

**T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**DOĞAL FİBER TAKVİYELİ ORGANO KİL DESTEKLİ
KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ**

AYKUT YAZICI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

DANIŞMAN: PROF. DR. AHMET SİNAN ÖKTEM

TEMMUZ 2025

**T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**DOĞAL FİBER TAKVİYELİ ORGANO KİL DESTEKLİ
KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ**

AYKUT YAZICI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

DANIŞMAN: PROF. DR. AHMET SİNAN ÖKTEM

TEMMUZ 2025

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**MANUFACTURING AND INVESTIGATION OF
MECHANICAL PROPERTIES OF NATURAL FIBER
REINFORCED ORGANO CLAY SUPPORTED
COMPOSITE MATERIALS**

AYKUT YAZICI

**A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

ADVISOR: PROF. DR. AHMET SİNAN ÖKTEM

JULY 2025

YÜKSEKLİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 08/07/2025 tarih ve 2025/35 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 16/07/2025 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Aykut YAZICI'nın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof.Dr.Ahmet Sinan ÖKTEM

ÜYE

: Doç. Dr. Yalçın BOZTOPRAK

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Recep ÖNLER

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Anneme

ÖZET

Bu çalışma sürdürülebilirlik alternatif mühendislik uygulamaları için doğal elyaf takviyeli ve nano boyutlu katkı maddesi içeren polimer kompozit malzemelerin üretimi ve performans analizlerini incelenmektedir. Çalışmanın ana amacı, keten elyaf takviyeli ve farklı oranlarda organo kil katkılı epoksi esaslı termoset kompozit malzemelerin araştırılması ve bu kompozitlerin mekanik olarak incelenmesidir . Bu deneyde, organo kil , keten lifli takviyeli kompozit parçaların performansı üzerindeki performans incelenmektedir.

Numune üretilen matris olarak iki bileşenli epoksi reçine sistemi tercih edildi. Takviye edici malzeme olarak yüksek dayanıma sahip, doğal, biyobozunur, çevre dostu keten elyaf kullanılmıştır. Kompozit sistemin mekanik özelliklerini belirlemek için belirli oranlarda organo katkı karışımları eklenmiştir. Vakum torbalama üretim tekniği ile kompozit numuneler üretilmiştir. Bu üretim tekniği sayesinde reçine, elyaflara etkin şekilde nüfuz etmiş olup, gözenek ve deleminasyon gibi üretim hatalarını minimize edilmesini sağlamıştır.

Üretilen numuneler üzerinde çekme testi, üç nokta eğme testi, izod darbe testi, titreşim testi ve sertlik testi gerçekleştirildi. Elde edilen veriler , bu malzemelerin otomotiv gibi dayanıklılığım ve yoğunluklara karşı dirençli uygulama alanlarında kullanılabileceğini ortaya koyuyor . Böylece, elyafın dayanıklılığı ile organo katkının birlikte kullanımı sayesinde mekanik dayanım, hafiflik ve sürdürülebilirlik gibi özelliklerin optimize edilebileceği anlaşılmıştır .

Çalışma, hafif, biyobozunur ve yüksek performanslı kompozit malzemelerin geliştirilmesine katkı sunmakta; aynı zamanda sürdürülebilir tasarım ve çevre dostu üretim yelpazesine yönelik literatür ve uygulamaya yönelik önemli bilgiler ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Doğal elyaf takviyeli kompozit, Keten elyaf, Organo kil, Vakum torbalama, Mekanik özellikler

ABSTRACT

This study investigates the production and performance analysis of polymer composite materials containing natural fiber reinforcement and nano-sized additives for sustainable alternative engineering applications. The main objective of the study is to investigate and mechanically examine epoxy-based thermoset composite materials reinforced with flax fiber and various proportions of organoclay. This experiment examines the performance of composite parts reinforced with organoclay and flax fiber.

A two-component epoxy resin system was chosen as the matrix for the sample production. High-strength, natural, biodegradable, and environmentally friendly flax fiber was used as the reinforcement material. Organoadditive mixtures were added at specific ratios to determine the mechanical properties of the composite system. Composite samples were produced using the vacuum bagging production technique. This production technique effectively penetrated the resin fibers, minimizing manufacturing defects such as porosity and delamination.

Tensile tests, three-point bending tests, Izod impact tests, vibration tests, and hardness tests were performed on the produced samples. The data obtained demonstrate that these materials can be used in applications requiring durability and resistance to high density, such as the automotive industry. Thus, it has been demonstrated that properties such as mechanical strength, lightness, and sustainability can be optimized through the combined use of fiber durability and organoadditives.

The study contributes to the development of lightweight, biodegradable, and high-performance composite materials, while also providing important insights into the literature and practice of sustainable design and environmentally friendly production.

Keywords: Natural fiber reinforced composite, Flax fiber, Organo clay, Vacuum bagging, Mechanical properties

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi, tecrübe ve rehberliğiyle bana her zaman yol gösteren, desteğini esirgemeyen ve çalışmam boyunca değerli katkılarda bulunan danışmanım Prof. Dr. Ahmet Sinan ÖKTEM'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Araştırmamın her aşamasında yanımda olan, bilimsel bakış açısını ve deneyimlerini benimle cömertçe paylaşan, yol gösterici desteği ve sürekli motivasyonu ile bana ilham veren Doç. Dr. Yalçın BOZTOPRAK'a en içtenlikle teşekkür ederim.

Tez çalışmam kapsamında çeşitli deneysel uygulamaları gerçekleştirme imkânı sundukları için Marmara Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Dinamik titreşim testlerinin gerçekleştirilmesindeki değerli katkıları ve teknik destekleri için Dr. Öğr. Üyesi Recep ÖNLER'e ve Arş. Gör. Fırat Can YILMAZ'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Keten elyaf tedariki konusundaki desteklerinden dolayı Bpreg firmasına ve özellikle Sn. Burcu KARACA'ya teşekkür ederim.

Epoksi sistemlerinin temini sürecinde katkı sağlayan CET Kompozit firmasına ve organokil katkısının temininde destek olan Alsa Kimya firmasına ve Sn. Yaşar AYDEMİR'e teşekkür ederim.

Ve son olarak, hayatım boyunca bana sevgisiyle, sabrıyla ve desteğiyle güç veren, her daim yanımda olan canım anneme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	1
1.2. Literatür Araştırması	10
2. KOMPOZİT MALZEMELER	28
2.1. Kompozit Malzemeyi Oluşturan Temel Bileşenler	31
2.1.1. Matris Malzeme	32
2.1.1.1. Polimerik Matrisler	34
2.1.1.1.1. Termoset Polimerler	35
2.1.1.1.2. Termoplastik Polimerler	37
2.1.1.2. Seramik Matrisler	39
2.1.1.3. Metal Matrisler	39
2.1.2. Takviye Elemanları	40
2.1.2.1. Doğal Elyaf lar	41
2.1.2.1.1. Doğal Elyaf ların Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	42
2.1.2.1.2. Doğal Elyaf ların Mekanik Özellikleri	43
2.1.2.1.3. Doğal Elyaf ların Avantajları ve Dezavantajları	44
2.1.2.2. Sentetik Elyaf lar	45
2.1.3. Katkı ve Dolgu Malzemeleri	46
3. ÜRETİM METOTLARI	49
3.1. Termoset Matrisli Kompozit Üretim Yöntemleri	50
3.1.1. Elle Yatırma Yöntemi	51
3.1.1.1. Üretim Süreci	52
3.1.2. Vakum Torbalama Yöntemi	53
3.1.2.1. Üretim Süreci	53
3.1.3. Vakum İnfüzyon Yöntemi	53
3.1.3.1. Üretim Süreci	54
3.1.4. Reçine Transfer Kalıplama	57
3.1.4.1. Üretim Süreci	57
3.1.5. Otoklav Yöntemi	57
3.1.5.1. Üretim Süreci	57
3.2. Termoplastik Matrisli Kompozit Üretim Yöntemleri	58
3.2.1. Sıcak Presleme Yöntemi	59
3.2.1.1. Üretim Süreci	59
3.2.1.2. Sıcak Presleme Yöntemi Avantajları	59
3.2.1.3. Sıcak Presleme Yöntemi Dezavantajları	60
3.2.2. Termoform	60
3.2.2.1. Üretim Süreci	60
3.2.3. Enjeksiyon Kalıplama	61

3.2.3.1. Üretim Süreci	61
3.2.4. Ekstrüzyon ve Pultrüzyon	61
3.2.4.1. Ekstrüzyon Yöntemi	61
3.2.4.1.1. Üretim Süreci	62
3.2.4.2. Pultrüzyon Yöntemi	62
3.2.4.2.1. Üretim Süreci	62
4. KULLANILAN MALZEMELER VE ÜRETİM YÖNTEMİ	63
4.1. Malzemeler	63
4.1.1. Takviye Malzemesi	64
4.1.1.1. Ketten Elyafı	64
4.1.2. Matris Malzemesi	67
4.1.2.1. Epoksi Reçine	69
4.1.2.2. Sertleştirici	71
4.1.2.3. Hızlandırıcı	72
4.1.3. Katkı Malzemesi	73
4.2. Üretim Yöntemi	75
4.2.1. Vakum Torbalama Yöntemi	75
4.2.1.1. Üretim Süreci	75
4.2.1.1.1. Kalıp Hazırlığı	75
4.2.1.1.2. Takviye Malzemesinin Yerleştirilmesi	75
4.2.1.1.3. Reçine Uygulaması	76
4.2.1.1.4. Yüzey Düzgünlüğünün Sağlanması	76
4.2.1.1.5. Vakum Torbası Uygulaması ve Vakumlama	76
4.2.1.1.6. Kurlenme Süreci	77
4.3. Üretilen Numuneler	78
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	80
5.1. Çekme Testi	81
5.2. Titreşim Testi	83
5.3. Üç Nokta Eğme Testi	84
5.4. Darbe Dayanım Testi	86
5.5. Sertlik Testi	88
5.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	89
6. MALİYET DEĞERLENDİRMESİ	90
6.1. Malzeme Maliyetlerinin Karşılaştırılması	90
6.2. Enerji Tüketimi Açısından Karşılaştırma	90
6.3. Çevresel Etki ve Ekonomi Açısından Değerlendirme	91
7. TEST SONUÇLARI VE BULGULAR	92
7.1. Çekme Testi Sonuçları	92
7.2. Titreşim Testi Sonuçları	94
7.3. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları	98
7.4. Darbe Dayanım Testi Sonuçları	101
7.5. Sertlik Testi Sonuçları	103
7.6. SEM Analiz Sonuçları	105
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	109
KAYNAKLAR	112
ÖZGEÇMİŞ	122
EKLER	123

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

$^{\circ}C$	: Santigrat derece
μm	: Mikrometre
σ	: Gerilme
σ_{maks}	: Maksimum çekme gerilmesi
σ_{fM}	: Maksimum eğilme gerilmesi
σ_{fB}	: Kırılma gerilmesi
ε	: Gerinim
ε_f	: Kırılma uzaması
E	: Elastisite Modülü
E_f	: Eğilme elastik modülü
η	: Viskozite
ρ	: Yoğunluk
ν	: Poisson oranı
α	: Lineer ısı genleşme katsayısı
λ	: Logaritmik sönüm oranı
ζ	: Sönümleme oranı
d	: Devir
ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi
FRP	: Elyaf Takviyeli Polimer
F_m	: Maksimum çekme kuvveti
HDPE	: Yüksek yoğunluklu Polietilen
HDT	: Isı Sapma Sıcaklığı
Hz	: Hertz
LDPE	: Düşük yoğunluklu Polietilen
MMT	: Montmorillonit
NBC	: Nanobiyokompozit
NF	: Doğal fiber
NFRPC	: Doğal fiber epoksi polimer kompozit
PA	: Poliamid
PEEK	: Poli Eter Keton
PE	: Polietilen
PMC	: Polimer Matrisli Kompozit
PP	: Polipropilen
R_m	: Maksimum çekme gerilmesi
RTM	: Reçine Transfer Kalıplama
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik Analiz
T_g	: Camı geçiş sıcaklığı
T_m	: Erime sıcaklığı
VI	: Vakum İnfüzyon
VARTM	: Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama
VBM	: Vakum Torbalama
V_f	: Fiber Hacim Oranı
V_m	: Matris Hacim Oranı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Keten-karbon-cam-aramid elyaf örnekleri.	2
Şekil 1.2: Kompozit malzemenin endüstride etki ettiği alanlar.	5
Şekil 1.3: Endüstride kompozit malzeme.	10
Şekil 2.1: Kompozit malzemenin çeşitleri.	29
Şekil 2.2: Kompozit malzemenin endüstride kullanım alanları.	30
Şekil 2.3: Kompozit malzemeyi oluşturan temel bileşenler.	31
Şekil 2.4: Matris malzemenin etkileşimi.	34
Şekil 2.5: Termoset polimerler.	36
Şekil 2.6: Takviye elemanları.	41
Şekil 2.7: Doğal elyaf çeşitleri.	42
Şekil 2.8: Dokuma kumaş.	43
Şekil 2.9: Nanokil.	48
Şekil 3.1: Doğal elyafli kompozitlerin üretim döngüsü.	50
Şekil 3.2: Termoset matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri.	51
Şekil 3.3: Vakum infüzyon yöntemi.	56
Şekil 3.4: Termoplastik matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri.	58
Şekil 4.1: Üretim malzemeleri.	64
Şekil 4.2: Keten bitkisi.	65
Şekil 4.3: Keten elyaf.	57
Şekil 4.4: Tepkimeye girmiş matris malzemesi.	68
Şekil 4.5: Matris malzemesi karışım prosesleri.	69
Şekil 4.6: Tepkimeye girmiş nanokilli matris malzemesi.	73
Şekil 4.7: Kullanılan organo kil.	74
Şekil 4.8: Vakum torbalama yöntemi.	77
Şekil 4.9: Katkısız numune.	78
Şekil 4.10: %1 nanokil katkılı numune.	79
Şekil 4.11: %2 nanokil katkılı numune.	79
Şekil 5.1: Numune kesim çalışması	80
Şekil 5.2: Çekme test cihazı.	81
Şekil 5.3: Çekme testi.	82
Şekil 5.4: Titreşim test cihazı.	83
Şekil 5.5: Üç nokta eğme test cihazı.	84
Şekil 5.6: Üç nokta eğme testi.	85
Şekil 5.7: Darbe dayanım test cihazı.	86
Şekil 5.8: Darbe dayanım testi.	87
Şekil 5.9: Sertlik test cihazı.	88
Şekil 5.10: FEI (PHILIPS) XL30 SFEG taramalı elektron mikroskobu.	89
Şekil 7.1: Çekme testi ortalama sonuçların gerilim-gerinim grafiği.	93
Şekil 7.2: Maksimum çekme dayanımı.	94
Şekil 7.3: Titreşim testi ortalama doğal frekans sonuçların grafiği.	96
Şekil 7.4: Titreşim testi ortalama sönümle oranı sonuçlarının grafiği.	97
Şekil 7.5: Üç nokta eğme testi ortalama sonuçların gerilim-gerinim grafiği.	100
Şekil 7.6: Darbe dayanım testi ortalama enerji absorpsiyonu sonuçların grafiği.	102
Şekil 7.7: Sertlik testi ortalama shore D sonuçlarının grafiği.	104
Şekil 7.8: Katkısız numune SEM görüntüsü	106
Şekil 7.9: Katkısız numune SEM görüntüsü	106

Şekil 7.10: %1 organo kil katkılı numune SEM görüntüsü	107
Şekil 7.11: %1 organo kil katkılı numune SEM görüntüsü	107
Şekil 7.12: %2 organo kil katkılı numune SEM görüntüsü	108
Şekil 7.13: %2 organo kil katkılı numune SEM görüntüsü	108

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1: Doğal elyafların mekanik özellikleri.	44
Tablo 2.2: Doğal elyafların üretim adetleri.	45
Tablo 4.1: Kullanılan elyaf özellikleri.	65
Tablo 4.2: Literatürlerde genel elyaf özellikleri.	66
Tablo 4.3: Kullanılan epoksi özellikleri.	71
Tablo 4.4: Kullanılan sertleştirici özellikleri.	72
Tablo 4.5: Kullanılan hızlandırıcı özellikleri.	73
Tablo 4.6: Kullanılan nanokil özellikleri.	74
Tablo 7.1: Numune grupları çekme testi sonuçları.	93
Tablo 7.2: Çekme testi sonuçları ortalama değerleri.	93
Tablo 7.3: Numune grupları doğal frekans değerleri.	96
Tablo 7.4: Katkısız numune sönümleme oranı sonuçları.	96
Tablo 7.5: %1 organo kil katkılı numune sönümleme oranı sonuçları.	97
Tablo 7.6: %2 organo kil katkılı numune sönümleme oranı sonuçları.	97
Tablo 7.7: Numune grupları üç nokta eğme testi sonuçları.	99
Tablo 7.8: Üç nokta eğme testi sonuçları ortalama değerleri.	99
Tablo 7.9: Üç nokta eğme testi sonuçları standart sapma değerleri	100
Tablo 7.10: Numune grupları darbe dayanım testi sonuçları..	102
Tablo 7.11: Numune grupları sertlik testi sonuçları.	104

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Sanayi, teknolojideki gelişmelerle birlikte bir dönüm noktası yaşanmaktadır, bu durumda ülke ekonomilerinin temel kalkınma stratejilerinden biri haline gelmiştir. Sanayi alanlarında önemli ölçüde yatırımlar ile teknolojik üretimler yapılmaktadır. Genellikle yüksek katma değerli ürünler ortaya çıkmaktadır. 20. yüzyılın başlangıcıyla birlikte hız kazanan teknolojik gelişmeler, insanlığın bu bireysel, toplu kullanım perspektifinden ve aynı zamanda ekonomik gelişmenin, büyümenin bir göstergesi olarak da önem kazanmasına neden olmuştur [1].

Endüstrilerde parça üretimi artışı, malzeme tüketiminin de kullanımın yüksek oranlara ulaşma yolu açılmaktadır. Ancak, kullanılan malzemelerin üretim süreçlerine kadar geçen sürede sürdürülebilirliğin güncelliği haline gelmiştir. Otomotiv endüstrisinde eskiden beri süregelen olarak kullanılan metal ve sentetik takviyeli kompozit malzemelere alternatif olarak; düşük yoğunluklu, geri dönüştürülebilir, çevre dostu ve mekanik olarak karşılayan, performans sunabilen doğal elyaf takviyeli kompozitlere yönelmiştir [2], [19], [20].

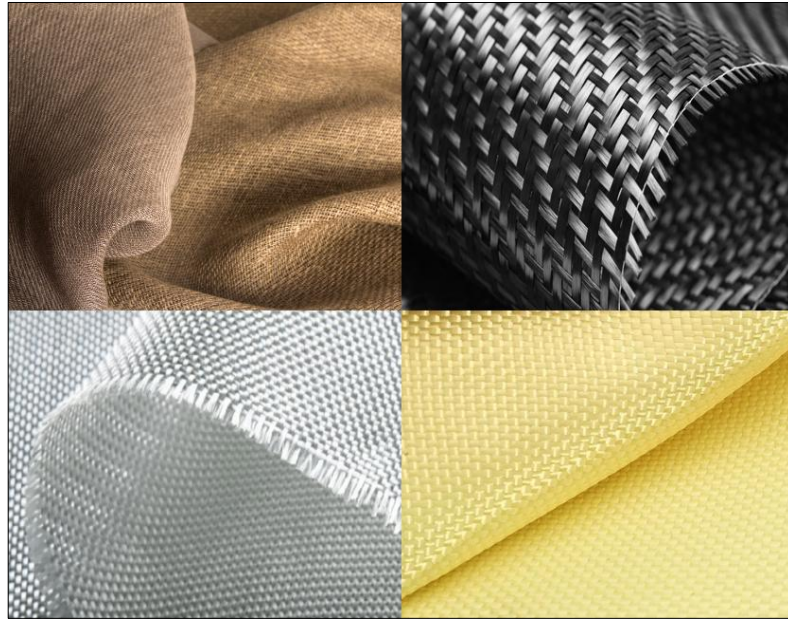
Pamuk liflerinden elde edilen dokumasız kumaşların, koruyucu sistemlerle birlikte kullanılarak otomotiv iç trim parçalarda kullanılabilme özelliği gösterilmiştir. Doğal liflerin darbe dayanımı, ses yalıtımı ve şekillendirilebilirlik gibi çeşitli performans özelliklerinde ihtiyaç duyulan özellikleri karşılamaktadır. Ayrıca olumlu bir etkiye sahiptir. Bu, doğal elyafların termoplastik reçineler veya termosetlerle birlikte kullanılmasıyla kompozit özellikler için çok çeşitli kullanım alanları sunabileceğini göstermektedir [2]. Gelişmiş kompozit üretim teknolojileri sayesinde doğal elyaf takviyeli kompozitler, endüstrinin hedeflediği yakıt verimliliği, emisyon azaltma ve maliyet kütüğüne doğrudan katkıda bulunabilmektedir. Geri dönüştürülebilir ve biyobozunur ünitelerine sahip yeni malzemeler geliştirilirken, hemde ekonomik açıdan hayati öneme sahip olacaktır [1].

Otomotiv sanayisi, yakıt tüketiminin azalması, verimliliğin artırılması ve çevre etkilerini en az indirme için sürekli bir çaba göstermektedir. Aracın ağırlığı en aza indirilirken, bu hedeflerin bileşimi etkili bir şekilde dağıtılır. Bununla birlikte, yüksek

nem oranları nedeniyle geleneksel olarak kullanılan metal malzemeleri bu açıdan yetersizdir. Metalin yerine daha hafif ve benzer mekanik yapıya sahip kompozit özellikler son zamanlarda popüler hale gelmiştir [3].

Kompozit kullanımının başlıca nedeni, araç hafifletmesidir. Karbon fiber takviyeli kompozitler çeliğine kıyasla yaklaşık %50 daha hafiftir. Birim ağırlık başına daha fazla mekanik dayanım sunarak esnekliği artırılmaktadır. Sahip olunan yüksek özgül dayanım sayesinde bu özellikler mevcuttur. Yüksek maliyet ve karmaşık parçalarının üretimi yaygın kullanımı sınırlandırmaktadır. Yakıt tasarrufu ve güvenlik gibi önemli avantajlarındandır. Bu nedenle daha düşük maliyetli ve sürdürülebilir alternatiflere yönelim giderek artmaktadır [3].

Cam elyaf takviyeli kompozitler günümüzde otomotivde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak biyobozunur ve açıklık özellikleri nedeniyle doğal elyaflar gelecekte daha fazla ilgi göreceği öngörülmektedir. Keten, kenevir ve jüt gibi liflerle üretilen doğal elyaf takviyeli kompozitler; buna karşılık, yeterli düzeyde dayanım ve parlaklık bir arada tutan otomotiv iç trim parçaları için uygun bir alternatif oluşturur [3].



Şekil 1.1: Keten-karbon-cam-aramid elyaf örnekleri [100]

Kompozit malzemelerin kullanımı son zamanlarda artmıştır. Bu gelişmelerle çevresel farkındalık ilerlemiştir. Çevre bilinci bilgisi, işletmelerin atık yönetimi konusunda daha fazla önem göstermelidir. Kompozit malzemelerin geri dönüşümü, özellikle kullanım ömürleri tamamlayan parçaların yok olması zorluklar yaratmaktadır. Geleneksel çöp alanları ve yöntemlerinin yetersiz olması, çevre dostu alternatifler yol açtı [4]. Kompozitlerin geri dönüşümündeki zorluklar nedeniyle sürdürülebilir çözümler geliştirilmelidir. Bu nedenle günümüz endüstrisi, özellikle otomotiv endüstrisi, geri dönüşüm ve sürdürülebilirlik için doğal elyaf takviyeli kompozitlere yöneliyor. Keten ve kenevir gibi doğal yaşamdan yapılmış kompozit parçalardan, çevre dostu ve iyi mekanik depolamaya sahiptir [4].

Üretilen parçaların kullanımındaki artış günümüzdeki kompozit malzemelerden oluşmaktadır. Büyümenin gelecekte de devam etmesi beklenmektedir. Kompozitler, var olan parçaların ağırlığını azaltma ve tasarım çeşitliliği gibi önemli avantajlara sahip olmalarına rağmen, yüksek üretim kapasitesi gerektiren parçalarda tercih edilmemektedir. Kompozitlerin kullanım ayrıntıları, yapısal olmayan ve yarı yapısal uygulamalarda, maliyetin önemlendirildiği üretim yöntemlerinin çalıştırılmasıyla hızlandırılabilir. Sektörlerde kullanılan yeni yöntemler tasarım süreci, malzeme ve üretim maliyetlerinde önemli ilerlemelerin kaydedileceği öngörülmektedir. Ayrıca bir kompozit parça tasarlanırken, kullanılan malzeme türü, malzeme bilgisi ve parçanın işlevi gibi çeşitli parçalar göz önünde bulundurulmalıdır [5].

Malzeme çeşitliliği, üretimde güvenlik, hafiflik, düşük emisyon, yüksek manevra kabiliyeti, kalite ve düşük maliyet gibi faktörlerle teknolojik gelişmelerle doğrudan ilişkilidir. Bu duruma örnek yeşil kompozitlerdir. Petrolün tükenmesiyle birlikte, elde edilen bu kompozitler, çevre için büyük bir potansiyel ve umut sunuyor. Endüstride sürdürülebilir parçaların kullanımı, ekonomik ve çevre dostu çözümler sunarken aynı zamanda Avrupa Birliği çözümlerine uygundur [6].

Malzemenin sürdürülebilirliği çok önemlidir. Yer altı kaynağı yapısının azlaması, metalurji sektöründe fiyatların artacağı anlamına gelir. Bu nedenle, her ülkenin sürdürülebilir malzeme teknolojilerinin geliştirilmesi çok önemlidir. Geri dönüşüm, çevre dostu politikalarda önemli bir bileşenidir. Atıklarının yeniden kullanılması, üretim maliyetlerinde kayıplar ve ekonomik kayıplarda azalma olur [7].

Genel konulardaki endişeler petrol, sentetik ürünler gibi kimyasal değişimler bu nedenle yenilenemeyen tükenmenin kullanımından kaynaklanmaktadır. Yenilenebilir kaynakların kullanımı giderek daha önemli hale gelir. Bilim dünyasındaki emisyonların sürekli tartışma konusu olduğu ve son yıllarda çevre dostu üretim teknolojilerine, ürünlere uyum sağlama hizmetleri, çeşitli üretim sektörlerinde kabul edildiği görülüyor. Çevresel kaygıları ve indirilmesi için endüstriyel uygulamalar ve gelişmiş malzeme geliştirmeleri yürütülmektedir. Yenilenebilir kaynaklara dayalı kompozit sistemler üzerinde yapılan kapsamlı incelemeler ve laboratuvar deneyleri, geniş bir kullanım alanı ve teknolojik olarak ekonomik, teknik açıdan önemli avantajlar sağladığını göstermektedir [7].

Ulaşım araçlarının sayısının aşırı artması, küresel yakıt talebinin, malzeme tüketiminin ve araçlardan kaynaklanan emisyonların artmasına sebep olmaktadır. Araçların tükenmesi, küresel yakıt talebinin, malzeme ihtiyacının ve araçlardan kaynaklanan emisyonların artmasına sebep olmaktadır. Ancak otomotiv sektörünün en önemli güçlerinden birinin sürdürülebilirliği ortaya çıkıyor. Amaç, araçları çevre dostu hale getirmektir. Ancak orijinal ekipman üzerinde baskı oluşmaktadır. Kaynakların verimli kullanımı hem ekonomik hem de tüketimin ortak sorumluluğudur [8].

Sürdürülebilirliğin önemli bir parçası olarak öne çıkan konu geri dönüşümdür. Günümüzde metaller, camlar, termoplastikler ve pek çok malzeme geri dönüştürülebilmektedir. Ancak tasarımlar, özellikle termoset temelli olanlar, heterojen yapılar ve takviyeli birleşimleri nedeniyle etkin bir şekilde geri dönüştürülememektedir. Otomobil ve uçak gibi elektrik enerjilerinin, ömürlerinin sonunda uygun şekilde geri kazanılması ve geri dönüşümün uygun olması gerekmektedir. Takviye ve matris malzemelerinin üretimi sağlanacak kaynak ve enerji tasarrufu, geri dönüşümü sayesinde mümkün olacaktır [18].



Şekil 1.2: Kompozit malzemenin endüstride etki ettiği alanlar [101].

Artan çevresel farkındalık ve kamu ilgisi, sürdürülemez petrol tüketiminin azaltılması ve yeni çevre düzenlemelerine uyum sağlanması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu süreç, çevre dostu malzemelerin yaygın kullanımına yol açmış ve bu malzemeler arasında doğal elyaflar, üstün özellikleri nedeniyle sentetik elyaflara sürdürülebilir bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Bitkilerden ve hayvanlardan elde edilen doğal elyaflar, son on yılda kompozit malzeme üretiminde büyük ilgi görmüştür. Keten, jüt, sisal, palmye, ipek ve yün gibi yenilenebilir kaynaklı elyaflar, elyaf takviyeli kompozitlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [16], [20].

Doğal elyaflar, özellikle polimer reçinelerle birleştiğinde, yüksek mekanik performans ve biyolojik olarak parçalanabilirlik gibi önemli avantajlar sağlamaktadır. Geleneksel otomotiv malzemeleriyle karşılaştırıldığında, doğal elyaf takviyeli kompozitler,

çevreye duyarlı üretim süreçlerinin bir parçası olarak daha cazip hale gelmektedir. Bu malzemeler, otomotiv endüstrisi ve diğer mühendislik uygulamalarında, hafiflik, dayanıklılık, maliyet etkinlik ve çevre dostu özellikleri ile yaygın bir şekilde benimsenmeye başlanmıştır. Küresel otomobil üreticileri, doğal elyaf takviyeli kompozitleri giderek daha fazla araç bileşenlerine entegre etmektedir [9]. Otomotiv endüstrisi, hafif ve çevre dostu malzeme arayışını sürdürürken, doğal elyaf takviyeli polimer kompozitler (NFPC'ler) önemli bir alternatif sunmaktadır. Bu kompozit malzemeler, yüksek mekanik özellikleri ve sentetik elyaf takviyeli kompozit malzemelere göre düşük yoğunlukları sayesinde araçlarda daha hafif, dayanıklı ve yakıt verimliliği sağlayan bileşenler olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda otomotiv endüstrisinde doğal elyaf takviyeli kompozitlerin kullanımı giderek artmıştır ve bu malzemeler, aynı zamanda çevre dostu olmalarıyla da dikkat çekmektedir. Bu kompozitler, otomotivde sadece düşük maliyetli ve hafif çözümler sunmakla kalmaz, aynı zamanda emisyonları azaltmak ve sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemek için büyük bir potansiyel taşımaktadır [10].

Otomobil üretiminde kullanılan malzemelerdeki değişim, yıllar içinde önemli bir evrim geçirmiştir. 1950'lerde araçlar çoğunlukla metalik çerçevelerden üretilirken, günümüzde hafif malzemeler daha fazla tercih edilmektedir. Bu değişiklik, araç ağırlığının azaltılması, yakıt verimliliğinin artırılması ve çevresel düzenleyici gerekliliklerin karşılanması amacı taşımaktadır. Araştırmalar, araç ağırlığındaki %10'luk bir azalmanın yakıt verimliliğinde %6-8 oranında iyileşme sağlayabileceğini ortaya koymuştur. Bu bağlamda, otomotiv üreticileri, daha hafif araçlar geliştirmek için malzeme değişimi ve bileşen entegrasyonu gibi stratejileri araştırmaktadır [11].

Plastikler, otomotiv endüstrisinde önemli bir rol oynamaktadır. İşlenebilirlik, korozyona karşı dayanıklılık ve düşük maliyetleri sayesinde araç tasarımlarında tercih edilmektedir. 20. yüzyılın başlarından itibaren plastiklerin kullanımı yaygınlaşmış, 1941 yılında Henry Ford'un kenevir, sisal ve selüloz takviyeli plastikten ürettiği otomobil gövdesi bu alanda bir dönüm noktası olmuştur. Bugün, plastik bileşenlerin kullanımı önemli ölçüde artmış, 2003-2011 yılları arasında Avrupa ve Amerikan otomotiv endüstrilerinde araçlardaki plastik içeriği artmıştır. Geleneksel termoplastikler ve elastomerler lastikler, contalar ve gösterge panelleri gibi bileşenlerde yaygın kullanıma sahiptir. Ancak, cam elyaf takviyeli plastik (GFRP) ve karbon elyaf takviyeli plastik (CFRP) gibi termoset kompozitler, araç yapısal

bileşenlerinde giderek daha fazla tercih edilmektedir [11]. Son yıllarda, otomotiv iç bileşenlerinde cam ve mineral dolgular, hafif, dayanıklı ve düşük maliyetli biyoelyaflarla değiştirilmiştir. Yüzyıllardır tekstil, halat ve halı gibi çeşitli alanlarda kullanılan biyoelyaflar, günümüzde otomobil bileşenlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Jüt, muz, kenevir, keten, sisal ve ahşap elyaf gibi bitki bazlı biyoelyaflar, sürdürülebilir otomotiv üretiminde temel malzemeler haline gelmiştir [12]. Biyoelyaflara yönelik artan araştırma ilgisi, özellikle kompozit uygulamalarında cam elyaflara benzer mekanik özelliklere sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Çalışmalar, biyoelyaf takviyeli polimer kompozitlerin otomotiv üretiminde yıllık %54 oranında artış göstereceğini öngörmektedir. Avrupa otomobil üreticileri bu dönüşümün öncüsü olmuş ve biyoelyaf kompozitleri kapı panelleri, sırt dayanakları, tavan kaplamaları, paket rafları, gösterge panelleri ve bagaj kaplamalarında kullanmaya başlamışlardır [12]. Hafif kompozit malzemeler, araçların ağırlığını azaltarak emisyonları düşürmek, yakıt verimliliğini artırmak ve bakım maliyetlerini azaltmak gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Bu faydalar, biyoelyaf takviyeli kompozitleri, otomotiv sektörü için sürdürülebilir ve maliyet etkin bir alternatif haline getirmektedir. Ancak, güvenlik standartlarını sağlamak ve malzeme işleme yöntemlerini iyileştirmek konusunda bazı zorluklar bulunmaktadır. Elyaf takviyeli polimerlerin (FRP) kullanımı mühendislik alanlarında hızla artmaktadır. Ancak geleneksel FRP'ler, geri dönüştürülebilirlik ve biyobozunurluk gibi zorluklar yaratmaktadır. Bu sorunları aşmak için, biyobazlı reçineler ve biyolojik olarak parçalanabilen yeşil kompozitler geliştirilmiştir. Fosil kaynakların tükenmesi, çevre düzenlemeleri ve kompozit atıklarının bertarafına yönelik artan endişeler, sürdürülebilir malzeme talebini artırmıştır. 1980'lerden itibaren, selülozik elyaflar ve termoset reçineler içeren biyobozunur kompozitler geliştirilmiştir. 1990'larda ise, odun unu (WF) takviyeli termoplastik reçineler önemli bir sürdürülebilir alternatif olarak öne çıkmıştır [13]. Biyoelyaf takviyeli kompozitler, sürdürülebilir ve yüksek performanslı malzemelere yönelik artan talep doğrultusunda, otomotiv ve mühendislik sektörlerinde önemli bir yer kazanmaktadır. Bu kompozitler, otomotiv iç panelleri, çamurluklar, bagaj kapakları ve toplu taşıma araçları gibi alanlarda kullanılarak, araçların ağırlığını azaltır, emisyonları düşürür, yakıt verimliliğini artırır ve bakım maliyetlerini (örneğin lastik ve fren aşınması) azaltır. Böylece çevresel ve ekonomik faydalar sağlanır [10]. Biyoelyaf takviyeli kompozitlerin güvenlik gereksinimlerini karşılayabileceği ancak yapısal değişikliklerin gerektiği de vurgulanmaktadır. Bu

malzemeler, otomotiv endüstrisinde etkili bir alternatif olarak giderek daha fazla tercih edilmektedir ve toplu taşıma sistemlerinde önemli avantajlar sunmaktadır [14].

Son yıllarda, ürün geliştirme, geri dönüşüm ve biyobozunur malzemelerin kullanımı üzerine yapılan araştırmalar önemli bir artış göstermiştir. Endüstride, geleneksel malzemelerin geri dönüştürülmesinin zorluğu göz önünde bulundurulduğunda, biyobozunur dokusuz kumaşların kullanımı için artan bir ihtiyaç ortaya çıkmıştır.

Dokusuz tekstil ürünleri, endüstride hafif olmaları, ses emilimi sağlamaları, esneklikleri ve çok yönlü kullanımları gibi özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Ayrıca, düşük üretim maliyetleri, geri dönüştürülebilirlikleri ve kolay şekillendirilebilmeleri gibi avantajlar, bu malzemeleri ekonomik ve performans açısından cazip kılmaktadır.

Otomotiv endüstrisinde araç ağırlığının azaltılması ihtiyacı, doğal lif takviyeli dokusuz kumaşlardan üretilen termoplastik kompozitlerin kullanımını teşvik etmektedir. Örneğin, doğal lif/polipropilen (PP) reçine kompozitlerinin üretimi, enjeksiyon kalıplama yöntemine göre %20 daha düşük maliyetlidir ve kapı panellerinde %25-30 arasında ağırlık azaltımı sağlamaktadır. Ayrıca, yandan darbe sırasında keskin kenar oluşumunu engellemektedir. Küçük ölçekli keten/PP yapı panelleri kullanılarak enjeksiyonla kalıba eklenen parçalarla %35 ağırlık tasarrufu sağlanmıştır [15].

Literatürde doğal elyaf takviyeli kompozitlerin otomotiv endüstrisindeki kullanımı, yaklaşık bir asırlık bir geçmişe sahiptir. Bu alandaki ilk öncülerden biri Henry Ford'un 1940'ların başında geliştirdiği, soya fasulyesi, buğday, kenevir, keten ve ramie gibi doğal elyaflardan yapılmış plastik gövdeli konsept araçtır. Bu araç, geleneksel metal gövdelere kıyasla yaklaşık %25 daha hafif olmasıyla dikkat çekmiş ve doğal elyaf katkılı kompozitlerin potansiyelini ilk gösteren önemli çalışmalardan biri olmuştur [16]. 1950'li yıllarda doğal liflerin kullanımı ticari ölçekte genişlemiş ve özellikle Doğu Alman üretimi Trabant aracı, polyester matris içinde pamuk liflerinden yapılmış gövdesiyle öne çıkmıştır. O dönemde bitki lifleri, araçların iç kaplamalarında, kapı panellerinde ve tavan kaplamalarında yoğun biçimde tercih edilmiştir. Ancak 1970'ler ve 1980'lerde petrokimyasal bazlı polimerlerin (örneğin ABS plastikler) üretim sürecinde hız ve maliyet avantajları sağlaması, doğal elyafların kullanımını geriletmiştir [16]. 1980'lerin ortalarından itibaren doğal lif takviyeli kompozitlere ilgi yeniden artmaya başlamış, bu malzemelerin teknik, ekonomik ve çevresel avantajları

ön plana çıkmıştır. Jüt, keten, kenevir ve kenaf gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen liflerin hem düşük yoğunluk hem de yüksek özgül dayanım gibi özellikleri, otomotiv sektörü için cazip bir çözüm haline gelmesini sağlamıştır. Bu dönemde sosyal ve çevresel baskılar, sürdürülebilir ve çevre dostu malzeme arayışlarını artırmış, doğal lifler giderek daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır [18]. 1990'ların ortalarına gelindiğinde, özellikle Almanya'daki araç üreticileri, jüt lifleriyle güçlendirilmiş plastik kapı panelleri gibi uygulamalarla doğal lif takviyeli kompozitleri üst segment araçlara entegre etmeye başlamıştır [16]. 2000'li yıllara gelindiğinde, keten ve sisal mat takviyeli poliüretan kaplamalar, çevre dostu kompozit çözümler olarak kapı kaplamalarında kullanılmaya başlanmıştır [16]. Bu dönemde yeşil kompozitlerin sektörde yaygınlaşması hem sürdürülebilirlik hedeflerinin hem de tüketici talebinin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. 2000'li yılların sonlarında ve 2010'lu yıllarda doğal liflerin otomotiv sektöründeki rolü daha belirgin hale gelmiştir. Özellikle lüks segment ve elektrikli araçlarda, doğal lif takviyeli parçaların yalnızca teknik değil, aynı zamanda estetik amaçlarla da tercih edildiği görülmüştür. Görünür doğal lifli kapı panelleri, sadece çevreci değil, aynı zamanda tasarım açısından da farklılaşan bir yaklaşım sunmuştur [17].

Günümüzde keten ve kenevir gibi tarımsal atıklardan elde edilen doğal lifler, kapılar ve arka kanatlar gibi gövde parçalarında kullanılmaktadır. Bu malzemeler karbon fiberle benzer ağırlık ve sertlik özellikleri sağlarken, daha düşük enerji tüketimiyle üretilmektedir. Bunun yanı sıra, doğal lif takviyeli kompozitler Mercedes-Benz, BMW, Audi ve Porsche gibi markalar tarafından hem sürdürülebilirlik hem de performans artışı hedefleri doğrultusunda tercih edilmektedir [21].

Literatürdeki bu gelişmeler, doğal elyaf takviyeli kompozitlerin otomotiv endüstrisinde geleneksel metal ve sentetik malzemelere sürdürülebilir ve hafif alternatifler olarak nasıl öne çıktığını göstermektedir. Çevresel regülasyonların sıkılaşması, karbon ayak izinin düşürülmesi ve enerji tasarrufu sağlanması hedefleri doğrultusunda, doğal lif takviyeli kompozitlerin otomotiv sektöründeki kullanımının gelecekte daha da yaygınlaşması beklenmektedir [18], [19], [20].



Şekil 1.3: Endüstride kompozit malzeme [102].

1.2. Literatür Araştırması

M. R. Bambach [87], keten, jüt ve kenevir gibi doğal elyaflarla cam ve karbon gibi sentetik elyaflar kullanılarak kompozit malzemeler üretilmiştir. Numunelere uygulanan basma testleri sonucunda, karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerin en yüksek mekanik dayanımı gösterdiği belirlenmiştir. Doğal elyaflar ise daha düşük mekanik özelliklere sahip olmasına rağmen hafiflik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından avantajlar sunmaktadır. Elde edilen veriler, doğal elyaf takviyeli kompozitlerin belirli mühendislik uygulamalarında alternatif bir seçenek olabileceğini, ancak mekanik performanslarının artırılması için lif-matris ara yüzeyinin iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda ise sentetik elyaflar hala en iyi seçenek olarak öne çıkmaktadır. Bahsedilen malzemelerle ilgili M.R. Bambach tarafından yapılmış olan çalışma, hafif ve dayanıklı malzemelere yönelik araştırmalara katkı sağlayarak, doğal ve sentetik elyafların mühendislik alanındaki potansiyellerini değerlendirmektedir [87].

Panciroli ve Giannini [88], düşük hızda darbe testleri uygulayarak her iki kompozitin enerji soğurma kapasitesi, hasar mekanizmaları ve mekanik performansı incelenmiştir. Ayrıca, bu testler sayısal simülasyonlarla desteklenerek malzemelerin darbe direncine ilişkin daha kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, cam elyaf takviyeli

epoksi kompozitlerin daha yüksek darbe dayanımına sahip olduğunu göstermektedir. Ancak keten elyaf takviyeli kompozitler, darbe enerjisini daha iyi dağıtarak bazı uygulamalarda avantaj sağlayabilir. Ayrıca, keten elyafın biyobozunur ve çevre dostu olması, sürdürülebilir malzeme alternatifleri arayan endüstriler için önemli bir seçenek olduğunu göstermektedir. Doğal elyaf takviyeli kompozitlerin mühendislik uygulamalarındaki potansiyelini değerlendirmek açısından önemli katkı sağlayan çalışmada ise, özellikle hafiflik ve çevresel sürdürülebilirlik gerektiren uygulamalarda, doğal elyafların kullanımıyla ilgili yeni bakış açıları sunulmaktadır [88].

Raponi ve diğerleri [89], farklı sıcaklıklarda düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilerek malzemenin enerji soğurma kapasitesi, hasar mekanizmaları ve yapısal bütünlüğü üzerindeki etkileri ortaya koymaktadır. Sayısal simülasyonlar ve analitik hesaplamalar ise deneysel verilerle doğrulanarak sıcaklık değişiminin kompozit malzemeye olan etkisini daha iyi anlamaya yardımcı olmuştur. Sonuçlar, sıcaklığın keten/epoksi laminatların darbe dayanımı üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Artan sıcaklık, matris malzemenin mekanik özelliklerini değiştirerek kompozitin genel dayanımını etkileyebilir. Bununla birlikte, keten elyaf takviyeli kompozitlerin belirli sıcaklık aralıklarında iyi bir enerji soğurma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Doğal elyaf takviyeli kompozitlerin sıcaklık koşullarına karşı dayanıklılığını anlamak açısından önemli bir katkı sunmaktadır. Elde edilen bulgular, özellikle otomotiv ve havacılık gibi değişken sıcaklık ortamlarında kullanılan sürdürülebilir kompozit malzemelerin geliştirilmesine ışık tutmaktadır [89].

Lu ve arkadaşları [79], keten liflerinin ve keten lifi takviyeli kompozitlerin nem emilimi ile boyutsal değişimlerini incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırmada, keten liflerinin geniş bir bağıl nem aralığında nasıl radyal şişme gösterdiği belirlenmiş ve bu durumun kompozit malzemeler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada keten/polyester ve keten/epoksi kompozitlerin nem emilimine bağlı olarak kalınlık değişimi incelenmiş ve eğilme özelliklerindeki değişimler gözlemlenmiştir. Nem emilimi nedeniyle oluşan şişme, kompozitlerin mekanik dayanımında azalmaya yol açmıştır. Keten temel liflerinin, teknik liflere kıyasla daha düşük radyal şişme katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, keten/polyester ve keten/epoksi kompozitlerin kalınlık şişme katsayılarının birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Farklı bağıl nem seviyelerinde şartlandırılmış ve tamamen kuru halde test edilen kompozitlerde, nem kaynaklı şişmenin malzemenin yapısına zarar verdiği ve

eğilme dayanımını düşürdüğü görülmüştür. Çalışmada Park'ın modeli kullanılarak liflerin nem emme eğrisi tanımlanmış ve elde edilen bulgular kompozit malzemelerin nem etkisine karşı davranışlarını anlamaya yönelik önemli bir katkı sağlamıştır [79].

Aybike Çelik [28], keten lifleriyle güçlendirilmiş ve nanokil katkılı epoksi reçineli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemektedir. Araştırmada, bu kompozitlerin dayanıklılığı ve mekanik performansı detaylı olarak değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, farklı oranlarda nanokil içeren keten/epoksi kompozit numuneleri üretilmiş ve çeşitli mekanik testlere tabi tutulmuştur. Bu testler sonucunda, nanokil katkısının kompozitlerin mukavemetine etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, belirli oranlarda nanokil katkısının malzemenin mekanik dayanımını artırdığını, ancak aşırı miktarda kullanımının olumsuz sonuçlara yol açabileceğini göstermektedir. Nanokil katkılı keten/epoksi kompozitlerin hafiflik ve dayanım açısından sunduğu avantajları ortaya koyarak, sürdürülebilir malzeme alternatifleri geliştirme konusunda önemli bulgular sunmaktadır. Elde edilen veriler, bu tür kompozitlerin otomotiv, havacılık ve yapı malzemeleri gibi çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanım potansiyelini değerlendirmek için değerli bir kaynak oluşturmaktadır [28].

Mehmet Safa Bodur [30], lif takviyeli kompozitlerde lif/matris ara yüzey bağının iyileştirilmesine yönelik yapılan çalışmaları ve çevresel faktörlerin bu malzemeler üzerindeki etkilerini incelemektedir. Araştırmada, doğal liflerin yüzey modifikasyon yöntemleri değerlendirilmiş ve bu yöntemlerin kompozit malzemenin mekanik özelliklerine olan etkileri deneysel olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, kompozit numuneler farklı çevresel koşullarda test edilerek nem, sıcaklık ve diğer dış etkenlerin malzemenin yapısal bütünlüğüne olan etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, lif/matris ara yüzeyinin geliştirilmesiyle kompozitlerin mekanik dayanımının önemli ölçüde artırılabilceğini göstermektedir. Özellikle kimyasal ve fiziksel yüzey işlemleri, liflerin matris ile daha güçlü bir bağ oluşturmalarını sağlamaktadır. Bununla birlikte, çevresel faktörler doğal lif takviyeli kompozitlerin uzun vadeli performansını etkileyebilmekte ve bu durum malzeme seçimi ile üretim süreçlerinde dikkate alınması gereken önemli bir unsur olarak öne çıkmaktadır [30].

Seçkin Kandemir [35], doğal elyaf takviyeli kompozit malzemelerin vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) yöntemiyle üretilmesini ve bu malzemelerin mekanik ile metalografik özelliklerinin incelenmesini amaçlamaktadır. Araştırmada, farklı doğal elyaf türleri kullanılarak kompozit malzemeler üretilmiş ve bu numuneler

çeşitli mekanik testlere tabi tutulmuştur. Ayrıca, kompozitlerin iç yapısal bütünlüğü ve lif-matris ara yüzey etkileşimlerini değerlendirmek için metalografik analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, vakum destekli reçine transfer kalıplama yönteminin doğal elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde etkin bir süreç olduğunu göstermektedir. Üretilen kompozitlerin mekanik dayanımı, lif türüne ve üretim parametrelerine bağlı olarak değişim göstermiştir. Metalografik incelemeler ise lif-matris ara yüzey bağının malzeme performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışma, doğal elyaf takviyeli kompozitlerin üretim süreçlerine dair önemli bilgiler sunmakta ve bu malzemelerin mühendislik uygulamalarında daha verimli bir şekilde kullanılabilmesi için üretim yöntemlerinin optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır [35].

Wang ve diğerleri [79], keten liflerinin izosiyanat ile yüzey modifikasyonunu ve bu işlemin lif/epoksi ara yüzey özelliklerine etkisini incelemektedir. Araştırmada, keten lifleri izosiyanat ile kimyasal olarak işlenmiş ve bu modifikasyonun liflerin epoksi matris ile bağlanma performansına etkisi değerlendirilmiştir. Deneysel analizlerde, yüzey modifikasyonunun lif-matris ara yüzeyindeki yapışma kuvvetini artırdığı ve kompozit malzemenin genel mekanik özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, izosiyanat ile modifiye edilen keten liflerinin yüzey enerjisinin arttığını ve epoksi matrise daha güçlü bir şekilde bağlandığını göstermektedir. Bu gelişmeler, lif-matris ara yüzey dayanımının iyileştirilmesine katkı sağlayarak kompozit malzemelerin mukavemetini artırmaktadır. Doğal lif takviyeli kompozitlerin mekanik performansını optimize etmek için yüzey modifikasyonlarının önemini vurgulamakta ve özellikle epoksi bazlı uygulamalar için daha dayanıklı ve verimli kompozit malzemeler geliştirilmesine yönelik önemli veriler sunmaktadır [79].

Hasan Yıldızhan [37], polimer matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemektedir. Araştırmada, farklı polimer matris türleri kullanılarak üretilen kompozitlerin mekanik dayanımları değerlendirilmiş ve bu malzemelerin mühendislik uygulamalarındaki performansları analiz edilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında, çeşitli takviye malzemeleri ile güçlendirilmiş polimer matrisli kompozit numuneler üretilmiş ve çekme, eğme ve darbe testleri gibi mekanik testlere tabi tutulmuştur. Elde edilen veriler, farklı matris ve takviye malzemelerinin kompozitlerin mukavemeti üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Sonuçlar, polimer matrisli kompozitlerin hafiflik, yüksek mukavemet ve dayanıklılık gibi avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Ayrıca, takviye malzemesi türü, fiber yönelimi ve üretim parametreleri gibi faktörlerin, kompozitlerin mekanik performansı üzerinde belirleyici bir rol oynadığı görülmüştür [37].

Mahmutcan Karslı [38], hafif silah üretiminde kullanılacak polimer kompozit malzemelerin seçimini ve bu malzemelerin performans özelliklerini incelemektedir. Araştırmada, polimer matrisli kompozitlerin hafiflik, mukavemet, darbe dayanımı ve çevresel faktörlere karşı direnç gibi özellikleri analiz edilmiştir. Farklı polimer matris türleri ve takviye malzemeleri karşılaştırılarak, hafif silah bileşenlerinde en uygun malzeme kombinasyonlarının belirlenmesine yönelik bir değerlendirme yapılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında, polimer kompozit malzemelerin mekanik testleri gerçekleştirilmiş ve özellikle mukavemet, aşınma direnci ve darbe dayanımı gibi kritik özellikler test edilmiştir. Ayrıca, bu malzemelerin geleneksel metal alaşımlarla karşılaştırmalı olarak avantajları ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar, polimer kompozitlerin hafif silah uygulamalarında ağırlık azaltma, korozyon direnci ve üretim kolaylığı gibi önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, malzeme seçimi sürecinde mekanik dayanıklılık, çevresel koşullara karşı direnç ve üretim maliyetleri gibi faktörlerin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır [38].

Hilal Filiz Öztekin [40], sürekli elyafarla takviye edilmiş termoplastik matrisli kompozit malzemelerin geliştirilmesini ve bu malzemelerin mekanik özelliklerinin deneysel olarak incelenmesini amaçlamaktadır. Araştırmada, farklı termoplastik matrisler (örneğin polipropilen, poliamid) ve sürekli elyaf takviyeleri (karbon, cam, doğal lifler) kullanılarak çeşitli kompozit numuneler üretilmiştir. Üretim sürecinde malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi için farklı işleme yöntemleri ve parametreler uygulanmıştır. Mekanik testler kapsamında çekme, eğme ve darbe dayanım testleri gerçekleştirilerek, farklı matris ve takviye kombinasyonlarının mekanik performansa etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, sürekli elyaf takviyesinin termoplastik kompozitlerin mukavemetini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Çalışmada ayrıca, termoplastik matrisli kompozitlerin hafiflik, geri dönüştürülebilirlik ve üretim kolaylığı gibi avantajları vurgulanmış ve mühendislik uygulamalarında kullanım potansiyeli tartışılmıştır. Özellikle otomotiv, havacılık ve savunma sanayi gibi sektörlerde kullanılabilecek yüksek performanslı termoplastik kompozitlerin geliştirilmesine yönelik önemli bilgiler sunmaktadır [40].

Mazumdar [48], kompozit malzeme üretim süreçlerine odaklanarak, malzeme seçimi, ürün tasarımı ve mühendislik uygulamalarını kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Kitapta, kompozit üretiminde kullanılan malzemeler (matris ve takviye malzemeleri) tanıtılmış, farklı üretim teknikleri detaylı olarak incelenmiştir. Vakum infüzyon, el yatırma, reçine transfer kalıplama (RTM), sıcak presleme ve otomatik fiber yerleştirme (AFP) gibi yöntemlerin avantajları, dezavantajları ve uygulama alanları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, üretim süreçlerinin mühendislik tasarımına etkileri, maliyet analizi ve kalite kontrol süreçleri üzerinde durulmuştur. Kompozit bileşenlerin otomotiv, havacılık, savunma ve denizcilik sektörlerinde kullanım potansiyeli tartışılmıştır. Kompozit üretimiyle ilgilenen mühendisler, araştırmacılar ve üretim uzmanları için kapsamlı bir kaynak niteliği taşımakta olup, malzeme seçimi ve üretim süreçlerinin verimliliğini artırmaya yönelik stratejiler sunmaktadır [48].

Miller ve Gibson [71], termoplastik matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan emprenye (ıslatma) tekniklerini incelemektedir. Araştırmada, termoplastik reçinelerin elyaflarla etkili bir şekilde birleşmesini sağlamak için kullanılan farklı emprenye yöntemleri karşılaştırılmıştır. Bunlar arasında eriyik emprenye, çözeltide emprenye ve toz emprenye gibi teknikler yer almaktadır. Her yöntemin avantajları, dezavantajları ve üretim süreçlerine etkileri detaylı olarak ele alınmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında, farklı termoplastik matrislerin (örneğin polipropilen, poliamid, PEEK) ve takviye elyaflarının (karbon, cam, doğal lifler) emprenye süreçlerindeki performansları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, matris ve elyaf arasındaki bağlanma kalitesinin, mekanik dayanım üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Termoplastik matrisli kompozitlerin üretiminde optimal emprenye yönteminin seçilmesinin, malzeme mukavemeti, üretim verimliliği ve nihai ürün kalitesi açısından kritik bir faktör olduğunu vurgulamaktadır. Sonuçlar, otomotiv, havacılık ve inşaat gibi sektörlerde termoplastik kompozitlerin kullanım potansiyelini artırmaya yönelik önemli bilgiler sunmaktadır [71].

Wang ve arkadaşları [60], nanokil ile kaplanmış keten liflerinin, keten/epoksi kompozitlerin ara yüzey kayma dayanımı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektedir. Araştırmada, keten liflerinin yüzeyine nanokil kaplanarak lif-matris ara yüzey bağlanmasını iyileştirmek hedeflenmiştir. Nanokil modifikasyonunun etkileri, tek lif çekme testi, ara yüzey kayma dayanımı testi ve kompozit numuneler üzerinde çekme ve eğilme testleri ile değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, nanokil

kaplamanın keten liflerinin epoksi matrise bağlanma kuvvetini artırdığını ve bunun sonucunda kompozitin mekanik özelliklerinde iyileşmeler sağladığını göstermiştir. Özellikle ara yüzey kayma dayanımı ve çekme mukavemetinde önemli artışlar gözlemlenmiştir. Doğal lif takviyeli kompozitlerde ara yüzey modifikasyonlarının mekanik performansa olan etkisini vurgulamakta ve nanokil katkısının sürdürülebilir kompozit malzemelerin geliştirilmesinde önemli bir yöntem olabileceğini göstermektedir [60].

Wang ve arkadaşları [86], kimyasal modifikasyon yöntemi kullanılarak keten lifleriyle takviye edilmiş plastik kompozitlerin mekanik ve ara yüzey özelliklerini incelemektedir. Araştırmada, keten lifleri çeşitli kimyasal işlemlerle modifiye edilerek lif-matris ara yüzey bağlanmasının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Kullanılan kimyasal modifikasyonlar arasında alkali işlem, silan kaplama ve diğer yüzey iyileştirme yöntemleri yer almaktadır. Bu işlemlerin, liflerin mekanik özellikleri ve matrisle etkileşimleri üzerindeki etkileri çekme, eğilme ve ara yüzey kayma dayanımı testleri ile değerlendirilmiştir. Deneysel bulgular, kimyasal modifikasyonların keten liflerinin yüzey özelliklerini değiştirerek epoksi ve diğer polimer matrislerle daha iyi bütünleşmesini sağladığını göstermiştir. Bu da kompozitin çekme dayanımı, eğilme mukavemeti ve ara yüzey kayma dayanımında önemli iyileşmeler sağlamıştır. Doğal lif takviyeli kompozitlerin mekanik performansını artırmak için kimyasal modifikasyon yöntemlerinin etkili bir strateji olabileceğini ortaya koymakta ve sürdürülebilir kompozit malzeme üretimi için önemli bilgiler sunmaktadır [86].

Wang ve arkadaşları [79], keten liflerinin izosiyanat ile yüzey modifikasyonunun, lif/epoksi ara yüzey özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektedir. Çalışmada, keten lifleri izosiyanat ile kimyasal olarak işlenerek yüzey enerjileri ve epoksi matrisle etkileşimleri iyileştirilmiştir. Modifikasyon işlemi sonrası liflerin yüzey morfolojisi, kimyasal bileşimi ve ıslanabilirliği analiz edilmiştir. Ara yüzey kayma dayanımı ve kompozit malzemenin çekme ve eğilme mekanik performansı test edilerek değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, izosiyanat modifikasyonunun lif-matris bağlanmasını güçlendirdiğini, ara yüzey kayma dayanımını artırdığını ve kompozitin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Özellikle çekme ve eğilme dayanımında belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Doğal lif takviyeli kompozitlerin performansını artırmak için izosiyanat bazlı yüzey modifikasyonunun

etkili bir yöntem olabileceğini ortaya koyarak, biyobazlı ve sürdürülebilir kompozit malzemelerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır [79].

Prasad ve çalışma arkadaşları [90], keten elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin katmanlar arası kırılma tokluğunu artırmak amacıyla nano titanyum dioksit (nano TiO_2) içeren bir matris modifikasyonu üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Çalışmada, kompozit malzemeler sıkıştırma kalıplama yöntemiyle üretilmiş ve 50 nm boyutundaki nano TiO_2 partikülleri, epoksi reçineye mekanik karıştırıcı yardımıyla homojen şekilde dağıtılmıştır. Ardından, farklı yükleme hızlarında sonikasyon işlemi uygulanarak malzeme özellikleri iyileştirilmiştir. Mod I ve Mod II katmanlar arası kırılma tokluğu değerleri, sırasıyla Çift Konsollu Kiriş (DCB) ve End Notch Flexure (ENF) test numuneleri ile belirlenmiştir. Ek olarak, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) teknikleri kullanılarak kırık yüzeylerin morfolojik ve yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, nano TiO_2 ilavesinin kompozitlerin kırılma tokluğunu önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Özellikle, %0,4 ağırlık oranında TiO_2 içeren kompozitlerde Mod I kırılma tokluğu %52 oranında, %0,5 ağırlık oranında TiO_2 içeren örneklerde ise Mod II kırılma tokluğu %73 oranında artış göstermiştir. Bu iyileşmenin, nanopartiküllerin elyaf yüzeyine difüzyonu sayesinde fiber-matris ara yüzeyinin güçlenmesiyle ilişkili olduğu tespit edilmiştir [90].

Oun ve çalışma arkadaşları [91], yüksek sıcaklık koşullarında keten elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerindeki değişimi inceleyerek, grafen nanoparçacıklarının bu sistem üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, farklı ağırlık yüzdelerinde (%0, %0,5, %1 ve %1,5) grafen içeren kompozit numuneler üretilmiş ve 20°C'den 100°C'ye kadar değişen sıcaklıklarda mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Grafen katkısının, özellikle keten lifleri ile epoksi matrisi arasındaki ara yüzey etkileşimlerini nasıl değiştirdiğini belirlemek amacıyla çekme, eğilme ve tabakalar arası kesme mukavemeti testleri uygulanmış ve ardından taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile kırık yüzey analizi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, %0,5 grafen ilavesinin kompozitlerin eğme dayanımı ve tabakalar arası kesme mukavemetinde önemli bir iyileşme sağladığını göstermektedir. Ancak, sıcaklık arttıkça mekanik özelliklerde belirli bir düşüş gözlemlenmiş, bu durumun termal genleşme ve polimer matrisin yumuşaması ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. Elde edilen bulgular, grafen nanoparçacıklarının keten elyaf takviyeli epoksi kompozitlerde ara

yüzey bağlarını güçlendirdiğini ve mekanik dayanımı artırdığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, sıcaklık artışının belirli bir eşiğin üzerinde malzemenin mukavemetine olumsuz etki edebileceği sonucuna varılmıştır [91].

Dias ve çalışma arkadaşları [2], sentetik ve doğal elyaf takviyeli polimer kompozitlerin üretiminde nanokil katkısının etkilerini inceleyen bir derleme çalışması gerçekleştirmiştir. Çalışmada, nanokil ilavesinin kompozitlerin mekanik performansını nasıl değiştirdiği ve farklı nanokil konsantrasyonlarının malzeme özellikleri üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Yapılan araştırmalar, belirli oranlarda nanokil içeren kompozitlerin daha iyi mekanik performans sergilediğini göstermiştir. Elde edilen numuneler, kompozit ağırlığına göre %2-4 arasında nanokil içermekte olup, nanokil katkılı cam elyaf kompozitlerin doğal elyaf katkılı kompozitlere kıyasla daha üstün özellikler sunduğu belirlenmiştir. Bu çalışmalara paralel olarak, doğal elyaf fiberlerden örülmüş yapılar ile güçlendirilmiş termoset temelli nanokil katkılı kompozit malzemelerin üretimi ve bu malzemelerin mekanik, dinamik mekanik ve termal özelliklerinin belirlenmesi üzerine deneysel araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Doğal elyaf olarak keten lifi kullanılmış ve elyaf-matris ara yüzey tutunuşunu artırmak amacıyla epoksi matris içerisine ağırlıkça farklı oranlarda nanokil ilave edilmiştir. Üretilen kompozitlerin mekanik performansları karşılaştırılmış ve nanokil katkısının malzeme üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ek olarak, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak nanokil ve epoksi arayüzey bağı analiz edilmiş ve nanokil katkısının kompozitlerin mekanik dayanıklılığını artırmada önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, nanokil katkılı kompozit malzemelerin otomotiv, savunma, makine, ev aletleri, mobilya, elektronik, medikal, havacılık, gıda paketlenme ve diğer endüstrilerde potansiyel kullanım alanlarına sahip olduğunu ortaya koymuştur. Nanokil katkılı kompozitler, geleneksel metaller veya standart kompozit malzemelere kıyasla daha hafif ve dayanıklı bir alternatif sunarak ileri mühendislik uygulamaları için uygun bir seçenek olarak değerlendirilmektedir [2].

Alwan [57], tarafından hazırlanan tezde, Kevlar ve karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelere nano kil katkısı yapılmasının malzemenin titreşim sönümleme, çekme dayanımı ve eğilme dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, iç içe geçen hibrit elyaf düzenine sahip kompozit plakalar farklı oranlarda nano kil ile hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde dinamik mekanik analiz (DMA), çekme ve üç nokta eğilme testleri uygulanmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, belirli

bir orana kadar eklenen nano kilin kompozit malzemelerin sönümleme kapasitesini, mukavemetini ve rijitliğini artırdığı görülmüştür. Ancak, fazla miktarda nano kil kullanımının matris fazda yığılmalara neden olarak performansı düşürebileceği de belirtilmiştir. Çekme ve eğilme mukavemetinde en yüksek iyileşme, sırasıyla %13 ve %28,4 artışla, %1,0 ve %2,0 oranlarında nano kil içeriğinde elde edilmiştir. Bu bağlamda, nano katkıların miktar ve dağılım optimizasyonunun kompozitlerin mekanik ve dinamik özellikleri açısından kritik olduğu vurgulanmıştır [57].

Rajeshkumar G. ve arkadaşları [12], doğal ve sentetik liflerle takviye edilmiş nanokil katkılı hibrit polimerik kompozitlerin üretimi, yapısı, özellikleri ve uygulama alanları detaylı olarak incelenmiştir. Özellikle nanokil katkısının, kompozitlerin mekanik performansı üzerindeki etkisi vurgulanmıştır. Nanokil gibi nano boyutlu dolgu maddeleri, kompozit matrisine homojen şekilde dağıtıldığında; çekme dayanımı, eğilme dayanımı, sertlik ve ısı stabilite gibi özelliklerde önemli iyileşmeler sağlanabilmektedir. Araştırmada, hem doğal liflerin (jüt, keten, kenevir vb.) çevre dostu ve hafif yapısına, hem de nanokilin yüksek yüzey alanı ve katmanlı yapısına dikkat çekilmiştir. Bu iki malzeme türünün birlikte kullanılması, sürdürülebilirlik ve performans arasında bir denge kurma potansiyeli taşımaktadır. Ayrıca üretim teknikleri (elle yatırma, sıcak presleme, vakum infüzyon, ekstrüzyon vb.) ve proses parametrelerinin kompozit özellikleri üzerindeki etkileri de değerlendirilmiştir. Çalışma, özellikle otomotiv, yapı, ambalaj ve spor ekipmanları gibi alanlarda doğal lif/nanokil hibrit kompozitlerinin artan önemine işaret etmekte ve bu malzemelerin, gelecekte çevre dostu mühendislik çözümleri için önemli bir alternatif oluşturabileceğini vurgulamaktadır [12].

Ünal [9], nano katkılı kompozit malzemelerin yorulma karakteristiği detaylı şekilde incelenmiştir. Çalışmada düz dokuma cam kumaş takviyeli epoksi esaslı kompozit sistemlerine farklı oranlarda (%0,5- %2) nanokil eklenmiş ve bu katkının mekanik performans üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Yapılan çekme, eğilme, düşük hızlı darbe ve yorulma testleri sonucunda, özellikle %0,5 nanokil katkısının kompozit yapının elastisite modülünü ve yorulma dayanımını artırdığı belirlenmiştir. Çekme deneyi sonuçların da %0,5 nanokil içeren numunelerde %34'lük bir artış görülmektedir. Ayrıca, nanokil oranının artışı ile darbe direncinde de artış gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerde nanokil gibi nano katkı maddelerinin performans artırıcı bir unsur

olarak kullanılabileceğini ve bu malzemelerin yorulma dayanımı açısından optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır [9].

Bayram [92], polimer epoksi reçineye farklı oranlarda (yüzde 0,5, yüzde 1, yüzde 1,5) nanokil takviyesi yapılarak cam fiber elyaflarla takviye edilmiş nanokompozit malzemeler üretilmiştir. Bu çalışmada, nanokil katkısının mekanik ve termal özellikler üzerindeki etkileri incelenmiş ve çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, nanokilin kompozit malzemelerin çekme dayanımını, elastisite modülünü, basma dayanımını ve dinamik mekanik özelliklerini artırdığını göstermiştir. Özellikle %1 oranındaki nanokil takviyesi, en yüksek iyileşmeyi sağlamış ve kompozitlerin ısı dayanımını iyileştirmiştir. Çalışma, nanokil katkısının nanokompozitlerin viskoelastik ve termal özelliklerini geliştirdiğini ortaya koymuş ve bu tür malzemelerin potansiyel uygulama alanları olarak ambalaj ve paketleme sanayisine katkı sağlayabileceğini vurgulamıştır. Ayrıca, çevresel şartlar altındaki davranışların da incelenmesi gerektiği belirtilmiştir [92].

Esendemir [93], hibrit kompozit malzemelerde nanokil ilavesinin mekanik ve darbe özelliklerine olan etkisi üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalardan biri, cam ve kevlar elyafları ile güçlendirilmiş epoksi reçine tabanlı hibrit kompozitler üzerine yapılan araştırmadır. Çalışmada, farklı nanokil ilave oranları (%0, %1, %3) ile silan ve amine gruplu fonksiyonelleştirilmiş nanokil, hibrit kompozitlere ilave edilmiştir. Araştırmada, nanokil katkısının kompozitlerin mekanik özelliklerine, özellikle darbe dayanımına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlar, nanokil ilavesinin kompozitlerin darbe dayanımını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Özellikle %1 oranında nanokil ilavesi, en yüksek darbe dayanımını sağlamış ve kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmiştir. Nanokil katkısının, kompozitlerin darbe enerjisini emme kapasitesini artırarak, malzemenin genel performansını yükselttiği belirlenmiştir. Bu bulgular, nanokilin hibrit kompozitlerde performans iyileştirmeleri sağladığını ve potansiyel olarak endüstriyel uygulamalarda faydalı olabileceğini ortaya koymaktadır [93].

Gürel [94], nanopartikül ilavesinin epoksi reçine bazlı nanokompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada, halloysit (HNT), NanoKil ve tungsten karbür (WC) nanopartikülleri kullanılarak, bu katkı maddelerinin farklı oranlarda (%1, %2, %3, %4, %5) epoksi reçineye eklenmesiyle kompozitler üretilmiştir. Kompozit numuneler, gezegensel santrifüj karıştırma ve mekanik

karıştırma yöntemleri ile hazırlanmış ve ardından çekme, eğilme ve izod darbe testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, nanopartiküllerin kompozitlerin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Özellikle gezegensel santrifüj karıştırma yöntemiyle hazırlanan halloysit katkılı kompozitlerde çekme dayanımında %30'a kadar artışlar gözlemlenmiştir. Nanokil katkılı numunelerde ise tüm mukavemet değerlerinde düşüşler yaşanmış ve bu formülasyonların kullanılabilirliği düşük bulunmuştur. Tungsten karbür (WC) katkılı kompozitlerde ise dayanım değerlerinde artış sağlanmış ve süneklik de belirgin şekilde artmıştır. En iyi sonuç, halloysit nanopartikülü kullanılarak %1 oranında yapılan katkılarda elde edilmiştir. Bu numuneler, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dayanımında en yüksek performansı sergilemiştir. Halloysit katkısı, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirirken, aynı zamanda kompozitlerin sıcaklık dayanımını artırmıştır. Elde edilen bulgular, santrifüj karıştırma yönteminin daha homojen karışımlar sağlayarak mekanik özellikleri iyileştirmede etkili olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, nanopartikül içeren nanokompozitlerin endüstriyel uygulamalarında potansiyel faydalar sunduğunu ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi açısından önemli katkılar sağladığını ortaya koymaktadır [94].

Ongun [95], karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozitlere karbon nanotüp (CNT) ve nanokil katkılarının ilave edilmesiyle düşük hızlı darbe altındaki enerji absorpsiyon davranışları incelenmiştir. Çalışma kapsamında, matris malzemesine sabit %0,3 oranında karbon nanotüp ve değişen oranlarda (%1, %3 ve %5) nanokil eklenerek sekiz farklı numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde çekme, eğilme ve düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır. Elde edilen test sonuçlarına göre, %0,3 CNT ve %1 nanokil katkısı içeren numunelerin hem mekanik özelliklerde hem de darbe dayanımında en yüksek performansı gösterdiği belirlenmiştir. Bu bulgular, CNT ve nanokil katkılarının birlikte kullanımının sinerjik bir etki yaratarak kompozit malzemelerin mekanik performansını ve enerji sönümleme kapasitesini artırabileceğini ortaya koymaktadır [95].

Siew Sand Chee ve arkadaşları [49], bambu ve kenaf lifleriyle güçlendirilmiş epoksi esaslı hibrit kompozitlere nanokil ilavesinin mekanik ve dinamik mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kompozitlere %1 oranında organik olarak modifiye edilmiş montmorillonit (OMMT), montmorillonit (MMT) ve halloysit nanotüp (HNT) eklenmiştir. Elde edilen sonuçlar, OMMT katkısının kompozitlerin çekme, eğilme ve

darbe dayanımlarını en fazla artırdığını göstermektedir; bu katkı ile sırasıyla 55,82 MPa, 105 MPa ve 65,68 J/m değerlerine ulaşılmıştır. Ayrıca, dinamik mekanik analiz sonuçlarına göre, OMMT katkısı kompozitlerin depolama modülünü %98,4 oranında artırmıştır. Morfolojik analizler, OMMT katkılı kompozitlerde lif-matris arayüzeyinin daha güçlü olduğunu ve daha az boşluk, mikro çatlak ve lif çekilmesi gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, OMMT katkılı bambu/kenaf/epoksi hibrit nanokompozitlerin, hafiflik ve yüksek mukavemet gerektiren zemin panelleri ve koltuk sırtlıkları gibi yük taşıyan yapısal uygulamalarda potansiyel kullanımını önermektedir [49].

Santulli [31], nanokil katkılı doğal elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini incelediği çalışmada, bu tür kompozitlerin sürdürülebilirlik açısından büyük potansiyele sahip olduğunu vurgulamıştır. Doğal elyafların biyolojik olarak parçalanabilir matrislerle birlikte kullanımı, çevre dostu kompozit üretimi açısından avantaj sunarken; liflerin nem hassasiyeti, boyutsal değişkenlikleri ve termal kararlılıkları gibi bazı önemli dezavantajlara da sahip olduğunu belirtmiştir. Araştırmada, bu zorlukların giderilmesi amacıyla kompozit yapıya düşük oranlarda (%5'ten az) nanokil ilavesinin, özellikle boyutsal kararlılık, işlenebilirlik ve bazı mekanik özellikler (çekme, eğilme, darbe gibi) üzerinde olumlu etkiler yarattığı ifade edilmiştir. Bununla birlikte, nanokilin matris ile yeterli seviyede etkileşime girememesi durumunda, beklenen performans artışının sağlanamadığına da dikkat çekilmiştir. Özellikle apolar polimer matrisler (örneğin poliolefinler) ile polar nanokil yapılarının uyumsuzluğu, ara yüzey bağlarının zayıf kalmasına neden olabilmektedir. Ayrıca çalışmada, çok katmanlı ve karmaşık lif düzenlemeleri ile nanokilin etkisinin artırılabilmesi, su absorpsiyonuna karşı dayanıklılığın ölçülmesi gibi çevresel etkilere karşı davranışların test edilmesinin önemli olduğu ve bitkisel yağ bazlı termoset biyomatrislerin geliştirilmesinin bu alandaki yenilikçi yaklaşımları destekleyebileceği belirtilmiştir. Doğal elyaf takviyeli kompozitlerin çevresel ve yapısal performanslarını artırmaya yönelik literatürdeki önemli katkılardan biri olarak değerlendirilmektedir [31].

Arulmurugan ve Venkateshwarann [96], nanokil katkılı doğal lif takviyeli kompozitlerin mekanik ve titreşim özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, nanokil katkısının kompozitlerin titreşim performansını nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Bu çalışmada, polyester reçinesine farklı oranlarda (%1, %3, %5 ve %7) nanokil

eklenerek kompozit malzemeler üretilmiştir. Araştırmada, optimum homojen dağılım sağlamak amacıyla ultrasonikasyon yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlar, nanokil katkısının kompozitlerin titreşim frekansını artırmakta etkili olduğunu ve özellikle %5 oranındaki nanokil katkısının en yüksek mekanik dayanım ve titreşim performansını sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, %5 oranındaki nanokil ile, jüt lifi takviyesi de kullanılmış ve bu kombinasyonun, titreşim özelliklerinde önemli iyileşmeler sağladığı gözlemlenmiştir. Jüt lifi içeriğinin artırılmasıyla birlikte kompozitlerin doğal frekansının da yükseldiğini göstermiştir. Bununla birlikte, %5 nanokil ve %15 jüt lifi oranının, kompozitlerin hem mekanik dayanımını hem de titreşim performansını optimize eden en uygun kombinasyon olduğu belirlenmiştir. Bu oran, doğal frekans ve mekanik dayanım testlerinde en iyi sonuçları veren oran olarak tespit edilmiştir. Nanokil katkısının doğal lif takviyeli kompozitlerde titreşim performansını geliştirmede önemli bir rol oynadığını ve bu tür kompozit malzemelerin uygulamalı mühendislik alanlarında kullanılabilirliğini artırabileceğini ortaya koymaktadır [96].

Essabir ve arkadaşları [53], doğal lifler (alfa lifi, çam kozalağı lifi, şeker kamışı bagas lifi, hindistancevizi lifi) ile nanokil katkılı polipropilen (PP) matrisli hibrit kompozit malzemeler üretilmiş ve bu kompozitlerin mekanik, morfolojik, termal ve reolojik özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmada doğal liflere alkali işlem uygulanmış, nanokil ise saflaştırılarak katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; nanokil ve doğal lif takviyesi, kompozitlerin çekme ve eğilme dayanımı ile sertlik gibi mekanik özelliklerini artırmış; aynı zamanda ısıya karşı dayanım ve viskozite özelliklerinde iyileştirmeler sağlamıştır. Bu bağlamda, nanokil katkısının yalnızca yapısal dayanımı değil, aynı zamanda malzemenin işlenebilirliği ve performans kararlılığını da olumlu etkilediği görülmüştür. Çalışma, sürdürülebilir ve yüksek performanslı hibrit kompozitlerin geliştirilmesinde nanokil ve doğal liflerin birlikte kullanımının önemli bir potansiyel sunduğunu ortaya koymuştur [53].

Yousefian ve Rodrigue [54], nanokil ve doğal lifler kullanılarak hibrit kompozit köpükler üretilmiş ve bu malzemelerin mekanik, morfolojik, termal ve reolojik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada, ilk olarak doğal liflerin türleri, özellikleri ve avantajları tanıtılmış, ardından nanokilin yapısı, özellikleri ve uygulamaları ele alınmıştır. Nanokil ve doğal liflerin birleşimiyle oluşturulan hibrit kompozit sistemlerinin son dönemdeki gelişmeleri gözden geçirilmiş ve bu malzemelerin köpük formasyonlarıyla birlikte nasıl iyileştirilebileceği tartışılmıştır.

Sonuçlar, nanokil ve doğal lif takviyesinin, kompozit köpüklerin yapısal bütünlüğünü ve performansını artırmada etkili olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, nanokil ve doğal liflerin birlikte kullanımının, sürdürülebilir ve yüksek performanslı kompozit malzemelerin geliştirilmesinde önemli bir potansiyel sunduğunu ortaya koymaktadır [54].

Chen ve arkadaşları [97], doğal elyaf takviyeli polimer kompozitlerinde nanokil katkısının etkileri incelenmiştir. Çalışmada, farklı oranlarda nanokil eklenerek, kompozitlerin mekanik dayanımı, termal stabilitesi ve nem direnci gibi özellikler değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, %2-3 oranında nanokil katkısının kompozitlerin mekanik özelliklerini en yüksek oranda iyileştirdiği bulunmuştur. Özellikle bu oran, kompozitlerin çekme dayanımını ve eğilme modülünü belirgin şekilde artırırken, termal özelliklerini de güçlendirmiştir. Bu araştırma, nanokilin doğal elyaf ve polimer arasındaki bağları güçlendirerek, kompozitlerin mikroyapısal bütünlüğünü iyileştirdiğini ve dolayısıyla malzemenin genel performansını artırdığını göstermektedir. Nanokil, özellikle kompozitlerin nem direncini de artırarak, çevresel etmenlere karşı dirençlerini geliştirmektedir. Ayrıca, yapılan analizler, nanokil oranının artmasıyla birlikte kompozitlerde belirli bir doyuma ulaşıldığını ve aşırı nanokil katkısının malzemenin işlenebilirliğini olumsuz etkileyebileceğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, bu çalışma, doğal elyaf ve polimer kompozitlerinde nanokil takviyesinin, kompozitlerin mekanik ve termal performanslarını optimize etme noktasında önemli bir potansiyele sahip olduğunu vurgulamaktadır. Özellikle %2-3 oranında nanokil eklemesi, en iyi sonuçları vermiş ve malzeme özelliklerini güçlendirmiştir. Bu bulgular, sürdürülebilir ve yüksek performanslı kompozit malzemeler geliştirmek isteyen endüstriler için önemli rehber niteliğindedir [97].

Deepak Verma [65], doğal elyaf takviyeli polimer kompozitlerin nanokil ile güçlendirilmesinin, malzemenin mekanik özelliklerini ve çevresel dayanıklılığını önemli ölçüde artırdığı belirtilmiştir. Bu çalışma, nanokilin, doğal elyaf kompozitlerinin yapısal ve termal performansını geliştirmek için etkili bir takviye malzemesi olarak kullanımını vurgulamaktadır. Nanokil, kompozitlerin suya dayanıklılığını artırırken, aynı zamanda malzemenin termal stabilitesini ve yanmazlık özelliklerini de geliştirmektedir. Nanokil takviyesi ile yapılan kompozitlerin üretim sürecine dair çeşitli işleme tekniklerini ele almıştır. Özellikle vakum infüzyon, el yatırma ve enjeksiyon kalıplama gibi yöntemlerin, doğal elyaflar ve nanokil ile

güçlendirilmiş polimer kompozitlerde başarılı bir şekilde kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu işleme yöntemleri, nanokilin homojen dağılımını ve elyaf ile polimer arasındaki bağları güçlendirerek, kompozitlerin mekanik dayanımını artırmaktadır. Verma'nın çalışmasında elde edilen sonuçlar, nanokil oranının kompozitin performansı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. En iyi sonuçlar, nanokil oranının %3 ile %5 arasında olduğu kompozitlerden elde edilmiştir. Bu oran, malzemenin çekme dayanımını %15, eğilme dayanımını ise %20 oranında artırırken, su emme oranını ve termal genleşme katsayısını da düşürmüştür. Diğer yandan, nanokil oranının %7'nin üzerine çıkmasıyla birlikte, kompozitlerin işlenebilirliğinin olumsuz etkilendiği ve mekanik özelliklerin azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular, nanokil takviyesi nin optimal oranlarının belirlenmesinin, kompozitlerin performansı ve üretim verimliliği açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır. Bu tür kompozitlerin sürdürülebilir çözümler sunduğunu belirterek, otomotiv, inşaat ve spor ekipmanları gibi sektörlerde potansiyel kullanım alanlarını vurgulamaktadır [65].

Nadendla Srinivasababu [75], Nanokil ve selüloz elyaf takviyeli kompozitler, sürdürülebilirlik ve yüksek performans sağlama potansiyelleriyle son yıllarda dikkat çekmektedir. Nadendla Srinivasababu tarafından yapılan çalışmada, modifiye edilmiş iki aşamalı ıslak/elle serim yöntemiyle üretilen bu tür kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışma, farklı nanokil ve selüloz elyaf oranlarının kompozitlerin gerilme, eğilme ve darbe dayanımı üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmanın bulguları, kompozitlerdeki nanokil ve selüloz elyaf oranlarının mekanik performans üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle %5 selüloz elyaf ve %6,67 nanokil içeren kompozitler, en yüksek gerilme dayanımı, modül ve eğilme mukavemeti değerlerini göstermiştir. Bu oran, kompozitlerin mekanik performansının maksimum seviyeye ulaştığı oran olarak belirlenmiştir. Ayrıca, bu oran, kompozitlerin darbe dayanımını da artırarak daha yüksek bir dayanıklılık göstermelerine olanak tanımıştır. Çalışmada kullanılan modifiye edilmiş iki aşamalı üretim yöntemi, malzeme bileşenlerinin homojen dağılmasını sağlamakta önemli bir rol oynamaktadır, bu da son ürünün mekanik özelliklerinin iyileşmesine katkı sağlamaktadır. Bu bulgular, çevre dostu malzemelerin, dayanıklılık ve mekanik performans açısından endüstriyel uygulamalarda potansiyel bir alternatif oluşturduğunu ortaya koymaktadır [75].

M. Rajesh ve arkadaşları [98], nanokilin kompozitlere %2 oranında eklenmesinin mekanik özelliklerde en belirgin iyileşmeyi sağladığı gözlemlenmiştir. %2 oranındaki nanokil, kompozitin çekme ve eğilme dayanımını artırmış ve malzemenin sertliğini önemli ölçüde yükseltmiştir. Ancak, nanokil oranı %2'yi geçtiğinde, özellikle %3 ve üzeri seviyelerde, kompozitin sertliğinde bir azalma meydana gelmiştir. Buna karşın, bu oranlarda bile malzeme, nanokil içermeyen kompozitlerden daha yüksek sertlik göstermeye devam etmiştir. Bu bulgu, nanokil katkısının optimum seviyesinin %2 olduğunu ve daha fazla nanokil ilavesinin performans artışını sınırlayabileceğini göstermektedir. Dinamik mekanik analizler ise, nanokil eklenmesinin cam geçiş sıcaklığını artırdığını ve kayıp faktörünü azalttığını ortaya koymuştur. Cam geçiş sıcaklığındaki artış, malzemenin termal dayanımının yükseldiğini gösterirken, kayıp faktöründeki azalma ise enerjinin daha verimli şekilde depolandığını ve dağılmadığını işaret etmektedir. Ayrıca, doğal frekanslar, nanokil eklenmesiyle %2 oranına kadar artmış, ancak bu orandan sonra azalmaya başlamıştır. Modal damping davranışı ise doğal frekanslarla ters orantılı olarak değişmiştir, yani modal damping, doğal frekanslardaki artışla birlikte azalmıştır. Bu bulgular, nanokilin doğal elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik ve dinamik özelliklerini iyileştirmek için etkili bir katkı maddesi olduğunu ortaya koymaktadır. En iyi performans, %2 oranındaki nanokil eklenmesiyle elde edilmiştir ve bu oran, kompozitin hem mekanik hem de dinamik özelliklerini en verimli şekilde iyileştiren oran olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, bu tür nanokil katkılı kompozitlerin, çevre dostu ve dayanıklı malzemeler olarak tüketici ürünlerinde ve yapısal uygulamalarda kullanılma potansiyeli taşımaktadır. Doğal elyaf takviyeli kompozitlerin cam elyaf gibi diğer takviyelerle güçlendirilerek daha yüksek performanslı malzemeler elde edilebileceğini göstermektedir [98].

Venkatram ve arkadaşları [99], sisal elyafı ile nano kil takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı, sıkıştırma dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dayanımında önemli artışlar gözlemlenmiştir. Özellikle, sisal elyafı ve %3 oranında nano kil takviyeli kompozitlerde en yüksek çekme dayanımı 109 MPa, sıkıştırma dayanımı 173 MPa, eğilme dayanımı 6980 MPa ve darbe dayanımı 3.1 J olarak kaydedilmiştir. Nano kilin kompozitlere eklenmesi, fiber-matris etkileşimini artırarak, stres transferini güçlendirmiş ve dolayısıyla mekanik özellikleri iyileştirmiştir. Araştırmada ayrıca, nano kil takviyesinin termal özelliklere de olumlu etkiler sağladığı görülmüştür. Termogravimetrik analiz (TGA) sonuçları, %3 nano kil içeren kompozitlerin daha

yüksek termal stabiliteye sahip olduğunu, bozunma sıcaklıklarının yükseldiğini ve bu sayede kompozitlerin daha dayanıklı hale geldiğini ortaya koymuştur. Bu bulgu, tezindeki vakum infüzyon yöntemiyle ürettiğim keten elyafı takviyeli kompozitlerin de termal dayanıklılıklarının artacağına dair beklentimi güçlendirmektedir. Özellikle nano malzemelerle yapılan takviyelerin, ısıl stabiliteyi iyileştirerek, kompozitlerin daha uzun ömürlü ve dayanıklı olmasını sağlayacağı düşünülmektedir. Makale ayrıca, su emme özelliklerini de incelemiş ve nano kil takviyesinin, kompozitlerin su emme kapasitesini azalttığını göstermiştir. Bu bulgu, suya duyarlı malzemelerle yapılan kompozitlerin performansını artırmak için oldukça önemlidir ve tezinde de doğal elyafların su emme özelliklerini inceleyeceğim testlerle paralellik göstermektedir [99].

Son yıllarda doğal elyaf takviyeli polimer kompozitler, çevresel sürdürülebilirlik, hafiflik ve geri dönüştürülebilirlik avantajları nedeniyle yoğun ilgi görmektedir. Literatürde bu tür kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerine yönelik kapsamlı araştırmalar bulunmasına rağmen, titreşim davranışlarının sistematik olarak ele alındığı çalışmaların sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Bu bağlamda, tez çalışmasında keten elyaf takviyeli ve organokil katkılı epoksi kompozitlerin üretilerek özellikle titreşim davranışlarının yanı sıra mekanik özelliklerinin detaylı şekilde incelenmesi amaçlanmıştır. Böylelikle mevcut literatürdeki boşluğun doldurulması ve doğal elyaf kompozitlerin mühendislik uygulamalarında daha etkin kullanılabilmesi için özgün katkılar sağlanmıştır.

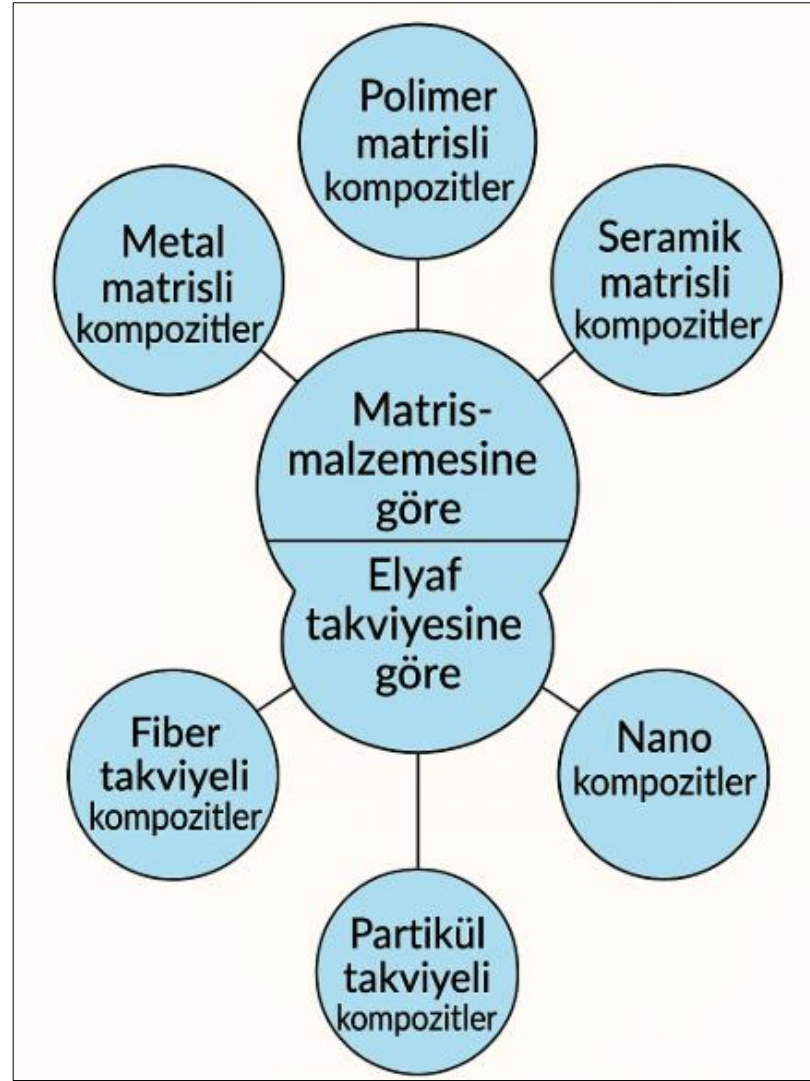
Tez çalışmasının ilk bölümünde, doğal elyaf takviyeli kompozitler, epoksi matris sistemleri ve nanokil katkıları üzerine literatür taraması gerçekleştirilmiş, araştırma boşlukları ortaya konulmuştur. Ardından malzeme seçimi, vakum torbalama yöntemiyle numune üretimi ve deneysel yöntemler detaylandırılmıştır. Üretilen numuneler üzerinde çekme, üç nokta eğilme, darbe ve sertlik testlerinin yanı sıra özellikle serbest titreşim testleri uygulanmış, doğal frekans ve titreşim genliği parametreleri mühendislik bakış açısıyla analiz edilmiştir. Ayrıca kompozitlerin mikroyapısal özelliklerini incelemek amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar mekanik bulgularla ilişkilendirilmiştir. Son bölümde ise elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş, organokil katkı oranlarının malzemelerin mekanik dayanımı ve titreşim davranışı üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Bu bütünsel organizasyon, çalışmanın literatürde eksik kalan yönleri tamamlamasına olanak sağlamıştır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, birden fazla malzemenin bir araya gelerek oluşturduğu malzemelere denir. En az iki malzemenin bir araya getirilerek, bireysel bileşenlerinin eksik yönlerini minimize eden ve üstün performans sunan fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip mühendislik malzemeleridir. Bu malzemeler, genellikle bir matris ve bir takviye bileşeninden oluşur. Takviye malzemesi ise mekanik dayanım ve rijitliği artırır, takviye elemanlarını bir arada tutarak yük transferini sağlar ve dış etkenlere karşı koruma sağlar. Böylece geleneksel malzemelerin tek başına sunamayacağı bir dizi avantajı sağlayarak geniş bir uygulama alanı yaratır [1], [22]. Geleneksel mühendislik malzemeleri olan alaşımlı metaller, polimerler ve seramikler belirli özelliklerle birlikte öne çıkmakla birlikte, kullanım sıcaklığına göre bazı dezavantajlar taşırlar.

Kompozit malzemelerin tarihi çok eskilere kadar uzanır. Mısırlılar, saman ile güçlendirilmiş kil tuğlalar kullanarak yapı malzemelerinin mekanik özelliklerini geliştirmiştir. Aynı şekilde Osmanlı döneminde kullanılan ahşap takviyeli yapı malzemeleri doğal kompozitlerle yapılmıştır. Özellikle 20. yüzyılda modern kompozit parçaların gelişimi hızlandı. Kompozit teknolojileri, İkinci Dünya Savaşı'nın ardından, otomotiv sektörünün daha hafif, daha dayanıklı ve daha uzun ömürlü üretim ihtiyacını karşılamıştır. Günümüzde, doğal elyaf takviyeli polimerler, karbon elyaf ve cam elyafı gibi ileri düzey kompozit malzemeler, hafiflik ve parçalanmayı birleştirerek birçok ürünün tamamlayıcı hale getirilmiştir [24], [25].

Kompozit malzemelerin en büyük avantajlarından biri, tasarım açısından dayanıklı olması ve sunduğu esnekliktir. Farklı matris ve takviye oranları sayesinde mühendisler belirli uygulamalar için optimize edilmiş özellikler üretebilirler. Ayrıca uçak gövdelerinde kullanılan karbon fiber takviyeli polimerler, yüksek dayanım ve düşük ağırlık oranı sayesinde yakıtın genişlemesini artıran sektörde devrim yaratmıştır. Otomotiv ürünleri doğal elyaf takviyeli kompozitler, sürdürülebilirlik odaklı üretim serilerinde çevre dostu alternatifler olarak öne çıkıyor. Ayrıca rüzgâr türbini kanatları, denizcilik endüstrisi ve spor ekipmanları [1], [22]. Genel olarak yaygın olan özellikler, rüzgâr türbini kanatları, denizcilik endüstrisi ve spor ekipmanlarıdır [1], [22].



Şekil 2.1: Kompozit malzemenin çeşitleri [63].

Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri, uygulama alanlarına göre değişkenlik gösterir. En yaygın kullanılan üretim yöntemleri arasında elle yatırma, vakum torbalama, vakum infüzyon, reçine transfer kalıplama, sıcak presleme ve filament sarma gibi teknikler bulunur. Bu üretim yöntemleri, malzemenin istenilen mekanik ve fiziksel özelliklerini en iyi şekilde sağlamak amacıyla seçilir. Özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde yüksek performans gerektiren uygulamalar için termoplastik veya termoset matrisli kompozitler tercih edilmektedir. Termoset matrisli kompozitler, epoksi ve polyester reçine gibi sertleştirici ajanlar ile mükemmel mekanik özellikler sunarken, termoplastik matrisli kompozitler daha kolay şekillendirilebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik avantajları ile dikkat çeker [1], [22].

Kompozit malzemelerin geleceği, gelişen nanoteknoloji ve ileri malzeme mühendisliği ile şekillenmektedir. Karbon nanotüpler, grafen takviyeli polimerler ve akıllı kompozit malzemeler, yeni nesil mühendislik uygulamalarında devrim yaratmaktadır. Örneğin, kendi kendini onaran kompozitler, yapısal hasarları algılayarak otomatik olarak onarım gerçekleştirebilir ve böylece malzemenin ömrünü uzatabilir. Ayrıca, çevresel etkileri minimize etmek adına biyobozunur ve geri dönüştürülebilir kompozit malzemeler üzerine yapılan araştırmalar, sürdürülebilir üretim süreçlerine katkı sağlamaktadır [23]. Hafiflik, yüksek mukavemet, dayanıklılık, korozyon direnci ve tasarım esnekliği gibi üstün özellikleri sayesinde havacılık, otomotiv, denizcilik, inşaat ve spor ekipmanları gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, daha yüksek performans sunan, çevre dostu ve yenilikçi kompozit malzemelerin geliştirilmesi, mühendislik alanında yeni ufuklar açmaya devam edecektir [1], [22].



Şekil 2.2: Kompozit malzeminin endüstride kullanım alanları [103].

2.1. Kompozit Malzemeyi Oluşturan Temel Bileşenler

Kompozit malzemeler, ana bileşen olan matris malzemesi ile takviye edici katkılardan oluşur. Farklı yöntemler kullanılarak malzeme miktarının artırılması için bu çözümlerin bir araya getirilmesi sağlanmaktadır. Sertlik ve sağlamlık artırılarak hafif yapıya sahip malzemeler kullanılarak düşük ağırlık ve yüksek mukavemet avantajı elde edilebilir. Sertlik ve rijitlik, hafif yapıya sahip malzemeler kullanılarak düşük ağırlık ve yüksek mukavemet avantajı elde edilebilir. Darbelere ve çatlak oluşumuna karşı mukavemetin oluşması, çatlama direncini geliştirerek malzemenin bütünlüğünü korumasını sağlar. Tekrarlayan yükler altında Malzemenin yorulmaya karşı direnci, tekrarlayan yükler altında tutulur ve uzun ömürlülüğü artırılarak güçlendirilir. Ek olarak, üretim sürecinde kullanılan malzemelerin optimizasyonu performans özelliklerinin belirli uygulamalar için özel olarak tasarlanmasına olanak tanır [26], [27]. Üretim sürecinde kullanılan malzemeler, kompozitlerin performans özelliklerinin belirli uygulamalar için özel olarak tasarlanmasına olanak tanır [26], [27].



Şekil 2.3: Kompozit malzemeyi oluşturan temel bileşenler [104].

Sürtünme ve aşınma koşullarında daha dayanıklı hale getirilmesi, kullanım ömrünü uzatırken, kimyasal ve elektrokimyasal etkilere karşı korunması ise korozyon direncini yükseltir. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında mekanik ve kimyasal özelliklerinin korunması için özel malzeme modifikasyonları uygulanır. Isı transfer yeteneği artırılarak daha iyi ısı iletkenliği sağlanırken, elektrik iletkenliği optimize edilerek akım geçişi iyileştirilir. Ayrıca, ses iletimi, yutumu veya yansımaları düzenlenerek akustik performans geliştirilir. Bu özellikler sayesinde, kompozit malzemeler endüstride geniş bir kullanım alanı bulmaktadır [26], [27].

Kompozit malzemelerin yüzey kalitesi ve estetik özellikleri de geliştirilerek daha çekici bir görünüm sunulabilir. Bunun yanı sıra, genel mekanik özellikler açısından esneklik, elastikiyet ve mukavemet artırılarak, kullanım alanlarına uygun optimum performans sağlanır. Günümüzde kompozit malzemeler, gelişmiş üretim teknikleri ile çok çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv, havacılık, denizcilik, spor ekipmanları, inşaat ve savunma sanayi gibi alanlarda üstün özellikleriyle dikkat çekmektedirler. Hafiflik, mukavemet ve dayanıklılığın yanı sıra, enerji tasarrufu ve sürdürülebilirlik açısından sundukları avantajlar, bu malzemelerin gelecekte daha da yaygınlaşmasını sağlayacaktır [26], [27].

Gelişen nanoteknoloji ve ileri malzeme bilimi ile, kompozit malzemelerin daha hafif, daha dayanıklı ve çevre dostu hale gelmesi beklenmektedir. Yeni nesil kompozitlerde, nanokil, karbon nanotüpler, grafen ve biyobazlı takviye malzemeleri gibi yenilikçi bileşenler kullanılarak performansın en üst seviyeye çıkarılması hedeflenmektedir. Gelecekte, bu malzemelerin üretim süreçlerinin daha verimli hale getirilmesi ve geri dönüştürülebilir kompozitlerin yaygınlaştırılması, sürdürülebilir üretim anlayışına katkı sağlayacaktır. Böylece, kompozit malzemeler hem endüstriyel verimliliği artıracak hem de çevresel etkileri minimize edecek şekilde geliştirilmeye devam edecektir [28].

2.1.1. Matris Malzeme

Kompozit yapıların temel yapılardan biri olan matris malzemesi, kompozitin mekanik bozulmalarını, kimyasal yapısal bozulmalarını karşı dayanmasını sağlar. Kompozit malzemenin bütünlüğünü koruyarak, takviye malzemesini sararak yük transferini optimize eder. Aynı zamanda kompozit belirli bir form vererek üretim sürecinin

işlenebilirliğini arttırır ve nihai ürünün istenilen geometrik toleranslara sahip olmasını sağlar [29]. Kompozitin kırılma tokluğu ve yorulma dayanımını artıran matris malzemesidir. Matris kırılma oluşumları, uygun bir seçim ile azaltılabilir ve malzemenin uzun süre dayanması arttırılabilir. Yorulma direnci, özellikle sürekli yüklere maruz kalan otomotiv ve rüzgâr enerjisi gibi sektörler için çok önemlidir [30]. Matris, kompozitin nem, sıcaklık değişimi ve kimyasal maddelere karşı direncini arttırır ve yoğunluk faktörlerine karşı bir bariyer kullanımı sağlamaktadır. Kompozitin performansı, özellikle yüksek sıcaklık, nem ve kimyasalların etkili olduğu ortamlar için uygun bir matris seçmekle doğrudan kullanılabilir. Örneğin, bakım ve denizcilik işlemlerinde kullanılan kompozit malzemelerin matrisi suya ve kimyasal değişimlere dayanmalıdır [30], [32]. Ancak matris malzemesi, darbe dayanımı ve enerji sönmüleme özellikleri sayesinde kompozitin ani yüklemelere karşı desteğini arttırır. Bu özellik, özellikle çarpma anında yüksek enerjiye maruz kalan savunma sanayi, spor ekipmanları ve otomobil uygulamaları çok önemlidir. Örneğin, farklı bölgelerde kullanılan kompozitler, uygun matris malzemeleri nedeniyle daha güvenli ve dayanıklı hale gelir ve darbe enerjisini absorbe ederek yolcuların artışı arttırır [29], [30]. Kompozit malzeme tasarımında istenilen özelliklerin elde edilmesi için doğru matris seçimi çok önemlidir. Matrisin viskozitesi, sertleşme sıcaklıkları, sıcaklık koşulları ve mekanik ve kimyasal özellikler gibi etki, doğumun nihai etkileri. Kompozit malzeme, uygun bir matrisin hafifliği, dayanıklılığı, uzun ömürlülüğü ve zenginliğine karşı direnci gibi istenen özellikleri sağlayabilir [32].



Şekil 2.4: Matris malzemenin etkileşimi [105].

Matris malzemeleri, kullanım alanlarına ve performans beklentilerine bağlı olarak farklı türlerde olabilir. Termoset ve termoplastik polimerler, metal ve seramik matrisler gibi çeşitler, farklı avantajlar sunarak geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Termoset reçineler, mükemmel kimyasal direnç ve sıcaklık stabilitesi sağlarken, termoplastikler yeniden şekillendirilebilir olmaları nedeniyle üretim süreçlerinde esneklik sunar. Metal matrisli kompozitler, yüksek sıcaklıklara dayanıklılık gerektiren uygulamalarda tercih edilirken, seramik matrisler aşırı sıcaklıklarda ve aşındırıcı ortamlarda üstün performans gösterebilir [32]. Doğru matris seçimi, takviye malzemesiyle optimum uyumu sağlayarak kompozitin performansını artırır ve belirli uygulamalarda maksimum verimlilik sunar. Bu nedenle, kompozit malzeme tasarımında matrisin özellikleri dikkatlice değerlendirilerek, hedeflenen uygulama koşullarına uygun malzeme kombinasyonu belirlenmelidir [29].

2.1.1.1. Polimerik Matrisler

Polimer matrisli kompozitler (PMC'ler), polimer esaslı matrislerin takviye elyaflarıyla birleştirilmesiyle elde edilen, hafif, dayanıklı ve çok yönlü mühendislik malzemeleridir. Bu kompozitlerde, polimer matris takviye elyaflarını çevreleyerek

yük transferini sağlar, mekanik dayanımı artırır ve çevresel etkilere karşı koruma sunar. Ayrıca, darbe dayanımını artırır ve çatlak ilerlemesini sınırlayarak malzemenin genel performansını iyileştirir [33]. PMC'ler, düşük yoğunlukları, yüksek özgül mukavemetleri ve korozyona karşı dirençleri sayesinde havacılık, otomotiv, denizcilik ve spor ekipmanları gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle termoset polimerler (örneğin epoksi, polyester) tercih edilse de mükemmel şekillendirilebilme özellikleri ve geri dönüştürülebilirlik avantajları nedeniyle termoplastik matrisli kompozitlerin kullanımı giderek artmaktadır [33].

Polimer matrisli kompozitler, matrisin yapısına bağlı olarak iki ana gruba ayrılır: termoset ve termoplastik kompozitler. Termoset matrisli kompozitler, yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal dirençleriyle öne çıkarken, termoplastik matrisli kompozitler daha kısa üretim süreleri ve yeniden şekillendirilebilme özellikleriyle dikkat çeker. [34].

Bu malzemelerin üretiminde kullanılan takviye elyafları arasında cam elyafı, karbon elyafı ve aramid elyafı gibi yüksek performanslı malzemeler bulunur. Takviye elyaflarının türü, yönelimi ve hacim oranı, kompozitin mekanik ve fiziksel özelliklerini belirleyici faktörlerdir [33].

Sonuç olarak, polimer matrisli kompozitler, hafiflik, yüksek mukavemet, korozyon direnci ve tasarım esnekliği gibi üstün özellikleri sayesinde modern mühendislik uygulamalarında vazgeçilmez malzemeler haline gelmiştir. Gelişen malzeme teknolojileri ve üretim teknikleriyle birlikte, bu kompozitlerin kullanım alanları ve performansları sürekli olarak artmaktadır [34].

2.1.1.1.1. Termoset Polimerler

Termoset polimerler, ısı işlem sırasında kimyasal olarak sertleşen ve bir kez şekil verildikten sonra tekrar yumuşamayan malzemelerdir. Bu polimerler, polimerizasyon sürecinde çapraz bağlı üç boyutlu bir ağ yapısı oluşturarak yüksek mekanik dayanım, kimyasal direnç ve ısıya karşı stabilite sağlar. Isıtıldıklarında moleküller arasında güçlü çapraz bağlar oluştuğu için birbirleri üzerinde kayma yeteneklerini kaybederler ve yeniden şekillendirilmeleri mümkün olmaz. Bu nedenle, termoset polimerler geri dönüştürülemeyen bir üretim sürecine sahiptir [35].

Termoset malzemeler, genellikle kısmen polimerleşmiş halde kalıplanır ve şekillendirme işlemi sırasında polimerleşme tamamlanarak geniş ölçüde çapraz bağlar oluşur. Bu yapı, yüksek sıcaklıklarda bile malzemenin yapısal bütünlüğünü korumasını sağlar. Dayanıklılık ve stabilite gerektiren uygulamalarda büyük avantaj sunan termoset polimerler, özellikle havacılık, otomotiv ve denizcilik gibi sektörlerde yaygın olarak tercih edilir. Ancak, şekillendirildikten sonra tekrar işlenememeleri ve geri dönüşümlerinin mümkün olmaması, bu malzemelerin en büyük dezavantajlarından biridir [36]. Termoset polimerlerde en çok tercih edilen matris malzeme epoksi reçinedir. Epoksi reçinenin malzemeye verdiği mekanik dayanım, elyaflar ile bağ mukavemetinin yüksek olması, yüksek aşınma direncine sahip olması ve kimyasal direncinin yüksek olması avantajlarındandır. İkinci olarak tercih edilen polyester reçineye göre pahalıdır ve yüksek viskoziteye sahip olması dezavantajlarındandır [37]. Polyester reçineler ucuz olması ve çevresel dayanımlarının diğer termoset matrislere göre yüksek olması tercih edilebilir kılarken; mekanik dayanımı epoksiye göre düşüktür [37]. Vinilester ise polyesterden daha iyi kimyasal direnç sunar ve korozyon dayanımı gerektiren uygulamalarda tercih edilir [37]. Fenolik reçineler ise Alev geciktirici özelliği sayesinde yanmazlık gerektiren uygulamalarda kullanılır [37]. Termoset polimerlerin dezavantajı, kırılgan olmaları ve geri dönüştürülemez olmalarıdır. Ancak yüksek performans gerektiren uygulamalarda sağladıkları üstün mekanik ve termal özellikler nedeniyle yaygın kullanılırlar [38].



Şekil 2.5: Termoset polimerler [106].

2.1.1.1.2. Termoplastik Polimerler

Termoplastik polimerler, ısıtıldığında yumuşayarak kolayca şekil alabilen, soğutulduğunda ise sertleşen malzemelerdir. Bu özellikleri sayesinde yeniden işlenebilir ve geri dönüştürülebilirler, bu da onları sürdürülebilir üretim için ideal hale getirir. Termoplastiklerin bu davranışı, moleküler yapılarından kaynaklanır; çapraz bağ içermeyen, doğrusal zincirli polimerlerden oluşurlar. Molekülleri arasındaki zayıf Van der Waals etkileşimleri sayesinde, ısı uygulandığında atomlar birbirleri üzerinde kayarak akışkan hale gelir ve farklı formlara dönüştürülebilir [39], [45]. Termoplastik malzemelerin fiziksel özellikleri sıcaklık değişimlerinden etkilenirken, kimyasal yapıları bozulmadan kalır. Üretim süreci tamamlandıktan sonra bile tekrar ısıtılarak yeni bir forma sokulabilirler. Yüksek şekillendirilebilirlikleri ve düşük sertlikleri nedeniyle otomotiv, ambalaj ve tüketici elektroniği gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılırlar. Bununla birlikte, zamanla yük altında şekil değiştirme eğilimleri (sünme) gösterdiklerinden, belirli uygulamalarda dikkatli tasarım gerektirirler. Yüksek darbe dayanımı ve esneklikleri sayesinde termoset polimerlere kıyasla birçok avantaj sunduklarından, termoplastik malzemelerin kullanımı giderek artmaktadır [40].

Polipropilen (PP) malzeme farklı parçalarda, bileşenlerde kullanılan bir termoplastiktir. Bu termoplastik polimer dayanımı yüksek oluşu, mekanik özelliklerinin iyi, hafif, düşük maliyetli ve kimyasal direnç gösteren bir malzemedir. Yapılmak istenen malzemede mekanik özelliklerin elde edilebilmesi polipropilen malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirme adına işlemler yapılabilir. Mekanik özellikleri yükseltmek için doğal elyaf, cam elyaf, karbon elyaf gibi takviye malzemeleri kullanılabilir. Bu takviye malzemeleri çekme dayanımı, eğilme dayanımı, darbe dayanımını yükseltebilir [41]. Polipropilen (PP), hafif, dayanıklı ve kimyasal direnci yüksek bir malzeme olduğu için özellikle otomotiv sanayisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük yoğunluğu sayesinde araçların toplam ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini artırır. Aynı zamanda darbe dayanımı yüksek olduğundan tamponlar, iç trim parçaları, kapı panelleri ve torpido gibi bileşenlerde tercih edilir. Kimyasal ve korozyon direnci sayesinde yakıt sistemleri, akü kutuları ve hava filtrelerinde de yer alır [41]. Polietilen (PE), yüksek darbe dayanımı, düşük sürtünme katsayısı, kimyasal direnci ve aşınma dayanımı ile öne çıkan bir termoplastiktir. Su emmez, geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilir, kendiliğinden yağlanma özelliğine sahiptir ve kolay işlenebilir [42]. Makine sanayinde sürtünme plakaları ve dişli

arklarda, madencilik sektöründe banker, tank ve silo kaplamalarında, gıda ve ambalaj sanayinde kesme masaları ve paketleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Günümüzde en çok tercih edilen termoplastiklerden biri olup, toplam plastik üretiminin yaklaşık %40'ını oluşturur [42]. Polietilen yoğunluk seviyelerine göre farklı sınıflara ayrılır, ancak en yaygın türleri düşük yoğunluklu (LDPE) ve yüksek yoğunluklu (HDPE) polietilendir. Dallanma yapısına bağlı olarak sert veya esnek retilabilir. Nem direnci sayesinde nemli ortamlarda rahatlıkla kullanılabilir ve genellikle sıvı maddelerin paketlenmesinde tercih edilir. Tuz ruhu ve çamaşır suyu gibi güçlü kimyasalların ambalajlanmasında da yaygın olarak kullanılmaktadır [42]. Poliamid (PA, Naylon), yüksek mekanik dayanımı, aşınma direnci ve kimyasal dayanıklılığı sayesinde birçok endüstriyel uygulamada kullanılan bir mühendislik plastiğidir. Kalıplama, ekstrüzyon ve döküm gibi yöntemlerle işlenebilir ve elyaf takviyesi ile güçlendirilerek kompozit malzemelerde matris olarak da yer almaktadır. [43]. Poliamidin zellikleri türüne bağlı olarak değişir. Genel olarak yüksek yorulma ve sürünme dayanımına sahiptir. Kristalinite derecesi, rijitlik, mukavemet ve ısı direncini belirler; düşük kristalinite darbe dayanımını artırırken rijitliği azaltır [43]. Poliamid, hafifliği ve yüksek dayanımı nedeniyle otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılır. Motor bölgesinde hava giriş manifoldu, radyatör tankları ve yakıt sistemlerinde tercih edilir. Ayrıca i trim parçaları, pedal sistemleri ve bağlantı elemanlarında metal yerine kullanılarak araç ağırlığını azaltır ve yakıt verimliliğini artırır [43]. Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS), darbe dayanımı, sertliği ve kimyasal direnci yüksek olan bir mühendislik plastiğidir. Kolay işlenebilirliği sayesinde enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon gibi yöntemlerle retilabilir. ABS, sert akrilonitril, dayanıklı bütadien ve rijit stirenin birleşiminden oluştuğu için mekanik özellikleri iyi dengelenmiş bir malzemedir [44]. ABS'nin en önemli özellikleri arasında yüksek darbe dayanımı, yüzey kalitesi, iyi elektriksel yalıtım ve kimyasal direnç yer alır. Isıya dayanımı poliamid kadar yüksek olmasa da sertliği ve şekillendirilebilme kabiliyeti sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir [44]. ABS, otomotiv sektöründe hafifliği, dayanıklılığı ve estetik yüzey kalitesi nedeniyle yaygın olarak kullanılır. İç trim parçaları, gösterge panelleri, direksiyon kaplamaları ve hava kanalları gibi bileşenlerde tercih edilir. Ayrıca, darbe dayanımı sayesinde tampon, amurluk ve aydınlatma muhafazalarında da kullanılmaktadır. Metal alternatiflerine kıyasla maliyet avantajı sağlaması ve kolay şekillendirilebilmesi, ABS'yi otomotiv endüstrisinde önemli bir malzeme haline getirilmiştir [44].

2.1.1.2. Seramik Matrisler

Seramikler, metal ve metal olmayan elementlerin birleşiminden oluşan inorganik bileşiklerdir. Doğada kil ve kaolen gibi minerallerin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle elde edilirler. İyonik ve kovalent bağ yapıları sayesinde oldukça kararlı, sert ve gevrek malzemelerdir. Yüksek sıcaklığa, aşınmaya ve kimyasallara karşı direnç göstermeleri nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılırlar [46]. Ancak seramiklerin düşük tokluk ve termal şok direnci gibi dezavantajları bulunmaktadır. Bu sorunları aşmak için seramik fiberlerle takviye edilen seramik matris kompozitleri (SMK) geliştirilmiştir. Bu malzemeler, monolitik seramiklere kıyasla 20 kata kadar daha yüksek tokluğa sahiptir. Takviye malzemeleri, çatlak ilerlemesini durdurarak mukavemeti artırır. SMK'lerin üretimi genellikle infiltrasyon, sıcak izostatik presleme, sol-jel ve toz metalurjisi gibi yöntemlerle gerçekleştirilir [47]. Seramikler ve SMK'ler, havacılık ve savunma sanayisinde roket ve turbojet motorlarının egzoz çıkışlarında, uydularda boyutsal kararlılık gerektiren parçalarda ve bazı biyomedikal uygulamalarda tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra, yüksek sıcaklık ve aşınma dayanımı gerektiren sanayi alanlarında da yaygın olarak kullanılmaktadırlar [47], [48].

2.1.1.3. Metal Matrisler

Metal matris kompozitleri (MMK), metal esaslı bir matris içinde takviye malzemeleri barındıran gelişmiş kompozit malzemelerdir. Genellikle alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi hafif metallerden oluşan matris yapıları, mekanik özellikleri artırmak amacıyla karbon veya silikon karbür gibi fiberlerle takviye edilir. Silikon karbür fiberlerin kullanımı, kompozitin elastik modülünü ve mukavemetini artırırken, ısıl genleşme katsayısını ve iletkenliğini azaltır [49]. Alüminyum ve titanyum, en yaygın kullanılan metal matrislerdir. Alüminyum, özellikle korozyon direnci nedeniyle tercih edilirken, yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip 6061 ve 1100 alaşımları da yaygın olarak kullanılmaktadır. MMK'ler farklı üretim teknikleriyle üretilir, bunlardan biri olan difüzyon bağlama yöntemi, özellikle boron/alüminyum kompozitlerin üretiminde kullanılır. Bu yöntemde, bor fiberleri ince alüminyum tabakalar arasına yerleştirilerek vakum altında ısıtılır ve daha sonra belirli sıcaklık ve basınç altında preslenir [50]. Metal matris kompozitleri, hafiflik ve yüksek dayanım özellikleri

sayesinde havacılık, uzay, savunma sanayi ve taşımacılık gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [50].

2.1.2. Takviye Elemanları

Kompozit malzemelerde takviye elemanları, malzemenin taşıma kapasitesini ve işlevselliğini artıran temel bileşenlerdir. Takviye malzemeleri, uygulanan yüklerin büyük bir bölümünü taşıyarak kompozit malzemenin mukavemet, rijitlik, sıcaklık dayanımı, elektriksel iletkenlik veya yalıtkanlık gibi hedeflenen özelliklerini iyileştirir. Ancak bu iyileştirmenin etkili olabilmesi, takviye ile matris malzemesi arasında güçlü bir arayüzey bağı oluşmasına bağlıdır. Zayıf arayüzey bağı, yük aktarımını kısıtlar ve kompozitin istenen mekanik özelliklerine ulaşmasını engeller [51]. Takviye elemanlarının performansı sadece malzeme türüne değil, aynı zamanda elyaf yönlenmesi, formu (parçacık, sürekli elyaf, süreksiz elyaf), ölçüsü ve hacim oranına da bağlıdır. Elyaf yönlenmesi, yük aktarımı yönünde maksimum mukavemet sağlanması için kritik bir tasarım parametresidir. Sürekli elyaf takviyeler, genellikle havacılık ve savunma sanayisi gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılırken; süreksiz (kısa) elyaflar, maliyet etkinliği ve üretim kolaylığı nedeniyle otomotiv ve tüketim mallarında tercih edilir [51]. Takviye malzemeleri iki ana grupta sınıflandırılır: doğal ve sentetik takviyeler. Doğal elyaflar (keten, kenevir, jüt, sisal vb.), yenilenebilir kaynaklardan elde edilir, düşük yoğunluk, biyolojik parçalanabilirlik ve çevre dostu özellikleriyle ön plana çıkar. Bu özellikler, sürdürülebilir mühendislik uygulamalarında doğal elyafların cazibesini artırmaktadır. Öte yandan, sentetik elyaflar (cam, karbon, aramid gibi) yüksek çekme dayanımı, rijitlik ve sıcaklık dayanımı ile öne çıkar. Özellikle karbon ve aramid elyaflar, havacılık, uzay ve askeri uygulamalarda kritik rol oynar [52]. Takviye elemanları sadece mekanik dayanımı değil, aynı zamanda termal, elektriksel ve çevresel direnç gibi çoklu özellikleri iyileştirebilir. Örneğin, karbon elyaf takviyeli kompozitler hem mekanik dayanım hem de elektriksel iletkenlik sağlarken; cam elyaf takviyeli sistemler elektriksel yalıtkanlık sunar. Doğru takviye seçimi, matris ve takviye uyumu, üretim yöntemi ve kullanım koşulları dikkate alınarak yapılmalıdır [52], [53]. Kompozit malzemelerde takviye elemanlarının mühendislik tasarımındaki rolü belirleyicidir. Kullanım alanına göre optimize edilmiş takviye-matris kombinasyonları, hafif, yüksek mukavemetli ve uzun ömürlü yapıların üretilmesini

mümkün kılar. Gelişen teknolojiyle birlikte hibrit takviye sistemleri ve nano takviyeler gibi yenilikçi çözümler de kompozit malzemelerin performansını daha da artırma potansiyeline sahiptir [53].



Şekil. 2.6: Takviye elemanları [107].

2.1.2.1. Doğal Elyaflar

Doğal elyaf, hayvanlardan veya bitkilerden elde edilen, biyolojik olarak parçalanabilen ve çevre için güvenli bir kaynak olan maddelerdir. Bu elyaf, artan sürdürülebilir malzeme maliyetleriyle birlikte geleneksel ve gelişmiş uygulamalarda giderek daha popüler hale geliyor. Hafifliği, ayrılabilirliği ve biyobozunurluk gibi özellikleri nedeniyle otomobil, inşaat, tekstil ve biyomedikal gibi sektörlerde önemli bir malzeme haline gelmiştir. Kompozit malzeme sentetik elyaf, güçlü bir alternatif olarak hizmet veriyorlar çünkü darbelere dayanıklı, tokluk ve esneklik açısından avantaj sağlamaktadır [53].



Şekil 2.7: Doğal elyaf çeşitleri [108].

2.1.2.1.1. Doğal Elyafların Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Doğal elyafların kökenine göre iki gruba ayrılmaktadır. Hayvansal ve bitkisel, keten, kenevir, jüt, pamuk, hindistan cevizi lifi, sisal, bambu ve diğer bitkisel elyafli türlerinin çoğu lignin, selüloz ve hemiselüloz içerir. Bu elyaflar, hafif, dayanıklı ve esnek oldukları için kompozit malzemelerde iyi bir takviye malzemesi olarak kullanılır. Keten ve kenevir elyafları, yüksek dayanım/ağırlık oranları ve düşük yoğunlukları nedeniyle biyokompozit üretimi önemli bir rol oynarlar. Bitkisel liflerin özellikleri, yetiştirme biçimleri, işlenme yöntemlerine ve iklim koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Mekanik performans, yaşam uzunluğu, kristallik yapısı ve selüloz miktarı tarafından doğrudan dağıtılır.

Hayvansal elyaflar ise protein bazlıdır ve ipek, yün, keçi kılı, at kılı gibi türleri içerir. İpek yüksek mukavemeti ve parlak yüzeyi ile özel uygulamalarda kullanılırken; yün esnekliği ve yalıtım özellikleri nedeniyle tekstil ve yapı sektörlerinde değerlendirilmektedir. Keçi ve at kılı ise çeşitli kompozit uygulamalarında takviye malzemesi olarak yer bulmaktadır. Hayvansal liflerin kimyasal ve fiziksel avantajları arasında esneklik, doğal elastikiyet ve iyi termal yalıtım öne çıkarken, nem alma eğilimi ve biyolojik bozunma hassasiyeti sınırlayıcı özelliklerdir [53].



Şekil 2.8: Dokuma kumaş [109].

2.1.2.1.2. Doğal Elyafların Mekanik Özellikleri

Doğal elyaf, özellikle keten ve kenevir gibi türlerde yüksek çekme dayanımı ve elastikiyet modülü sunmaktadır. Yük taşıyan ve dayanım gerektiren uygulamalarda sentetik elyaflara alternatif olarak değerlendirilmektedirler. Bu elyafların yüksek mukavemet/ağırlık oranı, darbe dayanımı ve tokluğu kompozitlerde üstün performans sergilemelerini sağlar. Betonarme yapılarda takviye edici eleman olarak kullanılabilir; keten ve kenevir lifleri ile güçlendirilmiş beton karışımları, geleneksel betonarme yapılara göre daha hafif ve yeterli mukavemete sahip yapı elemanları üretmeye olanak tanımaktadır. Doğal elyafların mekanik performansı; lif yapısına, içerdiği selüloz oranına ve kristallik derecesine bağlı olarak şekillenir [54].

Tablo 2.1: Doğal elyafların mekanik özellikleri [10], [22].

Elyaf Türü	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Şekil Değiştirme (%)
Keten	1,4–1,5	500–900	60–80	1,2–1,6
Kenevir	1,4–1,5	550–900	30–70	1,5–2,0
Jüt	1,3–1,5	400–800	10–30	1,5–2,0
Kenaf	1,3–1,4	350–930	14–60	1,5–1,8
Sisal	1,3–1,5	400–700	9–38	2,0–2,5
Karbon Elyaf	1,7–1,9	3000–6000	200–600	1,0–1,5
Cam Elyaf	2,5–2,6	2000–3500	70–90	2,0–4,0

2.1.2.1.3. Doğal Elyafların Avantajları ve Dezavantajları

Doğal elyafların avantajları arasında hafiflik, biyobozunurluk, düşük maliyet, iyi mekanik özellikler ve yenilenebilirlik öne çıkmaktadır. Özellikle karbon ayak izinin azaltılması ve sürdürülebilir malzeme kullanımının teşvik edilmesi açısından önemli rol üstlenmektedirler. Hafif olmaları, otomotiv ve havacılık sektörlerinde yakıt tüketimini azaltarak çevresel etkileri minimize etmektedir. Yenilenebilir kaynaklardan elde edildikleri için sürdürülebilir üretim süreçlerine katkı sağlamaktadırlar [54].

Ancak bazı dezavantajlar da mevcuttur. Doğal elyafların higroskopik (su emici) yapısı nedeniyle yüksek nem emme oranları, zamanla mekanik özelliklerinin azalmasına yol açabilmektedir. Biyolojik bozunmaya yatkınlık, uzun süreli dayanım açısından sınırlayıcı bir faktördür. Ayrıca, düşük ısıl dayanımları nedeniyle yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda kullanımları sınırlıdır. Bu dezavantajlar uygun yüzey işlemleri, kaplamalar ve doğru matris malzemeleriyle birleştirilerek büyük ölçüde giderilebilmektedir [55].

Otomotiv sektörü, doğal elyaf takviyeli kompozitlerin en yaygın kullanıldığı alanlardan biridir. Kenevir ve keten elyafları, kapı panelleri, gösterge panoları, tavan kaplamaları ve iç döşemelerde hafiflikleri, yüksek mukavemetleri ve çevresel avantajları nedeniyle tercih edilmektedir. Örneğin, BMW i3 modeli kenevir elyaf takviyeli kapı panelleriyle dikkat çekerken; Mercedes-Benz A-Class ve C-Class modellerinde keten ve kenevir elyaf takviyeli iç döşeme panelleri kullanılmaktadır. Audi A8 modelinde keten ve jüt elyafları; Ford Mondeo modelinde kenevir ve keten elyaflı biyokompozitler; Volvo modellerinde kapı iç panelleri ve gösterge panellerinde

doğal elyaflar yer almaktadır. Porsche 718 Cayman GT4 Clubsport modelinde ise keten elyaf takviyeli kompozit kapılar ve arka kanatlar tercih edilmiştir[55].

İnşaat sektöründe doğal elyaflar, ısı ve ses yalıtım panelleri, biyobozunur izolasyon malzemeleri ve hafif yapı elemanları üretiminde kullanılırken, mobilya, spor ekipmanları ve biyomedikal uygulamalarda da giderek daha fazla ilgi görmektedir. Biyomedikal sektöründe biyobozunur implantlar ve doku mühendisliği uygulamalarında kullanılan doğal elyaflar; spor malzemelerinde ise hafiflik ve darbe dayanımı avantajları nedeniyle çevre dostu bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Tenis racketlerinden kayak tahtalarına kadar birçok spor ekipmanında kullanılan bu malzemeler, sürdürülebilir spor malzemelerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Sonuç olarak, doğal elyaflar, doğru işleme teknikleri ve uygun matris malzemeleriyle birleştirildiklerinde hem ekonomik hem de ekolojik açıdan avantaj sağlayarak kompozit malzemelerin performansını artırmakta ve gelecekte yeni uygulama alanlarının keşfedilmesiyle birlikte daha yaygın kullanılmaları beklenmektedir [55].

Tablo 2.2: Doğal elyafların üretim adetleri [120], [121].

Elyaf Türü	Dünya Üretimi (Ton/Yıl)
Keten	896.636 (2021)
Kenevir	275.000 (2022)
Jüt	3.200.000 (2024)
Kenaf	970.000 (2024)
Sisal	210.000 (2020)
Karbon Elyaf	263.000 (2024)
Cam Elyaf	18.000.000 (2024)

2.1.2.2. Sentetik Elyaflar

Sentetik elyaflar, kimyasal ve fiziksel işlemlerle üretilen, yüksek mekanik özelliklere sahip malzemelerdir. Doğal elyaflara kıyasla daha kontrollü üretim süreçlerine sahiptirler ve yüksek mukavemet, hafiflik, aşınma direnci, korozyon dayanımı gibi üstün özellikleriyle mühendislik uygulamalarında geniş bir kullanım alanı bulurlar. Özellikle havacılık, otomotiv, savunma, elektrik-elektronik ve inşaat sektörlerinde yaygın olarak tercih edilmektedirler [3], [56]. Sentetik elyafların en bilinen türleri karbon elyaf, cam elyaf ve aramid elyaf (Kevlar). Karbon elyaf, yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve sertliği nedeniyle havacılık, otomotiv ve spor ekipmanlarında yaygın

olarak kullanılmaktadır. Cam elyaf ise elektriksel yalıtım özellikleri ve uygun maliyetiyle rüzgâr türbinleri, denizcilik ve inşaat sektörlerinde kullanılmaktadır. Aramid elyaf (Kevlar), darbe dayanımı ve ısıya karşı yüksek direnci ile zırhlı araçlar, balistik yelekler ve havacılık sektöründe öne çıkmaktadır [3], [56]. Bu elyaflar, polimer matris malzemeleri ile birleştirilerek Fiber Takviyeli Polimer (FRP) kompozitler oluşturulur. Matris malzemesi genellikle epoksi, polyester veya vinilester gibi polimerlerden oluşur ve elyaflarla bir araya gelerek kompozitin mekanik ve fiziksel özelliklerini belirler. Elyafların yönelimi ve matris ile etkileşimi, kompozit malzemenin performansını doğrudan etkiler. Özellikle yüksek sıcaklık, darbe yükleri ve yorulma direnci gibi zorlu koşullarda sentetik elyaf takviyeli kompozitler, metal bileşenlere kıyasla üstün performans göstermektedir [3], [56]. Sentetik elyafların en büyük avantajları arasında yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, kimyasal ve çevresel dayanım, uzun ömür ve bakım gereksinimlerinin az olması yer almaktadır. Ancak bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Örneğin, üretim süreçleri enerji yoğunudur ve karbon elyaf gibi bazı sentetik elyafların geri dönüşümü zor olabilir. Ayrıca, doğal elyaflara kıyasla biyolojik olarak parçalanabilir olmadıkları için çevresel sürdürülebilirlik açısından bazı endişeler yaratmaktadırlar. Bu nedenle, günümüzde nanomalzemeler (karbon nanotüpler, nano-silika, organo kil gibi) ve hibrit kompozitler kullanılarak sentetik elyaf bazlı malzemelerin özelliklerini optimize etme çalışmaları devam etmektedir [57]. Uygulama alanları açısından bakıldığında, havacılık ve uzay endüstrisi, otomotiv sektörü, enerji ve elektronik uygulamaları, yapı ve inşaat sektörü, spor ekipmanları ve savunma sanayi gibi birçok sektörde sentetik elyaf takviyeli kompozitler yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, uçak gövdeleri ve kanatları, yarış otomobillerinin şasi ve gövde panelleri, yüksek voltajlı elektrik yalıtım malzemeleri, roket nozulları ve kompozit köprü yapıları bu malzemelerin en yaygın kullanım alanları arasındadır [3], [56].

2.1.3. Katkı ve Dolgu Malzemeleri

Kompozit malzemelerin performansı artırmak ve alanını genişletmek amacıyla çeşitli katkı ve dolgu malzemeleri kullanılır. Bu sistemlerin, kompozit sistemlerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyileştirilmesi, malzemelerin daha işlevsel, dayanıklı ve daha fazla genişletilmesini sağlar. Mukavemet, kırılma, yırtılma direnci, ısı kararlılık, işlenebilirlik, gaz/sıvı geçirgenliği, özellikle otomotiv, havacılık, inşaat,

ambalaj gibi sektörlerin önemli özelliklerini sunmaktadır [12]. Katkı maddeleri, genellikle malzemenin belirli bir özelliğinin ortaya çıkmasıyla düşük oranlarda kullanılan, etkisi yüksek çözümlerdir. Kompozit sistemlerde özelliklerin özellikleri arasında grafen, metal oksitler, alev geciktiriciler, UV stabilizatörleri, karbon nanotüpler, hızları azaltıcı ajanlar bulunmaktadır. Örneğin; karbon nanotüpler ve grafen gibi nanoyapılar, elektriksel iletkenlik ve mekanik dayanım açısından önemli bileşenler sağlarken, alev geciktirici katkılar parçaa karşı izolasyonu artırmata ve güvenlik açısından kritik uygulamalarda tercih edilmektedir [59].

Dolgu malzemeleri ise daha çok maliyet azaltma, yoğunluk kontrolü ve yapısal dayanımı artırma amacıyla kullanılır ve katkı maddelerine kıyasla daha yüksek oranlarda kompozitlere dahil edilir. Dolgular, mikro ve nano ölçekli olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Kalsiyum karbonat, talk, baryum sülfat ve mika gibi mikro ölçekli dolgu malzemeleri, işlenebilirlik avantajı sunarken üretim maliyetlerini de düşürmektedir. Öte yandan, nano ölçekli dolgu malzemeleri arasında yer alan nanokil, silika nanopartikülleri ve karbon nanotüpler, kompozitlerin mekanik ve bariyer özelliklerini önemli ölçüde geliştirmektedir [60], [61]. Bu bağlamda, organo-kil, özellikle nanokompozit malzeme teknolojilerinde önemli bir yer tutan ve dikkat çeken bir dolgu malzemesidir. Doğal olarak bulunan kil minerallerinden (özellikle *montmorillonit*) elde edilen organo killer, yüzeylerinin kation değişim kapasitesi sayesinde organik modifikasyona uygundur. Bu kil mineralleri, kation değişim reaksiyonları ile yüzeylerine organik yüzey aktif maddeler (genellikle kuaterner amonyum tuzları) bağlanarak modifiye edilir. Bu işlem sonucunda hidrofilik (su seven) yapıdan, organik ortamlarla daha uyumlu olan hidrofobik (su itici) bir yapıya dönüşürler [58]. Bu modifikasyon, kil plakalarının polimer matris içinde daha homojen dağılmasını ve daha iyi ara yüzey etkileşimi sağlamasını mümkün kılar. Kilin tabakalı yapısı, polimer zincirlerinin bu plakaların arasına difüze olması ile interkalasyon veya eksfoliyasyon (tamamen ayrışma) gibi yapıların oluşmasına olanak tanır. Bu yapılar sayesinde çok düşük oranlarda bile (%1–5) organo-kil katkısı, kompozitlerin mekanik özelliklerini, termal kararlılığını ve bariyer performansını önemli ölçüde artırabilir [59], [60].

Özellikle otomotiv sektöründe, montmorillonit esaslı organo-kil katkılı kompozitler; ses yalıtımı, titreşim sönümleme, hafiflik ve ısı direnci gibi özellikleriyle ön plana çıkmakta; araç iç komponentlerde, motor bölgesi parçalarında ve yapısal elemanlarda

kullanılmaktadır. Havacılık ve savunma sanayii gibi daha ileri mühendislik gerektiren alanlarda da bu tür katkılar sayesinde yüksek performanslı, güvenilir ve uzun ömürlü kompozit çözümler geliştirilmektedir [61]. Ayrıca, organo-kil takviyeli nanokompozitler çevresel açıdan da avantajlıdır. Doğal ve bol bulunan hammaddelerden elde edilmesi, biyolojik olarak parçalanabilir sistemlerle uyumlu hale getirilebilmesi ve geri dönüştürülebilir özellik taşıması sayesinde, sürdürülebilir malzeme geliştirme süreçlerinde tercih edilmektedir. Üretim sırasında enerji tüketiminin azalması ve çevresel etki potansiyelinin düşmesi gibi faydalar da bu katkıların yeşil mühendislik uygulamaları için uygunluğunu artırmaktadır [58].



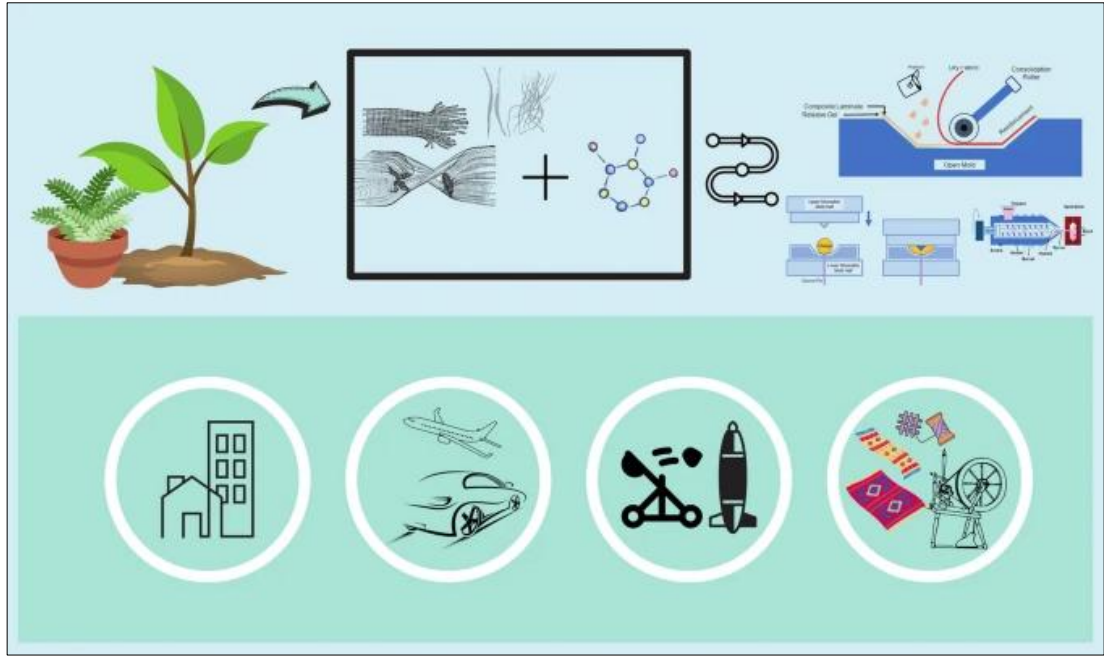
Şekil 2.9: Nanokil [110].

3. ÜRETİM METOTLARI

Kompozit malzemelerin matris malzemesinin türüne, uygulama alanına, üretim performansına ve hedeflenen mekanik depolamaya bağlı olarak üretimi evrensel boyuttur. Bu dağılım, matris ve takviye malzemelerinin homojen bir şekilde bir araya gelmesini sağlamak, üretim maliyetlerini en üst düzeyde çıkarmak ve kompozit kaplama mekanik, termal ve kimyasal dayanım gibi özellikler için tasarlanmıştır. Termoset ve termoplastik kompozitler, kompozit malzemelerin matrislerine göre iki ana gruptadır [62].

Matris malzemesinin türüne, uygulama alanına, üretim performansına ve hedeflenen mekanik depolamaya bağlı olarak kompozit malzemeler üretimi kullanılan üretim metotları evrensel boyuttur. Bu dağılım, matris ve takviye malzemelerinin homojen bir şekilde bir araya gelmesini sağlamak, üretim maliyetlerini en üst düzeyde çıkarmak ve kompozit kaplama mekanik, termal ve kimyasal dayanım gibi özellikler için tasarlanmıştır. Termoset ve termoplastik kompozitler, kompozit malzemelerin matrislerine göre iki ana gruptur [62].

Termoplastik reçineler ise ısıtıldığında yumuşayarak şekillendirilebilir ve soğuduğunda tekrar sertleşir. Bu özellikleri sayesinde geri dönüştürülebilir ve hızlı üretime uygundur. Polipropilen (PP), poliamid (PA), polietereterketon (PEEK) ve polieterimid (PEI) gibi reçineler termoplastik kompozitlerde sıkça kullanılır. Bu malzemeler, otomotiv, tüketici elektroniği, spor ekipmanları ve medikal cihazlar gibi alanlarda kullanım açısından avantaj sağlar. Üretim süreçlerinde sıcak presleme, termoform yöntemi, sürekli elyaf sarma ve ekstrüzyon gibi teknikler yaygın olarak kullanılmaktadır [62], [64].



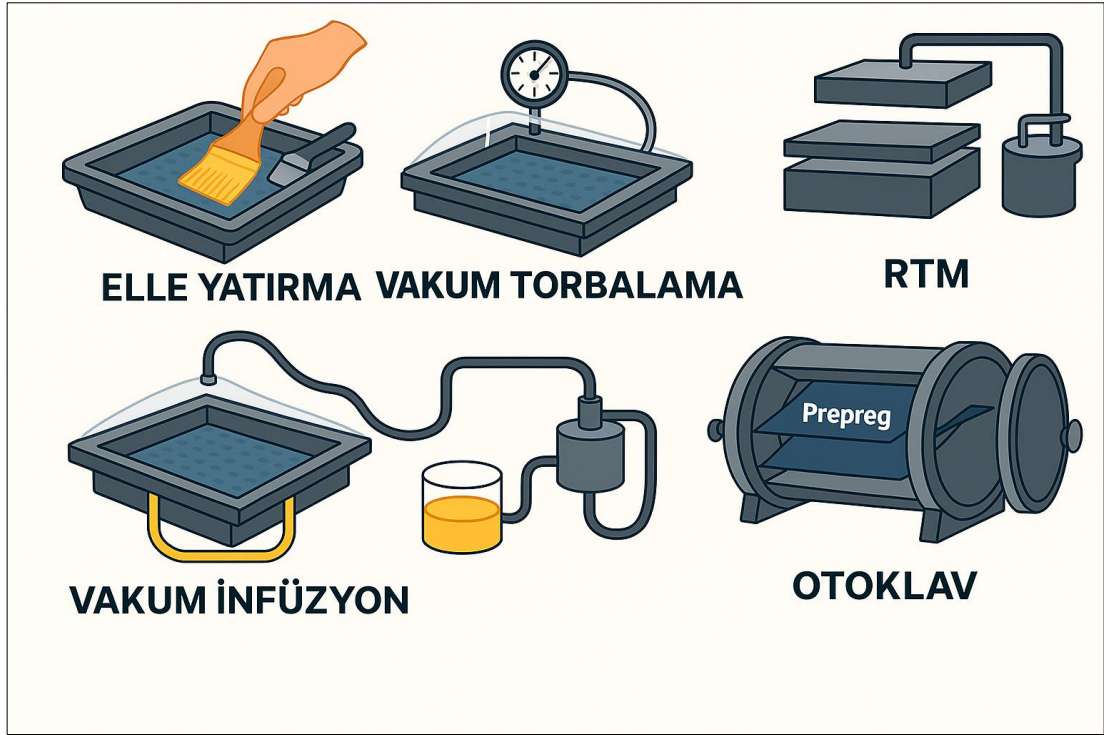
Şekil 3.1: Doğal elyafli kompozitlerin üretim döngüsü [111].

Son yıllarda, kompozit malzemelerin üretiminde sürdürülebilir ve çevre dostu yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır. Doğal elyaf takviyeli biyokompozitler, geri dönüştürülebilir termoplastik matris sistemleri ve nano katkılar gibi yenilikçi teknolojiler, kompozit malzemelerin hem mekanik performansını artırmakta hem de çevresel etkilerini azaltmaktadır. Özellikle hibrit üretim teknikleri, otomasyon sistemleri ve ileri mühendislik çözümleri sayesinde daha hafif, dayanıklı ve verimli kompozit malzemeler geliştirilmektedir [62].

Üretim yöntemlerinin seçimi, kompozit malzemenin nihai kullanım alanına, üretim ölçeğine ve maliyet faktörlerine göre değişiklik göstermektedir. Geleneksel yöntemlerin yanı sıra 3D baskı, robotik yerleştirme ve otomatik fiber yerleştirme gibi ileri üretim teknolojileri de giderek yaygınlaşmaktadır. Bu sayede, kompozit malzemelerin üretim süreçleri daha verimli hale gelmekte ve yeni nesil malzemeler endüstriyel uygulamalarda kendine daha fazla yer bulmaktadır [64].

3.1. Termoset Matrisli Kompozit Üretim Yöntemleri

Termoset reçineler (epoksi, polyester, vinilester vb.), ısı ve kimyasal reaksiyonlarla sertleşen, tekrar şekillendirilemeyen malzemelerdir. Bu nedenle üretim süreçleri, reçinenin elyaflarla homojen şekilde birleşmesini ve sertleşmesini odaklanır.



Şekil 3.2: Termoset matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri [112].

3.1.1. Elle Yatırma Yöntemi

Elle yatırma yöntemi, termoset matrisli kompozit üretiminde en basit, en ekonomik ve en yaygın kullanılan geleneksel üretim yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, takviye elyafı (cam, karbon, aramid, doğal elyaf vb.) kalıp yüzeyine katmanlar halinde yerleştirilir ve sıvı haldeki termoset reçine (epoksi, polyester, vinil ester vb.) fırça veya rulo yardımıyla uygulanır. Reçine elyaflara nüfuz ettirildikten sonra yüzey, hava kabarcıklarının giderilmesi ve reçinenin homojen dağılımı amacıyla fırça veya hava alma silindiri ile düzeltilir. Parça, oda sıcaklığında ya da hafif ısı altında kürlenmeye bırakılır. Sertleşme tamamlandıktan sonra kalıptan çıkarılarak kenar düzeltme, zımparalama ve gerekirse yüzey işlemleri yapılır [66].

Elle yatırma yönteminin avantajları arasında düşük ekipman maliyeti, basit ve esnek bir uygulama süreci, büyük ve karmaşık parçaların üretilebilmesi gibi faktörler yer alır. Ancak bazı önemli dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar arasında üretimin tamamen işçiliğe bağlı olması, üretim süresinin uzunluğu, matris-elyaf oranının tam kontrol edilememesi, hava boşluklarının oluşma riski ve seri üretime uygun olmaması

sayılabilir. Ayrıca açık ortamda yapılan reçine uygulamaları sağlık açısından risk oluşturabilir ve çevresel uçucu organik reçine emisyonlarına neden olabilir [67].

Elle yatırma yöntemi, tekne gövdeleri, otomotiv iç trim parçaları, küçük rüzgâr türbini kanatları, spor malzemeleri (sörf tahtası, kayak vb.), mimari paneller ve prototip üretimleri gibi alanlarda sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntemin verimliliğini artırmak ve kalitesini iyileştirmek için vakum torbalama tekniğiyle birleştirilmesi, düşük uçucu organik reçineler içeren reçineler kullanılması ve eğitimli personel ile çalışılması önerilmektedir. Ayrıca, kontrollü reçine uygulamaları için yarı otomatik sistemler veya reçine enjeksiyon teknikleri gibi modern yaklaşımlar da entegre edilerek performans ve tekrar edilebilirlik artırılabilir [48].

3.1.1.1. Üretim Süreci

Kalıp Hazırlığı: Üretime başlamadan önce kalıp yüzeyi toz, yağ ve kirden arındırılır. Kompozit malzemenin kalıba yapışmasını önlemek amacıyla kalıp yüzeyine ayırıcı madde (PVA, wax vb.) uygulanır.

Elyaf Yerleşimi: Takviye elyaflar (örneğin cam elyaf, karbon elyaf, keten gibi) kalıp içine katmanlar hâlinde elle yerleştirilir. Elyaf yönelimi ve katman sayısı, istenilen mekanik özelliklere göre belirlenir.

Reçine Uygulaması: Reçine ve sertleştirici karışımı belirlenen oranda hazırlanır. Hazırlanan karışım fırça, rulo veya dökme yöntemiyle elyafların üzerine uygulanır. Uygulama sırasında reçinenin tüm elyaflara eşit şekilde yayılması sağlanır.

Hava Kabarcıklarının Giderilmesi: Hava kabarcıkları, malzemenin mekanik dayanımını düşürür. Uygulama sonrası fırça veya özel hava alma silindirleri kullanılarak yüzey düzeltilir ve hava boşlukları giderilir.

Kürleme (Sertleşme): Reçinenin kimyasal reaksiyona girerek sertleşmesi için malzeme belirli bir süre bekletilir. Bu işlem genellikle oda sıcaklığında gerçekleşse de bazı durumlarda ısıtmalı fırın kullanılabilir. Kürleme süresi kullanılan reçine tipine göre değişkenlik gösterir (genellikle 6–24 saat).

Kalıptan Çıkarma ve Son İşlemler: Kürleme tamamlandıktan sonra kompozit parça kalıptan dikkatlice çıkarılır. Fazlalıklar kesilir, kenarlar düzeltilir ve yüzey gerekirse zımparalanır veya cilalanır.

3.1.2. Vakum Torbalama Yöntemi

Vakum torbalama yöntemi, elle yatırma yöntemiyle hazırlanan kompozit yapıların üzerine vakum uygulanarak fazla reçinenin dışarı atılmasını ve elyaf-matris oranının optimize edilmesini sağlar. Mekanik özelliklerde iyileşme daha net sağlanır. Elyaf-matris oranı daha iyi kontrol edilir. Daha düşük reçine tüketimi ile hafif parçalar üretilmesi avantajları arasında yer alır. Ekipman maliyetinin yüksek olması ve işlem süresinin uzun olması dezavantajlarındandır [68].

3.1.2.1. Üretim Süreci

Takviye ve Reçine Uygulaması, elle yatırma yöntemiyle elyaflar reçineyle ıslatılır. Vakum torbasının yerleştirilmesi, elyafli malzemenin üzerine bir ayırıcı film, delikli bir nefes alma katmanı ve hava geçirmez vakum torbası yerleştirilir. Vakum uygulaması, vakum pompaları yardımıyla torba içindeki hava alınarak malzeme sıkıştırılır. Kürlleme, malzeme, oda sıcaklığında veya fırında belirlenen süre boyunca sertleşmeye bırakılır. Son İşlemler, kürlenen parça kalıptan çıkarılarak yüzey işlemleri yapılır.

3.1.3. Vakum İnfüzyon Yöntemi

Vakum infüzyon yöntemi, kompozit malzeme üretiminde kullanılan gelişmiş ve yenilikçi bir üretim tekniğidir. Bu yöntem, yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve üstün mekanik performans gerektiren uygulamalar için geliştirilmiştir. Geleneksel açık kalıplama yöntemleriyle kıyaslandığında, vakum infüzyon daha hassas reçine dağılımı sağlamakta, düşük boşluk oranı ile yüksek kaliteli kompozit malzemeler üretmeye olanak tanımaktadır [48]. Günümüzde vakum infüzyon yöntemi, havacılık, otomotiv, denizcilik ve yenilenebilir enerji sektörlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Özellikle çevre dostu ve sürdürülebilir üretim tekniklerine olan ilginin artmasıyla birlikte, bu yöntemin önemi daha da belirgin hale gelmiştir. Vakum infüzyon, üretim sürecinde kullanılan reçine miktarını optimize ederek malzeme israfını azaltmakta ve daha homojen bir ürün elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, üretim sırasında düşük uçucu organik bileşik emisyonları sayesinde çevresel etkileri minimize etmektedir [70]. Vakum infüzyon yöntemi, kapalı kalıplama tekniklerinden biri olup, kuru takviye malzemesinin (liflerin) bir kalıp içine yerleştirilmesi ve ardından vakum basıncı ile

reçinenin liflerin arasına emdirilmesi prensibine dayanır. Bu yöntem, düşük viskoziteli reçinenin hava ile temasını minimum seviyeye indirerek gözenekliliği azaltır ve liflerin tamamının düzgün bir şekilde ıslanmasını sağlar. Böylece daha yüksek mekanik dayanım ve uzun ömürlü kompozit yapılar elde edilir [68]. Vakum infüzyon sürecinde, reçine, vakum yardımıyla liflerin içine çekildiği için kapalı bir sistem içerisinde ilerler. Bu, manuel laminasyon gibi geleneksel yöntemlerde görülen insan kaynaklı hataları en aza indirir ve daha tutarlı bir malzeme kalitesi sağlar. Reçinenin liflere nüfuz etme süreci, vakum basıncı ile yönlendirilir ve sistemdeki basınç farkı sayesinde reçinenin her bölgeye homojen şekilde ulaşması sağlanır [65]. Bu yöntemin en önemli avantajlarından biri, lif oranının artırılabilmesidir. Geleneksel el yatırma yöntemlerine kıyasla vakum infüzyon, kompozit malzemelerde daha yüksek lif hacim oranı (Vf) sağlayarak malzeme mukavemetini artırır. Aynı zamanda, reçine tüketimini optimize ederek fazla malzeme kullanımının önüne geçer. Bu özellikleriyle vakum infüzyon, özellikle hafif ve dayanıklı yapıların üretiminde önemli bir teknik olarak öne çıkmaktadır [48]. Vakum infüzyon sürecinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için çeşitli parametrelerin dikkatlice kontrol edilmesi gerekmektedir. Reçinenin viskozitesi, infüzyon hızını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Düşük viskoziteli reçineler, liflere daha kolay nüfuz ederken, yüksek viskoziteli reçineler daha uzun infüzyon süreleri gerektirebilir. Bunun yanı sıra, kalıp tasarımı, vakum sızdırmazlığı ve reçine akış yolları gibi unsurlar, üretim sürecinin verimliliğini ve elde edilen kompozitin kalitesini belirleyen önemli etkenlerdir [68].

3.1.3.1. Üretim Süreci

Vakum infüzyon yöntemiyle kompozit üretimi, dikkatli bir şekilde yönetilmesi gereken çok aşamalı bir süreçtir. Bu süreçte her bir adım, nihai ürünün kalitesini doğrudan etkileyen kritik bir rol oynamaktadır. Aşağıda her aşama detaylı bir şekilde açıklanmış olup, kullanılması gereken ekipman ve malzemeler de bu aşamalarla ilişkilendirilmiştir [48].

Kalıp Hazırlığı: Vakum infüzyon sürecinin ilk adımı, kalıp hazırlığıdır. Kalıp, üretilcek kompozit malzemenin yüzey kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Kalıp düzgün, pürüzsüz ve reçinenin düzgün bir şekilde dağılmasını sağlayacak şekilde hazırlanmalıdır. Kalıp yüzeyine, malzemenin kalıptan kolayca ayrılabilmesi için uygun bir delikli ayırıcı film uygulanır. Bu ayırıcı film, kompozit

malzemenin kalıptan zarar vermeden çıkmasını sağlar. Kalıp yüzeyine uygulanan delikli ayırıcı film sonrası, kalıbın kenarlarına dikkatlice vakum sızdırmazlık bandı yerleştirilir ve kalıp, vakum torbasının düzgün bir şekilde yerleşmesi için uygun hale getirilir. Bu mühürleme, sistemin hava sızdırmazlık fonksiyonunu garanti altına alır [48].

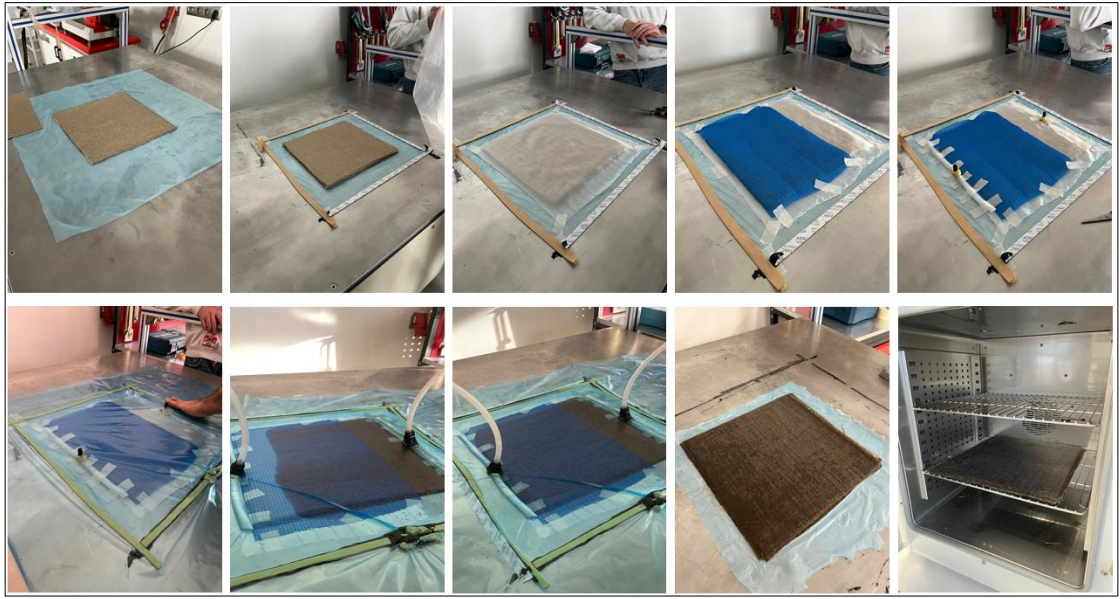
Takviye Malzemesinin Yerleştirilmesi: Keten elyaf takviyesi, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini belirleyen en önemli bileşendir. Takviye malzemesinin yerleştirilmesi sırasında, liflerin doğru oryantasyonu sağlanmalıdır. Liflerin doğru şekilde yerleştirilmesi, kompozitin taşıma kapasitesini ve mekanik dayanımını artırırken, aynı zamanda malzemenin kütleli verimliliğini de optimize eder. Liflerin düzgün bir şekilde yerleştirilmesi, kıvrılma ve büzülme gibi sorunların önüne geçilmesini sağlar. Bu adımda, liflerin dağılımının homojen olmasına ve gerilimsiz bir şekilde yerleştirilmesine dikkat edilir [48]. Takviye malzemelerinin yerleştirilmesi esnasında, akış filesi ve spiral infüzyon hortumu gibi infüzyon için gerekli olan ekipmanlar yerleştirilir. Akış filesi, reçinenin düzgün bir şekilde yayılmasına yardımcı olurken, spiral infüzyon hortumu ise reçinenin tüm kalıp alanına eşit bir şekilde dağılmasını sağlayan bir dağıtım aracıdır. Bu malzemelerin kullanımı, kompozit malzemenin homojen bir şekilde kürlenmesini ve mekanik özelliklerinin tutarlı olmasını sağlar [86].

Vakum Torbasının Yerleştirilmesi: Takviye malzemesi, akış filesi ve soyma kumaşı yerleştirildikten sonra, vakum torbası dikkatlice kapatılır. Vakum torbasının herhangi bir sızıntı yapmaması için kenarları özel yapıştırıcı bantlarla mühürlenir. Bu mühürleme, sistemin hava sızdırmazlık fonksiyonunu garanti altına alır. Torbanın içine yerleştirilen soyma kumaşı, reçinenin liflere homojen bir şekilde yayılmasına yardımcı olur ve fazla reçinenin dışarıya taşmasına engel olur [48].

Reçine Enjeksiyonu ve Vakum Uygulaması: Vakum pompası çalıştırıldığında, sistemdeki hava tamamen boşaltılır ve kalıp içinde negatif basınç oluşturulur. Bu negatif basınç sayesinde, düşük viskoziteli epoksi reçine, liflerin arasına yavaşça çekilir. Reçinenin liflere tam olarak nüfuz etmesi için belirli bir süre beklenir. Bu aşamada, reçinenin viskozitesi, sıcaklık ve vakum basıncı gibi parametreler dikkatle izlenir. Reçine enjeksiyonu sırasında, T giriş konnektörü ve infüzyon blok konnektörü gibi bağlantı elemanları kullanılır. Bu konnektörler, reçinenin sistemdeki diğer

bölgelerine doğru düzgün bir şekilde akmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir [48].

Kürlenme Süreci: Reçine, liflere tamamen nüfuz ettikten sonra, kürlenme süreci başlar. Bu aşama, epoksi reçine ve sertleştiricinin reaksiyona girerek sertleşmesini sağlar. Kürlenme süresi, kullanılan reçine sistemine bağlı olarak değişebilir. Ancak, sıcak tabla kullanımı sayesinde, bu süre 5-8 saat aralığına çekilebilir. Sıcak tabla, reaksiyon hızını artırır ve reçinenin daha hızlı kürleşmesini sağlar. Bu ısıl işlem, kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirir ve daha kısa süre içinde güçlü bir malzeme elde edilmesini mümkün kılar. Sıcak tabla kullanımı, özellikle yüksek ısıl dayanım gereksinimi olan uygulamalarda faydalıdır [48]. Kürlenme süresi tamamlandıktan sonra, kompozit malzeme kalıptan dikkatlice çıkarılır ve son işlem için hazır hale getirilir.



Şekil 3.3: Vakum infüzyon yöntemi [113].

3.1.4. Reçine Transfer Kalıplama

RTM yöntemi, kuru elyaf takviyesinin kapalı bir kalıba yerleştirilmesi ve reçinenin düşük basınçla enjekte edilmesi sürecine dayanır. Elyafın homojen olarak ıslanması sağlanır. Yüzey kalitesi yüksek kalitede elde edilir. Tekrarlanabilir üretimin mümkün olması avantajlarından. Kalıp maliyetinin yüksek olması ve uzun kürlenme süresi dezavantajlarından [48].

3.1.4.1. Üretim Süreci

Elyaf Yerleşimi, elyaflar kapalı kalıp içine düzgünce yerleştirilir. Kalıp kapatma, kalıp kapatılarak reçine enjeksiyonuna hazır hale getirilir. Reçine Enjeksiyonu, reçine düşük basınç altında kalıp içine enjekte edilir ve elyafların arasına yayılır. Kürleme, malzeme belirlenen sıcaklık ve süre boyunca kürlenir. Kalıptan çıkarma, kürlenen parça kalıptan çıkarılarak gerekli yüzey işlemleri yapılır.

3.1.5. Otoklav Yöntemi

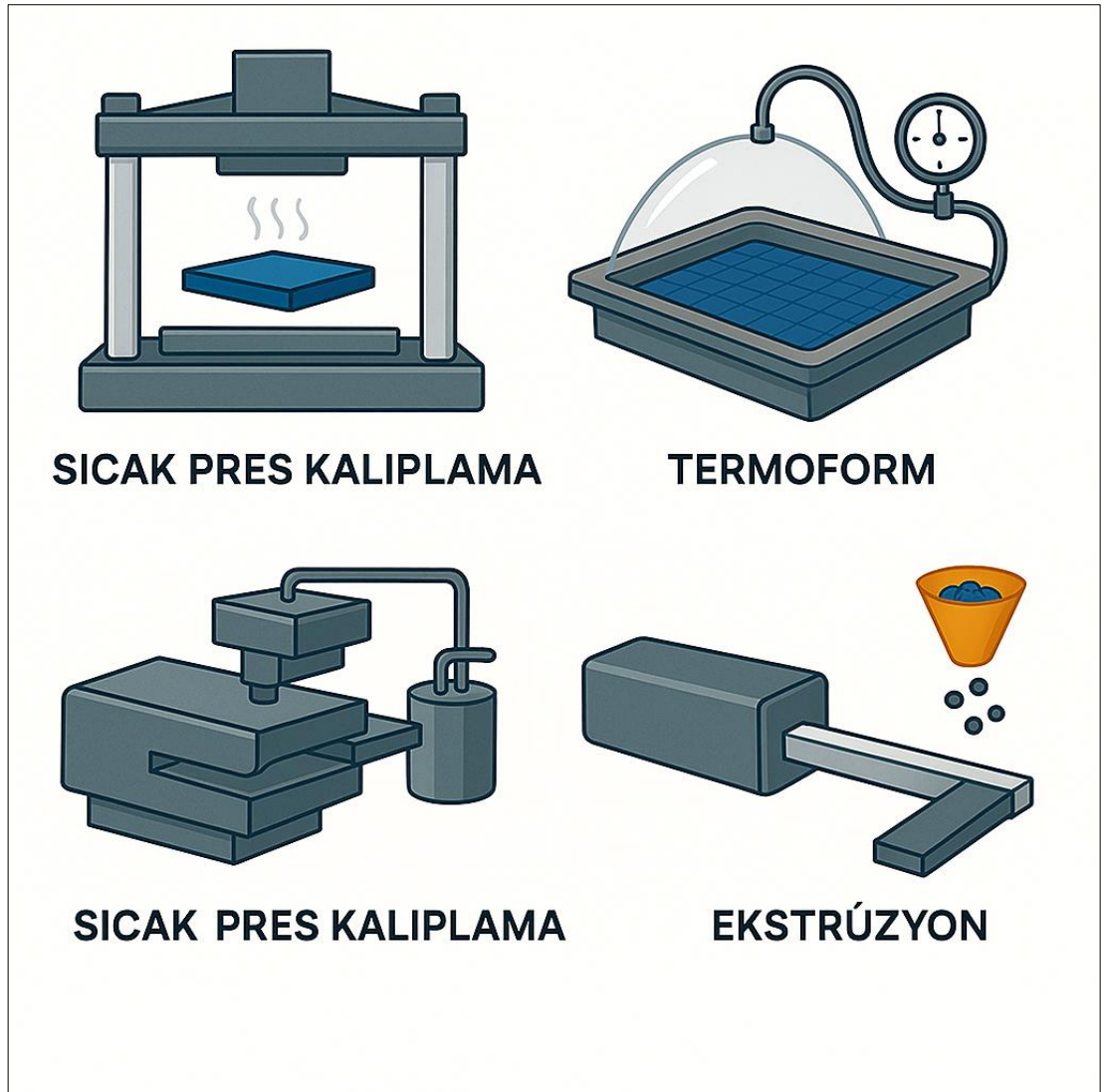
Otoklav yöntemi, yüksek sıcaklık ve basınç altında kompozit malzemelerin kürlenmesini sağlayan bir üretim yöntemidir. Bu yöntemle diğer üretim yöntemlerine kıyasla yüksek mekanik özellikler elde edilir. Yüksek tekrarlanabilirlik sağlanabilir. Fakat yüksek maliyetli ve üretim süresinin uzun olması dezavantajdır [48].

3.1.5.1. Üretim Süreci

Prepreg yerleşimi, prepreg malzeme (önceden reçineyle kaplanmış elyaf) kalıba yerleştirilir. Vakum torbası uygulaması, malzeme vakum torbası ile kaplanır. Otoklav kürleme, malzeme, otoklavda belirli sıcaklık ve basınç koşullarında kürlenir. Son işlemler, kürlenen parça kalıptan çıkarılarak yüzey işlemleri yapılır.

3.2. Termoplastik Matrisli Kompozit Üretim Yöntemleri

Termoplastik matrisli kompozit üretim yöntemleri, geri dönüştürülebilir, yüksek darbe dayanımı sunan ve seri üretime uygun kompozit malzemeler elde etmek için geliştirilmiştir. Termoset matrisli kompozitlerin aksine, termoplastik reçineler ısıtılarak şekillendirilebilir ve soğutularak tekrar katı hale getirilebilir. Bu özellikleri sayesinde otomotiv, havacılık ve tüketici ürünleri gibi birçok alanda kullanılırlar [34].



Şekil 3.4: Termoplastik matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri [114].

3.2.1. Sıcak Presleme Yöntemi

Sıcak presleme yöntemi, kompozit malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılan ve özellikle termoplastik matrisli prepreg malzemelerin işlenmesini sağlayan bir tekniktir. Bu yöntemde, takviye elyaf içeren termoplastik levhalar belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve ardından hidrolik presler yardımıyla metal kalıplar arasında yüksek basınç uygulanarak istenilen şekil verilir. Sıcaklık ve basıncın kontrolü, matris malzemenin tamamen erimesini ve takviye elyaf ile tam bir bütünleşme sağlamasını mümkün kılar. Sürecin sonunda malzeme, kontrollü bir şekilde soğutularak nihai formuna ulaşır ve böylece mukavemeti yüksek, hafif ve dayanıklı kompozit parçalar üretilmiş olur. Otomotiv, havacılık, tüketici elektroniği ve spor ekipmanları gibi sektörlerde yaygın bir kullanım alanına sahip olan bu yöntem, özellikle seri üretim gerektiren uygulamalarda avantaj sağlar [71].

3.2.1.1. Üretim Süreci

Üretim sürecinde öncelikle kullanılacak prepreg malzeme uygun boyutlarda kesilerek kalıp içerisine yerleştirilir. Ardından kalıp, proses için belirlenen sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu aşamada, hidrolik pres yardımıyla yüksek basınç uygulanır ve malzemenin şekil alması sağlanır. Uygulanan sıcaklık ve basınç etkisiyle matris malzeme tamamen eriyerek takviye elyaf ile bütünleşir. Presleme işleminin tamamlanmasının ardından, sıcaklık kontrollü bir şekilde düşürülerek malzemenin sertleşmesi gerçekleştirilir. Son aşamada ise kalıptan çıkarılan nihai ürün üzerinde gerekli yüzey işlemleri ve kalite kontrolleri uygulanarak malzeme kullanıma hazır hale getirilir [72].

3.2.1.2. Sıcak Presleme Yöntemi Avantajları

Sıcak presleme yöntemi, kompozit üretiminde pek çok avantaj sağlamaktadır. Öncelikle hızlı üretim imkânı sunması sayesinde seri üretime oldukça uygundur ve birkaç dakika içerisinde parça üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Bunun yanı sıra, elyaf oranının hassas bir şekilde kontrol edilebilmesi sayesinde yüksek mekanik özelliklere sahip, güçlü ve dayanıklı parçalar elde edilmektedir. İşçilik maliyetleri açısından bakıldığında, bu yöntem otomasyon sistemleri ile kolayca entegre edilebilmekte ve insan hatasının minimum seviyeye indirilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, termoplastik matrislerin tekrar eritilerek kullanılabilmesi sayesinde geri

dönüştürülebilir malzeme kullanımına olanak tanımakta ve sürdürülebilir üretim anlayışına katkıda bulunmaktadır [72].

3.2.1.3. Sıcak Presleme Yöntemi Dezavantajları

Sıcak presleme yöntemi, sahip olduğu avantajlara rağmen bazı dezavantajlar da barındırmaktadır. Öncelikle hidrolik presler ve özel kalıpların oldukça pahalı olması, başlangıç yatırım maliyetlerini artırmaktadır. Ayrıca büyük boyutlu ve karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimi bu yöntemle sınırlı kalmakta, özellikle derin ve kompleks şekillerin elde edilmesi zorlaşmaktadır. Yöntemin bir diğer dezavantajı ise yüksek sıcaklık gereksinimidir. Özellikle PEEK gibi yüksek performanslı malzemelerin işlenmesi için 400 °C ve üzeri sıcaklıklar gerekebilmekte, bu durum ise enerji tüketimini önemli ölçüde artırmaktadır. Son olarak, her tür termoplastik matris ya da takviye elyafı sıcak presleme süreci için uygun olmayabilir; bu da yöntemin malzeme çeşitliliği açısından sınırlayıcı bir yönünü ortaya koymaktadır [72].

3.2.2. Termoform

Termoform yöntemi, önceden üretilmiş termoplastik kompozit levhaların ısıtılarak kalıp içinde şekillendirilmesi esasına dayanır. Düşük maliyetli ve hızlı üretime uygundur. Hafif, karmaşık şekilli parçalar üretilebilir olması avantajlarından. Yapısal parçaların üretimde kısıtlı olması, yüksek sıcaklık ve hassas kontrol gerektirmesi dezavantajlarından [73].

3.2.2.1. Üretim Süreci

Kompozit levha ısıtma, malzeme 200–300°C sıcaklıkta ısıtılır. Şekil verme, yumuşayan malzeme, vakum veya basınç yardımıyla kalıp içinde şekillendirilir. Soğutma, parça kalıpta soğuyarak sertleşir. Kalıptan çıkarma, şekil verilen parça kesilir ve yüzey işlemleri yapılır.

3.2.3. Enjeksiyon Kalıplama

Enjeksiyon kalıplama, termoplastik matris ve kısa elyafların (cam, karbon, doğal elyaf) eritilip kalıba enjekte edilerek şekillendirilmesi yöntemidir. Hızlı ve seri üretim için uygundur. Düşük maliyetli parça üretimi sağlar ve karmaşık geometrilere uygundur. Kalıp maliyeti olması ve elyaf uzunluğu kısa olduğu için mekanik özelliklerinin sınırlı olması dezavantajlarından [74].

3.2.3.1. Üretim Süreci

Ham Madde Hazırlığı: Polipropilen (PP), Poliamid (PA), PEEK vb. matris polimer. %10–40 oranında kısa cam, karbon veya doğal elyaf. Malzeme eritme, plastik granüller 200–400°C sıcaklıkta eritilir. Enjeksiyon, eritilmiş malzeme, yüksek basınç altında metal kalıba enjekte edilir. Soğutma, kalıp içinde soğuyarak sertleşir. Kalıptan çıkarma ve son işlemler, parça çıkarılır, yüzey işlemleri yapılır.

3.2.4. Ekstrüzyon ve Pultrüzyon

Ekstrüzyon, matris ve takviye malzemelerinin kalıptan sürekli geçirilmesiyle profil üretimini sağlar. Pultrüzyon ise liflerin reçineyle doyurulup çekilmesiyle yüksek mukavemetli ve hafif kompozitler üretir. Her iki yöntem de seri üretim ve otomotiv uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.2.4.1. Ekstrüzyon Yöntemi

Ekstrüzyon, termoplastik matrisli kısa elyaf takviyeli kompozitlerin sürekli olarak üretilmesini sağlayan bir yöntemdir. Sürekli üretime uygundur ve ekonomik bir yöntemdir. Karmaşık şekillerin üretiminde sınırlı olması ve yüksek yatırım maliyetinin olması dezavantajlarından [76].

3.2.4.1.1. Üretim Süreci

Polimer ve elyaf karışımı, granül veya toz haldeki polimer ve kısa elyaf karıştırılır. Eritme, Karışım, yüksek sıcaklıkta eritilerek homojen hale getirilir. Şekil Verme, eritilmiş malzeme, özel bir kalıptan geçirilerek belirli bir kesitte üretilir. Soğutma ve kesim, malzeme soğutularak belirlenen uzunluklarda kesilir.

3.2.4.2. Pultrüzyon Yöntemi

Pultrüzyon, sürekli elyaf (cam, karbon, doğal elyaf) ve termoplastik reçinenin belirli bir profil şeklinde üretilmesini sağlayan bir yöntemdir. Yüksek mukavemet ve hafiflik sağlar. Uzun ömürlü ürünler üretilir. Sadece belirli kesitlerde üretim yapılabilir olması dezavantajlarından [76].

3.2.4.2.1. Üretim Süreci

Sürekli elyaf besleme, elyaf demetleri makineye beslenir. Reçine emdirme, elyaflar, erimiş termoplastik reçineyle kaplanır. Kalıptan geçirme, elyaf ve reçine kombinasyonu, belirli bir kesitte kalıptan geçirilerek şekillendirilir. Soğutma ve kesim, malzeme soğuyarak sertleşir ve belirlenen uzunluklarda kesilir.

4. KULLANILAN MALZEMELER VE ÜRETİM

4.1. Malzemeler

Günümüzde doğal elyaf takviyeli kompozit malzemeler üzerine giderek daha fazla araştırma yapılıyor. Bunun nedeni, otomotiv endüstrisinin çevreyi daha sürdürülebilir hale getirmek, otomobilleri daha hafif hale getirerek yakıt verimliliğini artırmak ve aynı zamanda yüksek performanslı alternatif malzemeler geliştirmek istemesidir. Bu bağlamda, doğal liflerin yenilenebilir kaynaklardan, çevre dostu ve iyi mekanik özelliklere sahiptir. Özellikle hafif olmaları ve enerjiyi emebilmeleri nedeniyle çok dikkat çekmektedirler.

Bu çalışmanın temel amacı, doğal elyaf ve nano katkı maddelerinin birlikte kullanımıyla geliştirilen hibrit kompozit malzemelerin, başta otomotiv endüstrisi olmak üzere çeşitli mühendislik uygulamalarındaki potansiyelini ortaya koymak ve çevreye duyarlı, mühendislik açısından uygun alternatif malzeme geliştirme çalışmalarına katkı sağlamaktır. Keten elyaf takviyeli ve organo kil katkılı epoksi esaslı hibrit kompozit malzemeler geliştirilmiş ve bu malzemelerin statik ve titreşim davranışları çok yönlü olarak değerlendirilmiştir. Projede kullanılan malzemeler ve uygulanan üretim yöntemi bu bölümde detaylandırılacaktır. Kompozit numuneler, vakum torbalama yöntemi kullanılarak 350 mm x 350 mm boyutlarında olacak şekilde üretilmiştir. Katmanlı yapıdaki bu numunelerde 8 katman keten elyaf takviyesi ile epoksi, sertleştirici ve hızlandırıcı içeren bir matris sistemi kullanılmış; üretim sürecinde toplamda yaklaşık 800 gr matris malzemesi ile 370 gr elyaf malzemesi kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmalarda, katkısız, %1 oranında nanokil katkılı ve %2 oranında nanokil katkılı olmak üzere üç farklı numune tasarımı yapılmıştır. Nano boyutta organo kil katkısı, kompozit yapıların mekanik dayanımını ve titreşim sönümleme yeteneğini artırmak amacıyla sisteme entegre edilmiştir. Ayrıca, numunelerin ilgili standartlara uygun şekilde kesimi ve hazırlanması da gerçekleştirilmiş olup bu süreçler bu bölümde açıklanacaktır.

ve Batı Asya bölgeleri olsa da günümüzde başta Fransa, Belçika, Hollanda, Çin, Rusya ve Kanada gibi ülkelerde endüstriyel keten tarımı yapılmaktadır. Bu ülkelerdeki uygun iklim ve toprak koşulları, yüksek kaliteli keten liflerinin elde edilmesine olanak sağlamaktadır [77], [78].



Şekil 4.2: Keten bitkisi [116].

Keten elyafı, kompozit malzemelerde doğal takviye elemanı olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Hafif yapısı, yüksek çekme mukavemeti, biyolojik olarak parçalanabilir olması ve çevresel sürdürülebilirliği nedeniyle sentetik takviye elemanlarına alternatif olarak değerlendirilmektedir. Otomotiv, yapı, havacılık ve spor malzemeleri gibi çeşitli sektörlerde uygulama alanı bulmaktadır [77]. Keten lifleri temel olarak selüloz, hemiselüloz, lignin, pektin ve mumsu bileşiklerden oluşmaktadır. Bu bileşenler lifin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemekte önemli rol oynamaktadır. Özellikle selüloz oranının yüksek olması, lifin mekanik dayanımını artırırken; lignin ve hemiselüloz gibi bileşenler ise rijitliği, esnekliği ve su emme kapasitesini etkilemektedir. Bu nedenle keten elyafı, matris malzeme ile ara yüzey etkileşimleri bakımından elverişli özellikler sunmaktadır [78].

Tablo 4.1: Kullanılan elyaf özellikleri [122].

Elyaf Tipi	Keten
İplik Türü	Kuru (Nemli)-Twisted
Örgü Deseni	Kumaş
Ağırlık (g/m ²)	400
Genişlik (mm)	1000
Maksimum Kuvvet	1000N
Maksimum Kuvvette Uzama (%)	5,9

Keten elyafları, cam elyafına kıyasla daha düşük yoğunlukta olup, kısmen benzer mekanik dayanım sunmaktadır.

Keten elyafının kompozit yapı içerisindeki temel görevi, matris malzemesi ile bütünleşerek malzemenin mekanik mukavemetini artırmaktır. Kompozitlerde keten elyafı kullanımı, pek çok önemli avantaj sağlamaktadır. Öncelikle yüksek dayanım/ağırlık oranı sayesinde hem hafif hem de güçlü yapıların elde edilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca iyi darbe dayanımı ve yüksek enerji absorpsiyonu özellikleri sayesinde malzemelerin dış etkilere karşı daha güvenilir ve uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır. Bunun yanında, mükemmel titreşim ve ses sönümleme kapasitesi ile özellikle otomotiv ve yapı sektörlerinde konfor ve güvenliği artırıcı bir rol üstlenmektedir. Son olarak, çevre dostu ve biyolojik olarak parçalanabilir yapısı sayesinde sürdürülebilir üretim anlayışına katkıda bulunarak çevresel etkilerin azaltılmasına önemli bir fayda sunmaktadır.

Keten elyafları, epoksi matris içinde homojen dağılım gösterebilmesi ve iyi ıslanabilirlik sunması için ön işlemden geçirilmiştir. Elyaf yüzeyi, epoksi reçine ile bağlanmayı artırmak için fiziksel veya kimyasal yöntemlerle modifiye edilmiştir [79].

Tablo 4.2: Literatürlerde genel elyaf özellikleri [77].

Özellik	Değer
Lif Yoğunluğu	~1,5 g/cm ³
Çekme Mukavemeti	500-1500 MPa
Elastisite Modülü	30-80 GPa
Uzama Oranı	%1,5-4
Nem Emme Kapasitesi	%7-10



Şekil 4.3: Keten elyaf [117].

4.1.2. Matris Malzemesi

Bu çalışmada matris malzemesi olarak epoksi reçine, anhidrit esaslı sertleştirici ve imidazol bazlı hızlandırıcı kullanılmıştır. Tedarik edilen malzemelerin teknik veri sayfalarına uygun olarak, karışım oranları epoksi: sertleştirici:hızlandırıcı için sırasıyla yüz birime doksan birim ve bir birim (100:90:1) olarak belirlenmiştir. Hazırlanan bu karışım, numune üretiminde vakum torbalama yöntemi ile elyaf takviyesine entegre edilmiştir.



Şekil 4.4: Tepkimeye girmiş matris malzemesi [113].

Nanokil katkısı ise %1 ve %2 oranlarında matrise eklenmiştir. Karışım hazırlık sürecinde ilk olarak epoksi reçine tartılarak uygun bir kaba aktarılmış, ardından ilgili orandaki nanokil ilave edilmiştir. Epoksi-nanokil karışımı, öncelikle 5 dakika süreyle mekanik karıştırıcıda homojenleştirilmiş, sonrasında ise 30 dakika boyunca ultrasonik karıştırıcıda işlenmiştir. Bu aşamanın ardından, belirlenen miktarda sertleştirici eklenmiş ve karışım 15 dakika boyunca yeniden ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Sertleştirici ilavesinden sonra karışımda yoğunluk farkının gözle görülür şekilde belirginleştiği tespit edilmiştir. Son aşamada, tüm bileşenler 30 dakika boyunca hem ultrasonik hem de mekanik karıştırıcı kullanılarak karıştırılmış ve homojen bir dağılım sağlanmıştır.



Şekil 4.5: Matris malzemesi karışım prosesleri [113].

4.1.2.1. Epoksi Reçine

Kompozit üretiminde matris fazı olarak epoksi bazlı termoset reçine ve sertleştirici kullanılmıştır. Epoksi reçine, termoplastik reçinelere kıyasla daha yüksek mekanik özellikler, üstün yapışma kapasitesi ve kimyasal dayanım sunduğu için tercih edilmiştir. Özellikle yüksek mukavemet ve uzun ömürlü performans gerektiren uygulamalarda epoksi reçineler kritik bir rol oynar [80]. Epoksi reçineler, polimerizasyon sırasında kimyasal reaksiyon yoluyla çapraz bağ yapıları oluşturur. Bu çapraz bağlar, termoset karaktere sahip olmalarını sağlar ve sertleştikten sonra tekrar yumuşama veya erime gibi durumlar göstermezler. Bu özellik, epoksi bazlı kompozit malzemeleri yüksek sıcaklıklara, mekanik yüklere ve kimyasal etkilere karşı dirençli hale getirir [83].

Epoksi reçine, elyaflarla kuvvetli bir bağ oluşturur ve böylece kompozitin yük taşıma kapasitesini artırarak çekme ve eğilme yükleri altında daha iyi performans göstermesini sağlar [81]. Kimyasal ve çevresel faktörlere karşı direnç sağlar. Epoksi bazlı kompozitler, nem, kimyasal maddeler, UV ışınları ve oksidasyon gibi çevresel faktörlere karşı yüksek direnç gösterir. Bu özellik, özellikle dış ortamda veya agresif kimyasallarla temas eden uygulamalarda büyük avantaj sağlar [81]. Yüzey pürüzsüzlüğü ve homojenliği artırır. Epoksi reçine, kompozit malzemenin yüzey kalitesini iyileştirerek daha düzgün ve estetik bir yapı oluşturur. Bu hem aerodinamik hem de mekanik performansı olumlu yönde etkiler [80]. Düşük büzülme oranı sayesinde boyutsal stabiliteyi artırır. Termoset yapısı sayesinde epoksi reçineler, kürlleme sonrası minimum büzülme gösterir. Bu, üretilen parçaların boyutsal hassasiyetinin korunmasını sağlar [83]. Delaminasyonu önleyerek malzeme bütünlüğünü artırır. Kompozit malzemelerde en büyük sorunlardan biri katmanlar arasında ayrılmadır (delaminasyon). Epoksi reçine, elyaflarla güçlü bir ara yüzey bağı oluşturarak bu sorunu minimize eder ve mekanik ömrü uzatır [84].

Epoksi reçineler, düşük viskoziteleri sayesinde elyaf takviyeli sistemlerin içerisine kolayca nüfuz edebilmekte ve bu durum özellikle vakum infüzyon ve elle yatırma gibi üretim tekniklerinde işlenebilirliği önemli ölçüde artırmaktadır. Uygun sertleştirici seçimi ve doğru kürlleme koşulları sağlandığında, epoksi esaslı sistemler -40 °C ile +150 °C arasında geniş bir sıcaklık aralığında yapısal stabilitesini koruyabilmektedir [82]. Ayrıca epoksi reçineler, sahip oldukları üstün dielektrik özellikler nedeniyle elektriksel yalıtıklık gerektiren uygulamalarda tercih edilmekte; düşük ısıl genleşme katsayısı sayesinde ise boyutsal kararlılığın kritik olduğu yüksek hassasiyetli mühendislik uygulamaları için uygun hale gelmektedir [81].

Epoksi reçinelerin kullanım alanları oldukça geniştir. Otomotiv sanayinde, araç ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini artıran yapısal parçalar, gövde panelleri, iç mekân bileşenleri ve motor bölmesi parçalarında kullanılmaktadır. Havacılık ve uzay sanayinde, yüksek mukavemet ve hafiflik kombinasyonu sayesinde uçak gövdeleri, kanatlar, motor parçaları ve uzay araçlarının üretiminde tercih edilmektedir. Denizcilik sektöründe, korozyona karşı dayanıklılığı nedeniyle tekneler, yatlar ve denizaltılar için hem gövde hem de iç destek yapılarında uygulanmaktadır. Spor ekipmanlarında, bisiklet kadroları, kayak tahtaları, golf sopaları, tenis raketleri ve yarış araçları gibi yüksek performans gerektiren ürünlerde kullanılmaktadır. Son olarak, elektrik ve

elektronik uygulamalarda, mükemmel yalıtım özellikleri sayesinde devre kartları, transformatör bileşenleri ve yüksek gerilim yalıtkanlarında önemli bir malzeme olarak yer almaktadır [80], [83].

Tablo 4.3: Kullanılan epoksi özellikleri [123].

Özellik	Değer
Yoğunluk	1,15-1,2 g/cm ³
Viskozite	1000-1200 MPa.s
Yanma Noktası	>200°C

Sertleştirici ile reaksiyona girerek çapraz bağlı bir yapı oluşturur ve yüksek mekanik özellikler sunar.

4.1.2.2. Sertleştirici

Epoksi reçinenin polimerizasyon sürecini tamamlamak amacıyla kullanılan sertleştirici, anhidrit bazlı bir ajan olup belirli bir karışım oranında reçine ile birleştirilmiştir. Anhidrit sertleştiriciler, âmin bazlı sertleştiricilere kıyasla daha düşük reaktiviteye sahip olmalarına rağmen, genellikle yüksek sıcaklıklarda kürlere gerektirirler. Bu durum, epoksi esaslı sistemlere daha yüksek ısı dayanımı, gelişmiş elektriksel yalıtım kapasitesi ve üstün kimyasal direnç kazandırmaktadır. Anhidritlerin epoksi grupları ile reaksiyonu sırasında ester bağlarının oluşması, yoğun bir çapraz bağ yapısının meydana gelmesine neden olur. Bu yapı, kompozit malzemenin yüksek sertlik, dayanıklılık ve uzun süreli kararlılık özelliklerine ulaşmasını sağlamaktadır [84].

Anhidrit bazlı sertleştiricilerin temel fonksiyonları arasında, epoksi reçinenin yüksek sıcaklık altında sertleşmesini sağlamak, kürlere sonrası mükemmel mekanik dayanım ve kimyasal direnç kazandırmak, elektriksel yalıtkanlık ile ısıya dayanım özelliklerini geliştirmek ve uzun süreli termal stabilite sunmak yer almaktadır.

Sertleştiricinin reçine ile doğru oranda ve homojen bir şekilde karıştırılması, polimer ağının düzgün ve eksiksiz bir şekilde oluşması için kritik öneme sahiptir. Anhidrit sistemlerde, özellikle yüksek sıcaklık gerektiren kürlere koşullarının doğru şekilde uygulanması, nihai malzemenin mekanik ve termal performansını doğrudan etkiler.

Ayrıca bu sistemler, özellikle elektronik, elektrik, otomotiv ve yapısal kompozit uygulamalarında tercih edilmektedir [85].

Tablo 4.4: Kullanılan sertleştirici özellikleri [123].

Özellik	Değer
Yoğunluk	1,20-1,25 g/cm ³
Viskozite	<50 MPa.s
Yanma Noktası	>92°C

4.1.2.3. Hızlandırıcı

Epoksi reçine sistemlerinde kullanılan hızlandırıcı, imidazol bazlı bir katkı malzemesi olup kürlleme reaksiyonunu hızlandırmak ve düşük sıcaklıklarda daha etkin çapraz bağ oluşumunu sağlamak amacıyla belirli oranlarda sisteme ilave edilmiştir. İmidazol hızlandırıcılar, özellikle anhidrit bazlı sertleştiricilerle birlikte kullanıldıklarında reaksiyonun aktivasyon enerjisini düşürerek kürlleme süresini kısaltmakta ve sürecin daha kontrollü bir şekilde ilerlemesine imkân tanımaktadır. Ayrıca düşük konsantrasyonlarda dahi etkili olmaları, reçine–sertleştirici sistemlerinin nihai mekanik ve termal performansının optimize edilmesine katkı sağlamaktadır [86]. İmidazol bazlı hızlandırıcıların temel fonksiyonları arasında; anhidrit–epoksi sistemlerinde kürlleme reaksiyon hızını artırmak, düşük sıcaklıklarda bile çapraz bağ oluşumunu desteklemek, nihai malzemenin mekanik dayanım ve termal stabilite özelliklerini geliştirmek, kürlleme sürecinde enerji tasarrufu sağlayarak üretim verimliliğini artırmak ve uzun raf ömrüne sahip reçine–sertleştirici karışımlarında bile etkinliğini korumak yer almaktadır. Hızlandırıcının sisteme doğru oranlarda ve homojen şekilde ilave edilmesi, özellikle çapraz bağ yoğunluğunu ve polimer ağının bütünlüğünü doğrudan etkilediğinden kritik öneme sahiptir. İmidazol katkılı sistemlerde, doğru proses parametrelerinin uygulanması hem laboratuvar ölçekli hem de endüstriyel uygulamalarda yüksek performanslı kompozit malzemelerin elde edilmesini sağlar. Bu tür sistemler, özellikle elektronik bileşenler, otomotiv parçaları ve yapısal kompozitlerde yaygın olarak tercih edilmektedir [87].

Tablo 4.5: Kullanılan hızlandırıcı özellikleri [123].

Özellik	Değer
Yoğunluk	0,95-1,0 g/cm ³
Viskozite	50-100 MPa.s
Yanma Noktası	>195°C

4.1.3. Katkı Malzemesi

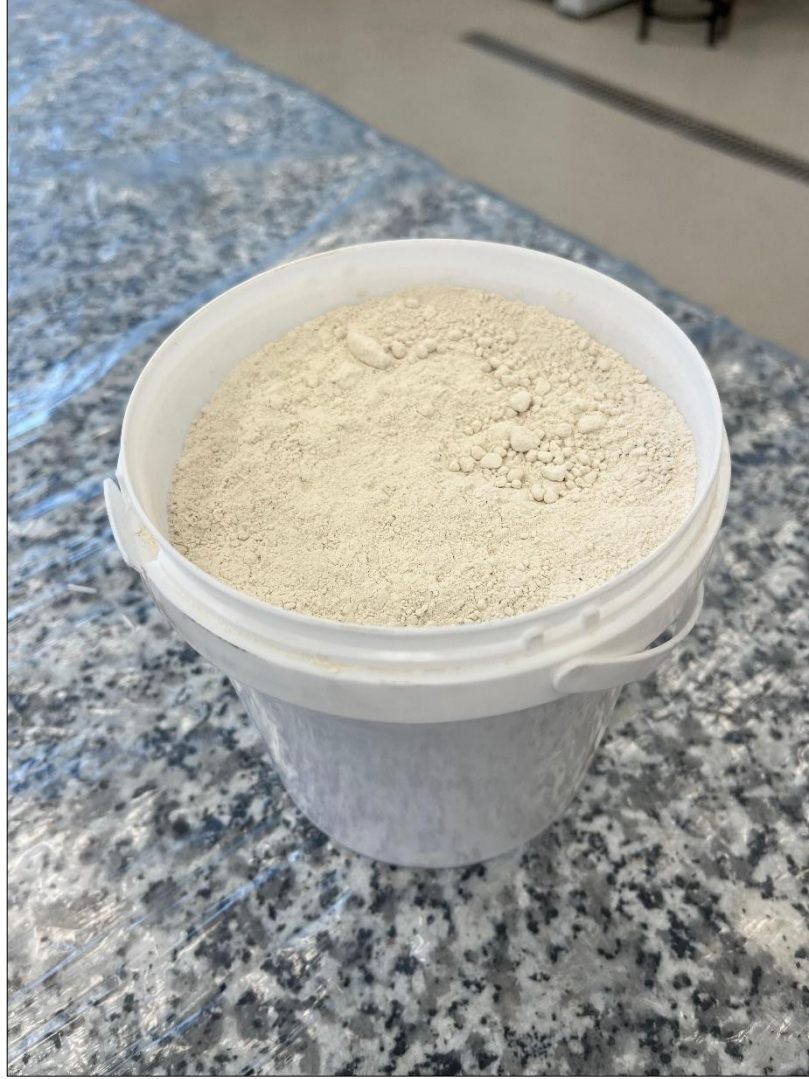
Epoksi matrisin mekanik ve fiziksel özelliklerini artırmak amacıyla organo kil katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Organo kil, yüzeyi modifiye edilmiş kil partiküllerinden oluşur ve epoksi içinde homojen şekilde dağılabilme kapasitesine sahiptir [60].



Şekil 4.6: Tepkimeye girmiş nanokilli matris malzemesi [113].

Bu katkıların kompozit malzeme üzerindeki etkileri çok yönlüdür. Öncelikle, mekanik dayanımı artırıcı etkisi sayesinde mikro çatlakların ilerlemesi engellenir ve bu durum hem çekme hem de eğilme dayanımının iyileştirilmesine katkı sağlar. Bunun yanı sıra, termal stabiliteyi artırarak malzemenin yüksek sıcaklıklarda dahi yapısal bütünlüğünü

korumasına imkân tanır. Son olarak, gaz ve nem bariyeri oluşturma özelliği ile malzemenin geçirgenliği azaltılır ve daha kompakt, dayanıklı bir yapı elde edilir. Bu özellikler, özellikle uzun süreli dayanım ve çevresel etkilere karşı direnç gerektiren uygulamalarda kompozitlerin performansını önemli ölçüde artırmaktadır. Organo kil, belirlenen oranlarda epoksi matris içine karıştırılarak homojen dağılımı sağlanmıştır.



Şekil 4.7: Kullanılan organo kil [113].

Tablo 4.6: Kullanılan nanokil özellikleri [124].

Özellik	Değer
Yoğunluk	1,7 g/cm ³
Viskozite	>1000 mPa.s
Form	Toz

4.2. Üretim Yöntemi

4.2.1. Vakum Torbalama Yöntemi

Vakum torbalama yöntemi, kompozit malzeme üretiminde el yatırma sonrası vakum basıncı ile fazla reçinenin dışarı alınarak boşluksuz ve homojen bir yapı elde edilmesini sağlayan bir tekniktir. Bu yöntemde kalıp yüzeyine yerleştirilen elyaf tabakaları, reçine emdirildikten sonra vakum torbası ile kapatılarak kontrollü bir şekilde sertleştirilir. Yöntem; düşük maliyet, iyi mekanik özellikler ve kaliteli yüzey elde edilmesi açısından özellikle otomotiv ve havacılık endüstrisinde tercih edilmektedir.

4.2.1.1. Üretim Süreci

Vakum torbalama yöntemiyle kompozit üretimi, dikkatli bir şekilde yönetilmesi gereken çok aşamalı bir süreçtir. Bu süreçte her bir adım, nihai ürünün kalitesini doğrudan etkileyen kritik bir rol oynamaktadır. Aşağıda her aşama detaylı bir şekilde açıklanmış olup, kullanılan ekipman ve malzemeler de bu aşamalarla ilişkilendirilmiştir [48].

4.2.1.1.1. Kalıp Hazırlığı

Vakum torbalama yöntemiyle kompozit üretiminde ilk adım, kalıp yüzeyinin hazırlanmasıdır. Kalıp, kompozitin yüzey kalitesini belirleyen kritik bir faktördür. Yüzeyin temiz, pürüzsüz ve tozsuz olması sağlanır. Kalıp yüzeyine, kompozit malzemenin kolay ayrılmasını sağlamak amacıyla kalıp ayırıcı (genellikle vaks ya da PVA bazlı ayırıcı) uygulanır. Bu uygulama, kalıp ile reçine arasında oluşabilecek yapışmayı engeller. Kalıp ayırıcı düzgün bir şekilde yüzeye yayıldıktan sonra, kuruması için belirli bir süre beklenir [48].

4.2.1.1.2. Takviye Malzemesinin Yerleştirilmesi

Keten elyaf gibi doğal lif takviyeler, kalıba manuel olarak yerleştirilir. Liflerin yönelimi, kompozitin nihai mekanik özelliklerini belirler. Bu nedenle, liflerin düzgün, kıvrımsız ve gerilimsiz bir şekilde yerleştirilmesine dikkat edilir.

Burada toplamda 8 kat keten elyaf kullanılmıştır. Her bir elyaf katmanı yerleştirilmeden önce, fırça yardımıyla yüzeye epoksi reçine karışımı (epoksi, sertleştirici ve hızlandırıcı) uygulanmıştır. Ardından bir sonraki elyaf katmanı serilir ve tekrar epoksi karışımı sürülmüştür. Bu işlem 8 kat tamamlanana kadar katman-katman tekrarlanmıştır. Son katman yerleştirildikten sonra kalan epoksi reçinesi fırça ile tüm yüzeye düzgünce yayılmıştır. Her katmanda, reçinenin tüm yüzeye homojen yayılması ve hava kabarcığı kalmaması sağlanmıştır. [48].

4.2.1.1.3. Reçine Uygulaması

Epoksi reçine ile sertleştirici, üretici firmanın önerdiği oranlarda (örneğin 100/90/1 – epoksi/sertleştirici/hızlandırıcı) karıştırılarak hazırlanır. Katmanlama esnasında her elyaf katmanı arasına fırça yardımıyla reçine uygulanır. Reçinenin tüm yüzeye nüfuz etmesi sağlanır. Uygulama sırasında liflerin kaymamasına özen gösterilir [48].

4.2.1.1.4. Yüzey Düzgünlüğünün Sağlanması

Her katman yerleştirme ve reçine uygulama aşamasında plastik spatula veya sıkma rulosu kullanılarak hava kabarcıkları giderilir. Bu işlem, kompozit içinde boşluk (void) oluşumunu önler. Tüm katmanlar yerleştirildikten ve son reçine uygulaması tamamlandıktan sonra, kompozit yüzeyine soyma kumaşı (peel ply) serilir. Soyma kumaşı, fazla reçinenin uzaklaştırılmasına ve yüzey düzgünlüğünün artırılmasına yardımcı olur [68].

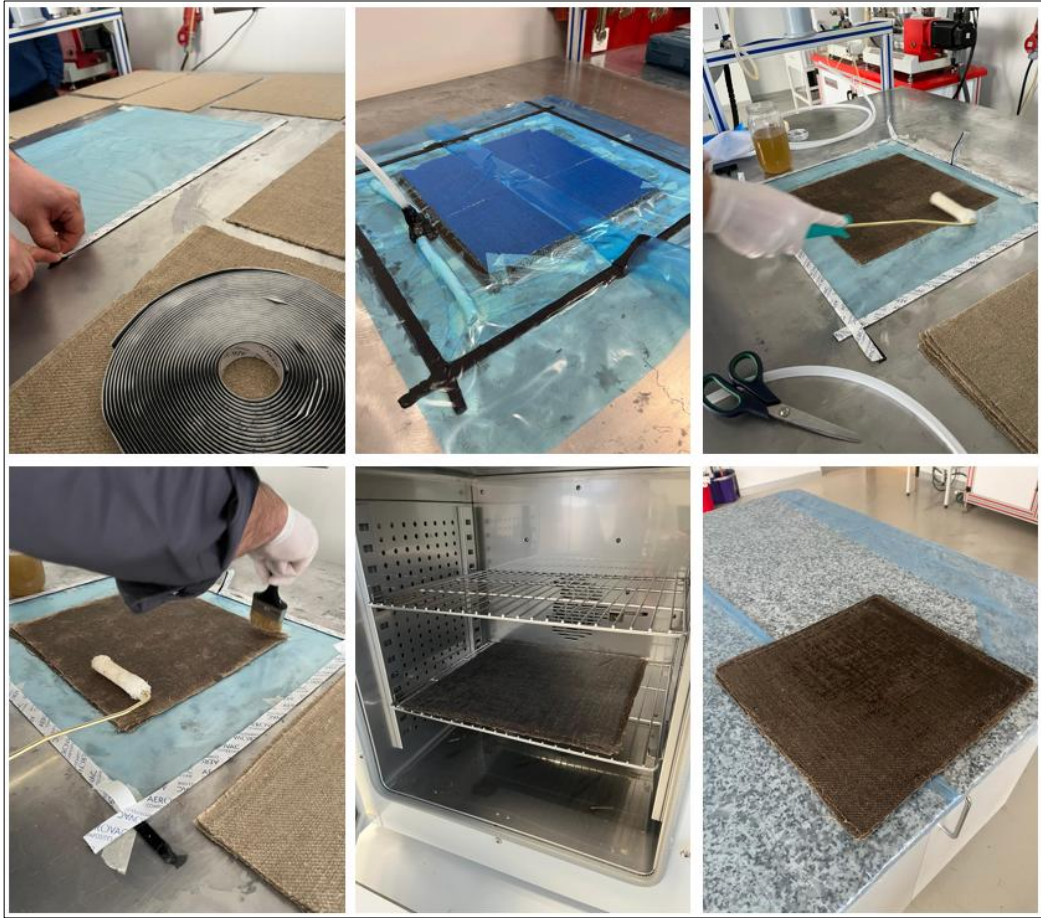
4.2.1.1.5. Vakum Torbası Uygulaması ve Vakumlama

Soyma kumaşı yerleştirildikten sonra, tüm yapıyı kapsayacak şekilde vakum torbası dikkatlice örtülür. Vakum torbasının kenarları, kalıp çevresine önceden yerleştirilmiş vakum sızdırmazlık bandı ile sızdırmaz şekilde mühürlenir. Bu mühürleme, sistemin hava geçirmezliğini sağlar [48].

Vakum pompası devreye alınarak sistemdeki hava boşaltılır ve negatif basınç oluşturulur. Vakumlama işlemi sayesinde, lifler sıkıştırılarak daha kompakt ve homojen bir yapı elde edilir. Fazla reçine dışarı atılır. Kompozit yapıda hava boşlukları en aza indirilir. Reçinenin lifler arasında daha etkin yayılması sağlanır. Bu adım, kompozit malzemenin hem mekanik hem de yüzey kalitesini önemli ölçüde artırır [48].

4.2.1.1.6. Kürlenme Süreci

Vakum altında kalan yapı, reçinenin k rlenmesi için belirli bir süre bu pozisyonda bekletilir. K rleme süresi, kullanılan epoksi reçine sistemine bağlı olarak ortam sıcaklığında (24–48 saat) ya da sıcaklık kontrollü bir ortamda (90–120  C'de 5–8 saat) gerçekleştirilebilir. Sıcak k rleme işlemi, epoksinin çapraz ba  yapısını hızlandırarak kompozit malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirir. K rleme tamamlandıktan sonra, vakum torbası ve yardımcı katmanlar s k l r, kompozit malzeme kalıptan dikkatlice çıkarılır ve son işlem aşamalarına geçilir [48].



Şekil 4.8: Vakum torbalama yöntemi [113].

4.3. Üretilen Numuneler

Bu  alı ma kapsamında, üç farklı kompozit numune grubu üretilmiştir. İlk grup, katkısız epoksi reçine ve sertleştirici kullanılarak hazırlanmıştır. İkinci grup numuneler, epoksi matrisine %1 oranında nanokil katkısı eklenerek üretilmiştir.

Üçüncü grup ise %2 oranında nanokil katkılı epoksi kompozitlerden oluşmaktadır. Tüm numuneler, belirlenen karışım oranları ve homojenizasyon yöntemleri doğrultusunda hazırlanmış, ardından uygun kalıplama ve kütleme işlemlerine tabi tutulmuştur.



Şekil 4.9: Katkısız numune [113].



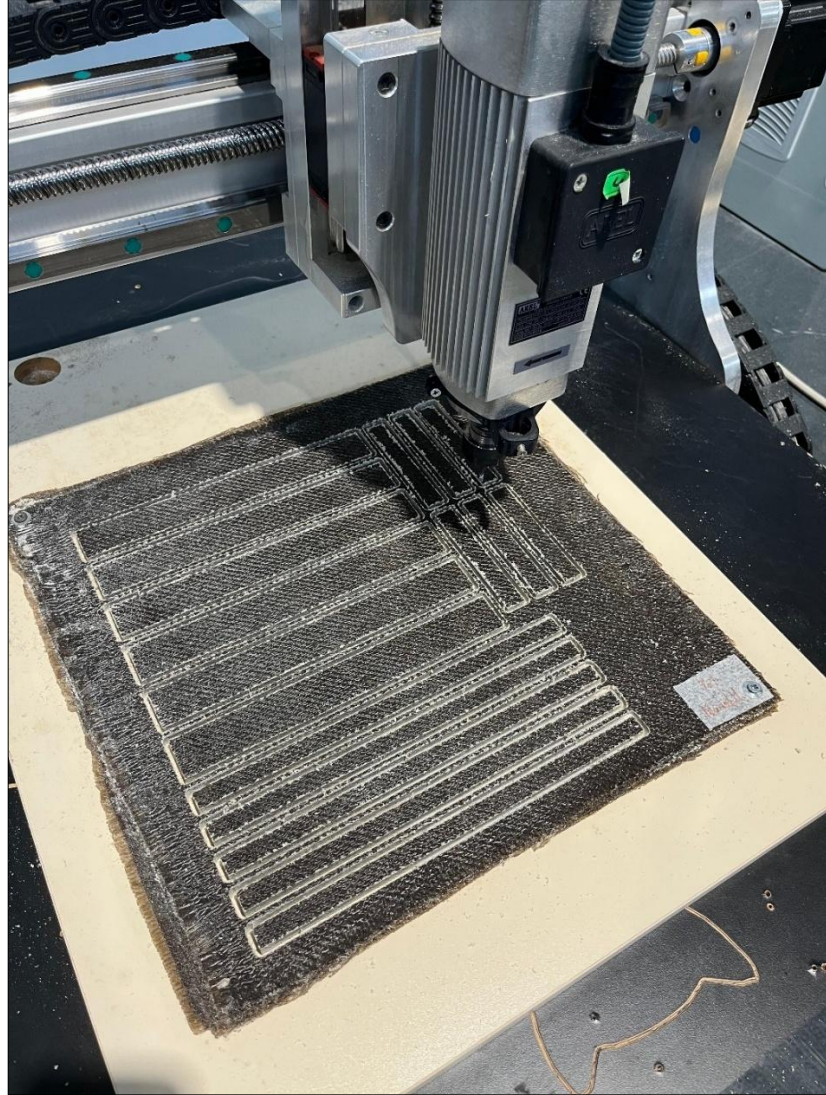
Şekil 4.10: %1 nanokil katkılı numune [113].



Şekil 4.11: %2 nanokil katkılı numune [113].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, doğal elyaf takviyeli ve organo kil katkılı kompozit malzemelerin statik, dinamik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi amacıyla çeşitli deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Kompozit numuneler, keten elyaf takviyeli epoksi matrisli yapıda olup, katkısız, %1 ve %2 oranlarında organo kil katkısı ile üç farklı grup halinde üretilmiştir. Üretim sürecinde vakum infüzyon yöntemi ve vakum torbalama yöntemi kullanılarak, mümkün olduğunca homojen dağılımlı ve gözeneksiz numuneler elde edilmiştir. Her bir grup için belirlenen standartlara uygun sayıda numune üretilmiş ve test edilmiştir.



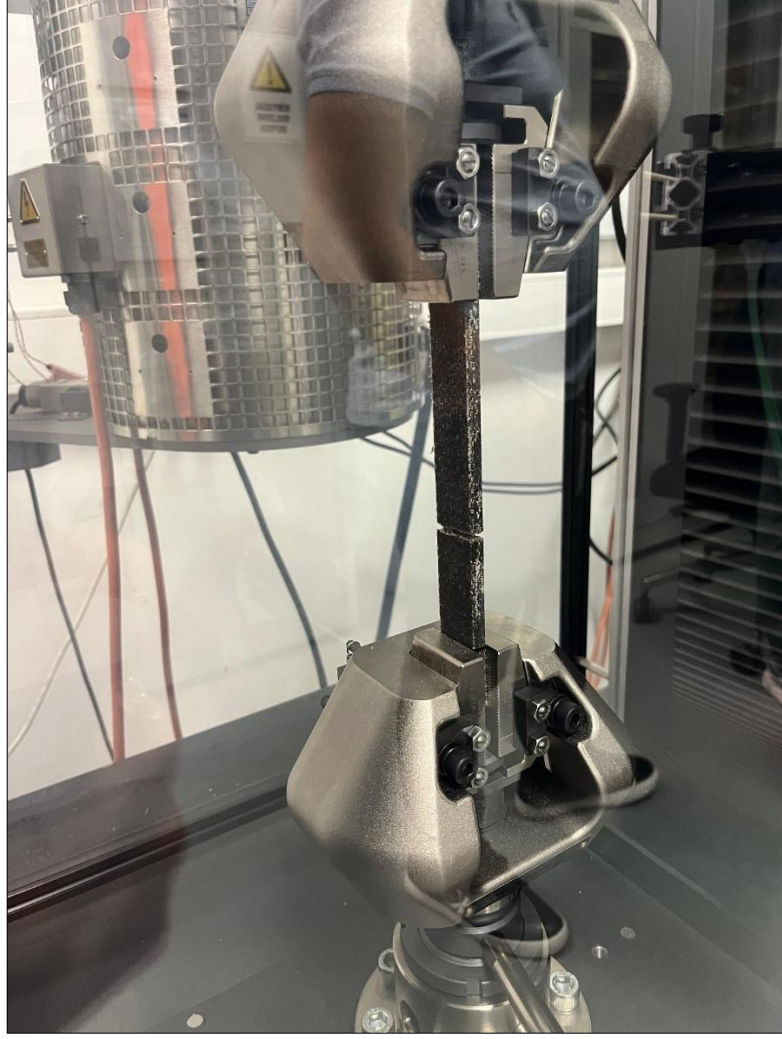
Şekil 5.1: Numune kesim çalışması [113].

5.1. Çekme Testi

Kompozit numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler, numunelerin elastik modülü, maksimum çekme gerilmesi ve kopma uzaması gibi karakteristiklerinin değerlendirilmesini sağlamıştır. Deneyler, ASTM D3039 standardına uygun olarak yürütülmüştür. Testler, bilgisayar kontrollü bir çekme test cihazında gerçekleştirilmiş, yük ve uzama değerleri dijital ortamda kaydedilmiştir. Numuneler, sabit bir çekme hızıyla teste tabi tutulmuş ve deney boyunca deformasyon davranışları gözlemlenmiştir. Her bir katkı grubundan 6 adet numune test edilmiş ve elde edilen veriler istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Test sonucunda maksimum çekme dayanımı (σ_{maks}), elastisite modülü (E) ve kırılma uzaması (ϵ_f) değerleri hesaplanmıştır.



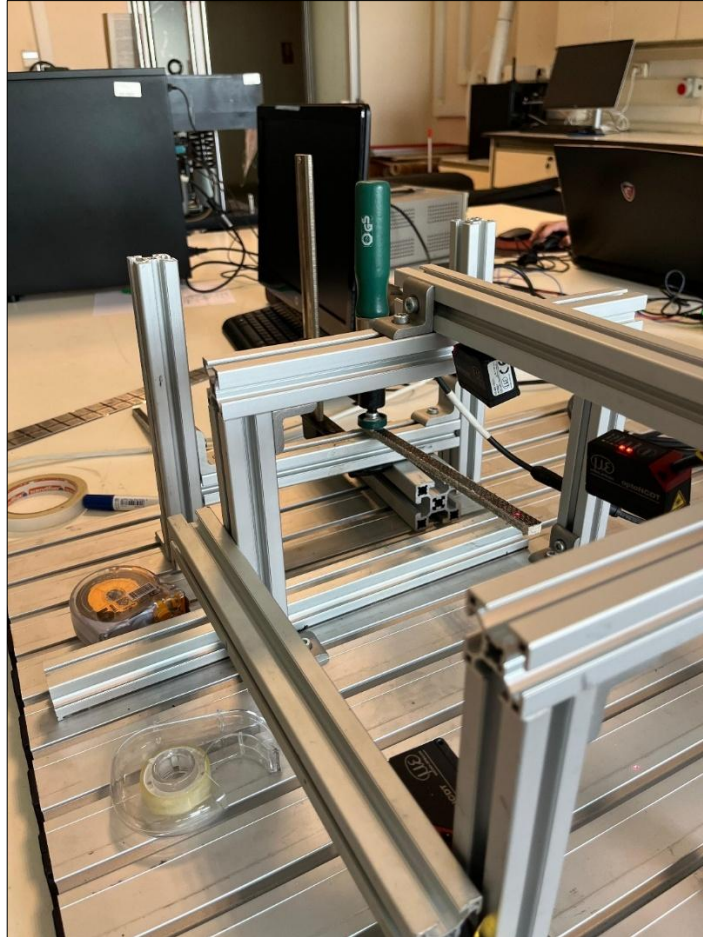
Şekil 5.2: Çekme test cihazı [117].



Şekil 5.3: Çekme testi [113].

5.2. Titreşim Testi

Bu çalışmada, doğal lif takviyeli kompozit numunelere farklı oranlarda organokil katkısı yapılarak, bu katkının yapının titreşim davranışı üzerindeki etkisi serbest titreşim testi aracılığıyla incelenmiştir. Her grup 6 adet numune test edilmiştir. Numuneler, bir ucu mengene ile sıkıca tespit edilmiş tek taraflı ankastre kırış şeklinde konumlandırılmış, serbest kalan uca darbe uygulanarak yapının birinci mod serbest salınımı kaydedilmiştir. Titreşim verileri temassız lazer sensör aracılığıyla bilgisayara aktarılmış, Fourier analiziyle doğal frekans belirlenmiş ve salınım genliklerinden logaritmik dekrement (log decrement, λ) yoluyla sönümleme oranı (ζ) hesaplanmıştır. Deneyler, ASTM E756 standardına uygun olarak yürütölmüştür.



şekil 5.4: Titreşim test cihazı [119].

5.3. Üç Nokta Eğme Testi

Bu çalışmada, kompozit numunelerin eğilmedeki elastisite modülü eğilme dayanımını ve elastik davranışlarını belirlemek amacıyla üç nokta eğilme testleri uygulanmıştır. Her bir numune grubu için 5 adet numune test edilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen başlıca mekanik parametreler; elastisite modülü (E_f), maksimum eğilme gerilmesi (σ_{fM}), kırılma gerilmesi (σ_{fB}), maksimum şekil değiştirme (ϵ_{fM}) ve kırılma şekil değiştirmesi (ϵ_{fB}) olarak tanımlanmıştır. Deneyler, ASTM D7264 standardına uygun olarak yürütülmüştür. Zwick Z010 makinesi ile ölçümler yapılmıştır.



Şekil 5.5: Üç nokta eğme test cihazı [113].

Test sırasında, eğilme düzeneğinde numunelerin orta noktasına yük uygulanmış ve destekler arasında oluşturulan açıklık boyunca oluşan deformasyon değerleri kaydedilmiştir. Eğilme davranışı, yük-şekil değiştirme eğrileri üzerinden değerlendirilmiş ve elastisite modülü, eğrinin lineer bölgesinden hesaplanmıştır. Maksimum yük altında numunenin kırılması ile kırılma gerilmesi ve şekil değiştirme değerleri belirlenmiştir. Test süresince numunelerde herhangi bir akma davranışı gözlemlenmemiştir. Bu durum, kırılma gerilmesinin genellikle maksimum eğilme gerilmesi ile çakıştığını göstermektedir.



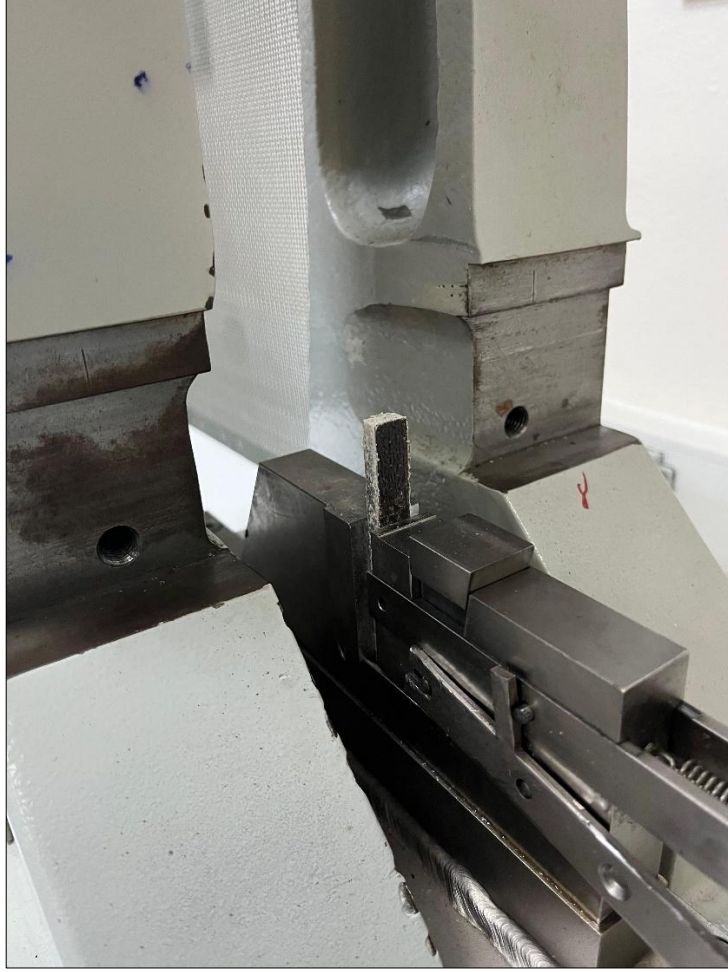
Şekil 5.6: Üç nokta eğme testi [113].

5.4. Darbe Dayanım Testi

Kompozit malzemelerin ani yüklere karşı gösterdiği direnci belirlemek amacıyla darbe dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde, her bir grup için 6 adet numune **test** edilmiştir. Darbe testleri çentiksiz Charpy darbe düzeneği kullanılarak uygulanmıştır. Test sırasında her numune, sabit açıklığa sahip destekler arasına yatay konumda yerleştirilmiş ve belirli potansiyele sahip sarkaç darbesine maruz bırakılmıştır. Sarkaç darbesi sonucu kırılma meydana geldiğinde, kırılma için absorbe edilen enerji değeri (joule cinsinden) test cihazı tarafından otomatik olarak ölçülmüştür. Bu enerji, kompozit malzemenin darbe dayanımı olarak değerlendirilmiştir. Darbe testi sonuçları, katkı oranlarının malzemenin kırılma enerjisi üzerindeki etkisini ortaya koymak üzere ortalama ve standart sapmalarla birlikte değerlendirilmiştir. Numunelerde meydana gelen kırılma şekli ve yüzey morfolojisi de gözlemlenmiş, bazı numunelerde lif-matris ara yüzey ayrılmaları dikkat çekmiştir. Deneyler, ASTM D6110-18 standardına uygun olarak yürütülmüştür. Zwick marka makine ile ölçümler yapılmış olup 5,4 joule darbe enerjisine sahip çekiç kullanılmıştır.



Şekil 5.7: Darbe dayanım test cihazı [113].



Şekil 5.8: Darbe dayanım testi [113].

5.5. Sertlik Testi

Kompozit malzemelerin yüzey mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla Shore D ölçeğinde sertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Testler, ASTM D2240 standardı esas alınarak uygulanmıştır. Zwick marka makine ile ölçümler yapılmıştır. Her bir grup için 10 farklı noktadan ölçüm alınmış ve elde edilen değerlerin ortalaması ile standart sapması hesaplanmıştır. Shore D sertlik testi sırasında, belirli kuvvet ve temas süresine sahip sertlik ölçüm cihazı, numune yüzeyine dik olarak uygulanmış ve yüzeyin penetrasyon direnci değerlendirilmiştir. Ölçümler, aynı yüzey üzerinde homojen şekilde dağılmış noktalardan alınarak yerel varyasyonların etkisi minimize edilmiştir. Elde edilen sertlik değerleri, katkı oranlarının yüzey dayanımı üzerindeki etkisini değerlendirmek üzere karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Sertlik sonuçları, lif-matris etkileşimi ve dolgu malzemesinin yüzey bütünlüğüne etkisi açısından değerlendirilmiş ve katkı oranındaki değişimin Shore D sertlik değerlerine yansımaları gözlemlenmiştir.



Şekil 5.9: Sertlik test cihazı [113].

5.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Kompozitlerin çekme testi sonucunda kırılan yüzeylerinin mikro yapıları ve hata modları Taramalı Elektron Mikroskobu FEI (PHILIPS) XL30 SFEG ile gözlemlenmiştir. Gözlemden önce yüzeyler altın ile kaplanmıştır. Görüntüleme maksimum 5 kV çalışma aralığında gerçekleştirilmiş ve yüzey mikrografları artan büyütmelerde ve 5 μm ile 500 μm arasındaki ölçeklerde çekilmiştir.



Şekil 5.10: FEI (PHILIPS) XL30 SFEG taramalı elektron mikroskobu [113].

6. MALİYET DEĞERLENDİRMESİ

6.1. Malzeme Maliyetlerinin Karşılaştırılması

Doğal elyafların en önemli avantajlarından biri, sentetik elyaflara kıyasla daha düşük hammadde maliyeti potansiyelidir. Literatürde keten gibi doğal liflerin fiyat aralığı 0,5–1,5 USD/kg olarak rapor edilirken, E-cam elyafın fiyatı 1,6–3,3 USD/kg seviyesindedir [129]. Bu durum, doğal elyafların ilk bakışta daha ekonomik olduğunu göstermektedir. Ancak, lif türü, saflık derecesi ve işlenme biçimine bağlı olarak maliyetlerde büyük değişkenlik vardır. Örneğin, yüksek kaliteli keten liflerinin kilogram maliyeti 2,1–4,2 USD düzeyine kadar çıkabilmekte ve bazı durumlarda cam elyafın maliyetini aşabilmektedir [126]. Buna karşın, coir veya kenaf gibi bazı doğal lifler ton başına 200–500 USD gibi daha düşük fiyatlara temin edilebilmektedir [129].

Epoksi reçine her iki sistemde de ortak matris malzemesi olduğundan, maliyet farkı esasen takviye elyaf kaynaklıdır. Bununla birlikte, keten elyafli sistemlerde kullanılan organokil katkılarının maliyet üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Montmorillonit esaslı organokillerin piyasa fiyatı 0,04–0,12 USD/kg olup, genellikle %1–5 oranında kullanıldığından kompozit maliyetine ciddi bir yük getirmemektedir. Dolayısıyla maliyet farklılığının belirleyici unsuru hammadde fiyatı ve doğal liflerin işlenmesi için gerekli ek adımlardır [134].

6.2. Enerji Tüketimi Açısından Karşılaştırma

Cam elyaf, onlarca yıldır oturmuş üretim teknikleriyle (ör. pultrüzyon, infüzyon, kalıplama) işlenebilirken, doğal elyaflarda nem kontrolü ve yüzey işlemleri zorunlu hale gelmektedir. Elyafların kurutulması, alkali veya silan bazlı yüzey modifikasyonları gibi adımlar, işçilik ve enerji maliyetini artırmaktadır. Bu nedenle keten elyafı, ham hammadde fiyatı açısından ucuz olsa da kompozit üretiminde ek maliyetler gerektirmektedir [126], [132].

Enerji tüketimi açısından bakıldığında doğal elyaflar bariz bir avantaj sunmaktadır. E-cam elyaf üretimi sırasında hammaddenin yüksek sıcaklıklarda ergitilmesi yaklaşık 50–55 MJ/kg enerji tüketimine neden olurken, keten elyaf üretimi tarımsal ve mekanik yöntemlerle yalnızca 9–11 MJ/kg enerji harcamaktadır [131]. Bu fark, doğal liflerin

Üretim aşamasında yaklaşık %80 enerji tasarrufu sağladığını göstermektedir. Bu durum yalnızca maliyet avantajı yaratmakla kalmaz, aynı zamanda çevresel etkiyi de azaltır. Ayrıca doğal elyaflar, cam elyaf kadar aşındırıcı olmadığından üretim ekipmanlarının ömrünü uzatır ve bakım maliyetlerini düşürür. İç güvenliği açısından da doğal elyaf tozlarının daha az tahriş edici olması önemli bir avantajdır [125], [132].

6.3. Çevresel Etki ve Ekonomi Açısından Değerlendirme

Doğal elyaf takviyeli kompozitler çevresel açıdan güçlü bir profil sergilemektedir. Keten, kenevir ve jt gibi lifler yenilenebilir kaynaklardan elde edilmekte ve büyüme süreçlerinde karbon tutmaktadır. Bir yaşam döngüsü değerlendirmesinde keten elyaflı bir tekne gövdesinin, cam elyaflı muadilinden %14 daha düşük karbon ayak izine ve yaklaşık %20 daha düşük toplam çevresel etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle fosil enerji tüketimi, sera gazı emisyonu ve mineral kaynak kullanımı açısından doğal elyaflı sistemler daha avantajlıdır [131].

Bunun başlıca nedeni, keten elyafının düşük enerjiyle retilbilmesi ve biyolojik karbon döngüsüne entegre olabilmesidir. Doğal liflerin karbon ayak izi kg başına 0,3–0,5 kg CO₂ düzeyinde olup, cam elyafa kıyasla çok daha düşüktür [133]. Buna karşın, keten tarımında kullanılan gübre ve pestisitler kara ekosistemi toksisitesi açısından olumsuzluk yaratabilmektedir. Ancak organik tarım uygulamalarıyla bu etki azaltılabilmektedir [131].

Atık yönetimi boyutunda da doğal elyaf kompozitler görece avantajlıdır. Cam elyaflı kompozitler yakıldığında inert atık olarak kalırken, keten elyafı biyokütle olarak enerji geri kazanımı sağlayabilmektedir [125]. Ayrıca uygun matris seçimiyle (r. biyobozunur epoksiler) tamamen doğada çözünebilen kompozitler tasarlanması da mümkündür. Bu nedenle doğal elyaflı kompozitlerin döngüsel ekonomi açısından katkısı daha yüksektir [133].

7. TEST SONUÇLARI VE BULGULAR

7.1. Çekme Testi Sonuçları

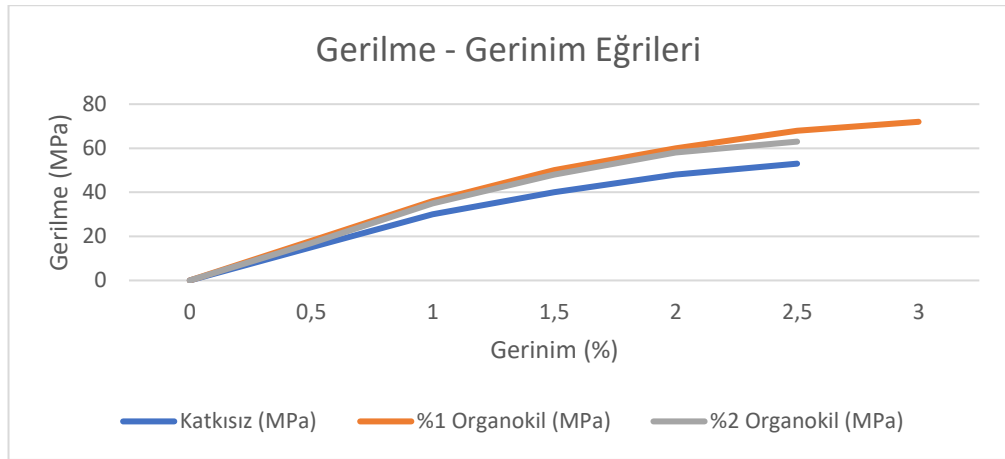
Bu bölümde katkısız, %1 ve %2 organokil katkılı keten elyaf takviyeli epoksi kompozit numuneler üzerinde gerçekleştirilen çekme testi sonuçları analiz edilmiştir. Her bir grup için 5 adet numune test edilmiş olup, değerlendirme maksimum çekme gerilmesi (R_m) ve maksimum uzama (Elongation %) parametrelerine dayanmaktadır.

Katkısız numunelerde ortalama maksimum çekme gerilmesi (R_m) 53,81 MPa olarak belirlenmiştir. %1 organokil katkısı ile bu değer 70,01 MPa'ye ulaşmış ve katkısız gruba göre yaklaşık %30,1'lik bir artış sağlanmıştır. %2 katkı grubunda ise ortalama çekme gerilmesi 65,02 MPa olup, katkısız numunelere kıyasla %20,8 oranında bir artış meydana gelmiştir. Bu bulgular, organokil katkısının kompozit malzemenin çekme dayanımını artırdığını göstermektedir. Ancak, en yüksek dayanım artışı %1 katkı oranında elde edilmiş olup, %2 katkıda bu artışın bir miktar azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, daha yüksek katkı oranlarında topraklaşma riskinin arttığını ve malzeme yapısında homojenliğin bozulabileceğini düşündürmektedir.

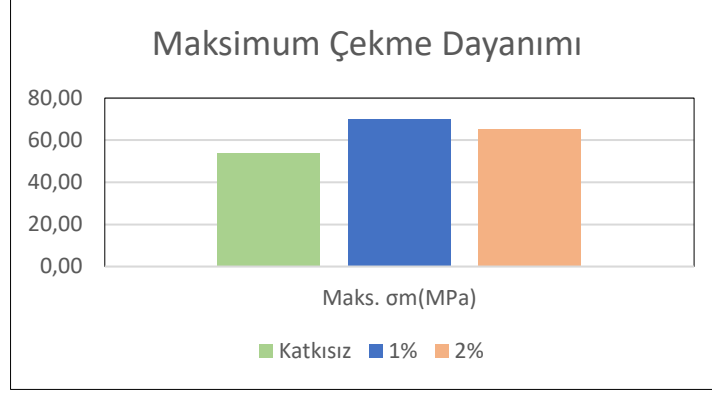
Maksimum uzama (Elongation %) değerleri açısından değerlendirildiğinde ise katkısız numunelerde ortalama %2,74'lük bir uzama elde edilmiştir. %1 organokil katkısı ile bu değer %3,18'e ulaşmış ve yaklaşık %16,1'lik bir artış sağlanmıştır. Bu artış, %1 katkının kompozite süneklik kazandırdığını ve elastik deformasyon kapasitesini artırdığını ortaya koymaktadır. Ancak %2 katkılı numunelerde uzama değeri %2,80 ile katkısız gruba oldukça yakın olup, süneklik artışı sınırlı kalmıştır. %1 organokil katkısı ile hem çekme dayanımı hem de süneklik anlamlı şekilde artırılmış, dolayısıyla mekanik performans bakımından en verimli katkı oranı olduğu ortaya konmuştur. %2 katkı ise dayanımda katkısız gruba göre artış sağlasa da süneklik açısından sınırlı bir iyileşme sunmuştur. Bu nedenle, %1 katkı oranı mühendislik uygulamaları açısından optimum katkı düzeyi olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 7.1: Numune grupları çekme testi sonuçları.

Numune		Maksimum Rm (MPa)	Uzama %
Katkısız	1	51,3797	2,2909
	2	54,9616	2,66386
	3	54,0723	3,02421
	4	54,1373	3,06935
	5	54,5236	2,6633
1%	1	68,3434	3,15253
	2	73,0243	3,21700
	3	71,7141	3,13068
	4	68,0103	3,13271
	5	68,9371	3,27454
2%	1	67,7541	2,99384
	2	65,5269	2,75911
	3	64,6053	2,84203
	4	67,1532	2,90689
	5	60,0796	2,51124

**Şekil 7.1:** Çekme testi ortalama sonuçların gerilim-gerinim grafiği.**Tablo 7.2:** Çekme testi sonuçları ortalama değerleri.

Ortalama Sonuçları			Standart Sapma	
	Maks. σ_m (MPa)	Uzama %	Standart Sapma Maks. σ_m (MPa)	Standart Sapma Uzama (%)
Katkısız	53,81	2,74	1,4069	0,3213
1%	70,01	3,18	2,1393	0,6894
2%	65,02	2,80	3,0357	0,1785



Şekil 7.2: Maksimum çekme dayanımı.

7.2. Titreşim Testi Sonuçları

Bu çalışmada, katkı oranlarının kompozit yapıların dinamik mekanik davranışlarına etkisini belirlemek amacıyla serbest titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda her bir numune grubuna ait birinci mod doğal frekans ve sönümlleme oranı (ζ) değerleri elde edilmiştir. Bu veriler, katkı oranlarının hem yapı rijitliği hem de titreşim enerjisini sönümlleme kapasitesi üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir. Sonuçlar MATLAB üzerinden görüntülenmiştir.

Testlerde, katkısız, %1 ve %2 organokil katkılı olmak üzere üç farklı grup incelenmiştir. Her grup için beşer adet numune hazırlanmış ve numuneler bir ucu ankastre, serbest uçlu kiriş şeklinde test düzeneğine yerleştirilmiştir. Serbest kalan uçlara ani darbe uygulanarak yapılar serbest titreşime geçirilmiştir. Titreşim sırasında serbest uç hareketi temassız lazer sensör yardımıyla ölçülmüş; zamana bağlı titreşim verileri FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) yöntemiyle analiz edilerek birinci mod doğal frekans değerleri belirlenmiştir. Ayrıca, logaritmik dekrement yöntemi kullanılarak her bir numuneye ait sönümlleme oranı (ζ) hesaplanmıştır.

Doğal frekans sonuçları değerlendirildiğinde, katkı oranının artmasıyla birlikte kompozit yapının rijitliğinde anlamlı bir artış gözlemlenmiştir. Katkısız numunelerin ortalama doğal frekansı yaklaşık 51.5 Hz. iken, %1 organokil katkılı numunelerde bu değer 60.8 Hz'ye yükselmiş, bu da yaklaşık %18 oranında bir artışa karşılık gelmiştir. %2 katkı oranında ise doğal frekans 60.4 Hz. olarak ölçülmüş ve katkısız numunelere göre yaklaşık %17,3 oranında artış sağlanmıştır. Bu artışlar, katkı maddesinin matrise sağladığı takviye etkisiyle elastik eğilme rijitliğini artırmasına bağlanmaktadır. Ancak %1 ve %2 katkı oranları arasında doğal frekans bakımından anlamlı bir fark

oluşmamıştır. Dolayısıyla %2 organo kil ilavesi doğal frekansa çok fazla etki etmemiştir.

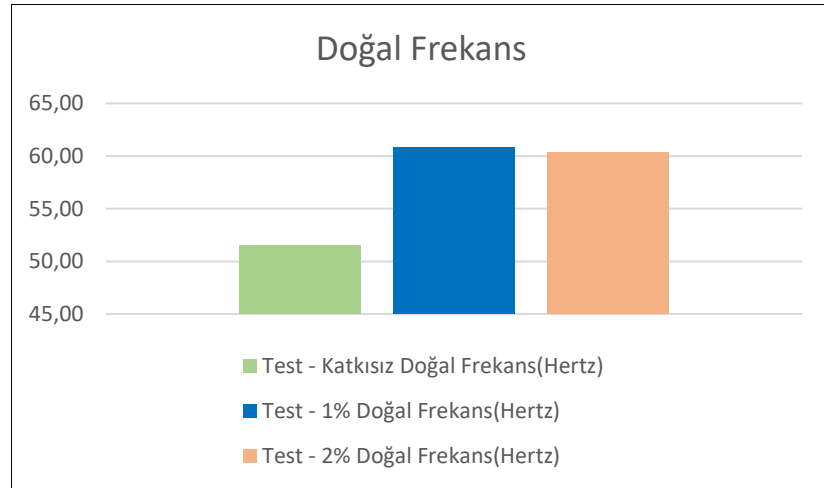
Sönümlleme oranı (ζ) açısından değerlendirildiğinde, katkı oranındaki artışın sönümlleme kapasitesi üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Katkısız numunelerde sönümlleme oranı ortalama 0.01005 iken, %1 organokil katkılı grupta bu değer 0.01441 olarak hesaplanmış ve bu da yaklaşık %43,4 oranında bir artış anlamına gelmiştir. En yüksek sönümlleme ise %2 katkılı numunelerde ölçülmüş olup ortalama ζ değeri 0.03826'ya ulaşmış; bu da katkısız numuneye göre yaklaşık %280,7 oranında bir artışa karşılık gelmektedir. Bu veriler, katkı oranı arttıkça yapı içerisindeki iç sürtünmenin, ara yüzey etkileşimlerinin ve enerji dağılım mekanizmalarının daha etkin hale geldiğini göstermektedir.

Sönümlleme davranışındaki bu artış, literatürde de sıkça vurgulanan mikromekanik enerji yayılım mekanizmaları ile uyumludur. Organokil gibi nano boyutlu katkı maddeleri, matris içerisinde dağıldıklarında, parçacık-matris ara yüzeylerinde sürtünme ve kayma oluşturarak iç sönümlleme kapasitesini artırır. Özellikle %2 katkı oranında gözlemlenen yüksek damping oranı, bu mekanizmaların yoğunlaştığını ve katkı maddesinin titreşim enerjisini daha etkin biçimde absorbe ettiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, serbest titreşim testi verileri katkı oranının hem elastik özellikler hem de dinamik sönümlleme davranışı üzerinde anlamlı etkilere sahip olduğunu ortaya koymuştur. Doğal frekans değerleri, yapının rijitliğini artırmak için katkı kullanımının etkili olduğunu; sönümlleme oranları ise titreşim enerjisinin dağılımı açısından katkının ilave avantajlar sağladığını göstermektedir. Özellikle %2 katkı oranı, sönümlleme oranı açısından en yüksek performansı sunmuş; bu da söz konusu kompozitin titreşim azaltımı ve gürültü kontrolü gibi uygulamalarda avantaj sağlayabileceğini göstermektedir.

Tablo 7.3: Numune grupları doğal frekans değerleri.

Numune	Test- Katkısız		Test- 1%		Test- 2%	
	Doğal Frekans (Hertz)	Genlik(m)	Doğal Frekans (Hertz)	Genlik(m)	Doğal Frekans (Hertz)	Genlik(m)
1	52,37	$1,01 \times 10^{-5}$	59,81	$1,66 \times 10^{-5}$	58,74	$1,62 \times 10^{-5}$
2	53,41	$1,19 \times 10^{-5}$	59,24	$5,75 \times 10^{-5}$	59,34	$7,07 \times 10^{-5}$
3	50,61	$5,43 \times 10^{-5}$	60,04	$2,27 \times 10^{-5}$	61,67	$5,35 \times 10^{-5}$
4	51,94	$5,69 \times 10^{-5}$	62,14	$1,39 \times 10^{-5}$	59,14	$4,99 \times 10^{-5}$
5	49,31	$2,50 \times 10^{-5}$	62,77	$2,11 \times 10^{-5}$	62,94	$1,84 \times 10^{-5}$
Ortalama	51,53		60,8		60,37	
Std. Sapma	1,59		1,55		1,84	

**Şekil 7.3:** Titreşim testi ortalama doğal frekans sonuçların grafiği.**Tablo 7.4:** Katkısız numune sönümlleme oranı sonuçları.

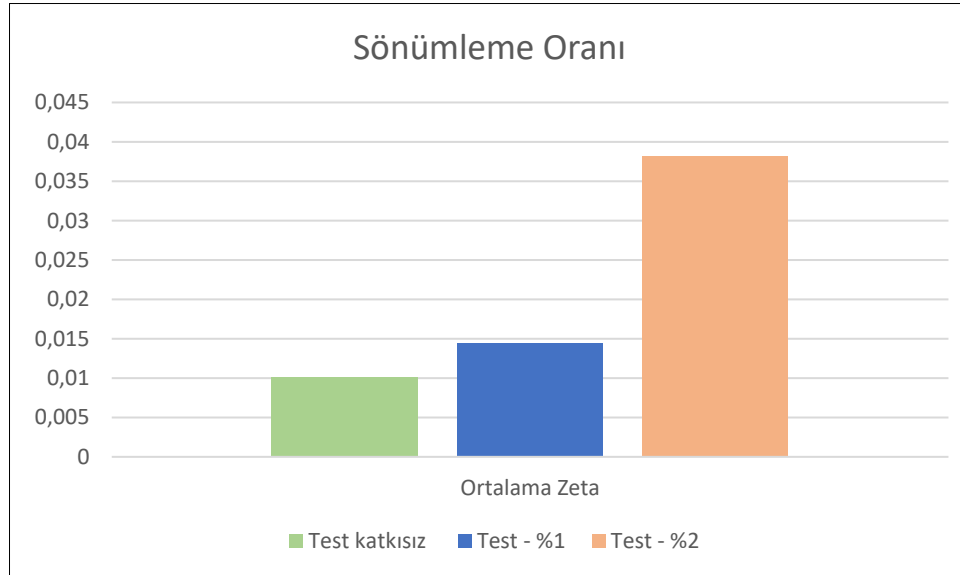
Numune	Test- Katkısız						
	X_1	X_{1+1}	Ort.	X_{1_r}	X_{1+1_r}	Lambda(λ)	Zeta(ζ)
1	797	793	752,5	44,50	40,50	0,09	0,014996
2	213	210	156	57,00	54,00	0,05	0,008609
3	232	229	132	100,00	97,00	0,03	0,004850
4	980	978	960	20,00	18,00	0,11	0,016775
5	299	297	237	62,00	60,00	0,03	0,005221
Ortalama							0,010090
Std. Sapma							0,005

Tablo 7.5: %1 organo kil katkılı numune sönümleme oranı sonuçları.

Numune	Test- %1						
	X_1	X_{1+1}	Ort.	$X_1 r$	$X_{1+1} r$	Lambda(λ)	Zeta(ζ)
1	516	508	425	91,00	83,00	0,09	0,014651
2	469	461	404	65,00	57,00	0,13	0,020909
3	304	302	262	42,00	40,00	0,05	0,007769
4	791	789	773	18,00	16,00	0,12	0,018752
5	582	580	549	33,00	31,00	0,06	0,009955
Ortalama							0,014407
Std. Sapma							0.005

Tablo 7.6: %2 organo kil katkılı numune sönümleme oranı sonuçları.

Numune	Test- %2						
	X_1	X_{1+1}	Ort.	$X_1 r$	$X_{1+1} r$	Lambda(λ)	Zeta(ζ)
1	937	933	908	29,00	25,00	0,15	0,023627
2	127	122	110	17,00	12,00	0,35	0,055378
3	989	987	981	8,00	6,00	0,29	0,045761
4	831	826	810	21,00	16,00	0,27	0,043261
5	142	140	127	15,00	13,00	0,14	0,022781
Ortalama							0,038162
Std. Sapma							0.014

**Şekil 7.4:** Titreşim testi ortalama sönümleme oranı sonuçlarının grafiği.

7.3. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

Bu çalışmada, kompozit numunelerin eğilme davranışlarını değerlendirmek amacıyla üç nokta eğilme testleri uygulanmıştır. Her bir numune grubu için elastik modül (E_f), maksimum eğilme gerilmesi (σ_{fM}), kopma gerilmesi (σ_{fB}), maksimum şekil değiştirme (ϵ_{fM}) ve kırılma şekil değiştirmesi (ϵ_{fB}) parametreleri hesaplanmıştır. Test sonuçları katkı oranlarına göre karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Elastisite modülü açısından değerlendirildiğinde, katkısız numunelerde ortalama değer 3458 MPa olarak ölçülmüşken, %1 organokil katkısıyla bu değer 5958 MPa'a yükselmiştir; bu yaklaşık %72'lik bir artışa karşılık gelmektedir. %2 katkı oranında ise elastik modül 5268 MPa olarak elde edilmiştir; bu da katkısız yapıya kıyasla hâlâ %52 oranında daha yüksek bir rijitlik göstermektedir. Bu bulgular, düşük oranlı organokil katkısının yapısal mukavemeti anlamlı biçimde artırdığını, ancak katkı miktarının artmasıyla birlikte elastikiyet kazancında doygunluk ve kısmi düşüş yaşanabileceğini göstermektedir. Bu durum, yüksek katkı oranlarında matris içerisinde homojen dağılmayan parçacıkların topraklaşma eğilimiyle birlikte, üretim sürecinde organokilin epoksi matris içine rulo yardımıyla dağıtılması esnasında homojen bir dağılımın tam olarak sağlanamamasından kaynaklı yerel yoğunluk farklarının da yük aktarımını olumsuz etkileyebileceğini düşündürmektedir.

Maksimum eğilme gerilmesi (σ_{fM}) bakımından katkısız numuneler ortalama 63,3 MPa seviyesindeyken, %1 organokil katkısıyla bu değer 93,8 MPa'a çıkmış ve yaklaşık %48 oranında bir iyileşme sağlanmıştır. %2 katkı grubunda ise ortalama eğilme dayanımı 77,0 MPa olarak belirlenmiştir; bu da katkısız gruba göre %22 artış, ancak %1 katkıya göre belirgin bir azalma anlamına gelmektedir. Bu sonuç, katkı oranının optimum seviyesinin aşıldığında mukavemet kazanımının zayıfladığını göstermektedir. Bu durum, matris içinde homojen dağılmayan kil parçacıklarının kusur noktası gibi davranarak çatlak başlatıcı etki göstermesiyle açıklanabilir.

Sonuç olarak, üç nokta eğilme testlerinden elde edilen veriler, organokil katkısının kompozit malzemenin eğilme davranışları üzerinde hem pozitif hem de sınırlayıcı etkilere sahip olduğunu göstermektedir. %1 katkı oranı, elastik modül ve eğilme dayanımı açısından en yüksek kazanımı sunarken, süneklikteki azalma kontrol edilebilir düzeydedir. Bu oran, rijitlik–dayanım–tokluk dengesi açısından optimum katkı miktarını temsil etmektedir. %2 katkı oranında ise sertlik ve dayanım katkısı bir

miktar korunmakla birlikte, süneklik ve kırılma dayanımında gözle görülür azalma eğilimi mevcuttur. Bu da yapının daha kırılğan bir karaktere evrildiğini göstermektedir. Elde edilen bu bulgular değerlendirildiğinde eğilme dayanımı ve elastik modül açısından %1 organokil katkısının kompozit yapı üzerinde en verimli katkıyı sağladığı görülmektedir. Bu katkı oranı ile hem elastik bölgede yüksek rijitlik hem de kırılma öncesi yeterli şekil değiştirme elde edilmiştir. Bu sebeple, mühendislik uygulamalarında %1 katkı oranı, eğilme yüklerine maruz kalacak kompozit sistemlerde performans–dayanıklılık optimizasyonu açısından önerilmektedir.

Tablo 7.7: Numune grupları üç nokta eğme testi sonuçları.

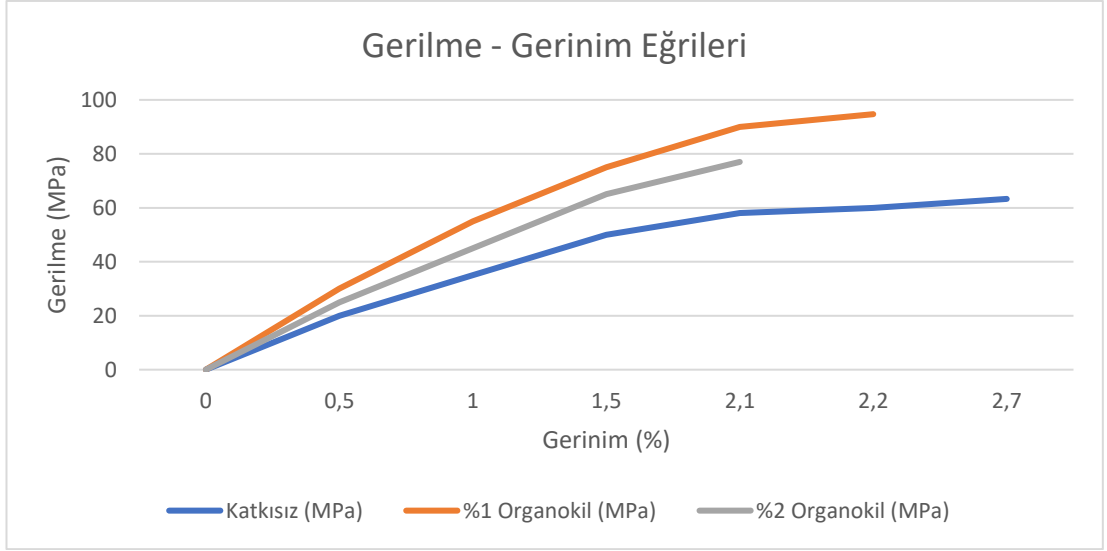
Numune		Eğilme Modülü (E_f) (MPa)	Maks. Eğilme Gerilmesi (σ_{fM}) (MPa)	Maks. Eğilme Şekil Değişimi (ϵ_{fM}) (%)	Kırılma Gerilmesi (σ_{fB}) (MPa)	Kırılma Şekil Değişimi (ϵ_{fB}) (%)
Katkısız	1	3710	65,5	2,7	65,5	2,7
	2	3510	64,7	2,8	64,7	2,8
	3	3230	57,8	2,7	57,8	2,7
	4	3380	65,2	2,6	65,2	2,6
1%	5	6030	96,3	2,3	96,3	2,3
	6	6040	96,1	2,2	96,1	2,2
	7	6170	91,7	2,1	91,7	2,1
	8	5860	94,8	2,2	94,8	2,2
2%	9	5520	80,9	2	80,9	2
	10	5340	79,4	2,3	79,4	2,3
	11	5260	77,2	2,1	77,2	2,1
	12	4950	70,6	2,1	70,6	2,1

Tablo 7.8: Üç nokta eğme testi sonuçları ortalama değerleri.

Numune Ortalama Değerleri	Eğilme Modülü (E_f) (MPa)	Maks. Eğilme Gerilmesi (σ_{fM}) (MPa)	Maks. Eğilme Şekil Değişimi (ϵ_{fM}) (%)	Kırılma Gerilmesi (σ_{fB}) (MPa)	Kırılma Şekil Değişimi (ϵ_{fB}) (%)
Katkısız	3457,5	63,3	2,7	63,3	2,7
1%	6025	94,725	2,2	94,725	2,2
2%	5267,5	77,025	2,125	77,025	2,125

Tablo 7.9 : Üç nokta eğme testi sonuçları standart sapma değerleri

	Std. Sapma Ef (MPa)	Std. Sapma σ_{fm} (MPa)	Std. Sapma ϵ_{fm} (%)	Std. Sapma σ_{fb} (MPa)	Std. Sapma ϵ_{fb} (%)
Katkısız	203,53	3,68	0,08	3,68	0,08
1%	94,69	2,41	0,13	2,41	0,13
2%	237,96	4,54	0,1	4,54	0,1



Şekil 7.5: Üç nokta eğme testi ortalama sonuçların gerilim-gerinim grafiği.

7.4. Darbe Dayanım Test Sonuçları

Bu çalışmada, kompozit numunelerin ani darbe yükleri altındaki enerji emilimi kapasitelerini belirlemek amacıyla darbe dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Testler çentiksiz Charpy darbe düzeneği ile, 5,4 J kapasiteli sarkaç cihazı kullanılarak uygulanmıştır. Her grup için altı numune test edilerek, absorbe edilen darbe enerjisi değerlerinin ortalamaları ve standart sapmaları hesaplanmıştır.

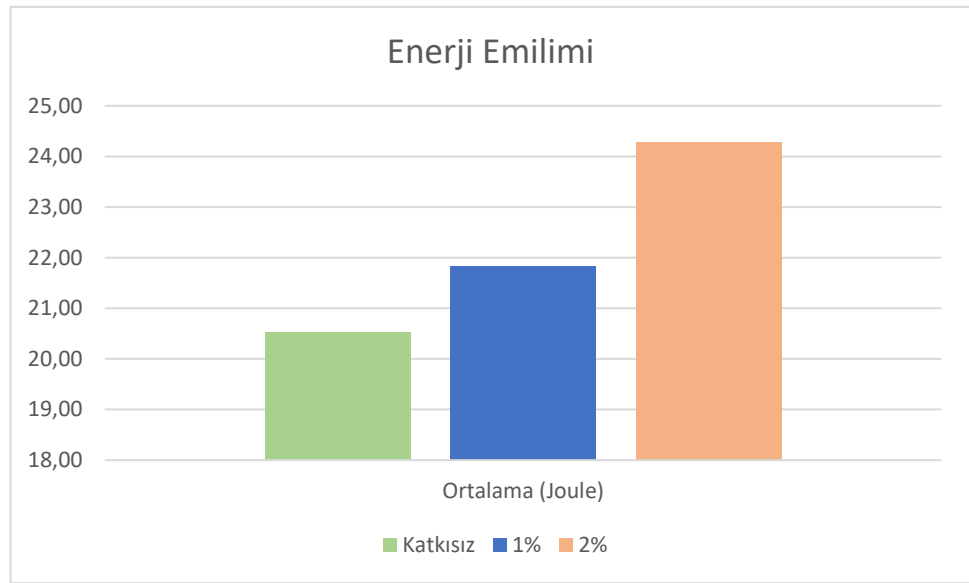
Test sonuçları incelendiğinde, katkısız numuneler ortalama 20,53 J, %1 organokil katkılı numuneler 21,83 J ve %2 organokil katkılı numuneler 24,27 J darbe enerjisi absorbe etmiştir. Bu sonuçlara göre:

%1 organokil katkısı, katkısız numuneye kıyasla darbe dayanımında yaklaşık %6,3 artış sağlamıştır. %2 katkı oranında ise bu artış yaklaşık %18,2 seviyesine ulaşmıştır.

Bu artışlar, düşük oranlı nanokil katkısının malzemenin kırılma öncesi enerji absorpsiyon kapasitesini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Özellikle %2 katkı grubunda gözlenen belirgin iyileşme, katkı maddesinin matris içerisinde homojen dağılması sayesinde çatlak ilerlemesinin daha zor gerçekleşmesiyle açıklanabilir. Sönümleme ve kırılma tokluğu açısından değerlendirildiğinde, nanokil katkılı yapılar çatlağın yön değiştirmesini, dallanmasını veya enerji harcayarak duraksamasını sağlayan mikro yapısal bariyerler oluşturur. Bu durum, çatlak ilerlemesini yavaşlatmakta ve daha yüksek enerji altında kırılmayı sağlamaktadır. %2 katkı oranında bu etkinin daha belirgin olması ince tabaka formundaki kil levhalarının polimer matriste oluşturduğu yüksek ara yüzey alanı ile ilişkilidir. Elde edilen sonuçlar, mühendislik uygulamaları açısından değerlendirildiğinde, organokil katkılı kompozitlerin yüksek darbe dayanımı gerektiren uygulamalar için uygun olduğunu göstermektedir. Özellikle otomotiv, yapı ve havacılık endüstrilerinde darbe ve çarpma yüklerine karşı performanslı davranış sergileyen bu malzemeler; kaporta panelleri, iç trim parçaları veya sismik darbelere maruz kalan yapısal elemanlar gibi alanlarda tercih edilebilir. Bu bağlamda, %2 organokil katkılı kompozitler darbe enerjisi emilim açısından en yüksek performansı sunmuş ve kompozit malzemenin tokluğunu ciddi şekilde artırmıştır.

Tablo 7.10: Numune grupları darbe dayanım testi sonuçları.

Numune	Katkısız	1%	2%
1	21,10	20,10	23,40
2	19,70	21,50	23,00
3	21,50	22,40	25,40
4	20,90	24,20	25,00
5	21,70	21,30	23,40
6	18,30	21,50	25,40
Ortalama	20,53	21,83	24,27
Std. Sapma	1,29	1,37	1,11



Şekil 7.6: Darbe dayanım testi ortalama enerji emilimi sonuçların grafiği.

7.5. Sertlik Testi Sonuçları

Kompozit numunelerin yüzey sertliğinin belirlenmesi amacıyla Shore D sertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Testler, ASTM D2240 standardına uygun olarak Zwick marka durometre cihazı ile yürütülmüş; her numune grubundan 10'ar farklı ölçüm alınarak ortalama değerler hesaplanmıştır. Bu yöntemde, sertleştirilmiş çelik bir iğne (indenter) belirli bir kuvvet altında numune yüzeyine bastırılır ve iz derinliğine bağlı olarak Shore D sertlik değeri 0–100 arasında ölçülür.

Katkısız kompozit numunelerde elde edilen sertlik değerleri 62–65 arasında değişmiş ve ortalama değer 63,3 olarak hesaplanmıştır. %1 organokil katkılı numuneler, 63–69 aralığında Shore D değeri göstermiş ve ortalama 65,4 olarak bulunmuştur. %2 katkı oranındaki numunelerde ise değerler 63–67 arasında ölçülmüş ve ortalama 64,2 olarak hesaplanmıştır.

Bu sonuçlara göre:

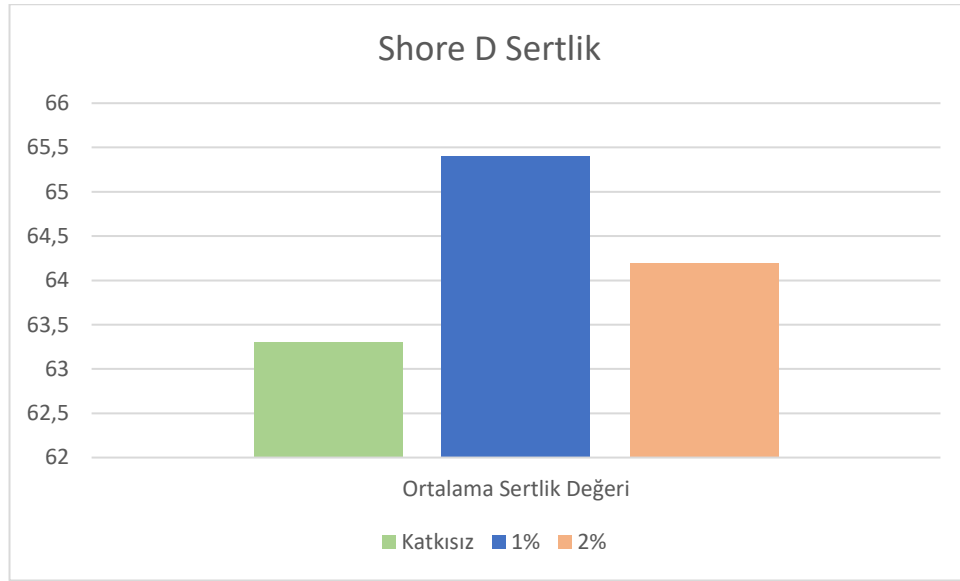
%1 katkılı numuneler, katkısız yapıya kıyasla yaklaşık 2,1 birim daha yüksek sertlik göstermiştir (%3,3 artış). %2 katkı oranı ise katkısız numunelere göre yaklaşık 0,9 birim artış sağlamıştır (%1,4 artış).

Tüm gruplarda elde edilen ölçüm sonuçlarının birbirine yakın ve dar bir dağılım göstermesi, ölçüm tekrarlarının güvenilir olduğunu ve numunelerin yüzeylerinde homojen bir özellik dağılımı olduğunu göstermektedir. Ölçüm varyasyonlarının düşük olması, organokil katkısının aynı zamanda iç yapıda stabilite ve homojenlik sağladığını da desteklemektedir.

Sonuç olarak, Shore D sertlik testleri göstermektedir ki, organokil katkısı kompozit numunelerin yüzey sertliğini artırmakta; bu etki en belirgin şekilde %1 katkı oranında gözlenmektedir. Mühendislik uygulamaları açısından değerlendirildiğinde, yüzey sertliği yüksek kompozit yapıların çizilme direncinin ve yüzey deformasyonuna karşı dayanıklılığının arttığı, dolayısıyla aşınma ve yüzey yorulması gibi problemlere karşı daha dirençli hale geldiği söylenebilir. Bu bağlamda, %1 organokil katkılı kompozitler, sertlik-tokluk dengesi açısından optimal bir performans sunmaktadır.

Tablo 7.11: Numune grupları sertlik testi sonuçları.

Numune	Katkısız	Katkısız	1%	1%	2%	2%
1	62	63	65	68	64	64
2	62	64	67	63	64	63
3	63	63	64	65	63	64
4	65	63	65	65	67	63
5	63	65	63	69	66	64
Ortalama	63,3		65,4		64,2	
Std. Sapma	1,05		2,01		1,37	



Şekil 7.7: Sertlik testi ortalama shore D sonuçların grafiği.

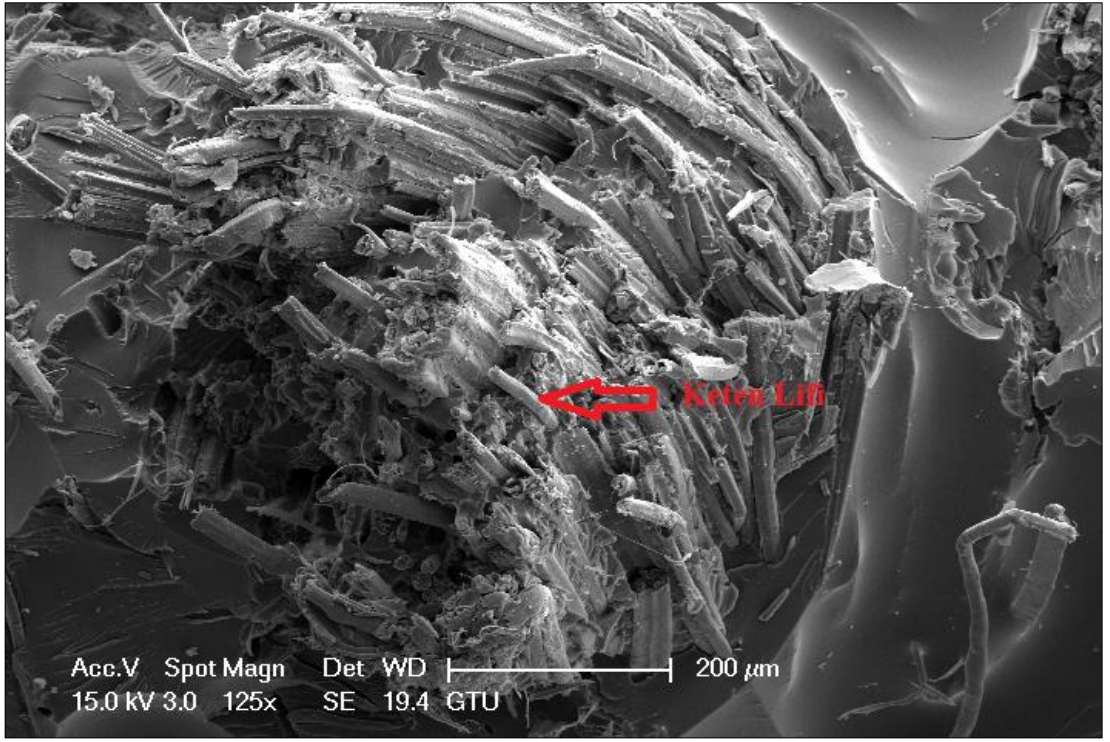
7.6. SEM Analiz Sonuçları

Bu bölümde, farklı katkı oranlarının kompozit yapı üzerindeki mikroyapısal etkilerini incelemek amacıyla elde edilen Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri sunulmaktadır. Katkısız numuneye ait SEM görüntülerinde, keten liflerinin etrafında epoksi matrisin tam anlamıyla sarmadığı bölgeler açıkça gözlemlenmektedir. Lif-matris ara yüzeyinde ortaya çıkan bu boşluklar, bağlanma kalitesinin düşük olduğu alanları işaret etmekte ve bu durum mekanik testlerde daha düşük dayanım değerlerinin elde edilmesine neden olmaktadır.

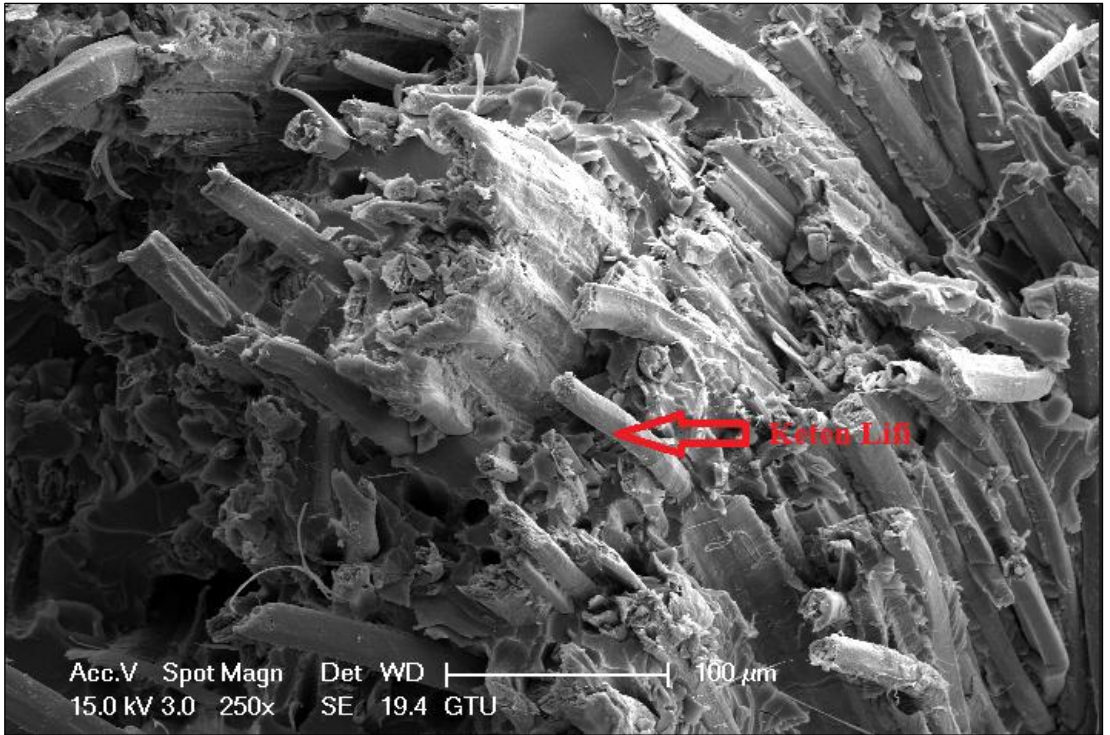
%1 organokil katkılı numunelerde ise yapının belirgin şekilde daha kompakt ve homojen bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Liflerin epoksi matris ile uyumlu bir şekilde bütünleştiği ve ara yüzeydeki boşlukların büyük oranda azaldığı görülmektedir. Organo kilin matris içerisinde kontrollü biçimde dağılması hem mikroskobik dolgu etkisi oluşturmakta hem de çatlak ilerlemesini yavaşlatan bir bariyer görevi üstlenmektedir. Bu bulgu, önceki mekanik ve titreşim testlerinde elde edilen optimum performans sonuçlarını destekler niteliktedir.

Buna karşılık, %2 organokil katkılı numunelerde mikroyapısal bütünlükte bozulmalar gözlenmiştir. SEM görüntülerinde liflerin matristen ayrıldığı bölgeler ile topaklaşma olmuş kil kümeleri dikkat çekmektedir. Bu bölgelerde epoksinin homojen dağılmaması, liflerin matristen kolayca ayrılmasına ve yapısal bütünlüğün zayıflamasına yol açmaktadır. Bu durum, özellikle çekme ve eğilme testlerinde gözlemlenen performans düşüşünü açıklamaktadır.

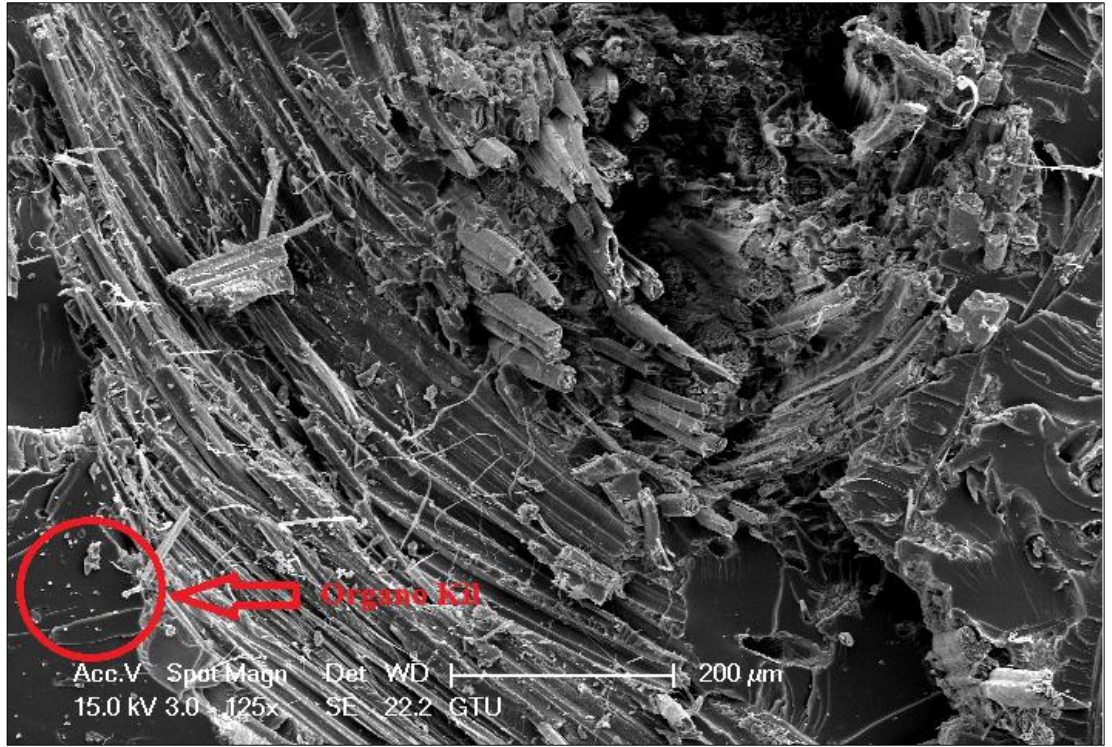
Sonuç olarak, SEM analizleri göstermektedir ki %1 organokil katkısı, mikroyapısal homojenlik ve lif-matris ara yüzey bağlanması açısından en uygun dağılımı sağlamaktadır. Bu durum, kompozit malzemenin genel mekanik ve dinamik performansına doğrudan yansımaktadır.



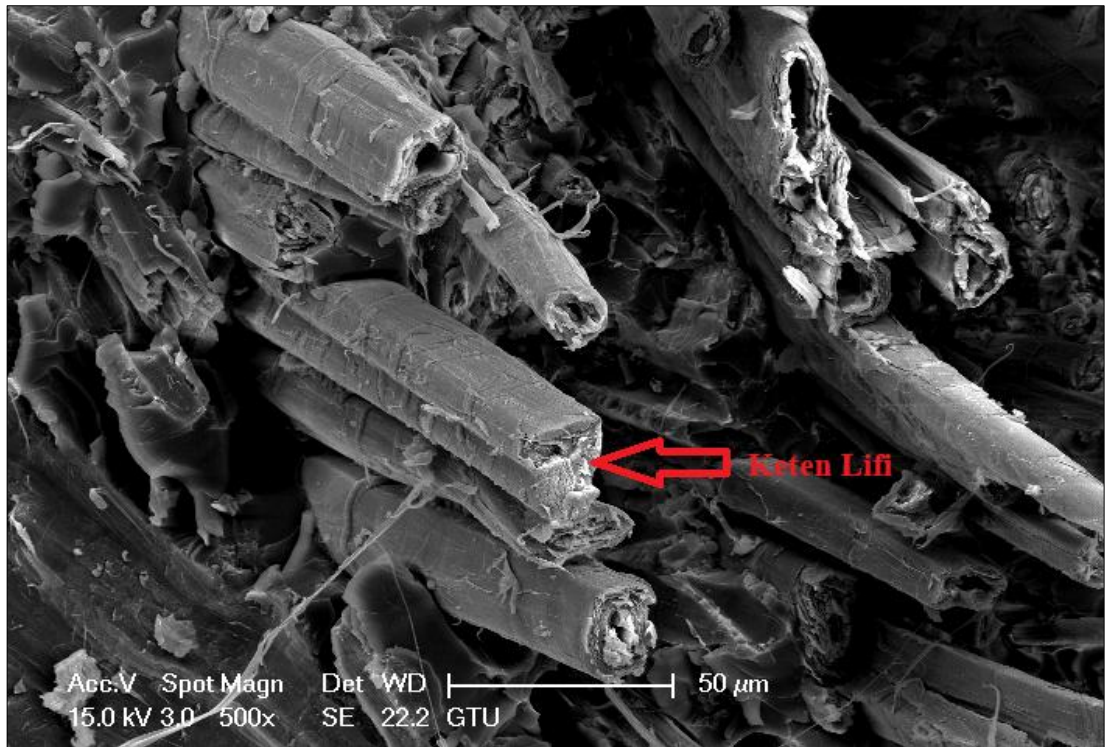
Şekil 7.8: Katkısız numune SEM Görüntüsü



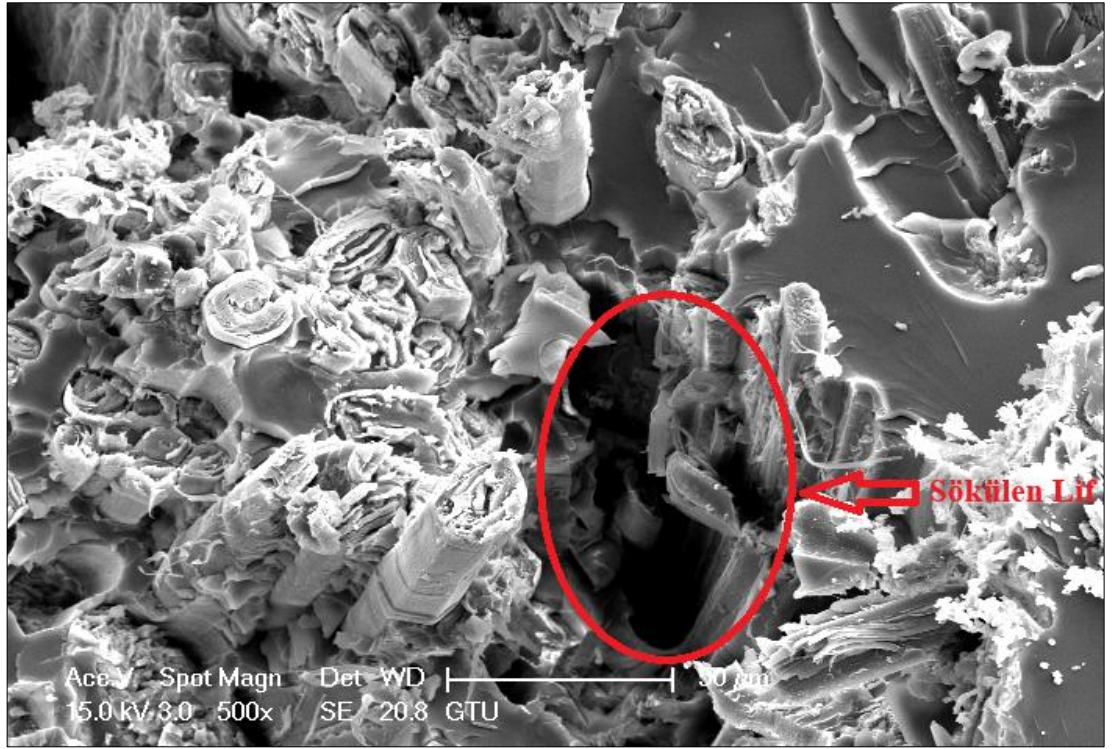
Şekil 7.9: Katkısız numune SEM Görüntüsü



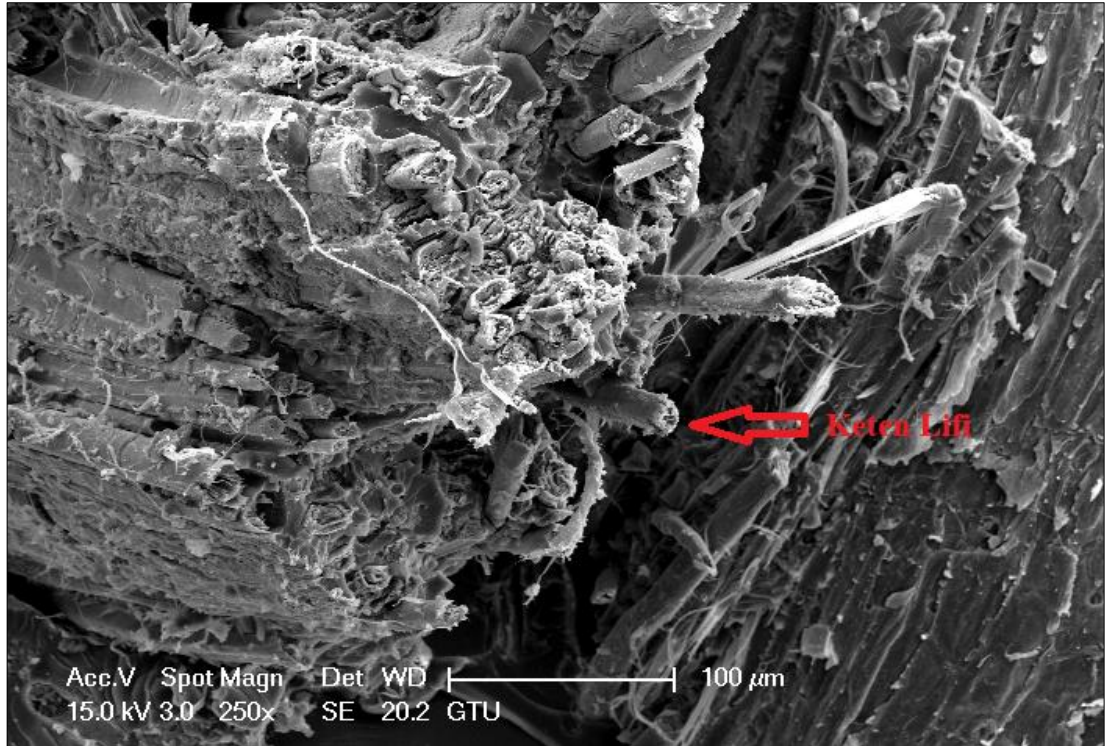
Şekil 7.10: %1 organo kil katkılı numune SEM Görüntüsü



Şekil 7.11: %1 organo kil katkılı numune SEM Görüntüsü



Şekil 7.12: %2 organo kil katkılı numune SEM Görüntüsü



Şekil 7.13: %2 organo kil katkılı numune SEM Görüntüsü

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Deneysel bulgular, organokil katkısının keten elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin hem mekanik hem de fiziksel özellikleri üzerinde çok yönlü ve belirgin etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Tüm test sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, katkı oranının artışına paralel olarak bazı özelliklerde anlamlı iyileşmeler sağlandığı, ancak belirli bir katkı seviyesinden sonra bu kazanımların sınırlanarak gerilediği gözlemlenmiştir. Bu durum, mikroyapısal düzeyde aglomerasyon, ara yüzey kalitesi ve homojenlik ile doğrudan ilişkilidir.

Çekme testi sonuçları, katkısız numuneye kıyasla %1 organokil ilavesi ile maksimum çekme kuvveti ve gerilmesinde %30'un üzerinde artış sağlandığını ortaya koymuştur. Bu artış, lif-matris-kil ara yüzeyinde yük transferinin etkin şekilde gerçekleştiğini ve katkının matriste homojen dağıldığını göstermektedir. %2 katkıya geçildiğinde ise bu iyileşmenin sınırlanarak kısmen azaldığı görülmüş; bu da yüksek katkı oranlarında parçacıkların bir araya toplanarak yerel zayıflık bölgeleri oluşturduğunu işaret etmektedir. Aynı durum, maksimum uzama ve elastik şekil değiştirme değerlerinde de gözlemlenmiş; %1 katkı ile süneklik artarken, %2 katkıda yeniden düşüşe geçilmiştir.

Üç nokta eğilme testi sonuçları, çekme testleri ile benzer bir eğilim göstermiştir. %1 organokil katkısı, elastik modül ve maksimum eğilme gerilmesi açısından en yüksek artışı sağlamış; %2 katkı ise bu değerlere katkı sağlamakla birlikte %1 katkının gerisinde kalmıştır. Eğilme modülü ve sertlik arasında paralel bir ilişki gözlemlenmiş, bu da kil katkısının matris içinde yapısal sertliği ve iç direnç kabiliyetini artırdığını göstermektedir. Ancak %2 katkı oranında, elastik modül ve eğilme gerilmesi değerlerindeki düşüşle birlikte kırılma şekil değiştirmesi belirgin şekilde azalmış; bu durum kompozitin daha kırılğan bir karaktere büründüğünü kanıtlamıştır.

Sertlik testleri, yukarıdaki mekanik test bulgularını desteklemiştir. %1 katkılı numuneler, yüzey deformasyonuna karşı en yüksek direnç değerini sergilemiş; bu da mikro takviye etkisinin matrisin dış yüzey özelliklerine yansıdığını göstermektedir. %2 katkıda ise sertlikte küçük bir azalma gözlenmiş; bu durum, parçacıkların homojen dağılmaması halinde yüzeyde etkin temas noktalarının azalmasıyla ilişkilendirilmiştir. Aynı zamanda elastik modül ile sertlik arasındaki paralel artış, matrisin sıkılaştığını ve yük altında daha dirençli hale geldiğini göstermektedir.

Titreşim testi bulguları, dinamik davranış açısından önemli veriler sunmuştur. Doğal frekans değerleri, yapı rijitliğiyle doğrudan ilişkili olup %1 katkı ile en yüksek seviyeye çıkmıştır. Bu artış hem elastik modüldeki yükselişle örtüşmekte hem de katkının rijitlik kazandırıcı etkisini doğrulamaktadır. Sönümlleme oranı ise farklı bir tablo sunmuştur: %2 katkıda sönümlleme kapasitesi %1 katkıya göre çok daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, parçacıkların artan yüzey alanının iç sürtünmeyi artırarak enerjiyi absorbe etmesini sağlamasıyla açıklanabilir. Ancak bu durum bir mühendislik açmazını da ortaya koymaktadır: Rijitlik artarken, sönüm düşme eğilimi göstermiş; sönüm artarken mukavemet ve yüzey direnci zayıflamıştır. Bu nedenle, katkı oranı belirlenirken tüm bu özellikler arasında dengeli bir optimizasyon yapılmalıdır.

Darbe dayanım testleri, diğer mekanik testlerden kısmen ayrılmıştır. Bu testte, %2 katkı oranı ile %1 katkıya kıyasla daha yüksek darbe enerjisi emilimi ölçülmüştür. Bu, organokil parçacıklarının çatlak ilerlemesini zorlaştıran mikro bariyerler oluşturması sayesinde gerçekleşmiştir. Ancak, bu avantaj sertlik, çekme ve eğilme değerlerinde yaşanan düşüşle birlikte değerlendirilmelidir. Çünkü darbe altında daha fazla enerji emilmesi, genel yapının daha tok olduğu anlamına gelse de bu durum malzemenin sürekli yük altındaki davranışını olumlu etkilemeyebilir. Bu bağlamda, darbe dayanımı ile statik dayanım parametreleri arasında doğrudan bir ilişki kurulamayacağı, mühendislik kararlarının uygulama koşullarına göre farklılaşması gerektiği anlaşılmaktadır.

Yoğunluk testleri, fiziksel performans açısından değerlendirildiğinde %1 ve %2 katkı oranlarında sınırlı düzeyde düşüş göstermiştir. Bu durum, katkı maddesinin matristen daha düşük yoğunlukta olması ve mikro boşlukların oluşumu ile açıklanabilir. Bu bağlamda, kompozit malzemenin hafifliği korunmuş, özellikle otomotiv ve havacılık gibi hafiflik-tabanlı mühendislik uygulamaları için uygunluk sürdürülmüştür. Ancak yoğunlukta sağlanan bu avantaj, %2 katkı ile gelen mekanik performans düşüşleriyle birlikte değerlendirildiğinde, katkı oranının belirlenmesinde yalnızca özgül ağırlık değil, çoklu performans ölçütlerinin dikkate alınması gerektiği ortaya konmuştur.

Genel sentez yapıldığında, tüm testler arasında yapısal bir bütünlük ve mühendislik açısından yüksek düzeyde tutarlılık gözlemlenmiştir. Çekme, eğilme, sertlik ve titreşim testleri, %1 organokil katkısının rijitlik, dayanım ve yüzey bütünlüğü açısından en yüksek verimi sunduğunu göstermiştir. Aynı katkı oranı darbe dayanımında da yeterli seviyede performans sağlamış; yoğunlukta ise kabul edilebilir

düzeyde hafiflik korunmuştur. %2 katkı oranı, özellikle sönümleme ve darbe enerjisi emme kapasitesi açısından öne çıkmasına rağmen, kırılabilirlik artışı, süneklik azalması, yüzey düzensizliği ve elastik modülde düşüş gibi zayıflıklarla dengelenmiştir. Bu durum, yüksek katkı oranlarında aglomerasyonun mikroyapısal bozulmalara yol açtığını ve bu bozulmaların mühendislik performansını sınırlandırdığını açıkça göstermektedir.

Sonuç olarak, elde edilen tüm deneysel veriler ışığında %1 organokil katkı oranı, çekme mukavemeti, elastik modül, yüzey sertliği, darbe tokluğu, doğal frekans, sönümleme oranı ve yoğunluk gibi kritik mühendislik parametreleri arasında optimum bir denge sağlamaktadır. Bu katkı oranı hem rijitlik hem de enerji soğurma kabiliyetini birlikte barındıran hem hafiflik hem de dayanım sunan bir yapı oluşturarak kompozit sistemler için dengeli ve sürdürülebilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, mühendislik uygulamalarında özellikle çoklu yükleme koşullarına maruz kalan yapılar için %1 katkı oranı performans, güvenilirlik ve üretim verimliliği açısından tercih edilen seviye olarak önerilmektedir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, üretilen kompozit malzemelerin ve bileşenlerinin daha kapsamlı bir şekilde incelenmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle organokil katkı oranlarının farklı seviyelerde yeniden ele alınması ve daha geniş aralıklarla sistematik olarak araştırılması, en uygun bileşen oranlarının belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Böyle bir yaklaşım, yalnızca malzemelerin mekanik ve titreşim performansının daha etkin bir şekilde optimize edilmesine olanak sağlamakla kalmayacak, aynı zamanda doğal elyaf takviyeli nanokompozitlerin otomotiv ve benzeri mühendislik uygulamalarında daha güvenilir, hafif ve sürdürülebilir çözümler olarak kullanılmasına da güçlü bir zemin hazırlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] D. D. Chung, (2010), *Composite Materials: Science and Applications*, Springer Science & Business Media.
- [2] E. Dias, H. Chalse, S. Mutha, Y. Mundhe, N. Ambhore, A. Kulkarni, and A. Mache, (2023), "Review on synthetic/natural fibers polymer composite filled with nanoclay and their mechanical performance," *Materials Today: Proceedings*, vol. 77, pp. 916–925, doi: 10.1016/j.matpr.2022.12.059.
- [3] S. Waghmare, S. Shelare, K. Aglawe, and P. Khope, (2022), "A mini review on fibre reinforced polymer composites," *Materials Today: Proceedings*, vol. 54, pp. 682–689.
- [4] M. Buggy, L. Farragher, and W. Madden, (1995), "Recycling of composite materials," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 55, no. 3–4, pp. 448–456.
- [5] M. G. Kamath, G. S. Bhat, D. V. Parikh, and D. Mueller, (2005), "Cotton fiber based nonwoven composites," Technical Report, Dept. of Materials Science and Engineering, The University of Tennessee, Knoxville, TN, USA.
- [6] G. Koronis, A. Silva, and M. Fontul, (2013), "Green composites: a review of adequate materials for automotive applications," *Composites Part B: Engineering*, vol. 44, no. 1, pp. 120–127.
- [7] A. Wilson, (2017), "Vehicle weight is the key driver for automotive composites," *Reinforced Plastics*, vol. 61, no. 2, pp. 100–102.
- [8] A. Mayyas, A. Qattawi, M. Omar, and D. Shan, (2012), "Design for Sustainability in Automotive Industry: A Comprehensive Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 4, pp. 1845–1862.
- [9] H. Y. Ünal, (2019), *Nano Takviyeli Kompozit Malzemelerde Yorulma Karakteristiğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi.
- [10] L. Mohammed, M. N. M. Ansari, G. Pua, M. Jawaaid, and M. S. Islam, (2015), "A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2015.
- [11] S. A. Pradeep, R. K. Iyer, H. Kazan, and S. Pilla, (2016), "Automotive Applications of Plastics: Past, Present, and Future," in *Applied Plastics Engineering Handbook*, 2nd ed., Elsevier Inc.
- [12] G. Rajeshkumar, (2021), "A Comprehensive Review on Natural Fiber/Nano-clay Reinforced Hybrid Polymeric Composites," *Polymer Composites*, vol. 42, no. 8, pp. 3935–3954.

- [13] P. K. Bajpai, I. Singh, and J. Madaan, (2014), "Development and Characterization of PLA-Based Green Composites: A Review," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*.
- [14] U. K. Vaidya, F. Samalot, S. Pillay, G. M. Janowski, G. Husman, and K. Gleich, (2004), "Design and Manufacture of Woven Reinforced Glass/Polypropylene Composites for Mass Transit Floor Structure," *Journal of Composite Materials*, vol. 38, no. 21, pp. 1949–1972.
- [15] N. Sgriccia, M. C. Hawley, and M. Misra, (2008), "Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, no. 10, pp. 1632–1637.
- [16] J. Holbery and D. Houston, (2006), "Natural-Fibre-Reinforced Polymer Composites in Automotive Applications," *JOM (Journal of Minerals, Metals and Materials Society)*, vol. 58, pp. 80–86.
- [17] M. Ağırhan, (2023), "Otomotiv Endüstrisinde Kompozit Malzeme Kullanımı," *Electronic Journal of Vocational Colleges*, vol. 13, no. 2, pp. 51–64, doi: 10.17339/ejovoc.1407005.
- [18] A. K. Mohanty, M. Misra, and L. T. Drzal, (2005), *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. Boca Raton: CRC Press.
- [19] S. K. Satyanarayana, K. Sukumaran, P. Pillai, and K. Rohatgi, (2009), "Natural Fiber–Polymer Composites: Status and Future," *Advances in Polymer Composites*, vol. 2, no. 3, pp. 1–36.
- [20] A. K. Mohanty, M. Misra, and G. Hinrichsen, (2000), "Biofibres, Biodegradable Polymers and Biocomposites: An Overview," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 276–277, no. 1, pp. 1–24, doi: 10.1002/1439-2054(20000301)276:1<1::AID-MAME1>3.0.CO;2-W.
- [21] Engineered Science Publisher, (n.d.), "Natural Fiber Reinforced Polymer Composites in Automotive Applications," *Engineered Science*.
- [22] D. Hull and T. W. Clyne, (1996), *An Introduction to Composite Materials*, 2nd ed., Cambridge University Press.
- [23] S. Korkut, (2019), *Statik ve Dinamik Yükler Altında Kompozit Plakaların Hasar Durumlarına Karşı Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi.
- [24] R. Nagavally, (2016), "Composite Materials – History, Types, Fabrication Techniques, Advantages, and Applications," in *Proceedings of the 29th IRF International Conference*, Bengaluru, India, pp. 25–30.
- [25] Mar-Bal Inc., (n.d.), "History of Composite Materials."
- [26] I. M. Daniel and O. Ishai, (1994), *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford University Press.

- [27] B. Harris, (1999), *Engineering Composite Materials*, The Institute of Materials, London, UK.
- [28] A. Çelik, (2020), *Keten Fiberli-Nanokil Katkılı Epoksi Reçineli Kompozit Malzemelerin Mekanik Performanslarının Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi.
- [29] D. K. Rajaka, D. D. Pagar, R. Kumar, and C. I. Pruncu, (2019), "Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials," *Materials Today: Proceedings*, vol. 18, pp. 2581–2592.
- [30] M. S. Bodur, (2020), *Doğal Lif Takviyeli Kompozitlerde Lif/Matris Ara Yüzey İyileştirme Çalışmaları ve Çevresel Koşullara Göre Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi.
- [31] C. Santulli, (2016), "Nanoclay Based Natural Fibre Reinforced Polymer Composites: Mechanical and Thermal Properties," in *Nanoclay Reinforced Polymer Composites: Natural Fibre/Nanoclay Hybrid Composites*, Springer Singapore, pp. 81–101.
- [32] AZoM, (n.d.), "Types of Composite Matrix Materials and Their Applications."
- [33] F. L. Matthews and R. D. Rawlings, (1999), *Composite Materials: Engineering and Science*, CRC Press.
- [34] S. R. Dhakal, M. S. Islam, and M. A. Islam, (2021), "A Review on Polymer Matrix Composite Materials and Their Applications," *Materials Today: Proceedings*, vol. 49, pp. 1–6.
- [35] S. Kandemir, (2019), *Doğal Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama Yöntemiyle Üretilerek Mekanik ve Metalografik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi.
- [36] J. Rouchan, (1987), *Materiaux composites pour d'aeronefs*, Ecole Nationale Supérieure d'Ingenieurs de Constructions Aeronautiques.
- [37] H. Yıldızhan, (2019), *Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi.
- [38] M. Karslı, (2019), *Hafif Silahlar İçin Polimer Kompozit Malzeme Seçimi*, Yüksek Lisans Tezi.
- [39] Y. Şahin, (2006), *Kompozit Malzemelere Giriş*, 2. Baskı, Seçkin Yayınevi, Ankara.
- [40] H. F. Öztekin, (2020), *Sürekli Elyaflarla Takviye Edilmiş Çeşitli Termoplastik Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin DeneySEL Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi.
- [41] A. Smith and B. Johnson, (2024), "A Review on the Mechanical and Physical Properties of Polyethylene," *Journal of Polymer Science*, vol. 12, no. 3, pp. 123–130.

- [42] M. Kohutiar, L. Kakošová, M. Krbata, R. Janík, J. J. Fekiač, A. Breznická, M. Eckert, P. Mikuš, and Ľ. Timárová, (2025), "Comprehensive Review: Technological Approaches, Properties, and Applications of Pure and Reinforced Polyamide 6 (PA6) and Polyamide 12 (PA12) Composite Materials," *Polymers*, vol. 17, no. 4, p. 442.
- [43] A. Garg, R. Bhattacharya, and S. K. Sharma, (2023), "A Comprehensive Mechanical Examination of ABS and ABS-like Materials for FDM 3D Printing," *Polymers*, vol. 15, no. 9, p. 2001.
- [44] İ. Karagöz, (2020), *Termoplastiklerin Sürtünme Karıştırma Kaynak Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi.
- [45] A. K. Singh, P. Kumar, and S. K. Singh, (2023), "Ceramic Matrix Composites: Classifications, Manufacturing, Properties, and Applications," *Manufacturing Review*, vol. 7, no. 2, p. 43.
- [46] F. Toptan, (2020), *Alüminyum Matrisli B4C Takviyeli Kompozitlerin Döküm Yöntemi ile Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi.
- [47] E. Güler, (2003), "Kompozit Malzemelerdeki Termal Gerilmelerin ve Sürünme Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi," Ege Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir.
- [48] S. K. Mazumdar, (2002), *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, New York.
- [49] S. S. Chee, M. Jawaid, O. Y. Alothman, and H. Fouad, (2021), "Effects of Nanoclay on Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Bamboo/Kenaf Reinforced Epoxy Hybrid Composites," *Polymers*, vol. 13, no. 3, p. 395.
- [50] M. Jawaid and H. P. S. Abdul Khalil, (2011), "Cellulosic/Synthetic Fibre Reinforced Polymer Hybrid Composites: A Review," *Carbohydrate Polymers*, vol. 86, no. 1, pp. 1–18.
- [51] W. Rodriguez-Castellanos and D. Rodrigue, (2016), "Production and Characterization of Hybrid Polymer Composites Based on Natural Fibers."
- [52] G. J. Bledzki, (1999), "Composites Reinforced with Cellulose Based Fibres," *Progress in Polymer Science*, vol. 24, pp. 221–274.
- [53] H. Essabir, M. Raji, R. Bouhfid, and A. E. K. Qaiss, (2016), "Nanoclay and Natural Fibers Based Hybrid Composites," in *Nanoclay Reinforced Polymer Composites: Natural Fibre/Nanoclay Hybrid Composites*, Springer Singapore.
- [54] H. Yousefian and D. Rodrigue, (2016), "Hybrid Composite Foams Based on Nanoclays and Natural Fibres," in *Nanoclay Reinforced Polymer Composites: Natural Fibre/Nanoclay Hybrid Composites*, Springer Singapore.

- [55] L. A. Elseify, M. Midani, A. El-Badawy, and M. Jawaid, (2021), "Manufacturing Automotive Components from Sustainable Natural Fiber Composites," Springer, doi: 10.1007/978-3-030-83025-0.
- [56] S. P., K. M. S., N. K. S., and S. S., (2017), "Fiber Reinforced Composites - A Review," *Journal of Material Sciences & Engineering*, vol. 6, p. 341.
- [57] M. A. Alwan, (2021), *Vibration, Damping Property, Tensile and Flexural Behavior of Kevlar/Carbon/Epoxy/Nanoclay Composites*, Yüksek Lisans Tezi.
- [58] N. Malik, S. Shrivastava, and S. B. Ghosh, (2018), "Moisture Absorption Behaviour of Biopolymer Polycaprolactone (PCL)/Organo Modified Montmorillonite Clay (OMMT) Biocomposite Films," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 346.
- [59] J. Njuguna, K. Pielichowski, and J. R. Alcock, (2007), "Epoxy-Based Fibre Reinforced Nanocomposites," *Advanced Engineering Materials*, vol. 9, no. 10, pp. 835–847.
- [60] A. Wang, D. Xia, G. Xian, and H. Li, (2019), "Effect of Nanoclay Grafting onto Flax Fibers on the Interfacial Shear Strength and Mechanical Properties of Flax/Epoxy Composites," *Polymer Composites*, vol. 40, no. 9, pp. 3482–3492.
- [61] M. Shettar, et al., (2020), "Experimental Investigation on Mechanical and Wear Properties of Nanoclay-Epoxy Composites," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, pp. 9108–9116, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.06.058.
- [62] R. Campilho, (2015), *Natural Fiber Composites*, CRC Press.
- [63] S. Sönmez, (2020), *Jüt Fiber Takviyeli Grafen Destekli Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi.
- [64] J. S. Chohan, K. S. Boparai, and R. Singh, (2020), "Manufacturing Techniques and Applications of Polymer Matrix Composites: A Brief Review," *Advances in Materials and Processing Technologies*, vol. 8, no. 2, pp. 1–11, doi: 10.1080/2374068X.2020.1835012.
- [65] D. Verma, (2016), "Processing Techniques of Nanoclay Based Natural Fibre Reinforced Polymer Composites," in *Nanoclay Reinforced Polymer Composites: Natural Fibre/Nanoclay Hybrid Composites*, Springer.
- [66] J. Skramstad, (2005), *Evaluation of Hand Lay-Up and Resin Transfer Molding in Composite Manufacturing*, M.S. thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Montana State University, Bozeman, MT, USA.
- [67] K. Abdurrohman, R. A. Pratomo, R. Hidayat, R. A. Ramadhan, T. S. Nurtiasto, and R. Ardiansyah, (2023), "A Comparison of Vacuum Infusion, Vacuum Bagging, and Hand Lay-Up Process on the Compressive and Shear Properties of GFRP Materials," *International Journal of Advanced Engineering and Management*, vol. 5, no. 1, pp. 10–17.

- [68] A. Dinaryanto, W. Raharjo, B. Setiyono, and A. Wibowo, (2023), "A Comparison of Vacuum Infusion, Vacuum Bagging, and Hand Lay-Up Process on the Compressive and Shear Properties of GFRP Materials," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1309, art. no. 012035, doi: 10.1088/1757-899X/1309/1/012035.
- [69] J. Schildgen, (2020), "Vacuum Bagging Process vs. Vacuum Infusion," *German Advanced Composites*.
- [70] Composites One, (2022), "Vacuum Infusion in Composites Manufacturing," *Composites One*.
- [71] A. Miller and A. G. Gibson, (1996), "Impregnation Techniques for Thermoplastic Matrix Composites," *Polymer Composites*, vol. 4, pp. 459–481.
- [72] T. Takahashi, K. Matsumoto, M. Koyanagi, and T. Ueda, (2018), "Hot Press Forming of Thermoplastic CFRP Sheets," *Procedia Manufacturing*, vol. 15, pp. 1–8, doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.001.
- [73] H. Özer, (2020), *Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi.
- [74] A. B. Strong, (1989), *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications*, Society of Manufacturing Engineers.
- [75] N. Srinivasababu, (2016), "Mechanical Performance of Nanoclay-Cellulose Fibre Particulate Composites," in *Nanoclay Reinforced Polymer Composites: Natural Fibre/Nanoclay Hybrid Composites*, Springer.
- [76] A. H. Miller, N. J. M. Dodds, and A. G. Gibson, (1998), "High Speed Pultrusion of Thermoplastic Matrix Composites," *Composites Part A*, vol. 29A, pp. 773–782.
- [77] L. Yan, N. Chouw, and K. Jayaraman, (2014), "Flax Fibre and Its Composites – A Review," *Composites Part B: Engineering*, vol. 56, pp. 296–317, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.08.014.
- [78] M. M. Kabir, H. Wang, K. T. Lau, and F. Cardona, (2012), "Chemical Treatments on Plant-Based Natural Fibre Reinforced Polymer Composites: An Overview," *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, pp. 2883–2892, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.04.053.
- [79] W. Wang, R. Fu, Q. Deng, X. Wang, Y. Wang, Z. Zhang, and G. Xian, (2020), "Surface Modification of Flax Fibers with Isocyanate and Its Effects on Fiber/Epoxy Interfacial Properties," *Fibers and Polymers*, vol. 21, no. 12, pp. 2888–2895.
- [80] S. Anwar and X. Li, (2024), "A Review of High-Quality Epoxy Resins for Corrosion-Resistant Applications," *Journal of Coatings Technology and Research*, vol. 21, pp. 461–480, doi: 10.1007/s11998-023-00865-5.

- [81] C. Verma, et al., (2020), "Epoxy Resins as Anticorrosive Polymeric Materials: A Review," *Reactive and Functional Polymers*, vol. 156, 104741, doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104741.
- [82] A. Derahman and Z. Z. Abidin, (2021), "Mechanical Properties of Bio-Epoxy Resins and Synthetic Epoxy Resins Blends," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1176, 012005, doi: 10.1088/1757-899X/1176/1/012005.
- [83] F. Jin, X. Li, and S.-J. Park, (2015), "Synthesis and Application of Epoxy Resins: A Review," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 29, pp. 1–11, doi: 10.1016/j.jiec.2015.03.026.
- [84] J. Pasatta, (2022), "Epoxy Curing Agents – Anhydrides, Long Pot Life and Exceptional Properties," *Polymer Innovation Blog*, Aug. 22.
- [85] Jayhawk Fine Chemicals Corporation, (2025), "The Unique Benefits of Anhydride Curing in Epoxy Resins," *AZoM*, Mar. 24.
- [86] H. Wang, H. Wu, L. Yang, and G. Yu, (2020), "Mechanical and Interfacial Properties of Flax Fiber-Reinforced Plastic Composites Based on a Chemical Modification Method," *Fibers and Polymers*, vol. 21, no. 7, pp. 1498–1507.
- [87] M. R. Bambach, (2020), "Direct Comparison of the Structural Compression Characteristics of Natural and Synthetic Fiber-Epoxy Composites: Flax, Jute, Hemp, Glass and Carbon Fibers," *Fibers*, vol. 8, no. 10, p. 62.
- [88] R. Panciroli and O. Giannini, (2021), "Comparing the Impact Resistance of Flax/Epoxy and Glass/Epoxy Composites through Experiments and Numerical Simulations," *Composite Structures*, vol. 264, p. 113750.
- [89] E. Raponi, C. Sergi, S. Boria, J. Tirillo, F. Sarasini, and A. Calzolari, (2021), "Temperature effect on impact response of flax-epoxy laminates: Analytical, numerical and experimental," *Composite Structures*, vol. 268, p. 113857.
- [90] V. Prasad, K. Sekar, S. Varghese, and M. A. Joseph, (2019), "Enhancing Mode I and Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Flax Fibre Reinforced Epoxy Composites with Nano TiO₂," *Composites Part A*, vol. 124, p. 105505.
- [91] A. Oun, A. Manalo, O. Alajarmeh, R. Abousnina, and A. Gerdes, (2022), "Influence of Elevated Temperature on the Mechanical Properties of Hybrid Flax-Fiber-Epoxy Composites Incorporating Graphene," *Polymers*, vol. 14, no. 9, p. 1841.
- [92] D. D. Örcen and D. Bayram, "Effect of nanoclay on the mechanical and thermal properties of glass fiber-reinforced epoxy composites," *Univ. Dicle, Arş. & Geliştirme*, Diyarbakır, 2024.
- [93] U. Esendemir ve R. Şimşek, "The effect of the functionalized nanoclay addition on the impact behavior of glass-Kevlar fiber/epoxy hybrid composites," M.S. tezi, Süleyman Demirel Univ., Isparta, 2019.

- [94] C. Gürel, “Investigation of the effect of nanoparticle dispersion on the mechanical behaviour of epoxy composites,” (halloysite, nanoclay, WC), P. A. U. (Pau Univ. handle), 2021.
- [95] A. Ongün, A. Avcı ve A. Erişen, “Investigation of mechanical properties of carbon fibre/epoxy composites incorporating nanoclay and multi-walled carbon nanotube,” *J. Mater. Sci. Eng.*, 2018.
- [96] S. Arulmurugan ve N. Venkateshwaran, “Vibration analysis of nanoclay filled natural fiber composites,” *Polymers & Polymer Composites*, vol. 24, no. 7, pp. 507–516, 2016.
- [97] Z. Chen, T. Kuang, Z. Yang ve X. Ren, “Effect of Nanoclay on Natural Fiber/Polymer Composites,” in *Nanoclay Reinforced Polymer Composites*, J. Mohammad, R. Abouel-Kassem ve R. Bouhfid, Eds., Springer, Berlin/Heidelberg, 2016, pp. 175–207.
- [98] M. Rajesh, P. Jeyaraj ve N. Rajini, “Mechanical, dynamic mechanical and vibration behavior of nanoclay dispersed natural fiber hybrid intra-ply woven fabric composite,” in *Nanoclay Reinforced Polymer Composites*, M. Jawaid, A. E. K. Qaiss ve R. Bouhfid, Eds., Springer, Singapore, 2016, ss. 281–296.
- [99] A. Venkatram, N. Venkateshwaran ve A. ElayaPerumal, “Mechanical, water absorption and thermal properties of sisal fiber reinforced hybrid composites with nano-clay,” *Polym. Compos.*, cilt 37, no 5, ss. 1234–1242, 2016.
- [100] “Flax, carbon, glass and aramid fiber fabrics,” Stock image, Shutterstock/Adobe Stock, Accessed: Aug. 2025.
- [101] A. Yazıcı, “Sustainability illustration with recycling, emissions, and transportation (AI-assisted),” Author’s own creation, 2025.
- [102] “Applications of composites in defense, sports, energy, aviation and marine industries,” Stock image, Google Images, Accessed: Aug. 16, 2025.
- [103] A. Yazıcı, “Applications of composites in different industries (illustrative collage),” Author’s own creation, 2025.
- [104] A. Yazıcı, “Illustration of resin infusion on natural fibers,” Author’s own creation (AI-assisted), 2025.
- [105] A. Yazıcı, “Illustration of resin application on fiber composites,” Author’s own creation (AI-assisted), 2025.
- [106] A. Yazıcı, “Illustration of fiber-reinforced composites with epoxy, polyester, and phenolic resins,” Author’s own creation (AI-assisted), 2025.
- [107] A. Yazıcı, “Illustration of flax (keten), glass (cam), and carbon (karbon) fiber fabrics,” Author’s own creation (AI-assisted), 2025.

- [108] “Examples of plant-based natural fibers (flax, kenaf, jute, hemp, sisal, abaca, banana, pineapple, coir),” Stock image, Google Images, Accessed: Aug. 16, 2025.
- [109] “Woven natural fiber fabrics,” Stock image, Google Images/Shutterstock, Accessed: Aug. 16, 2025.
- [110] A. Yazıcı, “Illustration of nanoclay powder and composite sample plates,” Author’s own creation (AI-assisted), 2025.
- [111] “Natural fiber composite production and applications (schematic),” Stock image, Google Images, Accessed: Aug. 16, 2025.
- [112] A. Yazıcı, “Illustration of composite manufacturing methods (hand lay-up, vacuum bagging, RTM, vacuum infusion, autoclave),” Author’s own creation (AI-assisted), 2025.
- [113] A. Yazıcı, “Photographs taken by the author during composite material production and testing processes at Marmara University, Polymer Composites Laboratory, 2025.” [114] A. Yazıcı, “Schematic representation of composite manufacturing methods (Hot Press Molding, Thermoforming, RTM, Extrusion),” Author’s own creation (AI-assisted), 2025.
- [116] Flax field and harvested flax bundles, Photograph, Accessed: 2025.
- [117] Flax fiber woven fabric, Photograph, Accessed: 2025.
- [118] A. Yazıcı, “Photographs taken by the author during mechanical testing processes at Ford Otosan R&D Center, 2025.”
- [119] A. Yazıcı, “Photographs taken by the author during experimental setup at Gebze Technical University, 2025.”
- [120] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), *FAOSTAT: Production of Fibres (Jute, Kenaf, Flax, Hemp, Sisal)*, 2024.
- [121] JEC Group, *JEC Composites Market Report 2024: Global Carbon and Glass Fiber Production Statistics*, Paris, France, 2024.
- [122] BPREG, *Technical Datasheet: Flax Fabric Reinforcement (400 g/m², 1000 mm width)*, BPREG Composites, 2024.
- [123] CET Kompozit, *Technical Datasheet*, CET Kompozit Materials, 2024.
- [124] ALSA Kimya, *Technical Datasheet*, ALSA Kimya, 2024.
- [125] R. A. Ilyas ve M. J. Suriani, "Natural Fiber Reinforced Composite Material for Product Design: A Short Review," *Polymers*, c. 13, s. 12, md. 1917, 2021.
- [126] J. A. Zsiros, *Natural Fibers and Fiberglass: A Technical and Economic Comparison*, Yüksek Lisans Tezi, Brigham Young University, 2010.

- [127] A. Çelik ve Y. Pekbey, "Mechanical Performance on Flax Fibre Epoxy Composites Filled with Montmorillonite Nanoclay for Lightweight Applications," *DEÜ Müh. Fak. Fen ve Müh. Derg.*, c. 26, s. 78, ss. 505-511, 2024.
- [128] P. Peças, H. Carvalho, H. Salman ve M. Leite, "Natural Fibre Composites and Their Applications: A Review," *Journal of Composites Science*, c. 2, s. 4, md. 66, 2018.
- [129] F. Ahmad, H. S. Choi ve M. K. Park, "A Review: Natural Fiber Composites Selection in View of Mechanical, Light Weight, and Economic Properties," *Macromol. Mater. Eng.*, c. 299, s. 6, ss. 672-687, 2014.
- [130] G. Genc, A. El Hafidi ve P. B. Gning, "Comparison of the mechanical properties of flax and glass fiber composite materials," *Journal of Vibroengineering*, c. 14, s. 2, ss. 783-789, 2012.
- [131] A. Lopez-Arraiza ve diğerleri, "Life cycle assessment of glass fibre versus flax fibre reinforced composite ship hulls," *Scientific Reports*, c. 15, md. 16283, 2025.
- [132] M. Holguin, "Pros and Cons of Natural Fiber-Reinforced Plastics in Automotive," *Plastics Engineering*, 27 Haziran 2024.
- [133] J. Roto, "Choosing sustainable fibers for composite materials," *Exel Composites – News & Insights*, 2 Nisan 2024.
- [134] L. Perelomov ve diğerleri, "The Synthesis of Organoclays Based on Clay Minerals with Different Structural Expansion Capacities," *Minerals*, c. 11, s. 7, md. 707, 2021.

ÖZGEÇMİŞ

2019 yılında Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldum ve 2022 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği yüksek lisans programına başladım. Eğitim sürecim boyunca özellikle kompozit malzemeler, mekanik tasarım ve yapısal analizler üzerine çalışmalar yürüttüm. Lisans dönemimde insansız hava aracı tasarımı ve aerodinamik analiz projelerinde görev aldım, Teknofest yarışmalarında dereceye giren ekiplerde aktif rol oynadım. Profesyonel kariyerime otomotiv sektöründe başladım; farklı firmalarda iç trim parça tasarımı, kalıp tasarımı, HVAC sistemleri ve proje yönetimi gibi alanlarda görev aldım. Son 1,5 yıldır Ford Otosan'da MCV Body Interior CAD Designer Team Member olarak çalışmakta ve araç iç trim parçalarının CAD tasarımı üzerine faaliyet göstermekteyim. Akademik ve mesleki kariyerimdeki hedefim, mühendislik tasarımı ve ileri malzemeler alanındaki bilgi ve deneyimimi sanayiye katkı sağlayacak yenilikçi projelerde kullanmaktır.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Öktem A. S., Yazıcı A., (2025), “Production of flax fiber and organo clay reinforced hybrid composites and evaluation of their mechanical properties and vibration performance”, 5th Global Conference on Polymers, Plastics and Composites, June 25-26, 2025 at Prague, Czech Republic.