
Burada  $w_l$  numunenin belirli bir süre sonraki ıslak ağırlığını ve  $w_k$  ise numunenin kuru ağırlığını göstermektedir.



Şekil 3.10. Biyokompozitlerin su tutma deneyi öncesi ve sonrasına ait görseller

### 3.3.4. UL-94 Dikey Yanma Deneyi

Borik asit katkılı kenevir kumaş kullanılarak üretilen kompozit malzemelerin yanma dayanımlarının tespit edilmesi ve kumaşa katkılanan bor bileşiğinin yanma özelliğine etkisinin incelenmesi amacıyla UL-94 testi yapılmıştır. Şekil 3.11’de üretilen numuneler ve testin uygulamasına ait görseller görülmektedir. UL-94 test standardına göre, plastik malzemenin yanmazlık sınıfı gerçek alev ile numunenin yatay ya da dikey olarak işlem görmesi ile belirlenir. Numuneye alt kısımdan alev tutulur ve bekin üst kısmı ile kenar arasında 10 mm kadar boşluk bırakılır. Öncelikle numuneye 10 s alev uygulanır ve sonra alev en az 30 cm geri çekilir. Alevin sönüp sönmediği ve eğer söndü ise sönme süresi not edilir.



**Şekil 3.11.** Yanma testi için üretilen numuneler ve UL-94 Yanma testi aşaması

Numuneye sönme sonrasında ikinci kez 10 s boyunca alev uygulanır ve sönme süresi kaydedilir. Son olarak tekrar 10 s alev tutulur sönmesinin ardından dalma sonrasında alttaki pamuğun tutuşup tutuşmamasına göre yanma dayanımı V0, V1 ve V2 olarak belirlenir.

### 3.3.5. Termogravimetrik ve Diferansiyel Termal Analiz (TGA/DTA)

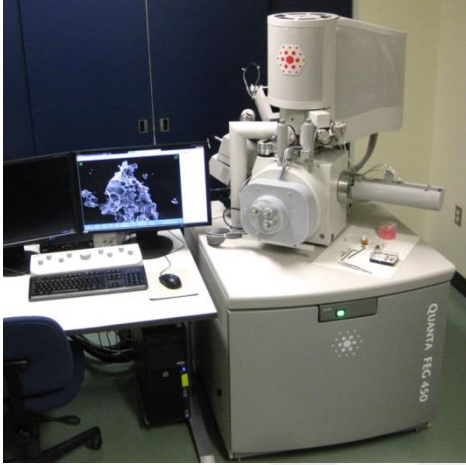
Ham kenevir kumaşı ve borik asit ile katkılanmış kenevir kumaşının termal bozunma özellikleri (Perkin Elmer-Diamond) termogravimetrik ve diferansiyel termal analiz (TGA/DTA) cihazında incelenmiştir (Şekil 3.12). TGA analizleri azot gazı ortamında yapılmış olup, tarama 25-1000 °C sıcaklıkları arasında 10 °C/dakika ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.12.** Termogravimetrik ve Diferansiyel Termal Analiz Cihazı

### 3.3.6. Taramalı Elektron Mikroskobu ile Morfolojik Analizler

Katkılı ve katkısız kenevir kumaşlar ile üretilen biyokompozitlerin morfolojisinin ve ara yüzey özelliklerinin belirlenmesi için FEI-Quanta FEG 450 marka alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FE-ESEM) kullanılmıştır. Numuneler elektrostatik yüklenmeyi önlemek ve net resimler elde etmek için püskürtme cihazı kullanılarak 25 s süresince altın ile kaplandı. Sonrasında yüzey ve kesit görüntüleri alınarak ölçümler tamamlanmıştır.

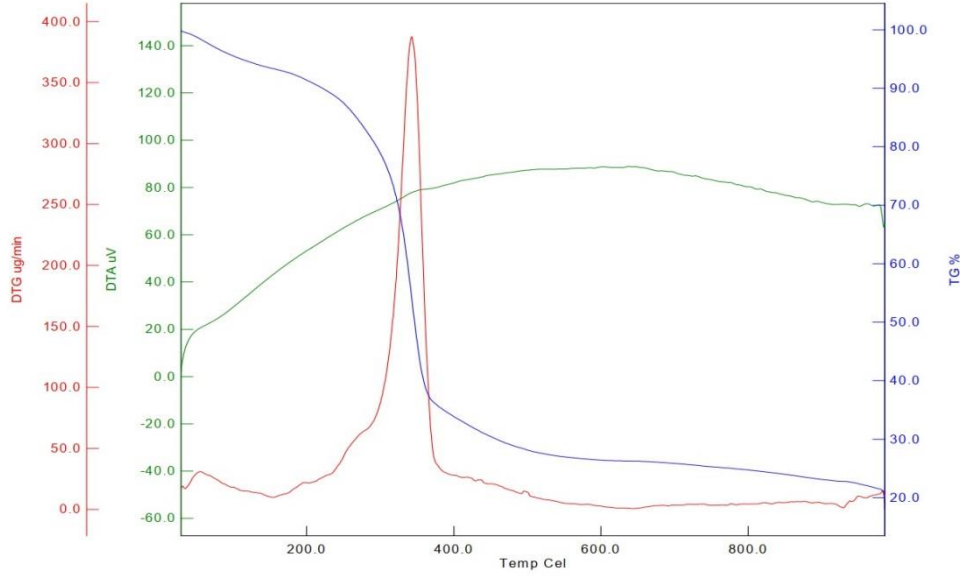


Şekil 3.13. Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-ESEM)

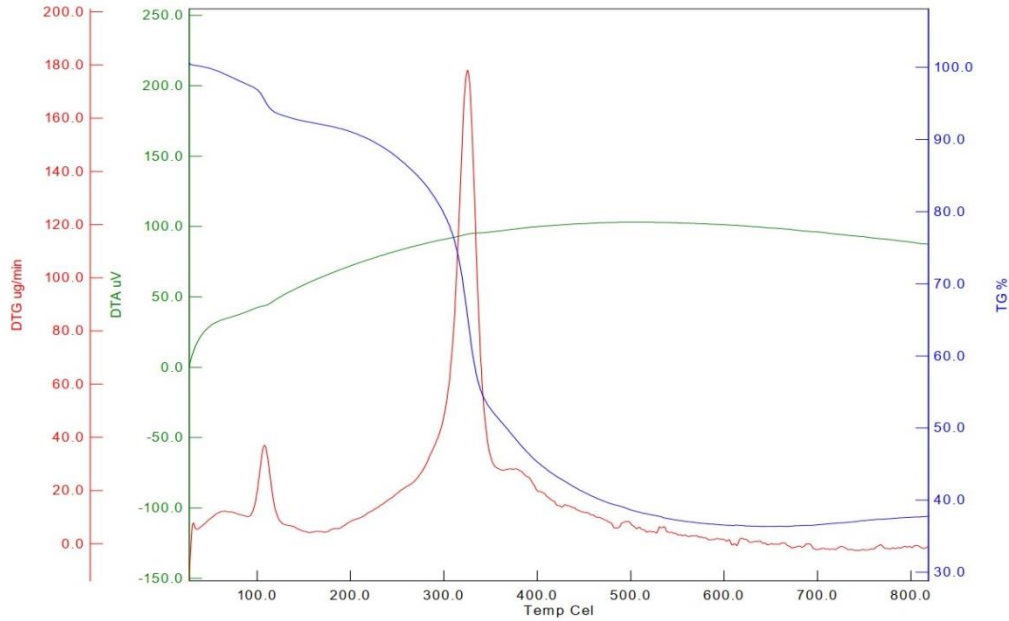
## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. TGA/DTA Analizi

Ham ve %10 borik asit katkılanmış kenevir kumaş malzemelerin bozunma sıcaklıklarının ve yapısal özelliklerinin incelenmesi amacıyla yapılan termogravimetrik analiz sonuçları Şekil 4.1, 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Katkılanmamış kenevir kumaşa ait TGA/DTA grafiği

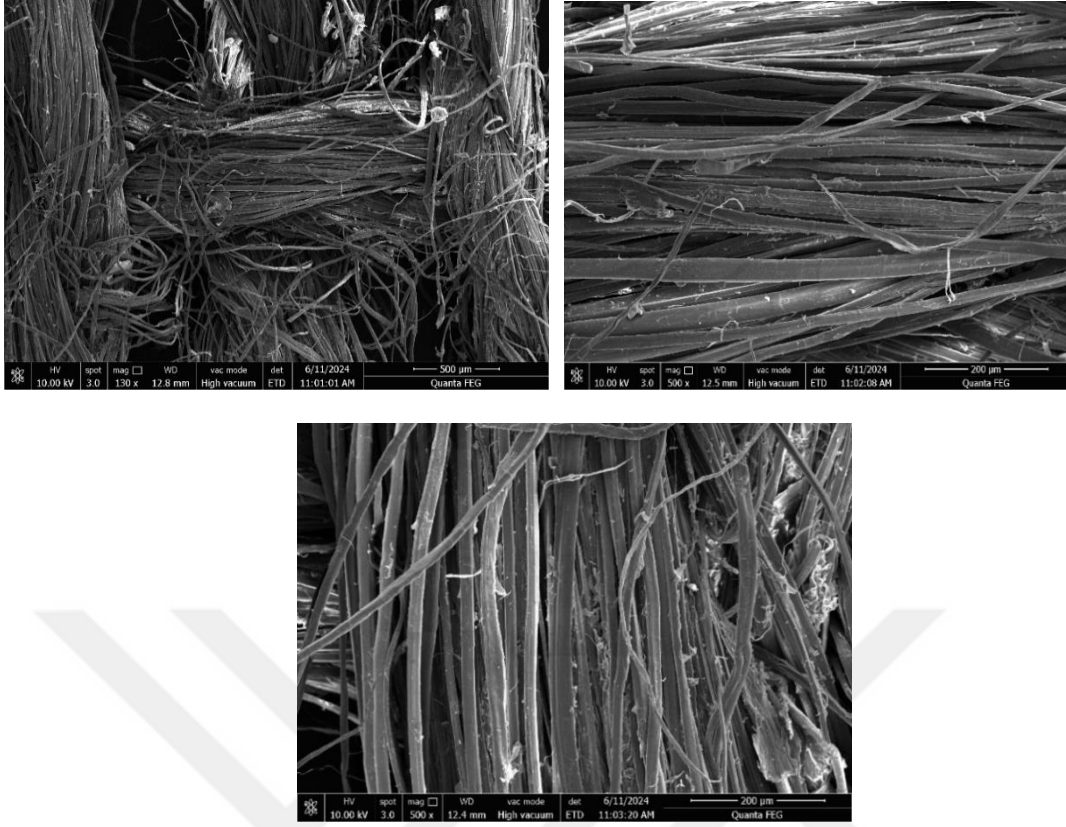


Şekil 4.2. %10 derişimdeki borik asit çözeltisi ile katkılanmış kenevir kumaşa ait TGA/DTA grafiği

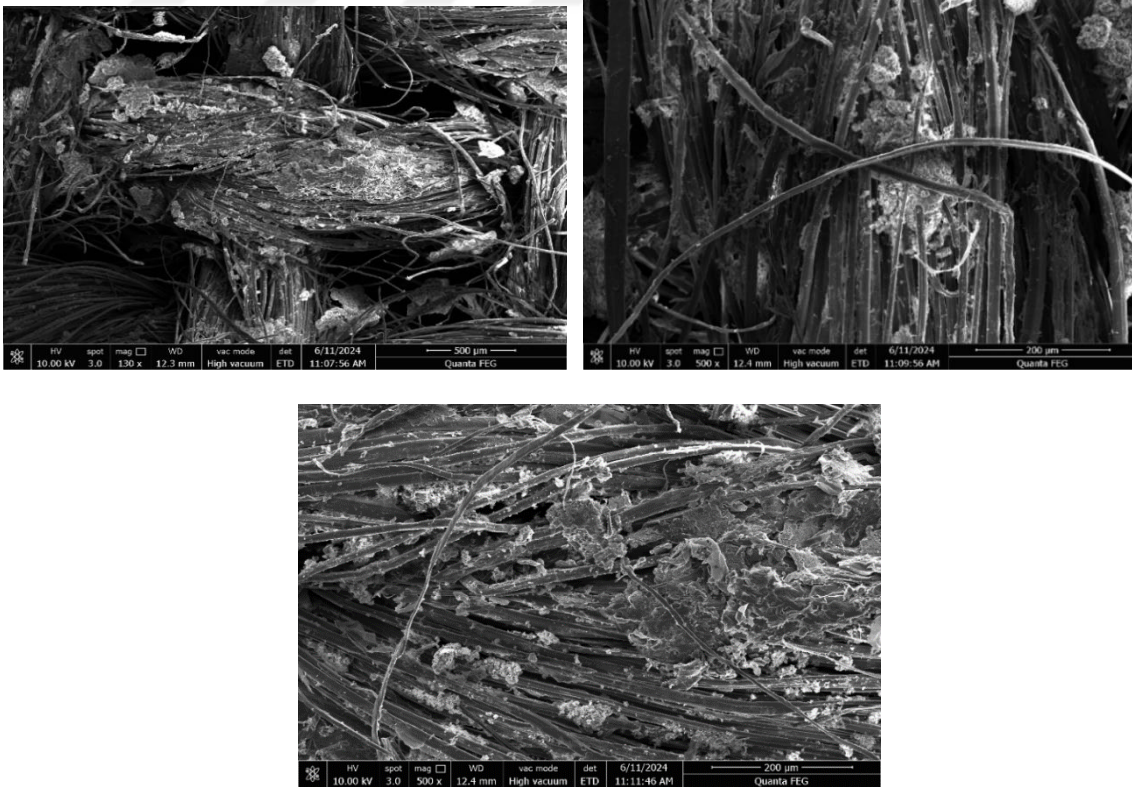
Katkılanmamış ve %10 derişimde borik asit çözeltilisi ile katkılanmış kenevir kumaşlarının TGA/DTA grafiklerine göre, ikisinin de tek aşamada bozunmaya uğradığı görülmektedir. Buna göre ilk olarak 100 °C civarında, kumaş içerisinde bulunan nem uzaklaşmaktadır. 250-400 °C arasında gözlenen endotermik pik hemiselüloz ve selülozun bozunmasından kaynaklanmaktadır. Kenevirin yapısındaki hemiselüloz ve selülozun maksimum bozunma sıcaklıkları değerlendirildiğinde; ham kumaş için 382 °C, %10 borik asit katkılı kumaş için 321 °C olduğu görülmektedir. Borik asit ile katkılama işlemi sonucunda modifiye edilmiş kenevir kumaşının termal olarak daha kararlı yapıya ulaştığı belirlenmiştir. Ayrıca yanma işlemi sonrasında %10 derişimde borik asit çözeltilisi ile modifikasyon işlemi uygulanan kumaştan ham kenevir kumaşına göre %72 oranında daha fazla biyoçar elde edildiği tespit edilmiş olup, bu sonuca göre %10 katkılama oranındaki kenevir kumaşının yanma dayanımının daha fazla olduğu ortaya konulmuştur.

#### **4.2. SEM-EDS Analizi**

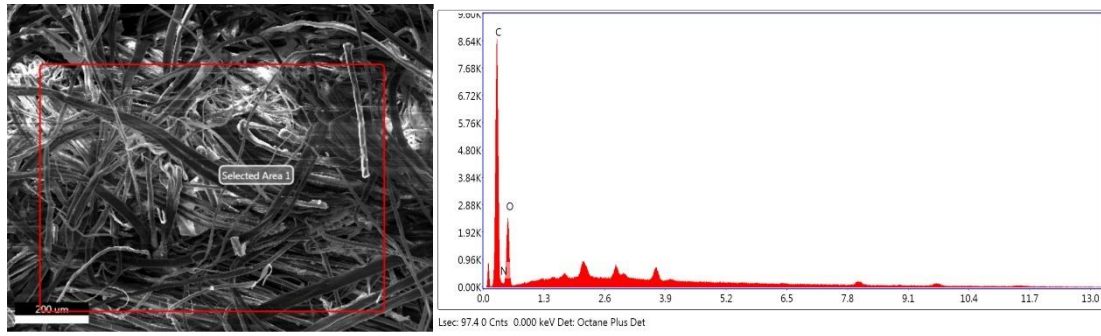
Katkısız ve %10 borik asit katkılanmış kenevir kumaşların morfolojisi ve üretilen biyokompozitlerin yüzey ve arayüzey özelliklerinin belirlenmesi taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) ve kimyasal bileşen analizi ise enerji dağılım spektroskopisi (EDS) kullanılarak ayrıntılı olarak incelenmiştir. %10 borik asit katkılı ve katkısız kenevir kumaşların SEM-EDS analiz sonuçları Şekil 4.3-4.6'da görülmektedir. Sem görüntülerinden görüldüğü üzere bor bileşiğinin liflerin içerisine homojen ve küçük boyutlarda ve homojen dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır. Ayrıca EDS analiz sonucundan da liflerin içerisinde borun başarılı bir şekilde katkılандığı ve ağırlıkça %14 civarında olduğu belirlenmiştir.



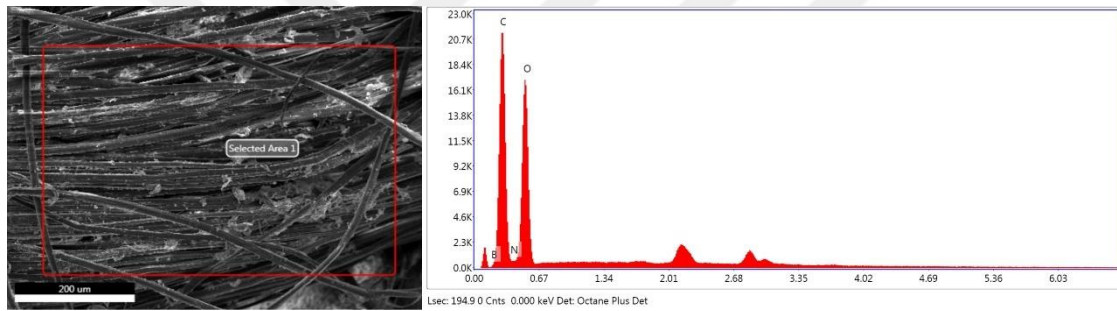
Şekil 4.3. Katkısız kenevir kumaşlara ait SEM görüntüleri



Şekil 4.4. %10 borik asit katkılı kenevir kumaşlara ait SEM görüntüleri



Şekil 4.5. Katkısız kenevir kumaşlara ait EDS sonuçları

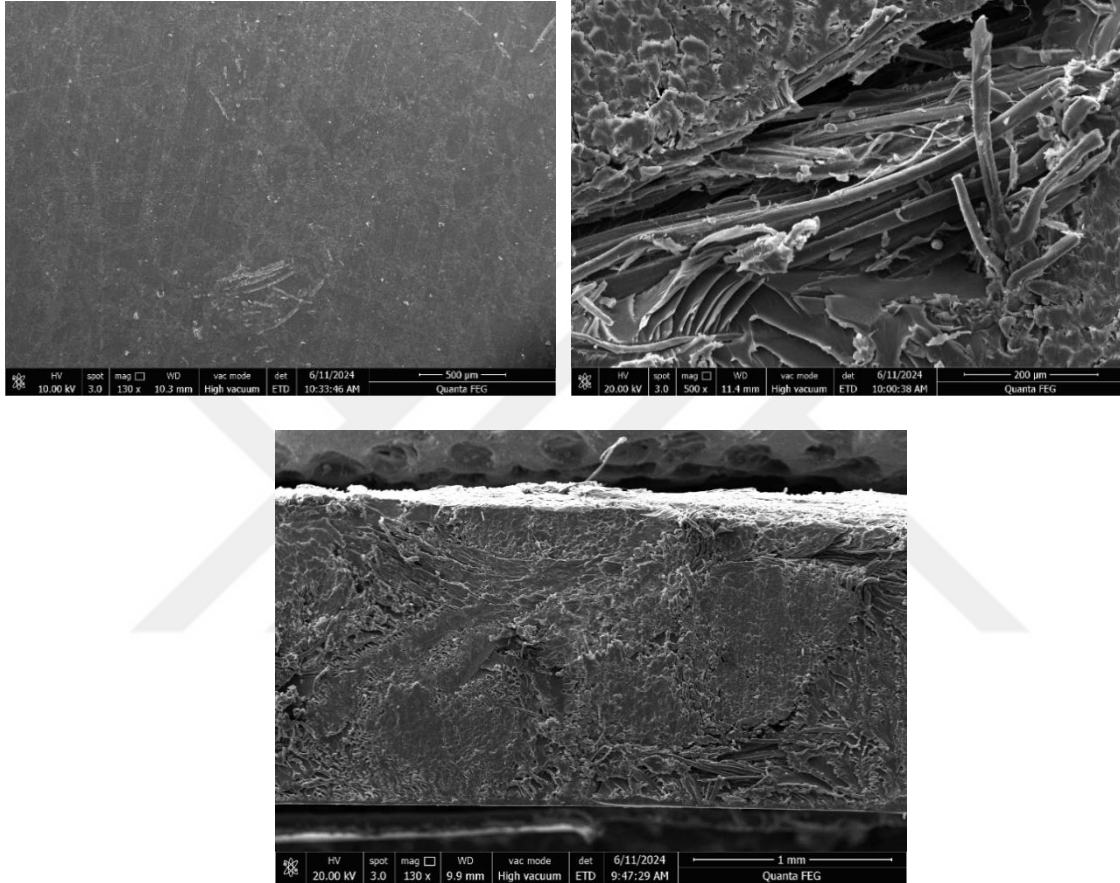


Şekil 4.6. %10 borik asit katkılı kenevir kumaşlara ait EDS sonuçları

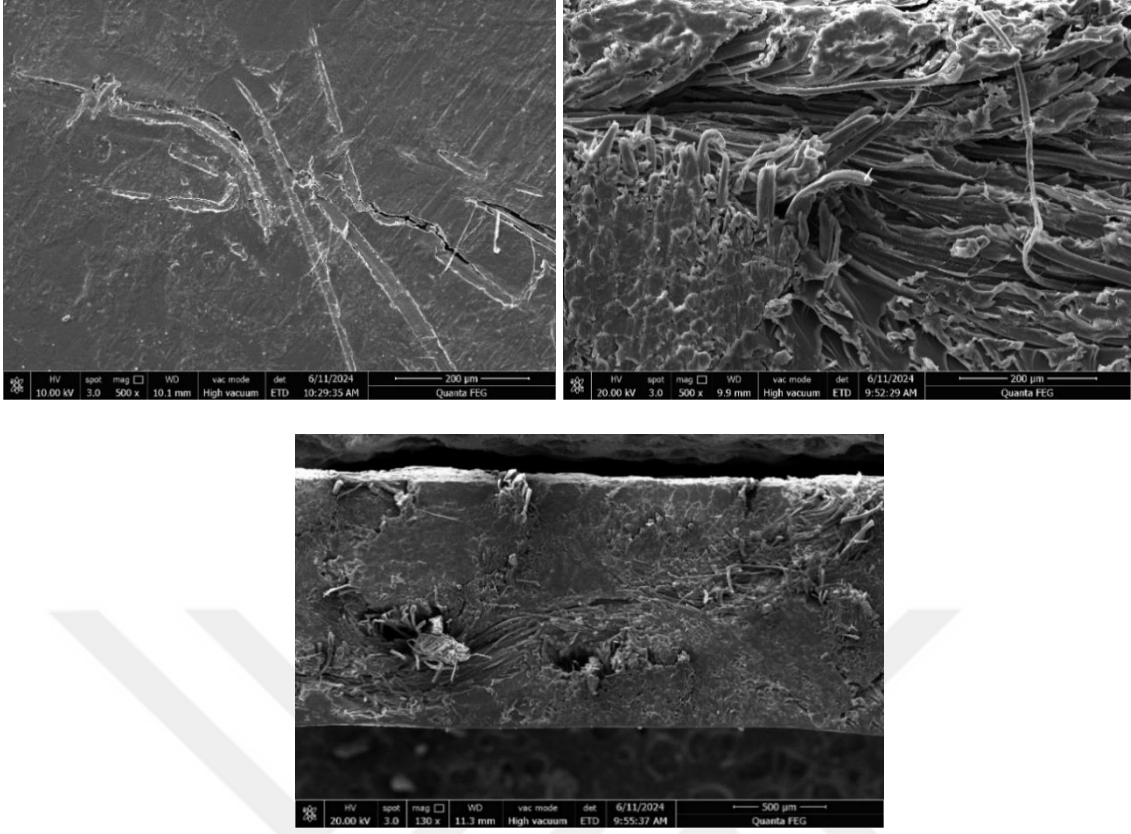
Üretilen biyokompozitlerin su yutumu öncesi, sonrası yüzey ve ara yüzeylerine ait SEM görüntüleri Şekil 4.8-4.10'da verilmiştir. Lif matris ara yüzey bağının kompozitin mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir unsur olduğu bilinmektedir. Katkılı ve katkısız biyokompozitlerde lif ile matris arasında boşluk olmadığı, matris yüzeyini tam olarak kapladığı ve liflerin üzerinde matris kalıntıları olduğu Şekil 4.7 ve 4.9'da gözlenmiştir.

Şekil 4.8 ve Şekil 4.10'da su tutma sonrasında kompozitlerin yüzey ve kesit kısımlarından alınmış olan SEM görüntüleri verilmiştir. Su tutma sonrasında katkılı ve katkısız

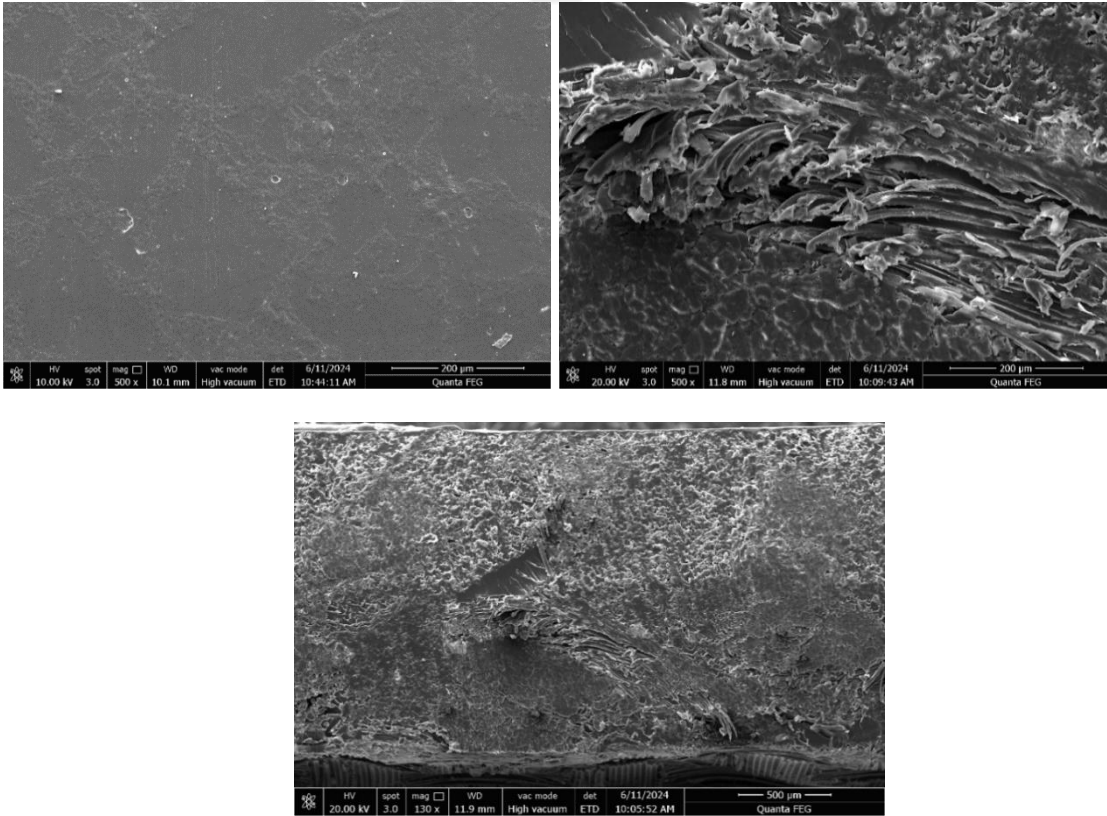
biyokompozitlerde liflerin parçalanarak mikro fibrillerin ortaya çıktığı görülmektedir. Suda bekletme sonucunda suyun, lif ile matris arayüzeyinde boşluklar oluşturduğu ve lifin kesitinde de artışa sebep olduğu belirlenmiştir. Yüzey görüntülerinden kompozit yüzeyinde çatlaklar oluştuğu ve kesit görüntülerinden ise lif ile matris ara yüzeyindeki boşlukların oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, çatlak ve boşlukların matris yüzeyinde de oluştuğu belirlenmiştir.



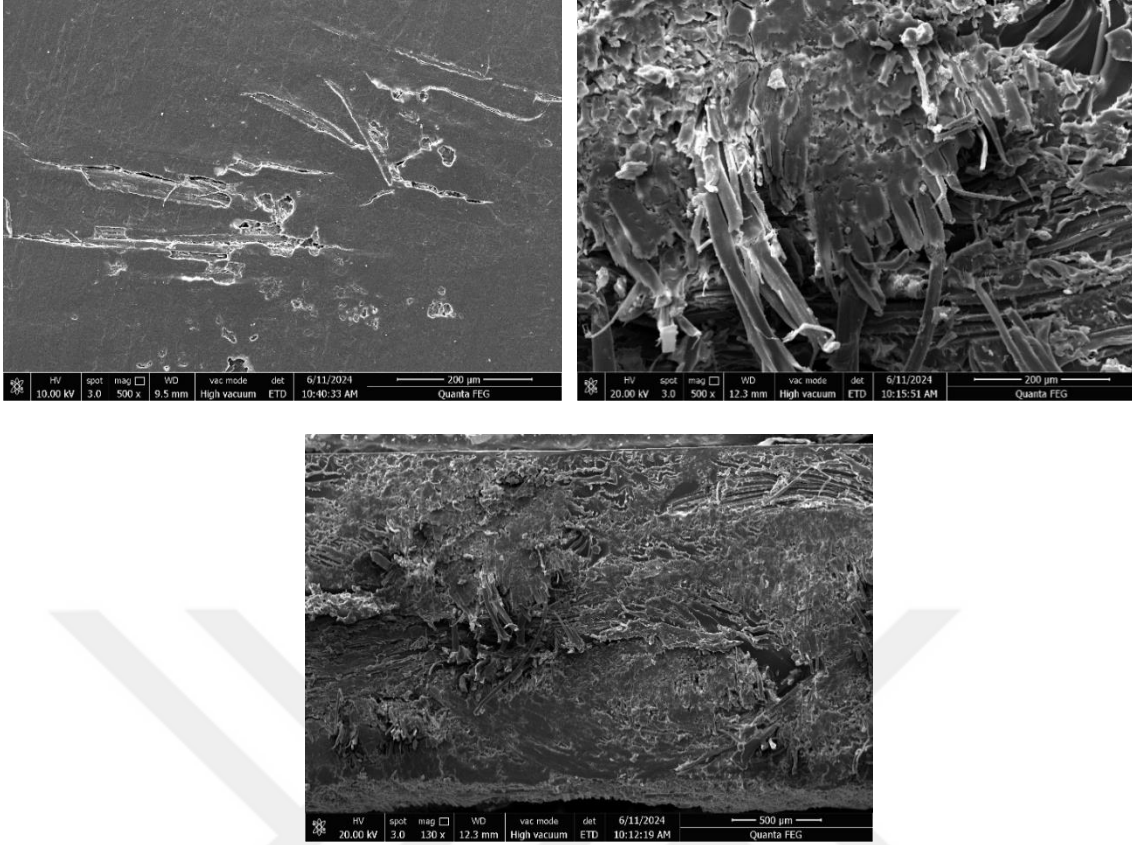
Şekil 4.7. Katkısız biyokompozitin su yutumu öncesi SEM görüntüleri



Şekil 4.8. Katkısız biyokompozitin su yutumu sonrası SEM görüntüleri



Şekil 4.9. Katkılı biyokompozitin su yutumu öncesi SEM görüntüleri



Şekil 4.10. Katkılı biyokompozitin su yutumu sonrası SEM görüntüleri

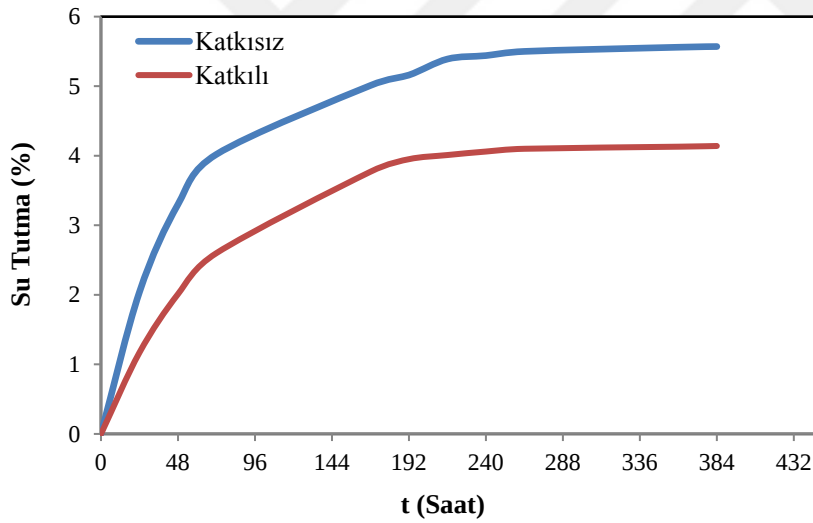
#### 4.3. Su Tutma Deneyi Sonuçları

Doğal liflerin ve polimer matris malzemelerin genel olarak suya ilgileri yüksektir. Doğal liflerin hidrofilik yapısı sebebi ile su tutma kapasitesinin fazla olması mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Sulu ortamda lifler şişerek matris etrafında mikro düzeyde çatlak oluşumu meydana gelir. Sırasında ise mikro çatlaklardan suyun yayılması ile kapiler etki oluşur. Daha sonra suyun difüzyonu lifleri çözerek lif kesitini küçültür ve lif matris ara yüzeyinde boşluk oluşmasına sebep olur. Sonunda su ortamdan uzaklaştırılsa bile malzeme özelliğini kaybetmiş olduğundan mekanik özelliklerinde zayıflama meydana gelir. Bu özelliğinin belirlenmesi amacı ile üretilen biyokompozitlerin su tutma miktarı ve borik asit katkılanması işleminin su tutma kapasitesine etkileri incelenmiştir. Biyokompozit malzemelerin zamana bağlı olarak su tutma oranları hesaplanmıştır. Sulu ortamda bırakılan malzemelere 24, 48, 72, 168, 192, 216, 240, 264, 360 ve 384 saat olmak üzere 11 farklı süre aralığında test uygulanmıştır. Aynı numune grubu için üç paralel çalışılmış olup ortalama sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir.

**Tablo 4.1.** Biyokompozitlerin su tutma miktarlarının zamanla değişim değerleri

|                                                                    | t (saat) |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------------------------------------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                                                    | 0        | 24     | 48     | 72     | 168    | 192    | 216    | 240    | 264    | 360    | 384    |
| <b>Katkısız<br/>Biyokompozit<br/>(Kütle (g))</b>                   | 1,1132   | 1,1359 | 1,1499 | 1,1579 | 1,1690 | 1,1706 | 1,1732 | 1,1738 | 1,1744 | 1,1753 | 1,1762 |
| <b>%10 Borik<br/>Asit Katkılı<br/>Biyokompozit<br/>(Kütle (g))</b> | 1,4022   | 1,4187 | 1,4304 | 1,4390 | 1,4551 | 1,4576 | 1,4587 | 1,4591 | 1,4597 | 1,4601 | 1,4603 |

384 saat suda bekletildikten sonra yapılan tartımlar sonucunda bor katkılı kenevir kumaş ile üretilen biyokompozit numunesinin su tutma oranı %4,14 iken katkısız biyokompozitin %5,57 olarak belirlenmiştir. Takviye malzemesine bor katkılama sonucunda su tutma oranının daha düşük olduğu ve su tutma oranını (%26) azaltılmasında olumlu etki yaptığı görölmektedir (Şekil 4.11).



**Şekil 4.11.** Biyokompozit malzemelerin su tutma yüzdeleri

Liflerin yapısına bor bileşiklerinin girmesi ve ayrıca liflerin yüzeyinin de ağırlıklı olarak borik asit ile kaplanması sonucunda liflerin su ile muamelesini azalttığı söylenebilir. Ayrıca kumaş yüzeyinde de bulunan borik asit katkısı ile kompozit ara yüzeyinin iyileşmesi ve boşluklu yapıyı azaltması sayesinde suyun difüzyon hızının yavaşlamasında da etkili olduğu şeklinde açıklanabilir.

#### 4.4. Yanmazlık Deneyi Sonuçları

Biyokompozitlerin yanma dayanımları ve tutuşabilirlik özelliği UL-94 testi kullanarak analiz edilmiştir. Sonuçlara göre bor katkılı kompozitin yanma süresinin ~60 s iken katkısız kompozitin ise 10 s civarında olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bor katkısının alevin ilerlemesini yavaşlattığı ve alev şiddetini azalttığı gözlemlenmiştir. Kullanılan matris malzemenin yanıcı özelliğinin fazla olmasından dolayı kompozitler için herhangi bir yanıcılık sınıfı belirlenememiştir. Buna rağmen beklenildiği üzere, borik asit katkısı ile kompozit malzemenin yanma dayanımının arttırıldığı ve alevlenme özelliğinin iyileştirildiği sonucuna varılmıştır.

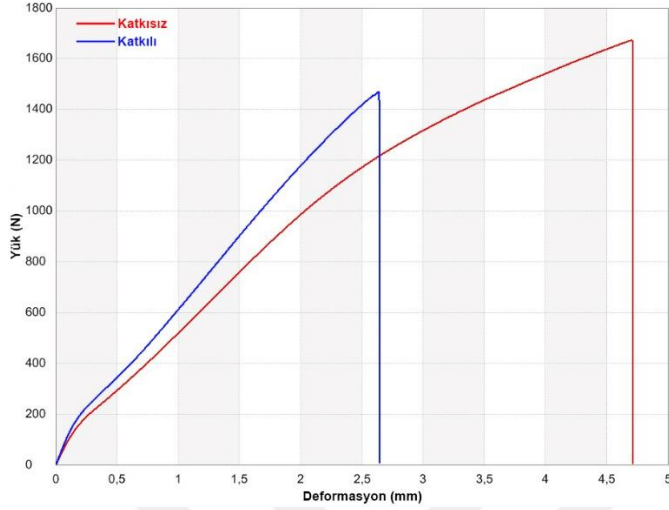
#### 4.5. Çekme Deneyi Sonuçları

Çekme deneyi sonuçlarına göre katkısız kenevir kumaşlarından üretilen biyokompozitlerin çekme dayanımının ve elastisite modülünün katkılı kenevir kumaşlarından üretilen biyokompozitlere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Borik asit ile katkılanmış numunelerin çekme dayanımının %28,6 ve elastisite modülünün %7,1 oranında daha düşük olduğu; uzama miktarının ise %43,9 daha az olduğu belirlenmiştir. Kenevir kumaşının %10 borik asit ile katkılanması çekme mukavemetinin yaklaşık 1/4 oranında azalmasına neden olurken; elastisite modülündeki azalma daha sınırlı düzeyde kalmıştır (Tablo 4.2).

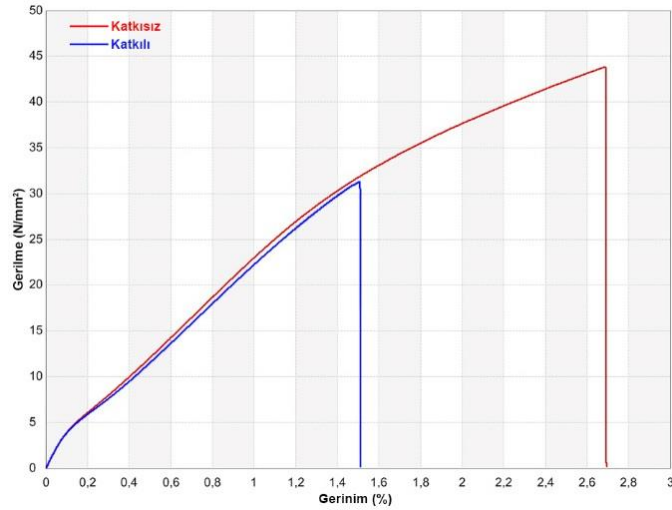
**Tablo 4.2.** Çekme deneyi sonuçları

| <i>Numune Adı</i>              | <i>Kopma Kuvveti (Max.) (N)</i> | <i>Uzama (Max.) (mm)</i> | <i>Gerinim (Max.) (%)</i> | <i>Çekme Dayanımı (<math>\sigma_c</math>) (N/mm<sup>2</sup>)</i> | <i>Elastisite Modülü (E) (N/mm<sup>2</sup>)</i> |
|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Katkısız 1                     | 1666,02                         | 4,88                     | 2,79                      | 47,21                                                            | 2213,89                                         |
| Katkısız 2                     | 1670,04                         | 4,72                     | 2,70                      | 42,05                                                            | 1642,30                                         |
| Katkısız 3                     | 1675,70                         | 4,54                     | 2,59                      | 42,15                                                            | 1967,00                                         |
| <b>Ortalama</b>                | <b>1670,59</b>                  | <b>4,71</b>              | <b>2,69</b>               | <b>43,80</b>                                                     | <b>1941,06</b>                                  |
| <b>Standard Sapma</b>          | <b>3,97</b>                     | <b>0,14</b>              | <b>0,08</b>               | <b>2,41</b>                                                      | <b>234,07</b>                                   |
| <b>Varyasyon Katsayısı (%)</b> | <b>0,24</b>                     | <b>2,94</b>              | <b>2,94</b>               | <b>5,51</b>                                                      | <b>12,06</b>                                    |
| Katkılı 1                      | 1548,12                         | 2,79                     | 1,60                      | 32,01                                                            | 1816,88                                         |
| Katkılı 2                      | 1459,82                         | 2,74                     | 1,56                      | 31,52                                                            | 1684,74                                         |
| Katkılı 3                      | 1396,64                         | 2,40                     | 1,37                      | 30,33                                                            | 1907,46                                         |
| <b>Ortalama</b>                | <b>1468,19</b>                  | <b>2,64</b>              | <b>1,51</b>               | <b>31,29</b>                                                     | <b>1803,03</b>                                  |
| <b>Standard Sapma</b>          | <b>62,12</b>                    | <b>0,17</b>              | <b>0,10</b>               | <b>0,70</b>                                                      | <b>91,45</b>                                    |
| <b>Varyasyon Katsayısı (%)</b> | <b>4,23</b>                     | <b>6,48</b>              | <b>6,48</b>               | <b>2,25</b>                                                      | <b>5,07</b>                                     |

Borik asit katkılı kumaşlardan üretilen biyokompozitlerin 600-1400 N arasında uygulanan yük karşısında daha az şekil değiştirmeye maruz kaldığı  $31 \text{ N/mm}^2$ 'lik gerilme sonrasında ise malzemede kopmanın gerçekleştiği belirlenmiştir (Şekil 4.12-4.13).



Şekil 4.12. Çekme deneyi, yük-deformasyon grafiği



Şekil 4.13. Çekme deneyi, gerilme-gerinim grafiği

#### 4.6. Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

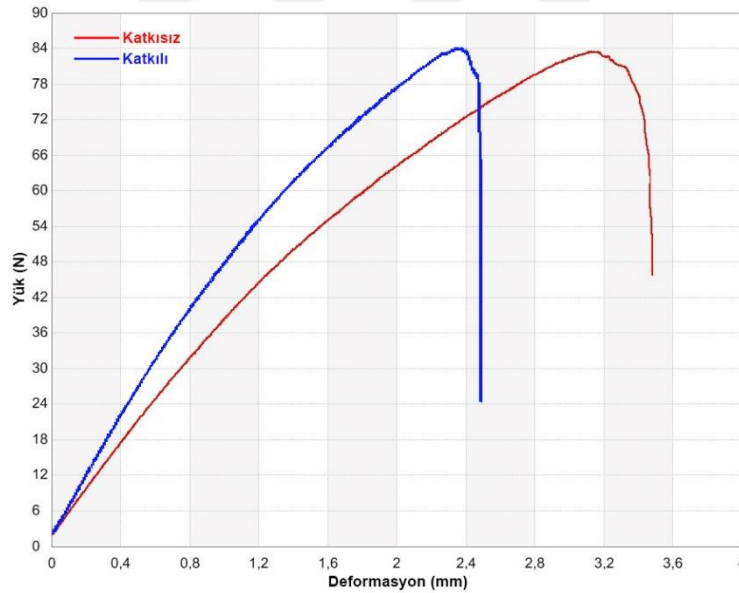
Eğme deneyi sonuçlarına göre katkısız kenevir kumaşlarından üretilen biyokompozitlerin katkılı kenevir kumaşlarından üretilen biyokompozitlere göre eğme dayanımının daha yüksek, eğme modülünün ise daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Borik asit ile katkılanmış numunelerin eğme dayanımının %13,6 daha düşük, eğme modülünün %32,8 oranında daha yüksek olduğu; deformasyon miktarının ise %32,6 daha az olduğu belirlenmiştir. Kenevir

kumaşının %10 borik asit ile katkılanması eğme mukavemetinin yaklaşık 1/7 oranında azalmasına neden olurken; eğme modülündeki artış 1/3 oranındadır (Tablo 4.3).

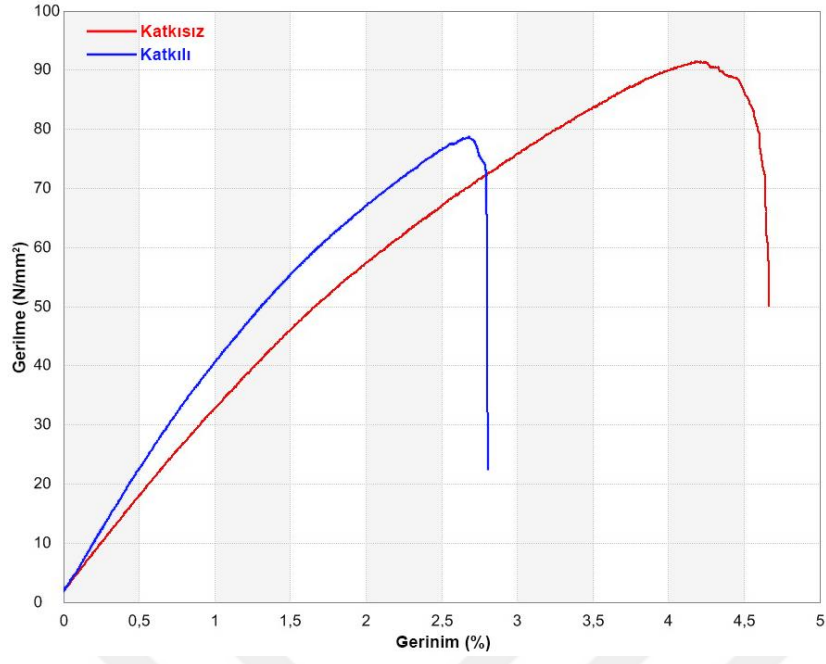
**Tablo 4.3.** Eğme deneyi sonuçları

| <i>Numune Adı</i>              | <i>Yük (Max.) (N)</i> | <i>Deformasyon (Max.) (mm)</i> | <i>Gerinim (Max.) (%)</i> | <i>Eğme Dayanımı (<math>\sigma_f</math>) (N/mm<sup>2</sup>)</i> | <i>Eğme Modülü (<math>E_B</math>) (N/mm<sup>2</sup>)</i> |
|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Katkısız 1                     | 88,08                 | 3,18                           | 4,13                      | 99,38                                                           | 3925,02                                                  |
| Katkısız 2                     | 88,05                 | 3,26                           | 4,51                      | 93,83                                                           | 3061,72                                                  |
| Katkısız 3                     | 75,44                 | 3,08                           | 4,11                      | 82,40                                                           | 2486,64                                                  |
| <b>Ortalama</b>                | <b>83,85</b>          | <b>3,17</b>                    | <b>4,25</b>               | <b>91,87</b>                                                    | <b>3157,79</b>                                           |
| <b>Standard Sapma</b>          | <b>5,95</b>           | <b>0,07</b>                    | <b>0,19</b>               | <b>7,07</b>                                                     | <b>591,13</b>                                            |
| <b>Varyasyon Katsayısı (%)</b> | <b>7,10</b>           | <b>2,25</b>                    | <b>4,38</b>               | <b>7,70</b>                                                     | <b>18,72</b>                                             |
| Katkılı 1                      | 92,03                 | 2,56                           | 2,87                      | 87,50                                                           | 4314,62                                                  |
| Katkılı 2                      | 86,86                 | 2,49                           | 2,76                      | 84,19                                                           | 4546,32                                                  |
| Katkılı 3                      | 76,48                 | 2,13                           | 2,46                      | 66,40                                                           | 3718,52                                                  |
| <b>Ortalama</b>                | <b>85,12</b>          | <b>2,39</b>                    | <b>2,70</b>               | <b>79,36</b>                                                    | <b>4193,15</b>                                           |
| <b>Standard Sapma</b>          | <b>6,46</b>           | <b>0,19</b>                    | <b>0,17</b>               | <b>9,27</b>                                                     | <b>348,69</b>                                            |
| <b>Varyasyon Katsayısı (%)</b> | <b>7,59</b>           | <b>7,92</b>                    | <b>6,47</b>               | <b>11,68</b>                                                    | <b>8,32</b>                                              |

Borik asit katkılı kumaşlardan üretilen biyokompozitlerin 6-78 N arasında uygulanan yük karşısında daha az şekil değiştirmeye maruz kaldığı 79 N/mm<sup>2</sup>'lik gerilme sonrasında ise malzemede kırılmanın gerçekleştiği belirlenmiştir (Şekil 4.14-4.15).



**Şekil 4.14.** Eğme deneyi, yük-deformasyon grafiği



Şekil 4.15. Eğme deneyi, gerilme-gerinim grafiği

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında takviye malzemesi olarak borik asit katkılı kenevir lifleri matris malzemesi olarak ise epoksi kullanılarak vakum infüzyon yöntemi ile biyokompozit malzemeler üretilerek yapısal ve mekanik özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Borik asit katkılanması ile bozunma sıcaklığında artışın sağlandığı TGA/DTA analizi ile belirlenmiştir. SEM-EDS analizleri ile kenevir kumaşların yüzey ve kimyasal bileşimleri ayrıntılı olarak incelenerek borik asitin başarılı bir şekilde liflere katkılандığı görülmüştür. Ayrıca üretilen biyokompozitlerin yüzey ve arayüzey kesit görüntüleri de aynı şekilde incelenerek lif ile matris arasında boşluk olmadığı ve matrisin yüzeyi tam olarak kapladığı belirlenmiştir. Eğme deneyi sonuçlarına göre katkısız kenevir kumaşlarından üretilen biyokompozitlerin katkılı kenevir kumaşlarından üretilen biyokompozitlere göre eğme dayanımının daha yüksek, eğme modülünün ise daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Çekme dayanımında ise katkısız biyokompozitin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Takviye malzemesine bor katkılama sonucunda su tutma oranının daha düşük olduğu ve su tutma oranını azaltılmasında olumlu etki yaptığı bulunmuştur.

Araçlarda konsol parçası olarak kullanılan parçanın ana malzemesi olan PVC'nin özellikleri için sınır şartları; 36.5 MPa eğilme dayanımı, 30 MPa çekme dayanımı ve 65 °C kullanım sıcaklığı şeklindedir. Tez çalışması kapsamında, katkısız kenevir kumaşının takviye malzemesi olarak kullanılmasıyla üretilen biyokompozitin çekme dayanımı 43,80 MPa, katkılı kumaş ile üretilenin ise 31,29 MPa olarak bulunmuştur. Üretilen biyokompozitlerin eğilme dayanımı ise katkısız için 91,87 MPa ve katkılı için 79,36 MPa olarak belirlenmiştir. Borik asit katkılı kenevir kumaşı ile üretilen biyokompozitlerin elastisite modülünde yaklaşık 1/14 oranında azalma meydana gelmiş olup; eğme modülünde yaklaşık 1/3 oranında artış sağlanmıştır. Borik asit katkısı ile biyokompozitin yanıcılık özelliği iyileştirilmiş ancak hedeflenen özelliğe (alev yürütmez) getirilememiştir. Kullanılan matris malzemesi nedeniyle geliştirilen biyokompozit 65 °C kullanım sıcaklığı değeri için sınır şartlarını sağlamamakta olup; kullanılan matris malzemesinin termosetler grubunda yer alması nedeniyle güneş etkisine bağlı olarak araç içi sıcaklık artışı karşısında geliştirilen biyokompozitin özelliklerini koruması mümkün olacaktır. Bununla birlikte malzemenin yangın riskine karşı yanıcılık özelliğinin daha fazla iyileştirilmesi amacıyla matris malzemesinin değiştirilmesi şeklindeki çözümlerle araştırmalara devam edilmesi planlanmaktadır.

## 6. KAYNAKLAR

- Açıkbaş, G. (2016). *Seramik Sağlık Gereçlerine Alternatif Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu*. (Yayın no. 444492) [Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dumlupınar Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.
- Agarwal, G., Patnaik, A., Sharma, R. K. ve Agarwal, J. (2014). Effect of Stacking Sequence on Physical, Mechanical and Tribological Properties of Glass-Carbon Hybrid Composites. *Friction*, 2(4), 354–364. <https://doi.org/10.1007/s40544-014-0068-9>
- Ahlatcı, H. (2003). *Alüminyum-Silisyum Karbür Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Takviye Boyutunun ve Matris Bileşiminin Etkisi*. (Yayın no. 143070) [Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.
- Arı, A. (2022). *Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yayın no. 752742) [Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Uludağ Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.
- Arıcasoy, O. (2006). *Kompozit Sektör Raporu*, İstanbul: İstanbul Ticaret Odası.
- Arnason. (2012). Erişim: 15 Mayıs 2024, <https://www.producer.com/news/driving-biocomposites-forward/.jpg>
- Atasayar, B. (2023). *Kenevir Lifi Takviyeli Epoksi Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu*. (Yayın no. 800384) [Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.
- Avcı, A., Eker, A. A. ve Bodur, M. S. (2021). Yeşil Kompozit Malzemelerin Performans Özellikleri ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(4), 3035-3054. <https://doi.org/10.21597/jist.952748>
- Aydın, E., Erzi, E., Yüksel, Ç. ve Dışpınar, D. (8-9 Ekim 2015). SIMA Yöntemi ile SiC Takviyeli A380 ve 6063 Kompozit Üretimi (Bildiri). 7. Alüminyum Sempozyumu, İstanbul.
- Bedir, F. (2006). Alüminyum Kompozitlerin Üretimi, Karakteristik Özellikleri ve Endüstriyel Uygulamaları. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 47(554), 28-35. [https://mmo.org.tr/sites/default/files/gonderi\\_dosya\\_ekleri/8258e5140317ff3\\_ek\\_0.pdf](https://mmo.org.tr/sites/default/files/gonderi_dosya_ekleri/8258e5140317ff3_ek_0.pdf)

- Bhoopathi, R., Ramesh, M., Deepa, C. (2014). Fabrication and Property Evaluation of Banana-Hemp-Glass Fiber Reinforced Composites. *Procedia Engineering*, 97, 2032-2041. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.446>
- Bulut, Y. ve Erdoğan, Ü. H. (2011). Selüloz Esaslı Doğal Liflerin Kompozit Üretiminde Takviye Materyali Olarak Kullanımı. *The Journal of Textiles and Engineers*, 18(82), 26-34. <https://www.tekstilvemuhendis.org.tr/showpublish.php?pubid=30&type=summary>
- Callister, W. D. (2007). *Materials Science and Engineering An Introduction Journal of Materials Science*, (7. basım), New York: John Wiley & Sons Inc.
- Callister, W. D. ve Rethwisch, D. G. (2020). *Fundamentals of Materials science and Engineering: An Integrated Approach*, New York: John Wiley ans Sons.
- Cha, J., Jun, G. H., Park, J. K., Kim, J. C., Ryu, H. J. ve Hong, S. H. (2017). Improvement of Modulus, Strength and Fracture Toughness of CNT/Epoxy Nanocomposites Through the Functionalization of Carbon Nanotubes. *Composites Part B: Engineering*, 129, 169-179. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.070>
- Compositesworld. (2017). Erişim: 15 Mayıs 2024, <https://adente.com.tr/products/composite-shaft/.jpg>
- Corbin, A., Soulat, D., Ferreira, M., Labanieh, A., Gabrion, X., Malecot, P. ve Placet, V. (2020). Towards Hemp Fabrics for High-Performance Composites: Influence of Weave Pattern and Features. *Composites Part B: Engineering*, 181, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107582>
- Çatlı, Z. (2024). *Farklı Geometrik Özelliklere Sahip Alüminyum Balpeteği Kompozit Panellerin Termal Çevrim Sonrası Mekanik Özelliklerindeki Değişimin İncelenmesi*. (Yayın no. 849343) [Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Necmettin Erbakan Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.
- Çavdar, A. D. ve Boran, S. (2016). Doğal Liflerin Otomotiv Sanayinde Kullanımı. *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 16(1), 253-263. <https://doi.org/10.17475/kujff.36865>
- Çelik, M. ve Kılıç, E. (2020). Bitkisel Kaynaklı Biyopolietilenin Biyokompozit Üretiminde ve Polimer Karışımlarında Kullanımı. *Journal of Textiles and Engineer*, 27(119), 197-215. <https://doi.org/10.7216/1300759920202711908>

- Çerezci, T. (2008). *Nikel Partikül Takviyeli Alumina Seramik Kompozitlerin Sentezi ve Karakterizasyonu*. (Yayın no. 216043) [Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.
- Değirmenci, N. (2020). *Kağıt Hamuru ve Sisal Elyaf Takviyeli Pla Biyokompozitlerinin Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yayın no. 625895) [Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Teknik Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.
- Demirbek, D. M. ve Bulut, M. O. (2021). Kenevir Liflerinin Eldesi, Özellikleri ve Kompozit Uygulama Alanları. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, 4(2), 176-191. <https://asosindex.com.tr/index.jsp?modul=articles-page&journal-id=996&article-id=616849>
- Doğru, A. (28-30 Eylül 2016). Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Üretimi ve Ürünlerin Tahribatsız Muayenesi (Bildiri). VI. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Kocaeli.
- Durgun, İ. (2014). El Yatırma Yöntemi ile Kompozit Parça Üretimi. *7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu 15-16 Mayıs 2014*, (s. 283-287). Ankara: Çankaya Üniversitesi.
- Ekşi, O. (2007). *Plastik Esaslı Malzemelerin Isıl Şekil Verme Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yayın no. 199971) [Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trakya Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.
- Enjeksiyon Kalıplama*. (2022). Erişim: 15 Mayıs 2024, <https://gokerplast.com.tr/enjeksiyon-kaliplama/.jpg>
- Eskizeybek, V. (2006). *Paslanmaz Çelik Elyaf Takviyeli Alüminyum Kompozit Malzemelerde Yorulma Çatlak İlerlemesi*. (Yayın no. 183178) [Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.
- Fu, S.Y. ve Lauke, B. (1996). Effects of Fiber Length and Fiber Orientation Distributions on the Tensile Strength of Short-Fiber-Reinforced Polymers. *Compos. Sci. Technol.*, 56, 1179-1190. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(96\)00072-3](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(96)00072-3)
- Gedik, G., Avinç, O. O. ve Yavaş, A. (2010). Kenevir Lifinin Özellikleri ve Tekstil Endüstrisinde Kullanımıyla Sağladığı Avantajlar. *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4(3), 39-48. <https://doi.org/10.21602/sduarte.624485>

- Göde, C. (2011). *TM ile Üretilmiş Alumix-231 SiCp ve B4Cp Kompozitlerin Farklı Üretim Yöntemlerinin Mekanik Özelliklere Etkisi*. (Yayın no. 287606) [Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.
- Göre, M. ve Kurt, O. (2021). Bitkisel Üretimde Yeni Bir Trend: Kenevir. *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*, 4(1), 138-157. <https://doi.org/10.38001/ijlsb.789970>
- Groover, M. P. (2016). Polimerler ve Kompozit Malzemeler. M. Yurdakul, Y. T. İç (Ed.). *Modern İmalatın Prensipleri*, 4, Ankara: Nobel Yayıncılık.
- Güler, K.A., Kısasöz, A., Yüksel, Ç. ve Karaaslan, A. (2012). Mechanical Properties of 6063/ SiC Composites Produced Using The Lost Foam Casting Process. *Mechanical Testing*, 54, 189- 192. <https://doi.org/10.3139/120.110318>
- Gülmez, S. (2018). *Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler*, (yüksek lisans projesi), Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Gürbüz, M. ve Mutuk, T. (2019). Karbon Esaslı Malzeme Takviyeli Titanyum Kompozitler ve Grafen Üzerine Yeni Eğilimler. *Mühendis ve Makine*, 60(695), 101-118. <https://search.trdizin.gov.tr/tr/yayin/detay/351476/>
- Ibrahim, M. H. (2022). *Karbon Fiber Takviyeli Kompozitlerde Epoksi Matrise Karbon Nanotüplerin Eklenmesinin Kompozitin Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi*. (Yayın no. 718384) [Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.
- İmak, A. (2015). *Tabakalı Hibrit Kompozit Malzemelerin Yorulma Davranışlarının Analizi*. (Yayın no. 405924) [Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.
- Jawaid, M. ve Abdul Khalil, H. P. S. (2011). Cellulosic/Synthetic Fibre-Reinforced Polymer Hybrid Composites: A Review. *Carbohydrate Polymers*, 86(1), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.043>
- Jojibabu, P., Zhang, Y. X. ve Prusty, B. G. (2020). A Review of Research Advances in Epoxy-Based Nanocomposites as Adhesive Materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 96, 102454. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102454>

- Kalemtaş, A. (2015). Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler. *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 2015(2), 20-26. <https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji/d7ee7cd9-f063-4669-8e1c-393503ed6ffb/kompozitmalzemellersunu7seramikmatrislikompozitler.pdf>
- Karaçor, B. ve Özcanlı, M., 2021. Effect of Various Matrix Materials on Mechanical Properties of Basalt/Jute/Glass Fiber Reinforced Hybrid Composites. *Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 36(4):941–954. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1040514>
- Kaya, A. İ. (2016). Kompozit Malzemeler ve Özellikleri. *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29, 38-45. [https://www.researchgate.net/publication/312332966\\_Kompozit\\_Malzemeler\\_ve\\_Ozellikleri](https://www.researchgate.net/publication/312332966_Kompozit_Malzemeler_ve_Ozellikleri)
- Kaya, S. ve Öner, E. (2020). Kenevir Liflerinin Eldesi, Karakteristik Özellikleri ve Tekstil Endüstrisindeki Uygulamaları. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(1), 108-123. <https://doi.org/10.29048/makufebd.693406>
- Kayıkçı, G. (2023). *Grafen Takviyeli Seramik Matrisli Kompozit Malzemelerin Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yayın no. 824258) [Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.
- Kenevir Araştırmaları Enstitüsü. (2023). Erişim: 15 Mayıs 2024, <https://bozok.edu.tr/okul/kenevir-arastirma-enstitusu/sayfa/fotograf-galerisi/12079.jpg>
- Leja, K. ve Lewandowicz, G. (2010) Polimer Biyolojik Bozunumu ve Biyolojik Olarak Parçalanabilir Polimer-Bir İnceleme. *Pol J Environ Stud*, 19(2), 255-266. <https://dergi.fabad.org.tr/pdf/volum24/Issue2/6.pdf>
- Mallick, P.K. (1997). *Composites Engineering Handbook*. New York: CRC Press.
- Mishra, S., Mohanty, A.K., Drzal, L.T., Misra, M., Parija, S., Nayak, S.K. ve Tripathy, S.S. (2003). Studies On Mechanical Performance of Biofibre/Glass Reinforced Polyester Hybrid Composites. *Composites Science and Technology*, 63(10), 1377–1385. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00084-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00084-8)
- Muneer, F. (2012). *Evaluation of The Sustainability of Hemp Fiber Reinforced Wheat Gluten Plastics*. (Yayın no. 130101) [Yüksek Lisans Tezi, Swedish University] Library.

- Mutje, P., Lopez, A., Vallejos, M.E., Lopez, J.P. ve Vilaseca, F. (2007). Full Exploitation of Cannabis Sativa as Reinforcement/Filler of Thermoplastic Composite Materials. *Composites: Part A*, 38, 369–377. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.03.009>
- Nehls. (2023). Erişim: 15 Mayıs 2024, <https://www.compositesworld.com/products/comppair-healtech-sandwich-panels-extend-self-healing-composite-capabilities.jpg>
- Portfolio Items. (2019). Erişim :15 Mayıs 2024, <https://eurecat.org/en/portfolio-items/cfip/.jpg>
- Ramesh, M. ve Nijanthan, S. (2016). Mechanical Property Analysis of Kenaf–Glass Fibre Reinforced Polymer Composites Using Finite Element Analysis. *Bulletin of Materials Science*, 39(1), 147-157. <https://doi.org/10.1007/s12034-015-1129-z>
- Robathan. (2023) Erişim: 15 Mayıs 2024, <https://www.jeccomposites.com/news/spotted-by-jec/f1-supplier-launches-revolutionary-low-cost-carbon-monocoque-for-road-cars/.jpg>
- Salvetat, J.P., Briggs, G.A.D., Bonard, J.M., Bacsá, R.R., Kulik, A.J., Stöckli, T., Burnham, N.A. ve Forró, L. (1999). Elastic and Shear Moduli of Single-Walled Carbon Nanotube Ropes. *Physical Review Letters*, 82(5), 944. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.944>
- Sarıkaya, E. (2019). *Doğal Fiber Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Tespiti*. (Yayın no. 387584) [Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Celal Bayar Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.
- Seki, Y., Selli, F., Şen, K. ve Erdoğan, Ü.H. (2017). Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılacak Bitkisel Liflerin Alkali Modifikasyonu Sonrası Morfolojik ve Kimyasal Yapılarındaki Değişimin İncelenmesi. *Tekstil ve Mühendis*, 24(108), 222-232. <https://doi.org/10.7216/1300759920172410801>
- Seramik Matrisli Kompozitler. (2019). Erişim: 15 Mayıs 2024, <https://malzemebilimi.net/seramik-matrisli-kompozitler.html.jpg>
- Šercer, M. (2004). FC Campbell: Manufacturing Processes for Advanced Composites. *Polimeri: Časopis Za Plastiku i Gumu*, 25(1–2), 61. <https://hrcak.srce.hr/6058>

- Sert, M. (2024). *Mikrodalga Sinterleme ile Üretilen Alüminyum Alaşımı Esaslı Sic ve Gr Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yayın no. 848256) [Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Celal Bayar Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.
- Seydibeyoğlu, M. Ö. (2012). A Novel Partially Biobased PAN-Lignin Blend as a Potential Carbon Fiber Precursor. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2012, 2-8. <https://doi.org/10.1155/2012/598324>
- Sezgin, H. (2018). *Investigation and Enhancement of The Mechanical Properties of The Fabric Reinforced Hybrid Composites*. (Yayın no. 896428) [Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.
- Song, X. (2016). *Slurry Based Stereolithography: A Solid Freeform Fabrication Method of Ceramics and Composites*. (Yayın no. 2016) [Doktora Tezi, Faculty of the Usc Graduate School University] Library.
- Subaşı, A., Zurnacı, M., Kahyaoğlu, A. ve Demir, E. (2017). Polyester/Grafen Kompozitlerin Mekanik ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(3), 472-481. <https://doi.org/10.31202/ecjse.327707>
- Şenbaş, T. (2024). *Grafen ve Karbon Nanotüp İkili Partikül Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu*. (Yayın no. 863836) [Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.
- Taşlıgil, N. ve Şahin, G. (2019). Türk Tarım Hayatında Kenevir / Kendir (Cannabis sativa L.) Yetiştiriciliğinin Yeniden Başlaması ve Yaşanan Gelişmeler [Bildiri]. 1. *İstanbul Uluslararası Coğrafya Kongresi Bildiri Kitabı, 20-22 Haziran 2019*, (s. 457-478). İstanbul: İstanbul Üniversitesi Yayınları.
- Truong, G.T., Tran, H.V. ve Choi, K.K. (2019). Tensile Behavior of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites Incorporating Nanomaterials after Exposure to Elevated Temperature. *Journal of Nanomaterials*, 2019(1), 4139208. <https://doi.org/10.1155/2019/4139208>
- Uğural, B.K. (2021). Gürültü Bariyeri için Çevre Dostu Alternatif: Doğal Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (Özel Sayı 32), 1006-1010. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1039332>

Walsh. (2014). Erişim: 15 Mayıs 2024, <https://cannabisdigest.ca/hemp-bio-composite-electric-car/.jpg>

Yorgun, H. (2024). *Eklemele İmalat ile Üretilmiş Balpeteği Kompozit Levhaların Mekanik Davranışlarının Araştırılması*. (Yayın no. 860844) [Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dicle Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.

Yu, M.F., Lourie, O., Dyer, M.J., Moloni, K., Kelly, T.F. ve Ruoff, R.S. (2000). Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes under Tensile Load. *Science*, 287(5453), 637–640. <https://doi.org/10.1126/science.287.5453.637>

Yumakgil, H. K. (2009). *Yüksek Enerjili Öğütme Sistemleriyle İnce Gümüş Tozlarının Üretimi ve Enjeksiyon Kalıplama Yöntemiyle Gümüş Takviyeli Polimer Kompozit Yapıların Geliştirilmesi*. (Yayın no. 251577) [Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi] Yök Tez Merkezi.

Muhammed Ali AYDOĞAN

Yüksek Lisans Tezi

YOZGAT 2024



**T.C.  
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**