



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

**POLİAMİD-6 İLE YÜZEYİ KAPLANMIŞ KENEVİR LİFİ TAKVİYELİ
POLİÜRETAN KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Meryem KARDAŞ

Polimer Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Polimer Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

TEMMUZ 2025

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

**POLİAMİD-6 İLE YÜZEYİ KAPLANMIŞ KENEVİR LİFİ TAKVİYELİ
POLİÜRETAN KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Meryem KARDAŞ

(21435016001)

ORCID: 0009-0005-7051-7712

**Polimer Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Polimer Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

Danışman: Doç. Dr. Ömer Yunus GÜMÜŞ

ORCID: 0000-0002-3361-6528

TEMMUZ 2025

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 21435016001 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Meryem KARDAŞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “POLİAMİD-6 İLE YÜZEYİ KAPLANMIŞ KENEVİR LİFİ TAKVİYELİ POLİÜRETAN KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :

Jüri Üyeleri :

Savunma Tarihi : 22.07.2025

Teslim Tarihi :



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Meryem KARDAŞ

İmzası:

[Handwritten signature of Meryem KARDAŞ]



Eşime ve çocuklarıma,

ÖNSÖZ

Bütün yüksek lisans öğrenimim boyunca gerek desteği gerekse bilgisi ile bu yolu yürümemi kolaylaştırsan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Ömer Yunus GÜMÜŞ'e çok teşekkür ederim. Ayrıca bu süreçte eğitim izni vererek kişisel gelişimime olanak sağlayan kurumum Türk Standartları Enstitüsü'ne teşekkür ederim. En büyük teşekkürü saatlerimi ve bazen günlerimi tezime ayırarak onlardan ayrı kalmama müsaade eden canım eşim ve biricik evlatlarıma ediyorum.

Temmuz 2025

Meryem KARDAŞ
(Kimya Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Kompozit Malzemeler.....	2
1.1.1 Kompozit malzemelerde sınıflandırma	3
1.1.2 Kompozit malzemelerin üretim teknikleri	4
1.2 Lignoselülozik Kompozit Malzemeler	5
1.2.1 Kenevir.....	6
1.2.2 Poliamid 6 (Naylon-6, PA 6)	9
1.2.3 Poliüretan (PU)	9
1.3 Çalışmanın Amacı	10
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	12
3. DENEYSEL TASARIM	21
3.1 Kullanılan Malzemeler	21
3.2 Test Cihazları	21
3.3 Numune Üretim Prosesi	21
3.3.1 Kaplanmış kenevir lifi üretimi	21
3.3.2 PU ve PU kompozitlerin çekme testi numunesi üretimi	22
3.3.3 Uygulanan testler ve analizler	23
3.3.3.1 Kaplanmış kenevir lifi kaplama yüzdesi analizi	23
3.3.3.2 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi.....	23
3.3.3.3 FTIR analizi	23
3.3.3.4 DSC analizi	23
3.3.3.5 TGA analizi.....	24
3.3.3.6 Çekme testi.....	24
3.3.3.7 3- Nokta eğme testi	24
3.3.3.8 Mekanik testler için ANOVA analizi.....	24
3.3.3.9 Yoğunluk testi	24
3.3.3.10 Su absorpsiyonu testi	25
4. BULGULAR VE YORUM	26
4.1 Kaplanmış Kenevir Lifi Kaplama Yüzdesi Sonuçları.....	26
4.2 SEM Sonuçları	26
4.2.1 Kenevir lifi SEM sonuçları	26
4.2.2 PU/Kompozit-PU numunelerinin SEM sonuçları.....	29
4.3 FTIR Sonuçları	32

4.4 DSC Sonuçları.....	33
4.5 TGA Sonuçları	34
4.6 Çekme Testi Sonuçları	36
4.6.1 Kenevir lifi çekme testi sonuçları	36
4.6.2 PU/Kompozit-PU çekme testi sonuçları	38
4.7 PU/Kompozit-PU 3-Nokta Eğme Testi Sonuçları	40
4.8 Mekanik Testler İçin ANOVA Analizi	42
4.9 PU/Kompozit-PU Yoğunluk Testi Sonuçları	44
4.10 PU/Kompozit-PU Su Absorpsiyonu Testi Sonuçları	44
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	46
KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ.....	53



KISALTMALAR

ATR	: Zayıflatılmış Toplam Yansıma
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
EN	: Europäische Norm (Avrupa Standardı)
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu)
PA 6	: Poliamid 6 (Naylon-6)
PE	: Polietilen
PES	: Poliester
PS	: Polistiren
PU	: Poliüretan
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik Analiz
TS	: Türk Standardı

SEMBOLLER

a.u.	: Absorbans Birimi
°C	: Santigrat Derece
cm⁻¹	: Dalga Sayısı
dk	: Dakika
J	: Joule
mL	: Mililitre
mm	: Milimetre
Mt	: Milyon Ton
mW	: Miliwatt

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: Sektörel bazda kompozit malzeme kullanım oranları [4].	3
Çizelge 1.2: Matris sınıflarına göre üretim teknikleri [7].	4
Çizelge 1.3: Temel yüzey işlem teknikleri [7].	8
Çizelge 4.1: TGA verilerine göre numunelerin kademe karşılaştırılması.	36
Çizelge 4.2: ANOVA analizi sonuçları.	43



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Mühendislik malzeme sistemlerinin tarihsel gelişimi.	1
Şekil 1.2: 2022 yılı coğrafi ve sektörel kompozit malzeme pazarı dağılımı.	2
Şekil 1.3: Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.	3
Şekil 1.4: Bitki liflerinin sınıflandırılması.	5
Şekil 1.5: Kenevir bitkisinin kullanım alanları.	6
Şekil 1.6: Doğal elyafların (karbon emilimi dahil) karbon ayak izi.	7
Şekil 1.7: Türkiye’deki kenevir üretim alanları.	8
Şekil 1.8: Döküm poliüretanın ön polimer reaksiyonu.	9
Şekil 1.9: Poliüretan kullanım alanları.	10
Şekil 2.1: Yıllar içinde kenevir kompozitler üzerine hazırlanmış belgeler.	12
Şekil 3.1: Kenevir lifi kaplama prosesi.	21
Şekil 3.2: Lif kaplama prosesi basamakları A. Kaplamada kullanılan 1 mm çapındaki nozül, B. 1 mm çapındaki nozülden geçirerek lif kaplama, C. Kaplanan numuneleri çekere ocakta kurutma.	22
Şekil 3.3: PA 6-Kenevir/PU numunelerinin üretim basamakları A. Çekme numunesi kalıbı, B. Kaplanan lifleri kalıba yatırma, C. PU karışımının lif üzerine dökümü, D. Kurlanmaya bırakılan numuneler.	23
Şekil 4.1: Kaplanmış kenevir liflerinin kaplama yüzdesi karşılaştırması.	26
Şekil 4.2: Kenevir numunelerinin 50 X büyütme SEM görüntüleri A. Kaplanmamış kenevir, B. PA 6 kaplanmış kenevir.	27
Şekil 4.3: Kenevir numunelerinin 250 X büyütme SEM görüntüleri A. Kaplanmamış kenevir, B. PA 6 kaplanmış kenevir.	28
Şekil 4.4: Kenevir numunelerinin SEM görüntüleri A. PA 6 kaplanmış kenevir 500 X, B. PA 6 kaplanmış kenevir 1000 X.	29
Şekil 4.5: PU ve Kompozit-PU numunelerinin ≈ 25 X büyütme SEM görüntüleri A. PU, B. Kenevir/PU, C. PA 6-Kenevir/PU.	30
Şekil 4.6: PU ve Kompozit-PU numunelerinin SEM görüntüleri A. PU 250 X, B. PU 5000 X, C. Kenevir/PU 500 X, D. Kenevir/PU 5000 X, E. PA 6-Kenevir/PU 500 X, F. PA 6-Kenevir/PU 5000 X.	31
Şekil 4.7: FTIR spektrumları karşılaştırılması.	32
Şekil 4.8: PA 6 ve PA 6-Kenevir numunelerinin termogramları.	33
Şekil 4.9: Numunelerin termogram karşılaştırmaları A. % Kütle değişimi, B. Türev % kütle değişimi.	35
Şekil 4.10: Kenevir liflerinin çekme testi sonuçları A. Çekme mukavemeti, B. Kopma Uzaması, C. Elastik modül.	37
Şekil 4.11: Kenevir lifi çekme testi Gerilim-Gerinim grafikleri.	38
Şekil 4.12: PU/Kompozit PU numunelerinin çekme testi sonuçları A. Çekme mukavemeti, B. Kopma Uzaması, C. Elastik modül.	39
Şekil 4.13: PU çekme testi Gerilim-Gerinim grafikleri.	40

Şekil 4.14: PU/Kompozit PU numunelerinin 3-Nokta eğme testi sonuçları	
A. Maksimum Gerilme, B. Maksimum Uzama, C. Elastik modül.	41
Şekil 4.15: PU 3-Nokta eğme testi Gerilim-Gerinim grafikleri.	42
Şekil 4.16: PU/Kompozit PU numunelerinin yoğunluk testi sonuçları.	44
Şekil 4.17: PU/Kompozit PU numunelerinin su absorpsiyonu testi sonuçları.	45



POLİAMİD-6 İLE YÜZEYİ KAPLANMIŞ KENEVİR LİFİ TAKVİYELİ POLİÜRETAN KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Kompozitlerin darbe dayanımı, ozona dayanımı, korozyona dayanımı, termal iletkenliği, tasarım esnekliği, hafifliği ve üretim çeşitliliği potansiyeli gibi ayırt edici özellikleri tüm sektörlerde kullanımını günden güne arttırmaktadır. Kompozit ailesinin en fazla tercih edileni polimer matrisli kompozitler; havacılık ve uzay sanayii, otomotiv sektörü, inşaat ve altyapı sektörü, savunma sanayi, spor ekipmanları ev elektrik-elektronik sektöründe kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerde takviye fazında doğal ve sentetik lifler tercih edilmekte ancak küresel ısınma, daha düşük karbon ayak izi, biyobozunurluk, düşük maliyet, iyi mekanik ve yalıtım özellikleri gibi parametreler sonucu son yıllarda doğal lifler üzerindeki çalışmalar artış göstermektedir.

Bu çalışmada Poliüretan (PU) matris, çeşitli kullanım alanına ve üretim şekline sahip olmasının yanı sıra kimyasallara dayanımı ve iyi mekanik özellikleri sebebiyle kullanılmıştır. Takviye fazında ise kenevir lifi hafifliği, yüksek mukavemet özelliği, tamamen doğada çözünebilir oluşu, düşük maliyetli üretimi sebebiyle tercih edilmiş; yüzeyi PA 6 kaplanarak matrise tutunması, su emme özelliği ve termal kararlılığı iyileştirilmiştir.

Kompozit üretiminden önce kenevir liflerinin kaplama işlemi araştırılmıştır. SEM, FTIR, DSC ve TGA analizleri ile kaplama işleminin yüzeyi uygun şekilde kapladığı, liflerin yüzeylerinin düzleştiği ve termal olarak daha kararlı hale geldikleri görülmüştür. Yapılan çekme testi ile 1 mm çapında nozül kullanılan kaplama işleminin yüzeyde %137 kaplama birikmesine neden olduğu, kenevire oranla çekme mukavemetinin %12 - kopma uzamasının %42 düştüğü, elastik modülün ise %43 arttığı tespit edilmiştir.

Kompozit üretiminde bu değerlere sahip lifler kalıba elle yatırılarak üzerine PU karışımı dökülmüştür. Karşılaştırmalar PU, Kenevir/PU ve PA 6-Kenevir/PU üzerinden yürütülmüştür. SEM analizi sonucunda kompozitlerin gözenekliliğinin PU'ya göre arttığı belirlenmiş olup kaplanan kenevir kullanımının daha az gözenekli yapı oluşturduğu görülmüştür. Yoğunluk değerleri PU için 1,070 g/cm³, Kenevir/PU için 0,855 g/cm³ ve PA 6-Kenevir/PU için 0,948 g/cm³ şeklinde bulunmuştur. Su absorpsiyonu testi sonucunda değerler PU %0,4, Kenevir/PU %1,85, PA 6-Kenevir/PU %1,65 şeklinde bulunmuştur. Oluşan gözenekli yapının getirisi olarak yoğunluğun düşmesi ve su absorpsiyonunun artması deneysel verilerle uyumaktadır. Uygulanan çekme testi sonucunda en yüksek mukavemet değeri 23,4 MPa ile PA 6-Kenevir/PU numunesinde, kopma uzaması %4,2 ile PU numunesinde, elastik modül ise 1057,2 MPa ile PA 6-Kenevir/PU numunesinde ölçülmüştür. 3-nokta eğme testinde maksimum gerilme 47,1 MPa ile PU numunesinde, maksimum uzama %6,5 ile PU numunesinde, elastik modül ise 1250,7 MPa ile PA 6-Kenevir/PU numunesinde

ölçülmüştür. Mekanik testlerin gerilim-gerinim grafikleri incelendiğinde PA 6-Kenevir/PU kompozitinin sert yapıda olduğu görülmüştür.

Elde edilen tüm sonuçlar ışığında daha hafif, daha sert, deforme olması zor olan ancak su emme potansiyeli yüksek kompozitlerin elde edilmesi; kullanım alanı olarak mobilya destek ünitesi, taşımada titreşim önleyici birimler ve spor ekipmanı iç destek dolgusu şeklinde değerlendirilebilir.

Anahtar kelimeler: Kenevir, Lignoselülozik kompozit malzemeler, Poliüretan, Kompozit.



INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF HEMP FIBER REINFORCED POLYURETHANE COMPOSITES SURFACE COATED WITH POLYAMIDE-6

SUMMARY

The distinctive properties of composites, such as impact resistance, ozone resistance, corrosion resistance, thermal conductivity, design flexibility, lightness and production diversity potential, are increasing their use in all sectors day by day. The most widely used type of composite is polymer matrix composites, which are employed in the aerospace industry, automotive sector, construction and infrastructure sector, defence industry, sports equipment, and electrical and electronic sectors. In polymer matrix composites, both natural and synthetic fibres are preferred as reinforcing phases; however, due to parameters such as global warming, lower carbon footprint, biodegradability, low cost, and good mechanical and insulation properties, research on natural fibres has increased in recent years.

In this study, polyurethane (PU) matrix was used due to its resistance to chemicals and good mechanical properties, as well as its various applications and production methods. In the reinforcement phase, hemp fibre was chosen for its lightness, high strength, complete biodegradability, and low-cost production; its surface was coated with PA 6 to improve adhesion to the matrix, water absorption, and thermal stability.

The coating process of hemp fibres was investigated prior to composite production. SEM, FTIR, DSC, and TGA analyses revealed that the coating process adequately covered the surface, flattened the fibre surfaces, and made them thermally more stable. Tensile tests revealed that the coating process using a 1 mm nozzle resulted in a 137% increase in surface coating, a 12% decrease in tensile strength and a 42% decrease in elongation at break compared to hemp, while the elastic modulus increased by 43%.

In composite production, fibres with these values were manually placed in the mould and PU mixture was poured over them. Comparisons were made between PU, Hemp/PU and PA 6-Hemp/PU. SEM analysis revealed that the porosity of the composites increased compared to PU, and that the use of coated hemp resulted in a less porous structure. The density values were found to be 1.070 g/cm³ for PU, 0.855 g/cm³ for Hemp/PU, and 0.948 g/cm³ for PA 6-Hemp/PU. The water absorption test results were 0.4% for PU, 1.85% for hemp/PU, and 1.65% for PA 6-hemp/PU. The decrease in density and increase in water absorption due to the porous structure are consistent with the experimental data. As a result of the tensile test applied, the highest strength value was measured at 23.4 MPa in the PA 6-Hemp/PU sample, the elongation at break was 4.2% in the PU sample, and the elastic modulus was 1057.2 MPa in the PA 6-Hemp/PU sample. In the three-point bending test, the maximum stress was 47.1 MPa in the PU sample, the maximum elongation was 6.5% in the PU sample, and the elastic modulus was 1250.7 MPa in the PA 6-Hemp/PU sample. When examining the

stress-strain graphs of the mechanical tests, it was observed that the PA 6-Hemp/PU composite has a rigid structure.

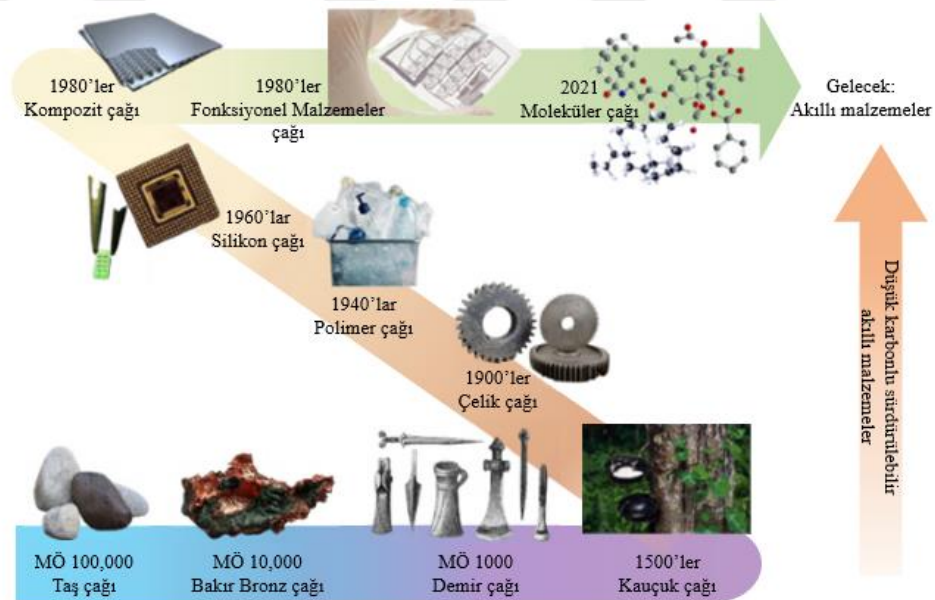
In view of all the results obtained, it is possible to produce composites that are lighter, harder, more resistant to deformation, but with high water absorption potential. These composites can be used in furniture support units, vibration-preventing units in transportation, and internal support fillings in sports equipment.

Keywords: Hemp, Lignocellulosic composite materials, Polyurethane, Composite.



1. GİRİŞ

Malzeme bilimi gerek medeniyetlerin ilerlemesinde gerekse teknolojik gelişmelerde önemli rol oynamaktadır. Örneğin, Demir Çağı'nda demirin keşfi, toplumların silah üretmesini sağlamış; 1940'lardan itibaren ise polimer malzemelerin geliştirilmesi, ev eşyalarından otomotiv parçalarına kadar birçok sektöre kaynak oluşturmıştır. Şekil 1.1'de mühendislik malzeme sistemlerinin tarihsel gelişimi ve gelecekte düşük karbonlu sürdürülebilir akıllı malzemelerin geliştirileceği gösterilmektedir [1].



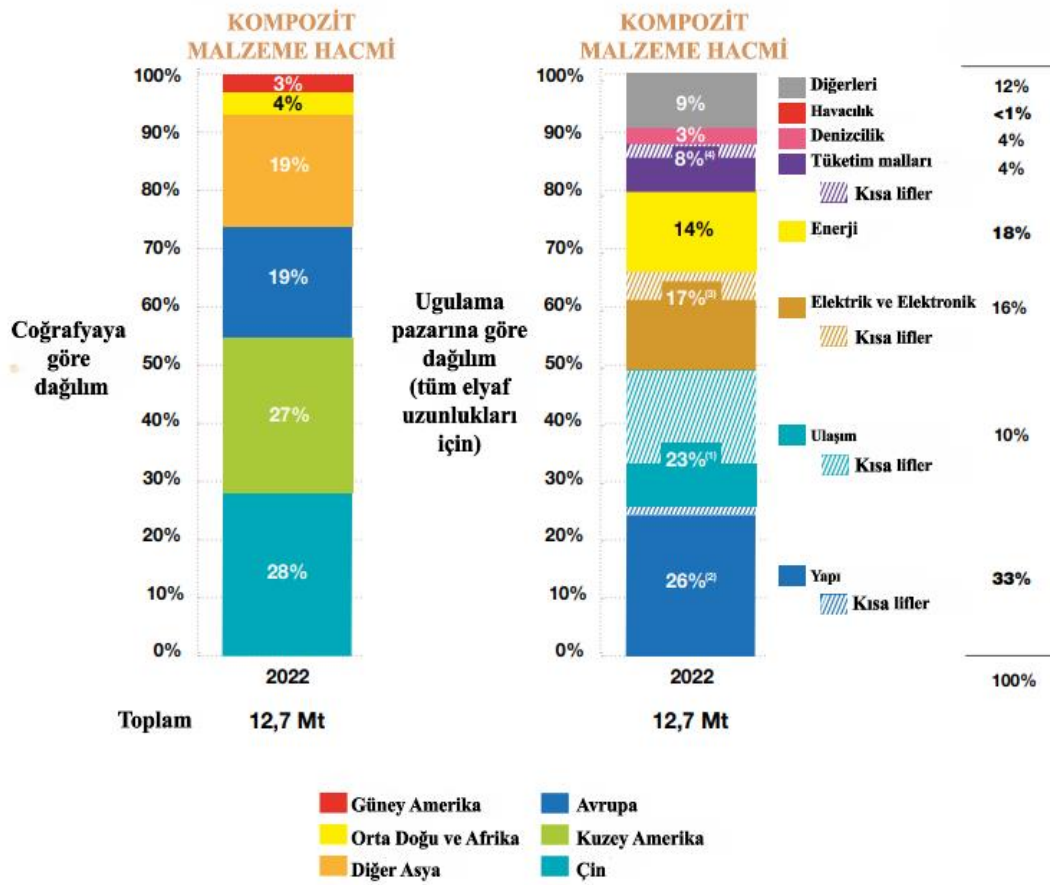
Şekil 1.1: Mühendislik malzeme sistemlerinin tarihsel gelişimi [1].

İnsanlığın artan ihtiyaçları daha iyi özelliklere sahip farklı malzemelerin talebine yol açmıştır. Malzeme tercihinde birden fazla malzemeyle oluşturulan seçeneklere yönelme olmuştur. Bu şekilde oluşturulan kompozit malzemeler sayesinde kompozitte yer alan her bir malzemenin karakteristik özelliklerinin daha iyi bir formu yakalanmak istenmektedir.

1.1 Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerde matris adı verilen sürekli bir ortamda dağılmış faz(lar) mevcuttur. Dağılmış fazın işlendikten sonra ve/veya servis/yeniden işleme sırasında orijinal kimliğini koruması beklenmektedir. Kompozitlerin özellikleri; bileşenlerin özelliklerine, oranlarına, dağılmış fazın geometrisine ve dağılımına bağlıdır [2].

Birçok sektörün kesişim noktası olan kompozitler; havacılık, otomotiv ve gemi yapımının yanı sıra inşaat, spor, tıbbi ve elektronik gibi büyük uygulama sektörlerine malzeme, parça ve ürün sağlamaktadır. 2022 yılı sonunda, 41 milyar dolarlık kompozit malzeme pazarının 105 milyar dolar değerinde kompozit parçalardan yapılmış montaj pazarına olanak sağladığı görülmüştür. Şekil 1.2’ de 2022 yılına ait hem coğrafi hem de sektörel olarak kompozit malzeme pazarı dağılımı gösterilmiştir. Global kompozit malzeme pazarının 2027 yılında toplam büyümesinin %3-4 arasında olacağı öngörülmektedir [3].



Şekil 1.2: 2022 yılı coğrafi ve sektörel kompozit malzeme pazarı dağılımı [3].

Türkiye’de kompozit malzeme sektörü ele alındığında, 2017 yılına kadar %8- %12 arasında büyüme gösteren sektörün hem kişi başı kompozit tüketim miktarı hem de kilogram başına ortalama maliyeti ileriki dönemler için avantaj sağlayabileceği öngörülmüştür. Çizelge 1.1’de sektörel bazda kompozit malzeme kullanım oranları verilmiştir [4].

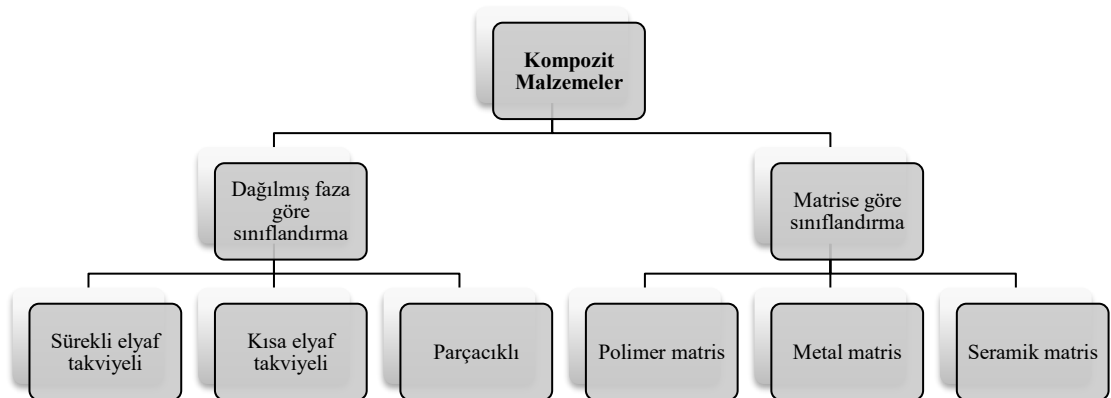
Çizelge 1.1: Sektörel bazda kompozit malzeme kullanım oranları [4].

	Dünya (%)	Avrupa (%)	Türkiye (%)
Taşımacılık- otomotiv	28	30	24
Yapı-inşaat	19	20	21
Elektrik-Elektronik	16	14	5
Boru-altyapı	15	13,5	36
Tüketici malları	8	3	3
Rüzgâr gücü	7	12	7
Denizcilik	3	5	2
Savunma ve havacılık	0,5	0,5	-
Diğer	3,5	2	2

Kompozit malzemeler tüm bu sözü edilen sektörlerde mukavim olmaları, hafiflikleri, tasarım çeşitliliği, elektrik yalıtımına olanak sağlamaları, paslanmaz ve aşınmaz olmaları sebebiyle birçok başarılı uygulamayla çelik, alüminyum ve metal alaşımlı malzemelere tercih edilmektedir [4].

1.1.1 Kompozit malzemelerde sınıflandırma

Kompozitler genel olarak doğal kompozitler ve sentetik kompozitler olarak sınıflandırılabilir. Doğal kompozitlere kemik ve odun örnek verilebileceği gibi sentetik olanlar da insanlar tarafından üretilen kompozitlerdir [2]. Ayrıca Şekil 1.3’ te gösterildiği gibi farklı sınıflandırmalar da yapılabilmektedir.



Şekil 1.3: Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.

Mühendislik malzeme pazarının önemli bölümünü oluşturan elyaf takviyeli kompozitlerde cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyaf gibi sentetik elyafların yanı sıra doğal lifler olan muz, keten, kenevir, jüt, kenaf, malva, rami, şeker kamışı gibi lifler kullanılmaktadır. Parçacıklı kompozitlerde ise genellikle daha yumuşak bir matriste rastgele dağılmış sert parçacıklar mevcuttur [5].

Matrislerine göre ayırdığımız kompozitlerde; polimer sınıfında sentetik tür olarak epoksi, poliüretan (PU) ve poliester (PES) gibi termosetlerin yanı sıra polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polistiren (PS) gibi termoplastikler kullanılırken, doğal tür olarak biyolojik olarak parçalanabilen alifatik polyester, nişastalar ve elastomer olarak doğal kauçuk gibi kauçuklar kullanılır [6]. Metal sınıfında Alüminyum alaşımları, Titanyum alaşımları, Magnezyum alaşımları ve Bakır gibi malzemeler ile seramik sınıfında Silika, Zirkonya ve Alümina gibi kristal oksitlerin yanında Magnezyum Alüminosilikatlar ve Kalsiyum Alüminosilikatlar gibi Cam ve Cam-Seramik malzemeler kullanılır [2].

1.1.2 Kompozit malzemelerin üretim teknikleri

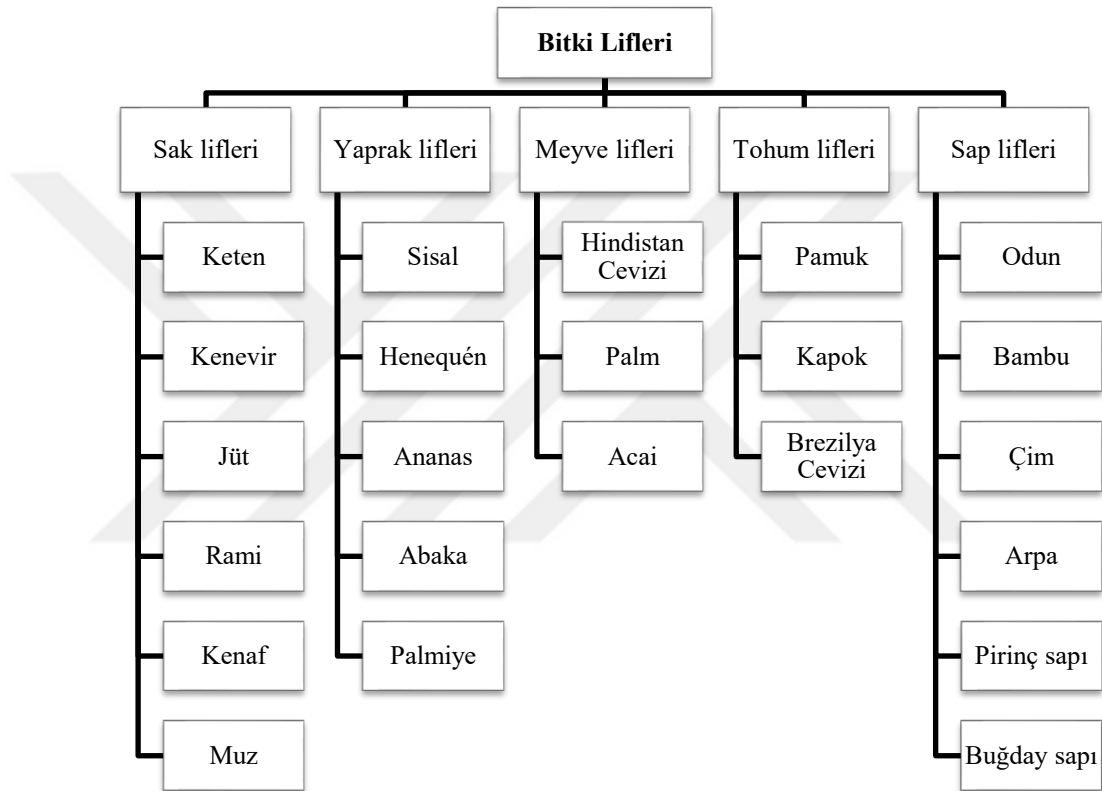
Kompozit malzeme üretim teknikleri matris yapısına göre değişmekle birlikte beliren ihtiyaçlar doğrultusunda sürekli gelişim göstermektedir. Çizelge 1.2’ de matris sınıflarına göre kullanılan bazı üretim teknikleri verilmiştir [7].

Çizelge 1.2: Matris sınıflarına göre üretim teknikleri [7].

Polimer Matris	Metal Matris	Seramik Matris
Elle yerleştirme	Karıştırmalı döküm	Katı hal
Vakumlu torba kalıplama	Sıkıştırarak sızma	Sol-Jel
Filament sarımı	Sprey biriktirme	Eriyik infiltrasyonu
Pultrüzyon	Reaktif işleme	Bulamaç döküm
Reçine transfer kalıplama	Toz işleme	Doğrudan metal oksidasyonu
Sıkıştırma kalıplama	Folyoların difüzyonla yapıştırılması	Sıvı silikon infiltrasyonu
Enjeksiyon kalıplama	Fiziksel buhar biriktirme	Kimyasal buhar sızması
Sandviç kalıplama	Partiküllerin spreyleştirilmesi	Reaksiyon işleme

1.2 Lignoselülozik Kompozit Malzemeler

Lignoselülozik malzemeler, ağaçlar, çalılar ve tarımsal ürünler tarafından üretilen organik maddeyi ifade eder. Lignoselülozikler, düşük maliyet, yenilenebilirlik, toksik olmama, biyolojik olarak parçalanabilirlik gibi diğer geleneksel malzemelere göre avantajları nedeniyle gıda ambalajı, kompozit ve tekstil endüstrilerinde kullanılmaktadır [6]. Şekil 1.4’ de bitki lifleri olarak da adlandırılan lignoselülozik liflerin sınıflandırılması verilmiştir [8].

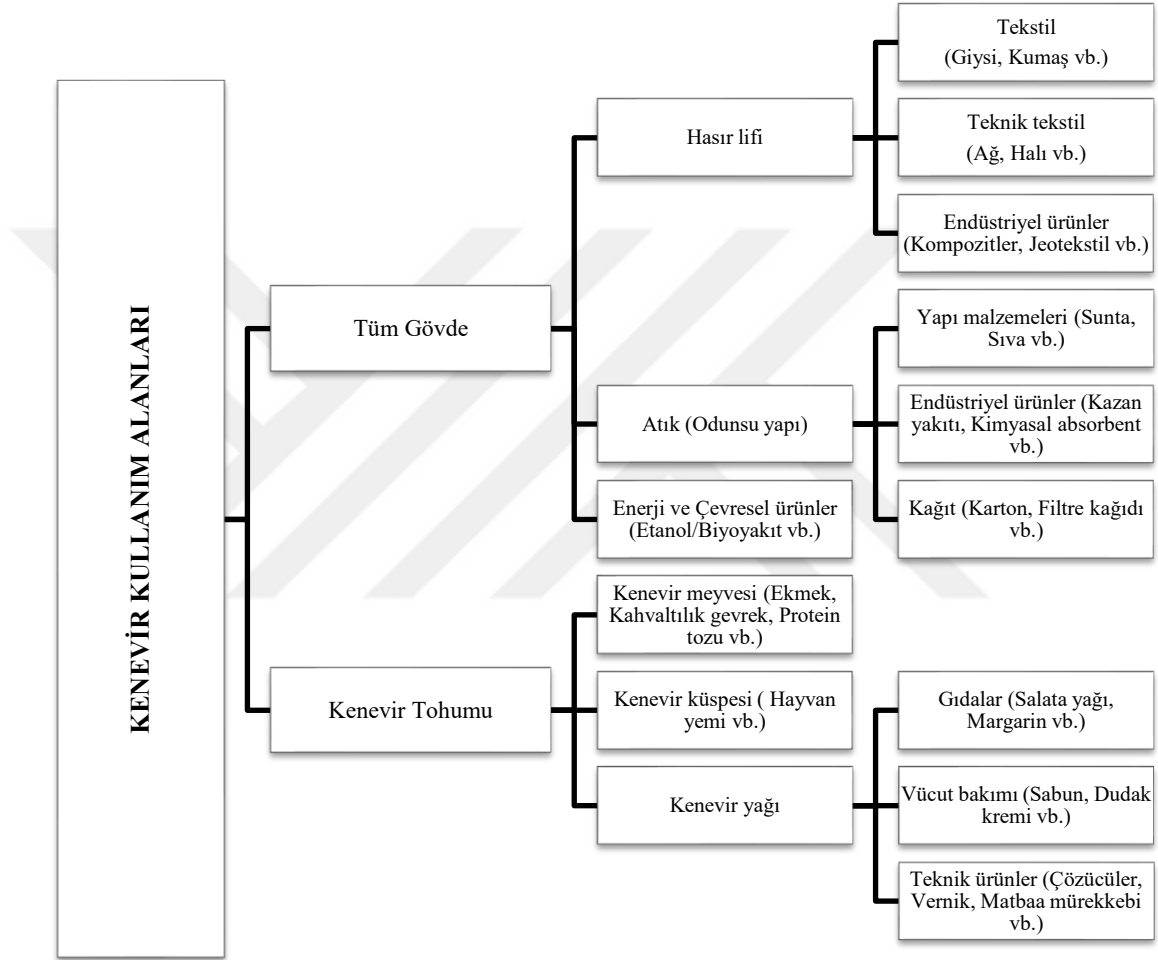


Şekil 1.4: Bitki liflerinin sınıflandırılması [8].

Elyaf takviyeli kompozitlerde, lifler yük taşıyan elemanlardır. Matris malzemesi, elyaf takviyelerini bir katı halinde birbirine bağlar. Kompozit yüklemeye maruz kaldığında yükü liflere aktarır. Aynı zamanda takviyeleri korumaya yarar ve kompozitlerin dokusu, rengi ve işlevsel özellikleri matrisin modifikasyonu yoluyla kazandırılır [2]. Matris olarak polimer matris çoğunlukla tercih edilse de seramik matris kullanımları da mevcuttur.

1.2.1 Kenevir

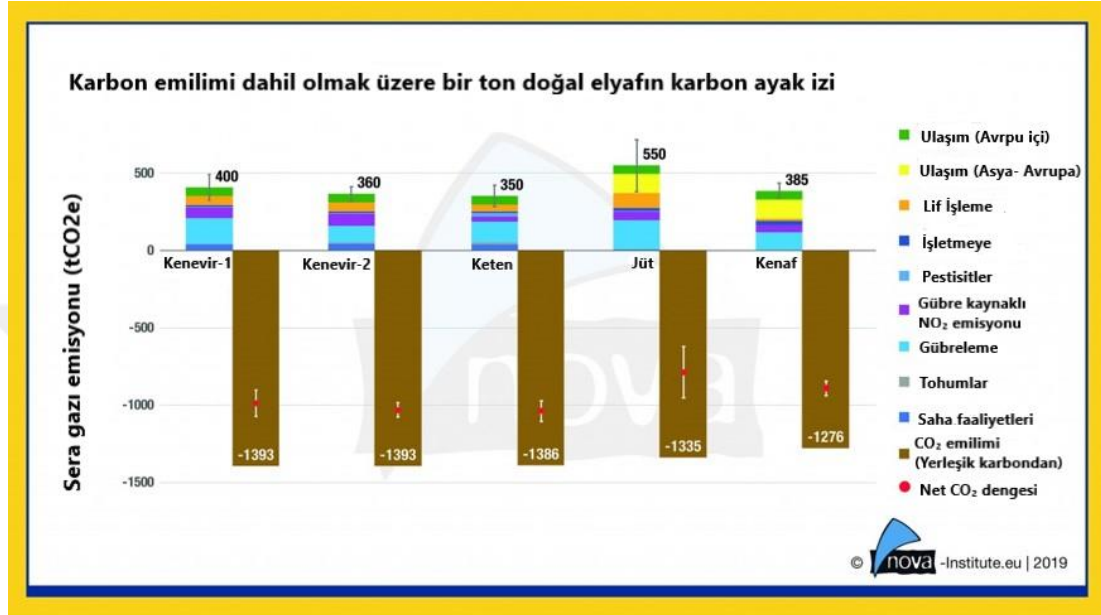
Lignoselülozik malzeme olan Kenevir; Cannabinaceae familyasına ait tek yıllık, otsu, dioik, çiçekli bir bitki olup lif (Cannabis sativa) ve ilaç ham maddesi (Cannabis indica) elde etmek için yetiştirilmektedir [9]. Kenevir bitkisinin kullanım alanları daha detaylı olarak Şekil 1.5'te verilmiştir [10].



Şekil 1.5: Kenevir bitkisinin kullanım alanları [10].

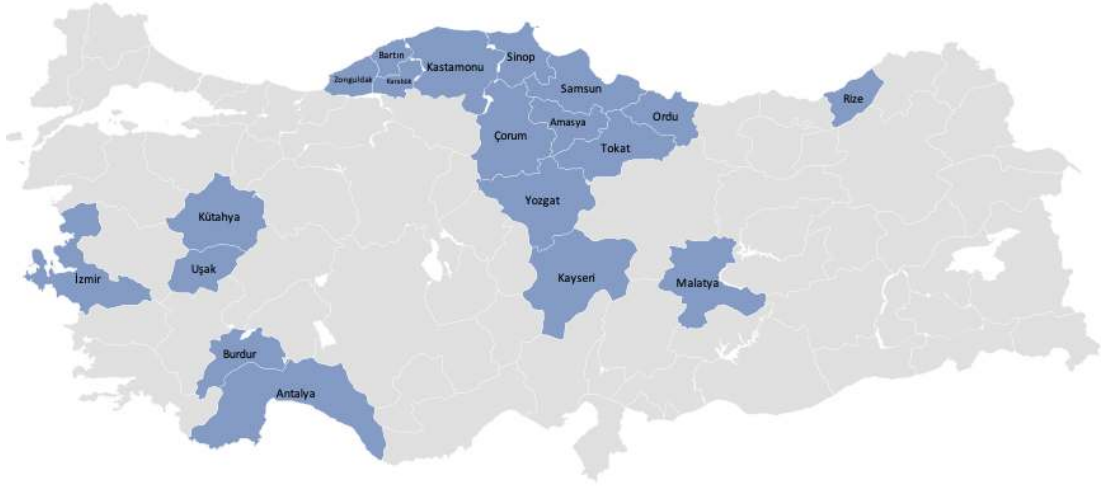
Küresel kenevir pazar büyüklüğünün 2023 yılında 5,49 milyar ABD doları olduğu tahmin edilmekteyken 2024'ten 2030'a kadar %17,5'lik bir yıllık bileşik büyüme oranıyla büyümesi beklenmektedir [11]. Özellikle sürdürülebilirlik olgusuna odaklanmış sektörler kenevir bazlı üretime yönelmektedir. Plastik kirliliğinin artması gibi sebeplerle doğada çözünebilir, yenilenebilir ve düşük karbon salınımı yapan kenevir bazlı biyoplastikler geliştirilmektedir [12].

Şekil 1.6’da küresel anlamda ısınmaya sebep olan sera gazı emisyonları göz önünde bulundurulduğunda keten, kenevir, jüt veya kenaf gibi doğal elyafların karbon ayak izinin sentetik elyaflardan çok daha düşük olduğu gösterilmiştir. Tüm prosesler göz önünde bulundurulduğunda doğal elyafların cam elyaf kompozitlere kıyasla yaklaşık %50 daha düşük karbon ayak izine sahip olduğu ortaya çıkmıştır [13].



Şekil 1.6: Doğal elyafların (karbon emilimi dahil) karbon ayak izi [13].

Anadolu’daki geçmişinin M.Ö. 1500’lü yıllara dayandığı düşünülen kenevirin 2019 yılında yayımlanan “Türkiye’de Endüstriyel Kenevir Yetiştiriciliği Raporu ve Eylem Planı” ile devlet tarafından önemi ortaya konulmuş ve kenevire dayalı sanayinin ve mekanizasyon sistemlerinin geliştirilmesi ve öncelikli yatırım alanlarının belirlenmesi belirlenmiştir [9]. Şekil 1.7’de kanun ile belirlenmiş Türkiye’deki kenevir üretim alanları verilmiştir [14].



Şekil 1.7: Türkiye’deki kenevir üretim alanları [14].

Kenevir liflerinin yapısında %70-74 selüloz, %15-20 hemiselüloz ve %3,5-5,7 lignin, %0,8 pektin ve %1,2-6,2 bal mumu bulunur. Pektin ile su tutma kabiliyeti, lignin ile kimyasallara karşı direnç, hemiselüloz ile nefes alabilirlik özelliklerine sahipken lignin varlığı kırılabilirliğe ve selülozun varlığı derişik inorganik asitlerden etkilenmesine sebep olur [14]. İstenmeyen bu özelliklerinin bertaraf edilmesi için bazı ön işlemlerden geçirilir. Elyaf ve polimer matrisi arasındaki yapışma (i) elyaf yüzeyinin modifiye edilmesi, (ii) polimerin modifiye edilmesi veya (iii) her ikisinin aynı anda modifiye edilmesi ile geliştirilebilir. Yüzey modifikasyonu, lignoselülozik elyafların hidrofilik karakterini azaltmak, elyaf ve matris arasındaki ıslanabilirliği geliştirmek ve elyaf/polimer matris yapışmasını iyileştirmek için gereklidir ve Çizelge 1.3’ te temel yüzey işlemleri listelenmiştir [7].

Çizelge 1.3: Temel yüzey işlem teknikleri [7].

Yüzey İşlemleri	
Kimyasal	Alkali– Silan- Esterifikasyon- Etherifikasyon- İzosiyanat- Benzoilasyon-Oksidasyon- Peroksit
Fiziksel	Plazma– Korona– Buhar Patlaması– Dielektirik Bariyer- Termo-mekanik
Biyolojik	Mantar- Enzimatik

Elyaf ve matris arasındaki yapışmanın iyileşmesini sağlamak için belirtilen yüzey işlem tekniklerinin yanında elyafı polimer ile kaplamak tercih edilen bir yöntemdir. Kaplama işlemi ile elyafın bozunma direnci de artırılabilir [6].

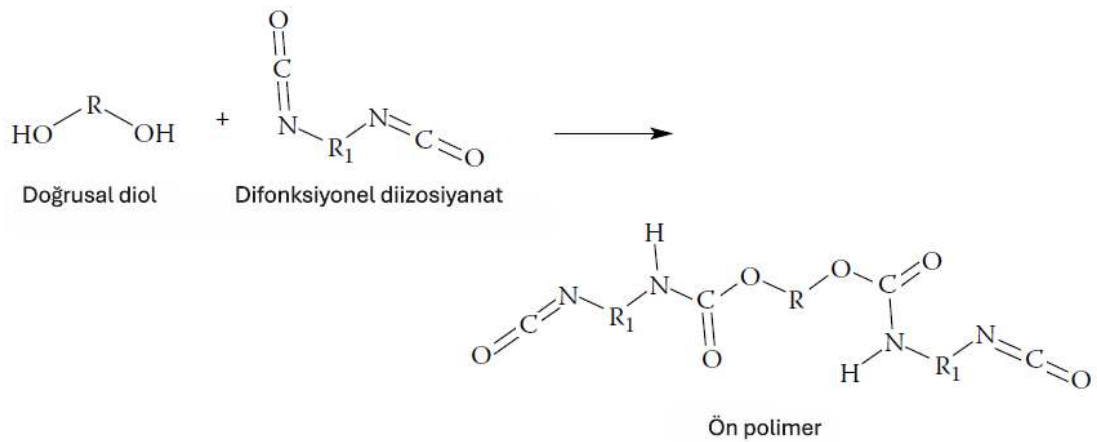
1.2.2 Poliamid 6 (Naylon-6, PA 6)

Polimer sektörünün en çok talep edilenlerinden biri olan naylon, poliamidler olarak bir grup polimeri temsil eden ortak bir kelimedir. Naylon-6, en az maliyetli naylon olması nedeniyle naylon ailesinin ünlü üyesidir. İlk olarak askeri alanlarda kullanılan Naylon-6, yüksek çekme mukavemeti, sertlik ve sürünme direnci, yüksek darbe direnci, iyi sıcaklık direnci, iyi sürtünme ve aşınma özelliklerinin yanı sıra elastikiyet gibi birçok özelliği sebebiyle çok sayıda sektörde kullanım alanına sahiptir. Aşınmaya ve birçok kimyasal karşı oldukça dayanıklıdır. Neme duyarlı yapısı mekanik özelliklerinde düşüşe sebep olabilir [15].

Poliamidler doğal liflerle hidrofilik yapıları sayesinde büyük etkileşim gösterir. Böylece üretim süresinin kısalmasını ve kompozit malzeme maliyetini artıran bağlayıcı maddelerin kullanımını ve doğal liflerin yüzey modifikasyonunu ortadan kaldırmaya olanak sağlar [16].

1.2.3 Poliüretan (PU)

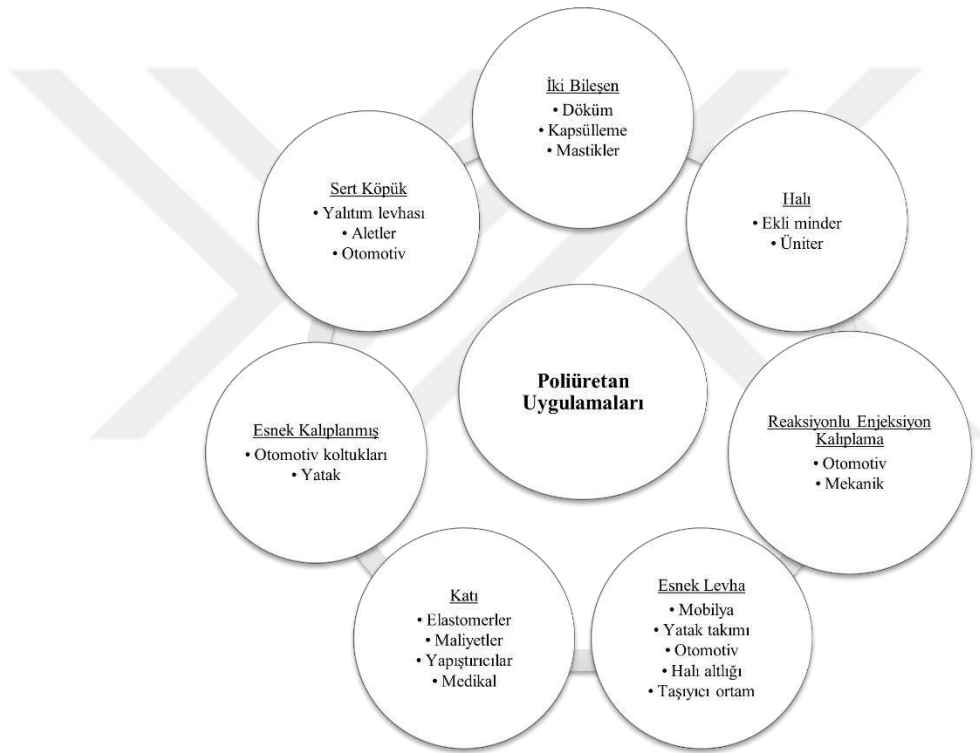
Naylona alternatif lif üzerine yapılan çalışmalar sonucu Almanya’da keşfedilen PU, izosiyanat ve poliöl gibi hidroksil işlevselliğe sahip bir malzemenin reaksiyonu sonucu elde edilir [17,18]. Örnek olarak Şekil 1.7’de döküm poliüretanın ön polimer reaksiyonu gösterilmektedir [18]. Bu iki bileşenin dışında reaksiyonu kontrol etmek ve istenen nihai ürüne ulaşmak için bazı katkı maddeleri de eklenebilir. Bunlar katalizörler, zincir uzatıcılar, çapraz bağlayıcılar, dolgu maddeleri, nem tutucular, renklendiriciler gibi maddelerdir [19].



Şekil 1.8: Döküm poliüretanın ön polimer reaksiyonu [18].

Poliüretanın kimyasal yapısı termoplastik veya termoset olabildiği gibi, fiziksel yapısı da katı-sert, yumuşak-elastomer veya köpük olabilir. Dallanma veya çapraz bağlanma derecesi ve zincir sertliği, zincirler arası çekim, kristallik kriterleri yapı-özellik ilişkilerini etkileyen faktörlerdir. Çok çeşitli formunun olması birçok alanda kullanımına olanak sağlar, PU uygulama örnekleri Şekil 1.7’de gösterilmiştir [17].

Temelde Lif, Film, Dökülebilir, Termoplastik, Köpük ve İşlenebilir olarak sınıflara ayrılan PU düşük sıcaklıklarda yüksek darbe dayanımını koruması, kolayca köpürmesi ve aşınmaya, yırtılma yayılmasına, ozona, oksidasyona, mantara ve neme karşı dayanıklı olması ile tercih edilir [17,18].



Şekil 1.9: Poliüretan kullanım alanları [17].

1.3 Çalışmanın Amacı

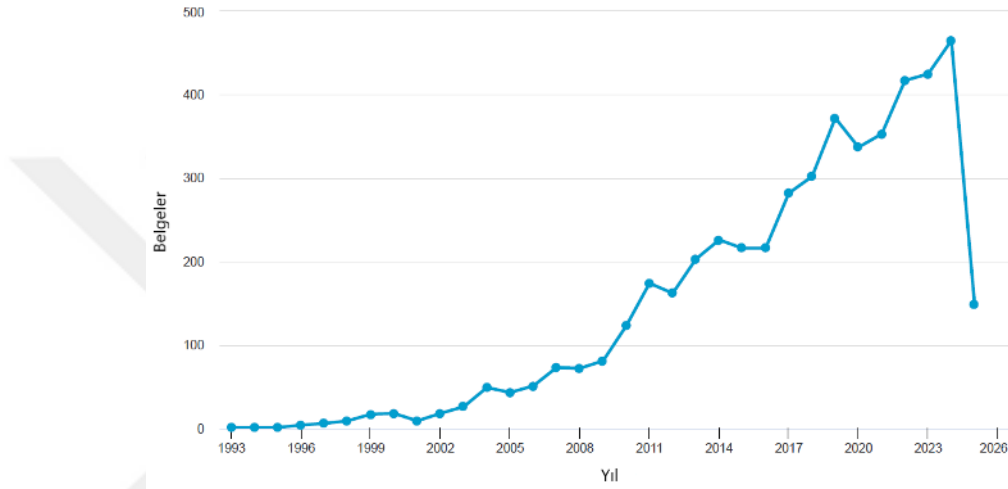
Bu çalışma, tüm dünyada sürdürülebilir ve doğada çözünebilir malzemeler kullanımının ön plana çıkması sebebiyle doğal lif olan kenevirin kompozit üretiminde kullanılan sentetik liflere alternatif olarak kullanımını ve araştırılan özellikleri açısından daha iyi bir malzeme üretmeyi amaçlamıştır. Kenevir hem maliyetli hem de atık ürün oluşumu fazla olan yüzey modifikasyonu işlemi yerine doğal liflere etkileşimi yüksek PA 6 ile kaplama yapılarak yüzeyinin matrise tutunması sağlanmaya

alışılmıştır. Polimerler arasında oldukça fazla kullanılan PU tercih edilerek kompozit üretimi gerçekleştirilmiş olup takviye fazı olarak kaplanan kenevirler kullanılmıştır. Kenevir- PA 6 kaplanmış kenevir, PU- Kompozit PU morfolojik, fiziksel, mekanik ve termal özellikleri açısından karşılaştırılmıştır.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde kenevir kompozitler üzerine hazırlanan belgelere ait grafik Şekil 2.1’de verilmiştir. 32 yıldır yapılmakta olan çalışmalar son yıllarda ivme kazanmıştır [20].



Şekil 2.1: Yıllar içinde kenevir kompozitler üzerine hazırlanmış belgeler[20].

Doğal liflerle hazırlanan polimer matrisli kompozitlere ait çalışmalardan bazıları şu şekildedir:

M. Scheibe ve arkadaşları; uzun life sahip kenevir ipliklerinden yapılan kenevir kumaşını hem alkali işleminden geçirerek hem de geçirmeyerek, yatların ve motorlu teknelerin kabuk ve yapısal ekipmanlarının üretilmesinde kullanılan cam elyaf takviyeli kompozitlere alternatif olarak üretmeyi amaçlamışlardır. Kenevir kumaşı ve poliester bazlı reçine ile 5 farklı katman sayısı tercih ederek yat ve motorlu tekne üretimi prosedürüne göre üretmişlerdir. Üretilen kompozitlere yoğunluk, su absorpsiyonu, çekme dayanımı, eğilme dayanımı, Charpy darbe testleri ve darbe testi sonrası morfolojik görüntüleme (SEM) gerçekleştirmişlerdir. Karşılaştırmalarının sonunda alkali işlem görmüş kompozitlerin yoğunluklarının düştüğünü ancak su absorpsiyon kapasitelerinin arttığını görmüşlerdir. Çekme testlerinin sonucunda kenevir katmanları arttıkça maksimum çekme kuvvetinin arttığını ancak alkali işlem görmüş kompozitlerin maksimum çekme kuvvetlerinin işlem görmemişlere göre daha düşük kaldığını belirtmişlerdir. Kopma uzaması değerlerinde ise alkali işlem görmüş

kompozitler daha yüksek değer verirken çekme dayanımında durumun tam tersi olduğunu söylemişlerdir. Eğilme dayanımı testinde sonuç olarak alkali işlem görmemiş kompozitlerin daha iyi olduğunu, Charpy darbe dayanımında da işlem görmüş kompozitlerin daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. SEM görüntülemeleriyle her iki kompozit türünde mikro gözenekli, kısmen deforme olmuş kenevir takviye liflerinin varlığı tespit edip matriste tutarsızlık gözlemişlerdir. En nihayetinde alkalizasyon işleminin gerekli olmadığını belirterek yüksek katmanlı işlem görmemiş kompozitlerin hedef yapılarda kullanılabileceğini belirtmişlerdir [21].

M. A. Lakho ve arkadaşları; jüt kumaşın vinil ester reçinesine takviye olarak kullanımını araştırmışlardır. “Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama” metoduyla ürettikleri numunelerin geleneksel kompozit malzemelere kıyasla çekme mukavemeti, elastikiyet modül ve çekme uzaması değerlerini hesaplamışlardır. Piyasada var olan üç farklı kompozite kıyasla ürettikleri kompozitlerin çekme mukavemeti, elastik modül, çekme uzaması değerlerinin arttığını yoğunluğunun ise düştüğünü gözlemlemişlerdir [22].

K. Takemura ve arkadaşı; jüt ve keneviri takviye malzemesi olarak biyobozunur reçine ve polipropilen matrislerinde kullanarak kompozit üretimi gerçekleştirmişlerdir. Vakum kalıplama yöntemine göre üretilen numunelerde çekme mukavemeti, Young modülü ve SEM görüntülemesi gerçekleştirmişlerdir. Kenevir-polipropilen kompozitlerde lif yüzdesi arttıkça çekme mukavemetinin ve Young modülü değerinin arttığını, yeşil kompozitte ise kenevirin jüte göre daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Kenevir yeşil kompozitlerin ısıtma sıcaklığı ve kalıplama süresi araştırılmış; kalıplama süresi arttıkça Young modülünün arttığını, ısıtma süresinin artmasıyla da çekme kuvvetinin düştüğünü gözlemlemişlerdir. Yeşil kompozitlerde lif yüzdesinin %50’ye kadar artması çekme mukavemetini arttırırken lif yüzdesinin dahada artması bu değerden sonra mukavemette azalmaya neden olduğu bildirilmiştir. SEM görüntüleri sonrasında az sayıda çekilmiş lif görülmesi ve kırılma yüzeyinin gevrek olmaması sebebiyle en uygun kalıplama sıcaklığını 180°C, baskı süresini ise 20 dk olarak belirtmişlerdir [23].

S. P. Ayyampilli ve arkadaşları; epoksi reçine matrisli kenevir ve koyun yünü elyaf takviyelerini 60:40 (reçine: elyaf) ağırlık oranı kullanarak kompozit üretimi yapmışlardır. Vakumlu torba kalıplama metoduyla üretilen sandviç numunelerin mekanik ve akustik özelliklerini değerlendirmişlerdir. 3 farklı katman modeli

çalışmışlardır. Kenevir takviyeli kompozitlerin maksimum çekme mukavemetine sahip olduğunu, kenevir-yün-kenevir lifli kompozitlerin ise daha iyi akustik özellikler sergilediğini belirtmişlerdir. Ses emilimi için sentetik elyaflara alternatif olduğu sonucunu söylemişlerdir [24].

W. Zhao ve arkadaşları; florlanmış su bazlı poliüretan emülsiyonu ile kenevir kumaşı ve selüloz filtre kağıdını kaplamışlardır. Su bazlı poliüretan emülsiyonlar FTIR, SEM, TGA ve gibi analizlere tabii tutulurken kompozitler çekme dayanımı, katlanma dayanımı ve kırışık kurtarma açısı gibi analizlere tabii tutulmuştur. Sonuç olarak florlanmış su bazlı poliüretanın temas açısının artıp hidrofobik özelliğinin iyileştiğini, florlanmış emülsiyonun kullanıldığı kompozitlerde de temas açısının arttığı bulunmuştur. Poliüretan modifikasyonunun başarılı olduğunu FTIR, SEM ve TGA analizleri ile doğrulamışlardır. Tüm kompozitlerin çekme mukavemetleri artarken kenevir kompozitlerin kırışık kurtarma açılarının ve kâğıt kompozitlerin katlanma dayanımlarının da arttığını bildirmişlerdir [25].

F.Ahmad ve arkadaşları; sol-jel tekniği ile kenevir/aljinat hidrojel kompozitini yar örtüsü olarak geliştirmişlerdir. Farklı alijinat konsantrasyonlarını ve metre kare başına düşen farklı dokunmamış kenevir liflerini çalışmışlardır. Kompozitin performansını morfolojik, kimyasal yapı, mekanik (çekme mukavemeti, uzama), konfor, yara eksüdası ve anti-bakteriyel özellikler üzerinden değerlendirmişlerdir. Kompozitlerde SEM görüntüleriyle çapraz bağlar sebebiyle boşlukların olmamasıyla, hidrojel ve metre kare başına düşen kenevir lifi miktarı arttıkça hava geçirgenliğinin düştüğünü gözlemlemişlerdir. Hidrojel katmanının kalınlaşmasının nemi daha çabuk emdiğini belirtip kenevirin kalınlaşmasının ise tam tersi etki yaptığını belirtmişlerdir. Kompozitlerin çekme dayanımında daha yüksek sonuçlar verirken uzamada düşük sonuçlar verdiğini iletmiş artan derişim ve metre kare başına düşen kenevir lifi miktarları ile çok yüksek farklar elde edildiğini iletmişlerdir. Yara eksüda özelliğinin hidrojel derişimin artmasıyla doğru orantılı olduğunu antibakteriyel özelliğinin ise kompozitler dokunmamış kenevire göre yüzeyde görüldüğünü belirtmişlerdir [26].

A. Raju ve arkadaşı; dört tip petek sandviç kompozitin (cam elyaf takviyeli epoksi, çok duvarlı karbon nanotüp ve cam elyaf takviyeli epoksi, kenevir elyaf takviyeli epoksi, çok duvarlı karbon nanotüp ve kenevir takviyeli epoksi ve kabuklarına çok duvarlı karbon nanotüp eklenmiş) burkulma, titreşim ve sapma özelliklerini karşılaştırmışlardır. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin kenevir elyaf takviyelilere göre

bahsedilen özelliklerde daha iyi olduğunu ancak kabuklara çok duvarlı karbon nanotüp eklenmesinin kenevir elyaf takviyelilerin özelliklerini oldukça iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Kenevir elyaf takviyeli kompozitlerin, statik ve dinamik yük taşıyan yapısal uygulamaların çoğunda sentetik polimerin yerini alabileceğini iletmişlerdir [27].

S. P. Singh ve arkadaşları; el yatırma yöntemi kullanılarak üç farklı tip jüt-epoksi ve kenevir-epoksi lamine kompozit üretmişlerdir. Deneylerden çekme dayanımı, eğilme dayanımı, kesme dayanımı, yoğunluk, frekans ve sönümlenme özelliklerini belirlemişlerdir. Farklı katman sayılarında üretilen kompozitlerin her iki türünde katman sayısı arttıkça mekanik sonuçların arttığını kenevir kompozitlerin de jüt kompozitlere göre daha iyi sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir. Yoğunluk verilerinde katman sayısının pek etkili olmadığını söylemişlerdir. Sönümlenme jüt kompozitte iyiyken doğal frekansın kenevirde yüksek değerde olduğunu söylemişlerdir [28].

A. M. Khalid ve arkadaşları; esnek poliüretan köpük için takviye fazında (1:1) hindistan cevizi ve pirinç kabuğu kullanarak biyokompozit üretmişlerdir. Farklı takviye ağırlık oranlarını belirleyip elle karıştırma ve döküm tekniği ile üretim yapmışlardır. Çekme testi, su emilim ölçümleri ve termal öz direnç testlerini gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlara baktıklarında takviye yüzdesinin artmasıyla çekme dayanımının artıp uzamanın azaldığını görmüşlerdir. Su emme miktarının takviye eklenmesiyle arttığını ancak takviye yüzdesi arttıkça bu oranın azalma eğiliminde olduğunu bildirmişlerdir. Termal öz direnç verilerini ticari yalıtkanların verilerinden yola çıkarak kullanılabilir alanda tespit edip, böylelikle klima boruları için yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir önerisinde bulunmuşlardır [29].

H. Alshahrani ve arkadaşı; silanla modifiye edilmiş Sunn (Hint) keneviri lifi ve Pisum Sativum (Bezelye) kabuğundan elde edilen nanoselüloz ile poliestere kullanarak elle yatırma tekniğiyle kompozit üretimi gerçekleştirmiş ve kompozitin mekanik, yorulma, düşme yükü etkisi ve dinamik mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Kenevir yüzdesini sabit tutup nanoselüloz ve poliesterin farklı bileşim yüzdeleriyle üretim yaparak saf poliesterle karşılaştırmışlardır. Mekanik testlerin karşılaştırmalarında takviye kullanımının verileri arttırdığını ve nanoselüloz kullanımının yüzdesel olarak artışının bu etkiyi sürdürdüğünü belirtmişlerdir. Ancak belli bir nanoselüloz yüzdesinden sonra değerlerde çok az düşme görmüş bunu da nanoselülozun topaklanmasına bağlamışlardır. Yorulma, düşme yükü ve dinamik mekanik testlerinin

sonuçlarının da mekanik testi sonuçları gibi değişim gösterdiğini iletmişlerdir. Ürettikleri kompozitlerin otomobil, havacılık, uzay bilimleri ve altyapı ve konut aletleri, biyomedikal ve spor uygulamalarının iç parçaları ve dış gövde kaplaması gibi alanlarda kullanılabileceğini belirtmişlerdir [30].

A. Corbin ve arkadaşları; Poliamid 12 ile sarılmış kenevir fitili kullanarak termokompresyon işlemiyle kompozit üretimi gerçekleştirmişlerdir. Fitili, dokumayı ve kompoziti tekstil ve mekanik özellikleri bakımından incelemişlerdir. Ayrıca, kenevir kompozitinin emdirme kalitesi için mikroskobik gözlemler yapmışlardır. Sarılı kenevirlerin dokuma için gereken minimum çekme mukavemetini sağladığını, dokumanın daha yüksek kalınlık ve alan yoğunluğuna ulaşır hava geçirgenliğinin düştüğünü gözlemlemişlerdir. Dokumaya uygulanan eğilme sertliği testlerinde fitillerin çözgü ve atkı yönünün farklılık göstermediğini ve kopma geriliminin atkı yönünde kopma uzamasının ise çözgü yönünde daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Tek katlı kompozitlerinin çözgü yönünde atkı yönünden daha yüksek kopma gerilimi ve gerinimine, 2 katlıların ise her iki yönde de çok az saçılma ile dengeli olduğunu belirtmişlerdir. Tek katlı kompozitlerinin üç yöndeki (çözgü, atkı ve 45°) eğilme davranışını benzer, 2 katlıların ise test yönüne göre farklı sonuçlar verdiğini bulmuşlardır [31].

H. Sezgin ve arkadaşları; sıcak pres yöntemiyle kenevir/polipropilen, pamuk/polipropilen ve kenevir-pamuk/polipropilen kompozitlerini farklı kalınlık ve takviye yüzdesi belirleyerek oluşturmuşlardır. Ses emilim katsayısını ve ses iletim kaybını karşılaştırmışlardır. Numune kalınlığının ve yoğunluğunun değişiminin ters orantılı olup ses emilim katsayısına etkisinin olmadığını gözlemlemişlerdir. Kompozitlerde polipropilen ve kenevir oranının artmasının ses emilim katsayısını arttırdığını, ancak düşük frekanslarda pamuk-kenevir ayrımı yapmanın pek de mümkün olmadığını belirtmişlerdir. Ses iletim kaybı değerinin kalınlık azalmasıyla tüm numuneler için arttığını, pamuk içeren kompozitlerin değerlerininse daha düşük olduğunu iletmişlerdir. Artan polipropilen miktarının da ses emilim kaybı değerini arttırdığını, tüm karşılaştırmalar sonunda en iyi kompozitlerin kenevir içerenler olduğunu söylemişlerdir. Böylelikle kenevirin gürültü kontrolü için ses yalıtımı ve emici malzeme olarak potansiyel taşıdığını belirtmişlerdir [32].

S. Behera ve arkadaşları; sodyum hidrojen karbonat ile işledikleri kenevir liflerini polilaktik asit ve polihidroksibütirat ile kaplayarak epoksi matrisli kompozitler

üretmişlerdir. Kompozitlerin mekanik, su emilimi ve tribolojik özelliklerini, kenevir liflerinin de işlenmemiş haliyle kaplanmış halleri arasındaki kristallik indeksi ve SEM görüntülerinin farklılığını araştırmışlardır. İşlenmemiş liflerin yüzeyinde safsızlık olduğunu kaplamadan sonra bu durumun ortadan kalktığını ve kristallik indeksinin kaplanmış olanlarda daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Kompozitlerde su emiliminin kaplamalı lifler sayesinde düştüğünü, en iyi sonucun polilaktik asit kaplı lif kullanılan olduğunu iletmışlerdir. Mekanik testlerde kaplamalı lifler sonuçları yükseltmiş en iyi sonuçlar ise polilaktik asit kaplı olanlar diye belirtmişlerdir. Tribolojik özelliklerin karşılaştırması da aynı şekilde sonuçlanmıştır [33].

R. Hamzaoui ve arkadaşları; karbon nanotüplerle birleştirilmiş kenevir liflerini çimento harcına farklı ağırlık yüzdesi ve ıslak/kuru durumlarıyla ekleyerek kompozit üretmişlerdir. Kompozitlerin mekanik özelliklerini incelerken karbon nanotüplerin eklenme yüzdelerinin sonuçlara etkilerini de araştırmışlardır. Islak lif kullanımının harcın basınç ve eğilme dayanımlarını arttırdığını optimum kullanım yüzdesinin 2,1 olduğunu iletmışlerdir. Karbon nanotüp eklenmesinin ise %0,01 oranında olmasının sonuçları iyileştirdiğini söylemişlerdir. Verilerini literatürdekilerle karşılaştırarak daha az miktarda karbon nanotüp kullanımının daha iyi sonuçlar verdiğini analiz etmişlerdir [34].

M.M. Kabir ve arkadaşları; kimyasal işlemden geçirdikleri kenevir liflerini poliestere reçine ile karıştırmış dış yüzeyi poliesterli kenevir kumaşı olan sandviç kompozitler üretmişlerdir. Liflerin kimyasal işlem sonrası FTIR spektroskopisi, SEM, DSC ve TGA gibi fiziksel ve termal özelliklerini, kompozitlerin de eğilme ve basınç dayanımı gibi mekanik özellikleri incelemişlerdir. İşlem gören tüm liflerin termal kararlılığının işlem görmeyenlere göre arttığını, yapılan kimyasal işlemlerin yüzeydeki lignini uzaklaştırdığını, yüzeyin daha pürüzlü ve sert olduğunu böylelikle hidrofilik yapının azaldığını görmüşlerdir. Alkali çözelti ile işlem görmüş ve %8 Sodyum hidroksit ile son ıslatılmış lifin, diğer işlem görmüş ve görmemiş lif kompozit örneklerinden daha iyi mekanik sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir [35].

H. Longkullabutra ve arkadaşları; işlenmemiş karbon nanotüpleri kenevir liflerine (bazı sıvılara emdirilmiş/emdirilmemiş) ve işlenmiş/işlenmemiş karbon nanotüpleri kenevir/epoksi kompozitlerine ekleyerek üretim gerçekleştirmişlerdir. Öncelikle kenevir lifi için en uygun sıvıyı bulup kompozit denemelerine geçmişlerdir. Üretilen numunelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kenevir lifinin en iyi sonucunun

epoksi reçine ile kullanımı olduğunu ve kompozitlerde durumun işlenmiş karbon nanotüp-kenevir-epoksi reçine birleşiminden elde edildiğini bulmuşlardır [36].

R. Abbel ve arkadaşları; kenevir liflerini çam kabuğundan elde edilen mumlarla kaplamış sonrasında da biyobazlı polyester ile birleştirmişlerdir. İki farklı bazda emülsiyon kullanarak lifler karşılaştırılmıştır. Polisorbit bazlı emülsiyonların lifler üzerinde daha homojen bir mum kaplaması oluşturduğunu Spirulina bazlı olanlarında topaklanma yaptığını gözlemlemişlerdir. Ancak farklı mum kullanımının kaplama kalitesi üzerinde önemli bir etkisi olmadığını belirtmişlerdir. Oluşturulan kompozitlerin (kaplanmış ve kaplanmamış lifli) mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Lif takviyesinin Young modülünde artışa ve kopma gerilmesinde düşüşe sebep olduğunu ancak aralarında mekanik özelliklerde pek fark olmadığını belirtmişlerdir [37].

C. Y. Désiré ve arkadaşları; %30 kenevir lifi içeren polietilen matrisli kompozitler üretmişlerdir. Kenevir liflerinin kullanımdan önce 1,2,4-triklorobenzen içinde çözünen maleik anhidrit aşılı polietilen ile işlem gördüğünü bildirmişlerdir. İşlem gören lifleri termal ve karakteristik özellikleri ile kompozitleri ise morfolojik, reolojik ve mekanik özellikleriyle karşılaştırmışlardır. SEM analizi, modifiye liflerin yüzeyinde ince bir maleik anhidrit tabakası oluştuğunu ortaya koyarken MAPE modifikasyonunun modifiye edilmemiş numuneye kıyasla modifiye kenevirin termal stabilitesini artırdığını belirtmişlerdir. Kompozitlerde ise SEM analiziyle maleik anhidrit miktarı arttıkça homojenliğin artıp delik miktarının azaldığını görmüşlerdir. Maleik anhidrit miktarının artmasının modülü artırdığını ancak çekme mukavemetine pek etki etmediğini belirtmişlerdir. Uzama değerlerinin ise bir hayli düştüğünü söylemişlerdir [38].

P. B. Anand ve arkadaşları; epoksi içinde çok duvarlı karbon nanotüp içeren kenaf/kenevir lifi karışımı hibrit kompozitler üretmişlerdir. Farklı çok duvarlı karbon nanotüp derişiminin etkisini morfolojik ve mekanik özellikleri açısından incelemişlerdir. Derişim artınca çekme mukavemetinin arttığını eğilme mukavemetininse düştüğünü gözlemlemişleridir. Darbe mukavemetinin ve sertlik değerinin çok duvarlı karbon nanotüp varlığının artmasıyla düştüğünü belirtmişlerdir. SEM analizi sonucunda çok duvarlı karbon nanotüp derişiminin artmasının elyaf çekilmesi, kopması ve boşlukların görülme sıklığını azalttığını iletmişlerdir [39].

C. Y. Désiré ve arkadaşları; ağırlıkça %20 kenevir lifi içerecek şekilde etilen polimerizasyon aşılması ile yüzey işlemi gerçekleştirmişlerdir. Kenevir liflerini hem alkali işlem görmüş hem de görmemiş şekilde kullanmışlardır. Kompozitlerin mekanik ve dinamik özelliklerini araştırmışlardır. İşlem gören liflerle oluşturdukları kompozitlerin su emiliminin ve yoğunluklarının düştüğünü, çekme mukavemeti ve uzamasının ise arttırdığını belirtmişlerdir. Aynı şekilde darbe direnci değerlerinin de arttığını bulmuşlardır. Dinamik testler sonucunda ise işlem gören lifin kullanıldığı kompozitlerin depolama modülünün ve sürünme gerilmesinin azaldığı bulunmuştur. Bu malzemeyi inşaat uygulamaları için kullanılabilir buldukları gibi otomotiv ve ambalaj sektörü içinde uygun olduğunu belirtmişlerdir [40].

O. Güney ve arkadaşları; kenevir lifi, kenevir lifinden ekstrakte ettikleri selüloz nanolifler/iyonik sıvı metodunca maleik anhidrit ile modifiye ettikleri kenevir lifinden ekstrakte ettikleri selüloz nanolifler ve geri dönüştürülmüş polietilen kullanarak kompozit üretmişlerdir. Takviye fazının kütle oranını parametre olarak kabul edip kompozitin termal ve mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Üretilen kompozitin çekme mukavemeti ve modülünün arttığını, DSC çalışması ile erime noktasının pek değişmediğini, ısı genleşme katsayısının ve uzamasının daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Eriyik akış indeksinin takviye yüzdesi arttıkça azaldığını gözlemlemişlerdir [41].

M. Razavi-Nouri ve arkadaşları; matris olarak akrilonitril bütadien stiren, takviye olarak çözelti emdirilmiş ve emdirilmemiş jüt ipliği kullanarak üç boyutlu yazıcı ile kompozit parçalar üretmişlerdir. Jüt ipliğini üç polimerin (polistiren, termoplastik poliüretan ve akrilonitril bütadien stiren) ağırlıkça %2 ve %10'luk iki konsantrasyondaki çözeltileri ile emdirme gerçekleştirmişlerdir. Baskı hızının artırılması ya da nozül çapının veya katman yüksekliğinin azaltılmasıyla gerçekleşen kayma gerilimindeki artışla birlikte, elyaf kopması olasılığının arttığını gözlemleyip uygun üretim parametrelerini 2 mm nozül çapı, 1 mm/s baskı hızı ve 1 mm katman yüksekliği şeklinde saptamışlardır. Kompozitlerin mekanik davranışlarını karşılaştırmak için çekme ve kısa kiriş kesme testleri uygulamışlardır. En iyi gerilme mukavemeti ve çekme sonuçlarını, ağırlıkça %2 termoplastik poliüretan içeren çözelti ile emdirilmiş tek lif kullanılan kompozitten elde etmişlerdir. Kısa kiriş kesme testi sonuçlarında aynı kompozitin en iyi sonucu verdiği belirtilmiştir [42].

D. Barnat-Hunek ve arkadaşları; bağlayıcı türleri, dolgu maddeleri ve bağlayıcı/dolgu maddesi oranı bakımından farklılık gösteren 18 perlit-kenevir ve keten-kenevir kompozit üretmişlerdir. Kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin testleri gerçekleştirmiş; geleneksel yapı malzemelerine kıyasla düşük ısı iletkenliğine, görünür yoğunluğa ve düşük mukavemet özelliklerine sahip olduklarını bulmuşlardır [43].

Y. Chuminjakve arkadaşları; karbon nanotüp ile yüzeyi işlenen kenevir kumaşı ve polyester reçine kullanarak laminasyon yöntemiyle kompozit üretmişlerdir. Titanyum partikülleri ve karbon nanotüpleri kıvılcım ve elektroforetik işlemler kullanılarak kenevir kumaşı üzerine biriktirmişlerdir. Kompozitlerin mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. İşlenmiş kumaş kullanılan kompozitlerin için çekme mukavemeti ve darbe mukavemeti değerlerinin artış gösterdiğini belirtmişlerdir [44].

3. DENEYSEL TASARIM

3.1 Kullanılan Malzemeler

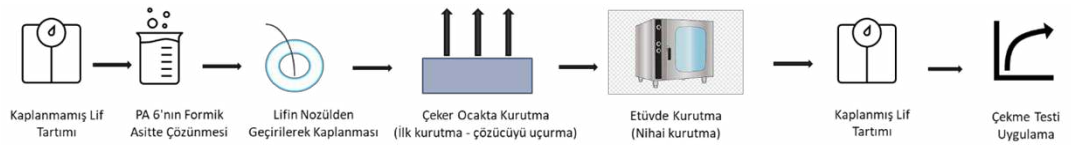
Takviye malzemesi olarak kullanılan 4 mm çaplı, 3 boğumlu kenetir ipi Hamdi Küçük A.Ş.'den temin edilmiştir. Kenetiri kaplamak için kullanılan PA 6 granülleri EPSAN Plastik A.Ş.'den, PA 6 çözücüsü olarak kullanılan Formik Asit Thermo Fisher Scientific firmasından temin edilmiştir. PU için diizosiyonat (TDI) (CARADATE 80) ve poliol (CARADOL) (kütlege 1:1) Shell ürünleri temin edilmiştir.

3.2 Test Cihazları

- Etüv: Lab Companion, SIF6000R
- Üniversal mekanik test cihazı: SHIMADZU-AGS-X
- Charpy/Izod darbe test cihazı: Instron
- FTIR Cihazı: Bruker, Vertex 70
- DSC Cihazı: TA Q200
- TGA Cihazı: TA Q500
- SEM öncesi kaplama cihazı: Leica, ACE600
- SEM Cihazı: Zeiss, Gemini 3000
- Terazî: Sartorius AC 210 S

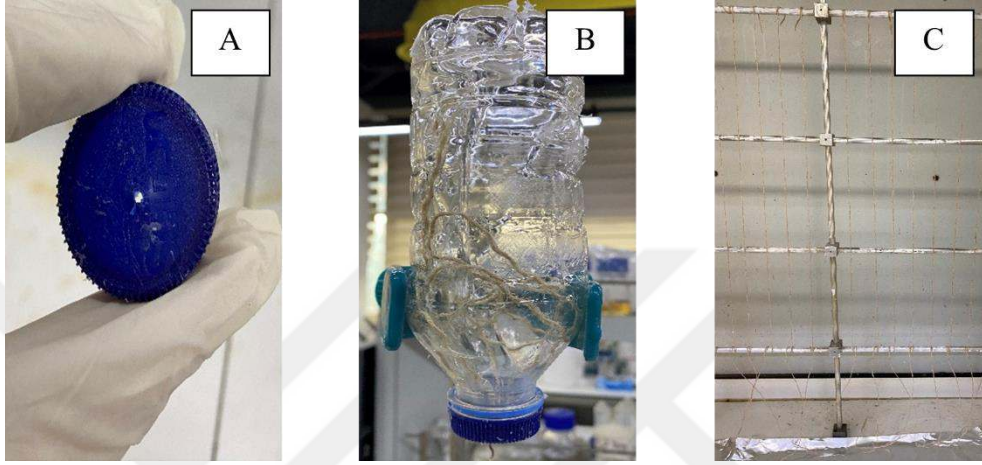
3.3 Numune Üretim Prosesi

3.3.1 Kaplanmış kenetir lifi üretimi



Şekil 3.1: Kenetir lifi kaplama prosesi.

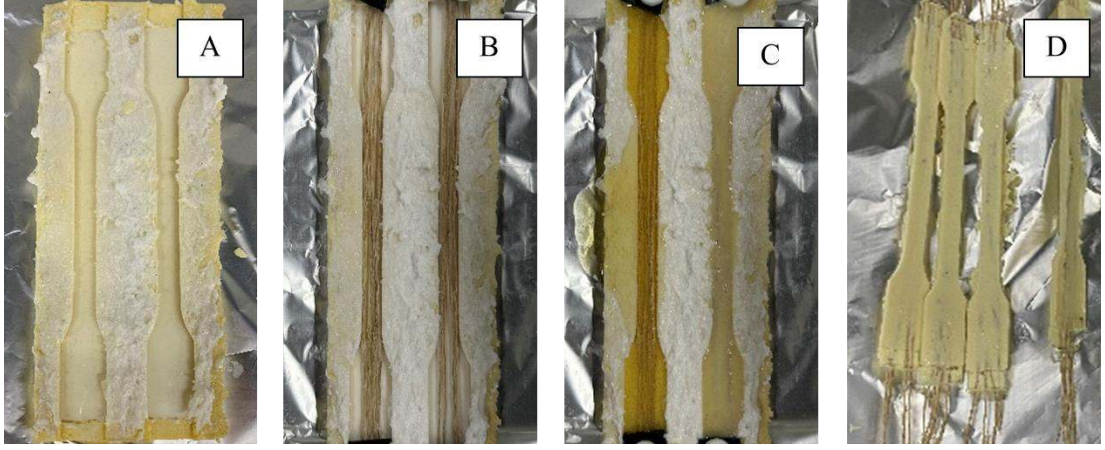
Şekil 3.1’de gösterilen kenevir lifi kaplama prosesi, boğumlarına ayrılan kenevir ipinin kaplanmadan önce tartımının alınmasıyla başlamaktadır. Sonrasında formik asit içinde çözülmüş PA 6 eriyiği ile 1 ve 2 mm çapındaki nozülünden geçirilerek kaplanmıştır. Kaplanan lifler bir gece çeker ocak, 24 saat 90°C’de etüv olmak üzere kurutulmuştur. Kurutma sonrası liflerin son tartımları alınmıştır. Şekil 3.2’de bazı basamakların görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.2:Lif kaplama prosesi basamakları A. Kaplamada kullanılan 1 mm çapındaki nozül, B. 1 mm çapındaki nozülünden geçirerek lif kaplama, C. Kaplanan numuneleri çekere ocakta kurutma.

3.3.2 PU ve PU kompozitlerin çekme testi numunesi üretimi

Şekil 3.3’te kaplanan liflerin çekme testi sonucunda seçilen lifler ve kaplanmamış lifler ile kompozit üretimi basamakları verilmiştir. PU numuneleri diizosiyonat ve poliölün kütlece 1:1 oranında karıştırılıp kalıba dökülmesi ile oluşturulmuştur. Kenevir/PU kompoziti için 4 adet kaplanmamış lif kalıba elle yatırılarak üzerine PU karışımı dökülmüştür. Aynı şekilde kaplanan kenevir lifleri ile PA 6-Kenevir/PU kompozitleri üretilmiştir. Her bir numunenin tamamen kürlenmesi için ortalama 4 hafta beklenmiştir.



Şekil 3.3: PA 6-Kenevir/PU numunelerinin üretim basamakları A. Çekme numunesi kalıbı, B. Kaplanan lifleri kalıba yatırma, C. PU karışımının lif üzerine dökümü, D. Kürlenmeye bırakılan numuneler.

3.3.3 Uygulanan testler ve analizler

3.3.3.1 Kaplanmış kenevir lifi kaplama yüzdesi analizi

Kenevir liflerinin kaplama işlemleri öncesi ve sonrası tartımları alınarak yüzeylerinin kütlece yüzde ne kadar PA 6 ile kaplandığı hesaplanmıştır.

3.3.3.2 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

Kenevir, PA 6-Kenevir, PU, Kenevir/PU ve PA 6-Kenevir/PU numuneleri analizden önce altın/paladyum ile 20 dakika boyunca kaplanmış, sonrasında görüntüleme gerçekleştirilmiştir. Numunelerin morfolojik yapıları karşılaştırılmıştır.

3.3.3.3 FTIR analizi

Kenevir, PA 6 ve PA 6-Kenevir numunelerinin spektrumları çekilmiştir. Çalışma Elmas ATR ünitesi kullanılarak $400-4000\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı aralığında yürütülmüştür. Spektrumlar karşılaştırılarak PA 6 kaplamanın düzgün olup olmadığı incelenmiştir.

3.3.3.4 DSC analizi

PA 6 ve PA 6-Kenevir numunelerinin termogramları çekilmiştir. Çalışma $25-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında N_2 (akış hızı: 50 mL/dk) ortamında $10\text{ }^{\circ}\text{C/dk}$ ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir. Termogramlar karşılaştırılarak PA 6 ya özgü termal verilerin varlığına göre PA 6 kaplamanın uygun olup olmadığı incelenmiştir.

3.3.3.5 TGA analizi

Kenevir, PA 6 ve PA 6-Kenevir numunelerinin termogramları çekilmiştir. Çalışma 25-900 °C aralığında N₂ (akış hızı: 50 mL/dk) ortamında 10 °C/dk ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir. Termogramlar karşılaştırılarak PA 6 kaplamanın kenevirin bozunma sıcaklığına etkisi incelenmiştir.

3.3.3.6 Çekme testi

Kenevir liflerinin çekme testleri çeneler arası mesafe 100 mm, çekme hızı 2 mm/dk olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

PU/Kompozit PU numunelerinin çekme testleri ise TS EN ISO 527-2 standardına uygun şekilde üretilen numuneler ile çeneler arası mesafe 110 mm, çekme hızı 10 mm/dk olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Tüm testler beş adet numune üzerinden yürütülmüş olup sonuçlar kopma uzaması ve çekme mukavemeti şeklinde ortalama değer olarak alınmıştır. Grafiklerinde standard sapmaları ile birlikte verilmiştir.

3.3.3.7 3- Nokta eğme testi

PU/Kompozit PU numunelerinin 3- nokta eğme testleri TS EN ISO 178 standardına göre çeneler arası mesafe 64 mm, çekme hızı 10 mm/dk olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Tüm testler beş adet numune üzerinden yürütülmüş olup sonuçlar eğme mukavemeti şeklinde ortalama değer olarak alınmıştır. Grafiklerinde standart sapmaları ile birlikte verilmiştir.

3.3.3.8 Mekanik testler için ANOVA analizi

PU ve kompozit PU numunelerine ait çekme ve eğilme testlerinden elde edilen mekanik özellikler (çekme mukavemeti, elastik modül vb.) tek yönlü varyans analizi (ANOVA) yöntemiyle değerlendirilmiş; gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı fark olup olmadığı $p < 0.05$ düzeyinde test edilmiştir.

3.3.3.9 Yoğunluk testi

PU/Kompozit PU numunelerinin yoğunluk testleri ise TS EN ISO 1183-1: Metot A standardına göre gerçekleştirilmiştir. Numunelerin önce havada sonra etanol içindeki ağırlıkları not edilmiştir. Standardın belirttiği hesaplama yöntemine göre yoğunlukları

hesaplanmıştır. Tüm testler üç adet numune üzerinden yürütülmüş olup sonuçların ortalaması olarak alınmıştır. Grafiklerinde standart sapmaları ile birlikte verilmiştir.

3.3.3.10 Su absorpsiyonu testi

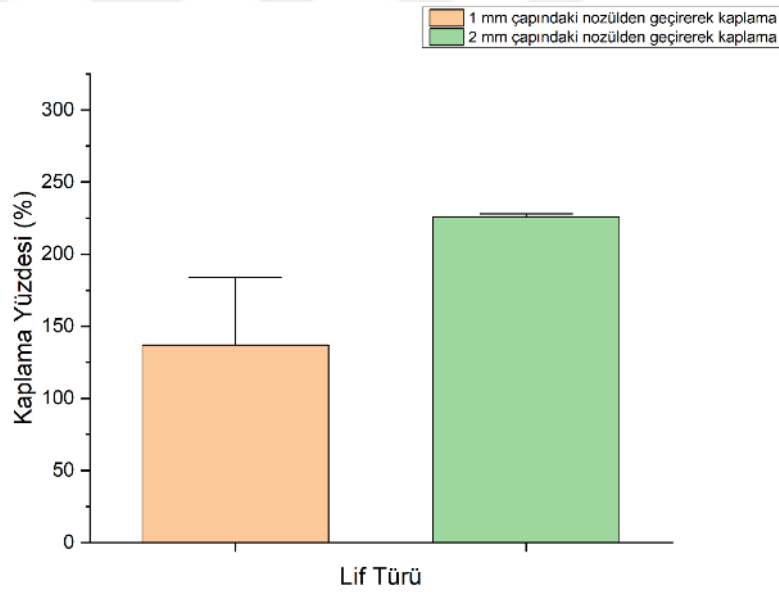
PU/Kompozit PU numunelerinin su absorpsiyonu testleri ise TS EN ISO 62 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Numuneler daldırma ncesi 50°C’de 24 saat kurutulduktan sonra 23°C’ye 24 saat daldırılmıştır. Daldırma ncesi ve sonrası ağırlıkları not edilmiştir. Standardın belirttiğı hesaplama yöntemine göre absorpladıkları su miktarı hesaplanmıştır. Tüm testler üç adet numune üzerinden yürütülmüş olup sonuçların ortalaması olarak alınmıştır. Grafiklerinde standart sapmaları ile birlikte verilmiştir.



4. BULGULAR VE YORUM

4.1 Kaplanmış Kenevir Lifi Kaplama Yüzdesi Sonuçları

Tüm kaplama işlemlerinin karşılaştırılması Şekil 4.1’de verilmiştir. Sonuçlar sırayla %137, %226 olarak bulunmuştur. 1 mm çapındaki nozülünden geçirerek kaplama işlemi yüzeye daha az PA 6 kaplanmasına sebep olmuştur. Kenevir ipinin kendi çapının da 1 mm’ye yakın olması sebebiyle olması beklenen bir sonuçtur. 2 mm çapındaki nozülünden geçirerek kaplama işlemi yüzdesinin daha fazla olmasının sebebi ise nozül çapının yaklaşık olarak ip çapının 2 katı oluşu ve dolayısıyla kaplama fazlasının iyi sıyrılamamasıdır.



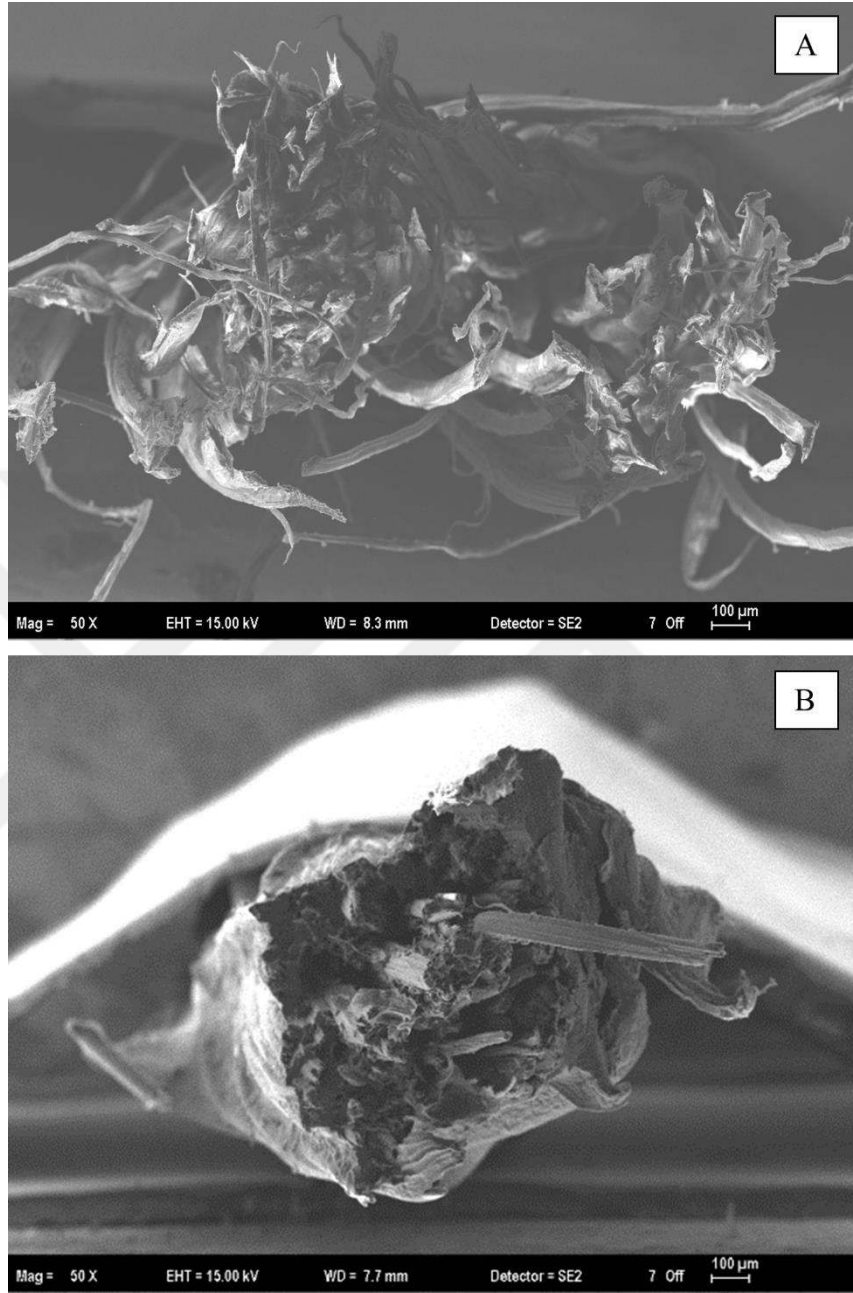
Şekil 4.1: Kaplanmış kenevir liflerinin kaplama yüzdesi karşılaştırması.

4.2 SEM Sonuçları

4.2.1 Kenevir lifi SEM sonuçları

Kenevir ve PA 6-Kenevir numunelerinin genel morfolojilerini belirlemek adına 50 X büyütmede alınan SEM görüntüleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Kaplanmamış kenevirin (Şekil 4.2A) kesit görüntüsü lif çekmesinin oldukça fazla gerçekleştiğini ve dağınık bir forma sahip olduğunu göstermektedir. PA 6 kaplanan kenevirde ise (Şekil 4.2B)

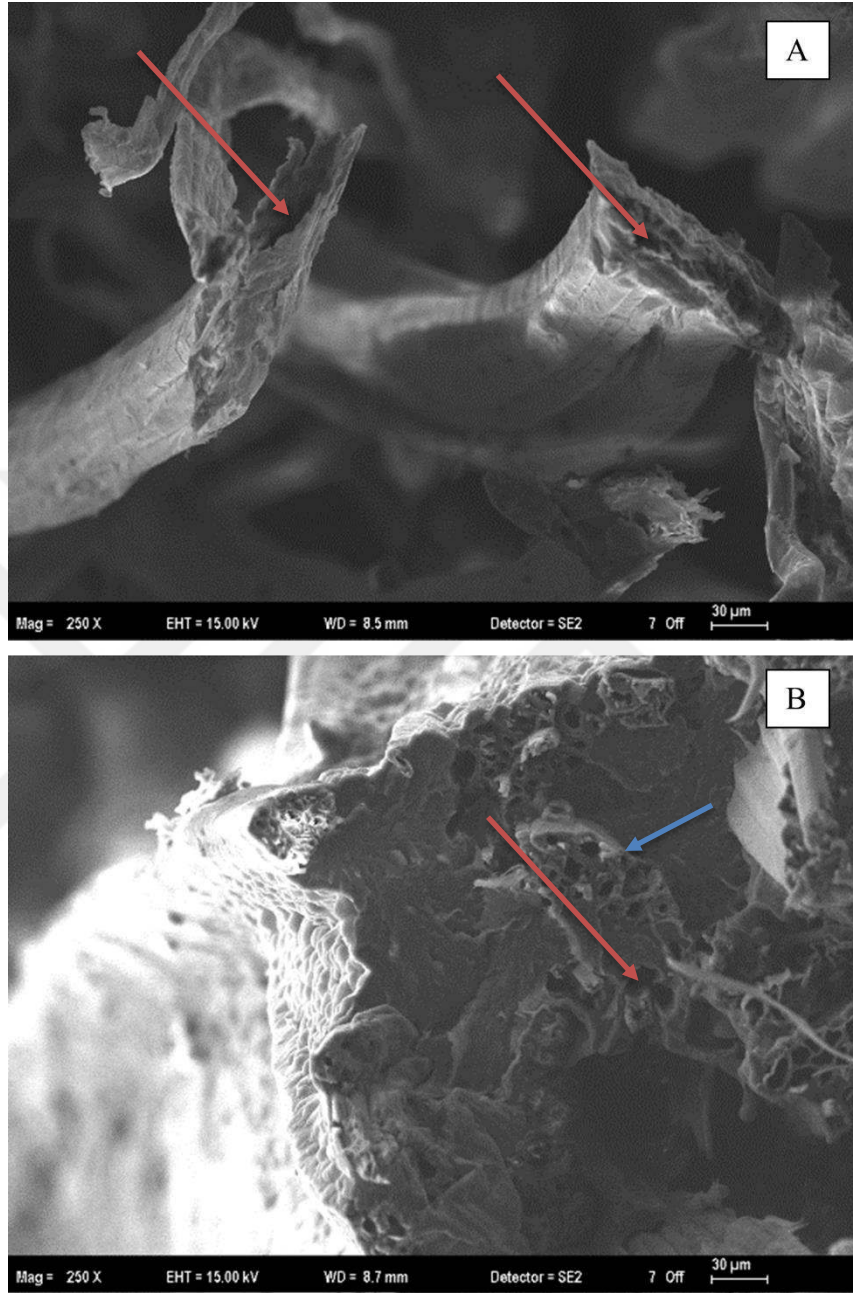
PA 6 kullanımı lifleri sıkıştırmış, daha kompakt bir form oluşmasını sağlamıştır. Lif çekmesi de düşmüştür.



Şekil 4.2: Kenevir numunelerinin 50 X büyütme SEM görüntüleri A. Kaplanmamış kenevir, B. PA 6 kaplanmış kenevir.

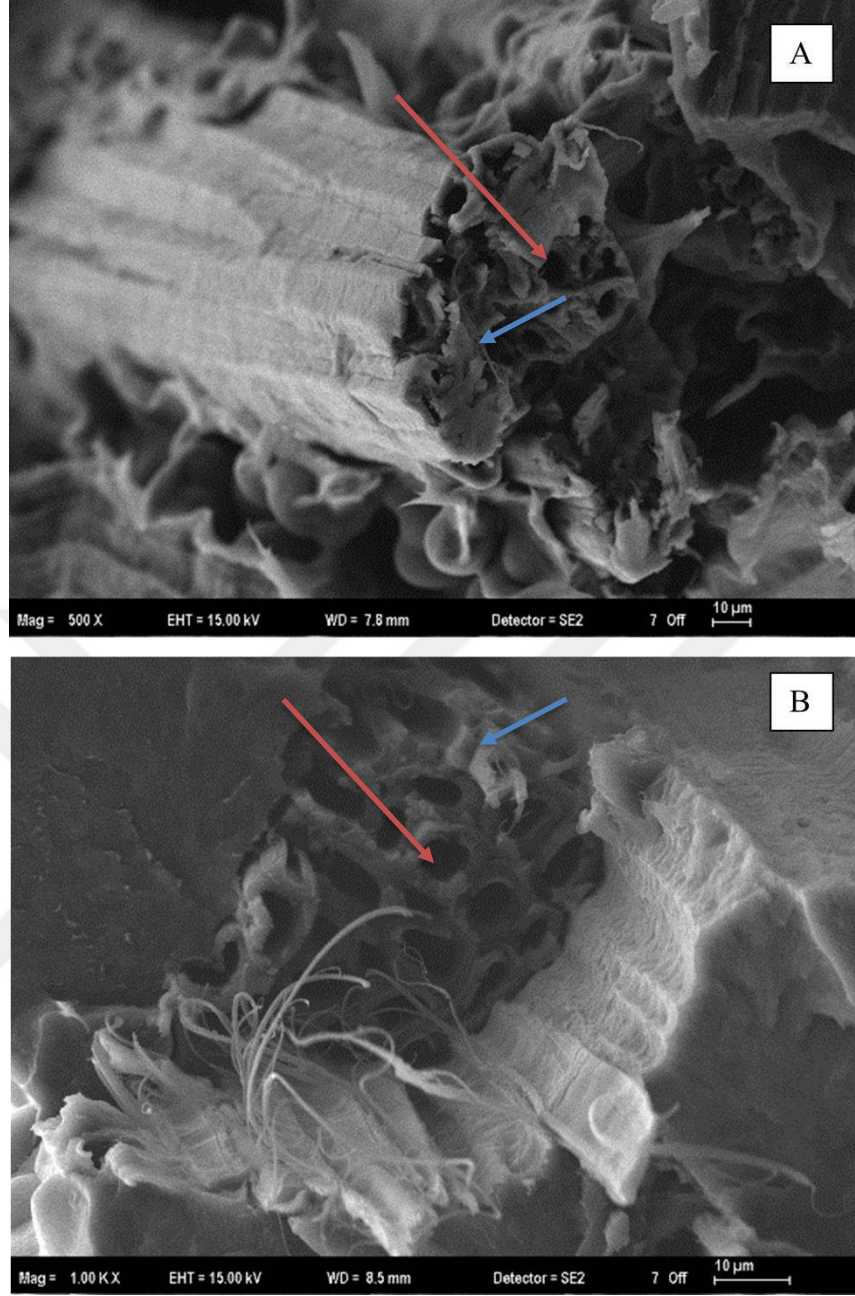
Kaplanmamış kenevirin daha detaylı incelenmesi için 250 X büyütmeden alınan görüntüde (Şekil 4.3.A) kırmızı oklar ile gösterilen boşluklu yapı ve dağınık lif dağılımı gözlemlenirken; PA 6 kaplamasının etkisinin daha detaylı incelenmesi için 250 X büyütmeden alınan görüntüde (Şekil 4.3.B) ise kaplamanın lifleri bir hizaya

soktuğu, mavi ok ile gösterilen kısımda liflerin çevresinin tamamen PA 6 tarafından sarıldığı görölmüştür.



Şekil 4.3: Kenevir numunelerinin 250 X büyütme SEM görüntüleri A. Kaplanmamış kenevir, B. PA 6 kaplanmış kenevir.

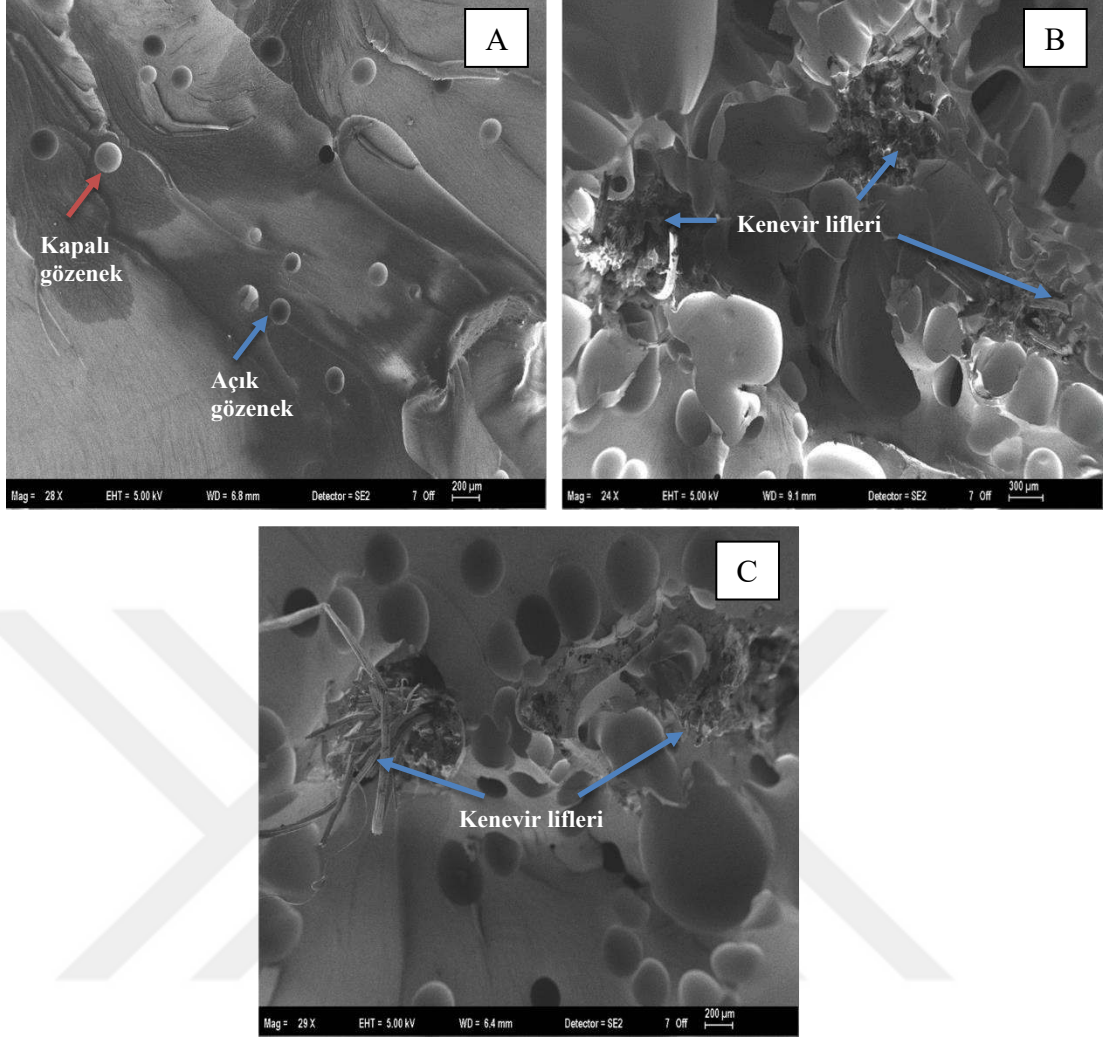
Şekil 4.4'te PA 6 kaplanan kenevirin görüntüleri incelendiğinde liflerin hizalanması ve lifler etrafındaki PA 6 katmanının varlığı daha net görölmektedir.



Şekil 4.4: Kenevir numunelerinin SEM görüntüleri A. PA 6 kaplanmış kenevir 500 X, B. PA 6 kaplanmış kenevir 1000 X.

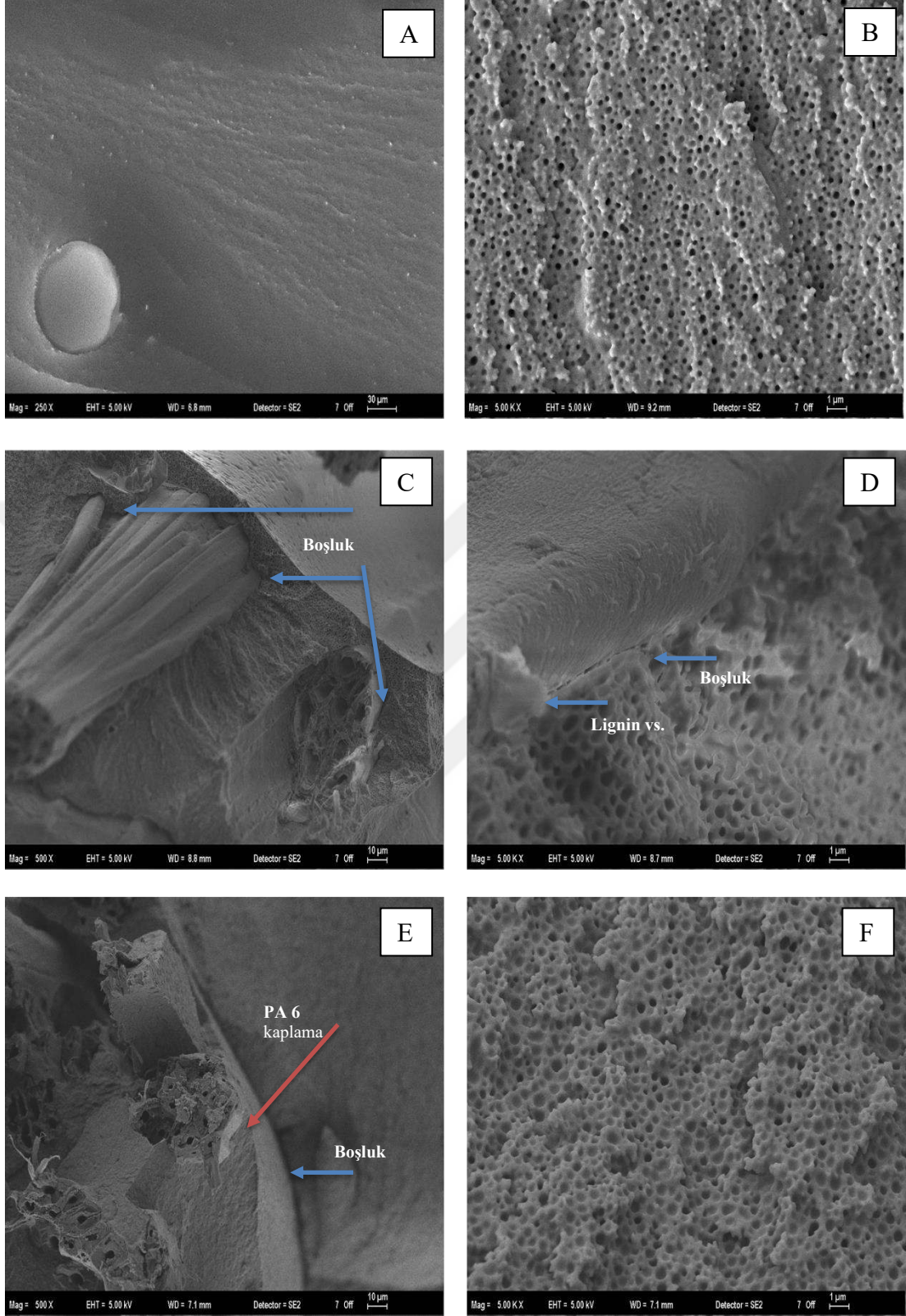
4.2.2 PU/Kompozit-PU numunelerinin SEM sonuçları

Şekil 4.5'te PU/Kompozit-PU numunelerinin 25 X büyütme SEM sonuçları karşılaştırıldığında PU'nun (Şekil 4.5.A) 10,8 µm çapında açık ve 9,8 µm çapında kapalı gözeneklere sahip olduğu, Kenevir/PU'nun (Şekil 4.5.B) 30,0 µm çapında açık ve 34,2 µm çapında kapalı gözeneklere sahip olduğu ve kenevir liflerinin dağılımının paralel olmadığı; PA 6-Kenevir/PU'nun (Şekil 4.5.C) 15,2 µm çapında açık ve 19,0 µm çapında kapalı gözeneklere sahip olduğu ve kenevir liflerinin dağılımının paralellik gösterdiği söylenebilir.



Şekil 4.5: PU ve Kompozit-PU numunelerinin ≈ 25 X büyütme SEM görüntüleri A. PU, B. Kenevir/PU, C. PA 6-Kenevir/PU.

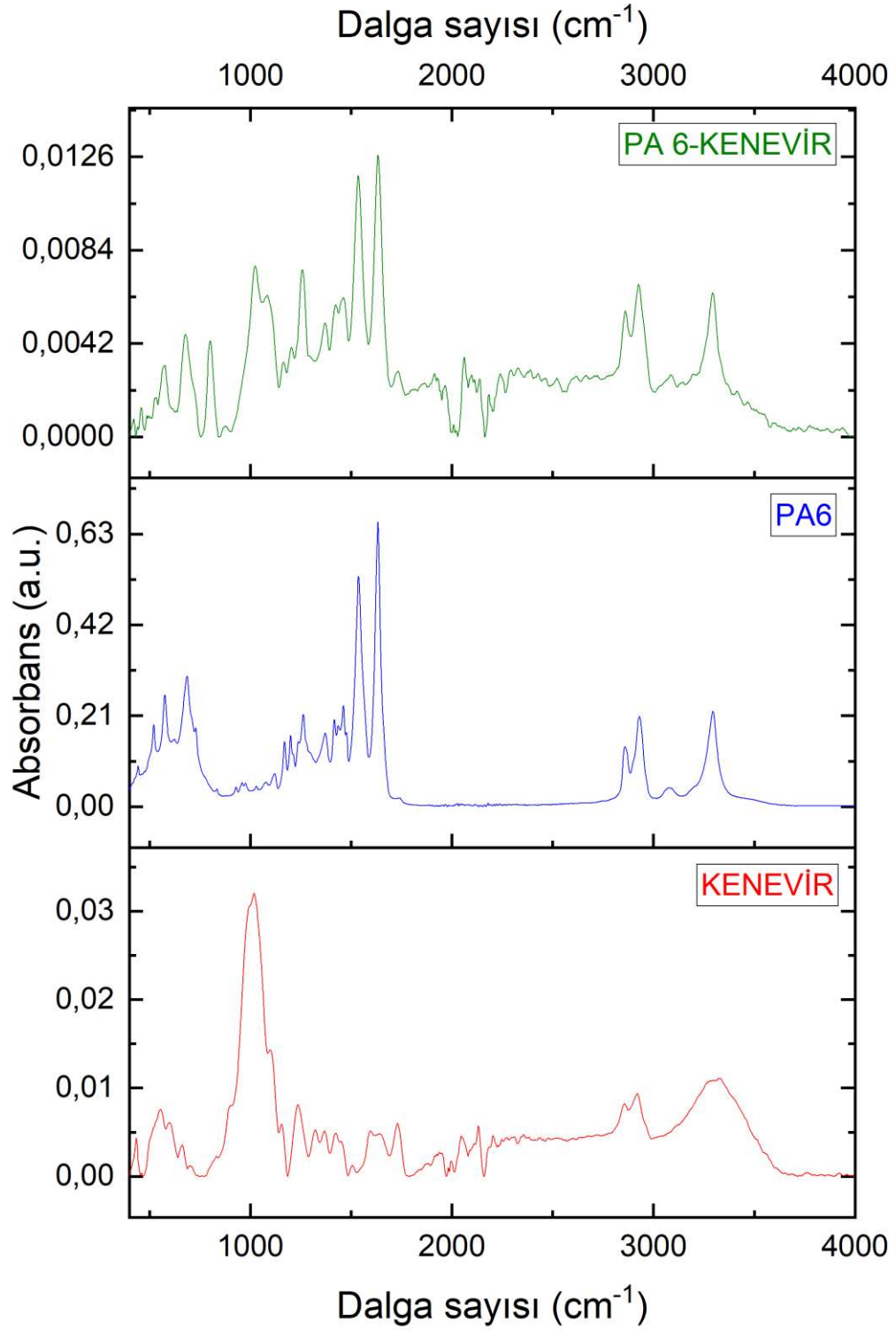
Numunelerin daha detaylı yüzey incelemeleri için Şekil 4.6’da gösterilen 250, 500 ve 5000 X büyütme kullanılmıştır. PU’nun (Şekil 4.6.A-B) görüntüleri incelendiğinde yüzeyde çatlak olmadığı ve gözeneklerin homojen dağıldığı görülmektedir. Kenevir/PU’nun (Şekil 4.6.B-C) görüntülerinde lif yüzeyinde kenevirin yapısındaki lignin gibi yapıların varlığı, matris dağılımının katmanlı olduğu, matris ile lif arasında boşluk bulunduğu ve gözenek yapısının homojen olmadığı görülmektedir. PA 6-Kenevir/PU’nun (Şekil 4.6.D-E) görüntülerinde matris ile lif arasında daha az boşluk olduğu, PA 6 kaplamanın lifi sardığı ve gözenek yapısının PU’ya benzer olduğu görülmektedir. Yüzeyin gözeneklilik oranı hesaplandığında PU için %48,6, Kenevir/PU için %59,2 ve PA 6-Kenevir/PU için %50,5 şeklinde bulunmuştur.



Şekil 4.6: PU ve Kompozit-PU numunelerinin SEM görüntüleri A. PU 250 X, B. PU 5000 X, C. Kenevir/PU 500 X, D. Kenevir/PU 5000 X, E. PA 6-Kenevir/PU 500 X, F. PA 6-Kenevir/PU 5000 X.

4.3 FTIR Sonuçları

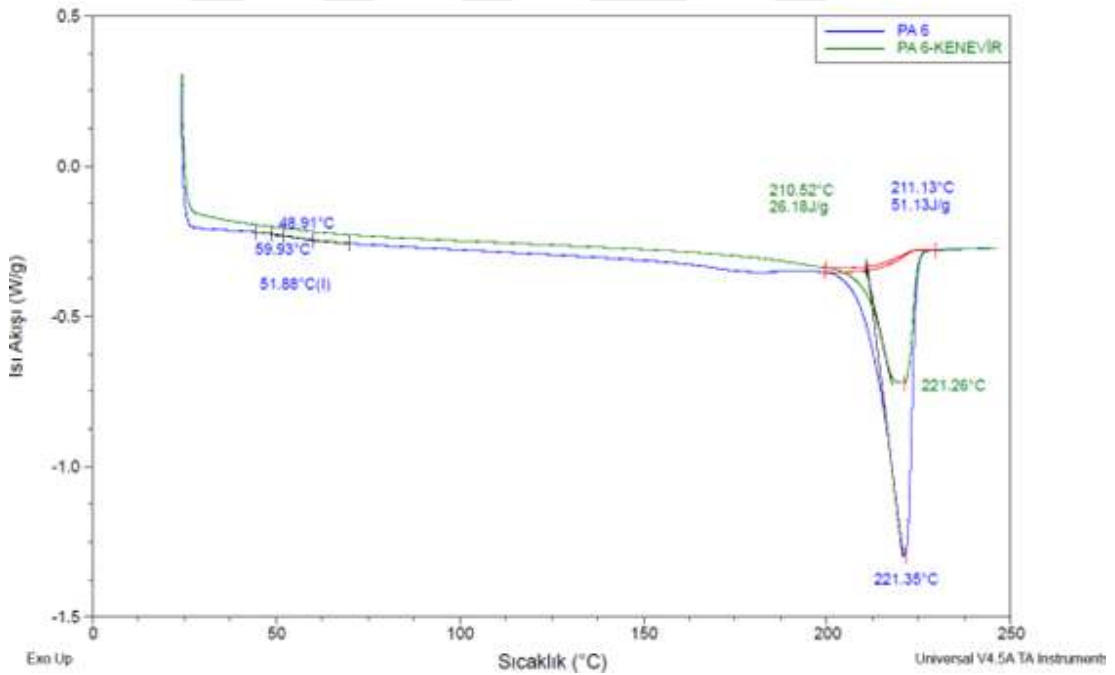
Kenevir, PA 6 ve PA 6-Kenevir numunelerinin spektrum karşılaştırılması Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7: FTIR spektrumları karşılaştırılması.

PA 6'nın literatürde verildiği gibi ikincil amidler için olması gereken dalga sayıları; N-H gerilmesi (3370-3170, tek pik), C=O gerilmesi (1680-1630), N-H düzlemde bükülme (1570-1515, güçlü), C-N gerilmesi (1310-1230) ve N-H düzlem dışı bükülme (750-680, geniş) PA 6-Kenevir numunesinde de gözükmemektedir [45,46]. Kenevirin spektrumunda yaklaşık 1000 cm^{-1} 'de görülen pik yok olmamış gibi gözükmesi aslında üç spektrumun yoğunluklarının birbirinden farklı olmasından kaynaklıdır. ($1800\text{-}2400\text{ cm}^{-1}$ arası cihazın gürültü aralığı olup yine yoğunluk farkından dolayı pik gibi görünmektedir.) ATR yöntemi için modifiye edilmiş Lambert-Beer yasası penetrasyon derinliği ve numune tipi ile ilişkilendirilmektedir[47,48]. Kullandığımız elmas ATR yüzeyde yaklaşık 2 mikronluk derinlikte bir katmanı taradığı için kaplama kalınlığı önemli rol oynamaktadır. Ayrıca kenevirin ve PA 6'nın ölçümde kullanılan kesitleri de çok farklıdır, dolayısıyla yoğunluğun düşüşü bu yasa ile uyum sağlamaktadır. FTIR verileri ışığında kaplama işleminin başarılı olduğu söylenebilir.

4.4 DSC Sonuçları



Şekil 4.8: PA 6 ve PA 6-Kenevir numunelerinin termogramları.

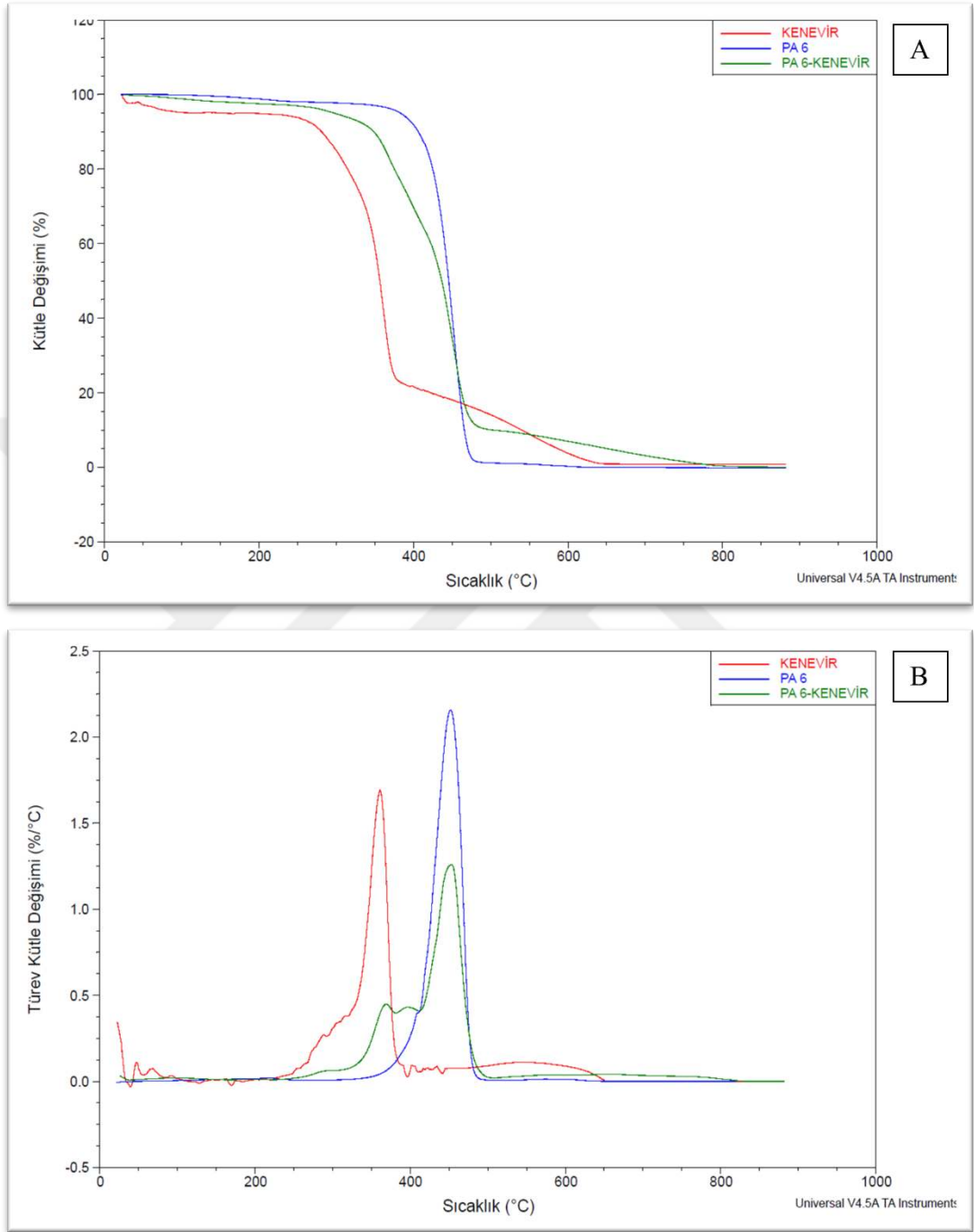
PA 6 ve PA 6-Kenevir numunelerinin termogram karşılaştırması Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Her iki numunenin de erime noktasının neredeyse aynı değerde olduğu görülmüş olup: PA 6: $221,35\text{ }^{\circ}\text{C}$, PA 6-Kenevir: $221,26\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak bulunmuştur. PA 6'nın camsı geçiş sıcaklığı da $51,88\text{ }^{\circ}\text{C}$ bulunmuş olup tüm bu veriler literatür ile

uyuşmaktadır [46]. Ancak kaplama yapılan kenevirde camsı geçiş sıcaklığı görülmemiştir. Camsı geçiş sıcaklığını etkileyen faktörlerin zincir esnekliği, moleküler yapı, moleküler ağırlık ve dallanma, çapraz bağlanma olduğu literatürde belirtilmiştir [49]. PA 6 eriyiği için formik asitte çözünme yapılması bahsedilen bu özellikler üzerinde değişim sağlamış olabilir. Erime entalpileri karşılaştırıldığında ise kristalinite oranının yarıya düştüğü g r lmektedir. P. Stival Bittencourt ve arkadaşları yaptıkları çalışmada lignin ve PA 6'yı formik asitte  zd r p PA 6'ya karşın farklı karışım kombinasyonlarında karşılaştırma yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda lignin ve PA 6'nın etkileşimiyle kristalinite değerinin düştüğünü belirtmişlerdir [50]. Bu çalışmadaki kristalinite düşüşünün kenevirin yapısındaki ligninden kaynaklandığını söylemek mümkündür. DSC verileri göz önünde bulundurulduğunda kaplama işleminin başarılı olduğu belirtilebilir.

4.5 TGA Sonuçları

Kenevir, PA 6 ve PA 6-Kenevir numunelerinin termogram karşılaştırmaları şekil 4.9'da verilmiştir. Literatürde belirtildiği gibi doğal liflerin 600  C'ye kadar olan termal bozunmaları   kademedен oluşmaktadır [16,51,52] . Kenevir numunesi için; birinci kademe olan lif içerisindeki suyun bozunması 100  C gibi sonlanmışken, ikinci kademe olan hemiselülozun bozunmasının sonlanması 290  C'de, selülozun bozunmasının maksimum olduğu sıcaklık 360  C, lignin bozunmasının sonlanması ise 445  C'de ve üçüncü kademe olan kalıntı elde edilmesi yaklaşık 650  C'de son bulmuş ve sabit tartıma ulaşılmıştır. Kaplama yapılan kenevir için ise sonuçlar birinci bölge için 100  C, ikinci bölge için hemiselülozun bozunmasının sonlanması 369  C'de, selülozun bozunmasının maksimum olduğu sıcaklık 454  C, lignin bozunmasının sonlanması ise 502  C'de ve üçüncü kademe olan kalıntı elde edilmesi yaklaşık 840  C'de son bulmuş ve sabit tartıma ulaşılmıştır. Ancak ikinci bölgede 299 ve 398  C'de görüntülenen pikler literatürde de bahsedilen hemiselülozun birden fazla pik verebileceğini göstermektedir [53]. Tüm kademelerdeki sıcaklıklar karşılaştırıldığında kaplama işleminin lifi termal olarak daha dayanıklı hale getirdiğini söylemek mümkündür. PA 6 için yapılan çalışma sonucu literatürde de bahsedildiği gibi tek noktada ve maksimum bozunmayı 452  C'de vermiştir [16]. Kalıntı 550  C'de sabit tartıma ulaşmıştır. Kaplanan kenevirdeki selülozun bozunmasının maksimum olduğu

sıcaklığın 94°C kayması PA 6'nın bozunma sıcaklığına çok yakın olması PA 6 varlığıyla doğrudan ilişkilendirilebilir.



Şekil 4.9: Numunelerin termogram karşılaştırmaları A. % Kütle değişimi, B. Türev % kütle değişimi.

Doğal lifler için literatürde verilen bir diğer kademe sınıflandırılması; 1. Kademe 200 °C'ye kadar yaklaşık %10 kütle kaybı, 2. Kademe 500 °C'ye kadar yaklaşık %70 kütle kaybı ve 3. kademe %20 kütle kaybına varabilecek 800 °C'ye kadar şeklinde

verilmiştir [52]. Bu sınıflandırma doğrultusunda Kenevir, PA 6 ve PA 6-Kenevir numunelerinin verileri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Verilere göre 1. Kademedeki sıcaklık PA 6’ya kıyasla düşmüş olsa da 2. Kademe korunmuş ve 3. Kademedeki nihai sıcaklık bir hayli yükselmiştir. Dolayısıyla kaplanan liflerin yüksek sıcaklıklara daha dayanıklı olduğunu söylemek mümkündür.

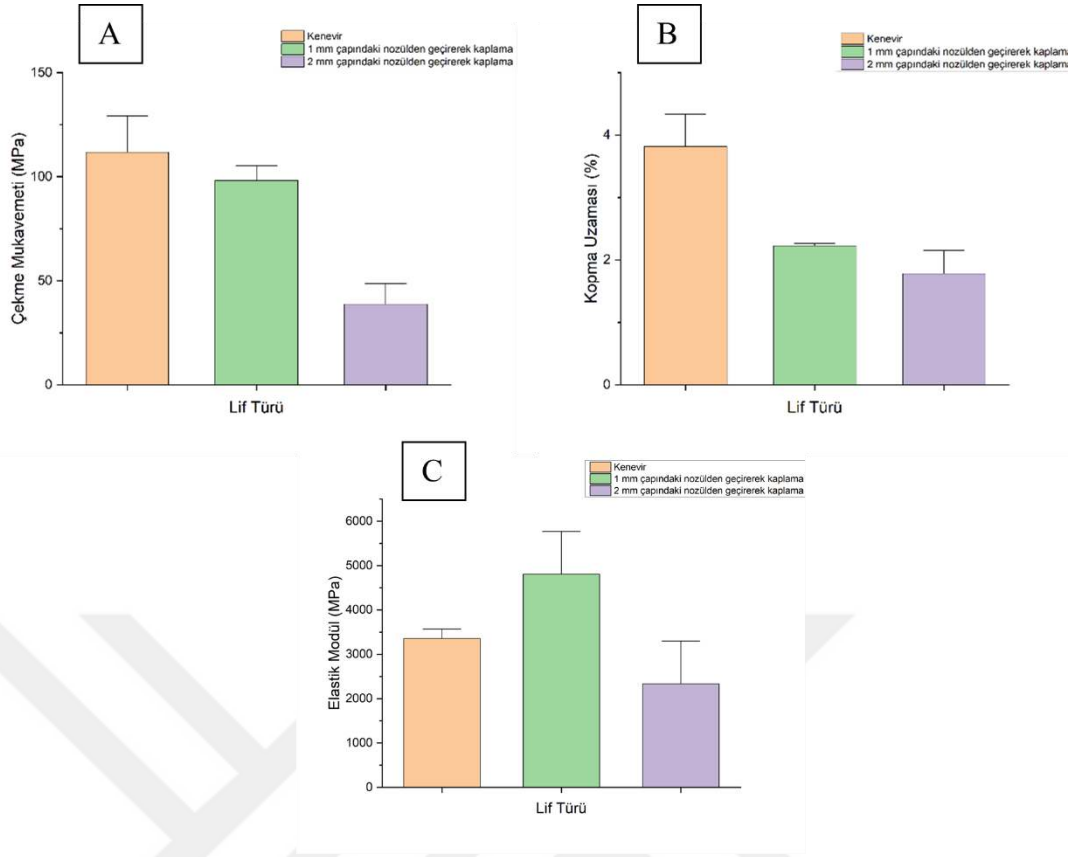
Çizelge 4.1: TGA verilerine göre numunelerin kademe karşılaştırılması.

Numune Adı	%10 kütle kaybının görüldüğü sıcaklık, °C	%50 kütle kaybının görüldüğü sıcaklık, °C	Kalıntı, °C/%
Kenevir	281	356	650/0,9
PA 6	406	445	550/0,9
PA 6-Kenevir	349	437	840/0,1

4.6 Çekme Testi Sonuçları

4.6.1 Kenevir lifi çekme testi sonuçları

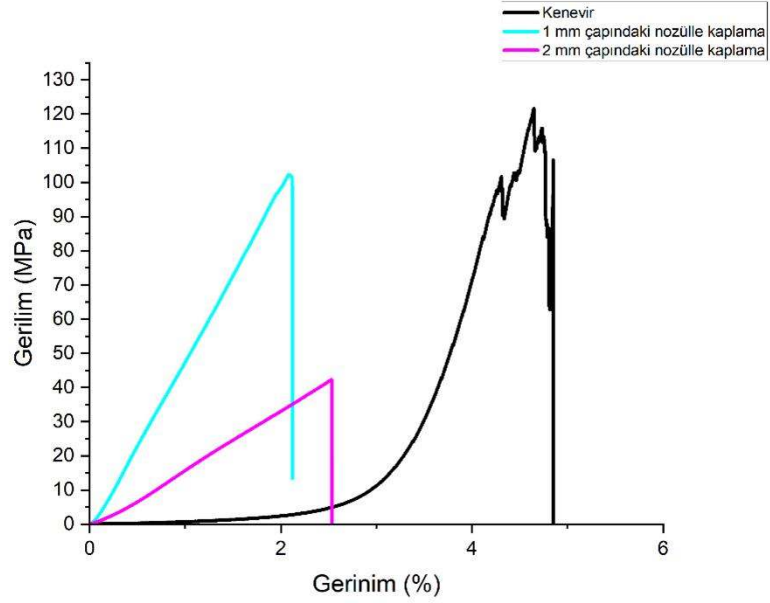
Kenevir liflerinin çekme testleri sonuçları Şekil 4.10’da verilmiştir. Mukavemet değerleri (Şekil 4.10A) kenevirin 111,8 MPa, 1 mm çapındaki nozülünden geçirerek kaplanan PA 6-Kenevir’in 98,2 MPa ve 2 mm çapındaki nozülünden geçirerek kaplanan PA 6-Kenevir’in ise 38,7 MPa bulunmuştur. Nozül çapının iki katına çıkarılması mukavemeti %61 düşürmüş, kaplanmamış kenevire göre sırasıyla %12 ve %65 azalma görülmüştür. PA 6 eriyiğini hazırlarken kullanılan formik asit lifin yapısına zarar vermiş olabileceğinden mukavemet değeri daha düşük çıkmış olabilir. Kopma uzaması değerleri (Şekil 4.10B) sırasıyla; %3,8, %2,2 ve %1,8 bulunmuştur. Uzama değerleri kaplama işlemi sonrası %42 ve %53 kayıp vermiştir. Elastik modül karşılaştırmasında (Şekil 4.10C) ise kenevirin değeri 3355,2 MPa, 1 mm çapındaki nozülünden geçirerek kaplanan PA 6-Kenevir’in değeri 4805,5MPa ve 2 mm çapındaki nozülünden geçirerek kaplanan PA 6-Kenevir’in değeri ise 2234,4 MPa bulunmuştur. Lifin çapına yakın nozül çapı tercihi elastik modülü %43 arttırmış, 2 mm çap ise %33 azaltmıştır. Kurutma sırasında tercih edilen sıcaklık lifin doğal nem dengesini değiştirip gevrekleşmesine neden olmuş olabilir. Elastik modülün artması daha sert bir yapı elde edildiğini göstermektedir.



Şekil 4.10: Kenevir liflerinin çekme testi sonuçları A. Çekme mukavemeti, B. Kopma Uzaması, C. Elastik modül.

Literatür çalışmalarının birinde PA 6 nanolifleri ile kaplanan kenaf lifine uygulanan çekme testi sonucunda mukavemetin %29 arttığı, uzamanın %16 azaldığını, elastik modülün ise yaklaşık %8 arttığını belirtmişlerdir [54]. Literatürün verileri göz önünde bulundurulduğunda bu çalışmadaki elastik modül artışı ve uzama azalışının öngörülebilir olduğunu ancak mukavemette istenilen sonucun alınamadığını söylemek mümkündür. Kaplama işlemlerinden 1 mm çapa sahip nozülü kullanmanın, oluşturulacak kompozit için daha iyi sonuçlar vereceği düşünülmüştür.

Yapılan çekme testlerine ait gerilim-gerinim grafiği karşılaştırması Şekil 4.11'de verilmiştir. Literatürde verilen tipik grafikler göz önünde bulundurulduğunda kaplanmamış kenevir lifinin sert ve yarı sünek yapıda olduğu, kaplanan liflerin ise sert ve gevrek yapıda olduğu tespit edilmiştir [55]. Kaplanmamış kenevir lifinin grafiğinde görülen dalgalanma tek tek temel liflerin kopmasından kaynaklanmaktadır. Kaplama işlemi sayesinde tek tek temel lif kopmalarının engellendiği görülmüştür.



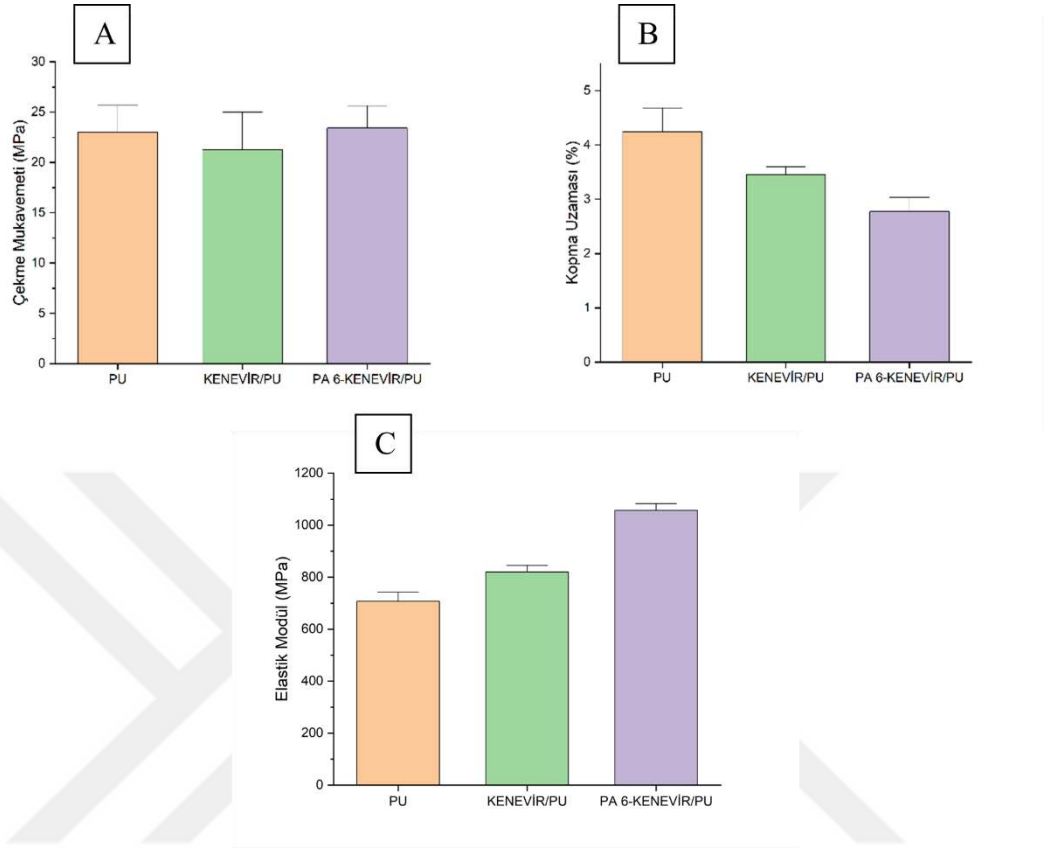
Şekil 4.11: Kenevir lifi çekme testi Gerilim-Gerinim grafikleri.

4.6.2 PU/Kompozit-PU çekme testi sonuçları

PU ve Kompozit-PU numunelerinin çekme testi sonuçları Şekil 4.12’de verilmiştir. Mukavemet değerleri (Şekil 4.12A) PU’nun 23,0 MPa, Kenevir/PU’nun 21,3 MPa ve PA 6-Kenevir/PU’nun ise 23,4 MPa bulunmuştur. PU’yu kaplanmış kenevir ile takviyelendirme, mukavemeti pek arttırmamış, kaplanmamış kenevir ise mukavemeti %7 düşürmüştür. Çekme mukavemetinin artması daha fazla yüke taşıyabileceği anlamını taşımaktadır. Kopma uzaması değerleri (Şekil 4.12B) sırasıyla %4,2, %3,4 ve %2,8 bulunmuştur. PA 6’nın varlığı liflere ait çekme testi sonuçlarında da görüldüğü gibi uzamayı düşürmüştür (%33). Kenevir lifini kaplamadan kullanmak uzamayı %19 düşürmüştür. Kopma uzamasının azalması ile daha az esnek numuneler elde edildiğini göstermektedir. Çekme testi elastik modül değerlerinde (Şekil 4.12C) ise sonuçlar sırasıyla 706,8 MPa, 819,5 MPa ve 1057,2 MPa bulunmuştur. Kaplanmamış kenevir takviyesi kullanmak modülü %16, kaplanmış kullanmak ise %50 arttırmıştır. Artan modül sertliğin artışı göstermektedir. Elde edilen numuneler daha zor deforme olacaktır.

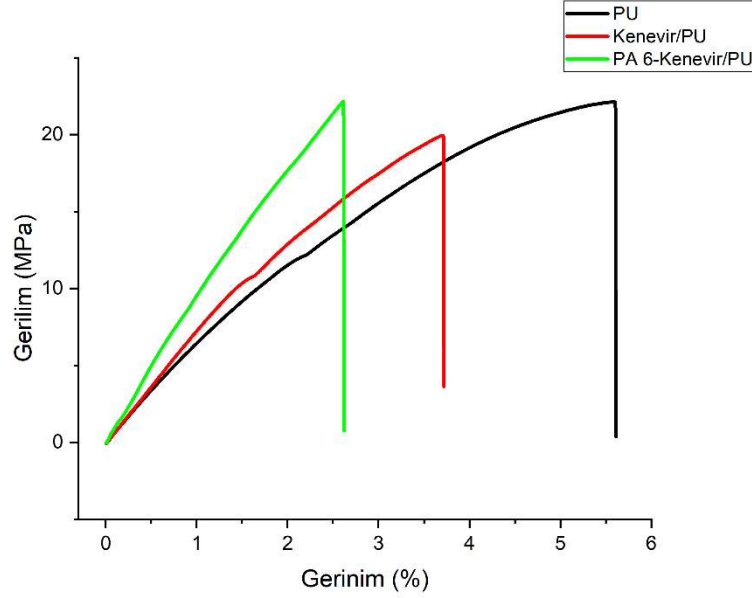
Literatürde alfa otundan ekstrakte edilen selüloz lifleri ile PU kompozitler üreterek çekme testi gerçekleştirildiğinde elastik modülün en az %250 arttığı, kopma uzamasının %405 azaldığı ve çekme mukavemetinin %43 azaldığı tespit edilmiştir [56]. Literatür çalışmasına baktığımızda kopma uzamasının azalmasının ve elastik

modülün artmasının öngörülebilir olduğu ve mukavemetin kaplanmış kenevir takviyesiyle artmasının literatüre bir katkı olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 4.12: PU/Kompozit PU numunelerinin çekme testi sonuçları A. Çekme mukavemeti, B. Kopma Uzaması, C. Elastik modül.

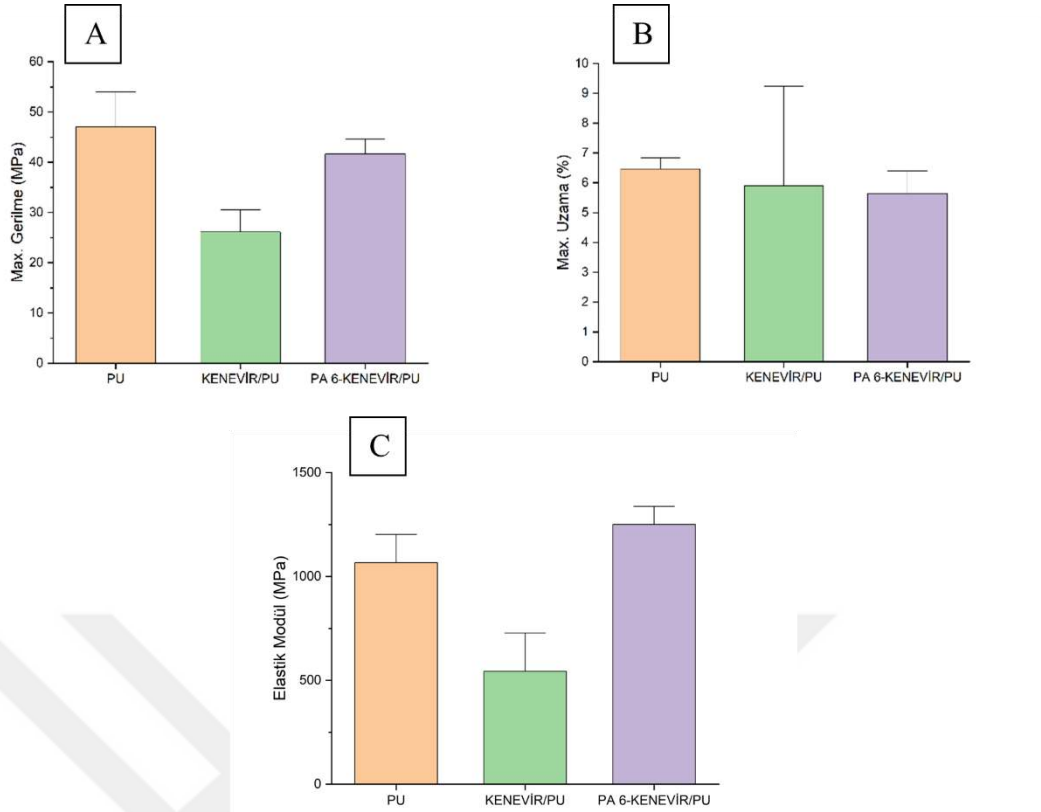
Yapılan çekme testlerine ait gerilim-gerinim grafiği karşılaştırması Şekil 4.13'te verilmiştir. Literatürde verilen tipik grafikler göz önünde bulundurulduğunda kaplanmış kenevir takviyeli PU sert ve gevrek, diğer numuneler ise sert ve sünek davranış göstermişlerdir [55].



Şekil 4.13: PU çekme testi Gerilim-Gerinim grafikleri.

4.7 PU/Kompozit-PU 3-Nokta Eğme Testi Sonuçları

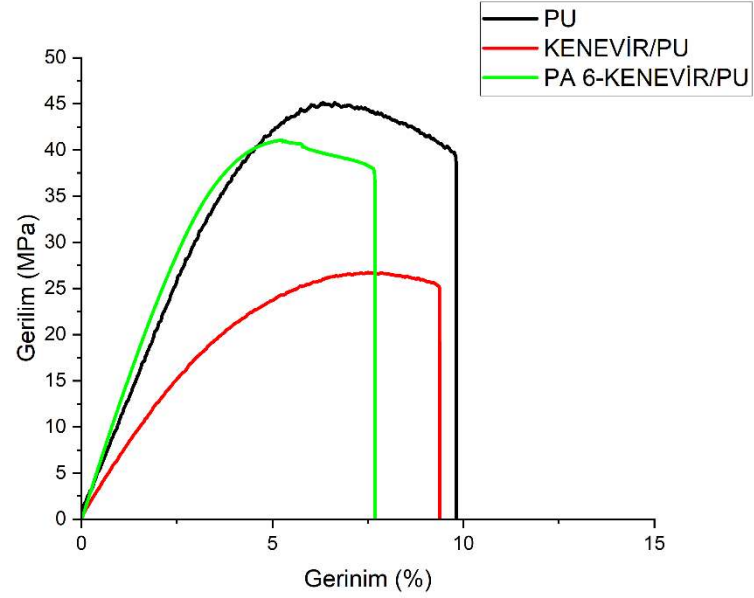
PU ve Kompozit-PU numunelerinin eğme testi sonuçları Şekil 4.14'te verilmiştir. Maksimum gerilme değerlerine (Şekil 4.14A) bakıldığında PU 47,1 MPa, Kenevir/PU 26,1 MPa, PA 6-Kenevir/PU 41,6 MPa sonuçlarını vermiştir. Kenevirin varlığı maksimum gerilmeyi arttıramazken, PA 6 kaplaması takviye fazını güçlendirerek maksimum gerilme farkını %12'ye kadar düşürmüştür. Böylelikle daha büyük kuvvetlere karşı koyması mümkündür. Maksimum uzama değerleri (Şekil 4.14B) sırasıyla %6,5, %5,9 ve %5,6 olarak bulunmuştur. Kompozitlerdeki %9 ve %14 kayıp, çekme testindeki kopma uzaması değerlerindeki gibi olmuştur. PA 6'nın varlığı uzama değerini düşürmüştür. Eğme testi elastik modül değerleri (Şekil 4.14C) sırasıyla 1066,3 MPa, 543,5 MPa, 1250,7 MPa şeklinde bulunmuştur. PA 6 kaplanan kenevirin kullanılması modülü %17 arttırmıştır. Malzemenin eğmeye karşı direnci artarken daha az esner hale gelmiştir. Böylelikle çekme testi modülünde belirtildiği gibi daha sert numune elde edilmiştir. Ancak çekme testi elastik modülündeki Kenevir/PU numunesinin verisinin aksine eğme elastik modülünde düşüş olmuştur. Bu durum SEM görüntülerinde de görüldüğü üzere, numunede lif dağılımının paralellik göstermemesi, gözenek çapının ve gözenekliliğinin artması basma yönündeki modül kaybının nedeni olmuştur.



Şekil 4.14: PU/Kompozit PU numunelerinin 3-Nokta eğme testi sonuçları A. Maksimum Gerilme, B. Maksimum Uzama, C. Elastik modül.

Literatürde termoplastik PU ve alkali işlem görmüş kenevir lifi (hacimce %40 oranında) ile oluşturulan kompozitlerin eğme testleri incelenmiş, eğme mukavemetinin %193 ve elastik modülünün %274 arttığı belirtilmiştir. Alkali işlem görmemiş liflerle oluşturulan kompozitlerde ise bu durum %158 ve %260 artış olarak belirtilmiştir [57]. Bu çalışma ile literatür birlikte değerlendirildiğinde; kaplama ile yüzeyi işlenen kenevirin takviye fazında kullanımının maksimum gerilme ve elastik modül değerlerinin kaplanmamış kenevire kıyasla artışının ve takviye edilmemiş PU'ya göre PA 6 kaplanan kenevir lifi ile takviyelendirilmiş PU'nun maksimum gerilmesinin artışının öngörülebilir olduğu görülmektedir.

Şekil 4.15'te verilen PU numunelerinin 3-Nokta eğme testine ait Gerilim-Gerinim grafikleri incelendiğinde PU ve PA 6-Kenevir/PU numuneleri sert ve sünek, Kenevir/PU numunesi ise yumuşak ve sünek yapı ile literatüre benzemektedir [55].



Şekil 4.15: PU 3-Nokta eğme testi Gerilim-Gerinim grafikleri.

4.8 Mekanik Testler İçin ANOVA Analizi

PU ve kompozit PU numunelerine ait çekme ve eğilme testlerinden elde edilen mekanik özellikler (çekme mukavemeti, elastik modül vb.) tek yönlü varyans analizi (ANOVA) yöntemiyle değerlendirilmiş olup Çizelge 4.2’de verilmiştir. $p < 0.05$ değeri sonuçların anlamlı olması için kriter olduğundan çekme mukavemeti ve eğme testi maksimum uzama değerleri anlamlı sonuçlar vermezken; kopma uzaması, çekme testi elastik modülü, eğme testi maksimum gerilme ve eğme testi maksimum modül değerleri ise anlamlı sonuçlar vermiştir.

Çizelge 4.2: ANOVA analizi sonuçları.

Test	Varyans Kaynağı	SS ¹	df ²	MS ³	F ⁴	P-değeri ⁵	F ölçütü ⁶
Çekme Mukavemeti	Gruplar Arasında	7,647848	2	3,823924	1,77647	0,247766	5,143253
	Gruplar İçinde	12,91524	6	2,152541			
Kopma Uzaması	Gruplar Arasında	3,25231	2	1,626155	69,27373	7,15E-05	5,143253
	Gruplar İçinde	0,140846	6	0,023474			
Çekme Testi Elastik Modülü	Gruplar Arasında	191897,7	2	95948,84	143,165	8,65E-06	5,143253
	Gruplar İçinde	4021,186	6	670,1977			
Eğme Testi Maksimum Gerilme	Gruplar Arasında	2915,538	2	1457,769	307,387	9,03E-07	5,143253
	Gruplar İçinde	28,45473	6	4,742456			
Eğme Testi Maksimum Uzama	Gruplar Arasında	1,047438	2	0,523719	0,531174	0,613206	5,143253
	Gruplar İçinde	5,915793	6	0,985965			
Eğme Testi Elastik Modülü	Gruplar Arasında	807515,5	2	403757,7	25,90867	0,001118	5,143253
	Gruplar İçinde	93503,31	6	15583,89			

¹ SS: Kareler Toplamı- Varyansın toplam miktarıdır. Ne kadar değişim (sapma) olduğunu gösterir.

² Df: Serbestlik Derecesi- Hesaplamada kullanılan veri sayısını ifade eder.

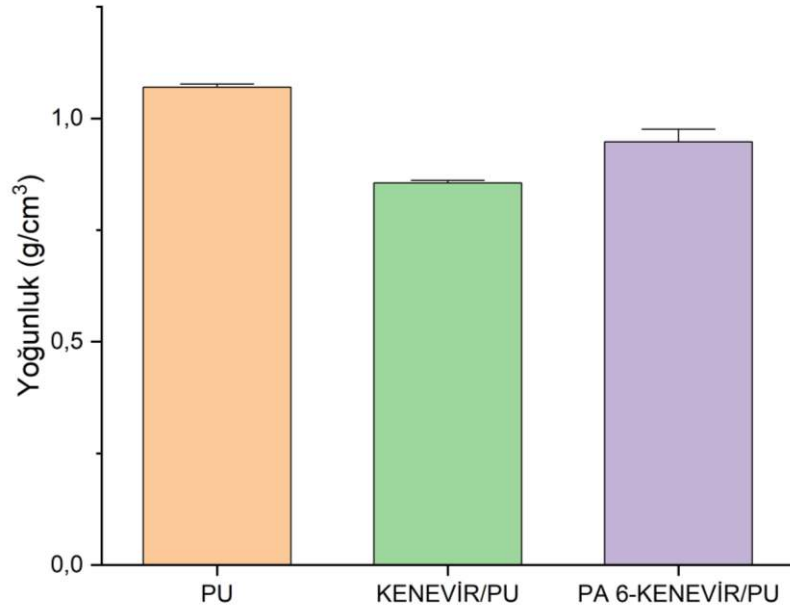
³ MS: SS değerinin df'ye bölünmesiyle elde edilir.

⁴ F: Varyans oranını ifade eder.

⁵ P-değeri: Gözlenen F değerinin, sıfır hipotezi doğruysa tesadüfen elde edilme olasılığıdır.

⁶ F ölçütü: Belirli df'lere ve güven düzeyine göre tablodan alınan eşik değeridir.

4.9 PU/Kompozit-PU Yoğunluk Testi Sonuçları



Şekil 4.16: PU/Kompozit PU numunelerinin yoğunluk testi sonuçları.

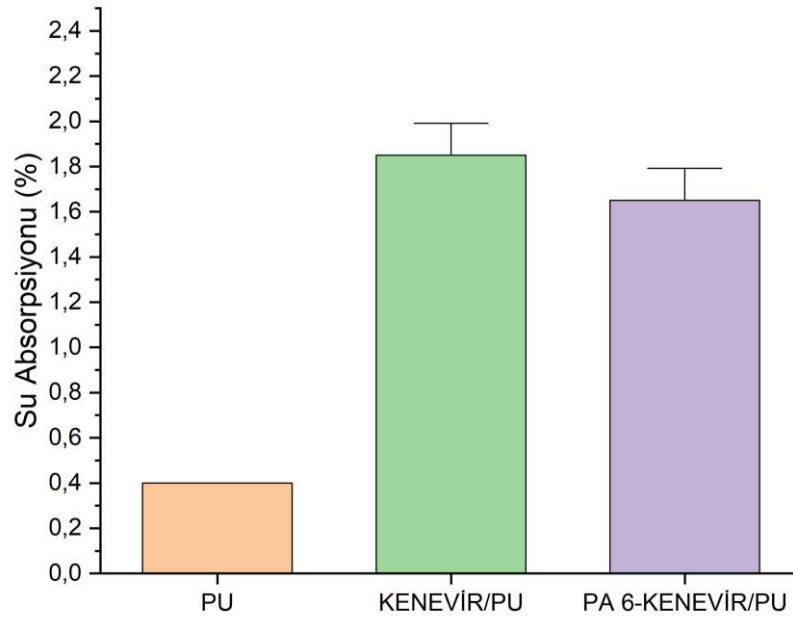
Şekil 4.16’da PU ve Kompozit-PU numunelerinin yoğunluk testi sonuçları verilmiştir. PU için sonuç 1,070 g/cm³, Kenevir/PU için sonuç 0,855 g/cm³ ve PA 6-Kenevir/PU için sonuç 0,948 g/cm³ şeklinde bulunmuştur. PU numunesinin yoğunluğu literatürle eşleşmiştir [18]. Kenevir lifi ile takviye kullanımı PU’nun yoğunluğunu sırasıyla %20, %11 oranında düşürmüştür. Kenevir lifini PA 6 ile kaplamak kompozitin yoğunluğunu arttırmıştır. Ayrıca yapılan SEM analizinde görüldüğü üzere kompozitlerdeki gözenek artışı yoğunluğun düşmesine neden olmuştur. Literatürde yapılan epoksi-kenevir kompozit çalışmasında kenevir takviyesi kullanımının epoksinin yoğunluğunu değiştirecek bir etki göstermediğini belirtmişlerdir [28]. Literatür ile karşılaştırıldığında daha hafif malzeme elde edildiğini söylemek mümkündür.

4.10 PU/Kompozit-PU Su Absorpsiyonu Testi Sonuçları

PU ve Kompozit-PU numunelerinin su absorpsiyonu testi sonuçları Şekil 4.17’de verilmiştir. PU için sonuç %0,4, Kenevir/PU için sonuç %1,85 ve PA 6-Kenevir/PU için sonuç %1,65 şeklinde bulunmuştur. Kenevir takviyesi kullanmak PU’nun su emme isteğini oldukça arttırmıştır. Ancak keneviri PA 6 ile kaplamak su absorpsiyonunu %10 azaltmayı sağlamıştır. Yapılan SEM analizinde görülen gözenekli yapı, matris ve takviye arasındaki boşluklar ve DSC verilerinde görülün

kristalinitenin düşüp amorf yapının oluşması su absorpsiyonunun artmasının olağan olduğunu göstermektedir. Absorpsiyonun yüksek çıkmasının muhtemel diğer sebepleri ise kompozitin iç dağılımının homojensizliği, liflerin kompozit içinde yönlenmeleri, test için hazırlanan numunelerde lifleri absorpsiyona açık hale getirecek tekniklerin kullanılması olabilir.

Literatürdeki çalışmada PU ve kenevir lifinden ürettikleri kompozitlere su absorpsiyonu testini 7 gün-168 saat şeklinde gerçekleştirerek PU'ya kıyasla kompozitlerin değerlerinin kenevir lifi katkısının artmasıyla arttığını ve en az %85 artış elde ettiklerini belirtmişlerdir [58]. Kenevirin yapısındaki selüloz, lignin gibi maddeler nem emilimine izin vererek matrisin lifle bağlanmasını zorlaştırmaktadır [59]. Bu bilgiler ışığında kompozitlerdeki emilimin fazla olmasının öngörülebilir olduğunu ancak PA 6 kaplama yapmanın istenen oranda olmasa da emilimi azaltmaya yardımcı olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 4.17: PU/Kompozit PU numunelerinin su absorpsiyonu testi sonuçları.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Değişen malzeme taleplerine cevap olabilmesi adına yapılan bu çalışmada PA 6 kaplanan kenevir lifleri PU matrise takviye olarak kullanımı amaçlanmıştır, öncesinde farklı nozül çapı kullanılarak yapılan kaplama işleminin uygun olup olmadığı tespit edilmiştir. Kenevir, PA 6-Kenevir ile karşılaştırılmıştır. Oluşturulan PA 6-Kenevir/PU kompoziti, PU ve Kenevir/PU kompoziti ile karşılaştırılarak üretilen malzeme yorumlanmıştır.

Lifler üzerinde gerçekleştirilen testler göz önünde bulundurulduğunda; SEM, FTIR, DSC ve TGA analizlerinin hepsi PA 6 kaplamanın düzgün olduğunu göstermektedir. PA 6 kaplamasının lifleri hizada tutup yüzeylerini düzleştirdiği ve termal olarak daha dayanıklı hale getirdiği görülmüştür. Kaplama sırasında lifin çapına yakın nozül kullanımının (1 mm) yüzeyde PA 6 birikmesini azalttığı gözlenmiştir. Çekme testi sonucunda, kaplanmamış kenevire kıyasla 1 mm nozül çapı kullanımı mukavemeti %12, 2 mm nozül çapı kullanımı %65 düşürmüş ve uzama değerleri sırasıyla %42 ve %53 düşmüştür. Elastik modül değeri, 1 mm nozül çapı kullanılan PA 6-Kenevir lifinde %43 artış göstermiştir. Gerilim-Gerinim grafikleri karşılaştırmasında PA 6 kaplamanın kenevirde görülen tek tek temel lif kopmasının engellediği görülmüştür. 1 mm çaplı nozül kullanımından elde edilen kaplanmış lifler 2 mm çaplı nozül kullanımına göre daha yüksek mekanik değerler verdiğinden kompozit üretiminde 1 mm çap kullanılarak kaplanan kenevir lifleri tercih edilmiştir.

PU ve kompozitlerin SEM karşılaştırmaları sonucunda kaplanmamış kenevirin gözenekliliğinin %22 artarken PA 6 kaplanan kenevirin gözenekliliğinin ise %4 arttığı bulunmuştur. PA 6 varlığı PU gözenekliliğine yakın sonuç elde edilmesini sağlamıştır. Kenevir/PU kompozitinde liflerin çevresindeki lignin gibi yapılar mevcutken PA 6 kaplanan liflerde kaplama düzgün bir biçimde lifi sarmış gözükmektedir. Bu durum matris ile takviye arasında oluşan boşluğun PA 6 kaplanan kompozitte daha az görülmesine neden olmuştur.

PU ve kompozitlerin mekanik testlerin karşılaştırılması sonucunda PA 6-Kenevir/PU kompoziti PU'ya göre; çekme mukavemetinde %1,7 artış, kopma uzamasında %33 düşüş, çekme elastik modülünde %50 artış, eğme gerilmesinde %12 düşüş, eğme uzamasında %14 düşüş, eğme elastik modülünde ise %17 artış olduğu bulunmuştur.

Kenevir/PU numunesi ise PU'ya kıyasla çekme mukavemetinde %7 düşüş, kopma uzamasında %19 düşüş, çekme elastik modülünde %16 artış, eğme gerilmesinde %45 düşüş, eğme uzamasında %9 düşüş, eğme elastik modülünde ise %49 düşüş göstermiştir. Bu değerler PA 6-Kenevir/PU kompozitinin daha sert, zor deforme olan bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

PU ve kompozitlerin mekanik testlerinin sonuçlarının ANOVA analizi sonucunda çekme mukavemeti ve eğme testi maksimum uzama değerleri anlamlı sonuçlar vermemiştir. Kopma uzaması, çekme testi elastik modülü, eğme testi maksimum gerilme ve eğme testi maksimum modül değerleri ise anlamlı sonuçlar vermiştir.

PU ve kompozitlerin fiziksel testlerine bakıldığında yoğunluk PA 6-Kenevir/PU kompozitinde %11 azalmış Kenevir/PU kompozitinde %20 azalmıştır. Su absorpsiyonunun ise kompozitlerde sırasıyla %363 ve %313 artış göstermiştir. SEM görüntülerindeki gözenekli yapı bu durumu desteklemektedir.

Tüm veriler değerlendirildiğinde; daha düşük yoğunluğa sahip olması hafifliğini, gözenekli yapıya sahip olması yalıtım ve darbe sönümlemesini, yüksek elastik modüle sahip olması ise şekil kararlılığını ve yük taşıma potansiyelini ortaya koyarak onu havacılık, otomotiv, mobilya, ambalaj, spor gibi sektörlerde kullanılabilir yapmıştır. Ancak su absorpsiyonunun yüksek çıkması dış mekân uygulamalarını sınırlandırarak mobilya desteğinde, spor ayakkabı iç dolgusunda veya taşımada titreşim emici olarak kullanımına olanak sağlamaktadır.

Kompozitin daha fazla alanda kullanılabilmesi için gözenek oluşumunu engellemek adına lifi modifiye etme yöntemi, PA 6 için kullanılacak çözücü, hazırlanan çözeltinin derişimi, kullanılan lif adedi ve yerleşimi, kompozit üretim tekniği ve PU türü değiştirilebilir. Bu sayede fiziksel özelliklerin iyileşmesiyle birlikte mekanik kazanımlarda da iyileşme görülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Jingcheng, L., Reddy, V. S., Jayathilaka, W. A. D. M., Chinnappan, A., Ramakrishna, S., Ghosh, R.** (2021). Intelligent Polymers, Fibers and Applications, *Polymers*, 13(9), doi: 10.3390/polym13091427.
- [2] **Balasubramanian, M.** (2008). *Composite Materials and Processing*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [3] **JEC Group** (2023). *JEC Observer Overview of The Global Composites Market 2022-2027*, [Online]. Available: https://www.jeccomposites.com/wp-content/uploads/2023/06/v2_14985_DP-UK_JEC-Observer-ECO.pdf.
- [4] **Kalkınma Bakanlığı** (2019). *On Birinci Kalkınma Planı*, Ankara: Kalkınma Bakanlığı Kimya Sanayii Çalışma Raporu.
- [5] **Brauns J., Rocens, K.** (2006). Reinforced Materials: Elastic Properties and Strength Prediction. In Buschow, K. H. J., Cahn, R. W., Flemings, M. C., Ilshner, B., Kramer, E. J., Mahajan, S. & Veyssi re, P. (Eds.), *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (1–9), Oxford: Elsevier, doi: <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/02137-9>.
- [6] **Kalia, S.** (2018). *Lignocellulosic Composite Materials*. Cham, Switzerland: Springer Nature.
- [7] **Kar, K. K.** (2017). *Composite Materials Processing, Applications, Characterizations*. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- [8] **Güven, O., Monteiro, S. N., Moura, E. A. B., Drelich, J. W.** (2016). Re-Emerging Field of Lignocellulosic Fiber – Polymer Composites and Ionizing Radiation Technology in their Formulation, *Polymer Reviews*, 56(4), pp. 702–736, doi: 10.1080/15583724.2016.1176037.
- [9] **Başer U., Bozoğlu, M.** (2020). Türkiye’nin Kenevir Politikası ve Piyasasına Bir Bakış, *Tarım Ekonomisi Araştırmaları Dergisi*, 6 (2), 127–135.
- [10] **Gizlenci, Ş., Acar, M., Yiğen, Ç., Aytaç, S.** (2019). *Kenevir Tarımı*, Ankara: Tarım ve Orman Bakanlığı- Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü.
- [11] **Url-11** <<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/industrial-hemp-market>> erişim tarihi 21.05.2025.
- [12] **Url-12** <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/industrial-hemp-market-84188417.html>> erişim tarihi 21.05.2025.
- [13] **Url-13** <<https://nova-institute.eu/news/pr/?id=104>> erişim tarihi 21.05.2025.
- [14] **Demirbek, D. M., Bulut, M. O.** (2021). Kenevir Liflerinin Eldesi, Özellikleri Ve Kompozit Uygulama Alanları, *International Journal of Natural and Applied Sciences*, 4(2), 176-191.

- [15] **Sewidan, M. A., Hamza, A. A.** (2020). The influence of grafting process on the optical, geometrical, and structural parameters of nylon-6 fibers. *Microscopy Research and Technique*, 83(1), 56-65.
- [16] **Kiziltas, E. E., Yang, H. S., Kiziltas, A., Boran, S., Ozen, E., Gardner, D. J.** (2016). Thermal analysis of polyamide 6 composites filled by natural fiber blend, *BioResources*, 11(2), 4758–4769, doi: 10.15376/biores.11.2.4758-4769.
- [17] **Szycher, M.** (2013). *Szycher'S handbook of PolyurethaneS Second edition*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [18] **Clemitsen, I.** (2008). *Castable Polyurethane Elastomers*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [19] **Sharmin E., Zafar, F.** (2012). *Polyurethane: An Introduction,* Polyurethane. InTech, doi: 10.5772/51663.
- [20] **Url-20,** < <https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sort=plf-f&src=s&sid=ad96c2b0e2449169de418181a767aa76&sot=a&sdt=a&sl=29&s=TITLE-ABS-KEY%28hemp+composite%29&origin=resultslist&count=10&analyzeResults=Analyze+results>> erişim tarihi 21.05.2025.
- [21] **Scheibe, M., Urbaniak, M., Kukulka, W., Bledzki, A.** (2024). Application of Natural (Plant) Fibers Particularly Hemp Fiber as Reinforcement in Hybrid Polymer Composites - Part III. Investigations of Physical and Mechanical Properties of Composites Reinforced with Hemp Fibers, *Journal of Natural Fibers*, 21(1), doi: 10.1080/15440478.2024.2414194.
- [22] **Lakho, M. A., Bhatti, M. T., Rajpar, A. H., Khoso, M. A., Qazi, I. A.** (2018). Comparrative tensile behaviour study of locally developed jute reinforced composite materials with conventional composite materials, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 4(3), 370–377, doi: 10.1080/2374068X.2018.1440867.
- [23] **Takemura K., Minekage, Y.** (2007). Effect of molding condition on tensile properties of hemp fiber reinforced composite, *Advanced Composite Materials: The Official Journal of the Japan Society of Composite Materials*, 16(4), 385–394, doi: 10.1163/156855107782325177.
- [24] **Ayyampilli, S. P., Suresh, R., Hegde, M. G.** (2024). Effect of Hemp and Sheep Wool Reinforcements on Mechanical and Acoustic Properties in Natural Fibre Polymer Composite using Vacuum Bag Moulding Process, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 1-10, doi: 10.1007/s40033-024-00807-4.
- [25] **Zhao, W., Sui, Z., Zhang, Q., Sun, L., Zu, B.** (2024). Hydrophobic and mechanical strength enhancement of hemp fabric and paper enabled by waterborne polyurethane-derived functional coating, *Cellulose*, 31(3), 1687–1703, doi: 10.1007/s10570-023-05703-w.
- [26] **Ahmad, F., Mushtaq, B., Ahmad, S., Rasheed, A., Nawab, Y.** (2023). A Novel Composite of Hemp Fiber and Alginate Hydrogel for Wound

Dressings, *Journal of Polymers and the Environment*, 31(6), 2294–2305, doi: 10.1007/s10924-023-02756-7.

- [27] **Raju A., Chandrasekaran, K.** (2024). Comparison of glass/epoxy and hemp/epoxy honeycomb core with MWCNT filler on its comprehensive performance in buckling, static and dynamic behaviors of sandwich composite plates, *Polymer Bulletin*, 81(18), 17317–17345 doi: 10.1007/s00289-024-05506-4.
- [28] **Singh, S. P., Dutt, A., Hirwani, C. K.** (2023). Mechanical, Modal and Harmonic Behavior Analysis of Jute and Hemp Fiber Reinforced Polymer Composite, *Journal of Natural Fibers*, 20(1), doi: 10.1080/15440478.2022.2140328.
- [29] **Khalid, A. M., Zuhri, M. Y. M., Hairuddin, A. A., As'arry, A.** (2024). Properties of polyurethane foam/natural fibre composite for air conditioning insulation, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 1-13, doi: 10.1080/2374068X.2024.2420444.
- [30] **Alshahrani H., Prakash, V. R. A.** (2024). Characterisation of Nanocellulose from Waste Pisum Sativum Sheath and its Sunn Hemp Fibre-Polyester Composite: A Step Towards Valorisation of Biomass, *Waste and Biomass Valorization*, 16(4), 1999-2010 doi: 10.1007/s12649-024-02794-9.
- [31] **Corbin, A.-C., Ferreira, M., Rashed Labanieh, A., Soulat, D.** (2020). Natural fiber composite manufacture using wrapped hemp roving with PA12, *Materials Today: Proceedings*, 31(2), S329-S334.
- [32] **Sezgin, H., Duru, S. C., Candan, C.** (2022). Evaluation Of Acoustic Performance of Hemp and Cotton Fiber Reinforced Thermoplastic Composites, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 27(1), 151–162, doi: 10.17482/uumfd.925486.
- [33] **Behera, S., Gautam, R. K., Mohan, S.** (2022). Polylactic acid and polyhydroxybutyrate coating on hemp fiber: Its effect on hemp fiber reinforced epoxy composites performance, *Journal of Composite Materials*, 56(6), 929–939, doi: 10.1177/00219983211066991.
- [34] **Hamzaoui, R., Guessasma, S., Mecheri, B., Eshtiaghi, A. M., Bennabi, A.** (2014). Microstructure and mechanical performance of modified mortar using hemp fibres and carbon nanotubes, *Materials and Design*, 56, 60–68, doi: 10.1016/j.matdes.2013.10.084.
- [35] **Kabir, M. M., Wang, H., Lau, K. T., Cardona, F., Aravinthan, T.** (2012). Mechanical properties of chemically-treated hemp fibre reinforced sandwich composites, *Composites Part B: Engineering*, 43(2), 159–169, doi: 10.1016/j.compositesb.2011.06.003.
- [36] **Longkullabutra, H., Nhuapeng, W., Thamjaree, W., Tunkasiri, T.** (2008). Mechanical properties of hemp fiber composites with carbon nanotubes reinforcement, *Advanced Materials Research*, 55–57, 553–555, doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.55-57.553.
- [37] **Abbel, R., Risani, R., Nourtier, M., Donaldson, L., Brunschwig, C., Mayer-Laigle, C., et al.** (2024). Coating of Hemp Fibres with Hydrophobic

Compounds Extracted from Pine Bark, *Fibers*, 12(11), doi: 10.3390/fib12110096.

- [38] **Désiré, C. Y., Jean-Bosco, S. T., Yona Arnaud Maxime, C.** (2024). Impact of Surface Modification of Hemp Fibers Using a Coupling Agent in Solvent on the Properties of Polyethylene Composites, *Biomaterials Connect*, 1(1), 1-10, doi: 10.69709/BIOMATC.2024.131030.
- [39] **Anand, P. B., Nagaraja, S., Jayaram, N., Sreenivasa, S. P., Almakayeel, N., Khan, T. M. Y., et al.** (2023). Kenaf Fiber & Hemp Fiber Multi-Walled Carbon Nanotube Filler-Reinforced Epoxy-Based Hybrid Composites for Biomedical Applications: Morphological and Mechanical Characterization, *Journal of Composites Science*, 7(8), doi: 10.3390/jcs7080324.
- [40] **Chimeni-Yomeni, D., Faye, A., Rodrigue, D., Dubois, C.** (2021). Behavior of polyethylene composites based on hemp fibers treated by surface-initiated catalytic polymerization, *Polymer Composites*, 42(5), 2334–2348, doi: 10.1002/pc.25981.
- [41] **Güney, O., Bilici, İ., Doğan, D., Metin, A. Ü.** (2023). Mechanical and thermal properties of recycled polyethylene/surface treated hemp fiber bio-composites, *Polymer Composites*, 44(8), 4976–4992, doi: 10.1002/pc.27463.
- [42] **Razavi-Nouri, M., Afsharkohan, M., Rezadoust, A. M., Zaredar, Z.** (2024). Printability and mechanical properties of solution impregnated continuous jute yarn reinforced acrylonitrile butadiene styrene composites fabricated by fused deposition modeling, *Polymer Composites*, 45(12), 11312–11327, doi: 10.1002/pc.28567.
- [43] **Barnat-Hunek, D., Smarzewski, P., Brzyski, P.** (2017). Properties of Hemp–Flax Composites for Use in the Building Industry, *Journal of Natural Fibers*, 14, (3), 410–425, doi: 10.1080/15440478.2016.1212764.
- [44] **Chuminjak, Y., Singjai, P., Mai Sci, C. J., Veingnon, S.** (2013). Surface Modification of Hemp Fabric with Sparked Titanium and Electrophoretically Deposited CNTs for Reinforced Polyester Composites, *Chiang Mai J. Sci.* 40(3), 499-506.
- [45] **Smith B. C.** (2023). Infrared Spectroscopy of Polymers, XI: Introduction to Organic Nitrogen Polymers, *Spectroscopy*, 38(3), 14–18
- [46] **Mark, J. E.** (1999). *Polymer Data Handbook*, New York, NY, USA: Oxford University Press.
- [47] **Url-47** <<https://www.labcompare.com/10-Featured-Articles/352695-Pathlength-Considerations-With-ATR-Sampling-in-FTIR/>>, erişim tarihi 21.05.2025.
- [48] **Sharma, S. K.** (2018). *Handbook of Materials Characterization*. Singapore: Springer.
- [49] **Chanda, M.** (2018). *Plastics Technology Handbook Fifth Edition*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- [50] **Stival Bittencourt, P. R., Martins Fernandes, D., Fernandes Silva, M., Karoline Lima, M., Winkler Hechenleitner, A. A., Gómez Pineda,**

- E. A. (2010). Lignin modified by formic acid on the PA6 films: Evaluation on the morphology and degradation by UV radiation, *Waste and Biomass Valorization*, 1(3), 323–328, doi: 10.1007/s12649-010-9035-5.
- [51] **Kumar, R., Ganguly, A., Purohit, R.** (2023). Thermogravimetric analysis of natural fiber reinforced hybrid composites – A review, *Materials Today: Proceedings*, doi: 10.1016/j.matpr.2023.08.025.
- [52] **Monteiro, S. N., Calado, V., Rodriguez, R. J. S., Margem, F. M.** (2012). Thermogravimetric behavior of natural fibers reinforced polymer composites-An overview, *Materials Science and Engineering: A*, 557, 17–28, doi: 10.1016/j.msea.2012.05.109.
- [53] **Apaydın Varol E., Mutlu, Ü.** (2023). TGA-FTIR Analysis of Biomass Samples Based on the Thermal Decomposition Behavior of Hemicellulose, Cellulose, and Lignin, *Energies*, 16(9), doi: 10.3390/en16093674.
- [54] **Ben, G., Kobayashi, Y., Sakata, K.** (2013). Mechanical properties of kenaf composites coated with several nanofibers, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(20), 1534–1541, doi: 10.1177/0731684413494111.
- [55] **Arıcıoğlu, M. K., Mert, B. ve Soydan, Y.** (2000). Polimer Malzemelerin Mekanik Analiz Yöntemleri, *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(1-2), 51-58.
- [56] **Hadjadj, A., Jbara, O., Tara, A., Gilliot, M., Malek, F., Maafi, E. M., et al.** (2016). Effects of cellulose fiber content on physical properties of polyurethane based composites, *Composite Structures*, 135, 217–223, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.09.043.
- [57] **Haghighatnia, T., Abbasian, A., Morshedien, J.** (2017). Hemp fiber reinforced thermoplastic polyurethane composite: An investigation in mechanical properties, *Industrial Crops and Products*, 108, pp. 853–863, doi: 10.1016/j.indcrop.2017.07.020.
- [58] **Sair, S., Oushabi, A., Kammouni, A., Tanane, O., Abboud, Y., el Bouari, A.** (2018). Mechanical and thermal conductivity properties of hemp fiber reinforced polyurethane composites, *Case Studies in Construction Materials*, 8, 203–212, doi: 10.1016/j.cscm.2018.02.001.
- [59] **Kabir, M. M., Wang, H., Lau, K. T., Cardona, F.** (2012). Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview, *Composites Part B: Engineering*, 43 (7), 2883–2892, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.04.053.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Meryem KARDAŞ

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kardaş, M., Gümüş, Ö. M.** (2025), Investigation of Mechanical Properties of Polyurethane Composites Reinforced with PA6 Coated Hemp Rope, *International Yıldırım Bayezid Scientific Research and Innovation Symposium-I*, Bursa, Türkiye: May 9-10.