



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ÇEŞİTLİ PARAMETRELERDE ÜRETİLMİŞ
NANO TAKVİYELİ TERMOPLASTİK
MALZEMELERİN
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI

Esma GAVGALI

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Esma GAVGALI tarafından hazırlanan “Çeşitli Parametrelerde Üretilmiş Nano Takviyeli Termoplastik Malzemelerin Şekillendirilebilirliğinin ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması” adlı tez çalışması 27/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Murat MAYDA

.....

Danışman

Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

.....

Üye

Doç. Dr. Barış GÖKÇE

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZTÜRK

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ŞAHBAZ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 231419001 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Esmâ GAVGALI

Tarih: 16/07/2025

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ÇEŞİTLİ PARAMETRELERDE ÜRETİLMİŞ NANO TAKVİYELİ TERMOPLASTİK MALZEMELERİN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Esmâ GAVGALI

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

2025, 121 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

Prof. Dr. Murat MAYDA

Doç. Dr. Barış GÖKÇE

Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZTÜRK

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ŞAHBAZ

Bu doktora tez çalışmasında, savunma sanayi, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde yüksek kullanım potansiyeline sahip, elyaf takviyeli polietilen (PE) matrisli kompozit malzemelerin mekanik ve şekillendirilebilirlik özellikleri kapsamlı olarak incelemiştir. Karbon nanotüp (KNT) takviyeli kompozit malzemeler, üstün mukavemet/ağırlık oranları ve gelişmiş mekanik özellikleri nedeniyle modern mühendislik uygulamalarında giderek artan bir ilgi görmektedir. Bu kapsamda, farklı dokuma türlerine (düz, dimi, $\pm 45^\circ$) ve takviye elyaflarına (cam, karbon) sahip PE matrisli kompozit numuneler üretilmiş düz ve dimi dokuma içeren yapıların ayrıca KNT takviyeli versiyonları hazırlanarak toplamda on farklı numune grubu oluşturulmuştur. Üretilen numunelere çekme, üç nokta eğme, sertlik (Shore-D), ve Erichsen şekillendirme testleri uygulanmış, elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Çekme testlerinde, KNT takviyeli dimi dokuma karbon elyaf takviyeli kompozitler, 240,32 MPa ile en yüksek çekme mukavemetini göstermiştir. Üç nokta eğme testlerinde, KNT takviyeli düz dokuma cam elyaf takviyeli kompozitler 43,19 MPa maksimum gerilme değeri sergilemiştir. Sertlik testlerinde KNT takviyeli dimi dokuma karbon elyaf takviyeli kompozitler 66,8 Shore-D değeri ile en yüksek yüzey sertlik değeri sunmuştur. Erichsen şekillendirme testleri, dimi dokuma karbon elyaf takviyeli kompozitlerin hem mukavemet hem de şekil alabilme kabiliyeti açısından üstün performans sergilediğini ortaya koymuştur. KNT takviyesiyle tüm numunelerde %4,44 ile %151,96 arasında artan şekillendirme kuvvetleri ve %24,21'e kadar varan oranda daha fazla deformasyon kapasitesi elde edilmiştir. Bu gelişmiş mekanik özelliklerin temel nedenleri arasında, karbon nanotüplerin matris içinde homojen dağılması, yük transferini iyileştirmesi ve çatlak ilerlemesini baskılaması yer almaktadır. Bu çalışma, karbon nanotüp takviyesinin kompozit malzeme performansındaki belirleyici rolünü ortaya koymakta, uygulanan test metodolojisinin önemine dikkat çekmekte ve literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Elde edilen bulgular, karbon nanotüp takviyeli dimi dokuma karbon elyaf takviyeli kompozitlerin genel mekanik performans açısından optimum çözüm sunduğunu kanıtlamakta ve bu teknolojinin kompozit malzeme geliştirme alanındaki yüksek potansiyeline işaret ederek gelecekte yapılacak araştırmalar için değerli bir kaynak oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Cam elyaf, elyaf takviyeli kompozit, Erichsen test metodu, karbon elyaf, karbon nanotüp, mekanik testler, şekillendirilebilirlik

ABSTRACT

Ph.D THESIS

INVESTIGATION OF THE FORMABILITY AND MECHANICAL PROPERTIES OF NANO REINFORCED THERMOPLASTIC MATERIALS PRODUCED WITH VARIOUS PARAMETERS

Esma GAVGALI

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

2025, 121 Pages

Jury

Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

Prof. Dr. Murat MAYDA

Assoc. Prof. Dr Barış GÖKÇE

Assist. Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Assist. Prof. Dr. Mehmet ŞAHBAZ

In this doctoral thesis, the mechanical and formability properties of fiber reinforced polyethylene (PE) matrix composite materials with high potential for use in the defense, aerospace and automotive industries were extensively investigated. Carbon nanotube (CNT) reinforced composite materials are receiving increasing attention in modern engineering applications due to their superior strength-to-weight ratios and enhanced mechanical properties. Within this scope, composite samples with a PE matrix were produced using different weave types (plain, twill, $\pm 45^\circ$) and reinforcement fibers (glass, carbon). Additionally, CNT reinforced versions of the structures with plain and twill weaves were prepared, resulting in a total of ten different sample groups. The specimens were subjected to tensile, three-point bending, hardness (Shore-D) and Erichsen forming tests and the results were analyzed comparatively. In tensile tests, CNT reinforced twill woven carbon fiber composites exhibited the highest tensile strength of 240.32 MPa. In three-point bending tests, CNT reinforced plain woven glass fiber composites demonstrated a maximum tensile value of 43.19 MPa. In the hardness tests, CNT reinforced twill woven carbon fiber composites exhibited the highest surface hardness value with 66.8 Shore-D. Erichsen formability tests revealed that twill woven carbon fiber composites showed superior performance in both strength and formability. With CNT reinforcement, the forming forces increased by 4.44% to 151.96% and up to 24.21% more deformation capacity was achieved. The main reasons behind these improved mechanical properties include homogeneous dispersion of CNTs in the matrix, enhanced load transfer and suppression of crack propagation. This study highlights the critical role of carbon nanotube reinforcement in determining composite material performance, emphasizes the importance of the applied testing methodology and fills an important gap in literature. The findings confirm that CNT reinforced twill woven carbon fiber composites offer an optimal solution in terms of overall mechanical performance and provide a valuable reference for further research, underlining the high potential of this technology for future composite material development.

Keywords: Carbon fiber, carbon nanotube, Erichsen test method, fiber reinforced composite, formability, glass fiber, mechanical tests

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmam süresince, değerli bilgilerini ve deneyimlerini benimle paylaşan, akademik rehberliği ve her aşamada sağladığı kıymetli desteği ile yolumu aydınlatan danışmanım Sayın Prof. Dr. Murat DİLMEÇ'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Üretim sürecinde katkılarını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesinde yer alarak yapıcı eleştirileri ve yol gösterici önerileriyle çalışmamın gelişimine önemli katkılarda bulunan saygıdeğer jüri üyelerim Doç. Dr. Barış GÖKÇE'ye ve Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımı yürüttüğüm; Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarı'na, Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Hidroşekillendirme Laboratuvarı'na, Necmettin Erbakan Üniversitesi Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat Atölyesi ve Kompozit Laboratuvarı'na ve Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Metal Şekillendirme Laboratuvarı'na teşekkür ederim.

Doktora eğitimim süresince yanımda olan, bana moral veren ve desteklerini hissettiren değerli arkadaşlarıma dostlukları ve anlayışları için teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde olduğu gibi akademik çalışmalarımda da koşulsuz sevgileri, sabırları ve cesaretlendirici tutumlarıyla her zaman yanımda olan canım annem Ayşegül GAVGALI ve canım babam Mehmet GAVGALI'ya teşekkür ederim.

İhtiyacım olan her anda yanımda olan canım ablam Esra BAKI ve canım kardeşim Özgenur GAVGALI'ya, çalışmama sağladığı katkılar ve desteğiyle her zaman yanımda olan değerli abim Recep GAVGALI'ya ve en yakın dostum, canım M. Berk GAVGALI'ya; varlıklarıyla bana güç verdikleri için ayrı ayrı teşekkür ederim.

Esma GAVGALI
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	iv
ÇİZELGELER LİSTESİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kompozit Malzemeler	3
1.2. Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler.....	5
1.2.1. Polimer matrisli kompozitler	6
1.2.2. Metal matrisli kompozitler.....	11
1.2.3. Seramik matrisli kompozitler.....	12
1.3. Takviye Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler	13
1.3.1. Cam elyaf.....	14
1.3.2. Karbon elyaf	14
1.3.3. Aramid elyaf	15
1.4. Karbon Nanotüp.....	15
1.5. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri	16
1.6. Sıcak Presleme Yöntemi ile Kompozit Malzeme Üretimi.....	18
1.7. Kompozit Malzemelere Uygulanan Mekanik Testler.....	19
1.7.1. Çekme testi	20
1.7.2. Üç nokta eğme testi.....	20
1.7.3. Sertlik testi	21
1.8. Kompozit Malzemelere Uygulanan Şekillendirme Testleri	21
1.8.1. Erichsen şekillendirme testi	22
1.8.2. Hidroşekillendirme testi.....	23
1.9. Kompozit Malzemelerin Hasar Mekanizmaları.....	24
1.9.1. Matris çatlağı	25
1.9.2. Elyaf kırılması.....	25
1.9.3. Delaminasyon	26
1.10. Taramalı Elektron Mikroskobu.....	27
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	29
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	37
3.1. Malzeme Tasarımı	37
3.2. Malzeme Üretimi	39
3.3. Mekanik Testler	41

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	46
4.1. Çekme Testi Sonuçları.....	46
4.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları	59
4.3. Shore-D Testi Sonuçları.....	71
4.4. Hidroşekillendirme Testi Sonuçları	73
4.5. Erichsen Şekillendirme Testi Sonuçları.....	74
4.6. SEM Görüntüleri.....	88
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	96
5.1. Sonuçlar	96
5.2. Öneriler	98
KAYNAKLAR	99
EKLER	106

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	4
Şekil 1.2. Matris ve takviye elemanın geometrik düzeni	5
Şekil 1.3. Cam, karbon ve aramid elyaf kumaşlar	13
Şekil 1.4. Kompozit malzemelerde hasar mekanizmaları	24
Şekil 3.1. Numunelerin dizilimi ve tasarımı	38
Şekil 3.2. a) PE malzeme, b) Malzemelerin kalıba serilmesi, c) Numune üretimi.....	39
Şekil 3.3. KNT takviyesiz test numunelerinin görseli	40
Şekil 3.4. KNT takviyeli test numunelerinin görseli	40
Şekil 3.5. Çekme test cihazı.....	41
Şekil 3.6. Üç nokta eğme test cihazı.....	42
Şekil 3.7. Shore-D test cihazı	42
Şekil 3.8. Hidroşekillendirme test cihazı.....	43
Şekil 3.9. a) Erichsen şekillendirme test cihazı ve b) Şekillendirme ünitesi.....	43
Şekil 3.10. Erichsen test cihazının şematik görüntüsü	44
Şekil 3.11. Kompozit levhaların Erichsen şekillendirme işlemi	44
Şekil 3.12. a) Taramalı elektron mikroskobu ve b) Kaplama ünitesi	45
Şekil 4.1. Çekme testi sonrası numune görüntüleri	47
Şekil 4.2. Numune 1 (PE_Cam_Düz)'e ait gerçek/mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	48
Şekil 4.3. Numune 2 (PE_Cam_Dimi)'ye ait gerçek/mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	49
Şekil 4.4. Numune 3 (PE_Karbon_Düz)'e ait gerçek/mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	50
Şekil 4.5. Numune 4 (PE_Karbon_Dimi)'e ait gerçek/mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	51
Şekil 4.6. Numune 5 (PE_Cam_±45°)'e ait gerçek/mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	52
Şekil 4.7. Numune 6 (PE_Karbon_±45°)'ya ait gerçek/mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	53
Şekil 4.8. Numune 1 (PE_Cam_Düz), Numune 2 (PE_Cam_Dimi), Numune 3 (PE_Karbon_Düz) ve Numune 4 (PE_Karbon_Dimi)'e ait mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	54
Şekil 4.9. Numune 5 (PE_Cam_±45°) ve Numune 6 (PE_Karbon_±45°)'ya ait mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	55
Şekil 4.10. KNT takviyeli numunelerin çekme testi sonrası numune görüntüleri	56
Şekil 4.11. KNT takviyeli numunelere ait gerçek/mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	57
Şekil 4.12. Maksimum çekme gerilmesi karşılaştırması	58
Şekil 4.13. KNT takviyesiz numunelerin üç nokta eğme testi sonrası numune görüntüleri.....	60
Şekil 4.14. Numune 1 (PE_Cam_Düz)'e ait gerilme-yüzde uzama eğrileri	61
Şekil 4.15. Numune 2 (PE_Cam_Dimi)'ye ait gerilme-yüzde uzama eğrileri	62
Şekil 4.16. Numune 3 (PE_Karbon_Düz)'e ait gerilme-yüzde uzama eğrileri	63
Şekil 4.17. Numune 4 (PE_Karbon_Dimi)'e ait gerilme-yüzde uzama eğrileri	64
Şekil 4.18. Numune 5 (PE_Cam_±45°)'e ait gerilme-yüzde uzama eğrileri	65
Şekil 4.19. Numune 6 (PE_Karbon_±45°)'ya ait gerilme-yüzde uzama eğrileri.....	66
Şekil 4.20. Numune 1 (PE_Cam_Düz), Numune 2 (PE_Cam_Dimi), Numune 3 (PE_Karbon_Düz), Numune 4 (PE_Karbon_Dimi), Numune 5 (PE_Cam_±45°) ve Numune 6 (PE_Karbon_±45°)'ya ait gerilme-yüzde uzama eğrileri	67

Şekil 4.21. KNT takviyeli numunelerin üç nokta eğme testi sonrası numune görüntüleri	68
Şekil 4.22. Numune 7 (PE_KNT_Cam_Düz), Numune 8 (PE_KNT_Cam_Dimi), Numune 9 (PE_KNT_Karbon_Düz) ve Numune 10 (PE_KNT_Karbon_Dimi)'a ait gerilme-yüzde uzama eğrileri	69
Şekil 4.23. Maksimum eğilme gerilmesi karşılaştırması.....	70
Şekil 4.24. KNT takviyesiz numunelerin Erichsen şekillendirme testi sonrası görüntüleri	75
Şekil 4.25. Numune 1 (PE_Cam_Düz)'e ait kuvvet-kubbe yüksekliği eğrileri	77
Şekil 4.26. Numune 2 (PE_Cam_Dimi)'ye ait kuvvet- kubbe yüksekliği eğrileri.....	78
Şekil 4.27. Numune 3 (PE_Karbon_Düz)'e ait kuvvet- kubbe yüksekliği eğrileri.....	79
Şekil 4.28. Numune 4 (PE_Karbon_Dimi)'e ait kuvvet- kubbe yüksekliği eğrileri	80
Şekil 4.29. Numune 5 (PE_Cam_±45°)'e ait kuvvet- kubbe yüksekliği eğrileri.....	81
Şekil 4.30. Numune 6 (PE_Karbon_±45°)'ya ait kuvvet-kubbe yüksekliği eğrileri	82
Şekil 4.31. Numune 1 (PE_Cam_Düz), Numune 2 (PE_Cam_Dimi), Numune 3 (PE_Karbon_Düz), Numune 4 (PE_Karbon_Dimi), Numune 5 (PE_Cam_±45°) ve Numune 6 (PE_Karbon_±45°)'ya ait kuvvet-kubbe yüksekliği eğrileri	83
Şekil 4.32. KNT takviyeli numuneleri Erichsen şekillendirme testi sonrası görüntüleri	84
Şekil 4.33. 7 (PE_KNT_Cam_Düz), 8 (PE_KNT_Cam_Dimi), 9 (PE_KNT_Karbon_Düz) ve 10 (PE_KNT_Karbon_Dimi)'a ait kuvvet-kubbe yüksekliği eğrileri.....	85
Şekil 4.34. Maksimum kuvvet karşılaştırması.....	86
Şekil 4.35. Maksimum kubbe yüksekliği karşılaştırması	87
Şekil 4.36. SEM görüntüsü alınan örnek çekme testi numune görüntüleri	89
Şekil 4.37. SEM görüntüsü alınan örnek Erichsen testi numune görüntüleri.....	89
Şekil 4.38. Çekme testi sonrası numunelerin SEM görüntüleri a) PE_Cam_Düz, b) PE_Cam_Dimi, c) PE_Karbon_Düz, d) PE_Karbon_Dimi, e) PE_Cam_±45° ve f) PE_Karbon_±45°	90
Şekil 4.39. Erichsen şekillendirme testi sonrası numunelerin SEM görüntüleri a) PE_Cam_Düz, b) PE_Cam_Dimi, c) PE_Karbon_Düz, d) PE_Karbon_Dimi, e) PE_Cam_±45° ve f) PE_Karbon_±45°	91
Şekil 4.40. SEM görüntüsü alınan örnek numune görüntüleri	93
Şekil 4.41. Çekme testi sonrası KNT takviyeli numunelerin SEM görüntüleri a) PE_KNT_Cam_Düz, b) PE_KNT_Cam_Dimi, c) PE_KNT_Karbon_Düz ve d) PE_KNT_Karbon_Dimi	93
Şekil 4.42. Erichsen şekillendirme testi sonrası KNT takviyeli numunelerin SEM görüntüleri a) PE_KNT_Cam_Düz, b) PE_KNT_Cam_Dimi, c) PE_KNT_Karbon_Düz ve d) PE_KNT_Karbon_Dimi	94

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Numune adlandırması.....	38
Çizelge 4.1. KNT takviyesiz numunelerin çekme testi sonuçları.....	47
Çizelge 4.2. KNT takviyeli numunelerin çekme testi sonuçları.....	57
Çizelge 4.3. KNT takviyesiz numunelerin üç nokta eğme testi sonuçları.....	60
Çizelge 4.4. KNT takviyeli numunelerin üç nokta eğme testi sonuçları	68
Çizelge 4.5. KNT takviyesiz numunelerin Shore-D testi sonuçları	71
Çizelge 4.6. KNT takviyeli numunelerin Shore-D testi sonuçları.....	72
Çizelge 4.7. KNT takviyesiz numunelerin Erichsen şekillendirme testi sonuçları	76
Çizelge 4.8. KNT takviyeli numunelerin Erichsen şekillendirme testi sonuçları.....	85

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ε	: Birim şekil değiştirme
T _g	: Camı geçiş sıcaklığı (°C)
E	: Elastisite modülü (MPa)
σ	: Gerilme (MPa)
F	: Kuvvet (N)
A	: Yüzey alanı (mm ²)

Kısaltmalar

Al	: Alüminyum
CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Polymer (Karbon elyaf takviyeli polimer)
GFR/PP	: Glass Fiber Reinforced/Polypropylene (Cam elyaf takviyeli polipropilen)
IE	: Erichsen cupping index (Erichsen indeksi)
KNT	: Karbon nanotüp
LDPE	: Low density polyethlene (Düşük yoğunluklu polietilen)
MPa	: MegaPaskal
MMK	: Metal matrisli kompozitler
MWCNT	: Multi Walled Carbon Nanotubes (Çok duvarlı karbon nanotüpler)
RTM	: Resin Transfer Molding (Reçine transfer kalıplama)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı elektron mikroskobu)
SMK	: Seramik matrisli kompozitler
SWCNT	: Single Walled Carbon Nanotubes (Tek duvarlı karbon nanotüpler)
PE	: Polyethylene (Polietilen)
PMK	: Polimer matrisli kompozitler
PP	: Polypropylene (Polipropilen)
PVC	: Polyvinyl Chloride (Polivinilklorür)
UTM	: Universal testing machine (Evrensel test makinesi)

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, geleneksel monolitik malzemelere kıyasla üstün mekanik, termal ve kimyasal özellikleri sayesinde modern mühendislik disiplinlerinde önemli bir materyal sınıfı olarak belirginleşmiş ve günümüzde hala bilim insanları için odak noktası olmaya devam etmektedir. Kompozit malzemeler, temel olarak bir matris fazına gömülü takviye fazından oluşan iki veya daha fazla kurucu fazın makroskobik kombinasyonu şeklinde tanımlanmaktadır. Bu sinerjik kombinasyon, kompozitlerin havacılık, otomotiv, denizcilik ve inşaat gibi endüstriyel sektörlerdeki spesifik uygulamalar için optimize edilmesini sağlayarak gelişmiş malzeme performansına olanak tanımaktadır.

Kompozit malzemeler, yüksek dayanım, düşük yoğunluk, üstün enerji verimliliği, uzun kullanım ömrü vb. özellikleri birleştirme potansiyeline sahiptir. Bu sayede, tek başına sahip olduğu zayıf özellikleri giderilen malzemeler, uygulama alanının ihtiyaçlarına karşılık vermektedir. Araştırmacılar, çevre dostu ve düşük maliyetli (Sarfraz vd., 2021) kompozitlerin üretimi ve kullanımı üzerine çalışmalar yapmaya devam etmektedir.

Elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin mekanik performans parametreleri, elyaf türü, elyaf-matris arayüzey adhezyon karakteristiği, elyaf oryantasyonu ve işleme koşulları dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Bu parametrelerin tam olarak anlaşılması, çeşitli mühendislik uygulamalarında kompozit yapıların performans optimizasyonu için gereklidir. Çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, yüzey sertliği ve darbe direnci gibi mekanik özelliklerin araştırılması ve karakterizasyonu, bu malzemelerin uygulama alanlarına uygunluğunun değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

Poliyeten matrisli elyaf takviyeli termoplastik kompozitler, yüksek mukavemet/ağırlık oranı sayesinde çeşitli endüstrilerde dikkat çeken ileri mühendislik malzemelerinden biridir. Geleneksel metal ve seramik malzemelere kıyasla düşük yoğunluk sergileyen bu kompozitler, aynı zamanda geri dönüştürülebilirlik ve üretim kolaylığı gibi çevresel avantajlar sunmaktadır.

Çekme testi, malzemelerin elastik modülü, akma dayanımı ve kopma uzaması gibi temel mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılan standart bir mekanik karakterizasyon yöntemidir. Elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerde özellikle elyaf oryantasyonunun çekme dayanımına etkisi belirgindir ve anizotropik davranış sergilemektedir. Üç nokta eğme testi, malzemelerin elastisite modülü ve eğilme dayanımı

gibi özelliklerini değerlendirmek için uygulanan bir test metodudur ve kompozitlerin tabakalı yapısının bütünlüğünü değerlendirmede önemli veriler sağlamaktadır. Sertlik testi, Shore-D veya Rockwell gibi ölçekler kullanılarak malzemelerin yüzey direncini sayısal değerlerle ölçmek için kullanılan, malzemenin aşınma direnci ve darbe dayanımı hakkında bilgiler veren pratik bir ölçüm yöntemidir (Sanjay vd., 2018). Erichsen şekillendirme testi, malzemelerin çekme deformasyon davranışlarını analiz ederek şekillendirilebilirlik kapasitelerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan şekillendirme metodolojisidir (Uriya ve Yanagimoto, 2017a; Q. Zhang vd., 2014). Literatürde ‘çukurlaştırma testi’ olarak da anılan bu yöntem, öncelikle metal sacların incelenmesinde kullanılmakla birlikte, kompozitlere de uyarlanabilmektedir (Ying vd., 2024). Termoplastik kompozitler de dahil olmak üzere tabakalı veya sandviç yapıdaki malzemelerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmek için standardize edilmiş bir metodoloji sunmaktadır. Bu test, katmanlı levhaların gerilme deformasyonunu simüle ederek çeşitli yükleme koşulları altında bu levhaların mekanik davranışları hakkında bilgi sağlamaktadır.

Özetle, kompozit malzemeler, özellikle elyaf takviyeli termoplastikler, mekanik performans ve sürdürülebilirlik açısından kayda değer avantajlar sunmaktadır. Bu malzemelerin mekanik davranışlarının detaylı bir şekilde incelenmesi, modern endüstrilerde yenilikçi ve yüksek verimliliğe sahip malzeme çözümlerinin geliştirilmesine olanak tanımakta ve bu sayede malzeme bilimi ile mühendislik uygulamalarının ilerlemesine katkı sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, elyaf türü ve oryantasyonu bağlı olarak belirlenen çeşitli parametreler doğrultusunda üretilmiş karbon nanotüp takviyeli ve takviyesiz, polietilen matrisli elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik davranışları ve performansları hem tek eksenli hem de iki eksenli test yöntemleriyle incelenmiş ve elde edilen bulgularla literatüre katkı sağlanmıştır. Kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olan karbon nanotüplerin matris içerisindeki homojen dağılımı ile elyaf-matris arayüzey bağlanma kalitesine özel önem verilmiştir. Sıcak pres yöntemiyle üretilen numunelere çekme, üç nokta eğme, sertlik, hidroşekillendirme ve Erichsen şekillendirme testleri uygulanarak; malzemelerin şekil değiştirilebilirlik, mukavemet ve sertlik gibi temel mekanik özellikleri detaylı şekilde analiz edilmiştir. Bu testler, kompozitlerin mekanik performanslarına ilişkin kapsamlı veriler sağlayarak, uygulamaya özel optimizasyon süreçlerine katkı sunmaktadır. Böylece, kompozit malzemelerin endüstriyel uygulamadaki şekillendirilebilirliğine ilişkin önemli bulgular elde edilmiştir.

1.1. Kompozit Malzemeler

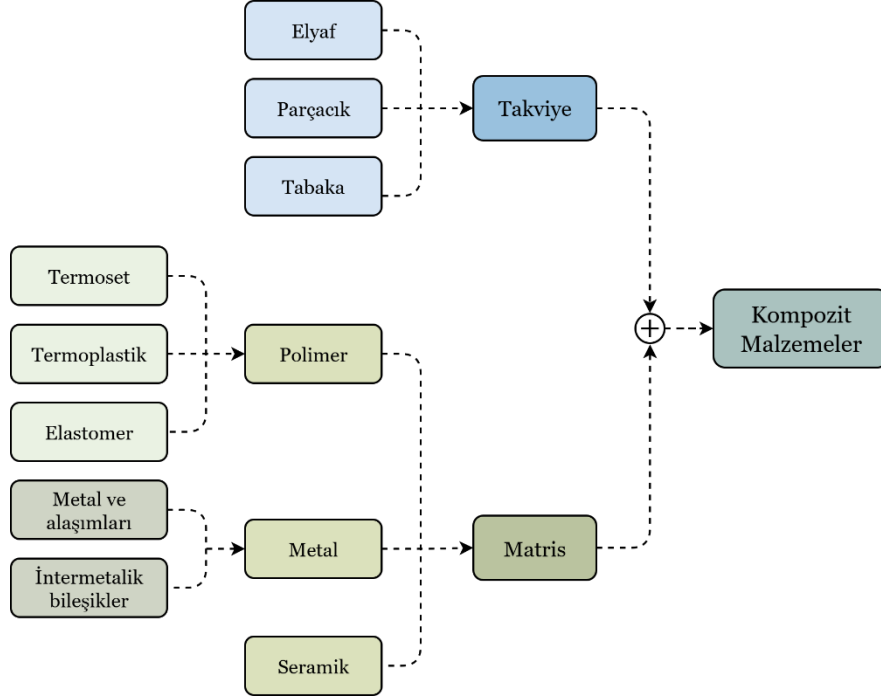
Kompozit malzemeler, makroskobik, mikroskobik veya nanoskopik ölçeklerde iki ya da daha fazla farklı bileşenin bir araya getirilmesiyle oluşan çok fazlı sistemler olarak tanımlanmaktadır. Bu malzemeler, üretim süreçleri sırasında belirli fiziksel ve mekanik özellikleri kazandırmak üzere özel olarak tasarlanmaktadır. Farklı özelliklere sahip bileşenlerin bir arada kullanılması sayesinde, tekil bileşenlerin ayrı ayrı sağlayamayacağı üstün özellik kombinasyonları elde edilmektedir.

Kompozit malzemelerin tarihsel gelişimi incelendiğinde, kökenlerinin Antik Mısır ve Mezopotamya uygarlıklarına kadar uzandığı görülmektedir. MÖ 1500'lü yıllarda bu medeniyetler, çamur ve saman karışımlarını yapı malzemesi olarak kullanarak erken dönem kompozit uygulamalarının temeli atmışlardır. MS 1200'lü yıllarda ise Moğollar, kompozit teknolojisini yay imalatında kullanarak, bu malzemelerin yüksek performans gerektiren askeri uygulamalarda kullanımına öncülük etmişlerdir.

20. yüzyılın başlarında plastik teknolojisinde yaşanan gelişmeler, kompozit malzemelerin modern döneminin başlangıcını oluşturmuştur. İkinci Dünya Savaşı sırasında elyaf takviyeli kompozit malzemeler geliştirilmiş; özellikle cam elyaf takviyeli plastikler (GFRP), radar kubbeleri gibi askeri uygulamalarda yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu dönemde geliştirilen teknolojiler, yalnızca savunma sanayisiyle sınırlı kalmayıp, çeşitli endüstriyel sektörlerde de uyarılma ve kullanım alanı bulmuştur. 1950'li yıllarda karbon elyafların geliştirilmesi ve 1960'lı yıllarda ticari üretimlerinin başlaması ise, kompozit malzeme teknolojisinde devrim niteliğinde bir ilerleme olarak kabul edilmektedir.

Kompozit malzemeler, havacılık, otomotiv ve savunma sanayi gibi yüksek performans gerektiren birçok sektörde uzun süredir başarıyla kullanılmaktadır. Günümüzde ahşap, seramik ve metal gibi geleneksel malzemelerin yerine, bu malzemelerde elde edilemeyen ya da sınırlı olan özellik kombinasyonlarına sahip yeni nesil kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Örneğin, doğal elyaf takviyeli kompozitler dahi, homojen yapılı metal malzemelere kıyasla daha yüksek bir mukavemet/ağırlık oranı sunmaktadır. Kompozit malzemeler, geleneksel malzemelere göre yaklaşık 15 kat daha yüksek çekme mukavemeti sergileyerek, bu özellikleri sayesinde yakıt tüketiminin azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Marichelvam vd., 2021). Bu malzemeler, diğer malzemelere göre gelişmiş mekanik niteliklerinin yanı sıra, kimyasal kararlılık, hafiflik gibi büyük avantajlara sahiptir (Kim vd., 2020).

Kompozit malzeme sınıfı çok geniş bir yelpazeye sahip olduğundan, sınıflandırılmaları oldukça zordur. Ancak, takviye ve matris elemanlarına göre yapılan genel sınıflandırma Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



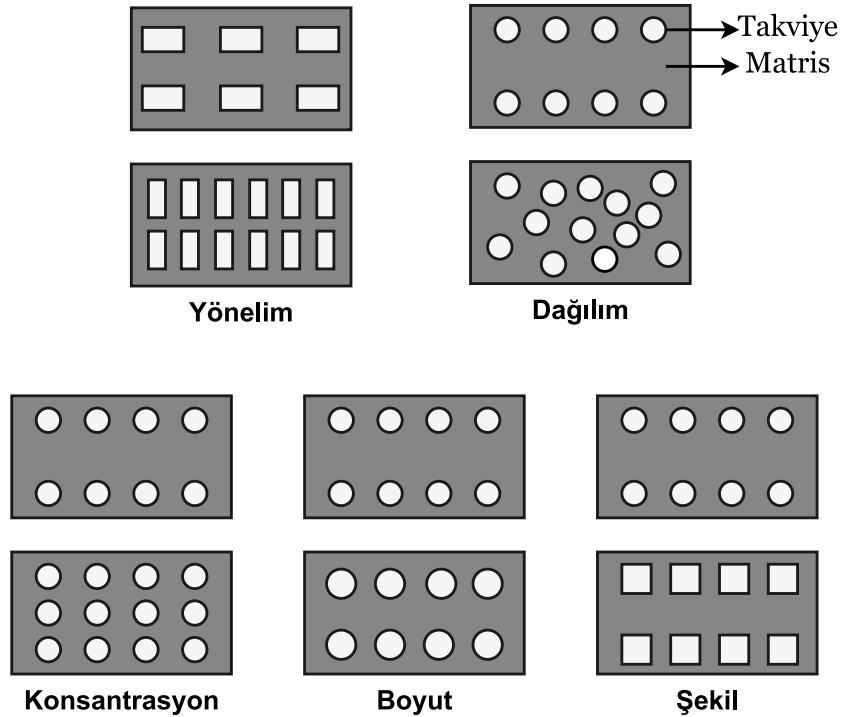
Şekil 1.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, birbirinden farklı fiziksel özelliklere sahip iki ana bileşen olan matris ve takviye elemanın bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Takviye elemanın temel görevi, yapının maruz kaldığı yükü taşımak ve malzemenin dayanımını artırmaktır.

Matris elemanı, takviye elemanlarını bir arada tutan, yük transferini sağlayan ve elyafları çevresel etkilerden koruyan bağlayıcı bileşen olarak işlev görmektedir. Hacimsel olarak yapının büyük bir kısmını oluşturan matrisin başlıca görevi, plastik deformasyon sırasında oluşabilecek çatlakları engellemek ve böylece yapının bütünlüğünü korumaktır. Ayrıca, takviye elemanını istenilen geometrik biçimde sabitlemek ve uygulanan kuvveti bu elemana homojen şekilde iletmektir.

Uygun matris ve takviye malzemesi kombinasyonunun seçimi, istenilen mekanik özelliklerin elde edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Başka bir deyişle, matris ile takviye elemanları arasındaki fiziksel ve kimyasal uyum ne kadar yüksekse, uygulanan yük o denli etkin ve dengeli bir şekilde yapı içerisinde dağıtılır (Şahin, 2015). Bununla birlikte, takviye elemanının matris içerisindeki geometrik düzeni de kompozit malzemenin nihai mekanik performansı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Şekil

1.2’de, takviye elemanlarının matris eleman içerisindeki yerleşim biçimleri görsel olarak sunulmaktadır.



Şekil 1.2. Matris ve takviye elemanın geometrik düzeni

Şekil 1.2, kompozit malzemelerde matris ve takviye elemanlarının geometrik düzenini çeşitli parametreler doğrultusunda görselleştirmektedir. Takviye elemanlarının matris içerisindeki dağılımı, oryantasyonu, konsantrasyonu, boyutu ve geometrik şekli; kompozit yapıların mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini doğrudan etkileyen başlıca faktörler arasında yer almaktadır.

1.2. Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler

Matris fazı, kompozit malzemelerin yapısal bütünlüğünün korunmasında ve işlevselliğinin sağlanmasında temel bir bileşen olarak kritik bir rol üstlenmektedir. Kompozit malzemelerde matris, takviye elemanlarını çevreleyerek bunları bir arada tutan kohezif bir yapı oluşturmakta; aynı zamanda uygulanan dış yüklerin takviye fazına verimli biçimde aktarılmasını sağlayarak yük paylaşımında merkezi bir işlev görmektedir. Matrisin bu yapısal görevi, sadece mekanik yüklerin homojen bir şekilde dağılımını gerçekleştirmekle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda takviye elemanlarını nem,

ısı, oksijen ve kimyasallar gibi çevresel etkilere karşı da koruyarak kompozitin ömrünü ve çevresel dayanımını artırmaktadır. Bu bağlamda, matris fazının sahip olduğu fiziksel, kimyasal ve termomekanik özellikler; kompozit malzemenin performansını doğrudan etkileyen ve mühendislik uygulamalarında malzeme seçimini yönlendiren belirleyici unsurlar arasında yer almaktadır.

Kompozitlerin yüksek performans göstermesi, büyük ölçüde matris ve takviye elemanları arasında kurulan moleküler düzeydeki etkileşimlerin kalitesine bağlıdır. Bu nedenle, matris malzemesinin, seçilen takviye sistemiyle yalnızca fiziksel olarak uyumlu olması değil, aynı zamanda arayüzey bağlanma karakteristikleri, ısıl genleşme katsayısı, işlenebilirlik, servis sıcaklığı ve kimyasal kararlılık gibi çok sayıda parametreyle de örtüşmesi gerekmektedir. Matrisin bu çok yönlü rolü, onu pasif bir bağlayıcıdan ziyade, yapısal tasarımda aktif mühendislik çözümünün bir parçası haline getirmektedir. Özellikle zorlu çevresel koşullarda görev yapacak olan kompozit sistemlerin tasarımında, matrisin elastik modülü, gevrekliği, ısı iletkenliği ve çatlak ilerlemesini engelleyici özellikleri gibi detaylı malzeme parametrelerinin dikkate alınması kaçınılmazdır.

Matris fazının bu çok boyutlu etkisi göz önüne alındığında, mühendislik uygulamalarında uygun matris malzemesinin seçimi, yalnızca performans açısından değil, üretim süreci, maliyet, geri dönüştürülebilirlik ve çevresel etkiler açısından da dikkatle değerlendirilmelidir. Kompozit malzemelerin performans optimizasyonu, matris ve takviye bileşenlerinin birlikte çalışabilirliğini esas alan bütüncül bir yaklaşımı gerektirir.

Matris malzemesinin kimyasal yapısına, termomekanik özelliklerine ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak kompozit malzemeler genel olarak üç ana kategori altında sınıflandırılmaktadır: Polimer matrisli kompozitler (PMK), metal matrisli kompozitler (MMK) ve seramik matrisli kompozitler (SMK). Bu sınıflandırma, kompozit sistemin performansını doğrudan etkileyen temel faktörlerden biri olup, her bir matris türü kendi içinde farklı mühendislik gereksinimlerine yanıt verebilecek şekilde özelleştirilebilmektedir.

1.2.1. Polimer matrisli kompozitler

Son yüzyılda, polimer matrisli kompozitlerin kullanımı, sahip oldukları çok yönlü özellikler sayesinde önemli ölçüde artış göstermiştir (Palanikumar vd., 2016). Özellikle yüksek performanslı polimerler, yüksek sıcaklıklara dayanıklı termoplastikler

öncülüğünde, havacılık ve uzay gibi ileri mühendislik çözümleri gerektiren sektörlerde vazgeçilmez bir konuma ulaşmıştır. Bu malzemeler, yüksek mukavemet/ağırlık oranları sayesinde yük taşıma kapasitesini artırmakta, yapısal optimizasyonu mümkün kılmakta ve dolayısıyla yakıt tüketimini azaltmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerin en dikkat çekici avantajlarından biri, geleneksel metalik ve seramik malzemelere kıyasla çok daha düşük yoğunluğa sahip olmalarıdır. Bu düşük yoğunluk özelliği, özellikle ağırlık sınırlamalarının kritik olduğu havacılık, otomotiv ve yenilenebilir enerji sistemleri gibi sektörlerde bu malzemelerin tercih edilme oranını artırmaktadır (Spanu vd., 2018).

Polimer malzemeler, kimyasal yapılarına ve işleme karakteristiklerine bağlı olarak başlıca iki kategoriye ayrılmaktadır: termoplastikler ve termosetler (Qiao vd., 2023). Termoplastikler, ısıtıldıklarında yumuşayan, soğuduklarında tekrar katılaşabilen ve bu özelliği sayesinde tekrar işlenebilen polimerlerdir. Bu yapı, onları eklemeli imalat, enjeksiyon kalıplama ve termoform gibi hızlı ve esnek üretim tekniklerine uygun hale getirir. Termosetler ise işleme sırasında kimyasal bağlar oluşturarak kalıcı bir sertlik kazanır; bu durum, onların yeniden şekillendirilebilmesini engellerken, yüksek sıcaklık uygulamalarına ve kimyasal ortamlara karşı üstün direnç kazandırır. Son yıllarda, özellikle hızlı üretim döngüleri ve geri dönüştürülebilirlik potansiyelleri nedeniyle termoplastik matrisler, sürdürülebilir mühendislik çözümleri bağlamında daha fazla ilgi görmeye başlamıştır.

Polimer matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan prosesler, seçilen polimerin reolojik ve termomekanik özelliklerine bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Her bir üretim yönteminin belirli avantajları ve sınırlılıkları bulunmakta olup, üretim parametreleri kompozitin nihai performans karakteristikleri üzerinde doğrudan belirleyici olmaktadır. Bu bağlamda, matris polimerlerinin viskoelastik davranışları, özellikle dinamik yükleme koşullarında, yani titreşim, darbeli yükleme ve yorulma altında malzemenin performansını etkilemektedir. Yorulma dayanımının kritik öneme sahip olduğu havacılık ve rüzgâr enerjisi uygulamalarında, bu davranışın doğru modellenmesi büyük önem taşımaktadır.

Son yıllarda, nanoteknoloji alanındaki ilerlemelerle birlikte, polimer matrisli kompozit sistemlerin performansında önemli iyileştirmeler sağlanmıştır. Özellikle nano boyuttaki takviye elemanlarının (örneğin karbon nanotüpler, grafen, nanokil vb.) polimer matrislere entegrasyonu sayesinde; mekanik, termal ve elektriksel özelliklerde kayda değer artışlar elde edilmiştir. Bu gelişmeler, polimer matrisli kompozitlerin geleneksel

sınırlamalarını aşmasını sağlamış; onları sadece yapısal değil, aynı zamanda fonksiyonel ve akıllı malzeme sistemleri haline dönüştürmüştür.

1.2.1.1. Termosetler

Termosetler, üretim öncesi genellikle oda sıcaklığında düşük viskoziteli, akışkan formda bulunan sıvı sistemlerdir. Bu yapı, üretim sürecinde şekil verilmesini kolaylaştırmakta; sertleşme işlemi sonrasında ise yüksek dayanımlı ve kararlı bir yapıya dönüşmektedir. Sertleşme (kürleme) işlemi, ısı uygulaması veya ‘sertleştirici’ adı verilen reaktif kimyasalların katılımıyla başlatılan kimyasal reaksiyonlar yoluyla gerçekleştirilir. Bu reaksiyonlar sonucunda, monomer ve oligomer zincirleri arasında kovalent bağlarla çapraz bağlanma meydana gelir ve termosetler üç boyutlu, düzensiz ama güçlü bir moleküler ağa dönüşür.

Çapraz bağlanma nedeniyle oluşan bu üç boyutlu ağ yapısı, termosetlerin yeniden şekillendirilebilmesini imkansız kılarken, onların ısıl deformasyona karşı dirençli, rijit ve yapısal açıdan stabil olmalarını sağlar (Kouparitsas vd., 2002). Bu nedenle, üretim sırasında yapılan hatalar veya proses parametrelerindeki sapmalar, malzeme israfı ve enerji kaybı gibi ciddi maliyet sorunlarına yol açabilir. Bununla birlikte, termosetlerin işlenebilirliği konusundaki kapsamlı bilgi birikimi, üretim süreçlerinin iyi kontrol edilebilmesini sağlamakta ve bu malzemeleri endüstriyel üretim açısından avantajlı hale getirmektedir. İleri mühendislik uygulamalarında sağladıkları performans-fiyat dengesi ve işlevsel kararlılık nedeniyle, termoset bazlı matris sistemler birçok yüksek teknoloji ürünün temel yapı taşı olmaya devam etmektedir.

1.2.1.2. Termoplastikler

Termoplastikler, genellikle sünek ve şekillendirilebilir yapılarıyla dikkat çeken, yeniden işlenebilir polimer sistemleridir. Bu malzemeler, termosetlere kıyasla daha düşük kırılma göstermekte ve uygulanan mekanik darbeler altında daha yüksek kırılma tokluğu sunmaktadır. Moleküller arasında kimyasal çapraz bağların bulunmaması, termoplastiklerin ısıtıldıklarında tekrar yumuşayıp şekil verilebilir hale gelmelerine olanak tanımakta ve böylece yeniden işlenebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik gibi önemli avantajlar sunmaktadır (Díaz ve Rubio, 2003; Vaidya ve Chawla, 2008). Bu özellikleri, çevresel sürdürülebilirliğin ön planda olduğu modern üretim süreçlerinde

termoplastiklerin tercih edilme oranını artırmakta; aynı zamanda sanayi uygulamalarında esnek üretim stratejilerine uygunluk sağlamaktadır.

Termoplastikler, ortam sıcaklığında amorf ya da yarı-kristal yapılarına bağlı olarak katı ve rijit bir halde bulunur. Ancak camsı geçiş sıcaklığına (Tg) ulaşıldığında, bu malzemelerde viskoelastik davranış gözlemlenir; bu durum, ısıya duyarlı şekillendirme işlemlerinin uygulanabilmesini mümkün kılar. Isıtma işlemi sırasında, bu malzemelerde %3-5 oranında hacimsel genleşme meydana gelirken, bu genleşmeye paralel olarak malzeme yoğunluğunda azalma gözlemlenir. Dolayısıyla, bu tür termal ve fiziksel değişimler, üretim proseslerinin hassas biçimde kontrol edilmesini gerektirmekte ve şekil kararlılığı açısından dikkate alınması gereken önemli parametreler arasında yer almaktadır.

Termoplastiklerin bu yeniden şekillenebilirliği, onları ısı ile şekillendirme, enjeksiyon kalıplama, termoform ve ekstrüzyon gibi yüksek verimli üretim yöntemlerine son derece uygun hale getirmektedir. Bu üretim tekniklerinin düşük çevrim süreleri, düşük enerji gereksinimleri, otomasyon sistemlerine kolay entegrasyon sağlaması ve işçilik maliyetlerini minimize etmesi; termoplastiklerin özellikle seri üretim gerektiren sanayi uygulamalarında termosetlere göre daha avantajlı bir konumda yer almasına neden olmaktadır (Palanikumar vd., 2016). Ayrıca, bu süreçlerin sunduğu hassas geometrik kontrol ve yüksek yüzey kalitesi, termoplastiklerin karmaşık tasarımlar içeren yapısal ve fonksiyonel bileşenlerde kullanımını da teşvik etmektedir.

Endüstride yaygın olarak kullanılan termoplastikler arasında polietilen, polipropilen (PP), polivinilklorür (PVC), polietilen tereftalat (PET) ve polikarbonat (PC) gibi malzemeler yer almaktadır. Bu polimerler, yüksek işlenebilirlik, kimyasal direnç, termal stabilite, mekanik dayanıklılık ve maliyet etkinliği gibi pek çok avantajı bir arada sunmaları sayesinde; otomotiv parçaları, ambalajlama sistemleri, medikal cihazlar ve yapı malzemeleri gibi çok çeşitli endüstriyel alanlarda geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir.

a. Polietilen

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) gibi polietilen esaslı termoplastikler; tıbbi cihazlardan eklemeli üretim teknolojilerine, endüstriyel ambalajlamadan kompozit malzemelere kadar uzanan geniş bir uygulama yelpazesinde kritik roller üstlenmektedir. Bu malzemelerin bu denli yaygın kullanımının temelinde, çok yönlü yapısal özellikleri, geri dönüştürülebilirlik potansiyelleri ve

kompozit sistemlerde matris fazı olarak sağladıkları mekanik, termal ve kimyasal katkılar yer almaktadır. Özellikle, önemli yapısal değişimler veya bozulmalar olmaksızın defalarca eritilip yeniden şekillendirilebilme kabiliyetine sahip olmaları sayesinde, sürdürülebilir mühendislik çözümleri açısından yüksek potansiyele sahip malzemeler arasında değerlendirilmektedir (Homkhiew vd., 2018). Polietilenler yalnızca düşük yoğunluk ve mekanik mukavemet açısından avantaj sunmakla kalmayıp; aynı zamanda kimyasal inertlikleri sayesinde korozif ortamlarda da güvenle kullanılabilen çözümler ortaya koymaktadır. Bu yönleriyle polietilen matrisli kompozitler hem yapısal uygulamalarda hem de fonksiyonel gereksinimlerin öne çıktığı ortamlarda güvenilir bir alternatif oluşturmaktadır.

Günümüzde malzeme teknolojilerinde sürdürülebilirlik, hafiflik ve maliyet etkinliği gibi kriterlerin ön plana çıkmasıyla birlikte, polietilen esaslı termoplastikler hem akademik araştırmalarda hem de sanayi odaklı ürün geliştirme çalışmalarında giderek daha fazla ilgi görmektedir. Gelişen işleme teknolojileri, polietilenlerin nano ve mikro ölçekte modifikasyonunu mümkün kılarak, bu malzemelerin darbe dayanımı, ısıl kararlılığı ve arayüzey etkileşimleri gibi özelliklerinin optimize edilmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, polietilenler yalnızca geleneksel uygulamalarda değil, aynı zamanda yeni nesil çok işlevli kompozit sistemlerin geliştirilmesinde de stratejik bir malzeme sınıfı olarak ön plana çıkmaktadır.

b. Polipropilen

Düşük özgül ağırlığı, üstün kalıplanabilirlik özellikleri ve çevresel etkilerinin minimize edilmesine olanak tanıyan yapısı sayesinde polipropilen, kompozit malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılan termoplastiklerden biri olmuştur. Yüksek oranda kristalin yapıya sahip olması, PP'yi yalnızca mekanik açıdan değil, aynı zamanda kimyasal direnç ve ısıl kararlılık gibi yönlerden de üstün kılmakta; bu da onu geniş bir uygulama spektrumu için seçilebilir duruma getirmektedir. Özellikle imalat sektöründe, çekme dayanımı, darbe tokluğu ve termal stabilite gereksinimlerinin ön planda olduğu uygulamalarda, polipropilen esaslı sistemler sıklıkla tercih edilmektedir. Bu bağlamda, cam elyaf takviyeli polipropilen (GF/PP) gibi yüksek performanslı kompozit sistemler, PP'nin mühendislik uygulamalarındaki işlevselliğini daha da artırmaktadır (Palanikumar vd., 2016).

Polipropilenin matris fazı olarak ön plana çıkmasının temel nedenleri arasında, düşük maliyetli olması, işleme kolaylığı sağlaması, geri dönüştürülebilirliği yüksek

düzeyde desteklemesi ve geniş ölçekte üretime uygunluğu yer almaktadır. Ayrıca, düşük yoğunluğu sayesinde yüksek spesifik mukavemet değerlerine ulaşılabilmesi, hafif yapıların gereklilik arz ettiği sektörlerde PP bazlı sistemlerin tercih edilmesini teşvik etmektedir. Takviye elemanlarıyla bir araya getirildiğinde, PP matrisli kompozitler; mukavemet, rijitlik ve kimyasal direnç açısından önemli iyileşmeler göstermekte, böylece uygulama yelpazesini önemli ölçüde genişletmektedir.

c. Polivinilklorür

Polivinilklorür, çok yönlü özelliklere sahip sentetik termoplastik polimerlerden biri olarak kabul edilmektedir. İlk olarak 19. yüzyılın sonlarında keşfedilen bu malzeme, 20. yüzyılın başlarında endüstriyel ölçekte üretime geçilmesiyle birlikte, özellikle yapı ve altyapı sektörleri başta olmak üzere birçok alanda önemli bir yer edinmiştir. PVC; yüksek mekanik mukavemeti, uzun ömürlü yapısı ve kimyasal maddelere karşı gösterdiği direnç özellikleri sayesinde öne çıkmaktadır.

Moleküler yapısında yer alan klor atomlarının etkisiyle, PVC doğal olarak alev geciktirici özellik göstermekte; bu nedenle yangın güvenliği gerektiren ortamlarda sıklıkla tercih edilmektedir. Bu özellik, ek katkı maddelerine ihtiyaç duymadan yüksek ısı kararlılık sunabilmesi açısından da önemli bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca PVC, elektriksel ve termal yalıtkanlık özellikleri bakımından da etkili performans göstermekte; bu yönüyle özellikle kablolama, elektrik tesisatı ve yalıtım sistemleri gibi teknik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.2.2. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler, bir metal veya metal alaşımının matris fazı olarak kullanıldığı; seramik, karbon veya benzeri yüksek performanslı ikincil fazlarla takviye edilmiş ileri teknoloji kompozit sistemleridir. Bu takviye fazları, genellikle parçacık, sürekli/kesikli elyaf ya da nanopartikül biçiminde sisteme entegre edilmekte olup, kompozit malzemenin mekanik, termal ve bazı uygulamalarda elektriksel özelliklerinin kayda değer şekilde geliştirilmesini sağlamaktadır. MMK'ların bu çok yönlü özellik profili, onları özellikle havacılık, uzay, otomotiv, savunma ve enerji üretimi gibi yüksek performans gerektiren mühendislik alanlarında tercih edilen stratejik malzeme sistemleri haline getirmiştir. Bu sistemlerde, matrisin süneklik ve işlenebilirlik gibi avantajları,

takviye fazının yüksek sertlik ve dayanım katkısıyla birleşerek, uygulamaya özel uyarlanabilir kompozit çözümler oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

Yüksek sıcaklık, yüksek gerilme veya aşındırıcı ortamlar gibi zorlu koşullarda görev yapacak yapısal bileşenler için MMK'lar, geleneksel metalik malzemelere kıyasla daha uzun ömürlü ve güvenilir bir seçenek sunmaktadır. Bu nedenle, özellikle motor parçaları, ısı değiştiricileri, fren diskleri, zırh sistemleri ve yüksek hızlı döner parçalar gibi kritik mühendislik uygulamalarında MMK'ların kullanımı giderek artmaktadır.

1.2.3. Seramik matrisli kompozitler

Seramik matrisli kompozitler hem kompozit hem de seramik malzeme sınıflarının keşişiminde yer alan ve bu yönüyle malzeme bilimi literatüründe uzun süredir önemli bir araştırma alanı oluşturan yüksek performanslı malzeme sistemleridir. Bu kompozit yapılar, seramik matris içerisine entegre edilen elyaf veya partikül formundaki takviye fazlar aracılığıyla, seramiğin doğasında bulunan kırılma dezavantajını büyük ölçüde azaltmakta; böylece daha tok, mukavemetli ve termal olarak kararlı bir yapı elde edilmesine olanak tanımaktadır.

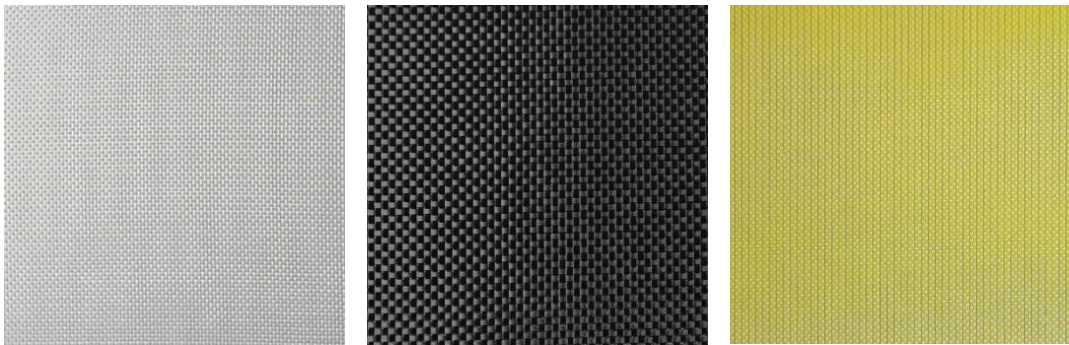
SMK'lar, genel olarak oksit bazlı (örneğin Al_2O_3 , ZrO_2) ve oksit olmayan (örneğin SiC , Si_3N_4) seramik matrisler olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır ve her iki sınıf da yüksek sıcaklık, aşındırıcı ortamlar ve yoğun mekanik yükler altında çalışacak sistemler için büyük potansiyel sunmaktadır (Karadimas ve Salonitis, 2023). SMK'lar; yüksek sertlik, mukavemet ve kırılma tokluğu gibi gelişmiş mekanik özelliklerinin yanı sıra, oksidatif kararlılık, korozyon direnci ve termal şok dayanımı gibi özellikleriyle zorlu çevresel koşullara karşı üstün dayanım sergilemektedir (Cho vd., 2009). Bu avantajlar, SMK'ları havacılık, otomotiv, enerji ve yüksek sıcaklık gerektiren mühendislik uygulamalarında stratejik birer yapı malzemesi haline getirmiştir. Özellikle uçak motoru parçaları gibi aşırı ısıl yüklemeye maruz kalan uygulamalarda, SMK'lar metalik alternatiflerine kıyasla daha düşük yoğunluk, daha yüksek sıcaklık dayanımı ve soğutma ihtiyacının azaltılması gibi avantajlar sunarak sistem verimliliğini artırmaktadır (Karadimas ve Salonitis, 2023).

1.3. Takviye Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler

Takviye elemanları, kompozit malzemelerin yapısal bütünlüğünü ve performansını belirleyen en kritik bileşenlerden biridir. Lif, kırpıntı veya parçacık formunda bulunabilen takviye fazı, kompozit sistemin mekanik özelliklerinin oluşumunda kilit rol oynamaktadır. Bu elemanlar, yüklerin malzeme boyunca etkin şekilde dağıtılmasını ve taşınmasını sağlayarak, özellikle mukavemet ve kırılma direnci gibi özellikleri önemli ölçüde iyileştirir. Ayrıca, matriste oluşabilecek çatlakların tespit edilmesi ve elyaf-matris arayüzeyinin etkin bir şekilde tasarlanması sayesinde, çatlak oluşumu ve yayılımı engellenebilmektedir (Cho vd., 2009; Volkmann vd., 2015; Wilson ve Visser, 2001).

Takviye malzemesinin türü, boyutu, şekli ve hacim oranı gibi parametreler, kompozit malzemenin mekanik davranışını doğrudan etkileyen temel faktörlerdir. Bu nedenle, takviye malzemesinin türü, boyutu, geometrisi, yüzey morfolojisi, oryantasyonu ve hacim oranı, kompozit malzemenin nihai mekanik davranışlarını doğrudan etkileyen temel parametreler arasında yer almaktadır (Pramanik, 2016).

Modern kompozit teknolojisinde yaygın olarak kullanılan takviye elemanları arasında özellikle karbon elyaf, cam elyaf ve aramid elyaf gibi yüksek performanslı lif bazlı malzemeler öne çıkmaktadır (Şekil 1.3). Bu lifler, yüksek özgül mukavemet, düşük yoğunluk, kimyasal direnç, yorulma dayanımı ve termal stabilite gibi çok yönlü avantajlar sunarak, kompozitlerin havacılık, otomotiv, denizcilik, inşaat, spor ekipmanları ve savunma sanayi gibi geniş bir uygulama alanında kullanılmasını mümkün kılmaktadır.



Şekil 1.3. Cam, karbon ve aramid elyaf kumaşlar

Takviye elemanlarının doğru seçimi ve matrisle olan arayüzey uyumu, kompozitlerin başarısı açısından belirleyicidir. Bu nedenle, ileri mühendislik

uygulamaları için geliştirilen kompozit malzemelerde takviye fazına ilişkin seçim kriterleri; sadece mekanik uyum değil, aynı zamanda üretim yöntemine uygunluk, maliyet etkinliği ve çevresel dayanıklılık gibi çok boyutlu tasarım gereksinimlerini de kapsayacak şekilde ele alınmaktadır.

1.3.1. Cam elyaf

Cam elyaf, yaygın olarak ‘fiberglas’ olarak bilinen ve kompozit malzeme üretiminde sıklıkla tercih edilen takviye elemanlarından biridir. Hafifliği, çok yönlü işlenebilirliği ve mekanik performansı ile öne çıkan bu malzeme, genellikle sürekli filament ya da dokuma kumaş formunda üretilen, mikron mertebesinde çapa sahip ince cam liflerinden oluşmaktadır. Cam elyaflar, uygulama gereksinimlerine göre E-cam (elektrik camı), S-cam (yüksek mukavemetli cam) gibi farklı cam kompozisyonlarından üretilmektedir.

Cam elyaflar, yüksek mukavemet/ağırlık oranı sunmaları sayesinde, hafif ancak dayanıklı yapısal çözümler geliştirilmesinde kritik rol oynamaktadır. Özellikle polimer matrislerle birlikte kullanıldıklarında, saf polimer sistemlere göre daha üstün mekanik özellikler, çevresel direnç ve uzun süreli yapısal stabilite sağlayan cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler (FRP – Fiber Reinforced Plastics) elde edilmektedir. Bu tür kompozit sistemler, otomotiv, inşaat, rüzgâr enerjisi, denizcilik ve altyapı mühendisliği gibi çok çeşitli sektörlerde yaygın kullanım alanı bulmaktadır.

Cam elyaf üretimi, temel olarak erimiş camın yüksek hızda çekilerek ince liflere dönüştürüldüğü ‘elyaf çekme’ yöntemiyle gerçekleştirilir. Bu süreç, yüksek kalite ve boyutsal tutarlılıkta üretimi mümkün kılar. Cam elyafın spesifik özellikleri; kullanılan cam türü, lif çapı ve üretim yöntemine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenlik, cam elyaf sistemlerinin hem yapısal hem de fonksiyonel mühendislik uygulamaları için özelleştirilebilir nitelik kazanmasını mümkün kılmaktadır.

1.3.2. Karbon elyaf

Karbon elyaf, yalnızca karbon atomlarından oluşan, kristal yapıda düzenlenmiş grafitik bölgeler içeren ve yüksek özgül mukavemet, düşük yoğunluk ve çok yönlü performans özelliklerini bir arada sunan sentetik bir takviye malzemesidir. Bu elyaf türü, özellikle yüksek performanslı kompozit sistemlerin tasarımında ve üretiminde kilit bir

yapı taşı olarak değerlendirilmektedir. Özellikle karbon elyafların yönlendirilmiş yapısı sayesinde elde edilen anizotropik mekanik davranış, uygulama gereksinimlerine özel olarak tasarlanabilen yapılar oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

Karbon elyaf takviyeli kompozit sistemler, geleneksel metalik ve polimerik malzemelere kıyasla hem daha hafif hem de daha dayanıklı yapısal çözümler sunmakta; bu da onları havacılık, uzay, otomotiv, yenilenebilir enerji sistemleri ve yüksek performanslı spor ekipmanları gibi alanlarda vazgeçilmez hale getirmektedir.

1.3.3. Aramid elyaf

Aramid elyafların mekanik performansı, yalnızca yapısal özelliklerine değil, aynı zamanda yüzey enerjisi, uygulanan yüzey işlemleri, elyaf-matris arayüzey bağlanma kuvveti ve ozon, nem, sıcaklık gibi çevresel etkiler dahil olmak üzere birçok parametreye bağlı olarak şekillenmektedir. Bu faktörler, aramid elyafların kompozit malzemeler içerisindeki etkinliğini, uzun vadeli dayanıklılığını ve performans kararlılığını doğrudan etkilemektedir. Aramid elyaflar, başta yüksek çekme mukavemeti, düşük yoğunluk, yüksek özgül darbe dayanımı ve termal kararlılık gibi üstün nitelikleri sayesinde; balistik zırh sistemleri, havacılık yapısal parçaları ve yüksek darbe absorpsiyonu gerektiren güvenlik ekipmanları gibi uygulamalarda kritik öneme sahiptir.

1.4. Karbon Nanotüp

Karbon nanotüpler (KNT'ler), ilk olarak 1991 yılında Japon bilim insanı Sumio Iijima tarafından keşfedilen ve grafen tabakasının silindirik biçimde sarılmasıyla oluşan karbon bazlı nanoyapılar olarak tanımlanmaktadır (Iijima, 1991). Bu keşif, malzeme bilimi ve nanoteknoloji alanında devrim niteliğinde bir gelişme olarak kabul edilmiştir. Nanometre düzeyindeki çapları ve mikrometre ölçeğindeki uzunlukları, bu yapılara son derece yüksek bir en-boy oranı kazandırmakta; bu benzersiz morfoloji ise onların mekanik, elektriksel ve termal özelliklerini belirleyici biçimde etkilemektedir.

Yapısal özelliklerine göre KNT'ler iki ana gruba ayrılır: tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT). SWCNT'ler, tek bir grafen tabakasının tek eksenli sarılmasıyla oluşurken; MWCNT'ler, birbirine eşmerkezli şekilde yerleşmiş çok sayıda grafen tabakasının oluşturduğu silindirik yapılardır. Bu iki yapı tipi, iletkenlik türü (metal/yarıiletken davranış), mekanik mukavemet, kimyasal

reaktivite ve termal iletkenlik gibi temel özellikler bakımından önemli farklılıklar göstermektedir. Özellikle SWCNT'lerin kuantum düzeyde elektronik özellikler sergileyebilmesi, onları yalnızca kompozit takviyesi değil, aynı zamanda nanoelektronik ve sensör teknolojileri açısından da değerli kılmaktadır.

Özellikle polimer matrisli kompozit sistemlerde takviye elemanı olarak kullanıldıklarında, düşük miktarlarda bile eklenmeleri; malzemenin mekanik, termal ve elektriksel performansında belirgin iyileşmelere yol açabilmektedir. Karbon nanotüpler, termoplastik matrisli kompozitlerin mukavemet ve ısı iletim kapasitelerini artırabilen yenilikçi takviye malzemeleri olarak öne çıkmaktadır (Kanagaraj vd., 2007). KNT'lerin kompozit sistemlere eklenmesi, malzemelerin mekanik dayanımını artırmanın yanı sıra termal iletkenlik gibi diğer kritik özellikleri de iyileştirebilmektedir (Kaul vd., 2013). Bu performans artışları, KNT'lerin yüksek özgül yüzey alanı ve yük taşıma kapasitesi ile doğrudan ilişkilidir. Ayrıca, matris ile KNT'ler arasındaki arayüzey etkileşimi, yük transfer etkinliğini artırarak malzemenin bütünsel dayanımını optimize etmektedir.

KNT'lerin termoplastik matrislerle uyumluluğu da onları yenilikçi takviye elemanları olarak öne çıkarmaktadır. Bu sistemlerde, KNT'lerin homojen dağılımı ve yönlenme kontrolü sağlandığında; malzemenin yalnızca yapısal dayanımı değil, aynı zamanda ısı yayılım kapasitesi, darbe sönümleme davranışı ve elektromanyetik girişim koruması gibi işlevsel özellikleri de geliştirilebilmektedir. Ayrıca, KNT'lerin düşük yoğunluklu olması, kompozit sistemlerin hafifliğini korurken mekanik avantajlardan ödün verilmemesini mümkün kılmaktadır. Tüm bu nedenlerle, karbon nanotüpler, günümüzün yüksek performanslı, çok işlevli ve sürdürülebilir kompozit sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir nano-takviye bileşeni olarak değerlendirilmektedir.

1.5. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemeler, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşenin sinerjik şekilde bir araya getirilmesiyle oluşturulan ileri mühendislik materyalleridir. Bu malzemeler, bileşenlerinin tekil özelliklerinin ötesine geçen performans sergileyerek, mekanik dayanım, termal stabilite, korozyon direnci ve hafiflik gibi çok çeşitli üstünlükleri bir arada sunabilmektedir. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri, hedeflenen uygulama alanı ve istenen özellikler doğrultusunda büyük çeşitlilik göstermektedir.

Üretim süreci, matris malzemesi ile takviye fazının birleştirilme tekniğine ve bu sırada uygulanan proses parametrelerine göre şekillenir. Yaygın olarak kullanılan başlıca kompozit üretim yöntemleri şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Sıcak presleme: Yüksek sıcaklık ve basınç altında matris ve takviye fazının birleştirilmesiyle gerçekleşir; özellikle termoplastik sistemlerde yaygındır.
- El ile yatırma: Takviye elemanlarının kalıp içerisine manuel olarak yerleştirilip reçineyle emprenye edilmesi yoluyla uygulanır; düşük maliyetli ancak sınırlı hassasiyet sunar.
- Püskürtme: Reçine ve kesilmiş takviye liflerinin aynı anda püskürtülerek kalıba uygulanması esasına dayanır.
- Elyaf sarma: Sürekli elyafların bir mandrel üzerine sarılarak kompozit yapıların oluşturulması tekniğidir.
- Reçine transfer kalıplama (RTM): Kapalı kalıba yerleştirilen takviye fazının içine reçinenin düşük viskoziteyle enjekte edilmesiyle gerçekleştirilir; yüksek tekrarlanabilirlik ve yüzey kalitesi sağlar.
- Vakum infüzyon: Vakum ortamında reçinenin takviye malzemesine nüfuz ettirilmesiyle elde edilir; düşük reçine tüketimi ve yüksek lif oranı avantajı sunar.
- Vakum torbalama: Katmanlı yapıların üzerine vakum torbası yerleştirilerek, reçine dağılımının homojen hale getirilmesi ve fazlar arası boşlukların minimize edilmesi amaçlanır.
- Pultrüzyon: Sürekli elyafların reçineyle emprenye edilerek kalıptan çekilmesiyle profil şeklinde ürünler elde edilir; yüksek otomasyon potansiyeline sahiptir.
- Sürekli laminasyon: Kompozit levhaların veya panellerin sürekli üretim hattında tabakalar formunda birleştirilmesiyle gerçekleştirilir.
- Reaksiyonlu üretim: Matrisin üretim sırasında kimyasal reaksiyonla oluştuğu sistemleri kapsar; özel uygulamalarda tercih edilir.

Her bir yöntem, sahip olduğu teknik potansiyelin yanı sıra belirli kısıtlamalar da içermektedir. Bu nedenle, uygun üretim tekniğinin seçimi; hedeflenen mekanik performans, geometrik karmaşıklık, proses hızı, üretim maliyeti ve malzeme verimliliği gibi parametreler göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Örneğin, el ile yatırma

yöntemi düşük maliyetli olması ve esnek üretim imkanı sunması açısından avantajlı iken, tekrarlanabilirlik ve yüksek yüzey kalitesi gerektiren uygulamalarda yetersiz kalabilir. Öte yandan, reçine transfer kalıplama gibi ileri üretim teknikleri, yüksek üretim kalitesi ve karmaşık parça üretimi açısından üstünlük sunmakla birlikte, yüksek başlangıç yatırımı ve kalıp maliyetleri gerektirir.

Malzeme bilimi ve üretim teknolojilerindeki ilerlemelere paralel olarak, kompozit üretim yöntemlerinde dijital üretim, robotik otomasyon ve akıllı proses kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Bu gelişmeler, yalnızca üretim hızını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda kalite kontrol süreçlerinin standardizasyonunu da kolaylaştırmakta ve kompozit malzemelerin çok daha geniş bir uygulama alanına yayılmasını mümkün kılmaktadır. Bu çerçevede, güncel üretim tekniklerinin optimize edilmesi ve uygulamaya özel yöntemlerin geliştirilmesi, geleceğin yüksek performanslı mühendislik çözümlerine yön veren temel faktörler arasında yer almaktadır.

1.6. Sıcak Presleme Yöntemi ile Kompozit Malzeme Üretimi

Kompozit malzemelerin imalatında birçok farklı üretim yöntemi uygulanmakla birlikte, bu teknikler arasında sıcak presleme (literatürde sıkıştırımlı kalıplama olarak da adlandırılır), özellikle termoplastik matrisli sistemlerin üretiminde önemli bir yer tutmaktadır (Palanikumar vd., 2016). Bu yöntem, kontrollü sıcaklık ve basınç koşulları altında gerçekleştirilmekte olup hem laboratuvar ölçekli akademik çalışmalar hem de endüstriyel uygulamalarda yüksek tekrarlanabilirlik, verimlilik ve yüzey kalitesi gibi avantajlar sunmaktadır. Sıcak presleme, termoplastik matris malzemeler ile kısa veya uzun elyaf takviye fazlarının bir araya getirilmesinde homojen dağılım ve yüksek arayüzey bağlanma kalitesi sağlaması bakımından oldukça etkili bir üretim tekniğidir.

Bu yöntemde, takviye elemanları, belirli boyutlarda kesilerek veya yerleştirilerek uygun şekilde hazırlanmış termoplastik filmler ile katmanlı halde bir araya getirilir. Ardından, bu yapı önceden belirlenmiş sıcaklık ve basınç koşulları altında preslenir. Sıcaklık, termoplastik matrisin yumuşamasını; basınç ise matrisin elyaflar arasında etkili biçimde akarak onları tamamen sarmasını ve boşluksuz bir yapı oluşturmasını sağlar (Parmar vd., 2021). Bu süreç, takviye elemanının matris içerisinde düzgün biçimde gömülmesini sağlayarak, arayüzey bağlanmasını artırmakta ve böylece kompozitin mekanik dayanım, şekil kararlılığı ve uzun vadeli yapısal bütünlüğü açısından üstün performans göstermesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, kullanılan elyafların kısa ya da

uzun formda olması, elde edilen kompozit malzemenin yönlü dayanımı ve kırılma davranışı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir (Zhang vd., 2016).

Sıcak presleme prosedürü; takviye ve matris bileşenlerinin uygun şekilde boyutlandırılması, kalıba yerleştirilmesi, ardından pres ekipmanına aktarılması ve belirlenen sıcaklık-basınç koşulları altında kürlenmesi adımlarından oluşur. Bu süreç sonunda, matris ve takviye arasında mikroyapısal bütünleşme tamamlanır ve hedeflenen morfolojik yapı elde edilir. Sıcak presleme, özellikle karmaşık olmayan geometrilere sahip, yüksek hacimli ve seri üretime uygun parçalarda tercih edilmektedir. Ayrıca, yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklı kompozit levha, panel ve laminat üretiminde de yaygın kullanım alanı bulmaktadır.

Sonuç olarak, sıcak presleme yöntemi; yüksek mekanik performans, mükemmel yüzey kalitesi, tekrarlanabilirlik ve proses kontrolü sunması sayesinde, modern kompozit üretim teknolojileri içinde hem endüstriyel verimlilik hem de akademik araştırmalar açısından tercih edilen yöntemlerden biri olmayı sürdürmektedir.

1.7. Kompozit Malzemelere Uygulanan Mekanik Testler

Kompozit malzemelerin mekanik karakterizasyonu, bu malzemelerin çeşitli mühendislik uygulamalarında güvenli, dayanıklı ve performans odaklı bir şekilde kullanılabilmesi açısından son derece kritik bir aşamayı teşkil etmektedir. Kompozit yapıların mekanik davranışlarını anlamaya yönelik yapılan testler, standardize edilmiş uluslararası normlar çerçevesinde yürütülmekte olup; çekme, basma, eğme, kesme, yorulma ve darbe gibi farklı yükleme senaryoları altında malzemenin gösterdiği tepkileri kapsamlı biçimde analiz etmeye olanak tanır. Bu testler, yalnızca temel mekanik özelliklerin (örneğin elastisite modülü, akma dayanımı, kopma uzaması) belirlenmesini değil; aynı zamanda hasar oluşumu, çatlak ilerlemesi, katmanlar arası delaminasyon gibi yapısal zayıflıkların tespiti açısından da önemli bilgiler sunmaktadır.

Kompozit malzemelerin anizotropik yapıya sahip olması nedeniyle, testlerin farklı elyaf yönlenmeleri (örn. 0° , 45° , 90°) dikkate alınarak tekrarlanması, yönsel dayanım özelliklerinin doğru bir şekilde ortaya konması açısından büyük önem taşır. Bu yaklaşım, özellikle tabakalı kompozitler için oryantasyona bağlı performans farklarının incelenmesine olanak sağlar. Ayrıca, çok eksenli yükleme senaryolarının modellenebilmesi amacıyla; bi-eksenel çekme testleri, hidrolik şişirme testleri ve Erichsen şekillendirme testleri gibi yöntemler de kullanılmaktadır. Bu tür testler, yalnızca

statik dayanım özelliklerini değil, aynı zamanda karmaşık şekil değişim davranışlarını, zamanla oluşan deformasyonları ve çok eksenli gerilme altındaki hasar gelişim süreçlerini de analiz etme imkanı tanır. Özellikle havacılık, otomotiv ve savunma sanayi gibi yüksek güvenlik gerektiren sektörlerde bu test protokollerinin uygulanması, tasarım doğrulama ve malzeme seçimi süreçlerinde belirleyici rol oynamaktadır.

1.7.1. Çekme testi

Çekme testi, kompozit malzemelerin tek eksenli yükleme altındaki mekanik davranışlarını değerlendirmek amacıyla yaygın olarak uygulanan temel karakterizasyon yöntemlerinden biridir. Bu test aracılığıyla, malzemenin elastik deformasyon sınırları, maksimum çekme gerilmesine karşı direnci ve kopma sonrası deformasyon karakteri gibi kritik mekanik parametreler nicel olarak belirlenmektedir. Kompozit sistemlerde çekme testi genellikle ASTM D3039 veya ISO 527-4 gibi uluslararası geçerliliği bulunan standartlara uygun olarak hazırlanmış doğrusal laminat numuneler üzerinden gerçekleştirilir.

Test sırasında, bilgisayar kontrollü evrensel test makinesi (UTM) kullanılarak numuneye sabit bir deformasyon hızıyla aksel çekme kuvveti uygulanır. Aynı anda, numunenin çekme kuvvetine karşı gösterdiği uzama miktarı hassas ölçüm cihazlarıyla kaydedilir. Numune kırılıncaya kadar devam eden test sonucunda; çekme dayanımı, elastik modül (Young modülü) ve kopma uzaması gibi temel mekanik parametreler elde edilir. Bu veriler, kompozit malzemenin yapısal uygulamalardaki uygunluğunu değerlendirmek ve tasarım kriterlerini belirlemek açısından kritik öneme sahiptir.

1.7.2. Üç nokta eğme testi

Üç nokta eğme testi, kompozit malzemelerin eğilme dayanımını ve eğilme modülünü belirlemek amacıyla uygulanan temel mekanik karakterizasyon yöntemlerinden biridir. Bu test yöntemi, özellikle elastik deformasyon kapasitesi, çatlak başlama eğilimi ve kırılma davranışı gibi önemli yapısal parametrelerin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Test sırasında, önceden belirlenen ölçülerde hazırlanmış dikdörtgen kesitli numuneler, iki destek noktası üzerine yerleştirilir ve numunenin orta noktasına bilgisayar kontrollü bir mekanik test cihazı aracılığıyla sabit hızda düşey yük uygulanır. Uygulanan

bu yük, numunede eğilme momenti oluşturur ve orta noktada maksimum gerilme konsantrasyonu meydana gelir. Yükleme süreci boyunca orta noktadaki sapma (defleksiyon) ile uygulanan kuvvet senkronize biçimde kaydedilerek bir yük-defleksiyon eğrisi elde edilir. Numune kırılma noktasına ulaşana ya da belirli bir deformasyon seviyesine ulaşmıncaya kadar devam eden bu test sonucunda, eğilme dayanımı ve eğilme modülü gibi önemli mekanik parametreler hesaplanır. Anizotropik yapıya sahip kompozit sistemlerde, farklı elyaf yönlenmelerine göre gerçekleştirilen testler, malzemenin yönsel rijitlik değişimlerini ve arayüzey dayanımını inceleme imkânı sunar.

1.7.3. Sertlik testi

Sertlik testi, bir malzemenin yüzeyine uygulanan kuvvet karşısında kalıcı plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç seviyesini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen temel mekanik karakterizasyon yöntemlerinden biridir. Sertlik, doğrudan aşınma direnci, çizilme dayanımı ve yüzey kalitesi ile ilişkilendirilir ve bu bağlamda, özellikle kompozit malzemelerin yüzeysel performansının değerlendirilmesinde önemli bir kriter olarak öne çıkar. Sertlik değeri aynı zamanda malzemenin mikro yapısal homojenliği, matris-takviye arayüzey bütünlüğü ve işlenebilirlik kapasitesi hakkında da dolaylı bilgiler sunmaktadır.

Kompozit levhalardan hazırlanan test numuneleri, genellikle Shore-D veya Rockwell sertlik cihazları kullanılarak test edilir. Bu cihazlar, belirli bir kuvveti malzeme yüzeyine uygulayarak, yük altında belirli bir süre bekleme süresi ile ölçüm gerçekleştirir. Sertlik değeri, cihazın kalibrasyon skalasından veya dijital göstergesinden okunarak elde edilir ve bu değer, malzemenin yüzeysel dayanım özelliklerini nicel olarak ifade eder.

1.8. Kompozit Malzemelere Uygulanan Şekillendirme Testleri

Yüksek mukavemet/ağırlık oranı sağlayarak optimum yakıt verimliliği hedefleyen mühendislik uygulamaları doğrultusunda, termoplastik kompozit levha şekillendirme teknolojileri üzerine son yıllarda yoğun araştırmalar yürütülmektedir. Bu süreçler, kompozit malzemelerin karmaşık geometriye sahip yapısal bileşenler halinde biçimlendirilmesine imkan tanırken, aynı zamanda hızlı üretim döngüsü, düşük enerji tüketimi ve geri dönüştürülebilirlik gibi avantajlar da sunmaktadır. Şekillendirme süreci, yapısal prensipler açısından konvansiyonel sac metal şekillendirme tekniklerine benzerlik

göstermekte olup, bu sayede geleneksel üretim altyapılarıyla uyumlu şekilde entegre edilebilmektedir.

Her ne kadar levha şekillendirme prosesi, başlangıçta termoplastik matrisli kompozitlerin yüksek işlem hızına uygunluğu temelinde geliştirilmiş olsa da günümüzde bu yöntem; vakum torbalama, otoklav kürleme ve ısıtmalı kalıplama gibi tekniklerle birlikte kullanılarak polimer esaslı laminatların ön şekillendirme işlemlerinde de yaygın biçimde uygulanmaktadır. Bu çok yönlü kullanım potansiyeli, levha şekillendirme teknolojisini hibrit sistemlere, çok katmanlı yapılara ve karmaşık mühendislik geometrilerine uyarlanabilir kılmakta hem araştırma hem de endüstriyel ölçekte önemini artırmaktadır.

1.8.1. Erichsen şekillendirme testi

Erichsen şekillendirme testi, özellikle sac ve levha formundaki malzemelerin plastik deformasyon kapasitesi, çukur oluşturma yeteneği ve yüzey çatlama direnci gibi şekillendirilebilirlik parametrelerini değerlendirmek amacıyla uygulanan gelişmiş bir mekanik karakterizasyon yöntemidir. Özellikle ince sac ve levha formundaki kompozit malzemelerin şekillendirilebilirlik özelliklerini belirlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Tabaka malzemelerin form alma davranışını simüle eden başlıca testlerden biri olarak kabul edilir (Zheng vd., 2019).

Test prosedüründe, belirli çapa sahip yarı küresel bir zımba, sabitlenmiş numune yüzeyine düşük hızda ve kontrollü olarak itilir. Numune, çevresinden bir kalıp aracılığıyla sabitlenmiş durumda tutulurken, zımba hareketiyle birlikte numunenin ortasında plastik deformasyona bağlı konkav bir çukur oluşur. Numune hem çekme hem de eğilme yüklerine maruz kalırken; oluşan plastik deformasyonun maksimum derinliği, özel ölçüm cihazları (genellikle dijital derinlik göstergeleri) ile tespit edilir. Bu derinlik değeri, testin sonucunu ifade eden Erichsen indeksi (IE değeri) olarak kaydedilir. Elde edilen Erichsen değeri, doğrudan malzemenin plastik deformasyon kapasitesini, dolaylı olarak ise elastisite modülü, akma dayanımı, deformasyon sertleşmesi katsayısı ve çatlak yayılma eğilimi gibi mekanik parametreleri yansıtan bir gösterge işlevi görür.

Endüstriyel uygulamalarda, Erichsen şekillendirme testi; otomotiv sektöründe araç gövde panellerinin üretim sürecinde kullanılan sac ve kompozit malzemelerin değerlendirilmesi, ambalaj sanayisinde metal kutuların derin çekme süreçlerine uygunluk analizi ve havacılıkta karmaşık geometrilere sahip yapı bileşenlerinin form

verilebilirliğinin analizi gibi alanlarda kritik bir kalite kontrol aracı olarak kabul görmektedir. Ayrıca, mühendislik tasarım süreçlerinde malzeme seçim kararlarını destekleyen ön değerlendirme testi olarak kullanılması, şekillendirme verimliliğini artırmakta ve maliyet optimizasyonu sağlamaktadır.

1.8.2. Hidroşekillendirme testi

Hidroşekillendirme testi, diğer adıyla hidrolik şişirme yöntemi, sac veya boru formundaki malzemelerin içten uygulanan kontrollü sıvı basıncı ile şekillendirilmesine dayanan, ileri düzey bir plastik şekil verme teknolojisidir. Bu yöntem, ilk kez 1980'li yıllarda otomotiv ve havacılık sanayisinin karmaşık geometrilere sahip, hafif ancak dayanıklı yapı bileşenlerine olan ihtiyacına cevap vermek amacıyla geliştirilmiştir. Günümüzde ise hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda, özellikle ağırlık optimizasyonu ve yüzey kalitesi gerektiren üretim süreçlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Literatürde bu teknik, 'akışkanla şekillendirme', 'esnek kalıp şekillendirme' ya da 'lastik zar şekillendirme' gibi farklı terimlerle de anılmaktadır. Sac metallere ek olarak, termoplastikler gibi alternatif malzemelerde de başarıyla uygulanabilmektedir. Yöntemin temel prensibi, düz veya kavisli numunelerin; su, polimer bazlı akışkanlar ya da yağ gibi sıkıştırılmaz ortamlar aracılığıyla erkek veya dişi kalıp işlevi gören sistemler içerisinde şekillendirilmesidir. Uygulanan hidrostatik basınç, malzeme üzerinde kontrollü bir plastik deformasyon yaratarak hedeflenen geometrinin elde edilmesini mümkün kılar.

Hidrolik şişirme yöntemi, farklı kalınlıklara sahip parçaların aynı kalıp ile şekillendirilebilmesine imkan tanıdığı için, kalıp maliyetlerini önemli ölçüde azaltır. Ayrıca, akışkanın esnek yapısı sayesinde karmaşık geometrilerin hassasiyetle üretimi mümkün hale gelir. Akışkan tarafından yüzeye eşit olarak uygulanan basınç hem homojen kalınlık dağılımı hem de yüksek yüzey kalitesine sahip ürünlerin elde edilmesini sağlar.

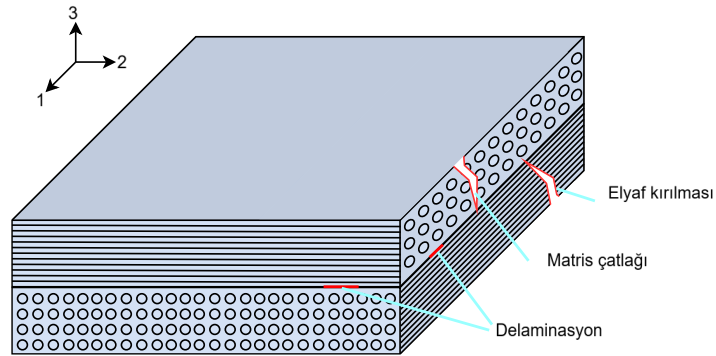
Test prosedürü kapsamında, numune test sistemine yerleştirilir ve aşamalı olarak artan hidrostatik basınca maruz bırakılır. Bu süreçte deformasyon başlangıcı ve olası çatlak oluşumları izlenir. Numune üzerinde meydana gelen kubbe biçimindeki deformasyonun yüksekliği ölçülerek, malzemenin şekillendirilebilirlik özellikleri nicel olarak değerlendirilir. Bu test aynı zamanda, malzemenin plastik deformasyon kapasitesi, kırılma direnci ve yapısal bütünlüğünün karakterizasyonunda kritik bir araç olarak öne çıkmaktadır.

1.9. Kompozit Malzemelerin Hasar Mekanizmaları

Kompozit malzemelerde gözlemlenen hasar mekanizmaları, malzemenin mikro yapısından makro ölçekteki davranışına kadar birçok parametreye bağlı olarak farklılık göstermektedir. Takviye elemanlarının yönelimi, matris fazının mekanik özellikleri, uygulanan yükleme koşulları ve çevresel etkenler, bu süreçte belirleyici unsurlar arasında yer alır. Anizotropik özellikler sergileyen kompozitler, bu yönleriyle izotropik mühendislik malzemelerine kıyasla daha karmaşık ve çok boyutlu bir hasar gelişimi sürecine sahiptir.

Özellikle elyaf takviyeli kompozitlerde hasar oluşumu, mikro ölçekteki lokal bozulmalarla başlar ve zamanla makro ölçekte yapısal bütünlüğün kaybına yol açan çok aşamalı mekanizmalar zinciri hâlinde ilerler. Bu tür yapılarda meydana gelen hasar, çoğunlukla tek bir olgunun sonucu olmayıp, ardışık ya da eşzamanlı gelişen çeşitli hasar türlerinin etkileşimiyle şekillenir. Dolayısıyla, bu mekanizmaların doğru bir şekilde analiz edilmesi, güvenli ve verimli kompozit tasarımı, ömür tahmini ve hasar toleranslı yapısal çözümlerin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Kompozit sistemlerin yapısal güvenilirliğini artırmak ve performanslarını optimize edebilmek için, hasar süreçlerinin detaylı bir biçimde karakterize edilmesi ve uygun modelleme yaklaşımlarıyla temsil edilmesi gerekmektedir. Elyaf takviyeli kompozitlerde yaygın olarak karşılaşılan hasar türleri üç ana başlık altında toplanmaktadır: matris çatlakları, elyaf kırılmaları ve delaminasyon. Bu mekanizmalar çoğunlukla birbirini tetikleyerek ilerler ve malzemenin nihai yapısal hasarına neden olur. Şekil 1.4'te bu temel hasar türleri görsel olarak sunulmaktadır.



Şekil 1.4. Kompozit malzemelerde hasar mekanizmaları

Özellikle delaminasyon, görsel muayene ile tespit edilmesi oldukça güç olmasına rağmen, yapısal bütünlüğü ciddi biçimde zayıflatabilen kritik bir hasar türüdür. Bu nedenle, havacılık ve uzay gibi yüksek güvenilirlik gerektiren uygulamalarda özel önem taşımakta ve gelişmiş tahribatsız muayene teknikleri ile dikkatle analiz edilmektedir.

1.9.1. Matris çatlağı

Matris çatlağı, kompozit malzemelerde en erken gözlemlenen hasar türlerinden biri olup, özellikle lif yönüne dik (transvers) doğrultuda meydana gelen çekme gerilmeleri sonucunda ortaya çıkar. Bu çatlaklar, özellikle epoksi, polyester ve vinil ester gibi kırılğan özellikler sergileyen termoset esaslı matris fazlarda görülür. Elyaf takviyeli kompozit sistemlerde, reçine açısından zengin bölgelerde, elyaf uçlarında veya elyaf-matris arayüzeyinin zayıf olduğu kısımlarda gerilme yığılmaları meydana gelir ve bu lokal alanlar, matris çatlağı için potansiyel başlangıç noktaları oluşturur.

Matris çatlaklarının erken evrede tespiti ve izlenmesi amacıyla çeşitli tahribatsız muayene yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Optik mikroskopi ve taramalı elektron mikroskopisi, mikroyapısal düzeyde detaylı incelemelere olanak tanırken; ultrasonik muayene, akustik emisyon analizi ve penetrant sıvı testleri gibi yöntemler, yapısal hasarın saptanması ve gelişiminin izlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu hasar mekanizmasının doğru şekilde analiz edilmesi ve sayısal olarak modellenmesi, kompozit yapıların güvenli tasarımı, servis ömrü tahmini ve yapısal performanslarının optimize edilmesi açısından büyük önem taşır. Özellikle çok katmanlı laminatların tasarımında, matris çatlaklarını sınırlayacak şekilde elyaf oryantasyonu, reçine türü ve işleme parametrelerinin dikkatli bir biçimde belirlenmesi gereklidir.

1.9.2. Elyaf kırılması

Elyaf kırılması, kompozit malzemelerde yük taşıma kapasitesini doğrudan etkileyen çoğu zaman nihai yapısal hasarın belirleyici aşaması olarak kabul edilen en kritik hasar mekanizmalarından biridir. Genellikle, elyafların kopma dayanımını aşan aksenal çekme yükleri altında gerçekleşen bu hasar türü, üretimden kaynaklanan mikroskobik kusurlar, yüzey hataları, lokal gerilme yoğunlaşmaları ve tekrarlı yüklemelere bağlı yorulma etkileri gibi faktörlerle de tetiklenebilir.

Bu kırılma mekanizması çoğunlukla ani ve gevrek bir kopma şeklinde gelişir. Başlangıçta izole kırılmalar olarak ortaya çıkan bu yapısal bozulmalar, zamanla komşu elyaflarla etkileşerek daha geniş çaplı bir kırılma ağına dönüşebilir. Oluşan kırılma yüzeyleri, kullanılan elyaf türüne bağlı olarak karakteristik davranışlar sergiler: karbon elyaflar gevrek ve keskin yüzeyli bir kırılma modeli oluştururken, aramid elyaflar daha sünek ve lif çekilmesiyle karakterize edilen bir kırılma yapısı gösterir.

Elyaf kırılması, yalnızca kompozit malzemenin taşıma kapasitesi ve rijitliğinde belirgin bir azalma meydana getirmekle kalmaz, aynı zamanda çevresindeki elyaflarda gerilme yığılmalarına neden olarak zincirleme hasar sürecini başlatabilir. Bu nedenle, bu mekanizmanın izlenmesi ve doğru bir şekilde karakterize edilmesi, yapısal bütünlük açısından kritik öneme sahiptir.

Elyaf kırılmalarının lokalizasyonu ve ilerleyişinin belirlenmesi için çeşitli gelişmiş karakterizasyon teknikleri kullanılmaktadır. X-ışını mikro-tomografisi, taramalı elektron mikroskopisi, akustik emisyon analizi ile aktif ve pasif termografi yöntemleri, hasarın üç boyutlu yapısal dağılımını ortaya koymak ve zaman içindeki evrimini izlemek açısından etkili araçlar olarak öne çıkmaktadır.

1.9.3. Delaminasyon

Delaminasyon, tabakalı kompozit malzemelerde komşu tabakalar arasında meydana gelen ayrılma olup, yapısal bütünlüğü ciddi şekilde zedeleyen en kritik hasar mekanizmalarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu hasar türü, tabakalar arası gerilmeler, darbe etkileri ya da serbest kenarlarda meydana gelen gerilme yığılmaları sonucu oluşabilmektedir. Özellikle farklı elyaf oryantasyonlarına sahip tabakaların arayüzeylerinde (başta $0^{\circ}/90^{\circ}$ geçiş bölgelerinde) delaminasyon oluşumu daha yaygındır. Ayrıca, termal gerilmeler ve nem emilimi gibi çevresel etkiler de bu ayrışmayı tetikleyebilmektedir.

Delaminasyon, genellikle iki tabaka arasında düzlemsel bir çatlak şeklinde yayılır ve çoğunlukla reçine açısından zengin bölgelerde ilerleme eğilimi gösterir. Bu hasar mekanizması, çıplak gözle tespit edilmesi zor olmakla birlikte, ultrasonik C-scan, termografi ve X-ışını mikro-tomografisi gibi gelişmiş tahribatsız muayene (NDT) teknikleriyle yüksek hassasiyetle tespit edilebilmektedir.

Bu hasar mekanizmasının kontrol altına alınmasına yönelik çeşitli mühendislik çözümleri geliştirilmiştir. Z-yönünde güçlendirme (Z-pinning), tabakalar arası nano-

partikül katkıları, termoplastik ara filmler, dikişleme teknikleri, üç boyutlu dokuma yapılar ve yapıştırıcı film takviyeleri, bu amaçla kullanılan yöntemler arasında öne çıkmaktadır. Bu tekniklerin tasarım aşamasında entegrasyonu, özellikle havacılık, savunma sanayii ve rüzgâr enerjisi gibi yüksek performans gerektiren alanlarda kompozit yapıların güvenilirliğini artırmakta ve servis ömrünü uzatmaktadır.

İleri kompozit sistemlerde delaminasyon direncinin optimize edilmesi, yapısal bütünlüğün korunması ve ani, felaket niteliğindeki hasarların önlenmesi açısından hayati öneme sahiptir.

1.10. Taramalı Elektron Mikroskobu

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), yüksek çözünürlüklü görüntüleme kabiliyeti sayesinde malzeme bilimi, nanoteknoloji ve mikroyapı analizi gibi birçok disiplinde yaygın olarak kullanılan güçlü bir karakterizasyon tekniğidir. SEM, numune yüzeyine odaklanan bir elektron demeti aracılığıyla saçılan ikincil elektronları toplar ve bu sinyalleri yüksek çözünürlüklü görüntülere dönüştürür. 10x ile 500.000x arasında değişen büyütme oranları ve 1–5 nanometre düzeyinde çözünürlük sunması, bu yöntemi optik mikroskoplara kıyasla çok daha üstün hale getirir. Ayrıca, geniş odak derinliği sayesinde yüzey morfolojisinin yarı üç boyutlu bir algı ile incelenmesine olanak tanır.

Kompozit malzemelerin mikroyapısal karakterizasyonunda SEM, kritik bir analiz aracıdır. Matris-takviye arayüzeyinin özellikleri, takviye fazının dağılımı, gözenek yapısı ve çatlak ilerleme yolları gibi parametreler bu yöntemle detaylı biçimde değerlendirilebilir. Özellikle karbon nanotüp takviyeli kompozit sistemlerde, nanotüplerin matris içerisindeki dağılımı, yönelimi ve arayüzey etkileşimleri SEM görüntüleri üzerinden analiz edilebilmektedir.

Ayrıca, mekanik testler sonrasında elde edilen kırık yüzeylerin SEM ile incelenmesi, hasar mekanizmalarının belirlenmesi ve malzeme tasarımında iyileştirme yapılması açısından değerli veriler sunar. Bu bağlamda, SEM yalnızca araştırma ve geliştirme süreçlerinde değil, aynı zamanda kalite kontrol uygulamalarında da vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir.

Bu doktora tez çalışmasında, termoplastik matrisli elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mekanik ve şekillendirme davranışlarının daha derinlemesine anlaşılmasına katkı sunmak hedeflenmiş; bu kapsamda, KNT takviyesinin polietilen matrisli cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çekme, eğme, sertlik ve Erichsen

şekillendirme performansları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Literatürde KNT takviyeli elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin şekillendirme kabiliyeti üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olması nedeniyle, bu tez çalışması, özellikle Erichsen testi üzerinden şekillendirilebilirliğin değerlendirilmesi açısından önemli bir boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, deneysel veriler aracılığıyla farklı takviye türleri (cam ve karbon elyaf), dokuma tipleri (düz ve dimi) ve nano katkı varlığı gibi değişkenlerin etkisi karşılaştırmalı olarak analiz edilerek, bu tür kompozit yapıların endüstriyel uygulamalara uygunluğuna dair somut öneriler sunulmaktadır. Böylece bu çalışma, hem nano takviyeli kompozit malzeme geliştirme süreçlerine hem de bu malzemelerin ileri düzey mekanik performans gerektiren alanlardaki potansiyel kullanımına yönelik bilimsel bilgi altyapısının güçlendirilmesine katkı sağlamaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kompozit malzemeler, üretim süreçlerinde belirlenen çeşitli fiziksel ve mekanik özellikleri bir arada sunabilen malzeme sınıflarındandır (Egorov vd., 2022). Bu malzemeler, yüksek yük taşıma kapasiteleriyle öne çıkmakta olup (Chen vd., 2022), diğer geleneksel malzemelere kıyasla kazandırılmış üstün davranış özellikleriyle dikkat çekmektedir. Bu üstünlük, yükün matris fazından takviye fazına etkin biçimde aktarılması ve bu iki faz arasındaki arayüzey etkileşimi sayesinde elde edilen nihai fiziksel-mekanik performansla ilişkilidir (Lee vd., 2017). Özellikle polimer kompozitler, hafiflik ve olağanüstü mekanik performansları nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın şekilde tercih edilmektedir (Spanu vd., 2018).

Polimer matrisli termoplastik kompozitler, genellikle kendinden takviyeli veya tek polimer kompozitler olarak tanımlanmakta olup; geri dönüştürülebilirlik, şekillendirilebilirlik, düşük üretim maliyeti, ultra hafiflik ve çevresel sürdürülebilirlik gibi avantajları sayesinde, geleceğin ileri teknoloji polimer kompozitlerinin geliştirilmesinde önemli bir potansiyel sunmaktadır. Son otuz yılda cam ve karbon elyaf takviyeli polimer kompozitler; yüksek özgül sertlik ve mukavemet özellikleri sayesinde havacılık ve otomotiv sektörlerinde yapısal elemanlar olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Hernández vd., 2011; Schwab vd., 2016; Zheng vd., 2019). Günümüzde, bu tür kompozitlere olan ilgi, yüksek mukavemet, sertlik, tokluk ve uzun servis ömrü gibi üstün özellikler nedeniyle giderek artmaktadır (Boudeau vd., 2012; Dworak vd., 2017; Zheng vd., 2017).

Elyaf takviyeli termoplastik kompozitler ayrıca tekrarlanan kalıplama kabiliyeti, dayanıklılık, düşük özgül ağırlık ve geri dönüştürülebilirlik gibi avantajlar sunmakta, bu yönleriyle termoset esaslı kompozitlere göre daha cazip bir alternatif haline gelmektedir (Xian vd., 2024). Bu bağlamda yapılan çalışmalar, bu kompozitlerin mekanik özelliklerinin büyük ölçüde matris ve takviye malzemesine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur. Örneğin, cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitler üzerine yapılan araştırmalar, benzer polietilen bazlı kompozitlerin mekanik performansına yönelik çıkarımlar yapılmasına olanak sağlamıştır (Palanikumar vd., 2016). Y. Zhang vd. (2024), dokuma kumaşların kompozit malzemelerin şekillendirilebilirlik özellikleri üzerindeki etkisini hem deneysel karakterizasyon hem de sayısal simülasyon yoluyla ele almış ve bu yapıların deformasyon mekanizmalarını detaylı biçimde analiz etmiştir (Y. Zhang vd., 2024).

Wong vd. (2015), hibrit elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini ve mimari yapılarını değerlendirerek, hibrit elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mekanik davranışlarına ilişkin önemli bilgiler sunmuştur (Wong vd., 2015). Benzer şekilde, geri dönüştürülmüş polipropilen içerisinde kullanılan cam elyaf uzunluğunun çekme özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş ve elyaf uzunluğunun kompozit malzemenin çekme performansını belirlemede kritik bir rol oynadığını vurgulamıştır (Senkerik vd., 2016).

Wang vd. (2015), uzun cam elyaf takviyeli termoplastik malzeme kullanarak otomotiv endüstrisine yönelik hafif bir tekerlek tasarımı üzerine bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada, üretim süreci için sıcak pres yöntemi önerilmiş ve kompozit tekerleğin mukavemet performansı sonlu elemanlar analizi yöntemi ile simüle edilmiştir (X. Wang vd., 2015).

Başka bir çalışmada cam elyaf takviyeli polipropilen (GFR/PP) kompozitlerin mukavemet doğrulaması ve morfolojik özellikleri incelenmiştir. Sıcak presleme yöntemiyle üretilen bu kompozitler, cam elyaf takviyeli termoplastik polimer kompozitlerin üretiminde sıcak pres yönteminin uygun bir teknik olduğunu ortaya koymuştur (Palanikumar vd., 2016).

Öztekin vd. (2022), kumaş katmanlarla güçlendirilmiş termoplastik kompozit plakaların mekanik davranışları üzerinde elyaf türü ve kalınlığının etkisi değerlendirilmiştir. Polietilen granüller ile dokuma elyafların belirli süre sıcak preste tutulmasıyla elde edilen termoplastik levhalar, bu yöntemin kompozit malzeme üretiminde etkin biçimde kullanılabilceğini göstermiştir (Öztekin vd., 2022).

Xu vd. (2024), karbon elyaf takviyeli termoplastik polimerler (CFRTP) ile polimerle güçlendirilmiş CFRTP sandviç filmlerin mekanik özelliklerini karşılaştırmıştır. Çekme ve üç nokta eğme testleri uygulanarak yapılan değerlendirmede, sandviç film numuneleri sıcak pres yöntemiyle üretilmiştir. Çalışmada üç farklı CFRTP türü incelenmiş; karbon elyafları sarmak için termoplastik naylon 66, poliüretan ve polifenilen sülfid bazlı reçineler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, CFRTP'lerin çekme uzamalarında sırasıyla %97, %109 ve %156 oranlarında iyileşme sağlanmış; buna karşın sandviç filmlerin eğilme özelliklerinin CFRTP'lere kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Xu vd., 2024).

Bu çalışmalar göstermektedir ki, teknolojik ilerlemeler doğrultusunda hafif, yüksek mukavemetli ve rijit yapı malzemelere duyulan ihtiyacın giderek arttığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, mühendislik uygulamalarında kullanılan malzemelerin

gelişimine paralel olarak, bu malzemelerden üretilen parçaların şekillendirme yöntemleri de büyük önem kazanmaktadır.

Brooks vd. (2022), kalıpla şekillendirme teknolojisindeki son gelişmeleri, bu teknolojinin sunduğu avantajları ve sürekli elyaf takviyeli termoplastik malzemelerin kalıpla şekillendirilmesinde karşılaşılan tipik kalite unsurlarını kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Çalışmada, şekillendirme sırasında meydana gelen deformasyon mekanizmaları, sürtünme davranışları, kusur oluşumu ve farklı işleme parametrelerinin şekillendirilmiş parçaların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri detaylı olarak analiz edilmiştir. Araştırmada, şekillendirme süreci sırasında malzeme içinde oluşan boşlukların mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediği ve bu boşlukların minimize edilmesinin kritik öneme sahip olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, modelleme ve simülasyon çalışmaları aracılığıyla buruşma oluşumunun azaltılabileceği belirtilmiştir. Termoplastik matrisin yapısal bütünlüğünün korunabilmesi için yüksek sıcaklıkların tercih edilmesi gerektiği belirtilmiş; öte yandan, yüksek basıncın katmanlar arası sürtünmeyi artırdığı, ancak aşırı reçine taşması ve elyafların aşırı sıkışmasını önlemek adına uygulanan basıncın dikkatle kontrol edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır (Brooks vd., 2022).

Manoochehri ve Kadkhodayan (2024), cam elyaf takviyeli polipropilen esaslı termoplastik kompozit levhaların oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık koşullarında şekillendirilebilirlik özelliklerini incelemeyi ve bu bağlamda şekillendirme limit diyagramları (FLD) geliştirmeyi amaçlamıştır. Çalışma kapsamında, $0^{\circ}/90^{\circ}$ oryantasyonlu dört katmandan oluşan kompozit levhalar üzerinde Nakajima test yöntemi kullanılarak çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, yüksek sıcaklık koşullarında malzemenin şekillendirme sınırlarının anlamlı düzeyde arttığını ve deformasyon kapasitesinin özellikle dar numunelerde %150'nin üzerine çıktığını ortaya koymuştur. Ayrıca, sıcaklığın artmasıyla birlikte şekillendirme için gerekli kuvvetin azaldığı gözlemlenmiştir. Hasar mekanizmaları açısından değerlendirildiğinde, oda sıcaklığında test edilen numunelerde kırılmanın cam elyafların çatlaması ve gevrek kırılma şeklinde gerçekleştiği; buna karşın yüksek sıcaklıkta test edilen numunelerde tabakalar arası ayrılma sonucu oluşan hasarın sünek kırılma karakteri gösterdiği belirlenmiştir (Manoochehri ve Kadkhodayan, 2024).

Eshun vd. (2022), farklı istifleme dizilerine sahip SS304/karbon elyaf takviyeli polimer kompozit tüplerin hidro şekillendirme davranışlarını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiş ve bu amaçla ABAQUS yazılımını kullanarak sayısal simülasyonlar gerçekleştirmiştir. Çalışma, çeşitli elyaf oryantasyon açılarında meydana gelen hasar

fazlarını ortaya koymayı hedeflemiştir. Araştırma sonucunda hibrit kompozit tüplerin tüm önerilen elyaf istifleme konfigürasyonlarında tabaka hasarına uğradığı, en yüksek dayanımın ise 0°/90° istifleme dizilimine sahip tüplerde elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca, von Mises gerilme değerlerinin maksimum 90 MPa seviyelerine ulaştığı ve tüp uç noktalarının maksimum gerilmeye maruz kaldığı tespit edilmiştir. Bunun yanında, $\pm 30^\circ$ ve $\pm 60^\circ$ açılarındaki konfigürasyonlarda daha fazla buruşma olduğu rapor edilmiştir (Eshun vd., 2022).

Sheth vd. (2021), karbon elyaf/epoksi esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla, epoksi matrisine %0,5 ve %2 oranında karbon nanotüp takviyesiyle laminat üretimi gerçekleştirmiştir. El yatırma yöntemiyle üretilen numuneler, taramalı elektron mikroskobu ile mikroyapısal olarak incelenmiş ve KNT'lerin matrisle yüksek düzeyde arayüzey etkileşimi sağladığı gözlemlenmiştir. Test sonuçları, KNT takviyeli numunelerin hem çekme hem de eğilme mukavemeti açısından katkısız referanslara kıyasla anlamlı artış gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, KNT katkısının karbon elyaf kompozitlerin yapısal performansını artırmada etkili bir yöntem olduğunu doğrulamaktadır (Sheth vd., 2021).

Kumar vd. (2015), karbon nanotüplerin en-boy oranının ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) matrisinin toklaştırma kapasitesi ve katı yağlama performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. %0,05-0,1 ağırlık oranlarında KNT takviyesi yapılan deneysel çalışmalar, UHMWPE'nin sertliğinde %3-45, elastik modülünde ise %8-42 arasında iyileşme sağlandığını göstermiştir. Özellikle yüksek en-boy oranına sahip KNT'lerin, UHMWPE matrisin mekanik özelliklerini artırmada daha etkili olduğu belirtilmiştir (Kumar vd., 2015).

Bansal vd. (2017), çok duvarlı karbon nanotüplerin polipropilen üzerindeki etkilerini incelemiş, %5 ve %10 ağırlık oranlarında katkı yapılan kompozitlerde önemli mekanik iyileşmeler gözlemlenmiştir. Saf PP ile karşılaştırıldığında, %5 MWCNT katkısıyla elastik modül %21, sertlik ise %27,1 oranında artarken, %10 KNT katkısında bu artışlar sırasıyla %27,6 ve %75 düzeyine ulaşmıştır (Bansal vd., 2017).

Shi vd. (2023), düşük yoğunluklu polietilen matrisine çok duvarlı karbon nanotüpler ilave ederek, ultrasonikasyon ankraj yöntemi ve sıkıştırma kalıplama tekniği ile yüksek iletkenlik ve gelişmiş mekanik özelliklere sahip kompozit filmler üretmişlerdir. %0,15 MWNT içeren kompozit filmler, $2,79 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ değerinde yüksek düzeyde elektriksel iletkenlik ve 18,9 MPa gerilme mukavemeti sergilemiştir. Ayrıca, bu filmlerde şeffaflıkta kayda değer bir azalma gözlenmediği belirtilmiştir (Shi vd., 2023).

Roumeli vd. (2014), çok duvarlı karbon nanotüpler ile takviye edilen çapraz bağlı yüksek yoğunluklu polietilen nanokompozitlerinin mekanik performansında anlamlı iyileşmeler elde etmişlerdir. Gerçekleştirilen çekme testleri, SEM ve TEM analizleri ile mikro-Raman spektroskopisi sonuçları bir arada değerlendirilmiş; dolgu malzemesi içeriğine bağlı olarak elastik ve şekil değiştirme davranışlarında geçiş karakteri taşıyan belirgin bir kırılma noktasının oluştuğu gözlemlenmiştir. MWCNT takviyesi, yük transferinin etkinliği ile mekanik özellikleri artırırken, aynı zamanda aglomerasyon eğilimi nedeniyle bu etkinin sınırlanabileceği de vurgulanmıştır (Roumeli vd., 2014).

Li ve Gaofeng (2024), ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla elyaf yüzeyine KNT graftlamışlardır. %4 KNT içeriğiyle elde edilen numunelerde çekme, eğilme ve darbe dayanımlarının maksimuma ulaştığı, elyaf-matris arayüzey bağının önemli ölçüde güçlendiği gösterilmiştir. KNT'lerin, çatlak ilerlemesini saptırma, arayüzeyde köprüleme ve enerji emme mekanizmaları aracılığıyla malzeme dayanımını artırdığı rapor edilmiştir (Jian ve Gaofeng, 2024).

Dokuma karbon elyaf takviyeli polieter eter keton (CF/PEEK) kompozit plakaların katı hal termoform işlemi sırasında şekillendirme davranışını incelemiş; sıcaklık ve deformasyon hızının şekillendirme performansı üzerindeki etkilerini belirlemiştir. Sıcaklığın 165°C'den 325°C'ye çıkarılması şekillendirilebilirliği artırırken, deformasyon hızının artmasıyla mekanik performansta hafif bir azalma gözlemlenmiştir. Lif kırılmaları ve delaminasyon gibi başarısızlık mekanizmalarının sıcaklığa bağlı olarak değiştiği rapor edilmiştir (Zheng vd., 2019). Derin çekme işlemleri sırasında boyun verme davranışlarını tahmin etmek için CF/PEEK kompozitleri üzerinde sayısal modelleme yaklaşımları geliştirmişlerdir (Chalal ve Abed-Meraim, 2017).

Erichsen şekillendirme testi termoplastik kompozitlerin plastik deformasyona uğrama kapasitelerini değerlendirmek açısından son derece etkili bir yöntemdir. Bu test, farklı yüzey işlemlerine veya kaplamalara tabi tutulmuş malzemelerin deformasyon davranışlarını analiz etmek ve şekillendirilebilirlik indeksini belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Radu ve Potecasu, 2020).

Özellikle polietilen matrisli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmede, Erichsen testi önemli bir analiz aracı olarak öne çıkmaktadır. Gerçek üretim koşullarını simüle etme kabiliyeti ve malzeme davranışı hakkında nicel veri sunma potansiyeli sayesinde, bu test yöntemi malzeme bilimi ve mühendisliği alanında yaygın şekilde tercih edilmektedir. Ayrıca, sayısal modelleme ve

yağlama koşullarının entegre edilmesi, kompozit malzemelerin farklı işleme senaryoları altındaki performanslarının derinlemesine anlaşılmasına olanak sağlamaktadır.

Erichsen şekillendirme testi, yağlamanın hem sac metaller hem de kompozit malzemelerin şekillendirilebilirliği üzerindeki etkilerini anlamada etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Test sırasında kullanılan yağlayıcılar, sürtünmeyi azaltarak malzemenin daha fazla deformasyona uğramasına olanak sağlamak ve böylece hata oluşmadan önce daha yüksek şekil değişimi elde edilebilmektedir (Şener ve Kayalı, 2013; Giuliano ve Samani, 2013). Bu durum, özellikle polietilen matrisli kompozitlerin işlenmesi sırasında, optimum şekillendirme koşullarının belirlenmesinde yağlamanın kritik bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

Uriya vd. (2016), termoset reçine ve sürekli elyaflardan oluşan karbon elyaf takviyeli plastik (CFRP) levhaların şekillendirilebilirliği Erichsen testi ile değerlendirilmiştir. Dört farklı yapıda (tek yönlü, ortogonal dizilimli ve bez katmanlı) CFRP numunelerle yapılan deneyler, şekillendirme sıcaklığı ve şekil değiştirme yolunun şekillendirme davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Özellikle ortogonal elyaf dizilimine sahip numunelerin, tek yönlü yapılara göre daha iyi şekillendirilebilirlik sergilediği gözlemlenmiştir. 100°C’de uygulanan ılık şekillendirme işlemi, malzemenin şekillenebilme kapasitesini önemli ölçüde artırmış; [0/90/0/0/90/0] dizilimli numunede 4,62 mm’lik Erichsen indeksi elde edilmiştir. Bu değer, yüksek mukavemetli çeliklerle karşılaştırılabilir düzeyde bulunmuştur. Ayrıca, analitik denklemler yardımıyla elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi, bu levhaların 100°C’de %30’un üzerinde çift eksenli şekil değişimi ve 1 GPa’dan fazla şekillendirme gerilmesi sergileyebildiğini ortaya koymuştur (Uriya ve Yanagimoto, 2017b). Bu sonuçlar, CFRP malzemelerin ılık şekillendirme koşullarında kullanıma uygun olduğunu ve uygulama alanlarının genişletilebileceğini göstermektedir.

Winhard vd. (2024), elyaf takviyeli termoplastik malzemelerde termoformlama sürecinde meydana gelen kusurlar üzerine odaklanmışlardır. Çalışmalarında, kalıplama süresi ve basınç parametrelerinin, üretilen laminatların yapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bulgular, düşük kalıplama süresi ve basınç altında daha homojen ve kaliteli laminat yapılarının elde edildiğini göstermiştir. Bu durum, termoformlama sürecinde parametre optimizasyonunun, malzeme kalitesini doğrudan etkileyen kritik bir unsur olduğunu ortaya koymaktadır (Winhard vd., 2024).

Yüksek basınç altında uygulanan hidroşekillendirme teknolojisi, karmaşık geometrilere sahip ve imalatı zor parçaların üretiminde sunduğu avantajlar nedeniyle

tercih edilmektedir (Moralas, 2015). Bu yöntem, parçaların yüksek basınçlı akışkan ortam yardımıyla kalıp geometrisine uygun biçimde şekillendirilmesini sağlar (Palumbo ve Tricarico, 2007). Bu bağlamda kullanılan hidrolik şişirme testleri, malzemelerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerini elde etmek için standart tek eksenli çekme testine alternatif olarak kullanılmakta, daha geniş deformasyon aralığına olanak tanıdığı için daha kapsamlı bir malzeme karakterizasyonu sunmaktadır (Khlif vd., 2015; H. Wang vd., 2016).

Özdemir vd. (2020), termofom kalıplarda kompozit malzeme şekillendirme sürecinin tasarımına yönelik bir ön çalışma gerçekleştirmiştir. Cam elyaf takviyeli polipropilen kompozit malzemeler, basınçlı kalıplama yöntemi kullanılarak üretilmiş ve derin çekme işlemleri çeşitli parametreler (tutma basıncı, zımba hızı, numune sıcaklığı ve parça derinliği) altında incelenmiştir. Ayrıca şekillendirme sonrası numunelerde oluşan geri esneme davranışları karşılaştırılarak değerlendirilen parametrelerin şekillenme kalitesi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir (Özdemir vd., 2020).

Ahn vd. (2018), termo-hidro şekillendirme yöntemi ile üretilmiş elyaf takviyeli termoplastik kompozit bir kaskın mekanik davranışını incelemiştir. Deneysel sonuçlar, bu yöntemin kompozit malzeme üretimi için uygun bir alternatif sunduğunu ortaya koymuştur. Aynı zamanda ABAQUS/CAE yazılımı kullanılarak sayısal modelleme yapılmış ve elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri, deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. 0,05 m'ye kadar olan deformasyonlarda sayısal ve deneysel sonuçlar arasında yüksek düzeyde korelasyon tespit edilmiştir. En büyük sapmanın ise buruşma oluşumu nedeniyle ortaya çıktığı; buruşmaların, lif yönelimine bağlı olarak kaskın merkezinden çevreye doğru yayıldığı belirlenmiştir. Genel olarak, buruşma dağılımı dikkate alınarak yapılan analizler, sayısal modellemenin malzeme deformasyonunu başarıyla öngörebildiğini göstermiştir (Ahn vd., 2018). Zhu vd. (2020), termoplastik malzemelerin artımlı sac şekillendirme (ISF) sürecinde ortaya çıkan deformasyon mekanizmaları ve arıza davranışlarını, şekillendirilebilirlik, işlem parametreleri ve şekillendirme kalitesi gibi faktörler ışığında detaylı olarak değerlendirmiştir. Bu çalışma, ISF sürecinin parametre duyarlılığı ve form verme kabiliyeti açısından sistematik analizine katkı sağlamaktadır (Zhu vd., 2020).

Polimer matrisli termoplastik kompozitlerin kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde, bu malzemelerin şekillendirilebilirlik kapasitelerinin geliştirilmesine yönelik çalışmaların sınırlı kaldığı görülmektedir. Özellikle son yıllarda, karbon nanotüpler gibi nanomalzemelerin elyaf takviyeli polimer kompozit yapılarla

birleştirilmesi üzerine yapılan araştırmalar, bu malzemelerin hem mekanik hem de fonksiyonel özelliklerini iyileştirmek amacıyla önemli bir potansiyel ortaya koymaktadır. Nano takviyelerin bu tür kompozit yapılara entegrasyonu, sertlik, tokluk ve termal iletkenlik gibi özelliklerde gözle görülür gelişmeler sağlayabileceğinden, bu katkıların endüstriyel uygulamalara adaptasyonu büyük önem taşımaktadır.

Genel olarak, elyaf takviyeli termoplastik kompozitler, mekanik dayanım ve sürdürülebilirlik açısından avantajlı yapılar sunmakta, bu da onları modern mühendislik uygulamaları için cazip kılmaktadır. Bu malzemelerin mekanik davranışlarının detaylı olarak incelenmesi, yenilikçi ve verimli malzeme çözümleri geliştirmek açısından hem malzeme bilimi hem de uygulamalı mühendislik açısından kritik öneme sahiptir.

Bu tez çalışmasında, elyaf türü, oryantasyonu ve yönlenmesine göre çeşitli parametreler esas alınarak üretilmiş karbon nano tüp takviyeli ve takviyesiz polietilen matrisli elyaf takviyeli kompozitlerin hem tek eksenli hem de iki eksenli testlerle mekanik davranışları ve performansları incelenerek literatürdeki bu boşluk doldurulacaktır. Sıcak pres yöntemiyle üretilen kompozitlere çekme, eğme, sertlik, hidroşekillendirme ve Erichsen şekillendirme test yöntemleri uygulanarak, malzemelerin şekil değiştirilebilirlik, mukavemet ve sertlik gibi temel mekanik özellikleri analiz edilmiştir. Bu testler, kompozitlerin mekanik performansı hakkında kapsamlı bilgiler sağlayarak uygulamaya özel optimizasyonlarına yardımcı olacaktır. KNT takviyesinin, kompozitin mukavemeti ve esnekliği üzerindeki etkileri analiz edilerek, yeni kompozit yapıların geliştirilmesindeki potansiyel katkıları incelenmiştir. Böylece kompozit malzemelerin endüstriyel uygulamalar için şekillendirilebilirliği ile ilgili kullanışlı veriler elde edilerek savunma, havacılık, otomotiv ve mühendislik uygulamalarına uygun hafif ve yüksek mukavemetli malzemeler sınıfına önemli bir katkı sağlanacaktır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Kompozit malzemelerin yapısal uygulamalardaki performansı; üretim metodolojisi, elyaf oryantasyonu ve malzeme seçimi gibi kritik parametrelere bağlıdır. Bu parametreler, nihai ürünün mekanik özellikleri, dayanım karakteristikleri ve elastik davranışı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Elyaf takviyeli kompozit sistemlerde, tek veya çok katmanlı yapılar, farklı elyaf oryantasyonları ve çeşitli elyaf-matris kombinasyonları, malzemenin makro mekanik özelliklerini şekillendirmektedir. Bu sebeple, üretim metodolojisinin optimizasyonu, malzeme tasarım süreciyle bütünleşmiş bir şekilde değerlendirilmelidir. Kompozit malzeme seçimi; hedeflenen performans kriterleri, maliyet unsurları ve üretim parametreleri gibi uygulamaya özgü gereksinimler doğrultusunda optimize edilmelidir.

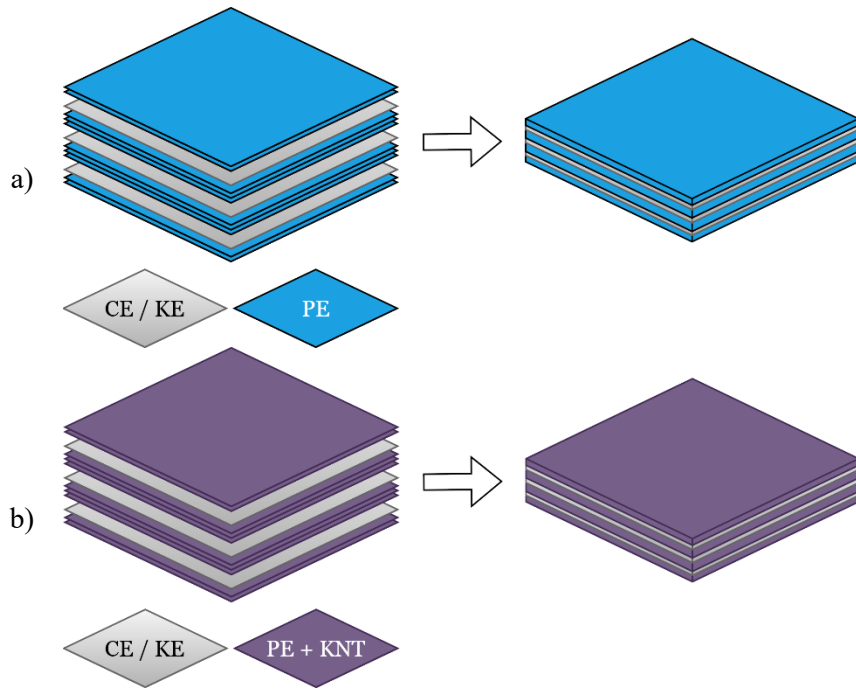
Bu tez çalışmasında polietilen matrisli cam ve karbon elyaf takviyeli numunelerin matris bileşenine KNT takviyesinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. KNT takviyesinin malzeme performansı üzerindeki etkilerinin detaylı şekilde incelenmesiyle, bu tür sistemlerin endüstriyel uygulamalardaki potansiyel kullanım alanlarının belirlenmesine katkı sağlanması hedeflenmiştir. Bu bölümde, araştırma periyodunda kullanılan malzemeler, üretim metodolojisi ve karakterizasyon yöntemleri ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

3.1. Malzeme Tasarımı

Deneysel çalışmalarda takviye malzeme olarak düz, dimi ve $\pm 45^\circ$ yönlenmeli dokuma cam elyaf ve düz, dimi ve $\pm 45^\circ$ yönlenmeli dokuma karbon elyaf kumaş ve ağırlıkça %1,5 oranında 10-20 nm dış çapa sahip çok duvarlı karbon nanotüp kullanılmıştır. Elyaf kumaşlar Dost Kimya Endüstriyel Hammaddeler San. Tic. Ltd. Şti., düşük yoğunluklu PE filmler Versan Plastik ve Ambalaj ve karbon nanotüp Ege Nanotek Kimya San. Ltd. Şti firmalarından temin edilmiştir. Düşük yoğunluklu polietilen, cam elyaf ve karbon elyafın yoğunluk değerleri sırasıyla $0,92 \text{ g/cm}^3$, $2,54 \text{ g/cm}^3$ ve $1,79 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Elyaf lar 200 g/cm^2 ağırlığa sahiptir.

Malzeme tasarımı aşamasında, kompozitlerde ağırlıkça %50 elyaf-matris oranı sağlanacak şekilde gerekli hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, kalıba yerleştirilecek elyaf kumaşlar ve PE filmler 25 x 25 cm boyutlarında kesilmiştir.

Tüm numuneler için katman sıralanışı şu şekilde optimize edilmiştir; $2 \times$ matris + $1 \times$ elyaf + $3 \times$ matris + $1 \times$ elyaf + $3 \times$ matris + $1 \times$ elyaf + $2 \times$ matris (Şekil 3.1a ve Şekil 3.1b). Bu yapı, on katman PE film ve 3 katman cam elyaf (CE)/karbon elyaf (KE) içermektedir. Bu düzenleme, teorik olarak kompozitte %50 elyaf ve %50 matris ağırlık fraksiyonunu sağlamaktadır.



Şekil 3.1. Numunelerin dizilimi ve tasarımı

Çizelge 3.1, üretimi yapılan kompozit numunelerin, kombinasyonlarını ve numune adlandırmalarını içermektedir.

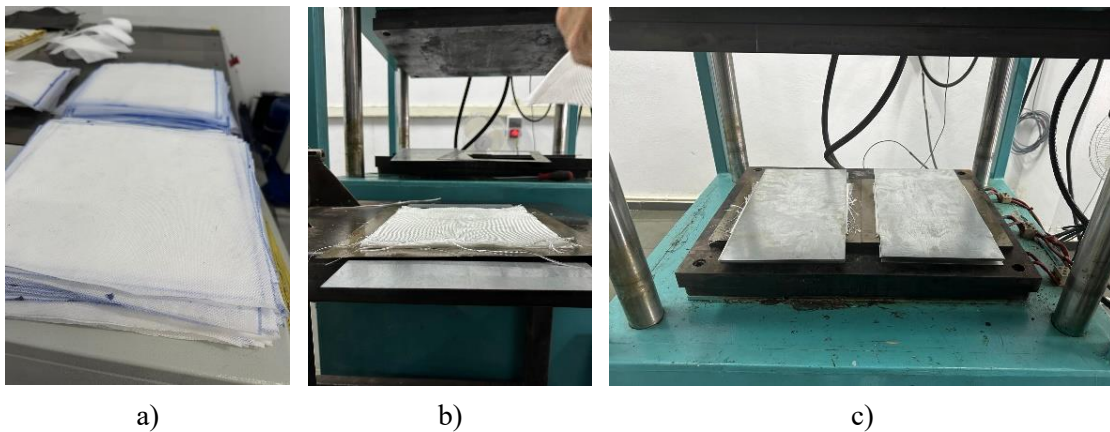
Çizelge 3.1. Numune adlandırması

Numune	Matris	Elyaf Türü	Elyaf Oryantasyonu	KNT Katkısı	Numune Adlandırması
1	PE	Cam	Düz	Yok	PE_Cam_Düz
2	PE	Cam	Dimi	Yok	PE_Cam_Dimi
3	PE	Karbon	Düz	Yok	PE_Karbon_Düz
4	PE	Karbon	Dimi	Yok	PE_Karbon_Dimi
5	PE	Cam	$\pm 45^\circ$	Yok	PE_Cam_ $\pm 45^\circ$
6	PE	Karbon	$\pm 45^\circ$	Yok	PE_Karbon_ $\pm 45^\circ$
7	PE	Cam	Düz	Var	PE_KNT_Cam_Düz
8	PE	Cam	Dimi	Var	PE_KNT_Cam_Dimi
9	PE	Karbon	Düz	Var	PE_KNT_Karbon_Düz
10	PE	Karbon	Dimi	Var	PE_KNT_Karbon_Dimi

3.2. Malzeme Üretimi

Kompozit malzeme üretim yöntemi, literatürde yer alan çalışmalar dikkate alınarak; numunenin kullanım amacı, hedeflenen ürün sayısı, boyutları ve kazandırılmak istenen yeni özelliklere göre belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında, elyaf takviyeli termoplastik kompozitler KNT takviyeli ve KNT takviyesiz olmak üzere iki farklı kombinasyonda üretilmiştir. Her iki kombinasyona ilişkin üretim aşamaları bu bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

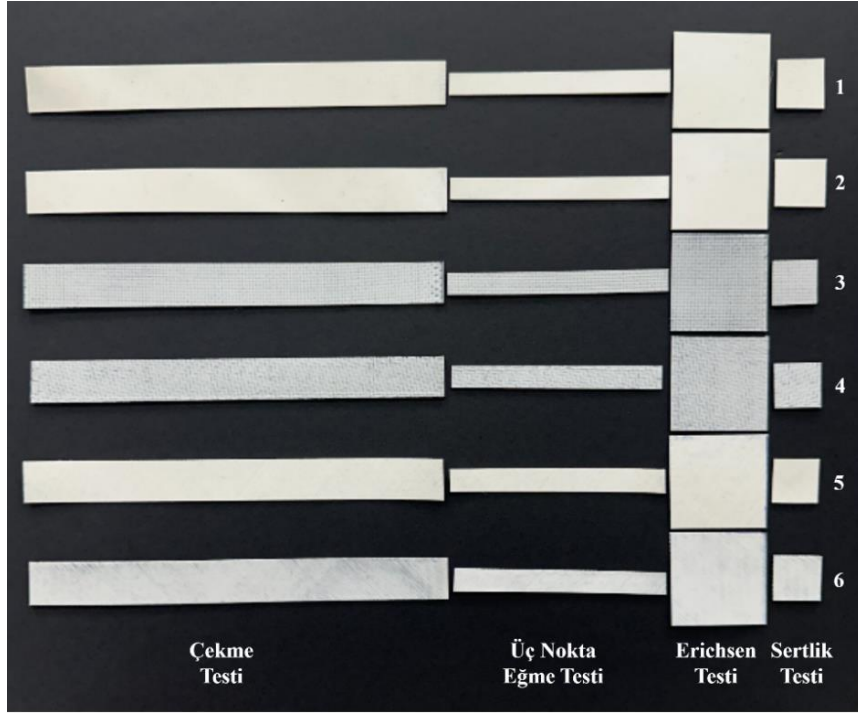
Termoplastik matrisli kompozit numunelerin tamamı sıcak presleme yöntemi ile üretilmiştir. Üretim prosesi; kalıp yüzey hazırlığı, malzeme preparasyonu, malzemelerin kalıba yerleştirilmesi ve kalıbın pres sistemine entegrasyonu adımlarından oluşmaktadır. Sıcaklık etkisiyle akışkan yapıya gelen matris yapının kalıp yüzeyine adhezyonunu önlemek ve nihai ürünün kalıptan kolay çıkmasını sağlamak için kalıbın, çerçevenin ve sacların yüzeylerine silikon bazlı kalıp ayırıcı sprej sıkıldıktan sonra yağlı kağıt serilmiştir. PE filmler ve elyaf kumaşlar uygun ölçülerde kesilerek üretime hazır hale getirilmiş (Şekil 3.2a) ve belirlenen sıralanışa göre kalıbın içine yerleştirilmiştir (Şekil 3.2b). Hazırlanan malzemelerin, sıcaklık kontrollü hidrolik preste kademeli sıcaklık artışı yapıldıktan sonra bir saat boyunca 120°C sıcaklıkta kürleşmesi sağlanmıştır (Şekil 3.2c). Kürleşme sonrası numunenin kalıptan kolay çıkarılması için kalıbın uygun sıcaklığa kadar soğuması beklenmiştir. Üretilen numuneler, test ölçülerine uygun olarak manuel kollu giyotin ile kesilmiştir.



Şekil 3.2. a) PE malzeme, b) Malzemelerin kalıba serilmesi, c) Numune üretimi

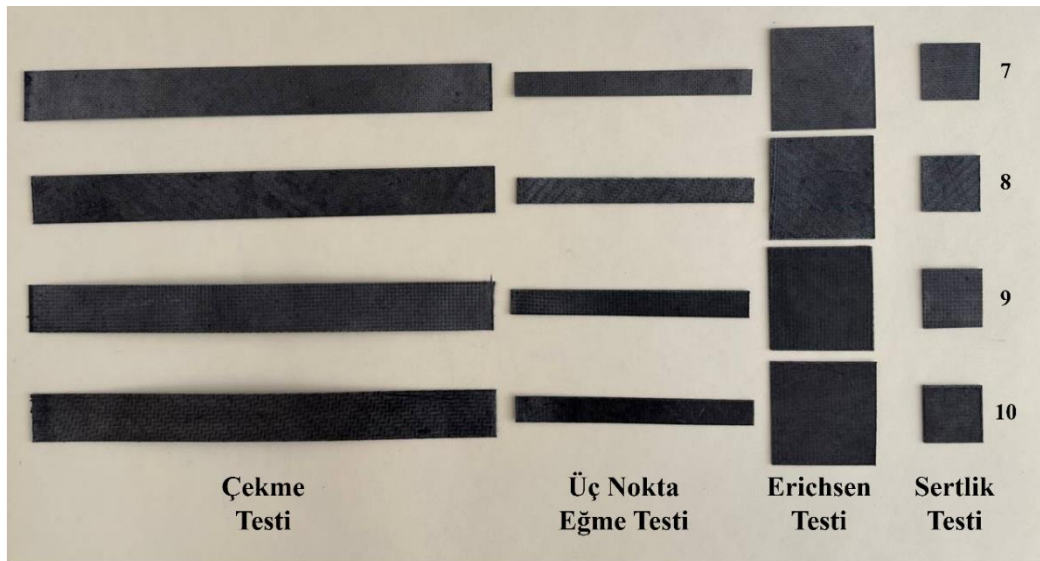
Kompozit malzeme üretim prosesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3, soldan

sağa sırasıyla çekme, üç nokta eğme, Erichsen şekillendirme ve sertlik deneyleri için üretilen KNT takviyesiz numune gurubundan birer adet görsel verilmiştir.



Şekil 3.3. KNT takviyesiz test numunelerinin görseli

Şekil 3.4, KNT takviyeli numunelere ait test örneklerini göstermektedir. Görselde soldan sağa sırasıyla çekme, üç nokta eğme, Erichsen şekillendirme ve sertlik deneyleri için üretilen her numune gurubundan birer adet görsel sunulmuştur.



Şekil 3.4. KNT takviyeli test numunelerinin görseli

3.3. Mekanik Testler

Kompozitler numunelerin şekillendirilebilirliğini ve mekanik özelliklerini değerlendirmek için tek eksenli çekme testi, üç nokta eğme testi, hidroşekillendirme testi, Erichsen şekillendirme testi ve sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca, çekme ve Erichsen şekillendirme testi yapılan numunelerde kırılma yüzeyleri, SEM ile incelenerek mikroyapı analizi gerçekleştirilmiştir. Termoplastik matrisli kompozitlerin üretimi Necmettin Erbakan Üniversitesi Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat Atölyesi ve Kompozit Laboratuvarı'nda, çekme, üç nokta eğme ve sertlik testleri Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarı'nda, hidroşekillendirme testleri Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Hidroşekillendirme Laboratuvarı'nda ve Erichsen şekillendirme testleri Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Metal Şekillendirme Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

Çekme ve eğme testleri max. 100 kN yüklemeye kapasitesine sahip elektromekanik SHIMADZU AGS-X universal test cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.5 ve Şekil 3.6). Çekme testleri için ASTM D3039 standardına uygun olarak 250x25x1 mm boyutlarında hazırlanan numuneler, oda sıcaklığında 2 mm/dk deformasyon hızında test edilmiştir. Her numune konfigürasyonu için üçer adet test gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5. Çekme test cihazı

Üç nokta eğme testleri, ASTM 790 standardı referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Test numuneleri, 127x12,7x1 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Deneyler, oda sıcaklığında ve 4,3 mm/dk deformasyon hızında uygulanmıştır. Her numune konfigürasyonu için üç tekrar testi yapılmıştır.



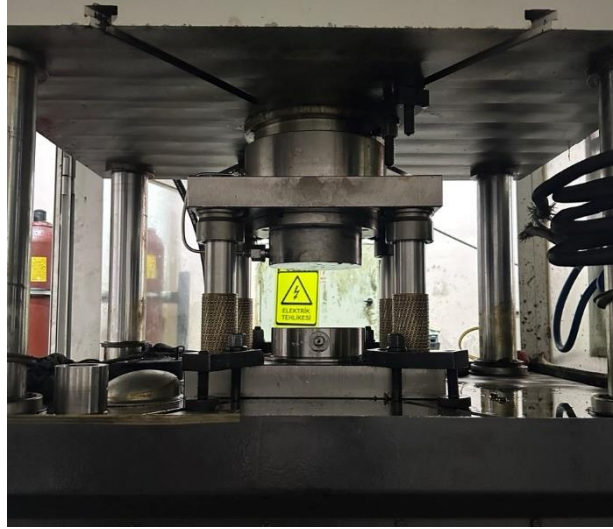
Şekil 3.6. Üç nokta eğme test cihazı

Kompozit numunelerin yüzey sertliklerinin belirlenmesi amacıyla sertlik ölçümleri, ASTM D2240 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, Shore-D tipi sertlik ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.7).



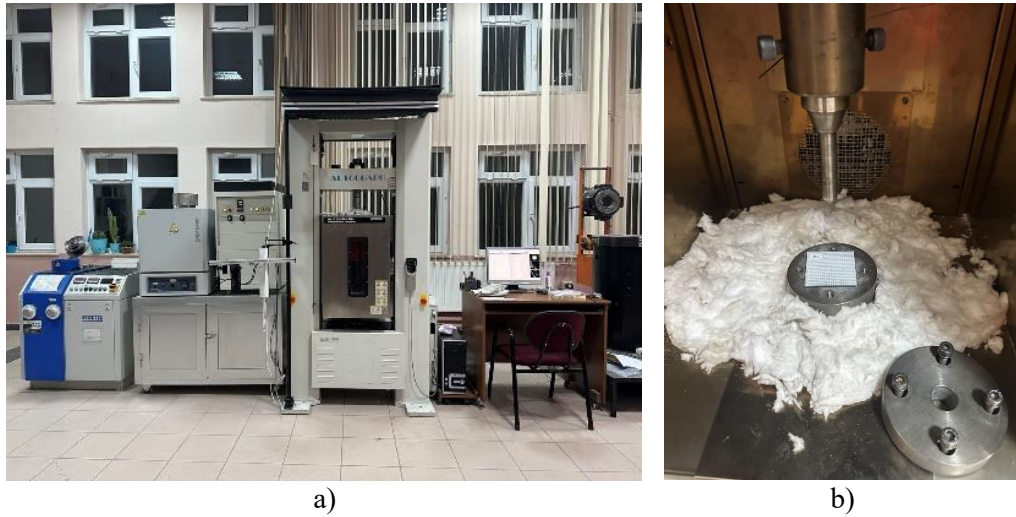
Şekil 3.7. Shore-D test cihazı

Hidroşekillendirme testleri, hidroşekillendirme işlemlerine de olanak sağlayan hidrolik pres deney ünitesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Hidroşekillendirme test cihazı

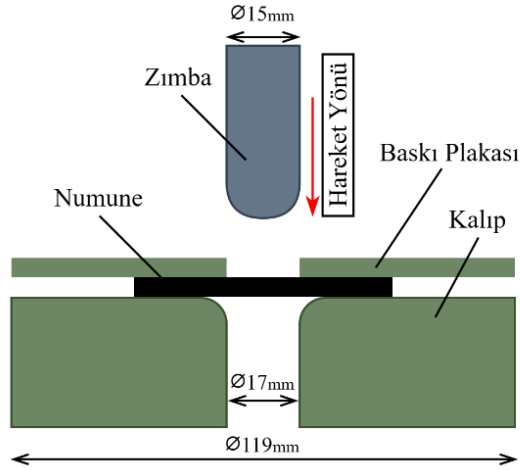
Erichsen şekillendirme testi, malzemelerin derin çekme özelliklerini ve şekillendirme kapasitelerini değerlendirmek amacıyla yaygın olarak kullanılan standart bir test metodudur. Bu test, malzemenin plastik deformasyon sırasındaki davranışını karakterize etmek ve endüstriyel şekillendirme uygulamalarında form verme sınırlarını belirlemek için kritik öneme sahiptir. Erichsen şekillendirme testleri, maksimum 100 kN kapasiteli SHIMADZU AG-IS evrensel test sisteminde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.9). Her numune konfigürasyonu için üç adet test yapılmıştır.



Şekil 3.9. a) Erichsen şekillendirme test cihazı ve b) Şekillendirme ünitesi

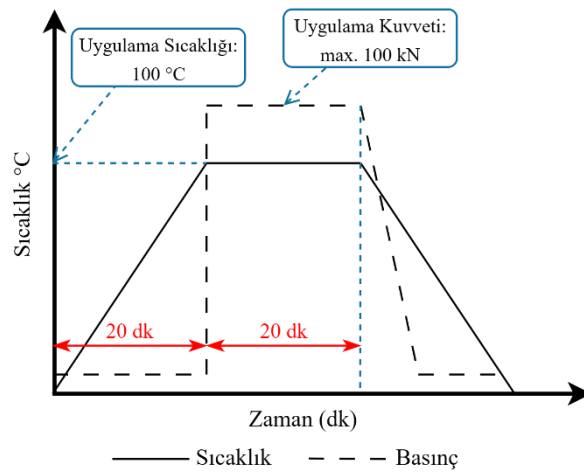
Erichsen testi, küresel uçlu bir zımbanın metal ya da kompozit levha üzerinde, malzemedeki hasar oluşuncaya kadar kuvvet uygulandığı standart bir şekillendirme testidir. Test sırasında zımba, numuneyi yavaş ve kontrollü bir şekilde deforme eder ve bu

deformasyon, levha üzerinde çatlama meydana gelene kadar sürdürülür. Hasar anında ölçülen zımba derinliği, malzemenin Erichsen indeksi (IE) olarak tanımlanır ve mm cinsinden ifade edilir. Bu değer, malzemenin plastik şekillendirme kapasitesini ve derin çekme uygunluğunu gösterir. Şekil 3.10, Erichsen şekillendirme test cihazının şematik görüntüsünü içermektedir.



Şekil 3.10. Erichsen test cihazının şematik görüntüsü

Standartlara uygun ölçülerde (55x55 mm) hazırlanan numuneler, 100°C sıcaklıkta 0,5 mm/dk şekillendirme hızında test edilmiştir. Şekil 3.11, Erichsen şekillendirme işlemine ait deney süreci grafiğini içermektedir.



Şekil 3.11. Kompozit levhaların Erichsen şekillendirme işlemi

Çekme ve Erichsen testine tabi tutulan numunelerin kırılma yüzeylerini incelemek için, yüzeyler LEICA EM ACE200 marka kaplama ünitesinde Altın/Paladyum (Au/Pd) kaplanarak iletken hale getirilmiştir. Bu kaplama işlemi, elektron demetinin numune yüzeyinde oluşturabileceği yanma etkisini önlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Analizler, HITACHI SU5000 model taramalı elektron mikroskobu ile vakum altında incelenmiştir. SEM cihazı ve kaplama ünitesi gösterilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. a) Taramalı elektron mikroskobu ve b) Kaplama ünitesi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

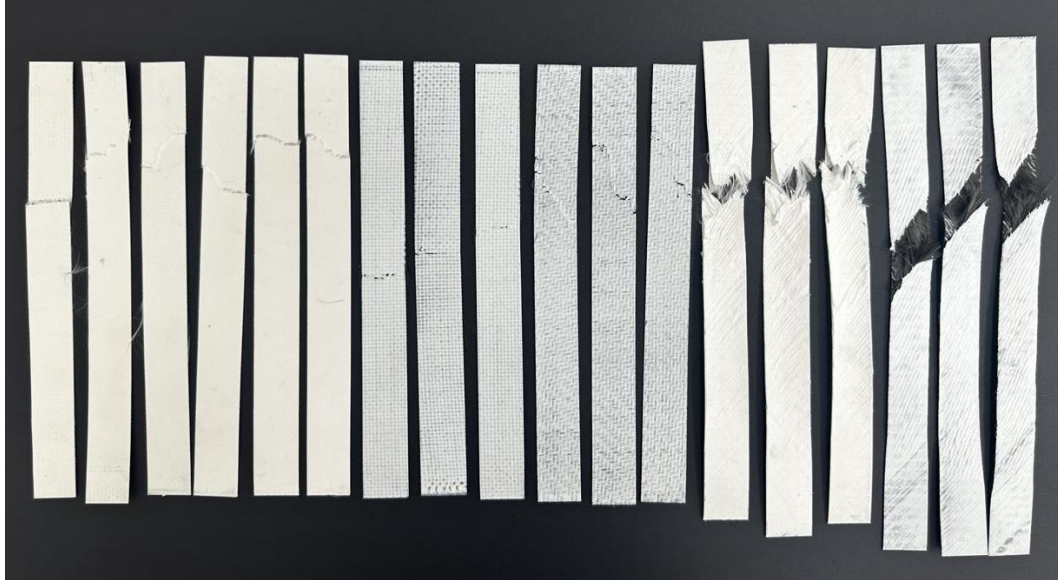
Bu bölümde, farklı elyaf türleri ve oryantasyonlarına sahip termoplastik matrisli kompozit sistemler ile bunların KNT takviyeli versiyonlarına yönelik gerçekleştirilen mekanik karakterizasyon çalışmasının sonuçları sunulmaktadır. Araştırma kapsamında, KNT takviyesinin kompozit malzemelerin mekanik performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Düz/dimi/ $\pm 45^\circ$ oryantasyonlu dokuma cam/karbon elyaf takviyeli polietilen matrisli altı temel numune grubu üretilmiş; düz ve dimi dokuma içeren yapıların ayrıca KNT takviyeli versiyonları hazırlanarak toplamda on farklı numune grubu oluşturulmuştur. Bu numuneler, çekme, üç nokta eğme, sertlik, hidroşekillendirme ve Erichsen şekillendirme testlerine tabi tutulmuştur. Tüm testlerde tekrarlı ölçümler gerçekleştirilmiş olup, elde edilen verilerin istatistiksel güvenilirliği ve tekrarlanabilirliği sağlanmıştır. Bulgular, test sonuçları ve SEM analizleri doğrultusunda bu bölümde ayrıntılı şekilde sunulmuştur.

4.1. Çekme Testi Sonuçları

Kompozit malzemelerin mekanik karakterizasyonunda çekme testi, eksenel yüklenme altındaki davranışların belirlenmesinde kullanılan temel test yöntemlerinden biridir. Bu çalışmada üretilen kompozitler, ASTM D3039 standardına uygun olarak çekme testine tabi tutulmuştur. Her numuneye ait maksimum kuvvet, gerilme, uzama ve yüzde uzama değerleri dikkate alınarak test sonuçları değerlendirilmiştir.

Çekme testlerinden elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması, malzemenin mekanik davranışının daha kapsamlı bir şekilde inceleme olanağı sunmaktadır. Mühendislik gerilmesi, numunenin başlangıç kesit alanı esas alınarak hesaplandığından, deformasyon sürecinde meydana gelen kesit daralmalarını dikkate almaz. Buna karşılık, gerçek gerilme hesaplamaları deformasyon ilerledikçe kesit alanında oluşan daralmayı göz önünde bulundurur. Bu nedenle, özellikle plastik deformasyon bölgesinde elde edilen değerler mühendislik gerilmesine kıyasla daha yüksektir. Kompozit yapılarda matris ile takviye elemanları arasındaki etkileşim, malzemenin mukavemet, süneklik ve kırılma davranışını doğrudan etkiler. Bu nedenle, her iki eğrinin karşılaştırılması; yük taşıma kapasitesi ve deformasyon karakteristiklerinin doğru biçimde yorumlanmasına katkı sağlamaktadır.

Şekil 4.1, KNT takviyesiz numunelerin çekme testi sonrasında elde edilen numune görüntülerini sunmaktadır. Her numune grubundan üç tekrarlı olmak üzere gerçekleştirilen deney numuneleri sırasıyla sunulmuştur.



Şekil 4.1. Çekme testi sonrası numune görüntüleri

Çekme testlerinden elde edilen ortalama mekanik performans değerleri Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Elde edilen bulgular, takviye elemanların malzemelerin performansını nasıl iyileştirdiğini ve bu iyileştirmenin mühendislik uygulamalarındaki pratik yansımalarını ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.1. KNT takviyesiz numunelerin çekme testi sonuçları

Numune Kodu	Gerçek Çekme Gerilmesi σ_{gmax} (MPa)	Mühendislik Çekme Gerilmesi σ_{mmax} (MPa)	Gerçek Maksimum Yüzde Uzama (% ϵ)	Mühendislik Maksimum Yüzde Uzama (% ϵ)
1 - (PE_Cam_Düz)	105,95	103,88	1,97	1,99
2 - (PE_Cam_Dimi)	115,94	113,06	2,51	2,55
3 - (PE_Karbon_Düz)	134,74	132,60	1,60	1,61
4 - (PE_Karbon_Dimi)	227,68	222,60	2,39	2,42
5 - (PE_Cam_±45°)	19,51	16,18	18,23	18,64
6 - (PE_Karbon_±45°)	24,83	18,62	27,82	31,66

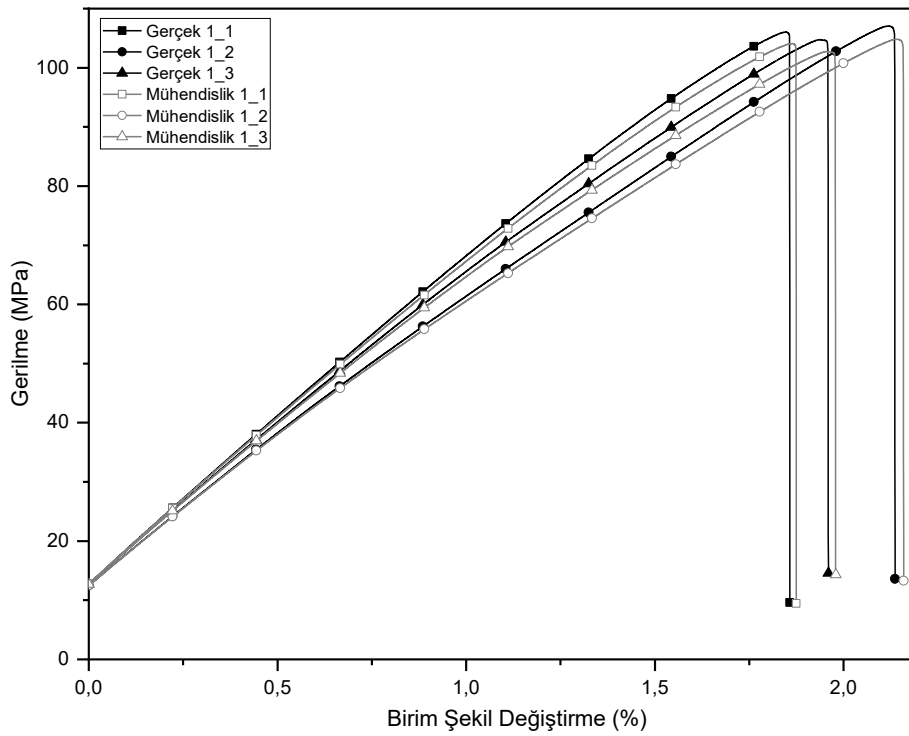
Çizelge 4.1 incelendiğinde, dimi dokuma karbon elyaf takviyeli numunenin 222,60 MPa ile en yüksek mühendislik gerilme değerine ulaştığı ve tüm numune grupları arasında en yüksek mukavemeti sergilediği görülmektedir. ±45° elyaf oryantasyonuna

sahip numuneler, belirgin şekilde daha düşük çekme gerilmesi değerleri göstermiştir. Mukavemet açısından düşük değerlere sahip olmalarına rağmen, yüksek uzama değerleri ile dikkat çekmiştir. Özellikle PE_Karbon_±45°, %31,66'lık maksimum uzama değeriyle en sünek davranışı sergilemiştir. Bu sonuç, elyafların yük taşıma yönüne çapraz yerleşiminin, deformasyon kabiliyetini artırdığını göstermektedir.

Karbon elyaf takviyeli numuneler karşılaştırıldığında, düz dokuma (132,60 MPa) ve dimi dokuma (222,60 MPa) kompozitler arasında belirgin bir mukavemet farkı görülmektedir. Bu fark, dimi dokumanın daha iyi mekanik kenetlenme, daha homojen gerilme dağılımı ve daha verimli yük transferi sağlamasından kaynaklanmaktadır. Dimi dokuma yapıda çözgü ve atkı ipliklerinin diagonal geçişleri, gerilme konsantrasyonlarını azaltarak performansı optimize etmektedir.

Cam elyaf takviyeli kompozitler, karbon elyaflı kompozitlere göre genellikle daha düşük çekme gerilmesi değerleri göstermiştir. Ancak cam elyaf; maliyet etkinliği, şekillendirme kolaylığı ve belirli uygulamalarda yeterli performans sunması nedeniyle hala tercih edilebilir bir takviye elemanıdır.

Düz dokuma cam elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozite (Numune 1) ait mühendislik ve gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri verilmiştir (Şekil 4.2).

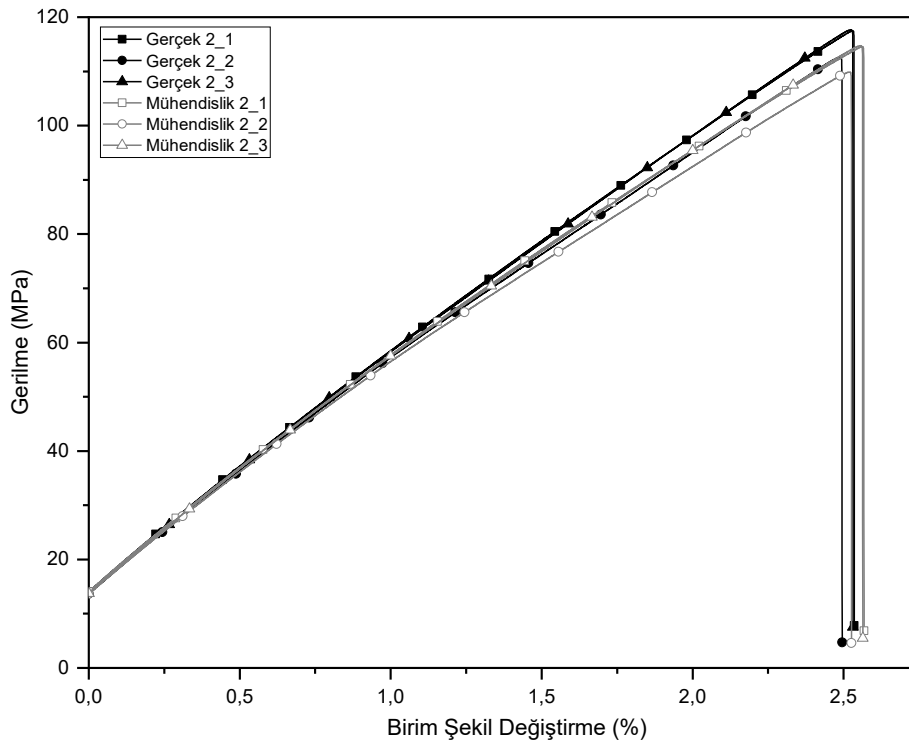


Şekil 4.2. Numune 1 (PE_Cam_Düz)'e ait gerçek/mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

Şekil 4.2 incelendiğinde, düz dokuma cam elyaf takviyeli kompozitlere ait gerçek ve mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin birbirine oldukça yakın seyrettiği görülmektedir. Bu durum, numunelerin deformasyon sürecinde önemli bir kesit daralması yaşamadığını ve plastik bölgeye geçmeden kırıldığını göstermektedir. Eğriler, kırılma noktasına kadar neredeyse doğrusal bir seyir izlemekte olup, malzemenin elastik deformasyon bölgesinin baskın olduğunu ortaya koymaktadır. Bu doğrusal davranış, kompozitin sünek değil, gevrek bir kırılma karakteristiğine sahip olduğunu işaret etmektedir.

Test sonuçlarına göre, bu numunelerde maksimum ortalama mühendislik çekme gerilmesi değeri yaklaşık 103,88 MPa, birim şekil değiştirme ise %2 seviyesindedir. Bu veriler, malzemenin yük taşıma kapasitesinin yüksek olduğunu ancak deformasyon kabiliyetinin sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu veriler, düz dokuma cam elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozitlerin kırılma yapıda olduğunu desteklemektedir.

Dimi dokuma cam elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozite (Numune 2) ait mühendislik ve gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri verilmiştir (Şekil 4.3).



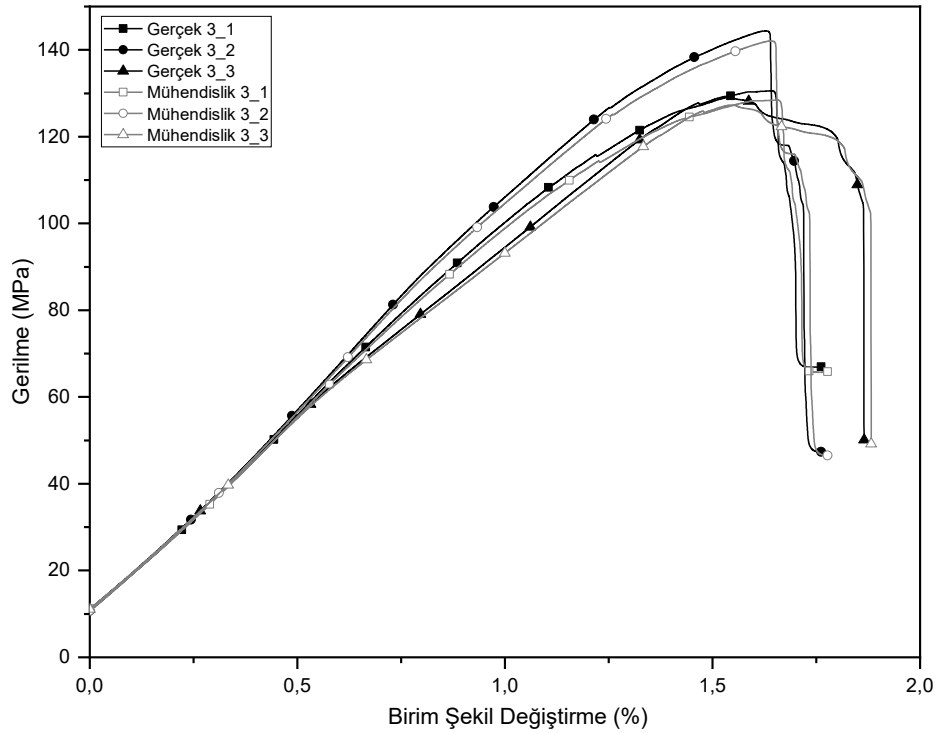
Şekil 4.3. Numune 2 (PE_Cam_Dimi)'ye ait gerçek/mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

Şekil 4.3 incelendiğinde, dimi dokuma cam elyaf takviyeli numunelere ait gerçek ve mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin birbirine son derece yakın

seyrettiği görülmektedir. Üç tekrarlı numune için elde edilen eğrilerin neredeyse çakışması, deneysel sürecin kontrollü yürütüldüğünü ve malzeme üretiminin homojenliğini desteklemektedir.

Düz dokuma cam elyaf takviyeli kompozitlerle (PE_Cam_Düz) karşılaştırıldığında, dimi dokuma cam elyaf takviyeli kompozitler (PE_Cam_Dimi) yaklaşık %2,5 oranında daha yüksek gerilme ve birim şekil değiştirme değerleri sergilemiştir. Bu performans farkı, dimi dokuma yapının daha homojen gerilme dağılımı sağlaması ve yük transferinde daha etkin olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca, dimi dokuma yapının yanal deformasyonları daha etkili şekilde sınırlandırması, yük taşıma kapasitesinin korunmasına katkıda bulunmaktadır.

Düz dokuma karbon elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozite (Numune 3) ait mühendislik ve gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri verilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Numune 3 (PE_Karbon_Düz)'e ait gerçek/mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

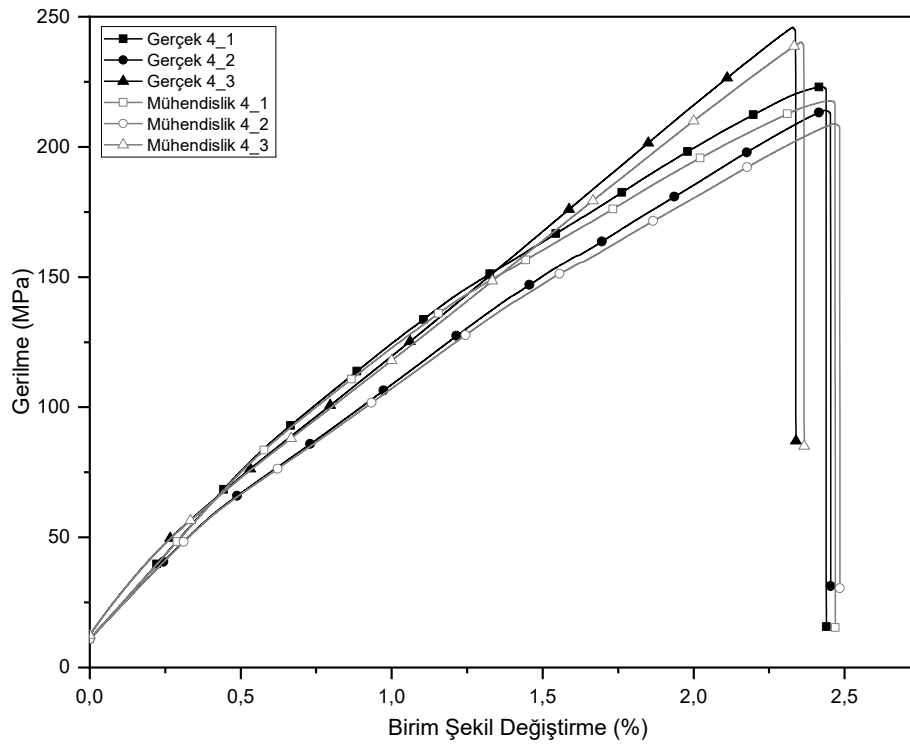
Şekil 4.4 incelendiğinde, düz dokuma karbon elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozit numunenin çekme davranışı, malzemenin mekanik karakteristiği hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Gerçekleştirilen üç tekrarlı test sonucunda, yaklaşık 140 MPa maksimum gerilme ve %1,8 maksimum birim şekil değiştirme değerleri elde edilmiş

olup, sonuçlar yüksek tekrarlanabilirlik göstermektedir. Bu durum hem üretim sürecinin homojenliğini hem de test prosedürlerinin güvenilirliğini desteklemektedir.

Gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin doğrusal seyri, malzemenin deformasyon sürecinde belirgin bir elastik davranış sergilediğini göstermektedir. Başlangıçtan kırılma anına kadar süregelen bu doğrusal ilişki, karbon elyafların yüksek elastisite modülü ve rijit yapısını yansıtmaktadır.

Malzeme, plastik deformasyon bölgesi göstermeksizin ani kırılma sergilemiştir. Bu sonuç, kompozitin gevrek bir kırılma davranışı sergilediğini ve enerji absorplama kapasitesinin sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu kırılma yapı, karbon elyafların karakteristik mekanik özellikleri ile polietilen matrisle oluşturduğu rijit bağlanma davranışıyla uyumludur.

Dimi dokuma karbon elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozite (Numune 4) ait mühendislik ve gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri verilmiştir (Şekil 4.5).

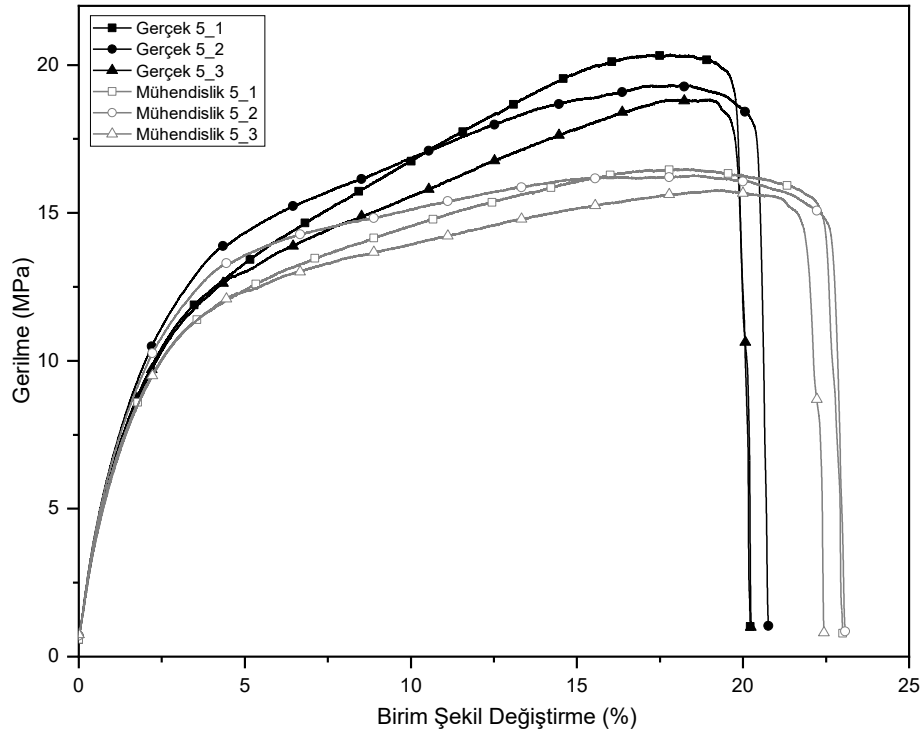


Şekil 4.5. Numune 4 (PE_Karbon_Dimi)'e ait gerçek/mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

Şekil incelendiğinde, dimi dokuma karbon elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozitlerin yüksek mekanik performans sergilediği görülmektedir. Gerçekleştirilen üç tekrarlı testler, yaklaşık 220-240 MPa aralığında maksimum gerilme ve %2,4'e kadar birim şekil değiştirme değerleriyle oldukça tutarlı sonuçlar vermektedir.

Gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin başlangıcında kısa bir non-linear deformasyon evresi gözlemlenmiş; yaklaşık %0,5 birim şekil değiştirme sonrasında belirgin bir lineer elastik bölgeye geçilmiştir. Bu davranış, dimer dokuma yapının yük aktarım mekanizmasını optimize ettiğini ve elyaf-matris arayüzey etkileşiminin etkinliğini göstermektedir. Kırılma, maksimum gerilme noktasında ani biçimde gerçekleşmekte olup, bu durum kompozitin gevrek kırılma karakteristiğine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

$\pm 45^\circ$ oryantasyonlu cam elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozite (Numune 5) ait mühendislik ve gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri verilmiştir (Şekil 4.6).



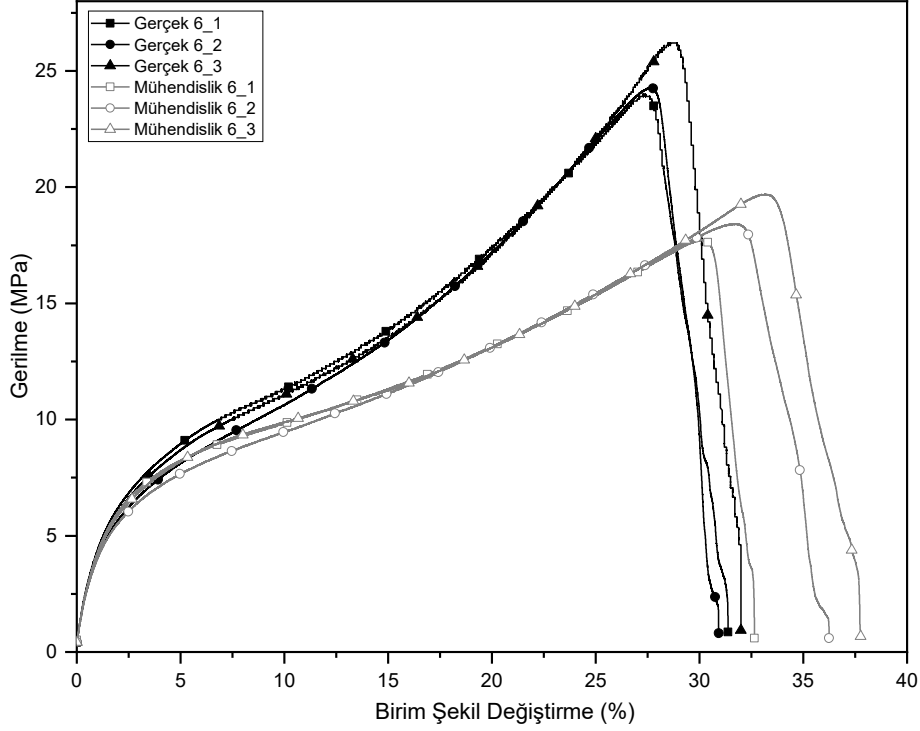
Şekil 4.6. Numune 5 (PE_Cam_±45°)'e ait gerçek/mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

Şekil incelendiğinde, $\pm 45^\circ$ oryantasyonlu cam elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozit numunelerin yaklaşık 20 MPa düzeyinde maksimum gerilme değerine ulaştığı ve %20 civarında birim şekil değiştirme ile yüksek süneklik sergilediği görülmektedir. Test tekrarları arasında belirli varyasyonlar bulunsa da tüm numuneler benzer deformasyon eğilimleri göstermiştir.

Malzemenin deformasyon davranışı incelendiğinde, başlangıçta yaklaşık %0-3 aralığında lineer elastik bir bölge tespit edilmiştir. Bu evreyi takiben, %3 ile %18 arasında belirgin bir plastik deformasyon bölgesi gözlemlenmiştir. Bu bölgede gerilme artmaya

devam etse de eğrilerin eğimi giderek azalmış ve malzeme sünek deformasyon davranışı sergilemiştir. Özellikle %10'un üzerindeki şekil değiştirme seviyelerinde, gerçek ve mühendislik gerilme eğrileri arasındaki fark belirginleşmiştir. Bu durum, kesit daralmasının deformasyon sürecinde etkili hale geldiğini göstermektedir.

$\pm 45^\circ$ oryantasyonlu karbon elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozite (Numune 6) ait mühendislik ve gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri verilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Numune 6 (PE_Karbon_±45°)'ya ait gerçek/mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

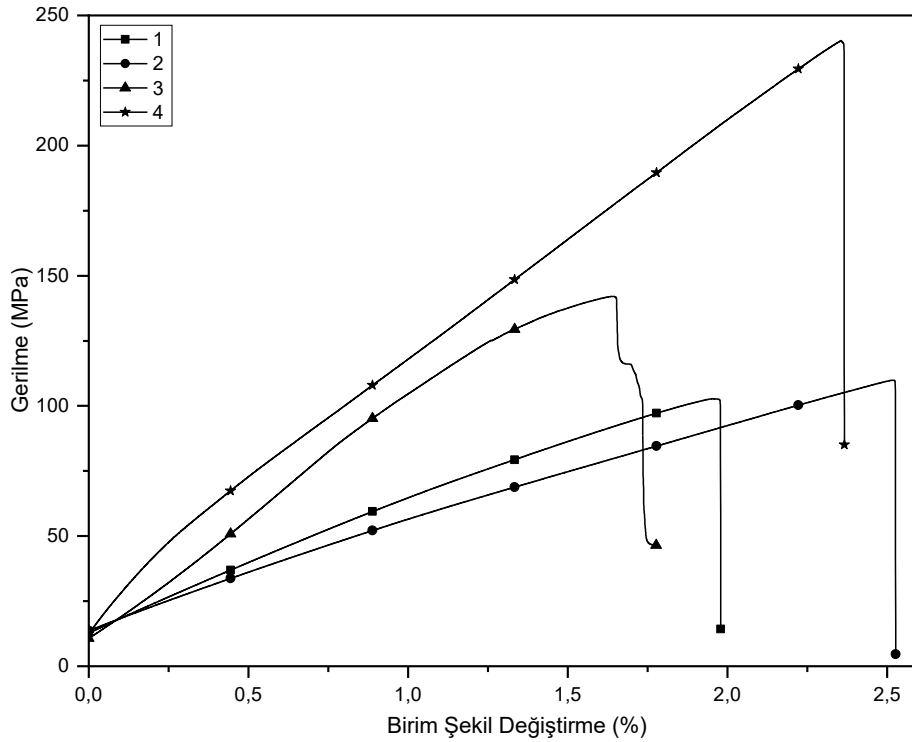
Şekil incelendiğinde, $\pm 45^\circ$ oryantasyonlu karbon elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozit numunelerin yüksek deformasyon kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Maksimum gerçek gerilme değerleri 25-26 MPa aralığında, maksimum birim şekil değiştirme değerleri %30-35 arasında ölçülmüştür.

Gerçek gerilme eğrilerinin, mühendislik eğrilerine kıyasla daha yüksek değerlere ulaşması, deformasyon sürecinde belirgin kesit daralması yaşandığını göstermektedir. Bu fark, gerçek gerilme hesaplamalarında kesit daralmasının dikkate alınmasının önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Yaklaşık %5-30 aralığındaki plastik deformasyon bölgesinde eğrilerin eğimi giderek azalmaktadır. Bu durum, deformasyon sertleşmesi etkisinin devreye girdiğini ve malzemenin artan deformasyon altında yük taşıma kapasitesini sürdürdüğünü

düşündürmektedir. Şekil değiştirme kapasitesinin oldukça yüksek olması, enerji absorpsiyon potansiyelini ortaya koymaktadır. %10'un üzerindeki deformasyonlar seviyelerinde, gerçek ve mühendislik eğrileri arasındaki fark daha da belirgin hale gelmekte, mühendislik gerilme değerini yaklaşık 17-18 MPa ile sınırlamaktadır.

Şekil 4.8, PE_Cam_Düz, PE_Cam_Dimi, PE_Karbon_Düz ve PE_Karbon_Dimi numunelerine ait ortalama mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerini içermektedir.



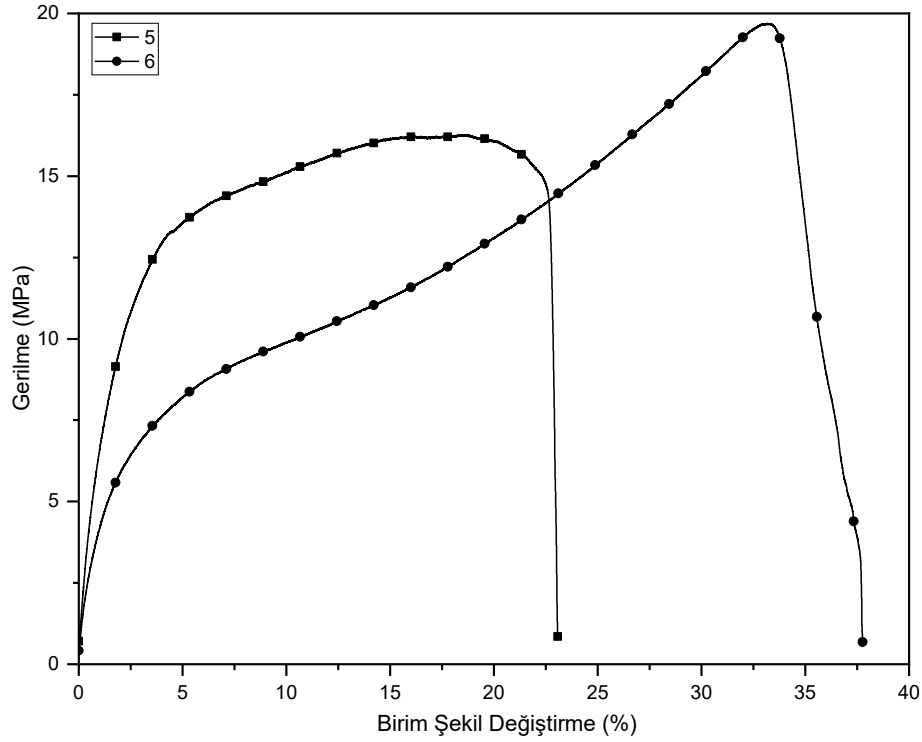
Şekil 4.8. Numune 1 (PE_Cam_Düz), Numune 2 (PE_Cam_Dimi), Numune 3 (PE_Karbon_Düz) ve Numune 4 (PE_Karbon_Dimi)'e ait mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

Eğriler, cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin çekme davranışlarını karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Numune 1 (PE_Cam_Düz), yaklaşık 105 MPa maksimum gerilme ve sınırlı şekil değiştirme kapasitesi ile en düşük çekme performansını sergilemiştir. Eğri profili, gevrek kırılma davranışına işaret etmektedir. Numune 2 (PE_Cam_Dimi), benzer mukavemet düzeylerine ulaşmasına rağmen, düz dokuma yapıya kıyasla daha yüksek deformasyon kapasitesi sunmuştur. Bu fark, dimi dokumanın sünekliği artırıcı etkisiyle açıklanabilir.

Numune 3 (PE_Karbon_Düz), yaklaşık 140 MPa seviyesinde çekme gerilmesine ulaşmıştır. Ancak, kopma öncesi gözlemlenen ani gerilme düşüşü, sistemde olası mikroyapısal zayıflıklara veya elyaf-matris arayüzeyinde ayrışmaya işaret etmektedir.

Numune 4 (PE_Karbon_Dimi), tüm numuneler arasında en yüksek performansı göstermiştir. Yaklaşık 220 MPa çekme gerilmesi ve %2,4'lük birim şekil değiştirme kapasitesi ile yüksek mukavemet-süneklik kombinasyonu sunmuştur. Bu davranış, dimi dokuma yapının yük aktarım mekanizmasını optimize etmesi ve karbon elyafın yüksek elastik modülüyle birleşmesiyle açıklanabilir.

Şekil 4.9, PE_Cam_±45° ve PE_Karbon_±45° numunelerine ait ortalama mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerini içermektedir.

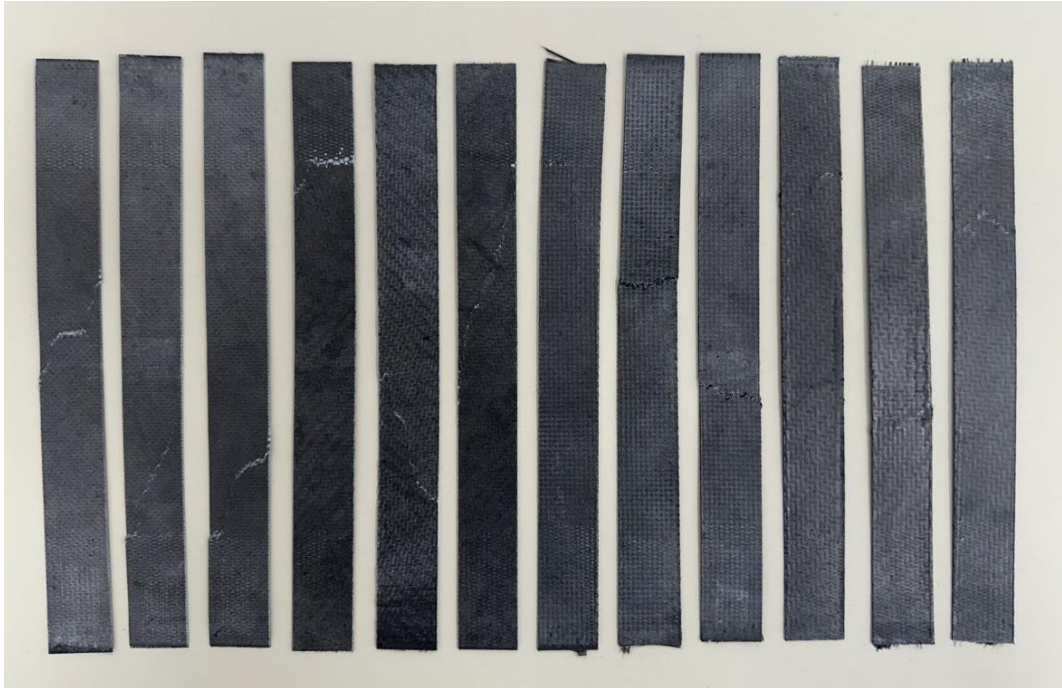


Şekil 4.9. Numune 5 (PE_Cam_±45°) ve Numune 6 (PE_Karbon_±45°)'ya ait mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

Eğriler incelendiğinde, cam elyaf takviyeli numunenin başlangıçta yükü etkin şekilde taşıdığı, ancak artan deformasyonla birlikte elyaf-matris arayüzeyinde kayma, ayrılma veya benzeri deformasyon mekanizmalarının devreye girdiği görülmektedir. Bu durum, malzemenin yüksek şekil değiştirme kapasitesine rağmen, kopmanın ani gerçekleşmesi nedeniyle sınırlı süneklik göstermesiyle sonuçlanmaktadır. Karbon elyaf takviyeli numuneye ait eğriler, deformasyon süresince daha dengeli ve sürekli artan bir gerilme profili sunmaktadır. Bu davranış, arayüzey bağlanmasının daha güçlü olduğunu ve yük transferinin daha verimli gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Özellikle karbon elyaf takviyeli numunede kopmanın daha geç ve kademeli olarak gerçekleşmesi, yapısal bütünlüğün deformasyon altında daha uzun süre koruduğuna işaret etmektedir.

Sonuçlar, $\pm 45^\circ$ oryantasyonlu kompozitlerin orta düzeyde mukavemet değerleri sunmakla birlikte oldukça yüksek bir deformasyon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu mekanik özellik kombinasyonu, malzemenin özellikle enerji absorpsiyonu ve deformasyon toleransı gerektiren mühendislik uygulamaları için uygun bir malzeme sistemi olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 4.10, KNT takviyeli numunelerin çekme testleri sonrasında elde edilen numune görüntülerini sunmaktadır. Her numune grubuna ait üç tekrarlı deney numunesi, sırayla gösterilmiştir.

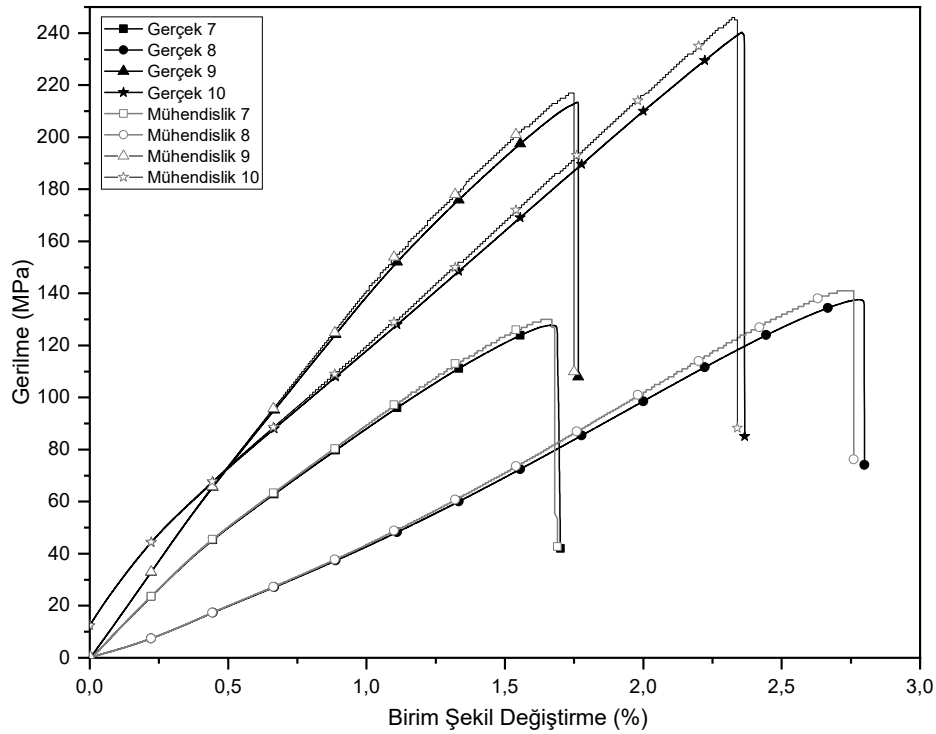


Şekil 4.10. KNT takviyeli numunelerin çekme testi sonrası numune görüntüleri

Çizelge 4.2, KNT takviyeli kompozit numunelerin çekme testlerinden elde edilen ortalama sonuçları içermektedir. Elde edilen bulgular, KNT takviyesinin malzemelerin çekme davranışı üzerindeki etkilerini yorumlamaya yardımcı olmaktadır. KNT takviyeli numunelere ait mühendislik ve gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri sunulmuştur (Şekil 4.11).

Çizelge 4.2. KNT takviyeli numunelerin çekme testi sonuçları

Numune Kodu	Gerçek Çekme Gerilmesi σ_{gmax} (MPa)	Mühendislik Çekme Gerilmesi σ_{mmax} (MPa)	Gerçek Maksimum Yüzde Uzama (% ϵ)	Mühendislik Maksimum Yüzde Uzama (% ϵ)
7 - (PE_KNT_Cam_Düz)	129,84	127,72	1,91	1,93
8 - (PE_KNT_Cam_Dimi)	141,38	137,56	2,76	2,79
9 - (PE_KNT_Karbon_Düz)	217,22	213,457	1,75	1,77
10 - (PE_KNT_Karbon_Dimi)	245,99	240,32	2,34	2,37



Şekil 4.11. KNT takviyeli numunelere ait gerçek/mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

Karbon nanotüp takviyeli numunelere uygulanan çekme testleri, farklı elyaf türlerinin mekanik özellikler üzerindeki belirgin etkilerini ortaya koymuştur. Deneysel çalışmada, matris malzemesi sabit tutulmuş ve yalnızca takviye elyaflar değiştirilerek elyaf türünün performansa katkısı incelenmiştir.

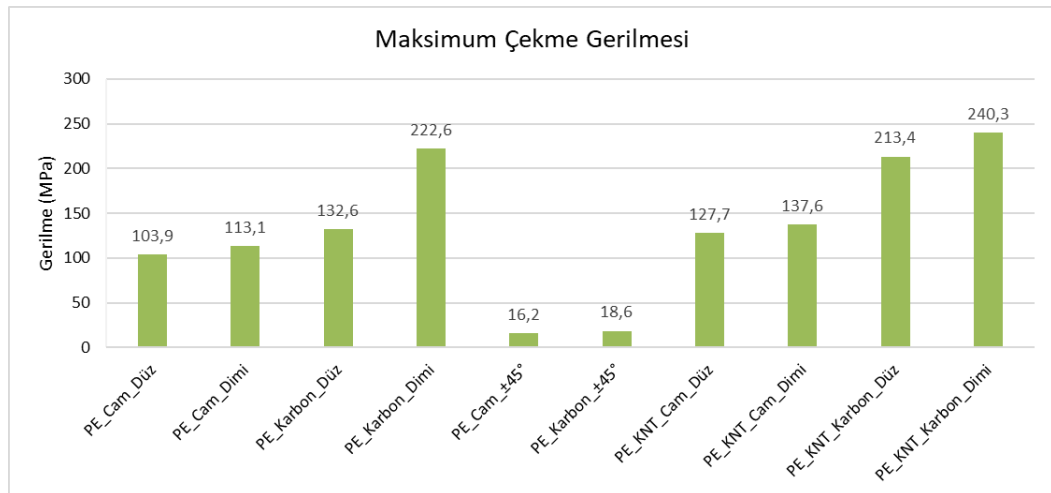
Çekme dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde, karbon elyaf takviyeli kompozitlerin cam elyaf takviyeli kompozitlere kıyasla belirgin bir üstünlük sergilediği görülmektedir. En yüksek çekme dayanımı PE_KNT_Karbon_Dimi numunesinde elde edilmiş; düz dokuma karbon elyaf takviyeli numunede (PE_KNT_Karbon_Düz) ise bu değer azalmış olsa da hala cam elyaf takviyeli numunelerin üzerinde kalmıştır.

Şekil değiştirme kapasitesi bakımından tüm kompozit numuneler sınırlı plastik deformasyon özelliği sergilemiştir. Maksimum yüzde uzama değerleri %1,7-2,8 aralığında gerçekleşmiş olup, bu durum, KNT takviyeli polietilen matrisin gevrek karakteristiği ile ilişkilendirilmektedir.

Gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, tüm numunelerin lineer elastik davranış sergilediği ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin daha yüksek gerilme seviyelerine ulaştığı açıkça görölmektedir. Bu durum, yüksek mukavemet ve rijitlik gerektiren yapısal uygulamalarda karbon elyaf tercihinin gerekçesini ortaya koymaktadır.

Ayrıca, KNT takviyesinin polietilen matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, takviyeli ve takviyesiz kompozitlerin karşılaştırmalı analizi ile net biçimde ortaya konmuştur. KNT takviyesiz kompozitlerin sonuçları (Çizelge 4.1) ile KNT takviyeli sistemlere ait sonuçlar (Çizelge 4.2) karşılaştırıldığında, KNT takviyesinin özellikle çekme dayanımı ve rijitlik açısından kayda değer iyileştirmeler sağladığı görölmektedir. Maksimum yüzde uzama değerleri açısından değerlendirildiğinde, karbon nanotüp takviyesinin genel olarak kompozitlerin şekil değiştirme kapasitesinde azalmaya neden olduğu gözlenmiştir. Bu durum, karbon nanotüplerin kompozit yapıda artan rijitlik sağlaması ve daha gevrek bir davranış karakteristiği oluşturmasıyla açıklanabilir.

Şekil 4.12, farklı takviye türlerine ve dokuma yapılarına sahip kompozit numunelerin çekme testleri sonucunda elde edilen maksimum çekme gerilmesi değerlerinin karşılaştırmalı olarak sunulduğu grafiği göstermektedir.



Şekil 4.12. Maksimum çekme gerilmesi karşılaştırması

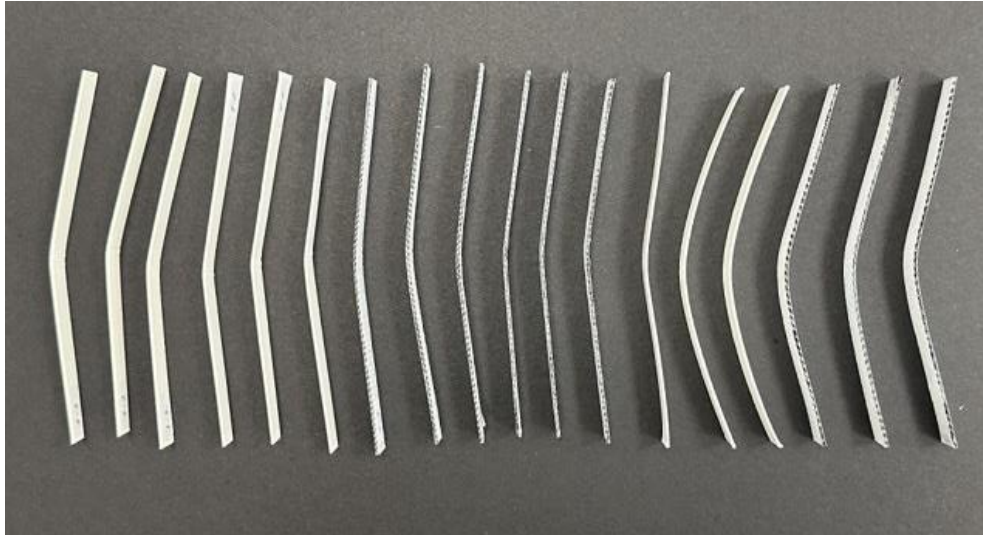
Cam elyaf takviyeli kompozitlerde karbon nanotüp takviyesinin etkisi incelendiğinde, düz cam elyaf kompozitlerinde çekme dayanımının yaklaşık %23,3 oranında artış gösterdiği tespit edilmiştir. Dımı dokuma cam elyaf kompozitlerinde ise bu iyileşme daha da belirgin olarak gözlenmiş, çekme dayanımı %21,24 oranında artış göstermiştir. Bu bulgular, karbon nanotüplerin matris içerisinde etkin bir takviye mekanizması oluşturduğunu ve elyaf-matris arayüzey bağlanmasını güçlendirdiğini göstermektedir.

Karbon elyaf takviyeli kompozitlerde karbon nanotüp etkisi daha da çarpıcı sonuçlar ortaya koymuştur. Düz dokuma karbon elyaf kompozitlerde çekme dayanımı yaklaşık %61,4 gibi oldukça yüksek bir artış sergilemiştir. Dımı dokuma karbon elyaf kompozitlerinde ise %8 oranında iyileşme sağlanmıştır. Bu durum, karbon nanotüplerin karbon elyaflarla sinerjik bir etkileşim oluşturarak kompozitin yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

Sonuç olarak, karbon nanotüp takviyesinin polietilen matris kompozitlerin mekanik özelliklerine olan katkısı deneysel verilerle doğrulanmıştır. KNT'lerin hem matris içinde yük taşımaya doğrudan katkısı hem de arayüzey bağlanmasını güçlendirici etkisi, onları ileri düzey mühendislik uygulamaları için vazgeçilmez bir nano takviye elemanı haline getirmektedir. Bu bağlamda, KNT takviyeli kompozitler, yüksek mukavemetin kritik olduğu savunma, otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde stratejik bir malzeme çözümü sunmaktadır.

4.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

Üç nokta eğme testi, kompozit malzemelerin eğilme yükleri altındaki mekanik davranışlarını karakterize etmek için uygulanan standart bir test yöntemidir. Bu çalışma kapsamında, ASTM 790 standardı doğrultusunda gerçekleştirilen üç nokta eğme testleriyle, geliştirilen kompozitlerin eğilme dayanımı ve rijitlik özellikleri analiz edilmiştir. Her numune grubu için üç tekrarlı test yapılmış; bu sayede elde edilen sonuçların tekrarlanabilirliği ve istatistiksel güvenilirliği sağlanmıştır. Ayrıca, elyaf türü ve oryantasyonunun eğilme performansı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Şekil 4.13, KNT takviyesiz numunelerin üç nokta eğme testleri sonrasında elde edilen numune görüntülerini sunmaktadır.



Şekil 4.13. KNT takviyesiz numunelerin üç nokta eğme testi sonrası numune görüntüleri

Deney numunelerine uygulanan üç nokta eğme testlerinden elde edilen maksimum ortalama değerler, her numune grubunun eğilme dayanımı ve deformasyon özelliklerinin karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır. Bu kapsamda elde edilen veriler Çizelge 4.3'te sunulmuş olup, farklı elyaf türü, dokuma yapısı ve oryantasyonun eğilme performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir

Çizelge 4.3. KNT takviyesiz numunelerin üç nokta eğme testi sonuçları

Numune Kodu	Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Gerilme σ_{max} (MPa)	Maksimum Uzama (mm)	Maksimum Yüzde Uzama (% ϵ)
1 - (PE_Cam_Düz)	5,55	42,19	10,27	2,12
2 - (PE_Cam_Dimi)	4,47	41,12	8,26	1,55
3 - (PE_Karbon_Düz)	5,10	35,96	10,06	2,41
4 - (PE_Karbon_Dimi)	5,51	29,92	10,01	2,14
5 - (PE_Cam_±45°)	3,59	29,61	13,58	2,60
6 - (PE_Karbon_±45°)	2,69	14,50	10,89	2,68

Çizelge 4.3 incelendiğinde, PE matrisli cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin eğilme dayanımı açısından belirgin farklılıklar sergilediği açıkça görülmektedir. Cam elyaf takviyeli numuneler, özellikle düz dokuma yapısına sahip olanlar, karbon elyaf takviyeli muadillerine kıyasla daha yüksek maksimum kuvvet ve gerilme değerleri göstermiştir.

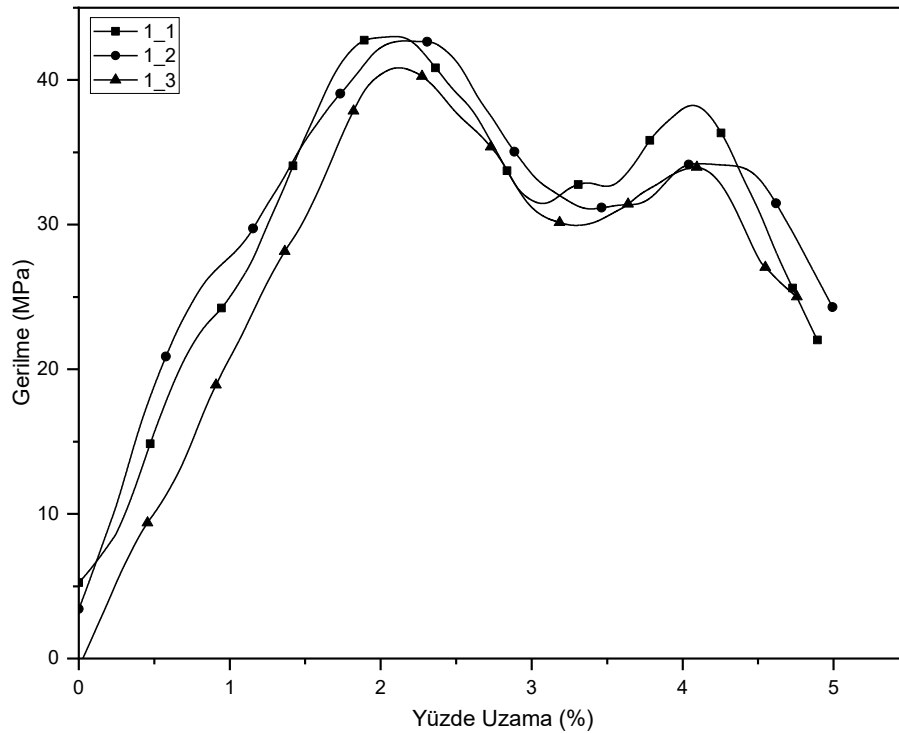
Karbon elyaf takviyeli numuneler, özellikle ±45° elyaf oryantasyonuna sahip olanlar, daha yüksek maksimum yüzde uzama değerleri sergileyerek deformasyon kapasitesi açısından öne çıkmıştır. Bu durum, karbon elyafların matris içinde daha fazla

elastik deformasyona olanak tanıdığı ve bu sayede kompozitin enerji absorpsiyon kapasitesinin artabileceğini göstermektedir.

Dokuma türü karşılaştırıldığında, düz dokuma yapıları numunelerin genellikle dimi dokuma yapıları muadillerine göre daha yüksek maksimum kuvvet değerleri sergilediği gözlemlenmiştir.

$\pm 45^\circ$ oryantasyonlu numuneler (5 ve 6), düz ve dimi dokuma yapılarına kıyasla daha düşük maksimum kuvvet ve gerilme değerleri sergilemiştir. Ancak buna karşılık, en yüksek maksimum uzama (13,58 mm ve 10,89 mm) ve maksimum yüzde uzama (%2,60 ve %2,68) değerlerini göstermiştir. Bu durum, bu dokuma türünün uygulanan yüke karşı elyafların yeniden yön değiştirmesine izin vererek daha fazla deformasyon kapasitesi sağladığını göstermektedir.

Şekil 4.14, düz dokuma cam elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozit malzemenin gerilme-yüzde uzama eğrilerini göstermektedir.



Şekil 4.14. Numune 1 (PE_Cam_Düz)'e ait gerilme-yüzde uzama eğrileri

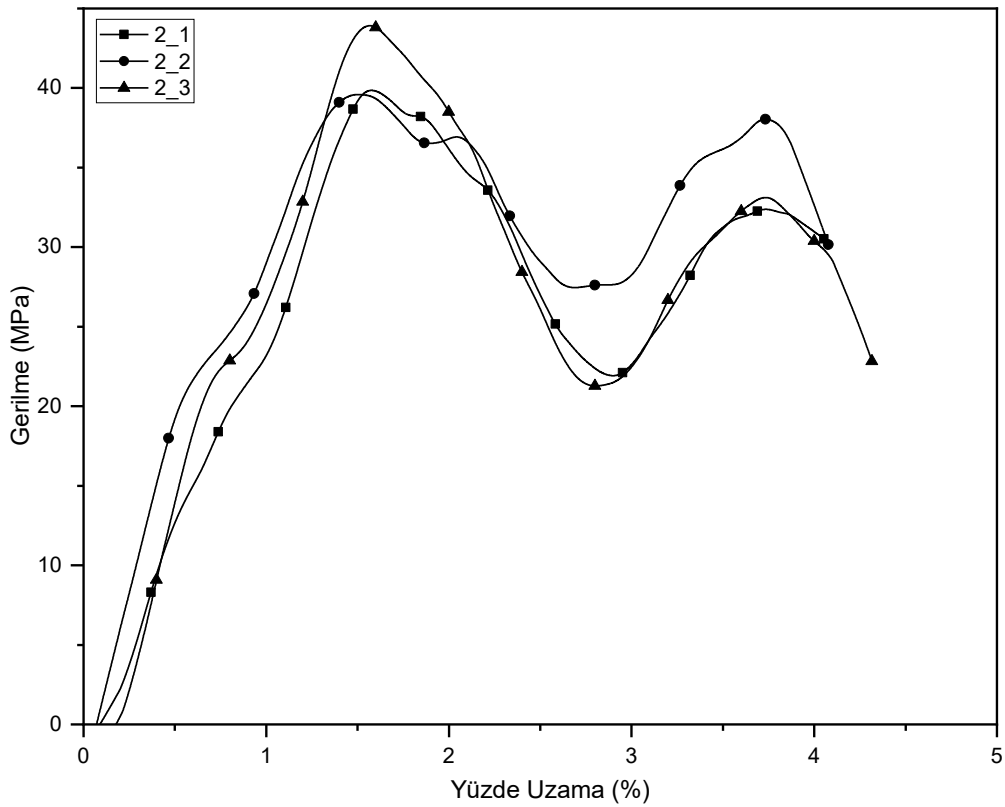
Eğriler incelendiğinde, deformasyon davranışında yüksek düzeyde tekrarlanabilirlik ve tutarlılık gözlemlenmektedir. Üç numune de yaklaşık %2 birim şekil değiştirme seviyesinde maksimum gerilme değerine ulaşmakta ve bu noktadan sonra benzer bir gerilme düşüş eğilimi sergilemektedir. Maksimum gerilme sonrası

gözlemlenen bu düşüş, genellikle matris çatlaması, elyaf-matris arayüzey bağının zayıflaması veya elyaflarda meydana gelen mikro düzeyde hasarların bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

Eğrilerin bu gerilme düşüş bölgesinde paralel şekilde seyretmeye devam etmesi, her numunenin benzer bir hasar mekanizmasına maruz kaldığını ve yapısal davranışın öngörülebilir olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, malzemenin gevrek karakteristiğini ve sınırlı plastik deformasyon kapasitesini de desteklemektedir.

Elde edilen bulgular, PE_Cam_Düz kompozitin kısa süreli ve tekrarlı yüklemeler altında yapısal güvenilirlik sunduğunu; ancak ani hasar gelişimine karşı dikkatli olunması gerektiğini göstermektedir.

Şekil 4.15, dimi dokuma cam elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozit malzemenin gerilme-yüzde uzama eğrilerini göstermektedir.



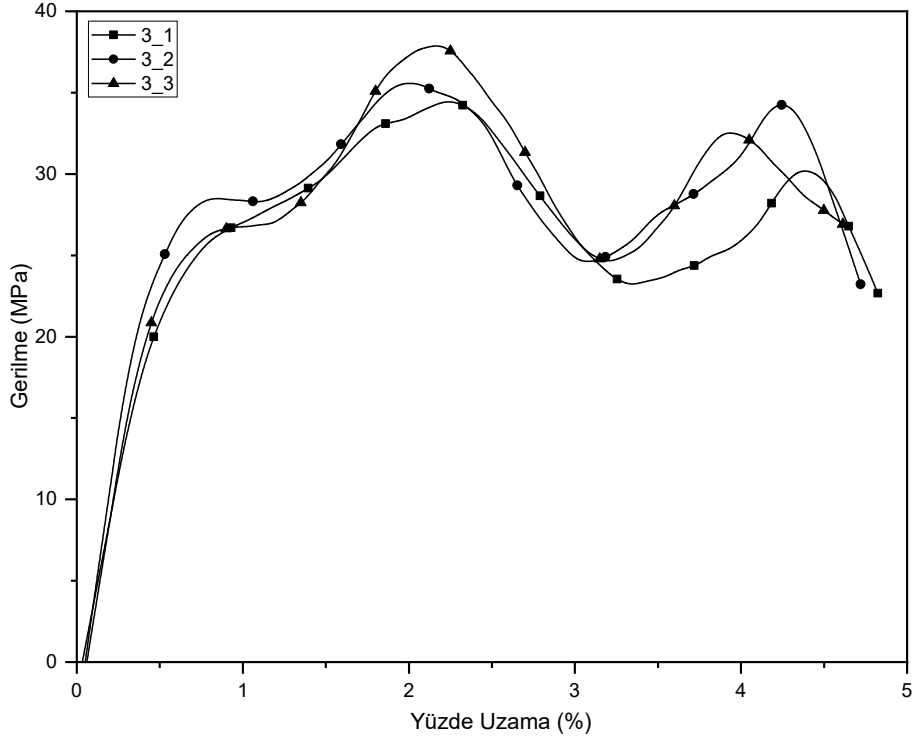
Şekil 4.15. Numune 2 (PE_Cam_Dimi)'ye ait gerilme-yüzde uzama eğrileri

Grafik incelendiğinde, dimi dokuma cam elyaf takviyeli PE kompozit numunelerin deformasyon davranışında belirli bir tutarlılık gözlemlenmekle birlikte, düz dokuma numunelerine kıyasla daha fazla varyasyon görülmektedir. Tüm numuneler

yaklaşık %1,5-2 birim şekil değiştirme seviyelerinde ilk maksimum gerilme değerlerine ulaşmakta ve ardından karakteristik olarak çok tepeli bir gerilme profili sergilemektedir.

Maksimum gerilme noktasından sonra, yaklaşık %1,5-3 birim şekil değiştirme aralığında tüm numunelerde gerilme değerlerinde belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu gerilme kaybı; matris içinde mikro çatlakların oluşması, elyaf-matris arayüzeyinde ayrılmaların başlaması ve kısmi elyaf kırılmaları gibi hasar mekanizmalarının devreye girdiğini göstermektedir. Düşüş oranında görülen farklılıklar ise, hasar ilerlemesinin numune bazında farklılık gösterdiğine ve yerel mikro yapısal etkilere bağlı olduğuna işaret etmektedir.

Şekil 4.16, düz dokuma karbon elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozit malzemenin gerilme-yüzde uzama eğrilerini göstermektedir.

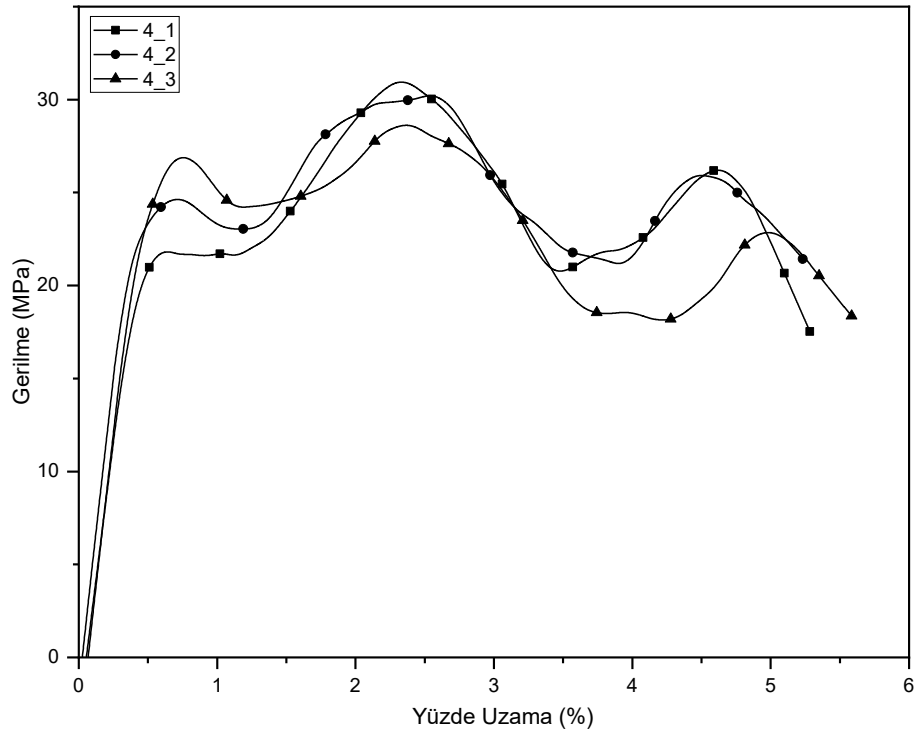


Şekil 4.16. Numune 3 (PE_Karbon_Düz)'e ait gerilme-yüzde uzama eğrileri

PE_Karbon_Düz kompozit numunelere ait gerilme-yüzde uzama eğrileri incelendiğinde, tüm numunelerde deformasyon süreci boyunca belirgin biçimde iki farklı tepe noktası gözlemlenmektedir. İlk tepe yaklaşık %1-2 birim şekil değiştirme aralığında; ikinci tepe ise yaklaşık %4 civarında meydana gelmektedir. Bu çoklu tepe davranışı, karbon elyaf takviyeli kompozitin yük altında ilerleyen hasar mekanizmalarının birbirinden bağımsız ve kademeli olarak devreye girdiğini göstermektedir.

İlk tepe noktası, büyük olasılıkla matris çatlaması veya elyaf-matris arayüzey ayrılmaları gibi erken evre hasarlarını temsil etmektedir. İkinci tepe noktası daha ileri düzey hasarları, örneğin elyaf kırılması veya yapısal bütünlüğün bozulması gibi mekanizmaları temsil etmektedir. Bu gözlemler, karbon elyafın polietilen matris içerisindeki deformasyon davranışının cam elyafa kıyasla daha karmaşık ve çok aşamalı bir karakter sergilediğini ortaya koymaktadır.

Şekil 4.17, düz dokuma karbon elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozit malzemenin gerilme-yüzde uzama eğrilerini göstermektedir.

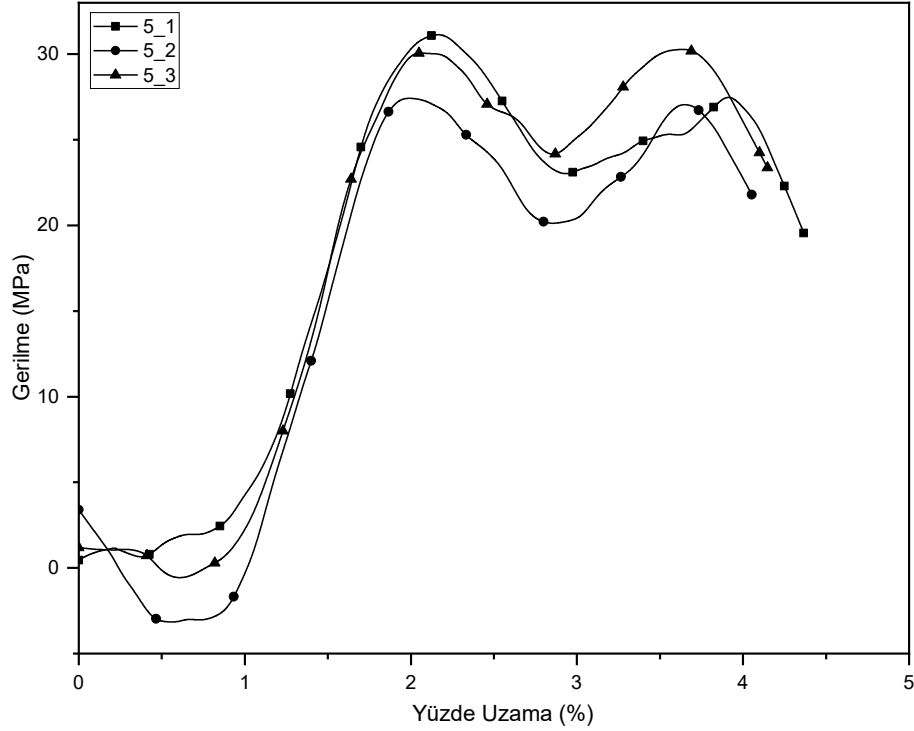


Şekil 4.17. Numune 4 (PE_Karbon_Dimi)'e ait gerilme-yüzde uzama eğrileri

Dimi dokuma karbon elyaf takviyeli PE kompozit numunelere ait gerilme-yüzde uzama eğrileri incelendiğinde, üç farklı test numunesi arasında genel deformasyon davranışında tutarlı bir çoklu tepe karakteristik gözlemlenmektedir. Tüm numuneler, yaklaşık %1-1,5 birim şekil değiştirme aralığında ilk tepe noktasına ulaşmakta; ardından gerilme değerlerinde hafif bir düşüş gerçekleşmekte ve bunu takiben ikinci bir tepe noktasına doğru yeniden artış eğilimi görülmektedir. Bu geçiş bölgesindeki davranışın eğriler arasında bazı farklılıklar göstermesi, elyafların kademeli olarak hasara uğraması ile ilişkilendirilebilir. Kademeli hasar ilerlemesi, dimi dokuma yapının darbe dayanımı ve enerji absorpsiyonu gibi uygulamalarda potansiyel avantaj sağlayabileceğini, buna

karşılık yüksek statik yük taşıma kapasitesi gerektiren uygulamalarda düz dokumanın daha uygun bir seçenek olabileceğini göstermektedir.

Şekil 4.18, $\pm 45^\circ$ oryantasyonlu cam elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozit malzemenin gerilme-yüzde uzama eğrilerini göstermektedir.



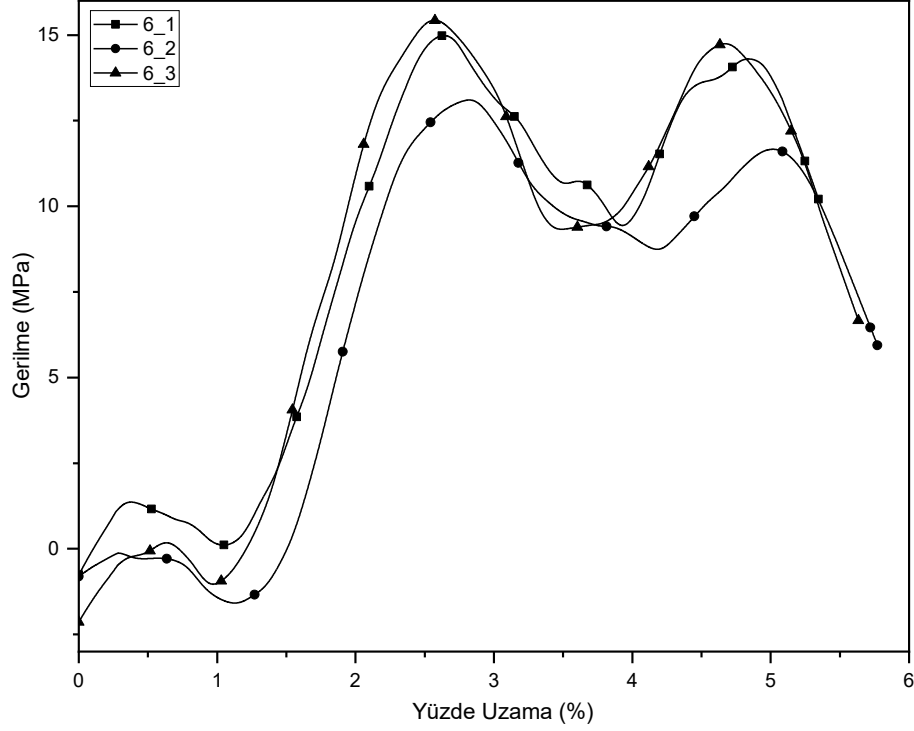
Şekil 4.18. Numune 5 (PE_Cam_±45°)'e ait gerilme-yüzde uzama eğrileri

PE_Cam_±45° numunelere ait gerilme-yüzde uzama eğrileri incelendiğinde, malzemenin anizotropik yapısından kaynaklanan karakteristik bir deformasyon davranışı gözlemlenmektedir. Eğriler üzerinde açıkça görülen çift tepe noktası, $\pm 45^\circ$ oryantasyonlu elyaf yapısına sahip kompozit sistemlerde sıkça karşılaşılan bir durumdur ve malzemenin yükleme süreci boyunca geçirdiği mikroyapısal dönüşümleri yansıtmaktadır.

İlk maksimum tepe noktası, büyük olasılıkla matris malzemenin ve elyaf-matris arayüzeyinin elastik sınırının aşılmasıyla ilişkilendirilmektedir. Bu evrede, elastik deformasyon bölgesinden çıkıldığı ve ilk hasar mekanizmalarının devreye girdiği söylenebilir. İkinci maksimum tepe noktası ise, elyaf oryantasyonunun etkisiyle birlikte, daha etkili bir yük taşıma düzeninin yeniden oluşması sonucunda meydana gelmektedir. Bu süreçte, elyaflar yük doğrultusuna yeniden hizalanarak gerilme transferini optimize etmekte ve malzeme deformasyon sürecini sürdürebilmektedir. Bu karakteristik davranış,

malzemenin enerji absorpsiyon kabiliyetinin yüksek olduğuna ve belirli bir düzeyde kendini yeniden yapılandırma yeteneğine sahip olduğuna işaret etmektedir.

Şekil 4.19, $\pm 45^\circ$ oryantasyonlu karbon elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozit malzemenin gerilme-yüzde uzama eğrilerini göstermektedir.



Şekil 4.19. Numune 6 (PE_Karbon_±45°)'ya ait gerilme-yüzde uzama eğrileri

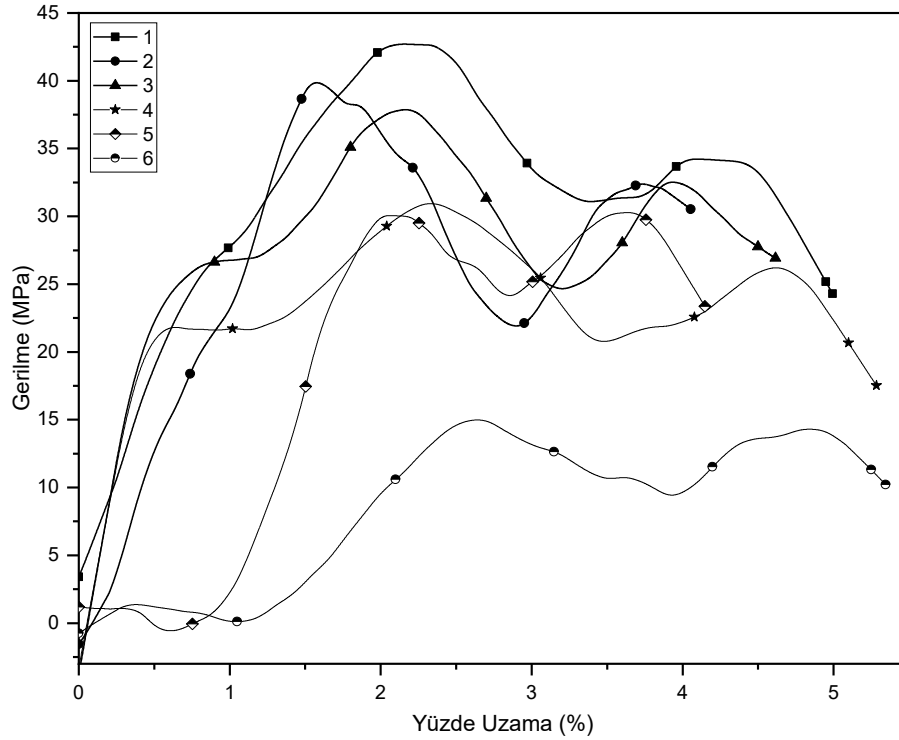
Şekil 4.19 incelendiğinde, tüm numunelerde test başlangıcında negatif gerilme değerleri görülmektedir. Bu durum, test düzeneğinin ön yükleme koşullarından kaynaklanmaktadır.

Eğriler başlangıçta düşük gerilme seviyelerinde seyretmekte ve yaklaşık %2-2,5 uzama aralığında ilk maksimum gerilme değerlerine ulaşmaktadır. İlk tepe noktasını takiben, tüm numunelerde gerilme değerlerinde belirgin bir azalma gözlemlenmiş ve %3,5 uzama civarında göreceli minimum noktalar oluşmuştur. Bu aşama, elyaf-matris arayüzeyinde meydana gelen kayma, mikro-çatlak oluşumu veya lokal elyaf ayrılması gibi hasar mekanizmalarının aktif olduğunu göstermektedir.

Deformasyon ilerledikçe, gerilme eğrilerinde yeniden bir artış eğilimi görülmüş ve tüm numuneler %4-4,5 uzama aralığında ikinci maksimum gerilme değerlerine ulaşmıştır. Bu ikinci yükseliş, elyafların yük doğrultusunda yeniden hizalanması ve yük transferinin daha dengeli bir şekilde gerçekleşmesi ile ilişkilendirilebilir. Nihayetinde

yaklaşık %5-5,5 uzama değerinden sonra tüm numunelerde nihai hasar meydana gelmiştir.

Şekil 4.20, PE_Cam_Düz, PE_Cam_Dimi, PE_Karbon_Düz, PE_Karbon_Dimi, PE_Cam_±45° ve PE_Karbon_±45° numunelerine ait ortalama gerilme yüzde uzama eğrilerini içermektedir.



Şekil 4.20. Numune 1 (PE_Cam_Düz), Numune 2 (PE_Cam_Dimi), Numune 3 (PE_Karbon_Düz), Numune 4 (PE_Karbon_Dimi), Numune 5 (PE_Cam_±45°) ve Numune 6 (PE_Karbon_±45°)'ya ait gerilme-yüzde uzama eğrileri

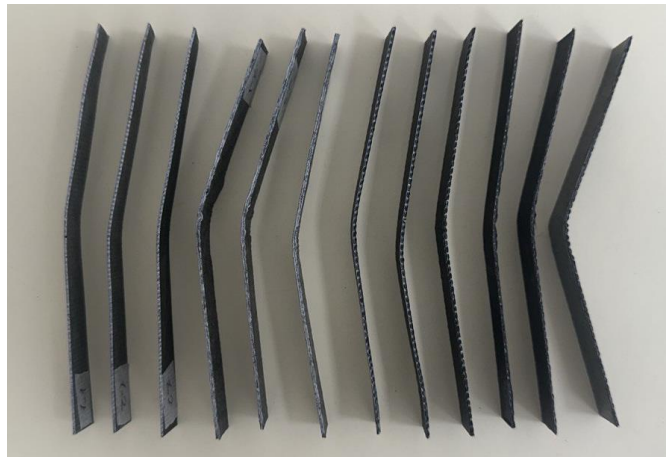
Grafik incelendiğinde, en yüksek eğilme gerilmesi Numune 1 (PE_Cam_Düz) için elde edilmiş olup, yaklaşık 44 MPa'lık gerilme değeriyle en üstün mekanik performansı sergilemiştir. Bu yüksek dayanım, cam elyafın düz dokuma formda kullanılması sayesinde, PE matris ile daha etkili bir arayüzey etkileşimi kurmasından ve elyaf oryantasyonunun yük taşıma yönüyle uyumlu olmasından kaynaklanmaktadır.

±45° elyaf oryantasyonuna sahip fakat farklı elyaf türü içeren Numune 5 ve Numune 6 arasındaki karşılaştırma, elyaf türünün mekanik davranış üzerindeki belirleyici etkisini net biçimde ortaya koymaktadır. Numune 5 yaklaşık 30 MPa'lık bir maksimum gerilme değeri sunarken, Numune 6 bu değer yarısına yakın bir performans sergilemiştir. Bu zayıf performans, karbon elyafın görece daha gevrek yapısıyla açıklanabilir. Her iki numune için, liflerin eğilme eksenine yaptığı açı farkı nedeniyle

yük taşıma kapasitesi azalmış, bu da mekanik dayanım üzerinde olumsuz bir etki yaratmıştır.

Cam elyaf takviyesi karbon elyafa kıyasla, düz dokuma ise dimi dokumaya kıyasla daha yüksek maksimum gerilme değerleri sunmuştur. Bu sonuçlar, cam elyafın PE matrisiyle daha güçlü bir bağ oluşturduğunu ve eğilme altında daha etkin çalıştığını göstermektedir. Ayrıca, düz dokuma yapısı, liflerin yük yönünde sürekliliğini koruyarak yük aktarımını artırmış ve yapının genel eğilme dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. Sonuç olarak hem elyaf türü hem de dokuma oryantasyonu eğilme dayanımı üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Özellikle düz dokuma cam elyaf takviyeli kompozitler, PE matris sistemi içinde en yüksek eğilme performansını sunarak öne çıkmaktadır.

Şekil 4.21, üç nokta eğme testleri sonrasında elde edilen KNT takviyeli numunelerin görüntülerini sunmaktadır.



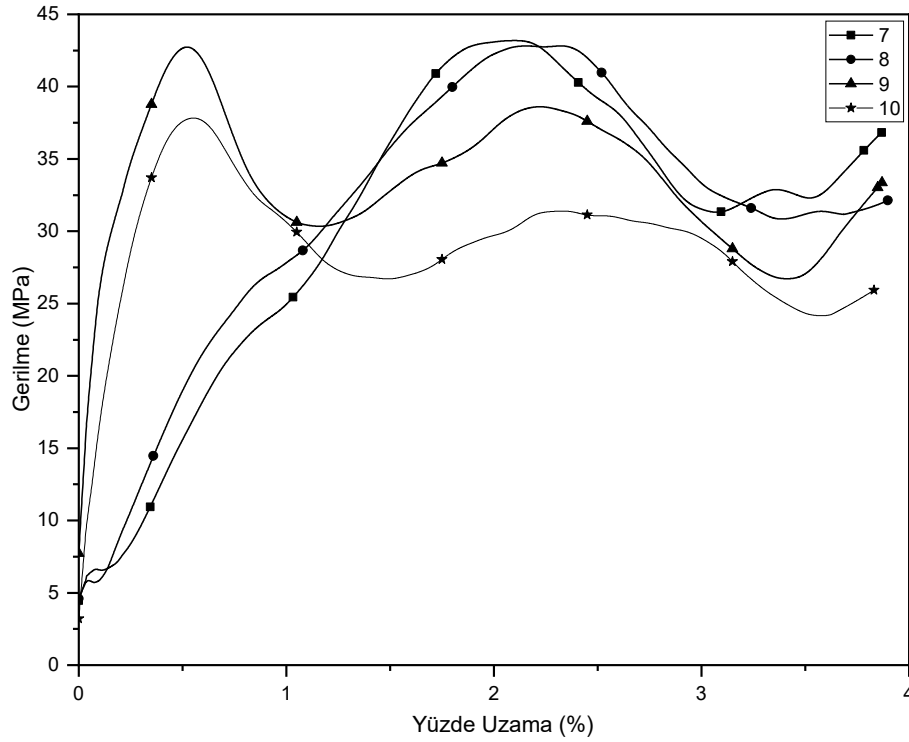
Şekil 4.21. KNT takviyeli numunelerin üç nokta eğme testi sonrası numune görüntüleri

KNT takviyeli deney numunelerinin üç nokta eğme testlerinden elde edilen ortalama değerleri verilmiştir (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4. KNT takviyeli numunelerin üç nokta eğme testi sonuçları

Numune Kodu	Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Gerilme σ_{max} (MPa)	Maksimum Uzama (mm)	Maksimum Yüzde Uzama (% ϵ)
7 - (PE_KNT_Cam_Düz)	5,21	43,19	10,49	2,09
8 - (PE_KNT_Cam_Dimi)	5,58	42,82	11,09	2,32
9 - (PE_KNT_Karbon_Düz)	7,67	42,73	2,24	0,52
10 - (PE_KNT_Karbon_Dimi)	6,79	37,83	2,38	0,55

KNT takviyeli deney numunelerin üç nokta eğme testlerinden elde edilen gerilme-yüzde uzama eğrileri sunulmuştur (Şekil 4.22).



Şekil 4.22. Numune 7 (PE_KNT_Cam_Düz), Numune 8 (PE_KNT_Cam_Dimi), Numune 9 (PE_KNT_Karbon_Düz) ve Numune 10 (PE_KNT_Karbon_Dimi)'a ait gerilme-yüzde uzama eğrileri

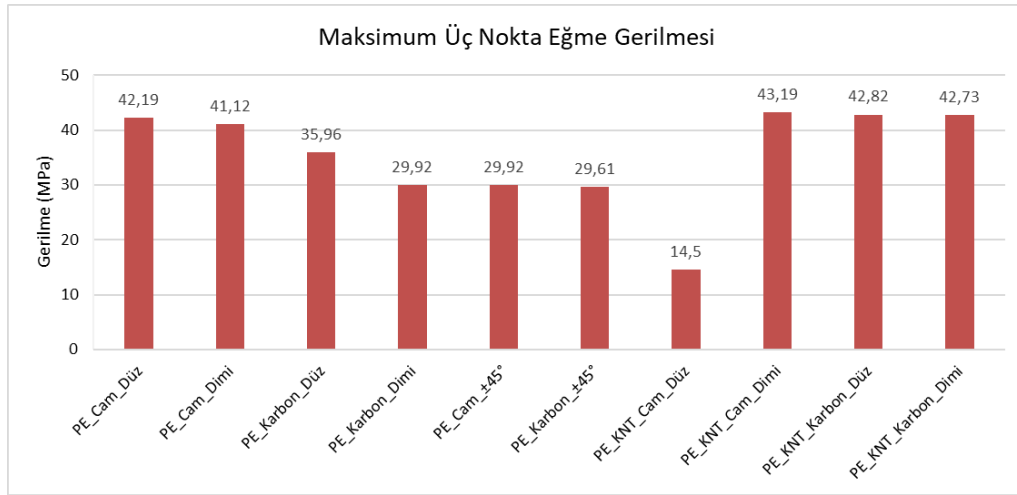
KNT takviyeli PE matrisli kompozit numunelere ait üç nokta eğme test sonuçları değerlendirildiğinde, en yüksek eğilme gerilmesi PE_KNT_Cam_Düz numunesinde elde edilmiştir. Bu numune, 5,21 N maksimum kuvvet ve %2,09 yüzde uzama değeri ile yüksek mukavemet ve süneklik kombinasyonu sunarak mekanik performans açısından öne çıkmaktadır.

Her iki cam elyaf takviyeli numune, KNT katkısıyla birlikte hem eğilme dayanımı hem de şekil değiştirme kapasitesi bakımından başarılı sonuçlar vermiştir. Karbon elyaf takviyeli numuneler daha rijit ancak daha gevrek bir davranış sergilemiştir. Özellikle PE_KNT_Karbon_Düz, yüksek eğilme gerilmesine ulaşmasına rağmen düşük uzama kapasitesi nedeniyle kırılma anında ani bir deformasyon göstermiştir. PE_KNT_Karbon_Dimi ise hem gerilme hem de uzama açısından en düşük performansı sunmuştur.

Bu sonuçlar, cam elyafın KNT ile kullanıldığında PE matris içinde daha etkin bir takviye görevi gördüğünü ortaya koymaktadır. Buna karşılık, karbon elyaf takviyesi daha sınırlı deformasyon kapasitesine sahiptir ve özellikle dimi dokuma yapısıyla birlikte bu

kısıt daha da belirginleşmektedir. Özellikle düz dokuma cam elyaf yapısı, KNT takviyesiyle birlikte eğilme yükü altında en iyi mekanik performansı sergilemiştir.

Farklı elyaf türleri, dokuma yapıları ve KNT takviyesi dikkate alınarak üretilmiş kompozit numunelerin üç nokta eğme testi sonucunda elde edilen maksimum gerilme değerlerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23. Maksimum eğilme gerilmesi karşılaştırması

Sunulan veriler incelendiğinde, en yüksek eğilme gerilmesi değeri, yaklaşık 43,19 MPa ile PE_KNT_Cam_Düz numunesinde elde edilmiştir. Bu sonuç, cam elyafın düz dokuma yapısıyla birlikte kullanıldığında, KNT takviyesi ile sinerjik bir etki oluşturarak PE matris içinde eğilme altında en etkin mekanik performansı sağladığını göstermektedir.

KNT takviyesi, özellikle cam elyaf takviyeli numunelerde eğilme dayanımını belirgin şekilde artırmıştır. Örneğin, PE_Cam_Düz (42,19 MPa) ile PE_KNT_Cam_Düz (43,19 MPa) arasındaki artış küçük olsa da PE_Cam_Dimi (41,12 MPa) ile PE_KNT_Cam_Dimi (42,82 MPa) arasındaki fark daha belirgindir. Bu durum, KNT'nin özellikle dimi dokuma yapılarla etkileşiminde daha etkili bir mekanik katkı sağladığını düşündürmektedir.

PE_Karbon_±45° en düşük eğilme gerilmesine (~14,50 MPa) ulaşmış ve bu numune, KNT katkısı bulunmasa da yapısal olarak eğilme altındaki en zayıf performansı sergilemiştir. Bu durum, karbon elyafın gevrek yapısının ve ±45° oryantasyonunun eğilme yükü altında düşük yük taşıma verimi ile ilişkili olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, karbon elyaf takviyeli numuneler genel olarak daha düşük deformasyon kapasitesiyle daha rijit ancak daha kırılğan bir yapı sergilerken, cam elyaf

takviyeli numuneler hem süneklik hem de dayanım açısından daha dengeli sonuçlar vermiştir. Ayrıca düz dokuma yapılar, dimi dokumalara göre genel olarak daha yüksek eğilme gerilmesi sunarak, yük yönüyle lif sürekliliği arasındaki ilişkinin performansa doğrudan yansıdığını ortaya koymuştur.

4.3. Shore-D Testi Sonuçları

Üretilen kompozit numunelerin yüzey sertliği, Shore-D sertlik testi kullanılarak değerlendirilmiştir. Her bir numune için beş ayrı ölçüm gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçların ortalamaları Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

Çizelge 4.5. KNT takviyesiz numunelerin Shore-D testi sonuçları

Numune	Numune Varyantlarının Ortalaması					Genel Ortalama
	1	2	3	4	5	
1 - (PE_Cam_Düz)	65	62	64	63	63	63,4
2 - (PE_Cam_Dimi)	65	64	63	63	65	64,0
3 - (PE_Karbon_Düz)	65	67	66	65	66	65,8
4 - (PE_Karbon_Dimi)	67	65	65	67	66	66,0
5 - (PE_Cam_±45°)	58	59	57	58	59	58,2
6 - (PE_Karbon_±45°)	59	59	60	60	61	59,8

Sonuçlar incelendiğinde, karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin, cam elyaf takviyeli kompozitlere kıyasla daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, karbon elyafların yüksek elastisite modülü ve yapısal rijitliği sayesinde kompozit matrisin daha sert bir davranış sergilemesine neden olmasıyla açıklanabilir. Karbon elyaf takviyesinin, polimer matrisin deformasyona karşı gösterdiği direnci artırarak sertlik değerlerini yükselttiği anlaşılmaktadır.

Dimi dokuma kumaşlarla üretilen numuneler, düz dokuma kumaşlarla göre daha yüksek sertlik değerleri göstermiştir. Bu farklılık, dimi dokuma yapısının daha sıkı ve düzenli lif yerleşimi sunarak kompozit içinde daha etkin bir yük transferi sağlamasına bağlanabilir.

En düşük sertlik değerleri ise $\pm 45^\circ$ elyaf oryantasyonuna sahip numunelerde gözlemlenmiştir. Bu sonuç, elyafların yük taşıma eksenine eğik yönde yerleşmesi ve örgü mesafeleri nedeniyle yüzeyde etkili bir rijitlik sağlayamamasından kaynaklanmaktadır. Liflerin çapraz yerleşimi, yük altındaki yapısal deformasyonlara karşı direnci azaltmakta ve bu da yüzey sertliğinin düşmesine neden olmaktadır.

KNT takviyeli numunelere ait yüzey sertlik sonuçları sunulmuştur (Çizelge 4.6). Shore-D yöntemiyle gerçekleştirilen bu ölçümler, KNT takviyesinin PE matrisli kompozit malzemelerin yüzey sertliği üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla yapılmıştır.

Çizelge 4.6. KNT takviyeli numunelerin Shore-D testi sonuçları

Numune	Numune Varyantlarının Ortalaması					Genel Ortalama
	1	2	3	4	5	
7 - (PE_KNT_Cam_Düz)	66	63	62	63	64	63,6
8 - (PE_KNT_Cam_Dimi)	64	66	65	63	63	64,2
9 - (PE_KNT_Karbon_Düz)	65	67	66	67	65	66,0
10 - (PE_KNT_Karbon_Dimi)	68	66	67	66	67	66,8

Sonuçlar incelendiğinde, karbon nanotüp takviyesinin polietilen matrisli kompozit malzemelerin yüzey sertliğini genel olarak olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Elde edilen verilere göre, KNT takviyesi cam elyaf takviyeli düz dokuma kompozitlerde sertliği %0,32'lik bir artışla 63,4'ten 63,6'ya, dimi dokuma kompozitlerde ise %0,31'lik bir artışla 64'ten 64,2'ye yükseltmiştir. Bu artışlar sınırlı düzeyde olsa da pozitif yönde bir değişimi ortaya koymaktadır.

Karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerde düz dokuma yapıda sertlik değerini %31'lik bir artışla 65,8'den 66'ya, dimi dokuma yapıdaki numunede %1,21'lik bir artışla 66'dan 66,8'e yükselerek daha belirgin bir artış göstermiştir. Özellikle PE_KNT_Karbon_Dimi numunesindeki bu artış, KNT takviyesinin yüzey sertliği üzerindeki etkisini ve dokuma tipiyle olan etkileşimini açıkça ortaya koymaktadır.

Bu bulgular literatürdeki çalışmalarla uyum göstermektedir. Karbon nanotüplerin yüksek elastisite modülü (~1 TPa) ve üstün mekanik özellikleri nedeniyle polimer matris içerisinde güçlendirici ajan olarak etki göstermesi beklenen bir durumdur (Thostenson vd., 2005). Benzer şekilde, Kumar ve arkadaşları, polietilen matrise %0,05-0,1 ağırlık oranında KNT takviyesiyle %3-%45 arasında değişen sertlik artışları elde etmişlerdir (Manoj Kumar et al., 2015). Bu bağlamda, mevcut çalışmada gözlemlenen sınırlı sertlik artışı, hibrit takviye sisteminin varlığıyla ilişkilendirilebilir. Nitekim Rafiee ve arkadaşlarının belirttiği üzere, hibrit sistemlerde KNT'lerin elyaf-matris arayüzeyinde lokalize olması, sertlik artışını sınırlayabilmektedir (Rafiee vd., 2010).

Sertlikteki en belirgin artışın dimi dokuma karbon elyaf takviyeli numunede gözlenmesi, bu dokuma yapısının KNT'lerin matris içinde daha homojen dağılmasına

imkan tanınmasıyla açıklanabilir. Dime dokuma yapısının üç boyutlu örgü geometrisi, KNT'lerin lifler arasındaki boşluklara daha etkin şekilde yerleşmesine ve yük transfer mekanizmasının daha verimli işlemesine olanak sunmaktadır. Bu bağlamda, KNT'lerin matris içerisindeki dağılım homojenliği, yüzey sertliği gibi özellikler üzerinde belirleyici bir parametre olarak ön plana çıkmaktadır (Thostenson vd., 2001).

Son olarak, sertlik artışının sınırlı kalmasının bir diğer olası nedeni de KNT konsantrasyonunun düşük tutulmuş olmasıdır. Yapılan bir çalışmada, %0,5'in altındaki KNT oranlarında sertlik artışı oldukça sınırlı kalmakta; optimum performans için %1-%3 oranlarında katkı önerilmektedir (Ma vd., 2010).

Bu bilgiler ışığında, çalışmada kullanılan KNT oranı dikkate alındığında gözlemlenen sonuçlar beklenen aralıkta değerlendirilebilir.

4.4.Hidroşekillendirme Testi Sonuçları

Bu çalışma kapsamında, geliştirilen kompozit malzemelerin şekillendirilebilirlik özelliklerini değerlendirmek amacıyla hidroşekillendirme testleri gerçekleştirilmiştir. Ancak mevcut işlem parametreleri (basınç, şekillendirme hızı, sıcaklık vb.) altında yapılan uygulamalarda, hedeflenen şekillendirme başarı düzeyine tam olarak ulaşılamamıştır. Elde edilen bulgular, test edilen kompozit yapıların söz konusu koşullarda sınırlı şekil alma kabiliyeti sergilediğini göstermektedir.

Malzemenin deformasyon davranışı sırasında gözlemlenen sınırlı plastisite, yerel çatlak oluşumları ve olası arayüzey zayıflıkları, hidroşekillendirme başarımını etkileyen faktörler arasında değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, farklı işlem parametreleri, alternatif kalıp geometrileri veya destekleyici ön işlemlerle birlikte bu malzemelerin şekillendirilebilirliğinin daha etkin şekilde test edilmesi mümkündür.

Sonuç olarak, hidroşekillendirme testleri kapsamında elde edilen ilk bulgular, mevcut koşullarda sınırlı başarı göstermiştir. Ancak bu durum, kompozit malzemelerin söz konusu işlem yöntemiyle tamamen uyumsuz olduğunu göstermemekte; aksine, daha kapsamlı parametre optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır. Deney sürecine ilişkin detaylı bulgular ve gözlemler EK-1'de sunulmuştur.



















4.5. Erichsen Şekillendirme Testi Sonuçları

Kompozit numunelerin şekillendirilebilirlik özelliklerini değerlendirmek amacıyla uygulanan Erichsen şekillendirme testi, polimer matrisli yapıların makroskobik deformasyon davranışlarını incelemek açısından önemli bir yöntemdir. Bu test aracılığıyla, kompozitlerin plastik deformasyon kapasitesi ve form verme yetenekleri gözlemlenmiş; özellikle malzemenin çok eksenli gerilme koşullarına verdiği tepkiler analiz edilmiştir. Testin uygulanmasının ardından, her numunenin ön yüzeyinden makroskobik görüntüler elde edilmiş ve bu görüntüler üzerinden deformasyon izleri, çatlama eğilimleri ve hasar bölgeleri analiz edilmiştir.

Bu bağlamda gerçekleştirilen Erichsen şekillendirme testleri, PE matrisli kompozit malzemelerin çeşitli takviye elemanları ile oluşturduğu yapıların şekillendirilebilirlik performanslarını karşılaştırmalı biçimde inceleme fırsatı sunmuştur. Altı farklı numune tipine (düz ve dimi dokuma cam elyaf, düz ve dimi dokuma karbon elyaf, $\pm 45^\circ$ oryantasyonlu cam ve $\pm 45^\circ$ oryantasyonlu karbon elyaf takviyeli PE matrisli kompozitler) uygulanan testler, malzeme karakterizasyonu açısından önemli bulgular ortaya koymuştur.

Şekil 4.24, farklı takviye türlerine ve dokuma yapılarına sahip numunelerin test sonrası yüzey görüntüleri sunulmuştur. Bu görseller, kompozit sistemlerin şekillendirme sürecine verdiği tepkilerin niteliksel olarak değerlendirilmesine katkı sağlamakta ve özellikle çatlak oluşum bölgeleri ile deformasyon dağılımlarının anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.

Şekillendirme prosesi sırasında uygulanan yük ve sıcaklık etkisiyle kompozit malzemelerde meydana gelen geometrik değişimler, farklı deformasyon davranışlarının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Elde edilen yüzey görüntüleri, yalnızca nicel test verilerinin ötesinde, malzemelerin şekillendirme karakteristiklerini görsel olarak değerlendirmeye olanak sağlamıştır.

Numune Kodu	Ön Yüzey Görüntüleri		
	1	2	3
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Şekil 4.24. KNT takviyesiz numunelerin Erichsen şekillendirme testi sonrası görüntüleri

Elde edilen mikroyapısal gözlemler hem takviye malzemesinin türünün hem de dokuma geometrisinin şekillendirilebilirlik üzerinde belirleyici etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Cam elyaf takviyeli numuneler, karbon elyaf takviyeli numunelere kıyasla daha homojen ve kontrollü bir deformasyon davranışı sergilemiştir. Bu durum, cam elyafın daha sünek karakteri sayesinde matrisle daha iyi bir deformasyon uyumu

göstermesiyle açıklanabilir. Özellikle $\pm 45^\circ$ oryantasyona sahip cam elyaf takviyeli numune (Numune 5), tüm gruplar arasında en yüksek şekillendirilebilirlik performansını sergilemiştir.

Dokuma geometrisinin etkisi değerlendirildiğinde, $\pm 45^\circ$ açılı dokuma yapılarının düz ve dimi dokumalara kıyasla çok eksenli deformasyon koşullarına daha uygun bir yapı sunduğu görülmüştür. Bu elyaf oryantasyonu sayesinde, malzeme yükleme sırasında gerilimi farklı yönlere yayarak daha fazla enerji absorbe edebilmekte ve daha geniş bir deformasyon aralığına ulaşabilmektedir.

Çizelge 4.7, Erichsen şekillendirme testi sonucunda elde edilen bulguların ortalama değerlerini içermekte olup, farklı takviye elemanlarına ve dokuma yapılarına sahip deney numunelerinin şekillendirilebilirlik performanslarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Çizelge 4.7. KNT takviyesiz numunelerin Erichsen şekillendirme testi sonuçları

Numune Kodu	Maksimum Kuvvet (N)	Kubbe Yüksekliği (mm)
1 - (PE_Cam_Düz)	786,98	6,39
2 - (PE_Cam_Dimi)	1207,54	6,43
3 - (PE_Karbon_Düz)	4193,51	8,47
4 - (PE_Karbon_Dimi)	4317,50	8,94
5 - (PE_Cam_±45°)	730,94	4,33
6 - (PE_Karbon_±45°)	3306,93	7,91

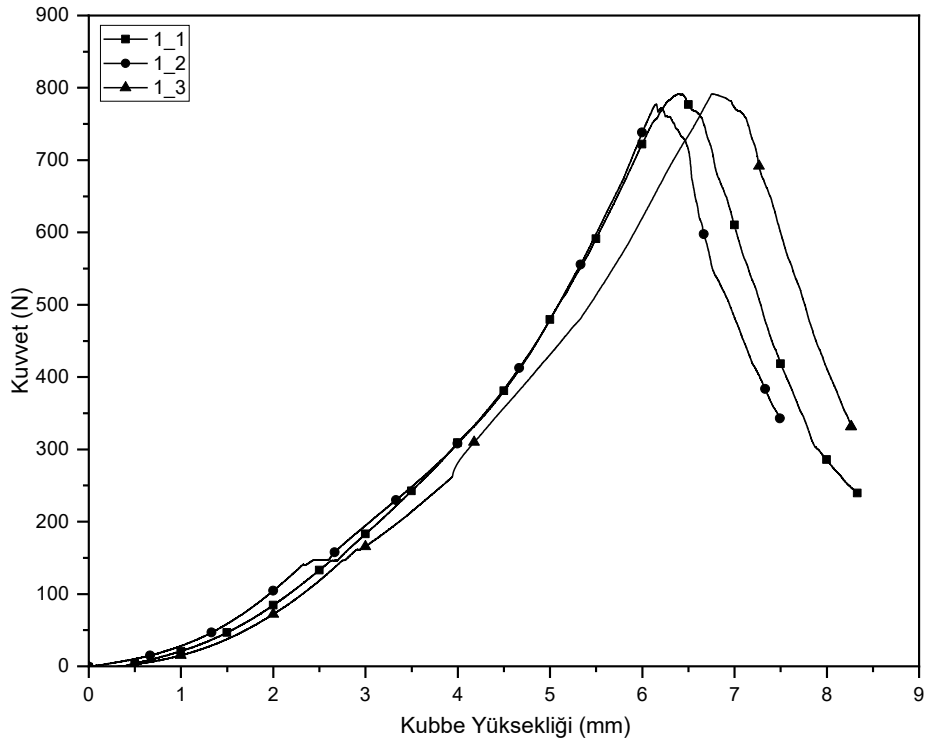
Çizelge 4.7 incelendiğinde, dimi dokuma karbon elyaf takviyeli kompozit numune (Numune 4), 4317,50 N ile en yüksek şekillendirme kuvvetini sergilemiş ve şekillendirme direnci bakımından öne çıkmıştır. Bu numuneyi, 4193,51 N değerine ulaşan düz dokuma karbon elyaf takviyeli kompozit (Numune 3) takip etmiştir. Elde edilen bu veriler, karbon elyaf takviyesinin cam elyafa kıyasla kompozit sistemlerin şekillendirme direncini belirgin şekilde artırdığını göstermektedir.

Şekillendirme derinliği açısından değerlendirildiğinde, karbon elyaf takviyeli numunelerin yaklaşık 8,4-8,9 mm aralığında yer değiştirme göstererek en yüksek deformasyon kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Buna karşın, cam elyaf takviyeli sistemler daha düşük şekillendirme derinlikleriyle öne çıkmıştır. Özellikle $\pm 45^\circ$ oryantasyona sahip cam elyaf takviyeli kompozit (Numune 5), yalnızca 4,33 mm şekillendirme derinliği ile en düşük deformasyon değerini göstermiştir. Aynı

oryantasyona sahip karbon elyaf takviyeli kompozit (Numune 6) ise 7,91 mm'lik bir şekillendirme derinliğine ulaşarak hem elyaf türünün hem de elyaf oryantasyonunun şekillendirilebilirlik üzerinde önemli etkileri olduğunu ortaya koymuştur.

Ayrıca arayüzey morfolojisine dair gözlemler, PE matris ile takviye elyaflar arasındaki etkileşimin şekillendirilebilirlik performansını doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur. Cam elyaf takviyeli numunelerde, yüksek deformasyon kapasitesi ve daha düşük hasar eğilimi, elyaf-matris arayüzey uyumunun ve mekanik kilitlenmenin daha başarılı olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, karbon elyaf takviyeli numunelerde gözlemlenen lokal gerilim yoğunlukları ve heterojen deformasyon alanları, şekillendirme sınırlarının daha düşük seviyede kalmasına yol açmıştır.

Şekil 4.25, düz dokuma cam elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozite ait Erichsen şekillendirme testi kuvvet-kubbe yüksekliği eğrilerini içermektedir.

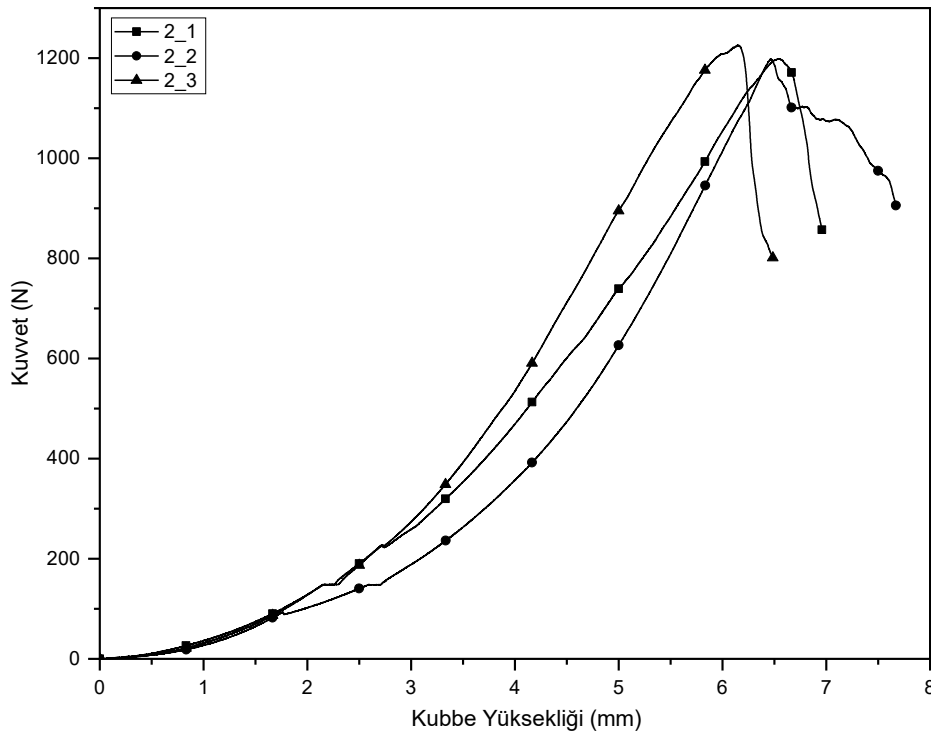


Şekil 4.25. Numune 1 (PE_Cam_Düz)'e ait kuvvet-kubbe yüksekliği eğrileri

Sunulan PE_Cam_Düz numunesine ait kuvvet-kubbe yüksekliği eğrileri incelendiğinde, numunelerin yaklaşık 700-780 N aralığında maksimum kuvvet değerlerine ulaştığı gözlemlenmektedir. Bu maksimum kuvvetler, 6-6,5 mm kubbe yüksekliği aralığında meydana gelmiş olup, malzemenin şekillendirme sırasında ortaya koyduğu yük taşıma kapasitesine ilişkin önemli veriler sunmaktadır.

Eğrilerin başlangıç bölgesinde, yaklaşık 0-3 mm yer değiştirme aralığında, elastik deformasyonun baskın olduğu bir süreç izlenmektedir. Bu bölgeyi takip eden 3-6 mm aralığında ise, daha belirgin ve lineer bir yük-deformasyon ilişkisi gözlemlenmekte; bu da numunenin şekillendirme kuvvetlerine karşı yapısal bütünlüğünü koruduğunu göstermektedir. Ancak 6 mm sonrasında malzemenin maksimum dayanımına ulaştığı ve bu noktada hasar mekanizmalarının devreye girdiği anlaşılmaktadır. Bu aşamada, gerilme bir anda düşerek malzemede çatlama veya kırılma gibi yapısal bozulmaların başladığına işaret etmektedir.

Şekil 4.26, dimi dokuma karbon elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozite ait Erichsen şekillendirme testi kuvvet-kubbe yüksekliği eğrilerini içermektedir.

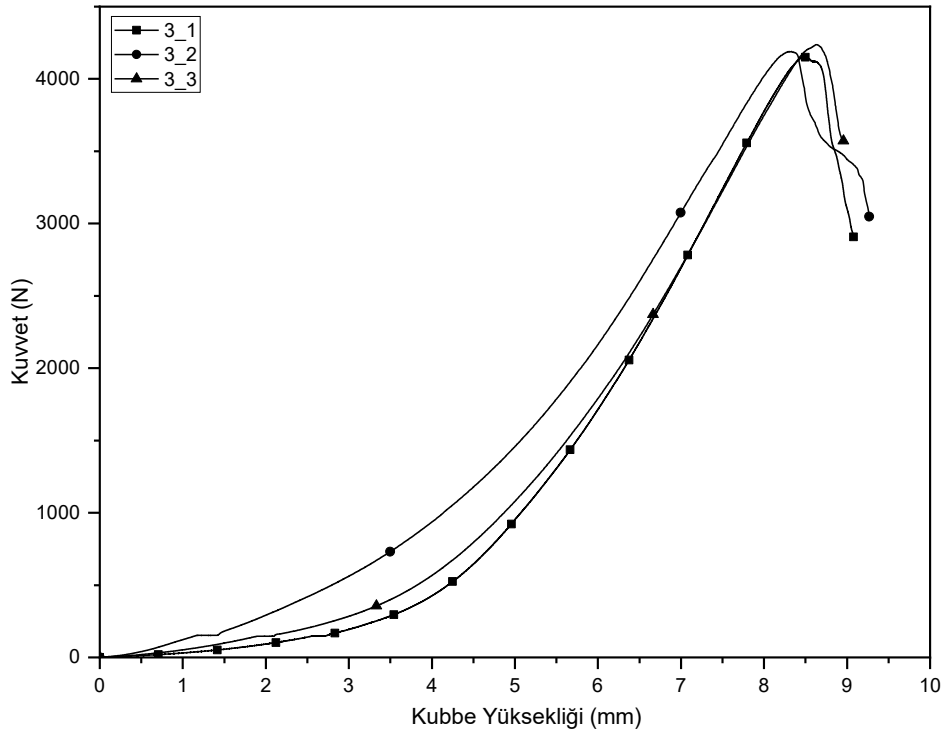


Şekil 4.26. Numune 2 (PE_Cam_Dimi)'ye ait kuvvet- kubbe yüksekliği eğrileri

PE_Cam_Dimi numunesine ait kuvvet-kubbe yüksekliği eğrileri incelendiğinde, test edilen üç numunenin yaklaşık 1150-1220 N aralığında maksimum kuvvet değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu kuvvet tepe noktaları, yaklaşık 6-7,5 mm kubbe yüksekliği aralığında gerçekleşmiş olup, malzemenin şekillendirme sürecinde yüksek yük taşıma kapasitesi sergilediğini göstermektedir. Eğrilerin ilk kısmında, 0-3 mm yer değiştirme aralığında, numuneler non-lineer elastik bir davranış ortaya koymuş; bu da başlangıçta yapı içerisinde yük dağılımının tam olarak oturmadığını veya arayüzeyde mikro

mekanizmaların devreye girdiğini düşündürmektedir. 3-6 mm aralığında eğriler daha belirgin bir lineer artış göstermiştir. Bu bölge, elyafların ve matrisin birlikte etkili bir şekilde yük taşıdığı şekillendirme sürecinin aktif bölgesini temsil etmektedir. 6 mm sonrasında malzeme maksimum dayanım seviyesine ulaşmış ve bu noktadan sonra hasar mekanizmaları devreye girerek, gerilme düşüşüyle birlikte yapısal bozulmalar başlamıştır.

Şekil 4.27, düz dokuma karbon elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozite ait Erichsen şekillendirme testi kuvvet-kubbe yüksekliği eğrilerini içermektedir.



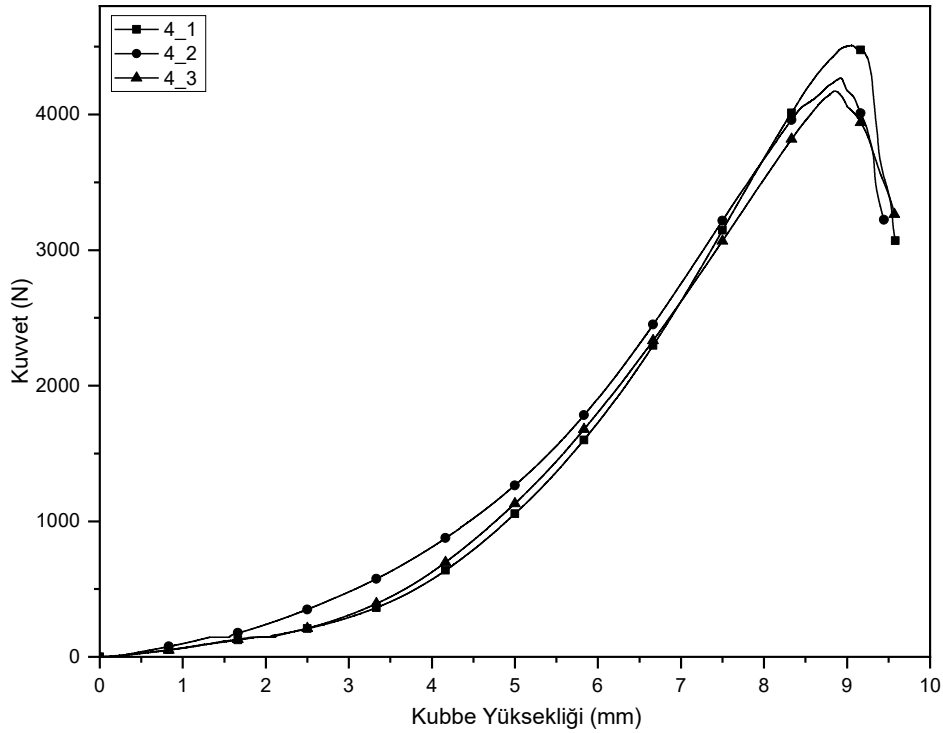
Şekil 4.27. Numune 3 (PE_Karbon_Düz)'e ait kuvvet- kubbe yüksekliği eğrileri

PE_Karbon_Düz numunelerine ait kuvvet-kubbe yüksekliği eğrileri incelendiğinde, her üç test numunesinde de benzer deformasyon eğilimlerinin gözlemlendiği ve oldukça tutarlı mekanik tepkiler elde edildiği görülmektedir. Numuneler, yaklaşık 3800-4200 N aralığında maksimum kuvvet değerlerine ulaşmış; bu değerler, cam elyaf takviyeli sistemlere kıyasla sırasıyla yaklaşık 5 kat (Numune 1) ve 3,5 kat (Numune 2) daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, karbon elyafların PE matris içinde sağladığı yüksek mukavemetin açık bir göstergesidir.

Eğrilerin başında, elastik bölgede görece daha yavaş bir kuvvet artışı gözlemlenmiş; ancak bu artış, deformasyon ilerledikçe hızlanarak yaklaşık 8-10 mm

kubbe yüksekliği değerine ulaşmıştır. Bu durum, malzemenin yalnızca yüksek değerde yükleri taşıyabildiğini değil, aynı zamanda daha derin şekillendirme seviyelerine de dayanabildiğini ortaya koymaktadır. Tepe noktasından sonraki aşamada, kuvvet değerlerinde kademeli bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu bölge, genellikle matris çatlakları, elyaf-matris arayüzey ayrılmaları ve kısmi elyaf kırılmaları gibi içsel hasar mekanizmalarının devreye girdiği safhayı temsil etmektedir. Kuvvet düşüşünün ani değil, daha yumuşak eğilimli olması, karbon elyaf takviyeli bu kompozit sistemin yüksek enerji absorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

şekil 4.28, dimi dokuma karbon elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozite ait Erichsen şekillendirme testi kuvvet-kubbe yüksekliği eğrilerini içermektedir.

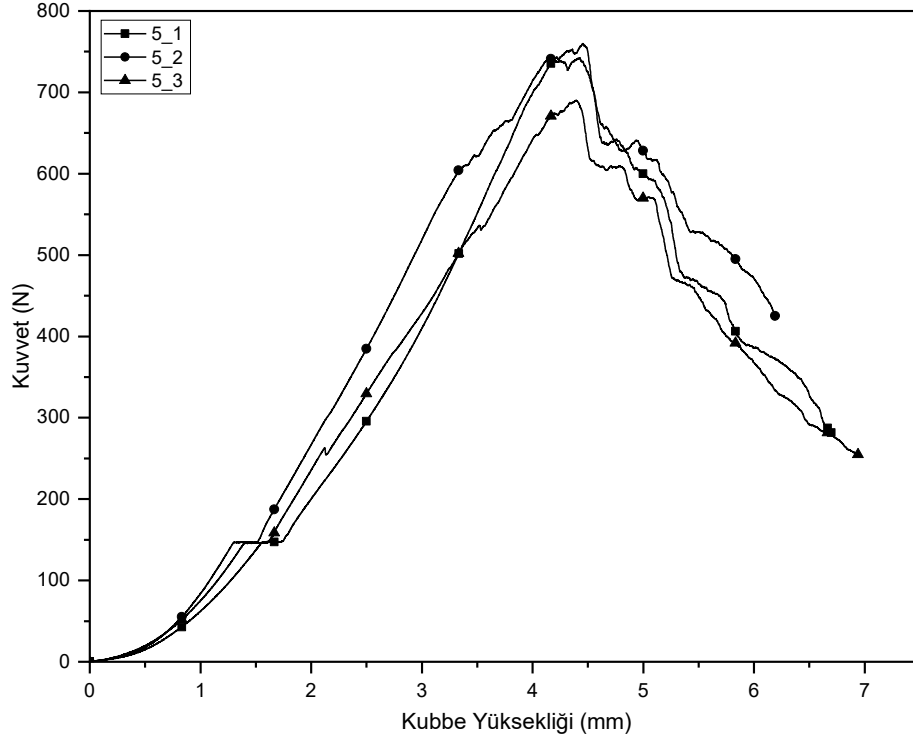


şekil 4.28. Numune 4 (PE_Karbon_Dimi)'e ait kuvvet- kubbe yüksekliği eğrileri

PE_Karbon_Dimi numunesine ait kuvvet-kubbe yüksekliği eğrileri, üç tekrarın tümünde yüksek tutarlılıkla benzer mekanik davranış sergilemiştir. Eğriler, yaklaşık 4100-4400 N aralığında maksimum kuvvet değerlerine ulaşmakta; bu tepe noktaları yaklaşık 9-9,5 mm kubbe yüksekliği seviyelerinde gerçekteşmektedir. Maksimum kuvvetten sonra gözlemlenen kademeli düşüş, yapısal bütünlüğün aniden değil, kontrollü bir şekilde bozulduğunu ve hasar mekanizmalarının (matris çatlaması, elyaf ayrılması, mikroyapısal kırılmalar) aşamalı olarak devreye girdiğini düşündürmektedir.

PE_Karbon_Düz (Numune 3) ile karşılaştırıldığında, dimi dokuma yapısına sahip PE_Karbon_Dimi (Numune 4), benzer maksimum kuvvet seviyelerine ulaşmasına rağmen, daha stabil ve öngörülebilir bir deformasyon sergilemiştir.

Şekil 4.29, $\pm 45^\circ$ yönlenmeli cam elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozite ait Erichsen şekillendirme testi kuvvet-kubbe yüksekliği eğrilerini içermektedir.



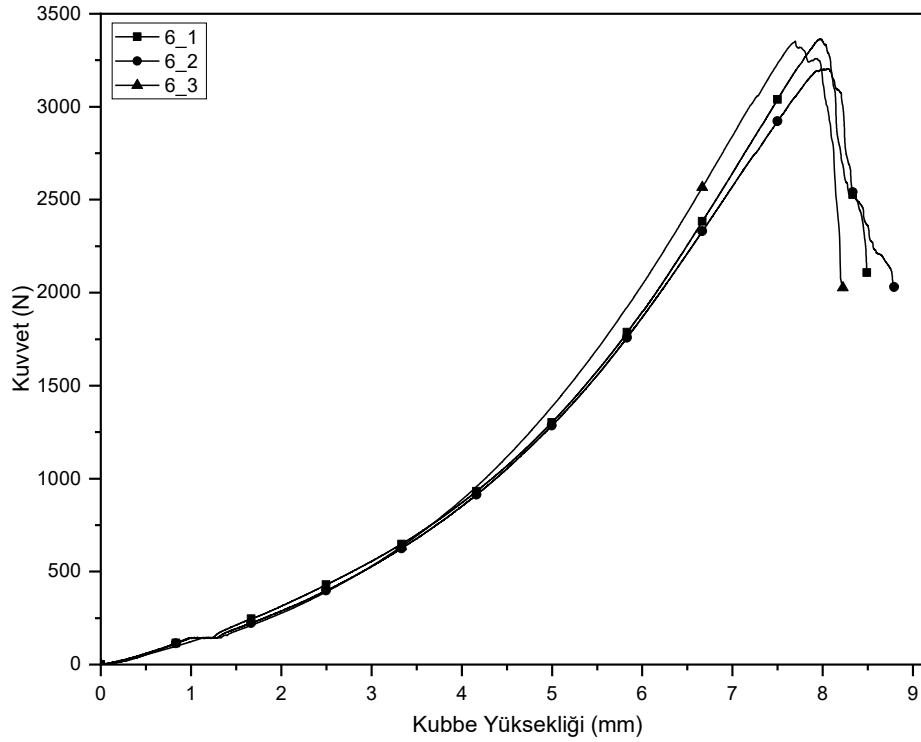
Şekil 4.29. Numune 5 (PE_Cam_±45)'e ait kuvvet- kubbe yüksekliği eğrileri

PE_Cam_±45° takviyeli kompozit numuneye ait kuvvet-kubbe yüksekliği eğrileri, üç test boyunca oldukça tutarlı ve benzer deformasyon profilleri ortaya koymuştur. Eğriler incelendiğinde, başlangıçta düşük eğimli bir kuvvet artışı görülmekte, ardından yaklaşık 4-4,5 mm kubbe yüksekliği seviyesinde 670-750 N aralığında maksimum kuvvet değerlerine ulaşılmaktadır. Bu aşama, kompozit malzemenin yük taşıma kapasitesini temsil ederken, deformasyon sürecindeki mekanik direncin genel düzeyini de ortaya koymaktadır. 1,5-4 mm arasındaki deformasyon seviyelerinde eğrilerin lineer karakter sergilemesi, bu yönlenmenin belirli aralıklarda daha dengeli ve öngörülebilir bir davranış sağladığını göstermektedir.

Maksimum kuvvet sonrası gözlemlenen kademeli kuvvet düşüşleri, yapısal hasarların ani değil, aşamalı olarak geliştiğini göstermektedir. Özellikle 5_1 ve 5_2 numunelerinde fark edilen küçük dalgalanmalar, matris çatlaması, elyaf-matris bağ

kopmaları ve mikro düzeyde lif ayrılmaları gibi karmaşık hasar mekanizmalarının devreye girdiğini düşündürmektedir.

Şekil 4.30, $\pm 45^\circ$ yönlenmeli karbon elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozite ait Erichsen şekillendirme testi kuvvet-kubbe yüksekliği eğrilerini içermektedir.



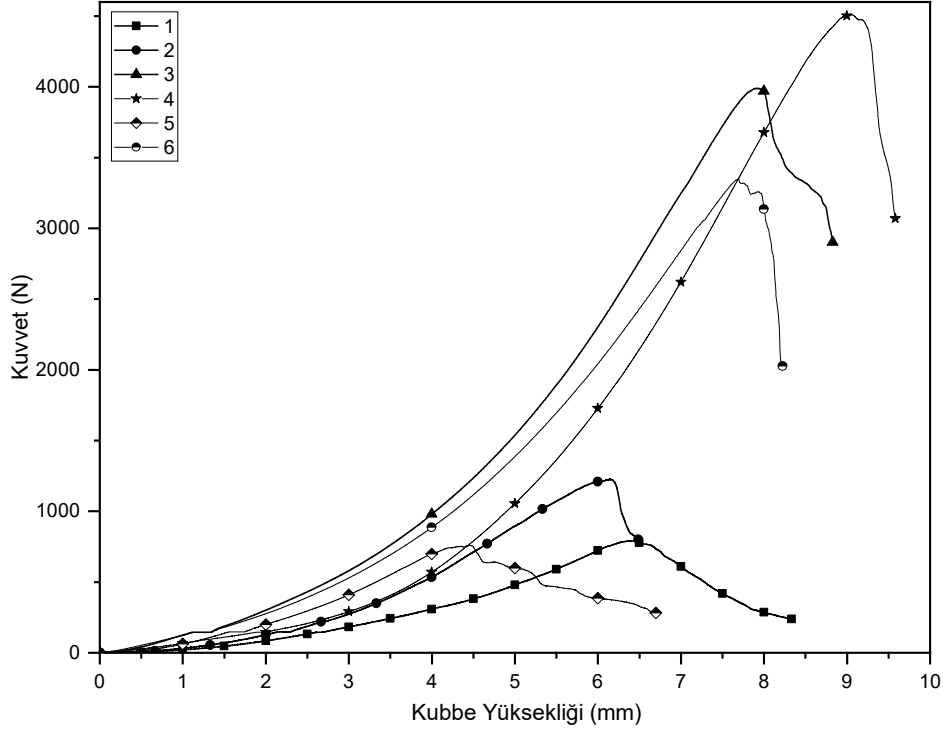
Şekil 4.30. Numune 6 (PE_Karbon_±45°)'ya ait kuvvet-kubbe yüksekliği eğrileri

PE_Karbon_±45° numunesine ait üç test tekrarı incelendiğinde, eğrilerde genel deformasyon eğilimlerinin birbirine oldukça yakın olduğu ve yüksek düzeyde tekrarlanabilirlik sergilendiği görülmektedir. Her üç numune de yaklaşık 3200-3400 N aralığında maksimum kuvvet değerine ulaşmış ve bu değerler, yaklaşık 7,5-8,5 mm kubbe yüksekliği seviyelerinde gerçekleşmiştir. Bu veriler, özellikle cam elyaf takviyeli aynı elyaf oryantasyonuna sahip kompozit numuneye (PE_Cam_±45°) kıyasla çok daha yüksek şekillendirme direnci ortaya koymakta; karbon elyaf takviyesinin kompozit yapıya sağladığı yüksek mukavemet katkısını açıkça göstermektedir.

Bununla birlikte, ulaşılan yüksek maksimum kuvvet ve uzama seviyeleri, PE_Karbon_±45° numunesinin yüksek şekillendirme kuvvetlerine direnç gösterebildiğini ve özellikle yüksek dayanım gerektiren uygulamalar için uygun olabileceğini ortaya koymaktadır. Ancak bu tür kompozit yapıların, ani kırılma eğilimi

ve sınırlı enerji absorpsiyon karakteristiği nedeniyle darbe sonrası davranışlarının dikkatle değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmalıdır.

PE_Cam_Düz, PE_Cam_Dimi, PE_Karbon_Düz, PE_Karbon_Dimi, PE_Cam_±45° ve PE_Karbon_±45° numunelerine ait ortalama kuvvet-kubbe yüksekliği eğrilerini içermektedir (Şekil 4.31).









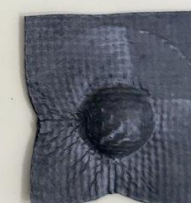





Şekil 4.31. Numune 1 (PE_Cam_Düz), Numune 2 (PE_Cam_Dimi), Numune 3 (PE_Karbon_Düz), Numune 4 (PE_Karbon_Dimi), Numune 5 (PE_Cam_±45°) ve Numune 6 (PE_Karbon_±45°)'ya ait kuvvet-kubbe yüksekliği eğrileri

Grafik incelendiğinde, Erichsen şekillendirme testine tabi tutulan kompozit numunelerin kuvvet–kubbe yüksekliği eğrileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve her numunenin şekillendirme performansında belirgin farklar gözlemlenmiştir. En yüksek şekillendirme kapasitesi, yaklaşık 4400 N maksimum kuvvet ve 9,5 mm kubbe yüksekliği ile Numune 4 (PE_Karbon_Dimi) tarafından sergilenmiştir. Bu, dimi dokuma karbon elyaf takviyeli yapıların hem yüksek dayanım hem de deformasyon kabiliyeti açısından üstün özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, Numune 3 (PE_Karbon_Düz) yaklaşık 4200 N maksimum kuvvet ve 8,5 mm civarındaki kubbe yüksekliği ile dikkat çekerken, bu numunede maksimum noktadan sonra daha keskin bir düşüş görülmüş, bu da malzemenin ani hasara daha yatkın olduğunu göstermiştir.

$\pm 45^\circ$ oryantasyona sahip Numune 6 (PE_Karbon_ $\pm 45^\circ$) yaklaşık 3300 N kuvvet ve 7,9 mm kubbe yüksekliği ile daha düşük mukavemet sunmasına rağmen daha esnek bir deformasyon karakteri göstermiştir. Bu yapı, özellikle kesme yükleri altında liflerin yönelme kabiliyeti sayesinde şekillendirme sırasında daha kontrollü bir davranış sergilemiştir. Numune 2 (PE_Cam_Dimi) yaklaşık 1200 N maksimum kuvvet ve 6,4 mm kubbe yüksekliği ile cam elyaf grubundaki en iyi performansı sunmuştur. Buna karşılık, düz dokuma cam elyaf takviyeli Numune 1 (PE_Cam_Düz) yaklaşık 786 N kuvvet ve benzer şekillendirme derinliği ile daha zayıf bir direnç sergilemiştir. Özellikle $\pm 45^\circ$ oryantasyonuna sahip Numune 5 (PE_Cam_ $\pm 45^\circ$) yalnızca 730 N maksimum kuvvet ve 4,3 mm gibi en düşük kubbe yüksekliği ile en sınırlı şekillendirilebilirlik performansına sahip olmuştur.

Şekil 4.32, KNT takviyeli numunelerin Erichsen şekillendirme testi sonrası makroskobik yüzey görüntülerini içermektedir.

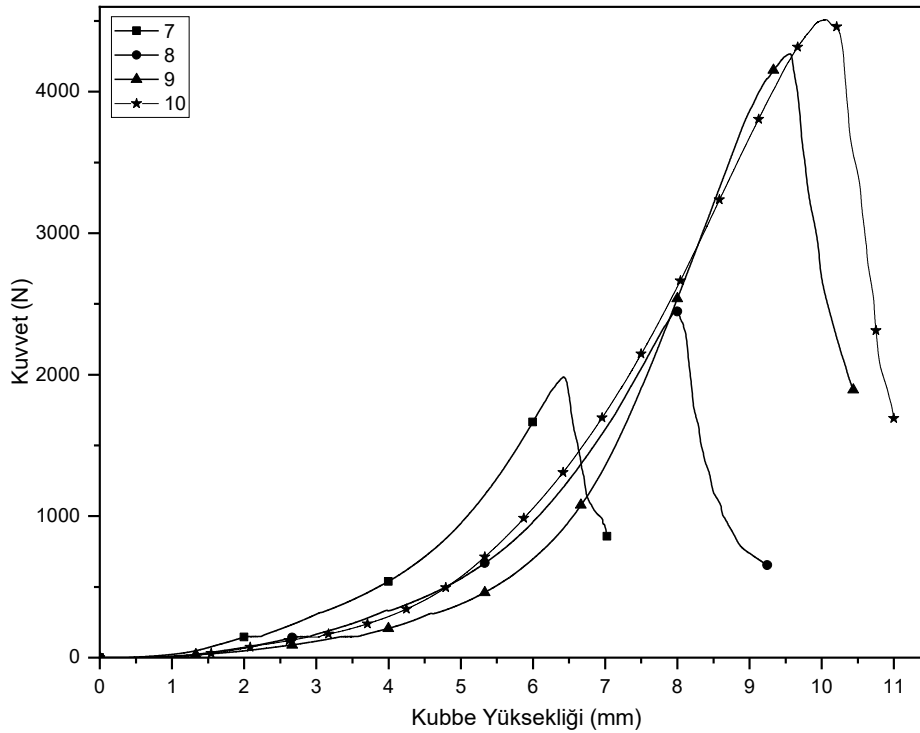
Numune Kodu	Ön Yüzey Görüntüleri		
	1	2	3
7			
8			
9			
10			

Şekil 4.32. KNT takviyeli numuneleri Erichsen şekillendirme testi sonrası görüntüleri

Erichsen şekillendirme testi sonuçları (Çizelge 4.8 ve Şekil 4.33), KNT takviyesinin polietilen matrisli kompozitlerin şekillendirme davranışı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı biçimde değerlendirme imkanı sunmaktadır.

Çizelge 4.8. KNT takviyeli numunelerin Erichsen şekillendirme testi sonuçları

Numune Kodu	Maksimum Kuvvet (N)	Kubbe Yüksekliği (mm)
7 - (PE_KNT_Cam_Düz)	1982,81	6,43
8 - (PE_KNT_Cam_Dimi)	2450,94	7,98
9 - (PE_KNT_Karbon_Düz)	4268,13	9,56
10 - (PE_KNT_Karbon_Dimi)	4509,38	10,05



Şekil 4.33. 7 (PE_KNT_Cam_Düz), 8 (PE_KNT_Cam_Dimi), 9 (PE_KNT_Karbon_Düz) ve 10 (PE_KNT_Karbon_Dimi)'a ait kuvvet-kubbe yüksekliği eğrileri

Elde edilen bulgular, KNT takviyesinin hem maksimum şekillendirme kuvveti hem de kubbe yüksekliği açısından genellikle olumlu bir katkı sağladığını göstermektedir.

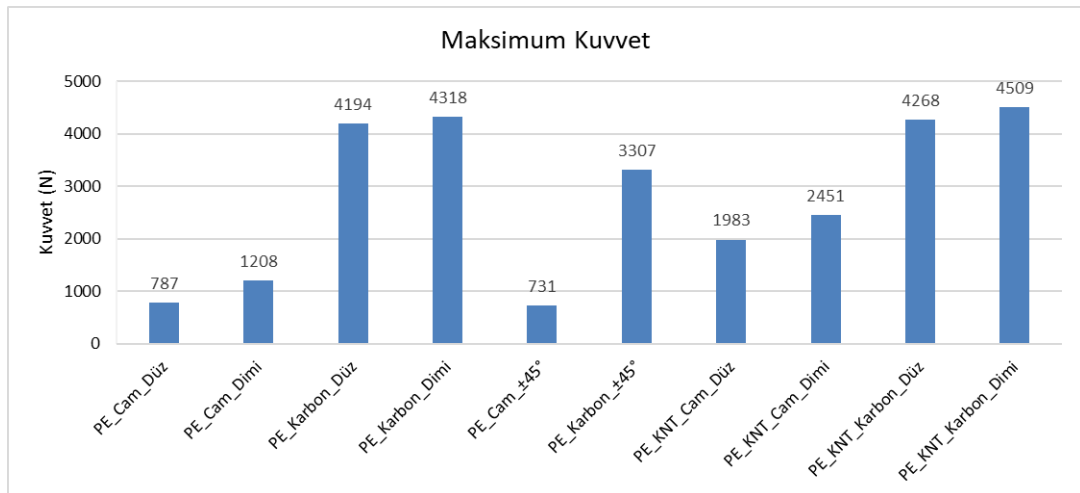
Maksimum kuvvet değerleri açısından, Numune 9 ve 10, Numune 7 ve 8'e kıyasla anlamlı bir üstünlük sergilemiştir. Özellikle Numune 10 yaklaşık 4509,38 N maksimum kuvvet ve 10,05 mm kubbe yüksekliği ile en yüksek şekillendirilebilirlik performansını

ortaya koymuştur. Bu durum, karbon elyafın yüksek mekanik dayanımı ile KNT'lerin nano boyutta arayüzey iyileştirici etkisinin sinerjik bir kombinasyon oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Kubbe yüksekliği parametresi açısından değerlendirildiğinde, tüm numuneler benzer genel eğilimler gösterse de karbon elyaf takviyeli kompozitlerde eğrilerin daha dik bir artış gösterdiği ve daha yüksek kubbe yüksekliklerine ulaşıldığı dikkat çekmektedir. Cam elyaf takviyeli kompozitlerde ise bu artış daha sınırlı kalmış, özellikle düz dokuma yapıda maksimum kuvvet daha düşük seviyede gerçekleşmiştir. Bu bulgular, karbon nanotüp takviyesinin sadece yapısal dayanımı değil, aynı zamanda plastik deformasyon kapasitesini de artırdığını ve bu etkinin elyaf türü ve dokuma geometrisi ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, KNT ile takviye edilmiş karbon elyaf-dimi dokuma kombinasyonu, PE matrisli kompozitlerde şekillendirme performansını en üst düzeye çıkarmış ve malzeme tasarımında çok boyutlu takviye sistemlerinin önemini bir kez daha vurgulamıştır. Bu yapıların hem yüksek şekillendirme mukavemeti hem de gelişmiş deformasyon yeteneği sunmaları sayesinde, ileri mühendislik uygulamalarında güçlü adaylar oldukları değerlendirilmektedir.

KNT takviyesiyle üretilmiş kompozit numunelerin Erichsen şekillendirme testinden elde edilen maksimum kuvvet değerlerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir (Şekil 4.34).



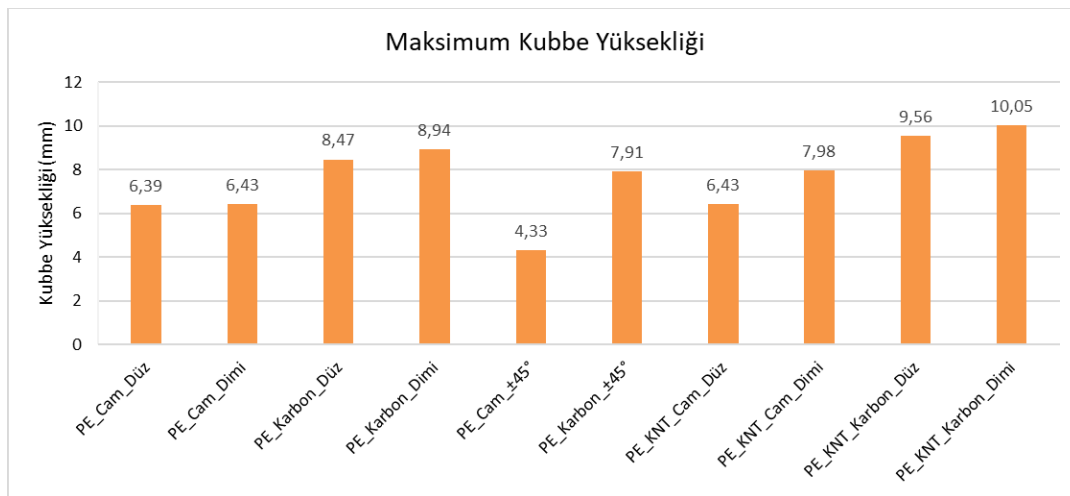
Şekil 4.34. Maksimum kuvvet karşılaştırması

Şekil 4.34 incelendiğinde, karbon nanotüp takviyesinin hem karbon hem de cam elyaf takviyeli kompozitlerde maksimum kuvvet değerlerini artırdığı gözlemlenmektedir. En yüksek maksimum kuvvet değeri PE_KNT_Karbon_Dimi numunesinde (4509,38 N) elde edilmiştir. Bu değeri 4268,13 N ile PE_KNT_Karbon_Düz ve 4317,5 N değeri ile PE_Karbon_Dimi numuneleri takip etmektedir. Bu veriler, karbon elyaf takviyesinin, cam elyaf takviyesine kıyasla açık şekilde daha yüksek şekillendirme mukavemeti sağladığını göstermektedir. Cam elyaf takviyeli numunelerde en yüksek değere, 2450,94 N ile PE_KNT_Cam_Dimi numunesi ulaşmıştır.

Düz dokuma karbon elyaf kompozitlerde maksimum kuvvet %1,78 ve dimi dokuma karbon elyaf kompozitlerde yaklaşık %4,42 oranında iyileşme kaydedilmiştir. Cam elyaf takviyeli kompozitlerde karbon nanotüp etkisi değerlendirildiğinde, düz dokuma cam elyaf kompozitlerinde maksimum kuvvetin yaklaşık %152 oranında bir artış sergilediği tespit edilmiştir. Dimi dokuma cam elyaf kompozitlerinde yaklaşık %103 oranında iyileşme göstermiştir.

Dikkat çeken bir diğer bulgu ise, $\pm 45^\circ$ elyaf oryantasyonuna sahip numunelerde gözlenen düşük maksimum kuvvet değerleridir. PE_Cam_ $\pm 45^\circ$ numunesi yalnızca 730,94 N, PE_Karbon_ $\pm 45^\circ$ numunesi ise 3306,93 N maksimum kuvvet göstermiştir. Bu durum, açılı yerleşimin yük taşıma kapasitesini sınırladığına işaret etmektedir.

KNT takviyesiyle üretilmiş kompozit numunelerin Erichsen şekillendirme testinden elde edilen maksimum kubbe yüksekliği değerlerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir (Şekil 4.35).



Şekil 4.35. Maksimum kubbe yüksekliği karşılaştırması

Grafik incelendiğinde, en yüksek kubbe yüksekliği değerinin PE_KNT_Karbon_Dimi numunesine ait olduğu (10,05 mm) görülmektedir. Bunu sırasıyla PE_KNT_Karbon_Düz (9,56 mm) ve PE_KNT_Cam_Dimi (7,98 mm) numuneleri takip etmektedir.

$\pm 45^\circ$ oryantasyona sahip cam elyaf takviyeli kompozit numune (PE_Cam_ $\pm 45^\circ$), 4,33 mm ile en düşük şekillendirme kabiliyetini göstermiştir. Bu sonuç, açılı lif yerleşiminin aksenel yük transferini sınırlandırarak plastik deformasyon kapasitesini azaltabileceğini göstermektedir. Buna karşılık, aynı oryantasyona sahip karbon elyaf takviyeli numune (PE_Karbon_ $\pm 45^\circ$), 7,91 mm ile daha iyi bir performans sergilemiştir ve bu durum lif türünün etkisini bir kez daha vurgulamaktadır.

Kubbe yüksekliği değerleri de cam elyaf kompozitlerde karbon nanotüp takviyesi ile şekillendirilebilirlikte kayda değer artışlar gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, Erichsen şekillendirme testi verileri karbon nanotüp takviyesinin kompozit malzemelerin şekillendirilebilirlik performansına olan katkısını net bir şekilde kanıtlamıştır. Bu bulgular, endüstriyel şekillendirme proseslerinde karbon nanotüp takviyeli kompozitlerin üstün performans potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymakta ve gelişmiş kompozit malzeme tasarımında bu teknolojinin stratejik önemini vurgulamaktadır. Elde edilen veriler, literatürde KNT takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin gelişimine dair yapılan çalışmalarla uyum göstermektedir (Jian ve Gaofeng, 2024; Sun vd., 2024).

4.6. SEM Görüntüleri

Çekme ve Erichsen şekillendirme testleri sonrasında, kompozit malzemelerin hasar oluşum süreçlerinin daha derinlemesine anlaşılması amacıyla taramalı elektron mikroskobu analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, numunelerde meydana gelen kırılma mekanizmalarının mikroyapısal düzeyde incelenmesine olanak sağlamış ve özellikle arayüzey davranışları, elyaf-matris etkileşimi ve hasar morfolojisi hakkında önemli bulgular sunmuştur.

Kompozit malzemelerin hasarının en temel nedenlerinden biri, elyaf ile matris arasındaki arayüzey bağının yetersizliğidir. SEM görüntüleri, bu zayıf bağların kırılma davranışına nasıl yansıdığını açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Arayüzey bağının zayıflaması kendisini matris çatlakları, elyaf kırılmaları ve elyaf-matris ayrılması gibi farklı biçimlerde ortaya koymaktadır. Literatürde de ifade edildiği gibi, yetersiz

ıslanabilirlik matris ile elyaf arasında zayıf bağların oluşmasına ve sonuç olarak da mekanik dayanımın azalmasına yol açmaktadır (Beura vd., 2019).

SEM analizleri, sadece malzemenin hasar sonrası morfolojisini ortaya koymakla kalmamakta, aynı zamanda takviye elyaf-matris uyumluluğunun iyileştirilmesi için ileri yüzey modifikasyonları veya arayüzey iyileştirici katkı maddelerinin gerekliliğine dair de önemli ipuçları sunmaktadır. Bu bağlamda elde edilen mikroskobik bulgular, kompozit tasarım sürecine yönelik anlamlı bir temel teşkil etmektedir.

Şekil 4.36, çekme testi uygulanan deney numunelerine ait örnek SEM numune görsellerini içermektedir.



Şekil 4.36. SEM görüntüsü alınan örnek çekme testi numune görüntüleri

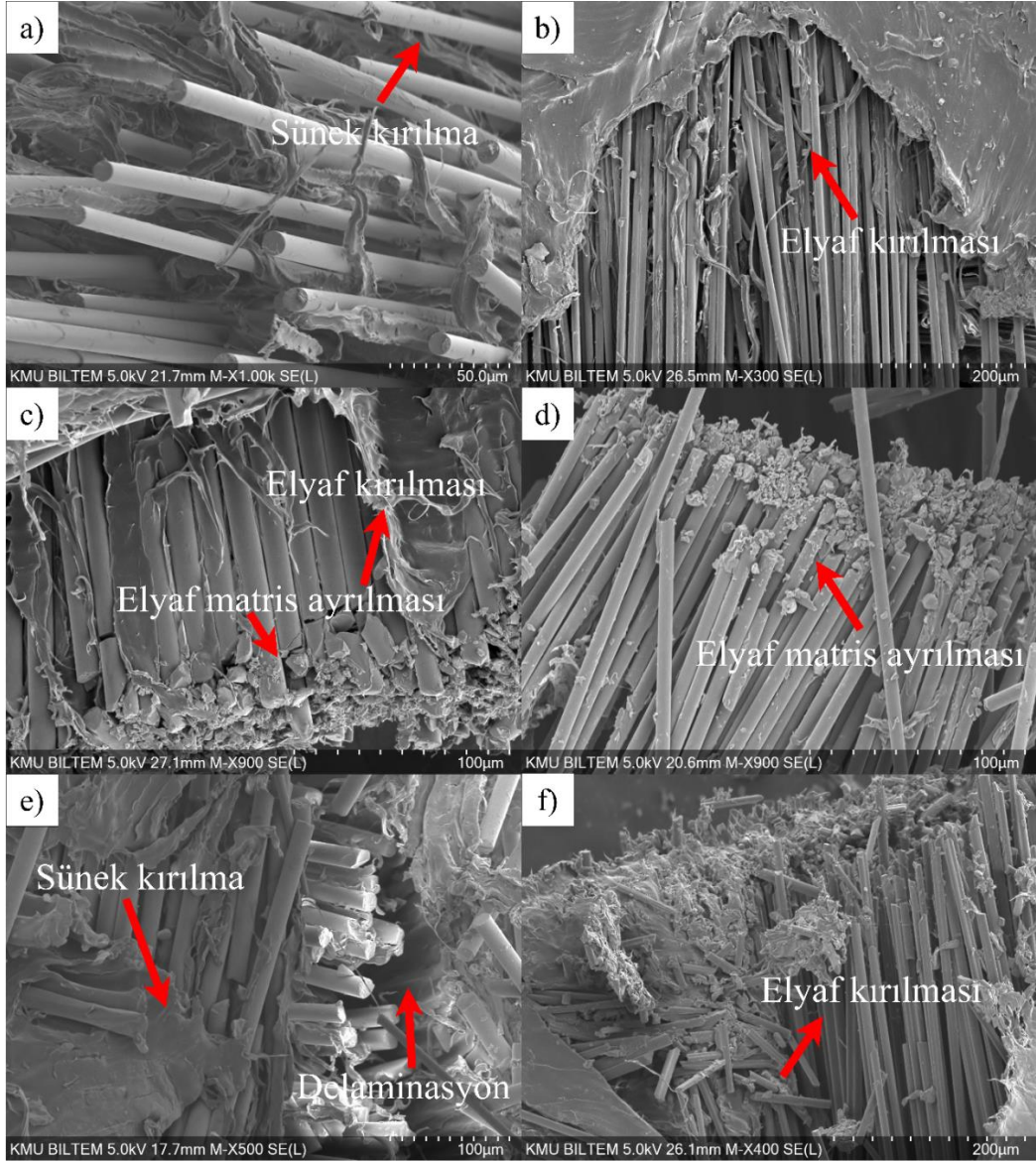
Şekil 4.37, Erichsen şekillendirme testi uygulanan deney numunelerine ait örnek SEM numune görsellerini içermektedir.



Şekil 4.37. SEM görüntüsü alınan örnek Erichsen testi numune görüntüleri

Görseller, farklı takviye elyaf türleri ve dokuma yapılarının, hasar davranışına olan etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirme imkanı sunmaktadır.

Şekil 4.38, çekme testi yapılan KNT takviyesiz numunelerin kırık yüzeylerine ait SEM görüntülerini sunmaktadır.

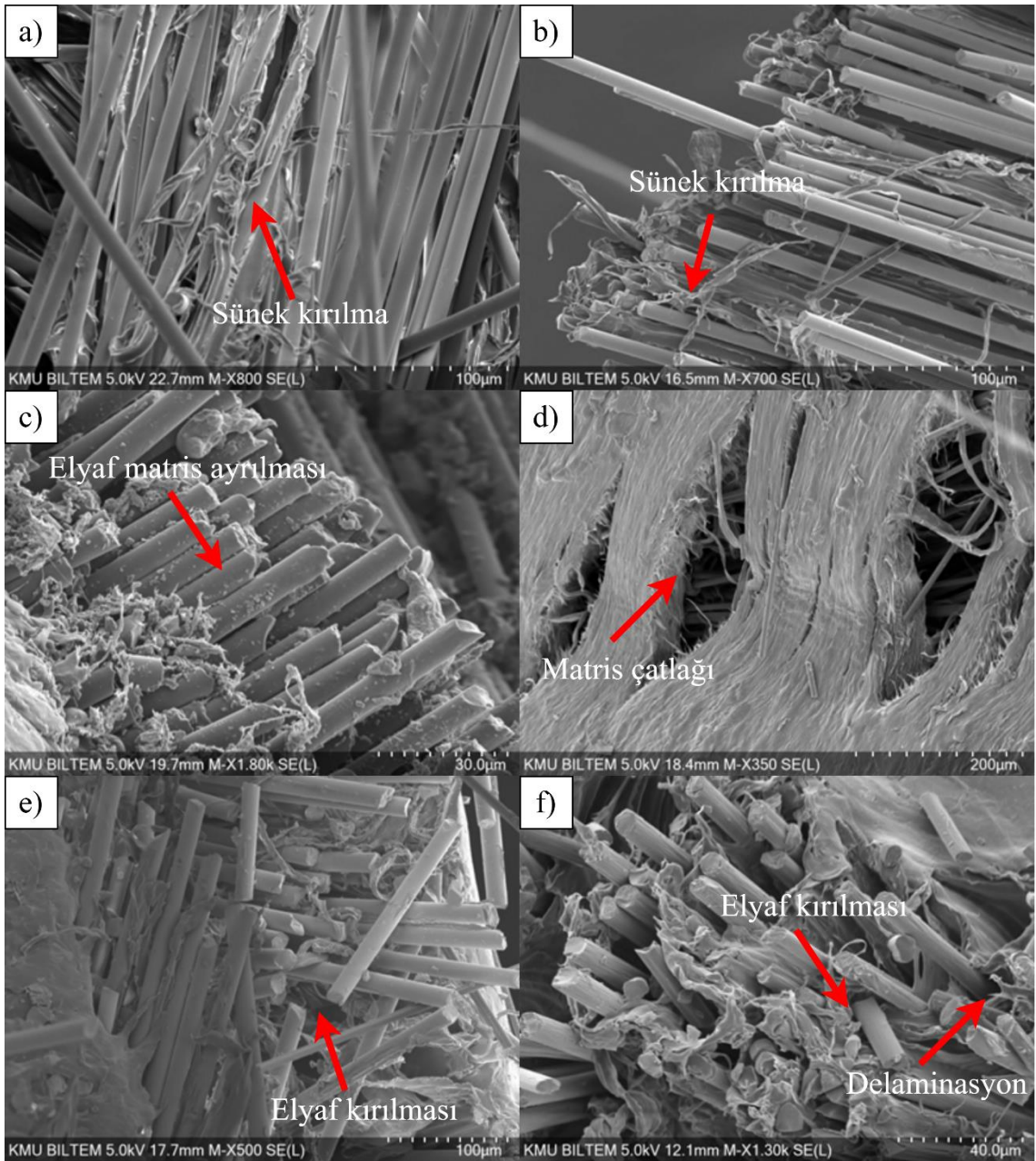


Şekil 4.38. Çekme testi sonrası numunelerin SEM görüntüleri a) PE_Cam_Düz, b) PE_Cam_Dimi, c) PE_Karbon_Düz, d) PE_Karbon_Dimi, e) PE_Cam_±45° ve f) PE_Karbon_±45°

Şekilde sunulan SEM görüntüleri, polietilen matrisli elyaf takviyeli kompozit numunelere uygulanan çekme testi sonrası oluşan kırılma morfolojilerini detaylı biçimde ortaya koymaktadır. Elde edilen görüntüler, sünek kırılma, elyaf kırılması, elyaf-matris ayrılması ve delaminasyon gibi tipik hasar mekanizmalarını içermektedir. PE matrisin termoplastik yapısı, malzemenin belirli seviyelere kadar sünek deformasyon kapasitesi sergilemesini sağlamaktadır. Özellikle görüntü (a) ve (e)'de görülen yırtılma ve uzama izleri, matrisin viskoelastik karakterine bağlı olarak gelişen sünek kırılma davranışını ortaya koymaktadır.

Görüntü (b), (c), (d) ve (f)'de açıkça gözlemlenen elyaf kırılması ve elyaf-matris ayrılması, arayüzey bağ kalitesinin mekanik performans üzerindeki belirleyici rolünü

göstermektedir. Elyafların tek eksenli çekme yükü altında ani olarak kopması, bu bölgenin yük taşıma kapasitesinin aşıldığını ve enerjinin büyük kısmının lifler üzerinde yoğunlaştığını göstermektedir. Elyaf-matris ayrılmaları ise, genellikle zayıf ıslanma, düşük kimyasal uyum veya arayüzey yapışmasının yetersiz olması sonucu meydana gelir (Thostenson vd., 2005). Bu tür ayrılmalar, yük aktarımını kesintiye uğratarak çatlak ilerlemesini hızlandırmaktadır. Şekil 4.39, Erichsen şekillendirme testi yapılan KNT takviyesiz numunelerin kırık yüzeylerine ait SEM görüntülerini içermektedir.



Şekil 4.39. Erichsen şekillendirme testi sonrası numunelerin SEM görüntüleri a) PE_Cam_Düz, b) PE_Cam_Dimi, c) PE_Karbon_Düz, d) PE_Karbon_Dimi, e) PE_Cam_±45° ve f) PE_Karbon_±45°

Şekil 4.39 incelendiğinde, Erichsen şekillendirme testi sonrası PE matrisli kompozit numunelerde gelişen hasar mekanizmalarını mikroyapısal düzeyde ortaya koymaktadır. Görsellerde yaygın olarak gözlemlenen sünek kırılma, polietilen matrisin viskoelastik doğasına bağlanmakta olup, şekillendirme sırasında bir miktar enerji sönümlenme kapasitesi sağladığı anlaşılmaktadır.

PE matrisin düşük yüzey enerjisi ve polar olmayan yapısı, özellikle cam elyaflarda arayüzey adezyonunu sınırlamaktadır. Cam elyaf takviyeli kompozit numunelerde özellikle elyaf-matris arayüzünde zayıf yapışma (adhezyon) gözlemlenmiştir. Bu durum, literatürde yaygın olarak gözlemlenen polietilen bazlı kompozitlerde arayüzey problemleriyle tutarlıdır (Beura vd., 2019).

Bununla birlikte, özellikle karbon elyaf takviyeli numunelerde elyaf kırılması, matris çatlağı ve delaminasyon gibi gevrek karakterli hasarlar öne çıkmaktadır. Bu tür hasarlar, karbon elyafların yüksek rijitliği nedeniyle yük aktarımı sırasında oluşan gerilme yoğunluklarına bağlanabilir. Özellikle $\pm 45^\circ$ oryantasyona sahip sistemlerde, çok eksenli gerilme koşulları altında tabakalar arası delaminasyon eğilimi belirgin hale gelmiştir.

Elyaf ve matris arasındaki arayüzey adezyonu, kompozit malzemelerin fiziksel, mekanik ve termal özelliklerini etkileyen en kritik faktörlerden biridir. Bu durum, (c) numaralı görüntüde açıkça görülen ‘elyaf matris ayrılması’ şeklinde kendini göstermektedir. Elyaf ile matris arasındaki yeterli bağlanmanın sağlanamaması, yük aktarımının etkili bir şekilde gerçekleşmesini engellemekte ve böylece kompozit yapının mekanik dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir.

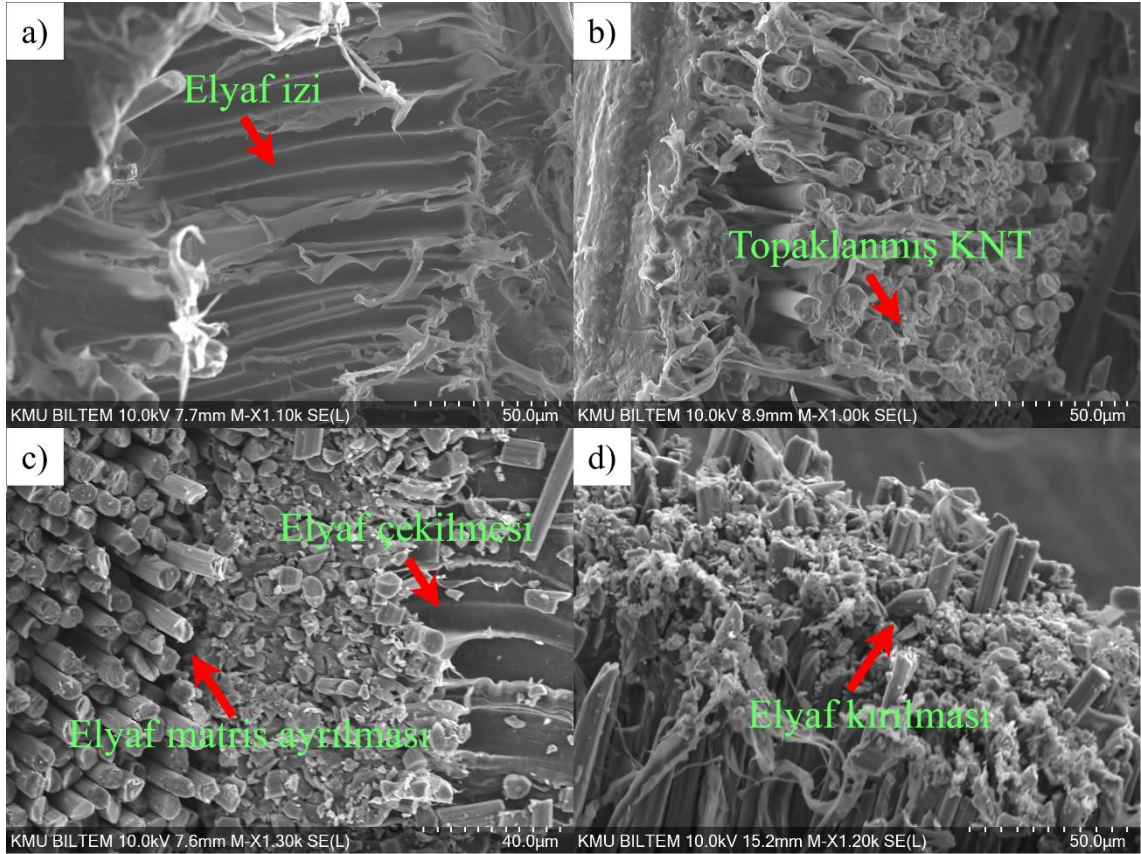
Elyaf kırılma görüntülerindeki keskin yüzeyler, yük transferinin belirli noktalarda yetersiz kaldığını ve gerilme konsantrasyonlarının oluştuğunu göstermektedir. Karbon elyaflarda görülen kırılma yüzeyleri daha düzgün ve keskin iken, cam elyaflarda daha düzensiz kırılma yüzeyleri gözlemlenmektedir. Bu fark, karbon elyafların grafit benzeri katmanlı yapısının belirli düzlemlerde temiz kırılma sağlamasından, cam elyafların amorf yapısının ise daha karmaşık kırılma davranışı sergilemesinden kaynaklanmaktadır.

Çekme testi ve Erichsen şekillendirme testi uygulanan KNT takviyeli numunelere ait örnek SEM numune görsellerini içermektedir (Şekil 4.40).



Şekil 4.40. SEM görüntüsü alınan örnek numune görüntüleri

Çekme ve Erichsen şekillendirme testi uygulanan KNT takviyeli numunelerin kırık yüzeylerine ait SEM görüntülerini sunmaktadır (Şekil 4.41 ve Şekil 4.42).

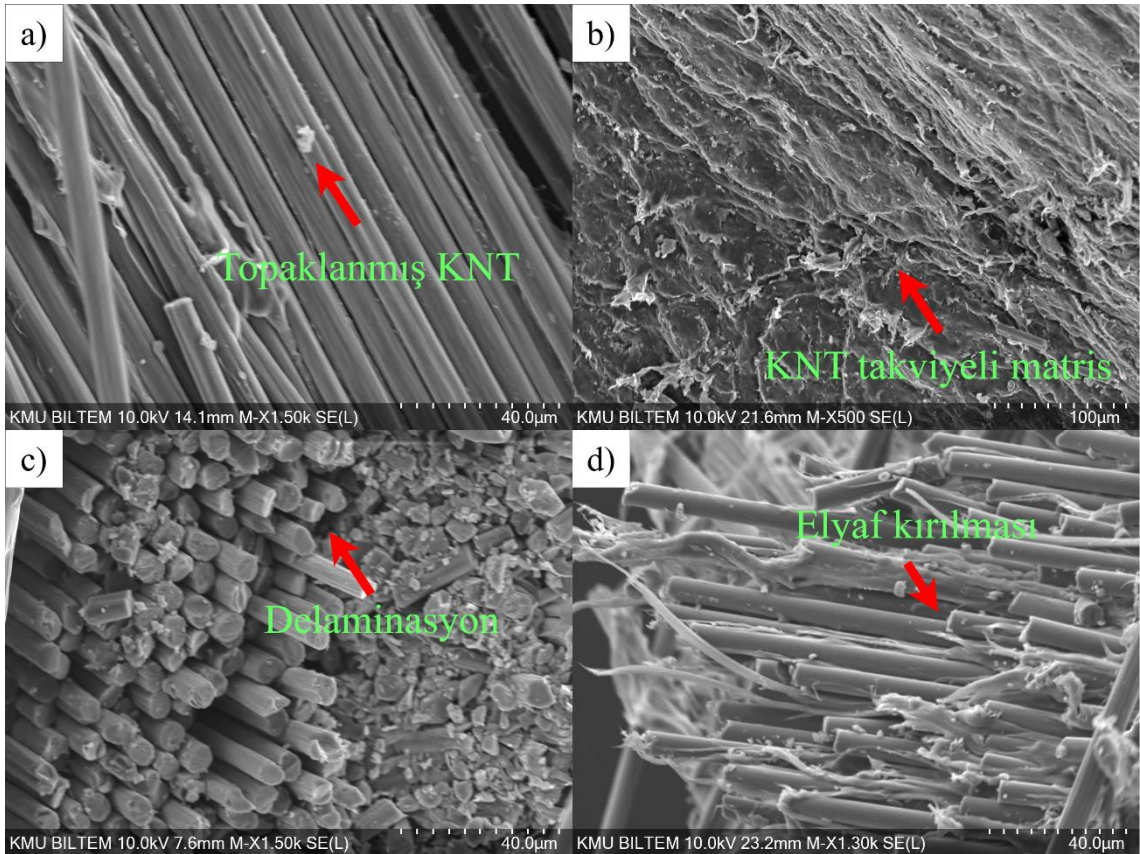


Şekil 4.41. Çekme testi sonrası KNT takviyeli numunelerin SEM görüntüleri a) PE_KNT_Cam_Düz, b) PE_KNT_Cam_Dimi, c) PE_KNT_Karbon_Düz ve d) PE_KNT_Karbon_Dimi

Karbon nanotüp takviyeli cam/karbon elyaf takviyeli polietilen matrisli termoplastik kompozitlerin çekme testi sonrası SEM kırılma yüzeylerinde, literatürde rapor edilen çok boyutlu hasar mekanizmalarının tipik örneklerini içermektedir. Şekilde gözlemlenen elyaf çekilmesi, elyaf-matris ayrılması ve elyaf kırılması, KNT'lerin çatlak

ilerlemesini yavaşlatıcı etkisiyle birlikte değerlendirildiğinde, arayüzey bağının iyileştiğini göstermektedir.

KNT'lerin yüksek çekme dayanımı, yüksek elastisite modülü ve büyük en-boy oranı gibi üstün özellikleri, kompozit sistemde mikro çatlaklar arasında 'köprüleme' etkisi oluşturarak çatlak ilerlemesini sınırlandırmakta ve enerji sönümlenme kapasitesini artırmaktadır. KNT takviyesi olmayan numunelerle karşılaştırıldığında, bu katkı maddesinin kırılma mekanizmaları üzerindeki olumlu etkisi SEM görüntülerinde açık şekilde ortaya konmuştur. Bu bağlamda, KNT'lerin hem matris hem de elyaf-matris arayüzey etkileşimlerini iyileştirerek kompozit performansını çok yönlü olarak artırdığı söylenebilir.



Şekil 4.42. Erichsen şekillendirme testi sonrası KNT takviyeli numunelerin SEM görüntüleri a) PE_KNT_Cam_Düz, b) PE_KNT_Cam_Dimi, c) PE_KNT_Karbon_Düz ve d) PE_KNT_Karbon_Dimi

KNT takviyesi, kompozit malzemelerde arayüzey bağını güçlendirerek çok eksenli gerilme altındaki mekanik dayanımı artırmakta ve aynı zamanda hasar mekanizmalarının gelişim şeklini etkilemektedir. Şekil 4.42.a'da görülen topaklanmış KNT yapıları, nanotüplerin bazı bölgelerde homojen dağılmadığını ve bu lokal yoğunlaşmaların potansiyel hasar başlangıç noktaları olabileceğini göstermektedir. Buna

karşılık, Şekil 4.42.b’de KNT takviyeli matrisin daha düzenli ve homojen bir yapıya sahip olduğu, bu durumun çatlak ilerlemesini geciktiren ve enerji sönmleme kapasitesini artıran bir mikro yapı oluşumuna katkı sağladığı anlaşılmaktadır.

Bu gözlemler, literatürde de belirtildiği üzere, KNT’lerin yalnızca yüksek mekanik özellikleriyle değil, aynı zamanda arayüzey etkileşimlerini iyileştirici etkisiyle de kompozit performansını artırdığını göstermektedir. Ancak, homojen dağılımın sağlanamaması halinde topaklanma bölgeleri çatlak oluşumu ve ilerlemesi açısından zayıf noktalar oluşturabilmektedir (Pandya ve Naik, 2015; Rai vd., 2017). Sonuç olarak, KNT katkısının etkinliğini belirleyen temel faktör, matris içerisindeki dağılım kalitesi ve elyaf-matris arayüzey bütünlüğüdür.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışmasında, polietilen matrisli cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelere KNT takviyesinin mekanik özellikler ve şekillendirilebilirlik üzerindeki etkisi çok yönlü deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Elde edilen bulgular, KNT takviyesinin malzeme performansında anlamlı iyileşmeler sağladığını ortaya koymaktadır.

5.1. Sonuçlar

Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin üstün mukavemet özellikleri sergilediği, buna karşın cam elyaf takviyeli kompozitlerin daha yüksek deformasyon kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, $\pm 45^\circ$ elyaf oryantasyonuna sahip dokuma takviyeli numunelerin, şekillendirilebilirlik ve şekil alabilme kabiliyetlerinin diğer konfigürasyonlara kıyasla önemli ölçüde üstün olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, dokuma tipinin mekanik performans üzerindeki etkisi incelendiğinde, düz dokuma yapısına sahip takviye malzemeleriyle üretilen kompozitlerin, dimi dokuma takviyeli muadillerine nazaran daha düşük gerilme değerleri gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Çekme testi sonuçları değerlendirildiğinde, karbon elyaf takviyeli kompozitlerin cam elyaf takviyeli kompozitlere kıyasla daha yüksek çekme gerilmeleri sunduğu, dimi dokuma yapısının düz dokumaya göre daha iyi performans sağladığı belirlenmiştir. KNT takviyesi ile özellikle PE_KNT_Karbon_Dimi numunesi 240,32 MPa çekme gerilmesi değeri ile en yüksek dayanımı sergilemiştir. Bu değer, en düşük performansı gösteren PE_KNT_Cam_Düz numunesine göre yaklaşık %88,16 daha yüksektir. PE_Karbon_Dimi numunesine göre ise %7,96 daha yüksek çekme gerilmesi değerine sahiptir. Bu sonuç, KNT'lerin matris içerisindeki yük transferini iyileştirmesi ve çatlak ilerlemesini sınırlandırıcı etkisiyle açıklanabilir.

Eğme testi sonuçlarına değerlendirildiğinde, cam elyaf takviyeli düz dokuma yapısına sahip numune (PE_KNT_Cam_Düz), 42,19 MPa'lık eğilme gerilmesi değeri ile tüm numuneler arasında en yüksek performansı göstermiştir. Bu değer, en düşük performansı sergileyen KNT_Karbon_Dimi numunesine kıyasla %14,16 daha yüksektir. PE_Cam_Düz numunesine göre ise eğilme gerilmesi yaklaşık %2,37 daha yüksektir. Ancak KNT katkısıyla karbon elyaf takviyeli kompozitlerin elastik deformasyon

kabiliyetinde görece bir artış olduğu öngörülmektedir. KNT'lerin, özellikle çatlak başlatma ve ilerleme direncini artırarak eğme altında malzeme rijitliğini desteklediği düşünülmektedir. Sonuç olarak, cam elyaf takviyesi ve düz dokuma yapısı, PE matrisli kompozitlerde eğilme dayanımı açısından en etkili kombinasyonu oluşturmuş; buna karşılık karbon elyaf takviyesi ve $\pm 45^\circ$ oryantasyonu ise en düşük eğilme dayanımıyla en zayıf sonucu vermiştir.

Sertlik testlerinde, KNT takviyeli PE_KNT_Karbon_Dimi numunesi 66,8 Shore-D değeri ile en yüksek sertlik değerine ulaşmıştır. Bu değer, en düşük değer olan PE_KNT_Cam_Düz numunesine göre yaklaşık %4,37 oranında daha yüksektir. Dimi dokuma yapısının daha kompakt lif dizilimi sağlaması sayesinde daha rijit yapılar oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, yük taşıma kapasitesinin optimize edilmesini sağlamaktadır.

Erichsen şekillendirme testinde, KNT takviyesi ile tüm numunelerde hem maksimum şekillendirme kuvveti hem de kubbe yüksekliğinde artış elde edilmiştir. PE_KNT_Karbon_Dimi numunesi, 4509,38 N maksimum kuvvet ve 10,05 mm kubbe yüksekliği ile en iyi şekillendirilebilirlik değerlerini sergilemiştir. Bu numune, en düşük değerlere sahip PE_KNT_Cam_Düz'e göre sırasıyla %127,39 daha fazla kuvvet ve %56,28 daha fazla kubbe yüksekliği değerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar, karbon nanotüplerin yüksek en-boy oranı, matrisle oluşturduğu etkin arayüzey etkileşimi ve deformasyon sırasında çatlak ilerlemesini engelleyici yapısıyla ilişkilendirilebilir.

SEM analizleri, matrisin sünek karakteristiği ve arayüzey adezyonunun mekanik performans üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymuştur. Cam elyaf takviyeli numunelerde elyaf-matris ayrılması yaygın görülürken, karbon elyafli sistemlerde kırılma, daha net elyaf kopmaları ve delaminasyon şeklinde gelişmiştir. KNT takviyeli sistemlerde bu ayrışmaların daha az belirgin olduğu, KNT'lerin arayüzey dayanımını artırdığı ve çatlak ilerlemesini bastırdığı literatür ışığında değerlendirilmiştir.

Savunma sanayinde, havacılık ve otomobil endüstrisinde yaygın olarak kullanılan karbon nanotüp takviyeli kompozit malzemelerde Erichsen test metoduyla şekillendirilebilirlik özelliklerinin araştırılmasına yönelik literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu doktora tez çalışmasında gerçekleştirilen çekme, üç nokta eğme, sertlik ve Erichsen şekillendirme testleri ile elde edilen kapsamlı mekanik karakterizasyon sonuçlarının, bu alanda var olan literatür boşluğunu dolduracağı ve gelecekte yapılacak çalışmalara önemli bir katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Karbon nanotüp takviyesinin şekillendirilebilirlik üzerindeki bu olumlu etkisi, nanoboyuttaki karbon nanotüplerin matris içerisinde homojen dağılım göstererek plastik deformasyon sırasında yük transferini iyileştirmesi ve çatlak yayılımını engelleyen bir mekanizma oluşturmasıyla açıklanabilir. Ayrıca karbon nanotüplerin yüksek en-boy oranı ve üstün mekanik özellikleri sayesinde kompozit yapının genel dayanımını artırarak daha yüksek şekillendirme kuvvetlerine dayanım göstermesini sağladığı düşünülmektedir.

5.2. Öneriler

Bu doktora tez çalışması, kompozit malzeme tasarımında kullanılan test yöntemleri ile yükleme tiplerinin, malzeme davranışını anlamada kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Malzemenin gerçek hizmet koşullarındaki yüklemelere benzer koşullarda test edilmesi, test protokolünün bu doğrultuda seçilmesi ve elyaf oryantasyonunun optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, PE matrisli sistemlerde gözlenen arayüzey zayıflıkları, mekanik performansı sınırlayan temel etkenlerden biri olarak öne çıkmakta ve bu konuda ileri iyileştirme çalışmalarının gerekli olduğunu göstermektedir.

KNT takviyeli kompozit üretiminde dispersiyonun homojenliğini artırmak uygun karıştırma yöntemlerinin kullanılması tavsiye edilmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı KNT oranlarının, alternatif matris malzemelerinin ve çok eksenli yükleme koşullarının etkilerinin detaylı olarak incelenmesi faydalı olacaktır. Ayrıca, matris-takviye uyumunu artırmaya yönelik yüzey modifikasyonları ve nano-arayüzey mühendisliği yaklaşımları ile kompozit performansının daha da artırılması mümkündür.

KAYNAKLAR

- Ahn, H., Kuuttila, N. E. ve Pourboghrat, F., 2018, Mechanical analysis of thermo-hydroforming of a fiber-reinforced thermoplastic composite helmet using preferred fiber orientation model. *Journal of Composite Materials*, 52 (23), 3183–3198. <https://doi.org/10.1177/0021998318762547>
- Bansal, S., Kumar, N. ve Jindal, P., 2017, Effect of MWCNT Composition on the Hardness of PP/MWCNT Composites. In *Materials Today: Proceedings* 4.
- Beura, S., Chakraverty, A. P., Thatoi, D. N., Mohanty, U. K. ve Mohapatra, M., 2019, Failure modes in GFRP composites assessed with the aid of SEM fractographs. *Materials Today: Proceedings*, 41, 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.518>
- Boudeau, N., Liksonov, D., Barriere, T., Maslov, L. ve Gelin, J. C., 2012, Composite based on polyetheretherketone reinforced with carbon fibres, an alternative to conventional materials for femoral implant: Manufacturing process and resulting structural behaviour. *Materials and Design*, 40, 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.03.028>
- Brooks, R. A., Wang, H., Ding, Z., Xu, J., Song, Q., Liu, H., Dear, J. P. ve Li, N., 2022, A review on stamp forming of continuous fibre-reinforced thermoplastics. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 5(3), 411–430. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.05.001>
- Chalal, H. ve Abed-Meraim, F., 2017, Numerical predictions of the occurrence of necking in deep drawing processes. *Metals*, 7(11). <https://doi.org/10.3390/met7110455>
- Chen, M., Zhang, X., Shen, K. ve Pan, G., 2022, Uncertainty quantification and global sensitivity analysis for composite cylinder shell via data-driven polynomial chaos expansion. *Journal of Physics: Conference Series*, 2174, 12085. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2174/1/012085>
- Cho, J., Boccaccini, A. R. ve Shaffer, M. S. P., 2009, Ceramic matrix composites containing carbon nanotubes. *Journal of Materials Science*, 44, 1934–1951. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:9798609>
- Díaz, J. ve Rubio, L., 2003, Developments to manufacture structural aeronautical parts in carbon fibre reinforced thermoplastic materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 143–144, 342–346. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00450-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00450-3)
- Dworak, M., Rudawski, A., Markowski, J. ve Blazewicz, S., 2017, Dynamic mechanical properties of carbon fibre-reinforced PEEK composites in simulated body-fluid. *Composite Structures*, 161, 428–434. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.11.070>
- Egorov, V., Abu-Khasan, M. ve Fedorov, A., 2022, Classification of Composite and Steel Plates Joints in Hybrid Structures with External Type of Reinforcement by

- Composite Materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 988(5), 52070. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/5/052070>
- Eshun, F., Rupango, T. ve Umoren, W., 2022, Finite Element Analysis on Hydroforming of CFRP/SS304 Composite Tube with different Fiber Orientation Stacking Sequence. *Journal of Mechanical, Civil and Industrial Engineering*, 3, 17–23. <https://doi.org/10.32996/jmcie.2022.3.2.3>
- Hernández, S., Sket, F., Molina-Aldareguí a, J. M., González, C. ve LLorca, J., 2011. Effect of curing cycle on void distribution and interlaminar shear strength in polymer-matrix composites. *Composites Science and Technology*, 71(10), 1331–1341. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.05.002>
- Homkhiew, C., Rawangwong, S., Boonchouytan, W., Thongruang, W. ve Ratanawilai, T., 2018, Composites from Thermoplastic Natural Rubber Reinforced Rubberwood Sawdust: Effects of Sawdust Size and Content on Thermal, Physical, and Mechanical Properties. *International Journal of Polymer Science*, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2018/7179527>
- Iijima, S., 1991. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354(6348), 56–58. <https://doi.org/10.1038/354056a0>
- Jian, L. ve Gaofeng, X., 2024. The effect of CNT grafting on the mechanical properties of the UHMWPE fiber/HDPE composite. *Surface and Interface Analysis*. <https://doi.org/10.1002/sia.7339>
- Kanagaraj, S., Varanda, F. R., Zhil'tsova, T. V., Oliveira, M. S. A. ve Simões, J. A. O., 2007, Mechanical properties of high density polyethylene/carbon nanotube composites. *Composites Science and Technology*, 67(15–16), 3071–3077. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.04.024>
- Karadimas, G. ve Salonitis, K., 2023,. Ceramic Matrix Composites for Aero Engine Applications—A Review. *Applied Sciences*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/app13053017>
- Kaul, P. B., Bifano, M. F. P. ve Prakash, V., 2013, Multifunctional carbon nanotube-epoxy composites for thermal energy management. *Journal of Composite Materials*, 47(1), 77–95. <https://doi.org/10.1177/0021998312453750>
- Khelif, M., Mhedhbi, M. ve Bradai, C., 2015, Development of Bulge Test for Aluminum Sheet Metal. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 789. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17527-0_33
- Kim, D., Kim, Y., Jung, Y., Kim, S. Y., Song, J., Kim, M. ve Kim, J., 2020, Development of a continuous manufacturing process for self-reinforced composites using multi-step highly drawn polypropylene tapes. *Polymer*, 191, 122267. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122267>

- Kouparitsas, C. E., Kartalis, C., Varelidis, P. C., Tsenoglou, C. ve Papaspyrides, C., 2002, Recycling of the fibrous fraction of reinforced thermoset composites. *Polymer Composites*, 23, 682–689. <https://doi.org/10.1002/pc.10468>
- Lee, J.-W., Park, S.-J. ve Kim, Y.-H., 2017, Improvement of Interfacial Adhesion of Incorporated Halloysite-Nanotubes in Fiber-Reinforced Epoxy-Based Composites. *Applied Sciences*, 7, 441. <https://doi.org/10.3390/app7050441>
- Ma, P. C., Siddiqui, N. A., Marom, G. ve Kim, J. K., 2010, Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(10), 1345–1367. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.07.003>
- Manoj Kumar, R., Sharma, S. K., Manoj Kumar, B. V. ve Lahiri, D., 2015, Effects of carbon nanotube aspect ratio on strengthening and tribological behavior of ultra high molecular weight polyethylene composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 76, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.05.007>
- Manoochchhari, M. ve Kadkhodayan, M., 2024, Development of the forming limit diagram for fiber-reinforced thermoplastic composites and its temperature effect. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. <https://doi.org/10.1177/07316844241290401>
- Marichelvam, M. K., Kandakodeeswaran, K., Maheswaran, K. ve Geetha, M., 2021, Investigation on mechanical properties of automobile strut made by GFRP composites. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1338–1347. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.026>
- Moralar, A., 2015, İnce sac levhaların yüksek basınç altında (hydroforming) şekillendirilmesi. *EJOVOC Electronic Journal of Vocational Colleges*, 5, 78. <https://doi.org/10.17339/ejovoc.74062>
- Özdemir, A., Subaşı, M. ve Karataş, Ç., 2020, Investigating the Effects of Forming Parameters on Molding Force and Springback in Deep Drawing Process of Thermoplastic Composite Laminates. *Gazi University Journal Of Science*, 34. <https://doi.org/10.35378/gujs.765095>
- Öztekin, H. F., Gür, M., Kaman, M. O. ve Kaman, M. O., 2022, Effect of Fiber Type and Thickness on Mechanical Behavior of Thermoplastic Composite Plates Reinforced With Fabric Plies. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*. <https://doi.org/10.31462/jseam.2022.03161169>
- Palanikumar, K., Srinivasan, T., Sailesh, A. ve Rajagopal, K., 2016, Strength Validation and Morphological studies of Glass Fiber Reinforced with Polypropylene Matrix (GFR/PP) Composites. *DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Science*, <https://doi.org/10.12783/dteees/seeie2016/4659>
- Palumbo, G. ve Tricarico, L., 2007, Numerical and experimental investigations on the Warm Deep Drawing process of circular aluminum alloy specimens. *Journal of Materials Processing Technology*, 184, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.024>

- Pandya, K. S. ve Naik, N. K., 2015, Energy absorption capability of carbon nanotubes dispersed in resins under compressive high strain rate loading. *Composites Part B: Engineering*, 72, 40–44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.11.026>
- Pramanik, A., 2016, Effects of reinforcement on wear resistance of aluminum matrix composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(2), 348–358. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64125-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64125-0)
- Qiao, Y., Fring, L. D., Pallaka, M. R. ve Simmons, K. L., 2023, A review of the fabrication methods and mechanical behavior of continuous thermoplastic polymer fiber–thermoplastic polymer matrix composites. In *Polymer Composites* 44 (2), 694–733. <https://doi.org/10.1002/pc.27139>
- Radu, T. ve Potecasu, F., 2020, Behavior on Plastic Deformation of Thin Steel Strips Coated with Electroless Ni-P. *The Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati. Fascicle IX, Metallurgy and Materials Science*, 43(1), 44–47. <https://doi.org/10.35219/mms.2020.1.06>
- Rafiee, M. A., Rafiee, J., Srivastava, I., Wang, Z., Song, H., Yu, Z. Z. ve Koratkar, N., 2010, Fracture and fatigue in graphene nanocomposites. *Small*, 6(2), 179–183. <https://doi.org/10.1002/sml.200901480>
- Rai, A., Subramanian, N. ve Chattopadhyay, A., 2017, Investigation of damage mechanisms in CNT nanocomposites using multiscale analysis. *International Journal of Solids and Structures*, 120, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.04.034>
- Roumeli, E., Pavlidou, E., Bikiaris, D. ve Chrissafis, K., 2014, Microscopic observation and micromechanical modeling to predict the enhanced mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes reinforced crosslinked high density polyethylene. *Carbon*, 67, 475–487. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.10.020>
- Sanjay, M. R., Madhu, P., Jawaid, M., Sentharamaikannan, P., Senthil, S. ve Pradeep, S., 2018, Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review. In *Journal of Cleaner Production*, 172, 566–581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.101>
- Sarfraz, M. S., Hong, H. ve Kim, S. S., 2021, Recent developments in the manufacturing technologies of composite components and their cost-effectiveness in the automotive industry: A review study. In *Composite Structures*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113864>
- Schwab, M., Todt, M., Wolfahrt, M. ve Pettermann, H. E., 2016, Failure mechanism based modelling of impact on fabric reinforced composite laminates based on shell elements. *Composites Science and Technology*, 128, 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.03.025>

- Senkerik, V., Stanek, M., Manas, D., Manas, M., Janosti, V. ve Ovsik, Martin., 2016, Influence of length of glass fibers in recycled polypropylene on tensile properties. *MATEC Web Conf.*, 76. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167602021>
- Sheth, D., Maiti, S., Patel, S., Kandasamy, J., Chandan, M. R. ve Rahaman, A., 2021, Enhancement of mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy matrix laminated composites with multiwalled carbon nanotubes. *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 29 (4) , 288-294. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2020.1839424>
- Shi, S., Xu, W., Zhou, B., Qin, S., Liu, X. ve Li, H., 2023, Low-density polyethylene-multi-walled carbon nanotube nanocomposite membranes with enhanced conductivity for highly sensitive vapor sensing. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 6(5). <https://doi.org/10.1007/s42114-023-00748-8>
- Spanu, P., Amza, C. ve Abaza, B., 2018, Study Regarding the Compressive Properties of Glass Fiber Reinforced Composites. *Materiale Plastice*, 55, 580–583. <https://doi.org/10.37358/MP.18.4.5078>
- Sun, B., Liu, Q., Gao, Y., Han, L., Zhang, R., Zhang, C. ve Jia, X., 2024, Preparation of carbon nanotube-reinforced polyethylene nanocomposites with better anti-scaling and corrosion-resistant properties. *Industrial Chemistry & Materials*, 2(1), 154–164. <https://doi.org/10.1039/d3im00031a>
- Thostenson, E. T., Li, C., ve Chou, T. W. (2005). Nanocomposites in context. In *Composites Science and Technology* (Vol. 65, Issues 3–4, pp. 491–516). <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.11.003>
- Thostenson, E. T., Ren, Z. ve Chou, T.-W., 2001, Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review. *Composites Science and Technology*, 61(13), 1899–1912. www.elsevier.com/locate/compscitech
- Uriya, Y. ve Yanagimoto, J., 2017a, Erichsen cupping test on thermosetting CFRP sheets. *International Journal of Material Forming*, 10(4), 527–534. <https://doi.org/10.1007/s12289-016-1298-3>
- Uriya, Y. ve Yanagimoto, J., 2017b, Erichsen cupping test on thermosetting CFRP sheets. *International Journal of Material Forming*, 10(4), 527–534. <https://doi.org/10.1007/s12289-016-1298-3>
- Vaidya, U. ve Chawla, K., 2008, Processing of fibre reinforced thermoplastic composites. *International Materials Reviews*, 53, 185–218. <https://doi.org/10.1179/174328008X325223>
- Volkman, E., Tushtev, K., Koch, D., Wilhelmi, C., Göring, J. ve Rezwani, K., 2015, Assessment of three oxide/oxide ceramic matrix composites: Mechanical performance and effects of heat treatments. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 68, 19–28. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.09.013>

- Wang, H., Xu, T. ve Shou, B., 2016, Determination of Material Strengths by Hydraulic Bulge Test. *Materials*, 10, 23. <https://doi.org/10.3390/ma10010023>
- Wang, X., Liu, X., Shan, Y., Wan, X., Wanghao, L. ve Pan, Y., 2015, Lightweight Design of Automotive Wheel Made of Long Glass Fiber Reinforced Thermoplastic. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science*. <https://doi.org/10.1177/0954406215583081>
- Wilson, D. M. ve Visser, L. R., 2001, High performance oxide fibers for metal and ceramic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(8), 1143–1153. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00176-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00176-7)
- Winhard, J., Nestler, D. ve Kroll, L., 2024, Effects of Process Parameters in Thermoforming of Unidirectional Fibre-Reinforced Thermoplastics. *Polymers*, 16(2). <https://doi.org/10.3390/polym16020221>
- Wong mm, I., Azmi, A., Lih, T., Lee, C. ve Mohd Khalil, A. N., 2015, Evaluation of Mechanical Properties of Hybrid Fiber Reinforced Polymer Composites and Their Architecture. *Procedia Manufacturing*, 2, 236–240. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.041>
- Xian, G., Zhou, P., Li, C., Dong, S., Du, H., Tian, J., Guo, R., Peng, Z., Zhang, Z. ve He, T., 2024, Mechanical properties evaluation of glass fiber reinforced thermoplastic composite plate under combined bending loading and water immersion. *Construction and Building Materials*, 440. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137470>
- Xu, K., Chu, P., Rumon, R. H. ve Fujimori, A., 2024, Tensile and bending properties of sandwich films of carbon fiber reinforced thermoplastics-polypropylene sheet processed by a simple hot-press method. *SPE Polymers*. <https://doi.org/10.1002/pls2.10153>
- Ying, Q., Jia, Z., Rong, D., Liu, L. ve Li, J., 2024, Formability and Failure Mechanisms of Continuous Glass Fiber-Reinforced Polypropylene Composite Laminates in Thermoforming Below the Melting Temperature. *Polymers*, 16(20). <https://doi.org/10.3390/polym16202885>
- Zhang, Q., Gao, Q. ve Cai, J., 2014, Experimental and simulation research on thermal stamping of carbon fiber composite sheet. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 24(1), 217–223. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63050-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63050-8)
- Zhang, Y., You, M., Guo, Q., Li, C., Zhang, D., Shi, D., Zhang, J., Sun, Z., Zhang, P., Wang, T. ve Chen, L., 2024, A review of the formability of woven fabrics for composite materials. In *Polymer Composites*. John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/pc.28837>
- Zheng, B., Gao, X., Li, M., Deng, T., Huang, Z., Zhou, H. ve Li, D., 2019, Formability and failure mechanisms of woven CF/PEEK composite sheet in solid-state thermoforming. *Polymers*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/polym11060966>

- Zheng, B., Wang, H., Huang, Z., Zhang, Y., Zhou, H. ve Li, D., 2017, Experimental investigation and constitutive modeling of the deformation behavior of Poly-Ether-Ether-Ketone at elevated temperatures. *Polymer Testing*, 63, 349–359. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.08.020>
- Zhu, H., Ou, H. ve Popov, A. A., 2020, Incremental Sheet Forming of Thermoplastics: A Review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06056-5>

EKLER

EK-1 Hidroşekillendirme Test Yöntemi Uygulanarak Yapılan Deneyle

Bu bölümde, kompozit malzemelerin hidroşekillendirme yöntemiyle şekillendirilmesi sürecinde malzeme davranışının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve elde edilen bulgular sunulmaktadır. Hidroşekillendirme, sıvı basıncı kullanarak kompozit malzemelerin kontrollü bir şekilde deforme edilmesini sağlayan bir üretim yöntemidir. Bu çalışma kapsamında, farklı boyutlardaki numuneler ve çeşitli kalıp geometrileri kullanılarak sistematik deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

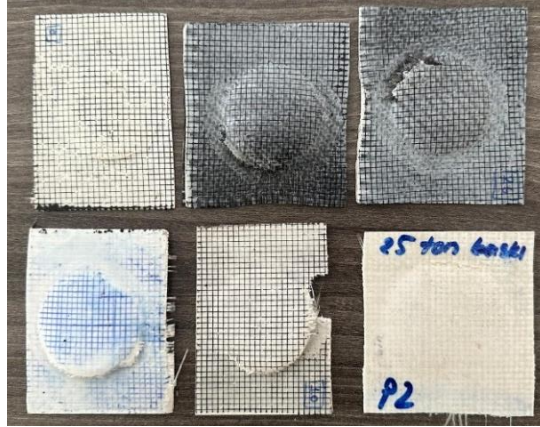
İlk deney setinde, 9×9 cm boyutlarındaki kompozit numuneler serbest yükleme koşulları altında test edilmiştir. Numunelere uygulanan hidrolik basınç değerleri 52-72 bar aralığında değiştirilerek malzeme davranışı incelenmiştir. Bu basınç aralığında numunelerde yırtılma hasarı meydana geldiği tespit edilmiştir (Şekil Ek-1.1). Elde edilen bulgular, malzemenin mevcut elyaf oranı ve yapısal özellikleri göz önüne alındığında, söz konusu basınç değerlerinde gerekli mukavemeti sağlayamadığını ortaya koymaktadır.



Şekil Ek-1.1. 9x9 cm boyutundaki numunelerde deney sonrası oluşan yırtılmalar

İlk aşamada elde edilen sonuçların iyileştirilmesi amacıyla, kompozit yapıda kullanılan elyaf miktarı tek katmandan üç katmana çıkarılmıştır. Bu modifikasyonun temel amacı, malzemenin hidrolik basınç altındaki dayanımını artırmak ve deformasyon davranışını iyileştirmektir. Ayrıca, şekil değişiminin daha hassas incelenebilmesi için numuneler üzerinde serigrafi yöntemi kullanılarak 2,5×2,5 mm boyutlarında kare grid

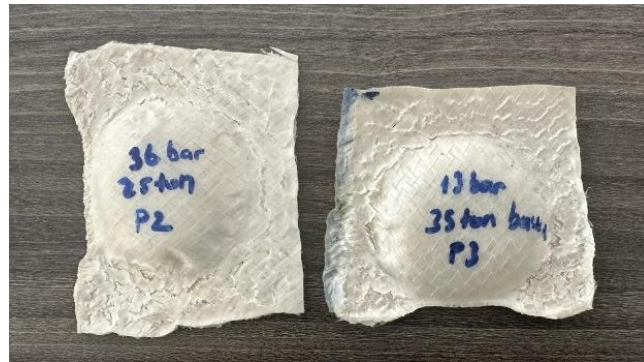
deseni oluşturulmuştur. Hazırlanan numunelere ait görüntüler sunulmuştur (Şekil Ek-1.2).



Şekil Ek-1.2. Serigrafi yöntemiyle grid desenli numunelerde deney sonrası yırtılmalar

Ancak, malzeme üzerindeki grid işaretlemelerinin kompozit yapının camsı geçiş sıcaklığının (T_g) altında gerçekleştirilmesi gerektiği belirlenmiştir. Bu sıcaklık kısıtlaması nedeniyle, uygulanan grid işaretlemelerinin kalıcılık göstermediği ve hidroşekillendirme işlem süresince silindiği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, gelecekteki çalışmalarda alternatif işaretleme yöntemlerinin araştırılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

± 45 dokuma cam elyaf takviyeli PE matrisli kompozit numunelerde, yarıçap bölgesinde oluşan yırtılma hasarlarını önlemek amacıyla baskı plakası basıncı artırılmıştır. Artan baskı plakası basıncı, kompozit malzemelerin kalıpla temas eden yüzeylerinde ezilme hasarlarına neden olmuştur. 9×9 cm boyutundaki numunelerin, hidroşekillendirme işlemi sırasında kalıp içerisinde kayma eğilimi sergilediği ve yeterli şişme seviyesine ulaşmadan deney sürecinin tamamlandığı tespit edilmiştir (Şekil Ek-1.3).



Şekil Ek-1.3. Artan baskı plakası basıncı sonucu numunelerde oluşan yırtılmalar

İlk aşama deneylerinden elde edilen verilerin analizi sonucunda, 9×9 cm numune boyutunun hidrolik şişirme testi için yetersiz olduğu sonucuna belirlenmiştir. Bu tespitin ardından, daha büyük boyutlu kalıplar kullanılarak deneysel çalışmalar sürdürülmüştür.

Dimi dokuma yapısına sahip cam elyaf takviyeli PE matrisli kompozit numuneler 17,5×17,5 cm boyutlarında hazırlanarak hidroşekillendirme deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil Ek-1.4).



Şekil Ek-1.4. 17,5×17,5 cm boyutundaki numunelerinin farklı kalıp geometrilerinde hidroşekillendirme sonuçları

Bu boyut artışı, numunelerin kalıp içerisinde yeterli tutunmayı sağlaması ve hidroşekillendirme sürecinin daha kontrollü gerçekleştirilmesi açısından önemli bir iyileştirme sağlamıştır. Farklı kalıp geometrileri ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda, üretilen kompozit malzemeler için en uygun hidroşekillendirme kalıbının süzdürme çubuksuz yuvarlak kalıp olduğu belirlenmiştir (Şekil Ek-1.5). Bu kalıp geometrisi, malzemenin daha homojen deformasyon göstermesini sağlayarak yırtılma ve kırılma hasarlarını minimize etmiştir.



Şekil Ek-1.5. Süzdürme çubuksuz yuvarlak kalıp ile hidroşekillendirme deneyi sonrası görüntüler

Süzdürme çubuksuz yuvarlak kalıp ile yapılan deneyler sonucunda deformasyon dağılımının merkeze göre daha simetrik olduğu, maksimum şişme yüksekliğinin diğer kalıp geometrilerine göre daha fazla olduğu ve yırtılma ve ezilme hasarlarının minimum seviyede gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen hidroşekillendirme testleri sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır:

Kompozit malzemelerin hidroşekillendirme performansında elyaf katman sayısı kritik öneme sahiptir. Tek katmanlı yapılar 52-70 bar basınç aralığında yırtılma hasarı gösterirken, üç katmanlı yapılarda mekanik dayanım önemli ölçüde artmıştır.

Numune boyutu, hidroşekillendirme sürecinin başarısını etkileyen temel parametrelerden biridir. 9×9 cm boyutundaki numunelerde gözlemlenen kalıp içi kayma problemleri, 17,5×17,5 cm boyutundaki numunelerde ortaya çıkmamıştır.

Baskı plakası basıncı, malzemenin kalıp içerisindeki hareketini ve şekillendirme kalitesini doğrudan etkilemektedir. Aşırı yüksek basınç değerleri yüzey ezilmelerine neden olurken, düşük basınç değerleri ise erken yırtılmalara yol açmaktadır.

Dokuma yapısı ve elyaf oryantasyonu, kompozit malzemelerin hidroşekillendirme davranışını belirleyen önemli faktörlerdir. Dımı dokuma yapısının, hidroşekillendirme sürecinde daha homojen deformasyon sağladığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, hidroşekillendirme testleri kapsamında elde edilen ilk bulgular, mevcut koşullarda sınırlı başarı göstermiştir. Ancak bu durum, kompozit malzemelerin söz konusu işlem yöntemiyle tamamen uyumsuz olduğunu göstermemekte; aksine, daha kapsamlı parametre optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır.