



**HİBRİT ELYAF TAKVİYELİ
KOMPOZİTLERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre SERBEST

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ercan ŞİMŞİR**

**İkinci Danışman
Doç. Dr. İbrahim YAVUZ**

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2025

Bu tez çalışması 24.FEN. BİL.07 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HİBRİT ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Emre SERBEST

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ercan ŞİMŞİR

İkinci Danışman
Doç. Dr. İbrahim YAVUZ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2025

TEZ ONAY SAYFASI

Emre SERBEST tarafından hazırlanan “Hibrit Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 16 / 01 / 2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Ercan ŞİMŞİR

İkinci Danışman : Doç. Dr. İbrahim YAVUZ

İmza

Başkan : Prof. Dr. İbrahim MUTLU
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Bekir GÜNEY
Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi
Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ercan ŞİMŞİR
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

16 / 01/ 2025

Emre SERBEST

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

HİBRİT ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI

Emre SERBEST

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ercan ŞİMŞİR

İkinci Danışman: Doç. Dr. İbrahim YAVUZ

Günümüzde giderek artan dayanıklı ve hafif malzeme ihtiyacını karşılamaya yönelik kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmalar önem kazanmıştır. Özellikle, sentetik ve doğal elyaf kaynaklarının farklı yönlenme açılarıyla oluşturdukları kompozit yapılarının mekanik özellikleri üzerine yoğunlaşmaktadır. Doğal elyaf olan kabak elyaf çevre dostu ve sürdürülebilir malzeme olması sebebi ile tercih edilmiştir. Yapay elyaf olarak ise yüksek mekanik özellikleri ve dayanımı sebebi ile karbon elyaf kullanılmıştır. Çalışmada, farklı yönlendirme açılarıyla dizilmiş karbon elyaf kumaş ile kabak elyafları hibrit şekilde kullanılmış ve bu yapının mekanik özellikleri araştırılmıştır.

Yapılan bu çalışmada, kompozit tabaka üretimi için üst-alt tabakalar olarak karbon elyaf kumaşların $[0^\circ]$, $[45^\circ]$ ve $[90^\circ]$ yönlenme açıları kullanılmıştır. İç katman malzemesi olarak doğal kabak elyafı kullanılmıştır. Üretimlerde el yatırma ve sıcak pres kalıplama yöntemi kullanılmıştır. Hazırlanan test numuneleri standartlara uygun boyutlarda hassas şerit testere ile kesilmiştir ve uygun standartlarda düşük hızlı darbe, üç nokta eğme ve çekme testleri yapılmıştır. Darbe testlerinde maksimum dayanımları belirlemek için her tabaka farklı enerjilerde test edilmiştir. Dört ve altı tabakalı numuneler sırasıyla 5-15 joule ve 10-20 joule farklı enerjilerde test edilmiştir. Dört tabakalı numunelere $(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ)$ sırasıyla darbe enerjisi uygulanmış, 0° yönlendirme 5 J'de 3500 N, 15 J'de ise 6000 N ile en yüksek kuvvet kapasitesini göstermiştir. Altı tabakalı yönlendirme kombinasyonlarına $(45^\circ-0^\circ, 90^\circ-0^\circ, 90^\circ-45^\circ)$ ise sırasıyla darbe enerjisi uygulanmıştır.

0°- 45° yönlenme kombinasyonu, 20 J darbe enerjisinde 7200 N ile en yüksek kuvvet kapasitesine ulaşırken, 45°- 90° yönlenme kombinasyonu aynı enerjide 4000 N ile en düşük kuvvet kapasitesini sergilemiştir. Üç nokta eğme ve çekme test sonuçları, düşük hız darbe test sonuçlarını doğrulamaktadır. Elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf yönlenme açısının ve tabaka sayısının malzeme performansını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Bu sonuçlar, elyaf yönlendirme açısının kompozit malzemelerin darbe dayanımı üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymaktadır.

2025, xii + 61 sayfa

Anahtar Kelimeler: Karbon Elyaf, Kabak Elyaf, Hibrit Kompozit, Mekanik Özellikler.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF HYBRID FIBER REINFORCED COMPOSITES

Emre SERBEST

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Automotive Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Ercan ŞİMŞİR

Co-Supervisor: Assoc. Prof. İbrahim YAVUZ

In recent years, studies on composite materials designed to meet the growing demand for durable and lightweight materials have gained significant importance. Particularly, the focus has been on the mechanical properties of composite structures formed by synthetic and natural fibers oriented at different angles. Pumpkin fiber, a natural fiber, was chosen for its environmentally friendly and sustainable characteristics. On the other hand, carbon fiber was utilized as the synthetic reinforcement due to its superior mechanical properties and high strength. In this study, hybrid composite structures were developed using carbon fiber fabrics arranged at different orientation angles combined with pumpkin fibers, and their mechanical properties were investigated.

For the production of composite laminates, carbon fiber fabrics oriented at $[0^\circ]$, $[45^\circ]$, and $[90^\circ]$ were used as the top and bottom layers, while natural pumpkin fiber was employed as the core material. The manufacturing process involved hand lay-up and hot press molding techniques. The prepared test specimens were cut into standard dimensions using a precision band saw, and low-velocity impact, three-point bending, and tensile tests were conducted in accordance with the relevant standards. During impact tests, the maximum strength of each laminate was determined under varying energy levels. Four-ply and six-ply specimens were tested at 5-15 joules and 10-20 joules of energy, respectively. For the four-ply specimens ($[0^\circ]$, $[45^\circ]$, $[90^\circ]$), impact energy was applied, and the $[0^\circ]$ orientation demonstrated the highest force capacity with 3500 N at 5 J and 6000 N at 15 J. For the six-ply orientation combinations ($[45^\circ-0^\circ]$, $[90^\circ-0^\circ]$, $[90^\circ-45^\circ]$),

impact energy was applied accordingly. The $[0^\circ-45^\circ]$ orientation combination exhibited the highest force capacity at 7200 N under 20 J of impact energy, while the $[45^\circ-90^\circ]$ orientation combination showed the lowest force capacity at 4000 N under the same energy level. The results of three-point bending and tensile tests corroborated the findings of the low-velocity impact tests.

It was observed that the fiber orientation angle and the number of layers significantly influenced the performance of fiber-reinforced composites. These results highlight the critical role of fiber orientation angles in determining the impact resistance of composite materials.

2025, xii + 61 pages

Keywords: Carbon Fiber Luffa Fiber, Hybrid Composite, Mechanical Properties.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne, tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ercan ŞİMŞİR'e, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen ikinci danışmanım Sayın Doç. Dr. İbrahim YAVUZ'a, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı eşim Ayfer SERBEST ve oğlum Kerem Deha SERBEST'e çok teşekkür ederim.

Emre SERBEST
Afyonkarahisar 2025

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	5
2.1 Kompozit Malzemeler	5
2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	7
2.2.1 Elyaf Takviyeli Kompozitler	7
2.2.1.1 Doğal Elyaf lar	8
2.2.1.2 Yapay Elyaf lar	13
2.2.2 Parçacık Takviyeli Kompozitler	14
2.2.3 Tabaka Tasarımlı Kompozitler	15
2.2.4 Karma (Hibrit) Kompozitler	17
2.3 Kompozit Üretim Yöntemleri.....	18
2.4 Kompozitlerde Test Uygulamaları	21
2.4.1 Çekme Testi	21
2.4.2 Üç Nokta Eğme Testi	22
2.4.3 Darbe Testi	23
2.4.4 Termal Genleşme Testi.....	24
2.4.5 Termal İletkenlik Testi	24
3. MATERYAL ve METOT	25
3.1 Karbon Elyaf Çeşitleri	25
3.2 Kabak Elyaf	26
3.3 El Yatırma Yöntemiyle Kompozit Üretimi	29
3.4 Pres ile Birleştirme (Kürleme) İşlemi.....	29
3.5 Darbe Testi	31
3.6 Üç Nokta Eğme Testi	32

3.7 Çekme Testi.....	35
4. BULGULAR	37
4.1 Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları	37
4.1.1 Dört Tabakalı Kompozit Plakaların Üç Nokta Eğme Test Sonucu.....	37
4.1.2 Altı Katmalı Kompozit Plakaların Eğme Testi Deneyi.....	38
4.2 Çekme Testi Sonuçları.....	40
4.2.1 Dört Tabakalı Kompozit Plakaların Çekme Testi Deneyi	40
4.2.2 Altı Tabakalı Kompozit Plakaların Çekme Testi Deneyi	41
4.3 Darbe Testi Sonuçları	43
4.3.1 Dört Tabakalı Kompozit Numunelerin 5 Joule Enerji Altında Deformasyon Davranışları.....	43
4.3.2 Dört Tabakalı Kompozit Numunelerin 15 Joule Enerji Altında Deformasyon Davranışları.....	45
4.3.3 Altı Tabakalı Kompozit Numunelerin 10 Joule Enerji Altında Deformasyon Davranışları.....	48
4.3.4 Altı Tabakalı Kompozit Numunelerin 20 Joule Enerji Altında Deformasyon Davranışları.....	50
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	53
6. KAYNAKLAR.....	56
ÖZGEÇMİŞ.....	61

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

E	Elastisite modülü
GPa	Giga pascal
J	Joule
Lv	Mesnetler arası mesafe
MPa	Megapascal
N	Newton

Kısaltmalar

ASTM	Uluslararası amerikan test ve materyalleri topluluğu
CETP	Cam elyaf takviyeli polimer
CFRP	Karbon elyaf takviyeli polimer
TGT	Termal genleşme testi
KETP	Karbon elyaf takviyeli polimer
MGS H287	Laminasyon epoksi sertleştirici
MGS L285	Laminasyon epoksi seti
MMETK	Metal matrisli elyaf takviyeli kompozitler
PMETK	Polimer matrisli elyaf takviyeli kompozitler
TMA	Termomekanik analiz
RTK	Reçine transfer kalıplama
SMETK	Seramik matrisli elyaf takviyeli kompozitler
[CK] ₁ ⁴	2 kat kabak elyaf iç katman ve 90° yönlendirilmiş 2 kat karbon elyaf kumaş
[CK] ₂ ⁴	2 kat kabak elyaf iç katman ve 45° yönlendirilmiş 2 kat karbon elyaf kumaş
[CK] ₃ ⁴	2 kat kabak elyaf iç katman ve 0° yönlendirilmiş 2 kat karbon elyaf kumaş
[CK] ₄ ⁶	2 kat kabak elyaf iç katman, 45° ve 90° yönlendirilmiş 2 şer kat karbon elyaf kumaş
[CK] ₅ ⁶	2 kat kabak elyaf iç katman, 0° ve 90° yönlendirilmiş 2 şer kat karbon elyaf kumaş
[CK] ₆ ⁶	2 kat kabak elyaf iç katman, 0° ve 45° yönlendirilmiş 2 şer kat karbon elyaf kumaş

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Kompozitlerin mühendislik malzemeleriyle karşılaştırılması	6
Şekil 2.2 Geleneksel tek parça olarak davranan malzemeler ile kompozit malzemeler arasında karşılaştırma	7
Şekil 2.3 Kompozit malzemelerin yapısındaki bileşenlere göre sınıflandırılması.....	7
Şekil 2.4 Doğal elyafların genel sınıflandırılması.....	9
Şekil 2.5 Karbon elyaf yönlendirme çeşitleri:.....	14
Şekil 2.6 Dokuma çeşitleri a) Düz elyaf dokuma, b) Hasır elyaf dokuma, c) Saten elyaf dokuma, d) Keçeleme (Mat) elyaf dokuma.....	14
Şekil 2.7 Tabakalı kompozit üretimi	16
Şekil 2.8 Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri.	19
Şekil 2.9 El yatırma yöntemi ve reçine uygulaması.....	19
Şekil 3.1, Altı tabakalı kompozitler, a) $[CK]_4^6$, b) $[CK]_5^6$, c) $[CK]_6^6$	27
Şekil 3.2 Dört tabakalı kompozitler, a) $[CK]_1^4$, b) $[CK]_2^4$, c) $[CK]_3^4$	28
Şekil 4.1 $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$ Kompozit plakaların kuvvet-deformasyon grafiği	388
Şekil 4.2 $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$, $[CK]_6^6$ Kompozit plakaların kuvvet- deformasyon grafiği.....	39
Şekil 4.3 $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$ Kompozit plakaların çekme testi sonucunda elde edilen gerilme-uzama grafiği	41
Şekil 4.4 $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$, $[CK]_6^6$ Kompozit plakaların çekme testi sonucunda elde edilen gerilme-uzama grafiği	42
Şekil 4.5 $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$ Kompozit plakaların 5 J kuvvet-deformasyon grafiği	455
Şekil 4.6 $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$ Kompozit plakaların 15 J kuvvet-deformasyon grafiği	47
Şekil 4.7 $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$, $[CK]_6^6$ Kompozit plakaların 10 J kuvvet-deformasyon grafiği	49
Şekil 4.8 $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$, $[CK]_6^6$ Kompozit plakaların 15 J kuvvet-deformasyon grafiği.	51

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Doğal elyafların bitki aileleri	10
Çizelge 2.2 Doğal elyafların bazı karakteristik özellikleri.....	10
Çizelge 3.1 Kabak elyafın ortalama kimyasal ve fiziksel özellikleri	27
Çizelge 3.2 Üretimde kullanılan kompozit tabaka adlandırmaları.....	27
Çizelge 4.1 Mekanik test sayısal veri sonuçları	54



RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Kabak elyafın doğal oluşum ve iç tabakaları.....	11
Resim 2.2 Karbon elyaf yönlendirme çeşitleri: a) Rastgele yönlendirilmiş süreksiz, b) Yönlendirilmiş süreksiz, c) Tek yönlü pekiştirilmiş sürekli, d) Örgü formunda	14
Resim 3.1 Karbon elyaf dokuma yönlendirmesi, a) 0°, b) 45° ve c) 90 °.....	25
Resim 3.2 a) Kabak elyafın doğal şekli, b) Kabak elyafın açılmış ve üretim için tezgah üstünde hazırlanma görüntüsü.....	26
Resim 3.3 Epoksi reçine ve sertleştirici	28
Resim 3.4 a) Karıştırma cihazı, b) hassas terazi	29
Resim 3.5 Karbon ve kabak elyaflarının tezgah üzerinde sırasıyla reçine emdirilerek birleştirilmesi	29
Resim 3.6 Kompozit üretiminde kullanılan sıcak pres.	30
Resim 3.7 Pres altında uygulama, a) Baskı tablaları, b) Tabla rezistans göstergesi ve potansları, c) Pres basınç manometresi.....	30
Resim 3.8 Şerit testere cihazı	31
Resim 3.9 Instron / ceast 9350 düşük hız darbe test cihazı.....	32
Resim 3.10 Eğme test cihazı görüntüsü.	33
Resim 3.11 Test öncesi üç nokta eğme numuneleri.....	33
Resim 3.12 Test öncesi çekme numuneleri.....	35
Resim 3.13 a) Çekme test cihazı, b) Çekme test cihazına numunenin yerleştirilmesi... 36	
Resim 4.1 $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$ Üç nokta eğme testi, a) Test sırasında, b) Test sonrası, c) Test öncesi resimleri.	37
Resim 4.2 $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$, $[CK]_6^6$ Üç nokta eğme testi a) Test sırasında, b) Test sonrası, c) Test öncesi resimleri.	39
Resim 4.3 $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$ Çekme testi a) Test öncesi resim, b) Test sonrası, c) Test sırasında	40
Resim 4.4 $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$, $[CK]_6^6$ Çekme testi a) Test öncesi resim, b) Test sonrası, c) Test sırasında	42
Resim 4.5 $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$ Kompozit numunelerin 5 joule darbe enerjisi altında görüntüsü	44
Resim 4.6 $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$ Kompozit numunelerin 15 joule darbe enerjisi altında görüntüsü	46
Resim 4.7 $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$, $[CK]_6^6$ Kompozit numunelerin 10 joule darbe enerjisi altında görüntüsü	48

Resim 4.8 $[\text{CK}]_4^6$, $[\text{CK}]_5^6$, $[\text{CK}]_6^6$ Kompozit numunelerin 20 joule darbe enerjisi altında görüntüsü	50
---	----



1. GİRİŞ

Geçen yüzyılda keşfedilen kompozit malzemeler, 21. yüzyılın da popüler bilimsel araştırma konularından biri olmuş ve halen üzerindeki bilimsel araştırmalar devam etmektedir (Yoldaş 2023). Kompozitten üretilen endüstri ekipmanlarının havacılık, denizcilik, otomotiv, robotik ve uzay gibi teknoloji alanlarında kullanılması, hafif olmalarının yanı sıra iyi mukavemet, dayanıklılık, ısı direnç ve stabilite ihtiyaçlarını karşılamasını daha önemli hale getirmektedir (Yozgat vd. 2019).

Termoplastik ve termoset kompozitler, sahip oldukları özellikler ve geniş uygulama alanları ile birçok endüstride önemli rol oynayan kompozit türleridir. Termoplastik kompozitler, yüksek darbe dayanımı ve geri dönüştürülebilir özellikleriyle öne çıkar. Bu kompozitler, özellikle otomotiv parçaları, tüketici ürünleri ve spor ekipmanları gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer yandan, termoset kompozitler yüksek ısı direnci ve kimyasal dayanıklılık özelliklerine sahiptir. Bu nedenle, havacılık bileşenleri, elektrik yalıtım parçaları ve denizcilik ekipmanları gibi dayanıklılık ve güvenilirlik gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Termoplastik ve termoset kompozitlerin her biri, sundukları farklı avantajlarla çeşitli endüstriyel ihtiyaçlara çözüm sunmaktadır. Elyaf takviyeli polimerler (*ETP'ler*) ve bunların kompozitleri, düşük yoğunlukları ile birlikte üstün mukavemet ve sertlik sunmaları sayesinde hafif yapılar için tercih edilmekte ve yapısal uygulamalardaki pazar paylarını artırmaktadır.

Son on yılda, tarımsal bazlı doğal elyaflar biyolojik olarak parçalanabilirlik, geri dönüştürülebilirlik, aşınmaya karşı direnç, kolay işlenebilirlik, düşük yoğunluk, düşük maliyet, toksik olmama, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve iyi akustik özellikler gibi birçok avantaj sunarak büyük bir potansiyel göstermiştir. Bunun yanında, doğal elyaflar selüloz içerikleri nedeniyle intrinsik olarak hidrofilik olup, yüksek su emme kapasitesine sahiptirler (Dönmez 2019). Bu özellik, arayüzey bağlarının zayıflamasına neden olabilir. Doğal elyafların hidrofilik doğasını azaltmak ve yüzey pürüzlülüğünü artırmak amacıyla kimyasal modifikasyon işlemleri gereklidir. Kabak, sisal, jüt, kenevir, kenaf ve keten gibi doğal elyaflar, mekanik özellikler açısından sentetik elyaflarla kıyaslanabilir durumdadır; ancak doğal elyafların yapısal ve yapısal olmayan uygulamalarda kullanımını sınırlayan

bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlar arasında aşırı nem emilimi, zayıf ıslanabilirlik, düşük termal stabilite ve düşük hızda darbe hasarlarına karşı hassasiyet bulunmaktadır. Polimer matrislerdeki doğal elyaf, endüstriyel talebi karşılamada kritik bir rol oynamaktadır ve araştırmacıların küresel anlaşmazlıkla başa çıkma misyonunu desteklemektedir. Dünya çapında birçok doğal elyaf çeşidi bulunmasına rağmen, sadece az bir kısmı polimer kompozit uygulamalarında potansiyel takviye malzemeleri olarak kullanılmış ve tanınmıştır (Jeyapragash vd. 2020).

Karbon ve aramid gibi sentetik takviyeli kompozit malzemeler ile cam elyafları, otomotiv, havacılık ve inşaat sektörleri başta olmak üzere geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Bu ürün çeşitleri arasında cam elyafları, düşük üretim maliyetleri ve üstün mekanik özellikleri nedeniyle en yaygın olarak kullanılanlardır. Ancak, sentetik elyafların kullanımı insan sağlığı ve çevre üzerinde zararlı etkiler yaratabilir; bu etkiler arasında cilt alerjileri ve akciğer kanseri gibi ciddi sağlık sorunları bulunur. Bu olumsuz etkileri azaltmak amacıyla, doğal elyaflar gibi çevre dostu malzemeler kompozit endüstrisinde artan bir ilgiyle tercih edilmeye başlanmıştır (Taşgın ve Kandemir 2023).

Sentetik karbon elyafının çekme mukavemeti 3500-6000 MPa aralığında iken, doğal elyafların çekme mukavemeti 393-1500 MPa aralığında değişmektedir. Karbon elyafın elastik modülü yaklaşık 230-300 GPa iken, doğal elyafların elastik modülü 5,5-82 GPa arasında değişiklik göstermektedir. Ayrıca, sentetik karbon elyafının yoğunluğu 1,6-2,0 g/cm³ olup, doğal elyafların yoğunluğu 1,2 ile 1,6 g/cm³ arasında değişmektedir. Bu sebeple, doğal elyafların spesifik çekme mukavemeti ve elastik modülü, sentetik karbon elyafı ile karşılaştırılabilir seviyelerdedir (Rajneesh ve Shikka 2024).

Kompozitlerde hibritleme, farklı türde takviyelerin tek bir matris içinde bir araya getirilerek kullanıldığı ve böylece kompozitlerin ve elyafların mekanik dayanımının artırıldığı başka bir yöntemdir. Kompozitlerin özelliklerini ihtiyaçlara uygun hale getirmek ve özellikler arasında denge sağlamak amacıyla yapılır (Nayak vd. 2022).

21. yüzyılda, araçların yüksek performans, güvenlik, maliyet etkinlik, fonksiyonellik ve estetik tasarım gibi özellikleri bir arada sunması beklenmektedir. Ayrıca, yakıt verimliliği

ve düşük karbon emisyonu gibi çevresel kriterler de kritik bir öneme sahiptir. Bu kapsamlı gereksinimleri karşılayabilecek yeni nesil araçlar geliştirmek için otomotiv üreticileri, tasarım esnekliği ve hafiflik avantajları sunan kompozit malzemeler gibi alternatif malzemelere yönelmektedir (İnt. Kyn. 1).

Yaklaşık 150 yıllık bir geçmişi olan otomotiv endüstrisi, özellikle “sürdürülebilirlik” odaklı olarak hızla değişim göstermektedir. Küresel iklim değişikliğinin getirdiği çevresel baskılar, ülkelerin 2050 yılına gelinene kadar totalde sıfır karbon emisyonuna ulaşma sözünü verdimekte ve bu otomotiv üreticileri üzerinde büyük bir baskı yaratmaktadır.

Geçtiğimiz yüzyılda üretilen otomobil sayısı katlanarak artmıştır. Bu artış, otomotiv endüstrisindeki gelişmelerin yanı sıra Asya, Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki büyük ekonomik genişlemelerle de ilişkilendirilebilir. Dünya genelindeki otomobil üreticileri, piyasada rekabetçi kalabilmek için maliyetleri düşürmenin yollarını ararken, kaliteden ödün vermemeye özen göstermektedir. Bu bağlamda, doğal elyaf kompozitler, otomotiv endüstrisinde giderek daha fazla araştırılmakta ve tercih edilmektedir (Sarita 2023). Son yıllarda, Avrupa ülkelerindeki otomotiv üreticileri arasında doğal elyaf takviyeli polimer kompozitler giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bu eğilim, özellikle tavan kaplamaları, kapı panelleri, paket tepsileri, koltuk arkalıkları, bagaj kaplamaları ve gösterge panellerinin üretiminde belirginleşmektedir. Amerika Birleşik Devletleri ve Japonya başta olmak üzere bazı Asya ülkeleri de bu alandaki trendleri yakından takip etmektedir.

Günümüzde kompozit malzemelerin geliştirilmesi, yüksek mukavemet, hafiflik ve dayanıklılık gibi üstün özelliklere olan talebi karşılamaya yönelik olarak hız kazanmıştır. Bu malzemelerin mekanik performanslarının değerlendirilmesi, özellikle endüstriyel uygulamalar açısından büyük önem taşır. Kompozitlerin dayanıklılık özelliklerini anlamak amacıyla düşük hız darbe, çekme ve üç nokta eğme testi gibi mekanik testler yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük hız darbe testi, malzemenin darbeye karşı dayanıklılığını değerlendirirken çekme testi, malzemenin çekme kuvvetine karşı gösterdiği mukavemeti ölçer. Düşük hızlı darbe testlerinde izod, charpy, pendulum

(*sarkaç*), ankastre edilmiş kiriş ve ağırlık düşürmeli darbe test metotları kullanılır. Izod ve Charpy testleri, metal malzemelerin darbe dayanımını belirlemede yaygın olarak kullanılan sarkaç testleridir. Pendulum darbe testi, çekiçle numuneye çarpılarak malzemenin absorbe ettiği enerji ölçülürken, ankastre edilmiş kiriş testi esnek bir kirişten serbest bırakılan çelik top ile darbe yaratır. Çalışmamızda kullandığımız ağırlık düşürmeli darbe testinde ise darbe enerjisi ve çarpma hızı ayarlanabilir; böylece tekrarlı darbe, delinme ve saplanma testleri de yapılabilir. Yüksek hızlı darbe testleri, hafif ama yüksek hızlı nesnelerin malzemelere etkisini simüle etmek için kullanılır. Bu yöntemler arasında basınçlı hava ile yapılan darbe testleri ve split-hopkinson basınç çubuğu testi de bulunmaktadır (Graziano 2021). Üç nokta eğme testi ise, malzemenin eğilme dayanımı ve rijitliği hakkında bilgi sunarak, özellikle tasarım ve mühendislik uygulamalarında kompozitlerin uygunluğunu belirlemeye yardımcı olur. Bu çalışma, farklı test yöntemleriyle kompozit malzemelerin performansını detaylandırarak, kompozitlerin farklı uygulama alanlarındaki mekanik davranışları hakkında kapsamlı bir analiz sunmayı amaçlamaktadır.

Yapılan bu tez çalışmasında; literatürden farklı olarak kabak elyaf iç tabakalı kompozit üretilmiştir. İç tabaka yapısı olarak kabak elyafı kullanılmıştır. Kompozit tabaka üretiminde iç tabakada kabak elyafı, alt ve üst tabakalarında ise 2 kat ve 4 kat karbon elyaf kumaşlar kullanılmıştır. Kullanılan karbon elyaflar 0, 45 ve 90 derece yönlendirme açılarında seçilmiştir. Üretilen kompozit tabakalar epoksi reçine kullanarak el yatırma yöntemiyle sabit 50 C° sıcaklığında 20 bar'lık pres basıncı altında 2 saat bekletilerek üretilmiştir. Numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme, üç nokta eğme ve düşük hız darbe testleri yapılmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Kompozit Malzemeler

Birden çok farklı malzemenin, makro seviyede birbirleri içinde çözünmeden birleşmesiyle oluşturulan malzemelere kompozit malzeme denir. 21. yüzyılda, denizcilikten inşaat mühendisliğine, ev eşyalarından uzay teknolojilerine kadar geniş bir yelpazede genel olarak kullanılan kompozit malzemelerin üretim serüveni, tarihsel olarak oldukça geçmiş tarihlere dayanmaktadır. Kompozit malzeme kavramının ve bu malzemelerin mühendislik disiplini içinde ele alınması ise 20. yüzyıl ortalarına kadar uzanmaktadır (Şimşir 2020).

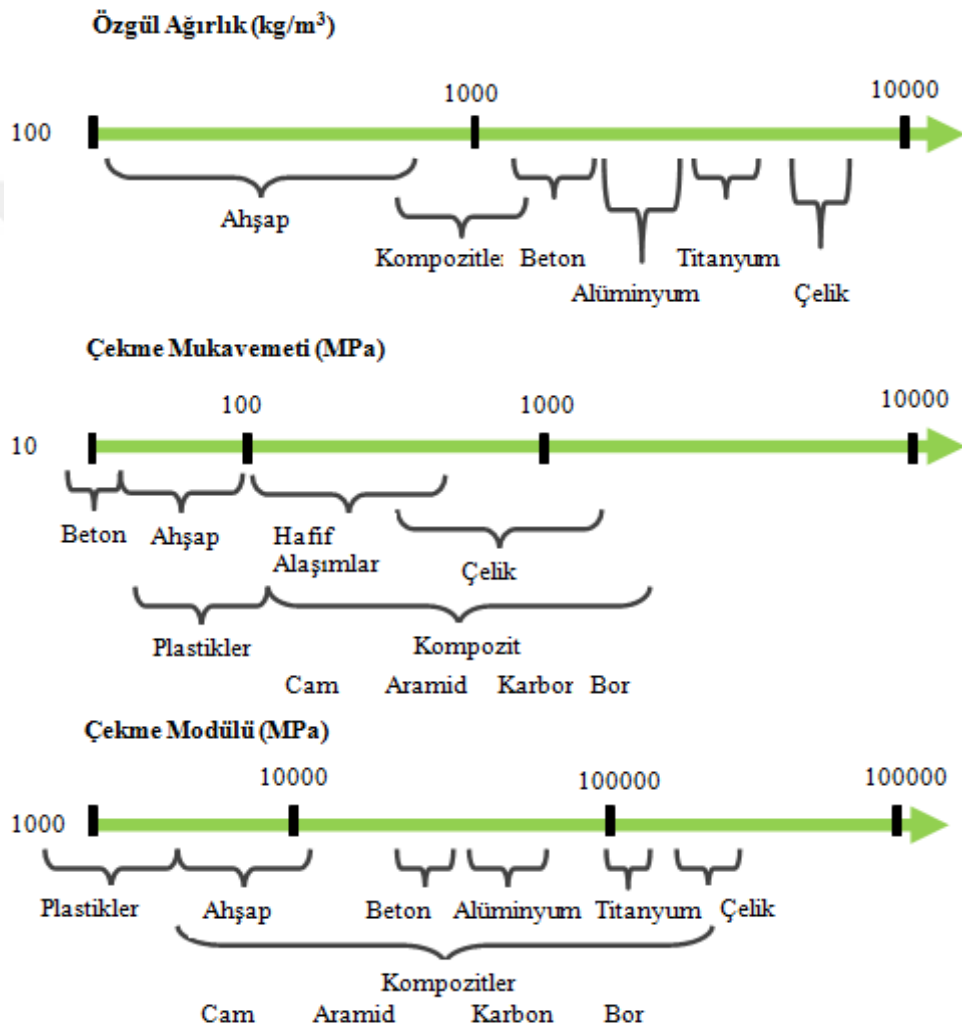
Kompozit üretim çıktıları, bileşimleri açısından takviye ve matris fazı olmak üzere iki temel bileşenden oluşur. Endüstriyel kullanıma uygun mekanik özellikler, bu iki temel fazın varlığı ile sağlanır. Matris fazı, takviye elemanlarını bir arada tutarak malzemenin bütünlüğünü korur. Aynı zamanda, kompozit malzemeye uygulanan kuvvetleri takviye elemanlarına ileterek malzemenin hasar görmesini önler (Ölmez vd. 2023).

Otomotiv sektöründe alternatif olan kompozit malzemeler, demir, çelik ve alüminyum gibi metal esaslı malzemelere göre çeşitli avantajlar sunmaktadır:

- Kompozitler, çelik ve alüminyumdan sırasıyla 4 ve 1,5 kat daha düşük yoğunluğa sahiptir. Bu sahip oldukları düşük yoğunluk, araçlarda kompozit malzeme kullanımının toplam maliyetleri ve yakıt tüketimini azaltmasına olanak tanır. Kullanılan malzeme yoğunluklarının düşürülerek taşıt kütlesinde her 45 kg azalma, yakıt tüketimini %2-3 oranında düşürmektedir.
- Kompozitlerin kompleks modellerde kolayca şekillendirilebilmesi, gerekli parça sayısını azaltır ve montaj sürelerini kısaltır.
- Kompozit malzemeler, düşük yoğunluklarına rağmen mükemmel dayanım ve rijitlik sunar. Bu yetenekleri sayesinde, yenilenemeyen petrol türevi yakıtların kullanıldığı taşıtlarda metal esaslı malzemelere alternatif oluşturmaktadır.

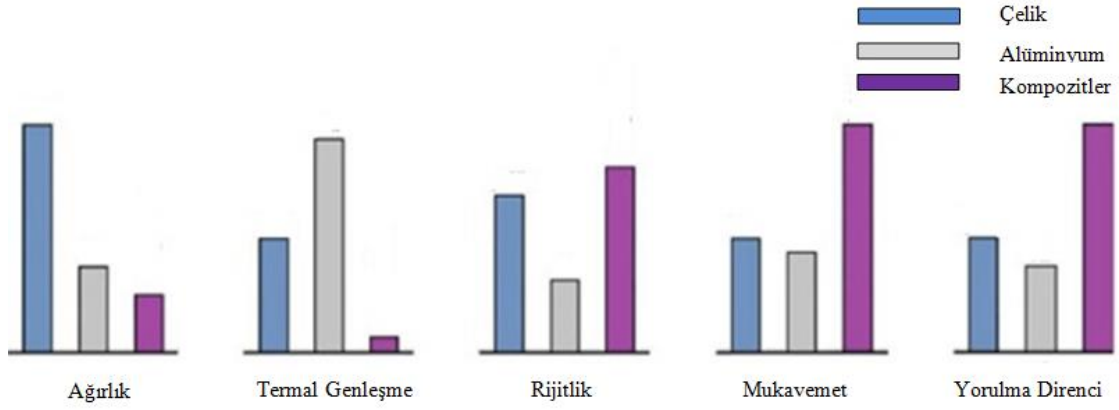
Literatürde yer alan çalışmalara göre, araştırmacılar sentetik elyaf yerine doğal elyaf

takviyesi kullanarak maliyetlerde %20'ye varan azalma ve ağırlıkta %30'a varan düşüş sağlamışlardır. Kabak, keten, sisal, kenevir ve diğer biyoreçineler içeren doğal elyaflar, otomotiv bileşenlerinin üretiminde araştırmacılar arasında giderek daha popüler hale gelmektedir (İnt. Kyn. 1). Kompozitlerin özgül ağırlıkları, çekme mukavemeti ve çekme modülü özellikleri, mühendislik malzemeleri ile karşılaştırılarak Şekil 2.1'de analiz edilmiştir.



Şekil 2.1 Kompozitlerin mühendislik malzemeleriyle karşılaştırılması (İnt. Kyn. 1).

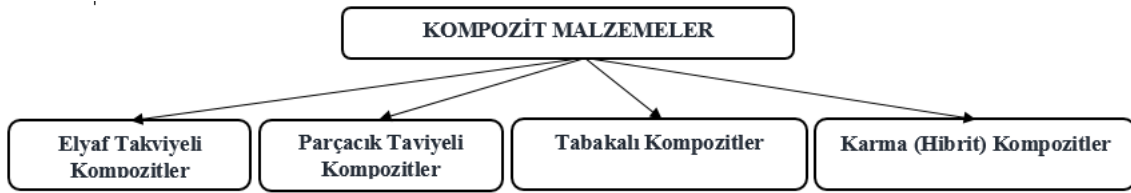
Kompozitlerin, çelik ve alüminyuma göre ağırlık, termal genleşme, rijitlik, mukavemet ve yorulma direnci değerlerinin karşılaştırılması Şekil 2.2' de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Geleneksel tek parça olarak davranan malzemeler ile kompozit malzemeler arasında karşılaştırma (Chawla vd. 2012).

2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit üretimi parçaları mekanik özellikleri, matris ve takviye fazlarının katkısıyla elde edilir. Bu doğrultuda, kompozit üretimi parçaları, matris ve takviye elemanlarına göre sınıflandırılır. Matris ve takviye malzemeleri ise Şekil 2.3'de gösterildiği gibi alt kategorilere ayrılmaktadır. Takviye fazları, matris malzemelerine kıyasla daha sert ve yüksek dayanımlı malzemelerden oluştuğundan, kompozit malzemelere akma/kopma dayanımı ve kırılma tokluğu gibi mekanik özelliklerinin artmasına yardımcı olur (Ölmez vd. 2023, Babu 2015).



Şekil 2.3 Kompozit malzemelerin yapısındaki bileşenlere göre sınıflandırılması.

2.2.1 Elyaf Takviyeli Kompozitler

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, matris malzemesi içerisinde dağılmış elyafların bulunduğu yapılardır. Bu elyaflar, kompozit malzemelere yüksek mukavemet, sertlik ve dayanıklılık gibi mekanik özellikler kazandırırken, matris malzemesi elyafları bir arada tutar ve dış etkilere karşı koruma sağlar. Elyaf takviyeli kompozitler, polimer, metal veya seramik gibi matris malzemeler ile cam, karbon, aramid veya doğal elyaflar kullanılarak

oluşturulur. Elyaf takviyeli kompozitler, matris malzemeleri ve elyaf türlerine göre farklı sınıflarda incelenebilir (Şen 2020).

Matris malzemelerine göre elyaf takviyeli kompozitler, polimer, metal ve seramik matrisli kompozitler olmak üzere üç ana kategoriye ayrılır. Polimer matrisli elyaf takviyeli kompozitler (*PMETK*), otomotiv, havacılık ve denizcilik gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılan bir sınıftır. Cam elyaf takviyeli polimerler (*CETP*) geniş kullanım alanı ve ekonomik olmasıyla dikkat çekerken, karbon elyaf takviyeli polimerler (*KETP*) yüksek mukavemet ve hafiflik sunarak özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Metal matrisli elyaf takviyeli kompozitler (*MMETK*), özellikle yüksek sıcaklık ve mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılırken, seramik matrisli elyaf takviyeli kompozitler (*SMETK*) kimyasal direnç ve yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren ortamlarda öne çıkmaktadır.

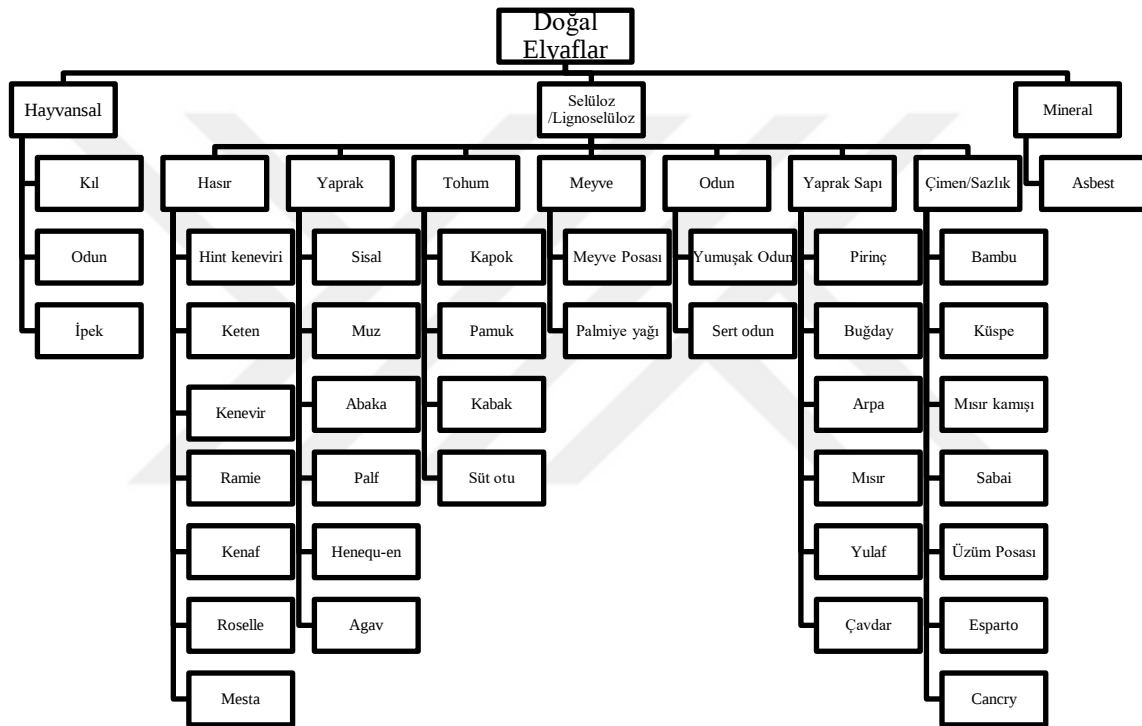
Elyaf türlerine göre sınıflandırıldığında, cam ve karbon elyaflar en sık tercih edilen elyaf türleridir. Cam elyaflar, yüksek mukavemet ve kimyasal direnç özellikleriyle polimer matrisli kompozitlerde yaygın olarak kullanılırken, karbon elyaflar düşük yoğunlukları ve yüksek mukavemet özellikleri nedeniyle havacılık, otomotiv ve spor ekipmanları gibi alanlarda tercih edilmektedir. Karbon elyaflar, özellikle yüksek performans ve düşük ağırlık gerektiren uygulamalarda metallerin yerini almaktadır. Karbon elyaf elyaflar, karbon atomlarının düzenli zincir yapısı sayesinde oldukça dayanıklı ve hafif bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Karbon elyaf üretimi prekürsör elyafların hazırlanması ve karbonizasyon işlemi ile gerçekleşmektedir. Bu süreç, karbon elyafların yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, korozyon direnci ve yüksek termal iletkenlik gibi üstün özelliklere sahip olmasını sağlar.

2.2.1.1 Doğal Elyaflar

Otomotiv sektörü, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de malzeme inovasyonu açısından önemli dönüşümler yaşamaktadır. Bu dönüşüm sürecinde doğal elyaflar, yenilikçi ve çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Keten, jüt, kenevir ve sisal gibi doğal elyaflar, hafiflik, dayanıklılık ve geri dönüştürülebilirlik özellikleri sayesinde otomotiv iç ve dış parçalarının üretiminde giderek daha fazla tercih edilmektedir. Ayrıca, doğal

elyafların kullanımı, araç ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini artırmakta ve karbon salınımını düşürmektedir. Bu çalışma, doğal elyafların otomotiv sektöründeki kullanım alanlarını, avantajlarını ve sektördeki sürdürülebilirlik hedeflerine katkılarını detaylı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır.

Doğal elyaflar kaynaklarına göre üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Şekil 2.4’ de doğal elyaf türleri geldikleri kaynak ailelerine göre sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Doğal elyafların genel sınıflandırılması (Alhijazi vd. 2020).

En çok kullanılan bitkisel elyafların fiziksel özellikleri Çizelge 2.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 Doğal elyafların bazı karakteristik özellikleri (Alhijazi vd. 2020).

Elyaf Tipi	Yoğunluk (gr/cm ³)	Kopma uzaması (%)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Pamuk Elyaf	1.55	7.0-8.0	287-597	5.50-12.60
Hint Keneviri Elyafı	1.30	1.5-1.8	393-773	26.50
Keten Elyaf	1.50	2.7-3.2	345-1035	27.60
Kenevir Elyafı	1.48	1.6	690	70.00
Rami Elyaf	1.50	3.6-3.8	400-938	61.40-128.00
Sisal Elyaf	1.50	2.0-2.5	511-635	9.40-22.00

Çizelge 2.1 (Devam) Doğal elyafların bazı karakteristik özellikleri (Alhijazi vd. 2020).

Hindistan Cevizi Elyafı	1.20	30.0	175	4.00-6.00
İpek Elyaf	-	20-25	252-528	7.32-11.22
Muz Elyaf	1.30	7.0	500	1.40
Yün Elyaf	-	25-35	122-175	2.34-3.42
Küspe Elyafı	1.25	-	290	17.00
Bambu Elyafı	1.50	3	575	27.00

Bitkisel doğal elyaf türleri yedi ana başlık altında sınıflandırılmaktadır. Çizelge 2.2’ de doğal elyaf türleri geldikleri bitki ailelerine göre sınıflandırılması gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 Doğal elyafların bitki aileleri (Alhijazi vd. 2020).

Elyaf Tipi	Genel Adı	Bitki Ailesi
Sak elyafları	Kenevir elyaf	Cannabis-sativa
	Jüt elyaf	Corchorus-capsularis
	Keten elyaf	Linum-usitastissimum
	Kenaf elyaf	Hibiscus-cannabius
	Roselle elyaf	Hibiscus-sabdariffa
	Rami elyaf	Boehmaria-nivea
	Rattan elyaf	Hordeum-vulgare
Yaprak elyafları	Abaka	Musa textilis
	Henequen	Agave-fourcroydes
	Ananas	Ananas-comosus
	Muz elyafı	Musa mannii
Tohum elyafları	Kapok	Ceibapentandra
	Pamuk	Gossypiumarboreum
Sap elyafları	Pirinç	Oryzasativa
	Bambu	Bambuseae
Meyve elyafları	Hindistan cevizi	Cocoosnucifera
	Demirhindi	Tamarindusindica
Kök elyafları	Sisal	Agavesisalana
	Taç	Calotropisgigantea
Parçacıklı Elyaf	Yer fıstığı kabuğu	Arachishypogaea
	Deniz kabuğu	Cypraecassisrufa
	Jack meyvesi	Artocarpusheterophyllus

Elyaf kabağı olarak bilinen “Luffa, Luffacylindrica” bitkisinin olgunlaşmış ve kurutulmuş meyvesinden elde edilir. Bol kaynaklara sahip ve gelişmekte olan ekonomik bir ürün olan elyaf kabağı bitkisi birçok ülkede yetiştirilmektedir. Çin'deki başlıca yetiştirme alanları arasında Jiangxi, Henan, Sichuan, Guangdong, Jiangsu ve Anhui bölgeleri bulunmaktadır (Chen vd. 2014). Geleneksel olarak kabak elyafı kişisel temizlik ve bulaşık yıkama amaçlı kullanılmıştır. Bilim ve teknolojiye ilerlemeler, kabak

elyaflarının çevre mühendisliği biyoteknoloji ve endüstriyel ürünlerde geniş çapta uygulanmasına yol açmıştır. Ayrıca, tüketiciler giderek daha fazla kabak elyafından üretilen günlük ürünleri tercih etmektedir. Resim 2.1’de kabak elyafın doğal oluşumu ve iç tabakaları gösterilmiştir.



Resim 2.1 Kabak elyafının doğal oluşum ve iç tabakaları (Rodriguez vd. 2022).

Mekanik Özellikler ve Dayanım: Kabak elyafı, doğal bir elyaf olarak hafif, esnek ve dayanıklı özellikleriyle bilinmektedir. Elyafly yapının sağladığı mikro gözenekli yapısı, yüksek bir çekme dayanımı sağlamaktadır. Bu özellikler, kabak elyafı kompozit malzemelerin üretimi için uygun bir takviye malzemesi haline getirmektedir. Yapılan araştırmalar, kabak elyafın çekme dayanımının 50-80 MPa arasında değişebildiğini ve elastik modülünün 1-2 GPa aralığında olduğunu göstermiştir (Rizzo vd. 2020). Bu değerler, özellikle hafif ve yüksek dayanımlı yapı malzemeleri üretiminde, kabak elyafın cazip bir alternatif olabileceğini göstermektedir. Ayrıca kabak elyafın darbe dayanımı da dikkate değerdir. Hüresel yapı ve esneklik, elyafın darbe kuvvetlerini absorbe etme kapasitesini artırır. Özellikle darbe dayanımı gerektiren ambalaj ve otomotiv uygulamalarında kabak elyafının potansiyel bir malzeme olduğu literatür de vurgulanmaktadır (Mida vd. 2018).

Kimyasal Kompozisyon ve Yapısal Özellikler: Kabak elyafın ana bileşenleri selüloz, hemiselüloz ve lignindir. Bu bileşenlerin oranları, elyafın mekanik özelliklerini ve biyolojik dayanıklılığını belirler. Kabak elyafında selüloz oranı %60-65 civarındadır, bu da elyafın sağlamlığını ve çekme dayanımını artırır (Zhao vd. 2019). Selüloz, kabak elyafında yüksek bir kristallik derecesi sağlamakta ve bu da elyafın mekanik dayanımını pozitif yönde etkilemektedir. Lignin ise elyafın sertliğini sağlar ve doğal bir biyopolimer olarak elyafın çevresel etkilerden korunmasına yardımcı olur. Ayrıca lignin içeriği, kabak elyafını biyobozunabilir ve çevre dostu bir malzeme haline getirmektedir (Da Silva vd. 2021).

Çevresel Yararları ve Biyobozunabilirlik: Kabak elyafı, tamamen biyobozunur bir malzeme olduğundan çevre dostu olarak kabul edilir. Plastik ve sentetik malzemelere alternatif olarak, kabak elyafı çeşitli ambalaj ve yapı malzemelerinde tercih edilebilir. Çevresel olarak düşük bir karbon ayak izine sahip olan bu elyaf, kullanım sonrası doğada hızlı bir şekilde parçalanabilmekte ve geri dönüştürülebilir yapısıyla atık miktarını azaltmaktadır (Borges 2019). Literatürde yapılan çalışmalar, kabak elyafının biyobozunabilirliğini ve çevre dostu yapısını vurgulayarak, bu elyafın sürdürülebilir tasarım uygulamalarında yaygın kullanımını desteklemektedir (Gupta ve Beom 2020).

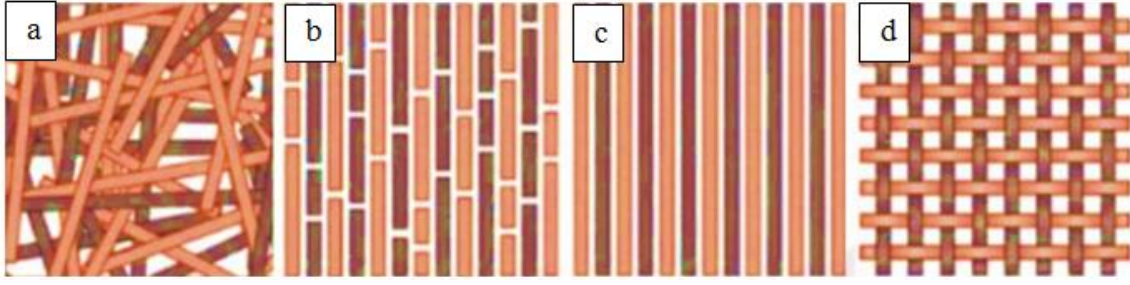
Kabak elyafı, endüstriyel ve ticari alanlarda çeşitli uygulamalarda kullanılabilen çevre dostu bir malzemedir. Doğal sünger olarak kimyasal süngerlerin yerini alabilen kabak elyafı, temizlik sektöründe ve kozmetikte cilt temizliği için güvenli bir seçenek sunar. Biyomedikal alanda ise biyouyumlu yapısı sayesinde doku mühendisliği, yara örtüsü ve yanık tedavisi gibi uygulamalarda tercih edilmektedir; antibakteriyel özellik kazanması amacıyla yapılan kimyasal modifikasyon çalışmaları da devam etmektedir. Kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılan kabak elyafı, hafifliği ve dayanıklılığı nedeniyle otomotiv ve yapı sektöründe ilgi görmektedir. Ayrıca, plastik ambalajlara alternatif olarak esnekliği ve dayanıklılığı sayesinde ambalaj malzemesi olarak tercih edilmektedir. Bu çok yönlü özellikleri, kabak elyafını sürdürülebilir endüstriyel çözümler için öne çıkan bir doğal malzeme haline getirmektedir (Fuqua vd. 2012, Okta 2021).

2.2.1.2 Yapay Elyafar

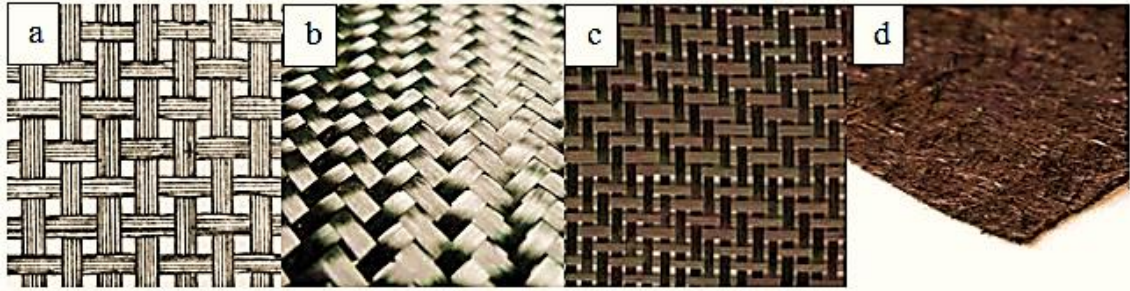
Karbon elyaf, çeşitli dokuma ve yönlendirme teknikleri kullanılarak farklı formlarda üretilebilir ve her üretim türü farklı mekanik özellikler ve estetik görünümler sunar. Yönlendirme tipleri Şekil 2.5’de, dokuma çeşitleri Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Düz dokuma, en basit ve yaygın kullanılan karbon elyaf dokuma türü olup, bir üst bir alt düzeniyle dengeli mukavemet ve esneklik sağlar. Bu dokuma türü, özellikle otomotiv parçaları, spor ekipmanları ve dekoratif yüzeyler gibi alanlarda kullanılır. Hasır dokuma, ise daha karmaşık bir desene sahip olup, iki üst bir alt veya daha farklı düzenlerde dokunarak daha esnek ve estetik bir yapı sunar. Bu yapı, özellikle havacılık, bisiklet çerçeveleri ve yüksek performanslı spor ekipmanlarında tercih edilmektedir. Saten dokuma, dört veya daha fazla elyafın bir üst bir alt şeklinde örülmesiyle oluşturulmakta ve çok pürüzsüz, parlak bir yüzey sağlamaktadır. Bu dokuma türü, lüks otomotiv iç kaplamaları ve tasarım ürünleri gibi yüksek performanslı uygulamalarda kullanılmaktadır. Keçeleme (*mat*) ise karbon elyafların rastgele yönlerde dağıtıldığı bir yapıdır ve izotropik mekanik özellikler sunarak farklı yönlerde mukavemet farklılıklarını azaltır. Bu yapı, otomotiv parçaları, kompozit paneller ve havacılık bileşenlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Aramid elyaf takviyeli kompozitler ise yüksek darbe dayanımı ve düşük yoğunluk sunan malzemeler olarak öne çıkmaktadır. Bu elyaflar, özellikle balistik koruma ve havacılık uygulamalarında kullanılmaktadır. Kevlar ve Twaron elyafları bu kategoride önemli yer tutar. Kevlar, yüksek darbe ve kesilme dayanımı sağlarken, Twaron yüksek mukavemet ve ısı direnci sunar.

Bu çeşitlilik, kompozit malzemelerin geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilir olmasını sağlar ve her bir elyaf türü ve dokuma şekli, uygulama gereksinimlerine göre özelleştirilebilecek avantajlar sunar.



Şekil 2.5 Karbon elyaf yönlendirme çeşitleri: a) Rastgele yönlendirilmiş süreksiz, b) Yönlendirilmiş süreksiz, c) Tek yönlü pekiştirilmiş sürekli, d) Örgü formunda (İnt. Kyn. 2).



Şekil 2.6 Dokuma çeşitleri, a) Düz elyaf dokuma, b) Hasır elyaf dokuma, c) Saten elyaf dokuma, d) Keçeleme (Mat) elyaf dokuma (İnt. Kyn. 2).

Sonuç olarak, elyaf takviyeli kompozitler, geniş bir yelpazede farklı uygulamalara hitap eden malzemelerdir. Matris ve elyaf türüne göre sınıflandırıldıklarında, her bir kompozit türü kendi özelliklerine ve kullanım alanlarına göre endüstride yerini bulmaktadır.

2.2.2 Parçacık Takviyeli Kompozitler

Parçacık takviyeli kompozitler, matris malzemesi içerisinde homojen bir şekilde dağılmış küçük parçacıkların bulunduğu kompozitlerdir. Bu parçacıklar, matrisin mekanik özelliklerini iyileştirerek sertlik, dayanıklılık ve bazen de özel termal veya elektriksel iletkenlik gibi nitelikler kazandırmaktadır. Parçacık takviyeli kompozitlerin üretiminde seramik, metal veya polimer matrisler kullanılmakta olup, bu matrislerin içerisine seramik, metal veya diğer takviye malzemeleri eklenmektedir. Parçacık takviyeli kompozitlerin avantajları arasında artırılmış sertlik ve mukavemet, aşınma direnci ve termal iletkenlik gibi özellikler yer almakta, bu sayede daha uzun ömürlü ve dayanıklı malzemeler elde edilmektedir. Ayrıca, bu kompozitler diğer kompozit türlerine kıyasla daha ekonomik olabilmektedir. Bununla birlikte, parçacıkların homojen dağılımını

sağlama zorluğu ve karmaşık üretim süreçleri dezavantajlar arasında sıralanmaktadır (Kılıçarslan 2020).

Parçacık takviyeli kompozitler, kullanılan matris malzemesine göre metal, polimer veya seramik matrisli kompozitler olarak sınıflandırılmaktadır. Metal matrisli parçacık takviyeli kompozitler, özellikle yüksek sıcaklık dayanımı ve mukavemet gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Alüminyum ve magnezyum matrisli kompozitler, hafifliği ve mukavemeti ile dikkat çeker. Polimer matrisli parçacık takviyeli kompozitler, polimer matris içerisine eklenen seramik veya metal parçacıklarla elde edilir ve özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde kullanılır. Epoksi ve polipropilen matrisli kompozitler, bu alanda yaygın kullanılan malzemelerdir. Seramik matrisli parçacık takviyeli kompozitler ise yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal direnç gerektiren alanlarda tercih edilir. Silikon karbür ve alümina matrisli kompozitler, bu türde yaygın kullanılan örneklerdir (Namalan 2022).

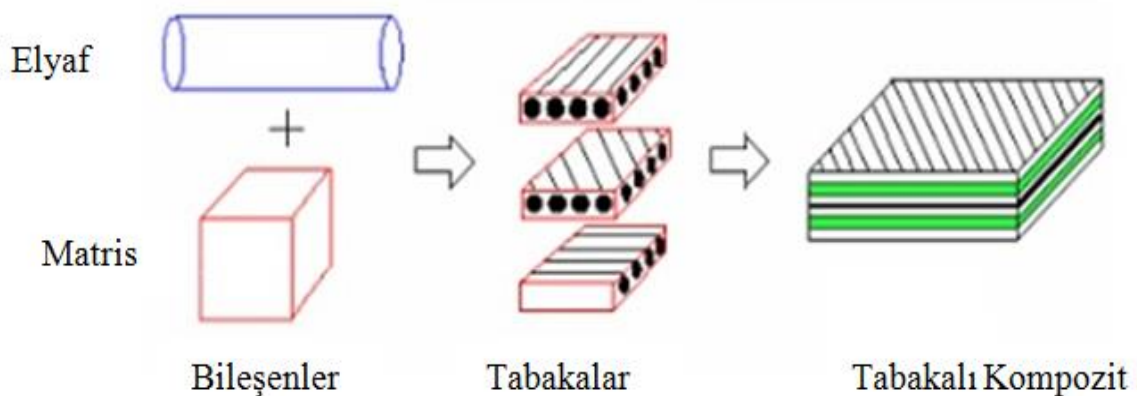
Takviye parçacıklarının türlerine göre parçacık takviyeli kompozitler de sınıflandırılabilir. Seramik, metal ve doğal parçacıklar kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Seramik parçacıklar, yüksek sıcaklık ve aşınma direnci sunarken, metal parçacıklar elektriksel ve termal iletkenlik sağlar. Doğal parçacıklar ise çevresel sürdürülebilirliği destekleyen biyokompozitler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bağlamda, bambu tozu ve keten elyaf takviyeli kompozitler, sürdürülebilir ve dayanıklı malzemeler sunarak endüstride ilgi görmektedir.

2.2.3 Tabaka Tasarımli Kompozitler

Tabaka yapılı kompozitler, farklı malzeme tabakalarının ardışık olarak bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Her bir tabaka, belirli mekanik, termal veya kimyasal özelliklerin optimize edilmesi amacıyla seçilir ve tabakalar birbirine yapıştırılarak tek bir yapı meydana getirilir. Bu tür kompozitler, farklı malzemelerin en iyi özelliklerini bir araya getirerek üstün performans sağlarlar. Tabaka tasarımı kompozitler, kullanılan malzeme türlerine göre çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. Polimer matrisli tabaka yapılı kompozitler, yüksek mukavemet ve hafiflik sunan yapılarıyla öne çıkar. Tabakalı kompozit yapısı Şekil 2.7' de gösterilmiştir. Bu grupta termoset

polimerler (*Epoksi, polyester, fenolik reçineler*) ve termoplastik polimerler (*Polietilen, polipropilen, naylon*) yer alır. Metal matrisli tabaka yapılı kompozitler ise yüksek sıcaklık ve aşındırıcı ortamlara dayanıklıdır. Alüminyum ve titanyum matrisli kompozitler, bu alanda yaygın olarak kullanılarak hafiflik, mukavemet ve yüksek sıcaklık dayanımı sağlar. Seramik matrisli tabaka yapılı kompozitler ise uzay ve nükleer endüstrilerde yüksek sıcaklık ve kimyasal direnç gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir (Sugözü 2024).

Tabaka yapılı kompozitler ayrıca yapısal özelliklerine göre simetrik ve asimetrik olarak sınıflandırılır. Simetrik tabaka yapılı kompozitlerde, her iki yüzeyde de aynı tür ve kalınlıkta malzeme tabakaları bulunur, bu yapı dengeli mekanik özellikler sağlar. Asimetrik tabaka yapılı kompozitlerde ise her iki yüzeyde farklı malzeme tabakaları kullanılır ve bu, belirli uygulamalar için optimize edilmiş performans sunar. Tabaka yapılı kompozitlerin uygulama alanları oldukça geniştir. Havacılık ve uzay endüstrisinde, hafiflik ve yüksek mukavemet gerektiren yapılar için tercih edilen bu malzemeler, kanatlar, gövde panelleri ve uydu bileşenleri gibi kritik parçalarda kullanılır. Otomotiv sektöründe ise yakıt verimliliğini artırmak ve araç performansını iyileştirmek amacıyla kaput, kapı panelleri ve şasi bileşenlerinde kullanılır. İnşaat ve altyapı projelerinde de dayanıklılık ve uzun ömürlülük sağlamak amacıyla köprüler, binalar ve altyapı elemanlarının güçlendirilmesinde tabaka yapılı kompozitlere yer verilmektedir.



Şekil 2.7 Tabakalı kompozit üretimi (Yozgat 2019).

2.2.4 Karma (Hibrit) Kompozitler

Hibrit kompozitler, modern mühendislik ve malzeme biliminde devrim niteliğinde yenilikler sunan önemli malzemeler olarak öne çıkmaktadır. Birden fazla farklı malzemenin kombinasyonundan oluşan bu kompozitler, her bir malzemenin en iyi özelliklerini bir araya getirerek üstün performans sağlamaktadır. Hibrit kompozitler, birden fazla farklı türde elyaf veya matris malzemesinin bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Bu kombinasyon, tek bir malzemenin sağlayamayacağı mekanik, termal ve kimyasal özelliklerin bir araya getirilmesini mümkün kılmaktadır. Örneğin, karbon elyaf ve cam elyafın birlikte kullanılmasıyla hem yüksek mukavemet hem de maliyet etkinliği elde edilebilir.

Hibrit kompozitlerin avantajları arasında yüksek mukavemet ve dayanıklılık, ağırlık azaltma, çeşitli özelliklerin kombinasyonu ve tasarım esnekliği yer almaktadır. Farklı malzemelerin güçlü yönlerini birleştiren bu kompozitler, hafif malzemelerin kullanılmasıyla yapısal ağırlığı azaltırken performansı artırmaktadır. Ayrıca, tek bir malzemede bulunmayan özelliklerin bir araya getirilmesiyle farklı uygulama alanlarında geniş bir kullanım imkânı sunmaktadır. Ancak, hibrit kompozitlerin dezavantajları arasında karmaşık üretim süreçleri ve yüksek maliyetler bulunmaktadır. Farklı malzemelerin bir araya getirilmesi, zaman zaman malzeme uyumsuzlukları ve performans düşüklüklerine de yol açabilmektedir (Verma vd. 2024).

Hibrit kompozitler, matris malzemelerine ve elyaf türlerine göre sınıflandırılabilir. Matris malzemesi, kompozitin yapı taşlarını bir arada tutan ve yük transferini sağlayan temel bileşendir. Polimer matrisli hibrit kompozitler, yüksek mukavemet ve düşük ağırlık özellikleri nedeniyle otomotiv ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu grupta termoset polimerler (*Epoksi, polyester, fenolik reçineler*) ve termoplastik polimerler (*Polietilen, polipropilen, naylon*) yer almaktadır. Metal matrisli hibrit kompozitler ise yüksek sıcaklıklara ve aşındırıcı ortamlara dayanıklılık gösterir ve genellikle havacılık, otomotiv ve askeri uygulamalarda tercih edilmektedir. Alüminyum matrisli kompozitler hafiflik ve mukavemet sağlarken, titanyum matrisli kompozitler yüksek sıcaklık dayanımı sunmaktadır. Seramik matrisli hibrit kompozitler ise özellikle

yüksek kimyasal direnç ve sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılır ve uzay ile nükleer endüstrilerde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Elyaf türlerine göre sınıflandırılan hibrit kompozitlerde mekanik özellikleri belirleyen, temel bileşenlerdir. Karbon ve cam elyaf hibrit kompozitler, yüksek mukavemet ve esneklik sağlamaktadır. Karbon elyaflar yüksek mukavemet sunarken, cam elyaflar daha ekonomik bir çözüm sunar. Aramid ve karbon elyaf hibrit kompozitler ise darbe dayanımı ve mukavemet sağlamaktadır; bu nedenle balistik zırh ve spor ekipmanlarında kullanılmaktadır. Doğal ve sentetik elyafların bir araya getirildiği hibrit kompozitler, çevresel sürdürülebilirliği artırırken mekanik performansı optimize etmektedir. Bu tür kompozitler, biyokompozitler olarak da adlandırılır ve otomotiv endüstrisinde iç trim parçalarında kullanılmaktadır.

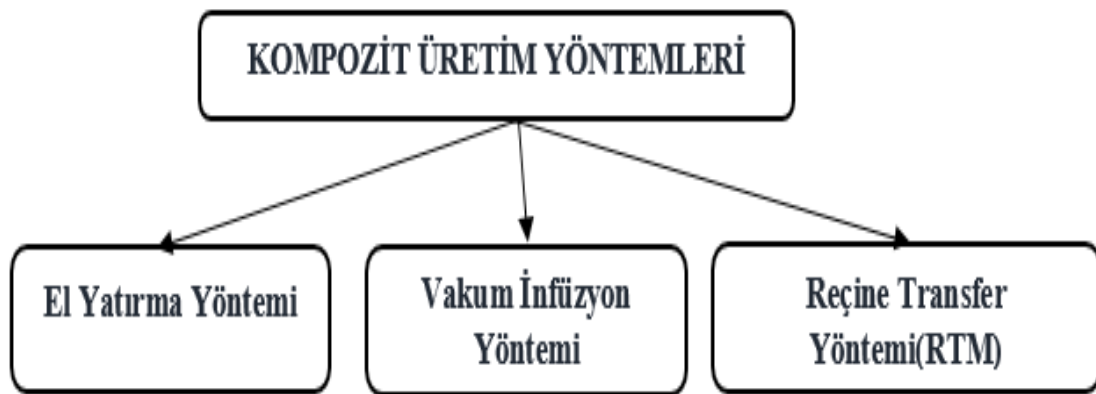
2.3 Kompozit Üretim Yöntemleri

El yatırma yönteminde elyaf haricinde en önemli birleşen epoksi ve sertleştirici seçimi ve hazırlanmasıdır. Fiziksel ve kimyasal süreç eksiksiz ve detaylı şekilde uygulanmalı ve takip edilmelidir.

Epoksi reçine ve sertleştirici bir araya geldiğinde, bir polimerizasyon reaksiyonu gerçekleşir. Bu reaksiyon, epoksinin sıvı halden katı hale geçmesini sağlar. Bu kimyasal reaksiyon olmadan epoksi reçine katılaşmaz ve istenen mekanik özellikleri elde edilemez. Ayarlanabilir sıcak pres’de kürleşme süresi hızlandırılır ve daha kısa sürede kürleşme tamamlanır. Epoksi ve sertleştiricinin doğru oranlarda karıştırılması, kürleşmiş malzemenin mekanik dayanıklılığını ve yapışma kapasitesini artırır. Karışımın homojen olması, malzemenin mukavemetini ve esnekliğini artırarak daha dayanıklı ve güvenilir bir yapı sağlar. Epoksi reçine ve sertleştirici karışımı, kimyasal direnç ve termal stabilite sağlar. Bu karışım, yüksek sıcaklıklara ve çeşitli kimyasallara karşı dayanıklı hale gelir, bu da endüstriyel uygulamalarda büyük bir avantaj sağlar. Epoksi ve sertleştirici karışımı, çalışma süresi ve kürleşme zamanını kontrol etmenizi sağlar. Farklı sertleştiriciler kullanarak, epoksinin çalışma süresini ve tam kürleşme zamanını ayarlayabilirsiniz. Çalışmamızda kürleşme süreci ısı altında 3 saat olarak ayarlanmıştır. Bu, uygulama sürecinde esneklik sağlar ve işlemi daha kontrollü hale getirir (Yuan 2020). Epoksi ve

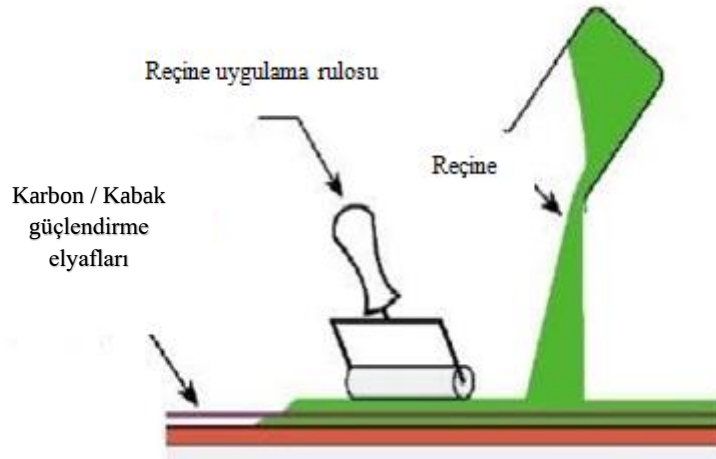
sertleştirici karışımı yaparken, üreticinin belirttiği doğru oranları kullanmak önemlidir. Genellikle karışım oranı, hacim veya ağırlık olarak belirtilir. Bu oranların doğru şekilde uygulanması, karışımın homojenliğini ve kürleşme sürecini etkiler. Karıştırma sürecinde epoksi reçine uygun bir kaba dökülür. Sertleştirici belirlenen oranda eklenir ve karışım üreticinin önerdiği süre boyunca mikser ile homojen olacak şekilde karıştırılır. Karışım tamamlandıktan sonra, epoksi reçine uygulama alanına dökülür veya fırça, rulo veya spatula ile yayılır. Kürleşme süresi boyunca karışımın yüzeyde düzgün bir şekilde yayılması sağlanmalıdır (Dinç 2024).

Mevcut yöntemlerden en basit olanı el yatırma yöntemidir. Kumaş halinde bulunan doğal ve sentetik elyaflar önceden hazırlanan kalıp içine yerleştirilir ve reçine elyaflar üzerinde boşluk kalmayacak şekilde fırça yardımıyla sürülür. El yatırma yönteminde epoksi ve polyester reçineler idealdir. Bununla birlikte, vinilester ve fenolik reçinelerde tercih edilmektedir. Reçinelerin kalıba yapışmasını önlemek için elyaf ve kalıp arasına jelkot veya ayırıcı uygulanır. Bu işlem sırasında reçinenin elyaf kumaşına iyi emilmesi çok önemlidir. Düşük sayıda üretim için uygun bir yöntemdir. Hava kabarcıkları oluşumu mekanik özellikleri, sistemin dezavantajlarından biridir. Çalışmada el yatırma yöntemi kullanılmıştır. Kompozit üretim yöntemleri Şekil 2.8’de gösterildiği gibi 3’e ayrılmaktadır.



Şekil 2.8 Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri.

El yatırma yöntemiyle kompozit üretimi Şekil 2.9' da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.9 El yatırma yöntemi ve reçine uygulaması (Kudachi ve Keerthi 2016).

Reçine transfer kalıplama (RTK) yöntemi ile kompozit üretimi; kapalı kalıp sistemi kullanılarak yüksek kaliteli ve karmaşık geometrili kompozit malzemelerin üretilmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem, özellikle otomotiv, havacılık, denizcilik ve rüzgar enerjisi gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretim süreci, iki parçadan oluşan kalıbın hazırlanmasıyla başlar; kalıp yüzeyi, reçinenin yapışmasını engellemek için ayırıcı malzemelerle kaplanır. Ardından, kuru elyaf takviyeleri kalıp içine düzenli bir şekilde yerleştirilir. Kalıp kapatıldıktan sonra düşük viskoziteli reçine, belirli bir basınç altında kalıba enjekte edilir ve vakum ile elyafların tamamen ıslanması sağlanır. Kontrollü sıcaklık ve basınç altında kürleme işlemi gerçekleştirilir ve son olarak, parça kalıptan çıkarılarak kenar düzeltme ve yüzey işlemleri yapılır.

Kapalı kalıp yöntemi; yüksek yüzey kalitesi, karmaşık geometrilerde üretim, otomasyon uyumu ve tekrarlanabilirlik gibi avantajlar sunar. Ayrıca, yüksek elyaf hacim oranı ile hafif ve dayanıklı kompozit malzemeler elde edilebilir. Ancak, yüksek kalıp maliyeti ve reçine akış davranışının iyi kontrol edilememesi gibi dezavantajlar da bulunmaktadır.

Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit üretimi; kapalı kalıp sisteminde kompozit malzeme üretimi için kullanılan, yüksek performanslı ve hafif parçaların üretimini sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem, özellikle havacılık, otomotiv, denizcilik ve rüzgar enerjisi sektörlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Vakum infüzyon yöntemi, düşük maliyetli ekipmanlarla yüksek elyaf hacim oranı ve mükemmel mekanik özellikler sunan kompozit parçalar elde edilmesine olanak tanır. Üretim süreci, öncelikle üretilecek

parçanın geometrisine uygun açık kalıp hazırlanıp, kalıp yüzeyine ayrıcı malzeme uygulanarak reçinenin yapışması engellenir. Ardından, kuru elyaf takviyeler kalıp üzerine yerleştirilir. Bu elyafların yönlendirmesi ve tabaka sayısı, kompozitin mekanik özelliklerini etkiler. Elyafların üzeri vakum poşeti ile kaplanır, hava tahliye ve reçine giriş hatları entegre edilir. Vakum pompası ile hava boşaltılarak, reçine elyaflar arasına düzgünce yayılır. Düşük viskoziteli reçine, vakum etkisiyle kalıba çekilir ve elyafları ısıtarak boşlukları doldurur. Reçine polimerleşip sertleştikten sonra, kompozit parça kalıptan çıkarılır ve gerekli işleme yapılır.

Vakum infüzyon yöntemi, yüksek elyaf hacim oranı, düşük reçine tüketimi, homojen yapı ve büyük parçaların üretimi gibi avantajlar sunar. Ayrıca, kalıp maliyeti RTK gibi kapalı kalıplı sistemlere göre daha düşüktür; ancak, uzun üretim süresi, operasyonel hassasiyet gerekliliği ve sınırlı üretim hızı gibi dezavantajları da bulunmaktadır.

2.4 Kompozit Test Uygulamaları

ASTM (*American Society for Testing and Materials*) kompozit testleri, kompozit malzemelerin performansını ve özelliklerini değerlendirmek için belirlenen standart test yöntemlerini içerir. Kompozit malzemeler, farklı materyallerin birleşimiyle oluşan ve her bir bileşenin kendi başına sağladığı özelliklerden daha üstün performans sergileyen malzemelerdir. ASTM, bu malzemelerin dayanıklılığı, esnekliği, sıcaklık değişimlerine karşı direnci, yük taşıma kapasitesi gibi çeşitli özelliklerini ölçmek için uluslararası standartlar geliştirmiştir. ASTM kompozit testleri, malzemenin mekanik, termal, elektriksel ve kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılır ve genellikle havacılık, otomotiv, inşaat ve denizcilik gibi endüstrilerde kritik öneme sahiptir. Bu testler, üreticilerin yüksek kaliteli ve güvenli kompozit malzemeler üretmelerini sağlamanın yanı sıra, mühendislerin ve tasarımcıların malzeme seçiminde doğru kararlar almasına yardımcı olur. Bu standart testler, ürünlerin dayanıklılığını garanti altına alır ve tasarım süreçlerinde riskleri azaltır.

2.4.1 Çekme Testi

ASTM (*American Society for Testing and Materials*), çekme testi yöntemleri için dünya

genelinde kabul gören standartlar sunmaktadır. Çekme testi, bir malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla uygulanan temel testlerden biridir. Bu test, malzemenin elastik modülü, akma dayanımı, kopma dayanımı, maksimum gerilme ve uzama gibi özelliklerini belirlemek için kullanılır. ASTM standartları, testin doğru ve tekrarlanabilir şekilde uygulanmasını sağlamak amacıyla detaylı prosedürler sunar.

Kompozit malzemeler için çekme testi ASTM D3039/D3039M: Bu standart, elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeler üzerinde çekme testi gerçekleştirmek için kullanılır. Çekme testi, kompozitlerin elyaf yönündeki ve matris içerisindeki dayanımını ölçmek amacıyla uygulanır (ASTM 3039/3039M-17, 2017). Numune hazırlanması, elyaf yönü ve test hızları gibi parametreler standartta detaylı şekilde açıklanır. ASTM D3039/D3039M, özellikle havacılık, otomotiv ve yapı sektöründe kullanılan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini değerlendirmek için önemli bir referanstır.

2.4.2 Üç Nokta Eğme Testi

Kompozit malzemelerde üç nokta eğme testi, mekanik performansı değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan standart bir yöntemdir. Bu test, özellikle kompozitlerin eğilme dayanımı, eğilme modülü ve kırılma davranışını ölçmek için uygulanır. ASTM ve ISO gibi uluslararası standart kuruluşları, bu test için detaylı prosedürler ve kurallar belirlemiştir.

ASTM D790 Plastik ve kompozit malzemeler için eğilme testi standardı, takviyeli veya takviyesiz termoplastik, termoset plastik ve kompozit malzemelerde eğilme (bükülme) özelliklerini belirlemek için kullanılır (ASTM D790-17, 2017). Bu standart, üç nokta eğme testi yöntemini tanımlar ve test sırasında numuneye uygulanan kuvvet, deformasyon ve bu kuvvetin uygulandığı mesafe gibi parametreleri detaylı olarak açıklar. Bu test kapsamında şu mekanik özellikler elde edilebilir:

- Eğilme dayanımı,
- Eğilme modülü,
- Maksimum eğilme gerilmesi.

Test Prosedürü:

1. Numune Hazırlığı: Standart, numune boyutları ve yüzey hazırlığı için öneriler sunar. Tipik olarak, numuneler dikdörtgen kesitli olmalıdır.
2. Test Düzenegi: Numune, iki destek noktası arasında yerleştirilir ve merkezde bir yük uygulanır. Destek noktaları arasındaki mesafe ve yükleme hızı gibi parametreler standartta tanımlanmıştır.
3. Veri Analizi: Eğilme dayanımı ve modül değerleri, yük-deformasyon grafiği kullanılarak hesaplanır.

2.4.3 Darbe Testi

Darbe; düşük, yüksek veya çok yüksek hızda kısa bir süre içinde bir malzeme veya yapı üzerine uygulanan anlık dış kuvvettir. Yüksek hızlı ve düşük hızlı darbeler, bir yapı veya malzeme üzerine gelen darbelere ayrılır. Düşük hızlı darbelerde darbe hızı 1 ila 10 m/s, yüksek hızlı testlerde 10 – 100 m/s arası hızlar ve çok yüksek hızlı testlerde 100 m/s’yi aşan hızlar uygulanır. Düşük hızda darbeler düşük enerjili darbeler olarak da bilinir. Kompozit malzemelerin darbeye maruz kalmayan yüzeylerinde meydana gelebilir. İçyapıda meydana gelen tabakalar arasında bir ayrışma olarak bilinen delaminasyon oluşabilir (Esendemir vd. 2020).

Ağırlık Düşürme Darbe Test Metodu: Ağırlık düşürme testi, Charpy ve Izod test metotları yerine malzemenin dinamik özelliklerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Ağırlık düşürme darbe test metodunda, malzemenin darbe enerjisini ve çarpma hızı istediğiniz şekilde değiştirebilir. İstenilen yükseklikten istenilen ağırlık malzeme üzerine düşebilir. Bu yöntem, malzemeyi delinme, saplanma ve tekrarlanan darbelere karşı test edebilir.

Test cihazı, ağırlıklar, veri yazılım sistemi, pnömatik geri sekme freni ve pnömatik bir sabitleyici içerir. Ağırlık tutma ve kaldırma bloğu altında bulunan çapraz kafayı ve vurucuyu istenilen yüksekliğe çıkararak yay desteği ile ağırlıkların malzeme üzerine düşürülmesini sağlar (Doğan 2020).

Böylece malzemeye istenilen hızda, yükseklikte ve darbe enerjisinde kuvvet uygulanır. Vurucu uç tipik olarak rijit yapıda, 12,7 mm çapında ve yarı küresel formda kullanılır; ancak istenirse farklı geometri ve yarıçapta uçlar kullanılabilir.

2.4.4 Termal Genleşme Testi (TGT)

ASTM E831 standardı, malzemelerin sıcaklık değişimi altındaki genleşme veya büzülme miktarını ölçmek amacıyla kullanılan bir test yöntemini tanımlar. Bu test, kompozit malzemelerin termal genleşme katsayısını belirleyerek, sıcaklık aralığında boyutsal stabilitenin tespiti için önemli veriler sağlar. Yöntem olarak, malzeme bir termomekanik analiz (TMA) cihazında test edilir. Bu test, sıcaklık kontrollü bir ortamda, yük altında veya yüke bağlı olmadan, malzemenin boyutsal değişimini kaydederek termal özelliklerini analiz eder (Venu vd. 2024, Raja vd. 2024).

2.4.5 Termal İletkenlik Testi

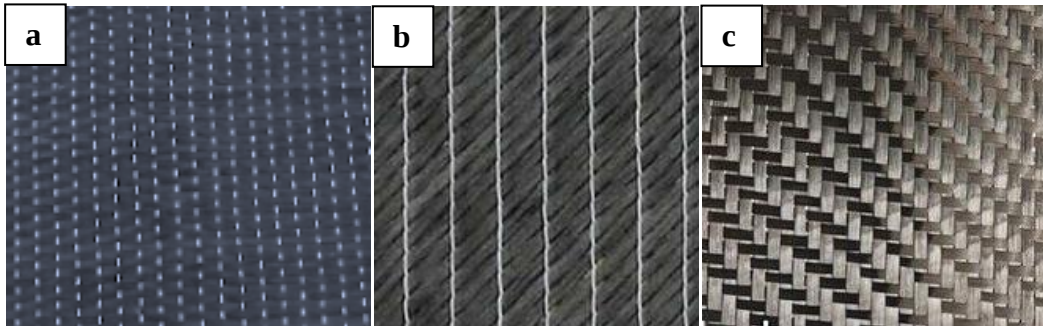
ASTM C177 veya ASTM E1461 standartlarına göre, lazer flaş yöntemiyle malzemelerin termal iletkenlik katsayısı belirlenir. Bu test, malzemenin ısı transfer kapasitesini değerlendirmek için kullanılır ve özellikle yüksek performanslı kompozitlerde hızlı ve etkili ölçümler sağlar. Yöntem, numune üzerine kısa süreli bir enerji uygulayarak, malzemenin yüzeyindeki sıcaklık artışını kaydeder. Bu sıcaklık artışı, malzemenin termal iletkenlik özelliğini belirlemek için analiz edilir. Lazer flaş yöntemi, özellikle hızlı tepki veren ve küçük örneklerle çalışılabilen bir test olanağı sunar, bu sayede malzemenin ısı transfer özelliklerinin hızlıca değerlendirilmesini sağlar (Ravichandran 2023).

3. MATERYAL ve METOT

Doğal elyaflardan olan kabak elyafı ve karbon elyafların farklı yönlendirme açıları kullanılarak hibrit kompozit üretimi yapılmıştır. Her tabaka birleştirilirken hazırlanan epoksi reçine uygulanmış ve sıcak preste basınç altında kürleşmesi sağlanmıştır. Üretilen kompozit malzemeler çekme, üç nokta eğme ve darbe test numune boyutlarına göre kesilmiş ve hazırlanmıştır. Çekme ve üç nokta eğme numunelerine yapılan testler Afyon Kocatepe Üniversitesi Makine Laboratuvarında bulunan autography test cihazında uygulanmıştır. Elde edilen veriler her tabaka için grafiğe çevrilmiş ve bulgular kısmında açıklanmıştır. Üretilen darbe test numunelerinden dört tabakalı olanlara 5 ve 15 joule, altı tabakalı olanlara ise 10 ve 20 joule darbe enerjisi uygulanmıştır. Elde edilen veriler grafiğe çevrilerek bulgular kısmında açıklanmıştır. Bu veriler doğrultusunda; otomotiv endüstrisinde tasarımcıların tampon, panjur, far çerçevesi ve trim parçaları için kullanılabileceği malzemelere alternatif oluşturacaktır.

3.1 Karbon Elyaf Çeşitleri

Karbon elyaf kumaş, hibrit kompozit malzemeyi oluşturan temel bileşendir. Reçine, karbon elyaf kumaş tabakaları arasından yayılır. Hibrit kompozit, kürleme işlemi tamamlandığında tek bir yapı olarak ortaya çıkar. Hibrit kompozit malzeme üretiminde (0°), (45°) ve (90°) yönlendirmeli düzlem örgü 300 g/m² yoğunluğa sahip karbon elyaf kumaşlar kullanılmıştır. Resim 3.1’ de üretim sürecinde kullanılan karbon elyaf kumaş tabakaları gösterilmektedir.

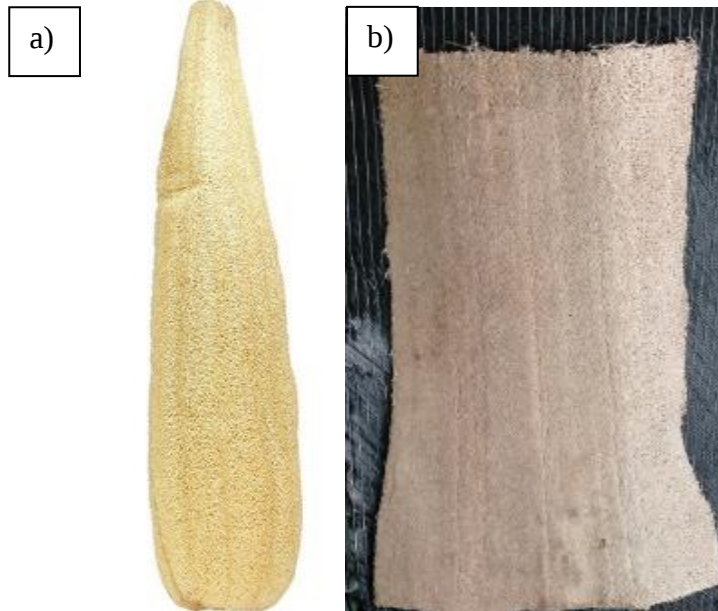


Resim 3.1 Karbon elyaf dokuma yönlendirmesi, a) 0°, b) 45° ve c) 90 °.

3.2 Kabak Elyaf

Türkiye’de kabak elyafı üretimi, kabak yetiştiriciliğinin yoğun olduğu bölgelerde yapılmaktadır. Özellikle Akdeniz, Ege ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri kabak üretiminde öne çıkan alanlardır. Bu bölgelerde kabak, sıcak iklim ve uzun büyüme mevsimi gereksinimlerini karşılayabildiği için geniş ölçekte yetiştirilmektedir. Antalya, Adana, İzmir ve Mersin gibi şehirler, kabak üretiminin ve buna bağlı elyaf elde etme çalışmalarının merkezlerindendir. Kabak elyafları, dayanıklı ve çevre dostu özellikleriyle öne çıkmakta, özellikle tekstil ve biyokompozit malzeme üretiminde kullanılmaktadır. Türkiye’de bu alandaki çalışmalar artmakta olup, yerel üretim ve ihracat potansiyeli açısından da ilgi görmektedir.

Çalışmada kullandığımız Resim 3.2’de gösterilen kabak elyafları Antalya Kumluca bölgesinde üretilen kabak elyaflarıdır. Maket bıçağıyla dikey ekseninde bir kesikle elyaf örgüsü açılarak levha haline getirilmiştir. Üretimde homojenlik sağlaması için epoksi uygulaması öncesinde pres altında yaklaşık 45 dakika ve 10 bar basınç altında bekletilmiştir.



Resim 3.2 a) Kabak elyafın doğal hali, b) Kabak elyafın açılmış ve üretim için tezgah üstünde hazırlanma görüntüsü.

Kabak elyafının ortalama fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Kabak elyafının ortalama kimyasal ve fiziksel özellikleri (Alhijazi vd. 2020).

Kimyasal Özellikler					
Selüloz (%)	Lignin (%)	Hemiselüloz (%)	Kül (%)	Sıcak Suda Çözünürlük (%)	%1 NaOH Çözünürlüğü (%)
55-74	8-23	10-30	0.4 ± 1	3.3	16.4
Fiziksel Özellikler					
Yoğunluk (g/cm ³)	Elyaf çapı (μm)	En/Boy oranı	S _{bahis} m ² /g	Gözenek çapı (ml/g)	Orta gözenek çapı (nm)
0.56-1.38	270±20	340 ±5	1-30	0.001-0.857	1.753 x 10 ³

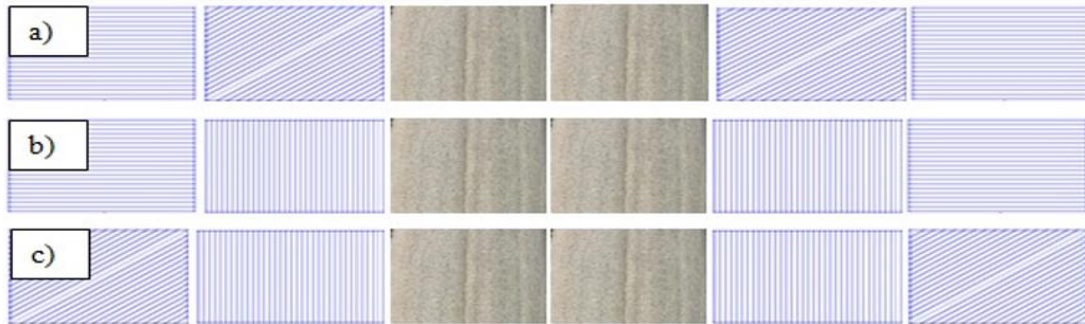
3.3 El Yatırma Yöntemiyle Kompozit Üretimi

Yapılan çalışmada, kabak elyafı ile birlikte [0°], [45°] ve [90°] açılarında yönlendirilmiş karbon elyaf kumaş olmak üzere üç farklı yönlenmede malzeme kullanılmıştır. Tabaka tasarımlarının farklı karbon elyaf yönlendirmelerine göre verilen kısaltmaları Çizelge 3.2’de ki gibi hazırlanmıştır. Ayrıca karbon elyaf ve kabak elyafın tabakalarının görünüşleri dört ve altı kat olarak sırasıyla Şekil 3.1 ve 3.2’de gösterilmiştir.

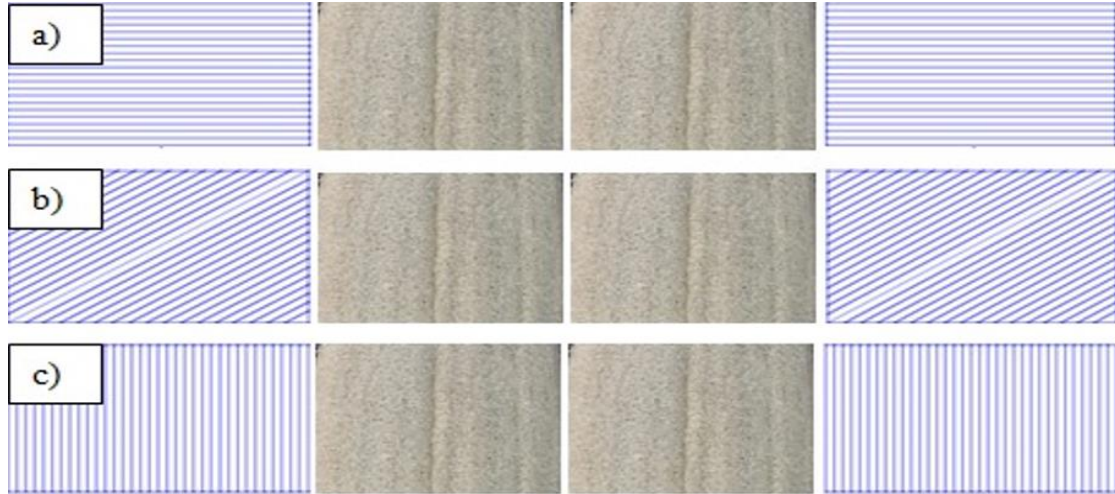
Çizelge 3.2 Üretimde kullanılan kompozit tabaka adlandırmaları.

Kompozit tabakalar	Tabaka açılımı	Et kalınlığı (mm)
[CK] ₁ ⁴	[90°/K/K/90°]	2
[CK] ₂ ⁴	[45°/K/K/45°]	2
[CK] ₃ ⁴	[0°/K/K/0°]	2
[CK] ₄ ⁶	[90°/45 °/K/K/45°/90°]	3
[CK] ₅ ⁶	[90°/0°/K/K/0 °/90°]	3
[CK] ₆ ⁶	[45 °/ 0°/K/K/0° /45 °]	3

CK_x^y: C: Karbon elyaf, K:Kabak elyafı, x: Numune adedi, y: Tabaka sayısı.



Şekil 3.1 Altı tabakalı kompozitler, a) [CK]₄⁶, b) [CK]₅⁶, c) [CK]₆⁶.



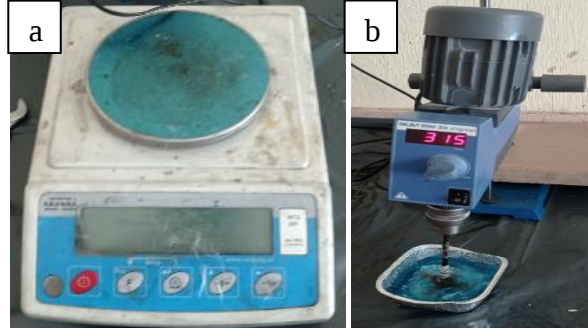
Şekil 3.2 Dört tabakalı kompozitler, a) $[CK]_1^4$, b) $[CK]_2^4$, c) $[CK]_3^4$.

Epoksi ve sertleştirici, reçine karışımını oluşturarak katılaşmasını sağlayan kimyasallardır. Tabaka kompozit malzeme üretiminde MGS H287 sertleştirici ve MGS L285 epoksi kullanılmıştır. Resim 3.3'de üretim sürecinde kullanılan epoksi ve sertleştiriciye ait görseller yer almaktadır.



Resim 3.3 Epoksi reçine ve sertleştirici.

Epoksi reçineleri, güçlü yapışma özellikleri, kimyasal direnci ve dayanıklılığı sayesinde farklı endüstrilerde yaygın olarak tercih edilip kullanılan bir malzemedir; ancak epoksi reçinelerin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için sertleştirici ile doğru oranda karıştırılması gerekmektedir. Üretimde, reçine ve sertleştirici olarak Resim 3.3'de gösterilen MGS L285 ve MGS H287 uygulanmıştır. Üretilen her bir plakanın yapımında, Resim 3.4.a'da hassas terazi kullanılarak 100 gram reçine ve 40 gram sertleştirici oranında birleştirilerek, Resim 3.4.b'deki karışım cihazı yardımıyla bir kap içinde 5 dakika boyunca karıştırılmıştır.



Resim 3.4 a) Karıştırma cihazı, b) hassas terazi.

Doğal ve yapay elyaf kumaşların üzerine, hazırlanan epoksi malzemesi fırça yardımıyla sürülerek dört ve altı tabakalı olacak şekilde numune kompozit parçalar oluşturulmuştur. Resim 3.5’de karbon ve kabak elyaflar düz masa üzerinde sırasıyla reçine emdirilerek birleştirilmesi gösterilmiştir.



Resim 3.5 Karbon ve kabak elyaflarının masa üzerinde sırasıyla reçine emdirilerek birleştirilme işlemi.

3.4 Pres ile Birleştirme (Kürleme) İşlemi

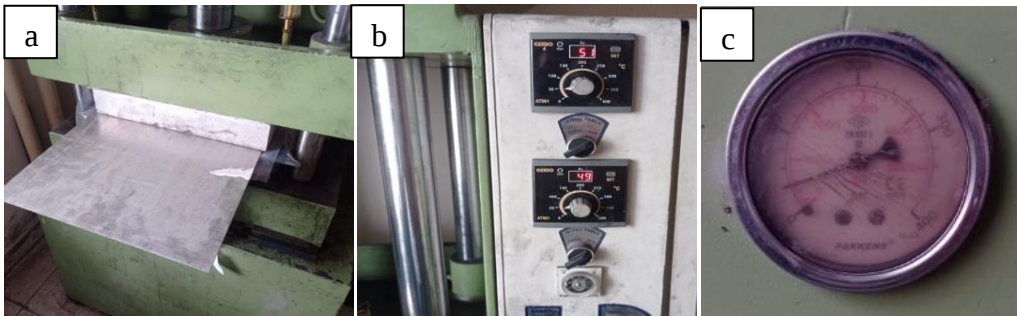
Sıkıştırma kalıplama, termoplastik veya termoset malzemelerin kalıplar arasında sıkıştırılarak şekillendirildiği bir üretim sürecidir. Bu süreçte, malzeme kalıba yerleştirilir ve sıcaklık ve basınç uygulanarak istenen şekle getirilir. Bu yöntem, özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde tercih edilir.

Sıkıştırma kalıplamanın adımları, belirli bir sırayla gerçekleştirilir. İlk olarak, kullanılacak kompozit malzeme, takviye elyafları ve matris reçinesi gibi bileşenlerin hazırlanmasıyla başlanır. Hazırlanan malzeme, sıcaklık olarak alt ve üst tablalar yaklaşık 50 °C civarında sabit tutulan, basınç değeri ise 20 bar'a getirilen pres'te alt kalıba yerleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan pres Resim 3.6'de görülmektedir. Sonrasında, üst kalıp alt kalıpla birleştirilir ve yüksek basınç ve sıcaklık uygulanarak malzemeye istenen şekil verilir. Son adımda, şekillendirilmiş malzeme soğutulur ve kalıptan çıkarılır.



Resim3.6 Kompozit üretiminde kullanılan sıcak pres.

Sıkıştırma kalıplama hem termoplastik hem de termoset kompozitlerin üretiminde kullanılır. Termoplastikler, ısıtıldığında eriyip soğutulduğunda sertleşen malzemelerdir. Termosetler ise bir kez sertleştikten sonra tekrar erimezler. Test numunelerim bu kapsamda değerlendirildiğinde termoset malzeme sınıfındadır ve tekrar ısıyla eritilemezler.



Resim 3.7 Pres altında uygulama, a) Baskı tablaları, b) Tabla rezistans gösterge ve potansları, c) Pres basınç manometresi.

Hazırlanan numune parçaları, Resim 3.7.a' da gösterilen tablaları 50 °C dereceye ısıtılmış hidrolik pres, 20 bar basınç altında 180 dakika boyunca sıkıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Ardından, pres tablalarındaki rezistanslar kapatılarak kademeli soğuma süreci başlatılmış ve yaklaşık 45 dakika sonra numune parçaları pres tablalarından düz plaka formunda çıkarılmıştır.

Üretilen farklı yönlendirme açılara sahip hibrit malzeme plakaları; çekme, üç nokta eğme ve darbe test numuneleri için gereken boyutlara, Resim 3.8' de gösterilen Einhell TC-SB 200/1 modeli şerit testere kullanılarak kesilmiş ve boyutlandırılmıştır.



Resim 3.8 Şerit testere cihazı.

3.5 Darbe Testi

Darbe, bir malzeme veya yapı üzerine çok kısa bir zaman diliminde uygulanan ani dış kuvvet olarak tanımlanabilir ve bu kuvvet düşük, orta veya yüksek hızlarda gerçekleşebilir. Darbeler genellikle düşük hızda veya yüksek hızda meydana gelen olaylar olarak sınıflandırılır. Çalışmamızda düşük hızlı darbe test metodu uygulanmıştır.

Düşük hız darbe testlerim Hitit Üniversitesinin Bilimsel Teknik Uygulama ve Araştırma

Merkezi'nde (*HÜBTUAM*) uygulanmıştır. Buradaki cihaz, Resim 3.9' da gösterilen Instron / Ceast 9350-Fractovis Plus darbe test makinesidir. Test uç çapı olarak 12,7 mm çapta ve 4,926 kg ağırlığa sahip yarım küre sert bir uç kullanılır. Darbenin numuneye uygulanmasından sonra vurucu, yük sinyalleri oluşturur ve bu sinyaller yük verisi şeklinde bilgisayarda ki veri toplama belleğine iletilir. Toplanan veriler, veri toplama yazılımına aktarılarak test sonuçlarına ilişkin verilerin elde edilmesini sağlar. Testler, oda sıcaklığında (26 ± 1 °C) uygulanmış ve kürenin serbest bırakılan yüksekliği dört tabakalı numuneler için 5 ve 15 J, altı tabakalı numuneler için 10 ve 20 J olacak şekilde yazılım vasıtasıyla hesaplanıp otomatik olarak belirlenmiştir. Makinenin uygulayabildiği enerji aralığı 2 - 1800 J aralığındadır. ASTM D3763 standartlarına uygun şekilde testler uygulanmıştır.



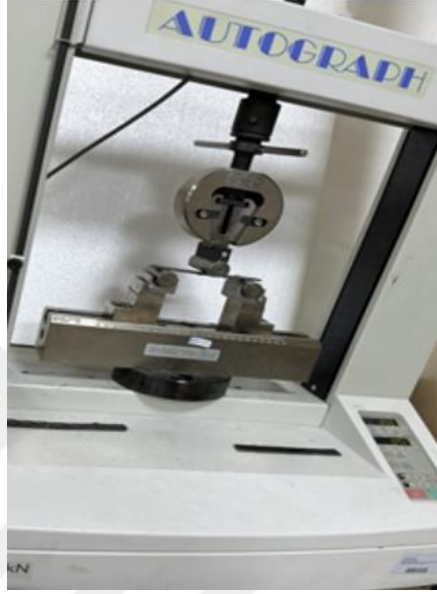
Resim 3.9 Instron / ceast 9350 düşük hız darbe test cihazı.

3.6 Üç Nokta Eğme Testi

ASTM D7264, "Elyaf Takviyeli Polimer Matris Kompozitlerinde Eğilme Özelliklerinin Belirlenmesi" başlıklı bir testtir. Bu test, elyaf takviyeli kompozit malzemelerin eğilme dayanımını, eğilme modülünü ve diğer ilgili özelliklerini belirlemek için kullanılır.

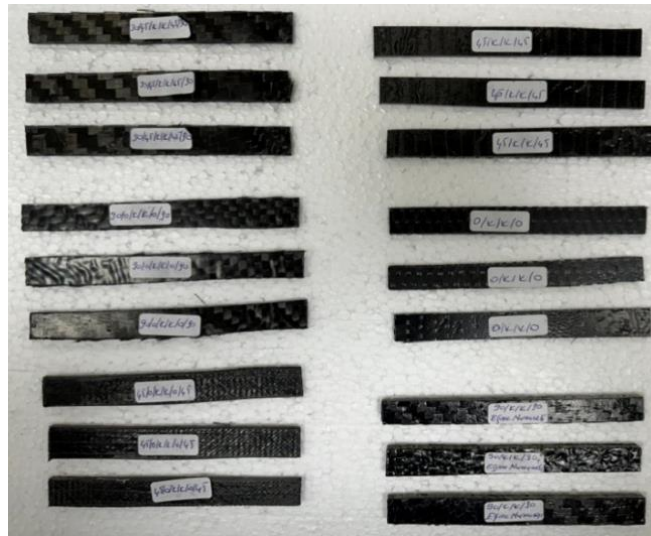
ASTM D7264 testinin amacı, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini değerlendirmek ve karşılaştırmak için güvenilir ve tekrarlanabilir bir yöntem sunmaktır.

Üç nokta eğme testinde kullanılan maksimum 10 kN' luk Autograph marka test cihazı Resim 3.10' da gösterilmiştir.



Resim 3.10 Eğme test cihazı görüntüsü.

Resim 3.11' de, üçerli gruplar halinde hazırlanan $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$, $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$ ve $[CK]_6^6$ eğme test numuneleri test öncesi hazırlanma görüntüsü verilmiştir.



Resim 3.11 Test öncesi üç nokta eğme numuneleri.

Test adımları sırasıyla uygulanarak hibrit kompozit numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. İlk aşamada, numuneler ASTM D7264 standardına uygun 13 x 130 mm boyutlarda kesilmiş ve yüzeyleri temiz ve düzgün olacak şekilde hazırlanmıştır. Sonrasında, üç nokta eğilme test cihazı uygun destekler ve yükleme burcu ile donatılarak test için hazır hale getirilmiştir. Destekler arasındaki mesafe, numunenin boyutlarına ve test gereksinimlerine göre ayarlanmıştır. Üçüncü aşamada, numune dikkatlice desteklerin üzerine yerleştirilmiş ve tam ortasına gelecek şekilde yükleme burcuyla hizalanmıştır. Testin başlatılmasında, ASTM D7264 standardına uygun bir yükleme hızı ayarlanmış, ardından test cihazı çalıştırılarak yük uygulamaya başlanmıştır. Hibrit kompozit numunenin alt kısmındaki destekler arasındaki mesafe 100 mm olarak belirlenmiş, destekler arası mesafe oranı ise 10'dan büyük olacak şekilde konumlandırılmıştır. Ayrıca, üst çenenin hareket hızı 1 mm/dakika olacak biçimde bilgisayar yazılımına tanımlanmıştır. Test sırasında, numuneye uygulanan kuvvet ve orta noktasındaki sapma sürekli olarak ölçülmüş, elde edilen veriler düzenli bir şekilde kaydedilmiştir. Test, numune kırılıncaya ya da belirli bir sapmaya ulaşıncaya kadar devam ettirilmiş; tamamlandığında cihaz durdurulup numune dikkatlice çıkarılmıştır. Test cihazının yazılım programı kullanılarak her numuneye ait kuvvet-deformasyon grafiği elde edilmiştir. Test verileri ve aşağıda Denklem 3.1 kullanılarak numunelerde ki özellikler hesaplanabilir.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (3.1)$$

Denklemden, b numunenin genişliği, σ_f eğilme gerilmesi, F uygulanan maksimum kuvvet, h numunenin kalınlığı ve L mesnet noktaları arası mesafe olarak tanımlanmıştır.

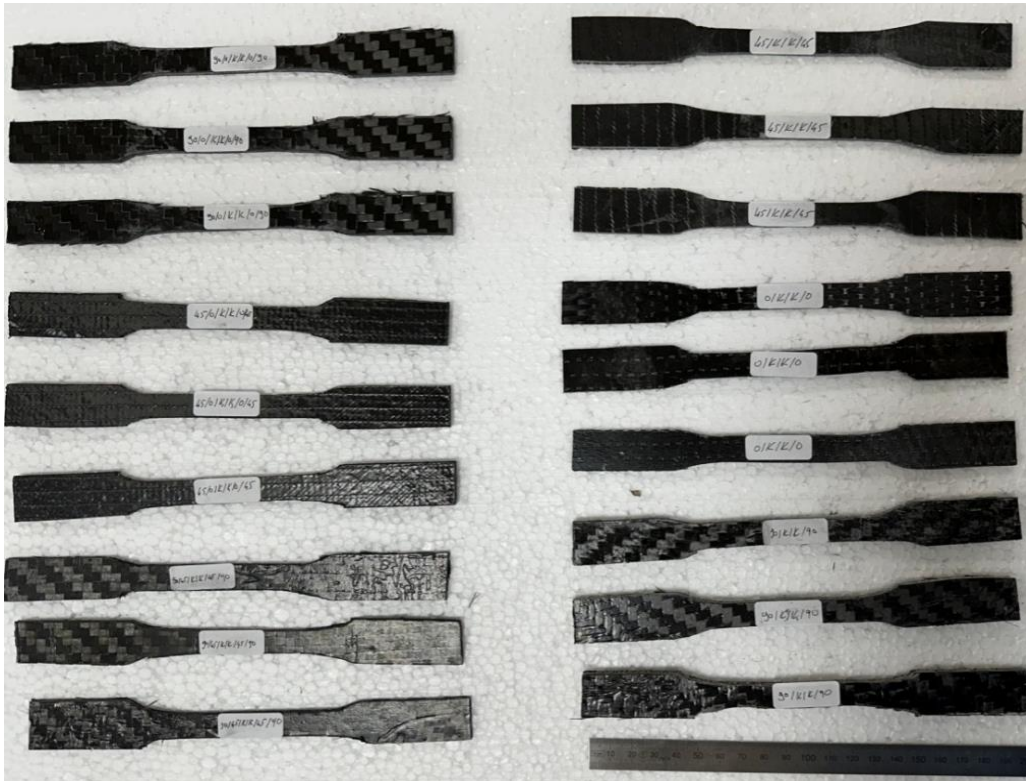
Eğilme testleri sonucunda, kompozit malzemelerin mekanik performansını değerlendirmek amacıyla eğilme dayanımı, eğilme modülü ve eğilme deformasyonu gibi önemli parametreler hesaplanabilir. Eğilme dayanımı, malzemenin kırılma anındaki maksimum gerilme değerini ifade eder ve malzemenin uygulanan yüke karşı direncini belirler. Eğilme modülü, malzemenin elastik deformasyon aşamasındaki eğilme sertliğini tanımlar ve bu değer, malzemenin eğilme altında deformasyona karşı gösterdiği rijitlik derecesini gösterir. Son olarak, eğilme deformasyonu, malzemenin yük altında ne kadar

şekil değiştirdiğini ifade eder ve elastik davranış sınırları içinde malzemenin deformasyon miktarını ölçer. Bu parametreler, malzemenin uygulama alanlarına uygunluğunu belirlemek için kritik verilerdir.

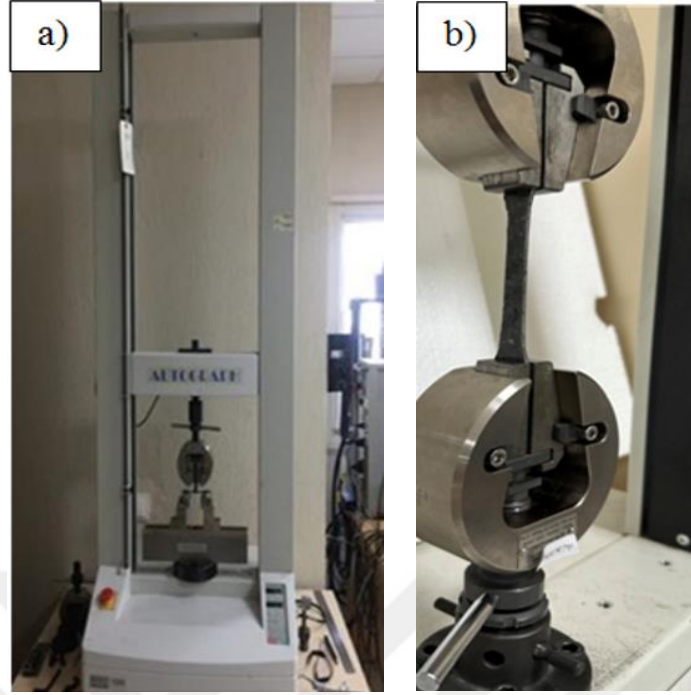
3.7 Çekme Testi

ASTM D 3039 standartlarına göre; bir test numunesinin kopana dek tek eksende çekme kuvvetine maruziyetine ve test numunesinin karakter özelliklerini belirlemek için uygulanan bir test işlemidir. Çekme testi sayesinde hibrit kompozit malzemenin gerilme karakteristikleri belirlenmektedir. Resim 3.11’ de standartlara göre boyutlanan numunelerinin çekme testleri 26 ± 1 °C ortam sıcaklığında ve 1 mm /dakika çekme hızıyla uygulanmıştır. Resim 3.13’de uygulamada, test numunesi test cihazına yerleştirilir ve iki parçaya ayrılana dek çekme kuvvetine maruz bırakılır.

Resim 3.12’de, üçerli gruplar halinde hazırlanan $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$, $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$ ve $[CK]_6^6$ çekme test numuneleri test öncesi görüntüsü verilmiştir.



Resim 3.12 Test öncesi çekme numuneleri.



Resim 3.13 a) Çekme test cihazı, b) Çekme test cihaz çenesine numunenin yerleştirilmesi.

Kuvvete maruziyet süresinde, kesit alanında ki uzama miktarı tatbik edilen kuvvete orantılı bir şekilde kayıt altına alınmıştır. Uzama esnasında değişim verileri aşağıdaki denklem 3.2 yardımıyla hesaplanabilir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} = \frac{L - L_o}{L_o} \quad (3.2)$$

“ ΔL ” boydaki uzama, “ L_o ” başlangıç uzunluğu ve “ L ” ise son uzunluktur. Denklem 3.3’ de kuvvet verileri yerine konularak gerilme değerleri hesaplanabilir.

$$\sigma = \frac{F_n}{A} \quad (3.3)$$

“ σ ” gerilme, “ A ” ise standart kesit alanını ve “ F_n ” kuvveti belirtmektedir.

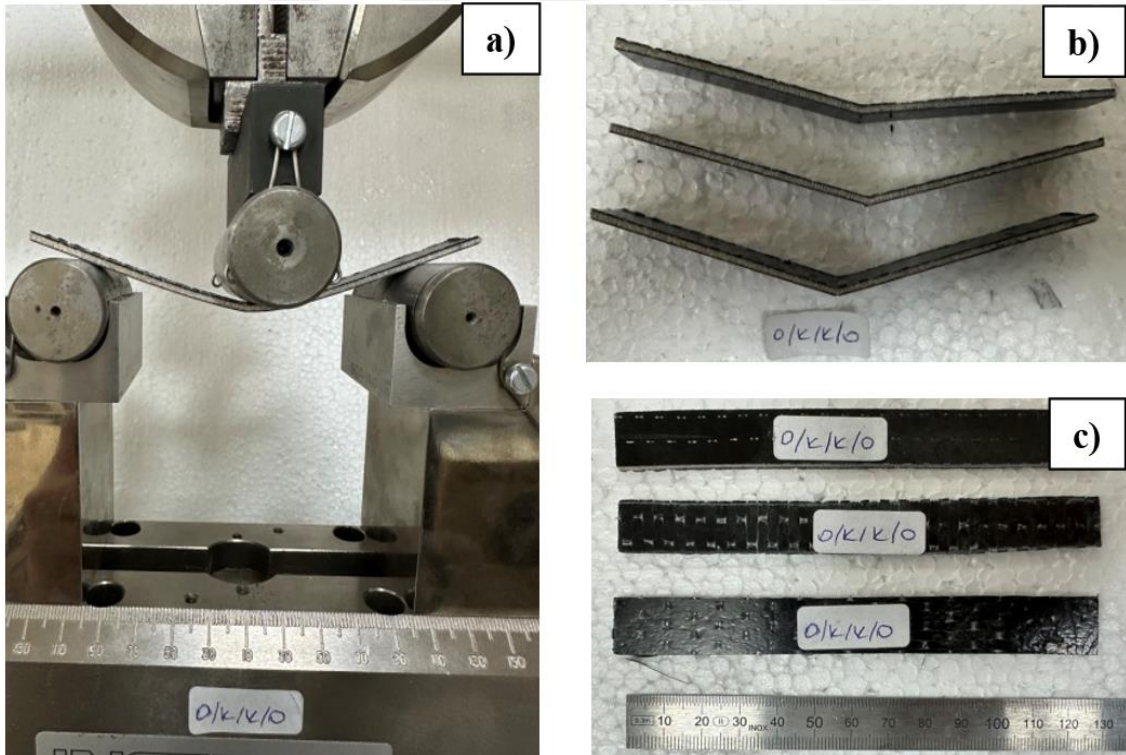
4. BULGULAR

4.1 Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

Çalışmada, üç farklı koşulda gerçekleştirilen üç nokta eğme testi kapsamında, $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$, $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$ ve $[CK]_6^6$ kompozit malzemelerin kuvvet-deformasyon davranışları incelenmiştir. Her bir gruptan 3'er adet numune test edilmiştir. Test edilen numunelerin ortalamaları alınarak maksimum kuvvet ve deformasyon değerleri hesaplanarak grafikleri çizilmiştir.

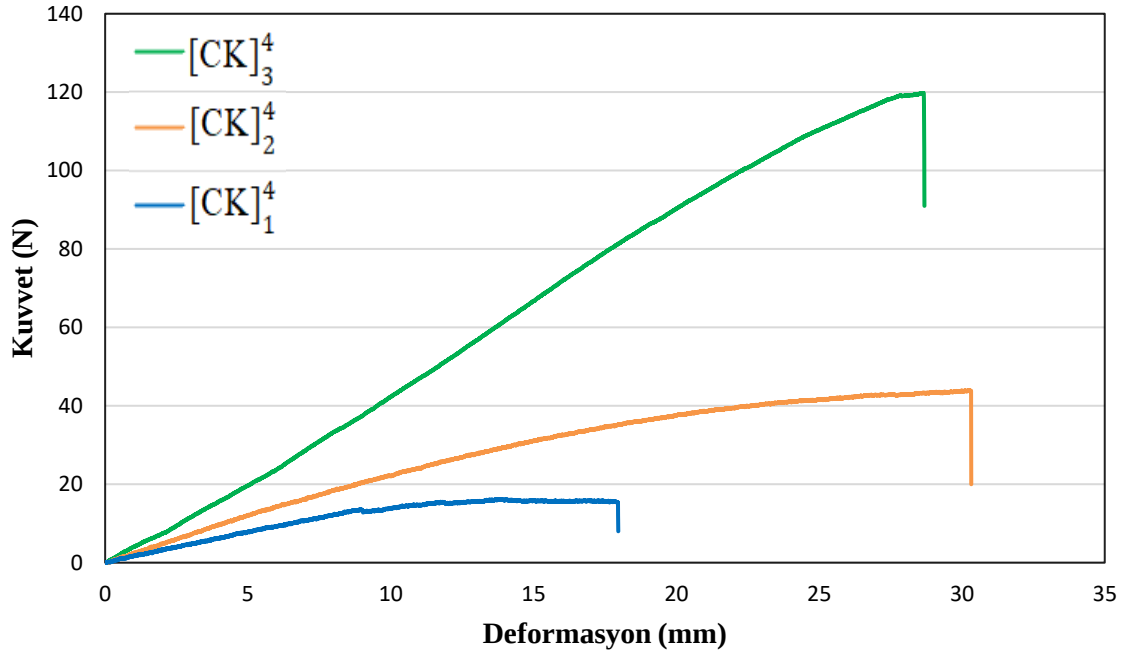
4.1.1. Dört Tabakalı Kompozit Plakaların Üç Nokta Eğme Test Sonucu

Dört tabakalı ($[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$) kompozit plakaların üç nokta eğme testi sırasında çekilen resimler Resim 4.1' de gösterilmiştir.



Resim 4.1 $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$ Üç nokta eğme testi görüntüleri, a) Test sırasında, b) Test sonrası, c) Test öncesi.

Şekil 4.1' de dört tabakalı $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$ kompozit plakaların üç nokta eğme testi sonucunda elde edilen kuvvet-deformasyon eğrisini göstermektedir.

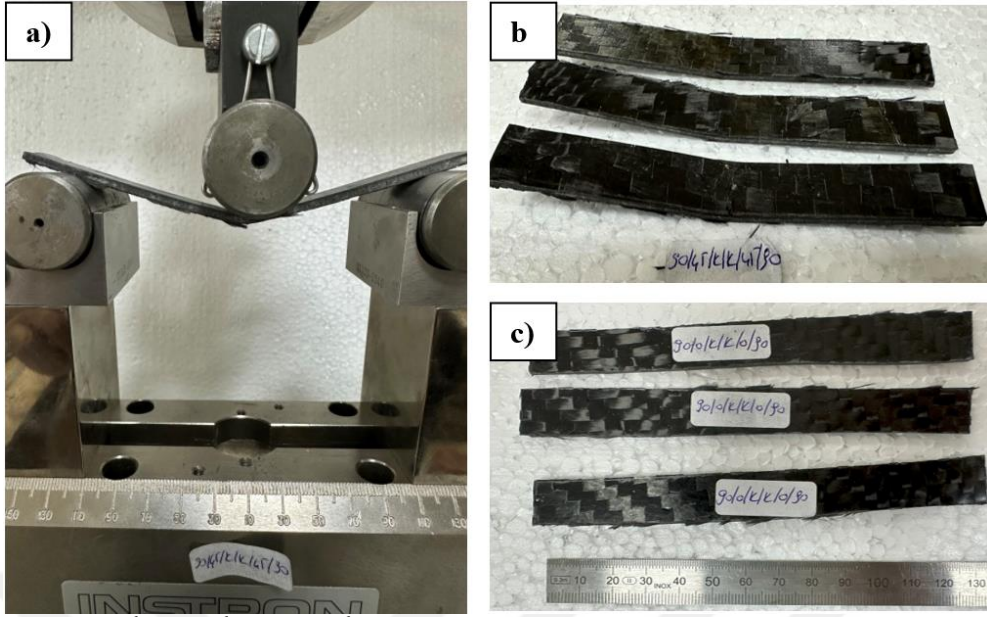


Şekil 4.1 $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$ Kompozit plakaların kuvvet - deformasyon grafiği.

Yapılan üç nokta eğme test sonuçlarına göre, 0° elyaf yönlendirmesine sahip numune $[CK]_3^4$ en yüksek dayanımı göstererek yaklaşık 120 N kuvvet altında 27 mm deformasyona ulaşarak numune kırılmıştır. 45° elyaf yönlendirmesine sahip numune $[CK]_2^4$, yaklaşık 45 N kuvvetle 30 mm deformasyona ulaşarak numune kırılmıştır. 90° elyaf yönlendirmesine sahip numune ise $[CK]_1^4$ en düşük kuvvet göstermiş olup, yaklaşık 20 N kuvvet altında 18 mm deformasyonda numune de kırılma görülmüştür. $[CK]_3^4$ numunesi en yüksek mukavemet değerine, $[CK]_2^4$ ise en yüksek uzama değerine sahip olduğunu görülmüştür. Bu üç nokta eğme test sonuçlar doğrultusunda, karbon elyafın yönlenme açısının, malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir.

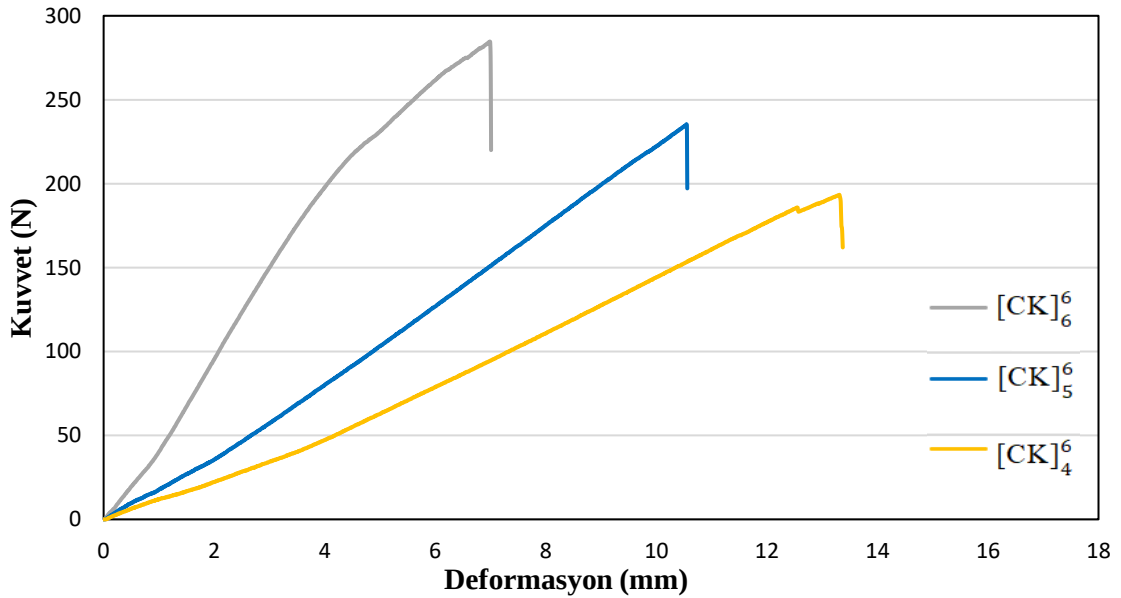
4.1.2 Altı Katmalı Kompozit Plakaların Eğme Testi Deneyi

Altı tabakalı $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$ ve $[CK]_6^6$ kompozit plakaların üç nokta eğme testi sırasında farklı yükleme aşamalarında çekilen görüntüleri Resim 4.2’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Resim 4.2 $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$ ve $[CK]_6^6$ Üç nokta eğme testi görüntüleri, a) Test sırasında, b) Test sonrası, c) Test öncesi.

Şekil 4.2’ de Altı tabakalı $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$ ve $[CK]_6^6$ kompozit plakaların üç nokta eğme testi sonucunda elde edilen kuvvet-deformasyon eğrisini göstermektedir.



Şekil 4.2 Altı tabakalı $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$ ve $[CK]_6^6$ Kompozit plakaların kuvvet-deformasyon grafiği.

Yapılan üç nokta eğme test sonuçlarına göre, 45° ve 0° karbon elyaf yönlendirmesine sahip numune $[CK]_6^6$ en yüksek dayanımı göstererek yaklaşık 280 N kuvvet altında 7 mm

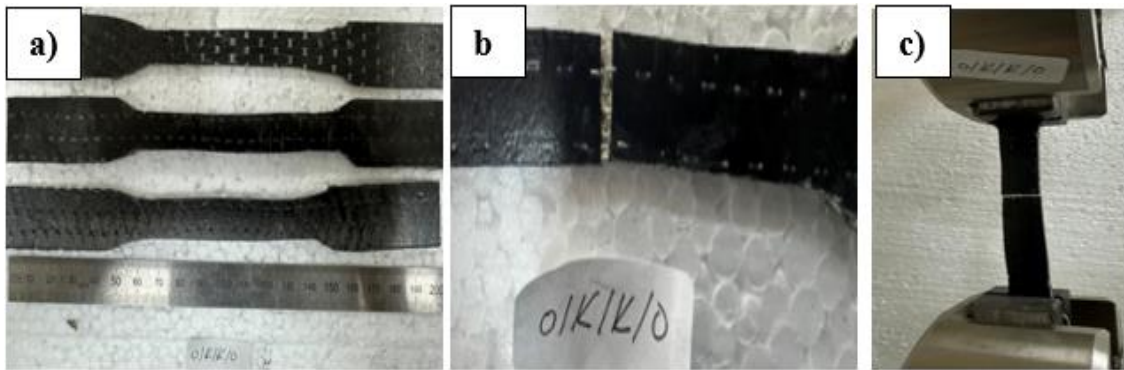
deformasyona ulaşarak numune kırılmıştır. 90° ve 0° karbon elyaf yönlendirmesine sahip numune, $[CK]_5^6$ yaklaşık 240N kuvvetle 11 mm deformasyona ulaşarak numune kırılmıştır. 90° ve 45° karbon elyaf yönlendirmesine sahip numune ise $[CK]_4^6$ en düşük kuvvet göstermiş olup, yaklaşık 190 N kuvvet altında 13 mm deformasyonda kırılma görülmüştür. $[CK]_6^6$ numunesi en yüksek mukavemet değerine, $[CK]_4^6$ ise en yüksek uzama değerine sahip olduğunu gözlenmiştir. Bu üç nokta eğme test sonuçları doğrultusunda, karbon elyafın yönlendirme açısının, malzemenin mekanik dayanımını önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir.

4.2 Çekme Testi Sonuçları

Üretilen deney numuneleri her ürün grubundan 3'er takım olmak üzere toplam 18 adet numune farklı kuvvet altında ki şekil değişimleri incelenmiştir. Toplanan veriler eşliğinde oluşan değerler şekillerdeki Gerilme-Uzama değişimi grafiklerinde gösterilmiştir.

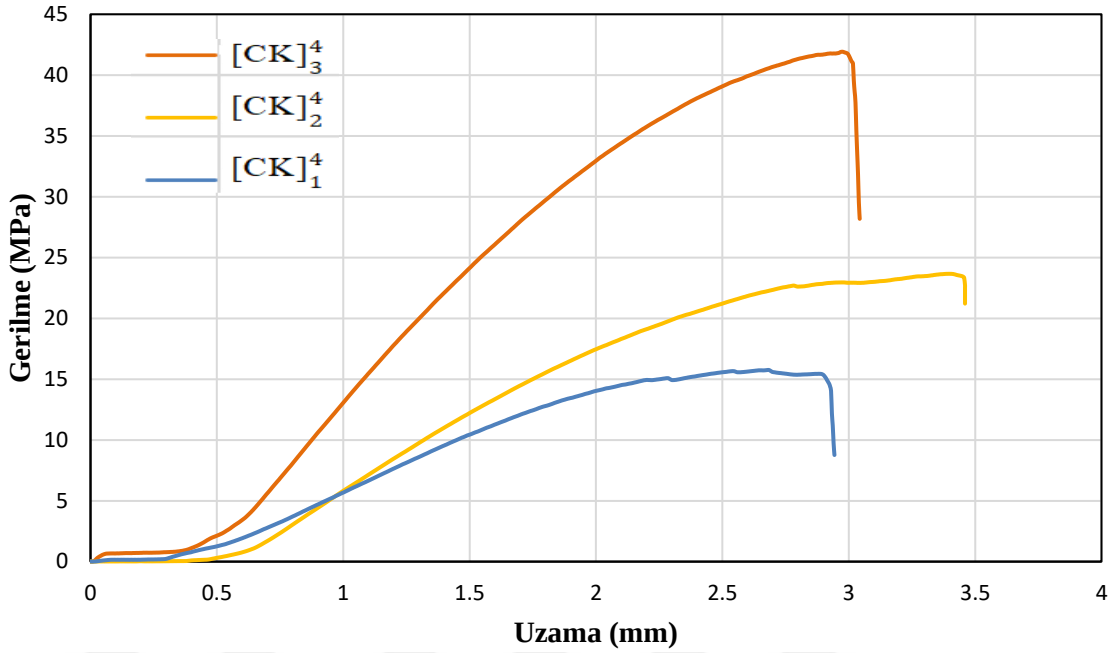
4.2.1 Dört Tabakalı Kompozit Plakaların Çekme Testi Deneyi

Dört tabakalı $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$ kompozit plakaların çekme testi sırasında çekilen resimleri Resim 4.3' de gösterilmiştir.



Resim 4.3 $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$ Çekme testi görüntüleri, a) Test öncesi resim, b) Test sonrası, c) Test sırasında

Dört tabakalı $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$ kompozit plakaların çekme testi sırasında farklı yükleme koşulları altında elde edilen deneysel veriler, gerilme-uzama ilişkileri ve diğer mekanik davranış parametreleri ile birlikte Şekil 4.3'te ayrıntılı olarak sunulmuştur.

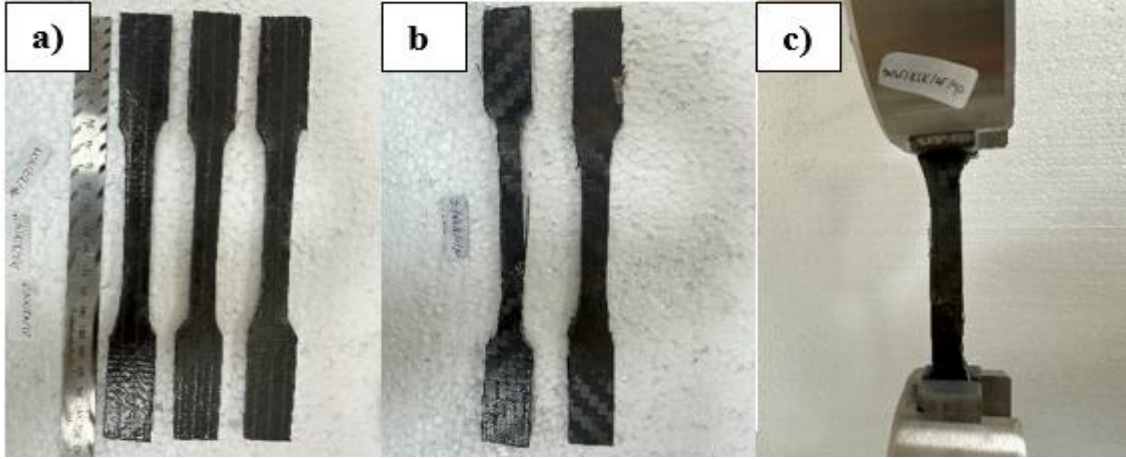


Şekil 4.3 $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$ Kompozit plakaların çekme testi sonucunda elde edilen gerilme - uzama grafiği

Şekil 4.3’de verilen grafikte, üç farklı malzemenin gerilme-uzama eğrileri karşılaştırmaktadır. Grafik incelendiğinde, 0° karbon elyaf yönlendirmesine sahip $[CK]_3^4$ malzemesinin en yüksek dayanımı gösterdiği görülmektedir; bu malzeme yaklaşık 42 MPa gerilme altında 3 mm uzama gösterdikten sonra kopmuştur. 45° karbon elyaf yönlendirmesine sahip, $[CK]_2^4$ malzemesi ise yaklaşık 24 MPa gerilme altında 3,4 mm uzamaya kadar dayanmış ve ardından kopma meydana gelmiştir. 90° karbon elyaf yönlendirmesine sahip $[CK]_1^4$ malzemesi en düşük dayanımı sergileyerek yaklaşık 15 MPa gerilme altında 2,8 mm uzamaya ulaşmış ve kopmuştur. Yapılan çekme test sonuçlarına göre, malzemelerin farklı gerilme dayanımı ve uzama kapasitelerine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. $[CK]_3^4$ malzemesinin en yüksek mukavemete ve $[CK]_2^4$ ün ise en iyi uzama değerine sahip olduğu görülmektedir. Numuneler arasındaki bu fark, kullanılan karbon elyaf yönlendirmesinin, numunelerin çekme gerilmesi altındaki performanslarını önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir.

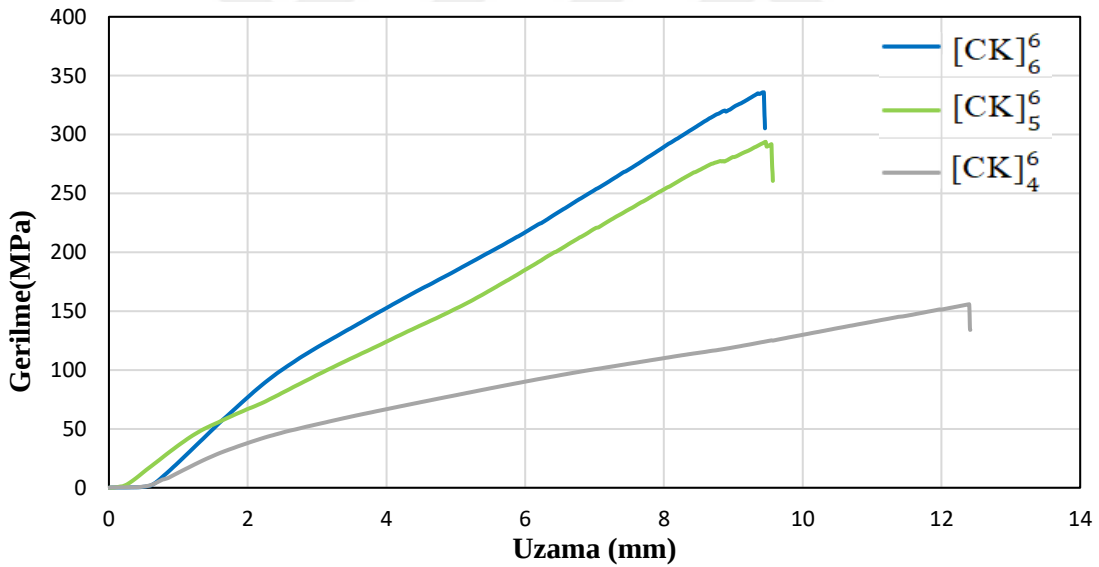
4.2.2 Altı Tabakalı Kompozit Plakaların Çekme Testi Deneyi

Altı tabakalı $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$, $[CK]_6^6$ kompozit plakaların çekme testi sırasında çekilen resimler Resim 4.4’ de gösterilmiştir.



Resim 4.4 $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$, $[CK]_6^6$ Çekme testi görüntüleri, a) Test öncesi resim, b) Test sonrası, c) Test sırasında

Altı tabakalı $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$, $[CK]_6^6$ kompozit plakaların çekme testi sırasında elde edilen gerilme-uzama grafikleri Şekil 4.4' de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$, $[CK]_6^6$ Kompozit plakaların çekme testi sonucunda elde edilen gerilme - uzama grafiği

Şekil 4.4'de verilen grafikte, üç farklı malzemenin gerilme-uzama eğrileri karşılaştırmaktadır. Grafik incelendiğinde, 45° ve 0° karbon elyaf yönlendirmesine sahip $[CK]_6^6$ malzemesinin en yüksek dayanımı gösterdiği görülmektedir; bu malzeme yaklaşık 340 MPa gerilme altında 9 mm uzama gösterdikten sonra kopmuştur. 90° ve 0° karbon elyaf yönlendirmesine sahip $[CK]_5^6$ numunesi, $[CK]_6^6$ 'ya göre daha düşük gerilme

dayanımına sahip olup yaklaşık 290 MPa gerilme altında 9 mm uzamaya kadar dayanmış ve ardından kopma meydana gelmiştir. 90° ve 45° karbon elyaf yönlendirmesine sahip [CK]₄⁶ malzemesi en düşük dayanımı sergileyerek yaklaşık 150 MPa gerilme altında 12 mm uzamaya ulaşmış ve kopmuştur. Yapılan çekme test sonuçlarına göre, malzemelerin farklı gerilme dayanımı ve uzama kapasitelerine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. [CK]₆⁶ malzemesinin en yüksek mukavemete ve [CK]₄⁶'ün ise en iyi uzama değerine sahip olduğu görülmektedir. Numuneler arasındaki bu fark, kullanılan karbon elyaf yönlendirmesinin, numunelerde çekme gerilmesi altındaki performanslarını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır.

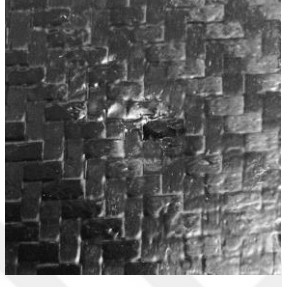
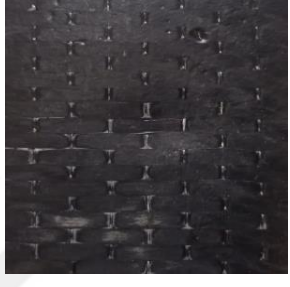
4.3 Darbe Testi Sonuçları

Çalışmada, iki farklı koşulda gerçekleştirilen darbe testi kapsamında, [CK]₁⁴, [CK]₂⁴, [CK]₃⁴, [CK]₄⁶, [CK]₅⁶, [CK]₆⁶ kompozit malzemelerin kuvvet-deformasyon davranışları incelenmiştir. Her bir gruptan farklı enerjilerde 3'er adet numune test edilmiştir. Test edilen numunelerin ortalamaları alınarak maksimum kuvvet ve deformasyon değerleri hesaplanarak grafikleri çizilmiştir.

4.3.1 Dört Tabakalı Kompozit Numunelerin 5 Joule Enerji Altında Deformasyon Davranışları

Darbe testi yapılacak plakanın boyutları 100x100x2 mm'dir. Kompozit plaka numunelerinin darbe testinden önce ve sonraki sonuçları Resim 4.5' de gösterilmektedir. Deneylerde Instron/Ceast 9350 hızlı darbe test cihazı kullanıldı. Bu cihazda toplamda 2 MHz'e kadar kuvvet uygulanabilir. Kompozit plakanın [CK]₁⁴, [CK]₂⁴, ve [CK]₃⁴ enerji sönümleme kapasitesi ve deformasyon davranışları bu test koşullarında incelenmiştir.

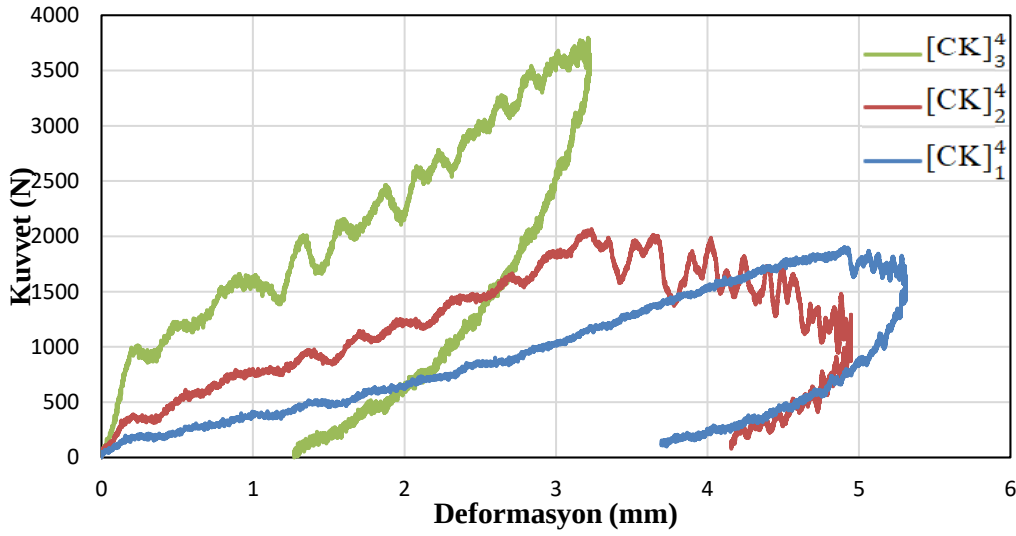
[CK]₁⁴, [CK]₂⁴, [CK]₃⁴, kompozit plakaların enerji-deformasyon karşısında göstermiş olduğu davranışlar incelenmiştir. Numunelerimiz [CK]₁⁴, [CK]₂⁴ ve [CK]₃⁴ için test koşulu olarak 5 Joule enerjiyle darbe testine tabi tutuldu. Test sonuçlarında 5 Joule kuvvet uygulandığında Resim 4.5' de gösterildiği gibi tüm numunelerde geri sekme davranışı gözlemlenmiştir.

5 joule			
	$[CK]_1^4$	$[CK]_2^4$	$[CK]_3^4$
Test öncesi Görüntüsü			
Test sonrası Ön Görüntüsü			
Test Sonrası Arka Görüntüsü			

Resim 4.5 $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$ Kompozit numunelerin 5 joule darbe enerjisi altında görüntüleri.

Şekil 4.5'te verilen grafikte, üç farklı malzemenin kuvvet-deformasyon eğrileri detaylı bir şekilde karşılaştırılmaktadır. Bu grafik, her bir malzemenin yük altında sergilediği elastik ve plastik davranışları, deformasyon seviyelerini, maksimum taşıma kapasitelerini ve kopma noktalarını analiz etmek amacıyla hazırlanmıştır. Ayrıca, malzemelerin mekanik performansları arasındaki farklar belirlenmiştir.

Grafikte, üç farklı malzemenin ($[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$) 5 J enerji altında darbe testi kuvvet-deformasyon davranışı incelenmiştir. $[CK]_3^4$ malzemesi, yaklaşık 3500 N ile en yüksek maksimum kuvvet değerine ulaşmış ve deformasyon kapasitesi yaklaşık 3,5 mm olarak ölçülmüştür. Bu durum, $[CK]_3^4$ malzemesinin yüksek dayanım sergilediğini ancak sınırlı deformasyonla daha gevrek bir yapıya bir açıdan da darbe sırasında kuvveti etkin bir şekilde dağıtarak yüksek yük taşıma kapasitesi sağladığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.5 $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$ Kompozit plakaların 5 joule kuvvet-deformasyon grafiği.

$[CK]_2^4$ malzemesi, maksimum yaklaşık 2000 N kuvvet değeri ile $[CK]_3^4$ 'ya kıyasla daha düşük dayanım sergilerken, deformasyon kapasitesinin 5 mm'ye kadar çıkması, malzemenin daha esnek ve darbe sırasında daha dengeli bir tepki veren bir yapıya sahip olduğunu işaret etmektedir. $[CK]_1^4$ malzemesi ise yaklaşık 1900 N maksimum kuvvet değerine ulaşmış ve 5,5 mm'ye kadar deformasyon göstermiştir. Bu sonuçlar, $[CK]_1^4$ malzemesinin en esnek yapıdaki malzeme olduğunu ancak darbe karşısında düşük dayanım sergilediğini ve yük taşımada daha az etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Genel olarak, $[CK]_3^4$ malzemesi yüksek dayanım gerektiren uygulamalar için uygun bir alternatifken, $[CK]_2^4$ malzemesi dengeli dayanım ve esneklik özellikleriyle öne çıkmaktadır. $[CK]_1^4$ malzemesi ise esneklik gerektiren ancak yüksek dayanımın öncelikli olmadığı uygulamalar için daha uygun bir seçenek olabilir. Bu sonuçlar, malzemelerin mekanik özelliklerinin uygulama gereksinimlerine göre optimize edilebileceğini göstermektedir.

4.3.2 Dört Tabakalı Kompozit Numunelerin 15 Joule Enerji Altında Deformasyon Davranışları

Darbe testi yapılacak plakanın boyutları 100x100x2 mm'dir. Kompozit plaka numunelerinin darbe testinden önce ve sonraki sonuçları Resim 4.6' da gösterilmektedir. Instron/Ceast 9350 hızlı darbe test cihazı kullanıldı. Bu cihazda toplamda 2 MHz'e kadar

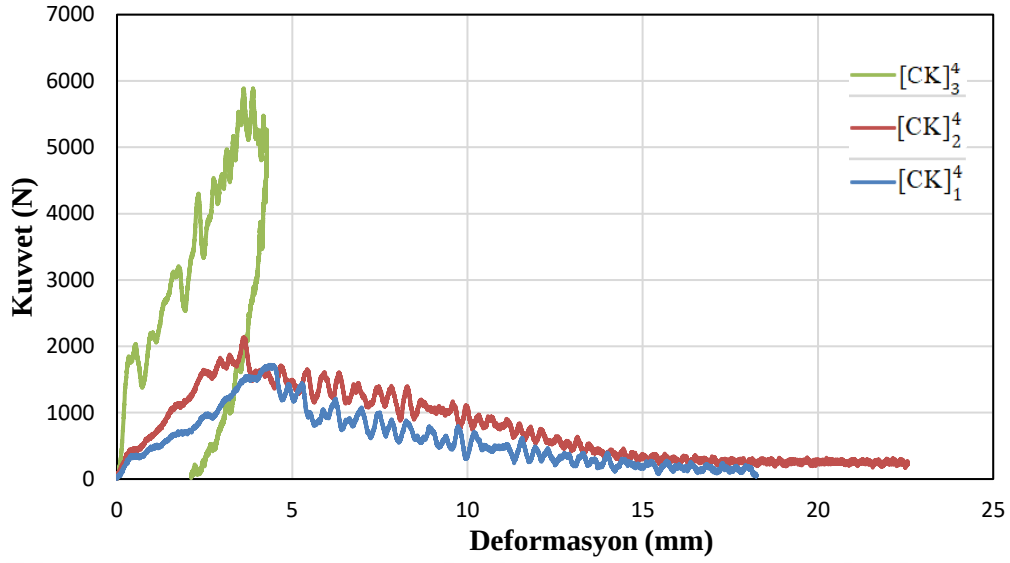
kuvvet uygulanabilir. Kompozit plakanın $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$ ve $[CK]_3^4$ enerji sönümleme kapasitesi ve deformasyon davranışları bu test koşullarında incelenmiştir.

15 joule			
	$[CK]_1^4$	$[CK]_2^4$	$[CK]_3^4$
Test öncesi			
Test sonrası Ön Görüntüsü			
Test Sonrası Arka Görüntüsü			

Resim 4.6 $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$ Kompozit numunelerin 15 Joule darbe enerjisi altında görüntüleri.

Kompozit plakaların enerji-deformasyona karşı gösterdiği davranışlar incelenmiştir: Numunelerimiz $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$ ve $[CK]_3^4$ için test koşulu olarak 15 Joule enerjiyle darbe testine tabi tutuldu. 15 Joule kuvvet uygulandığında test sonuçları, Şekil 4.6’ da görüldüğü üzere saplanma ve geri sekme davranışları gözlemlenmiştir.

15 joule darbe enerjisi ile test edilen karbon elyaf takviyeli kompozitlerin ($[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$) farklı elyaf yönlendirme açılarına göre kuvvet-deformasyon davranışlarını gösteren bu grafik, malzemenin darbe altında sergilediği mekanik performansı analiz etmek için önemlidir.



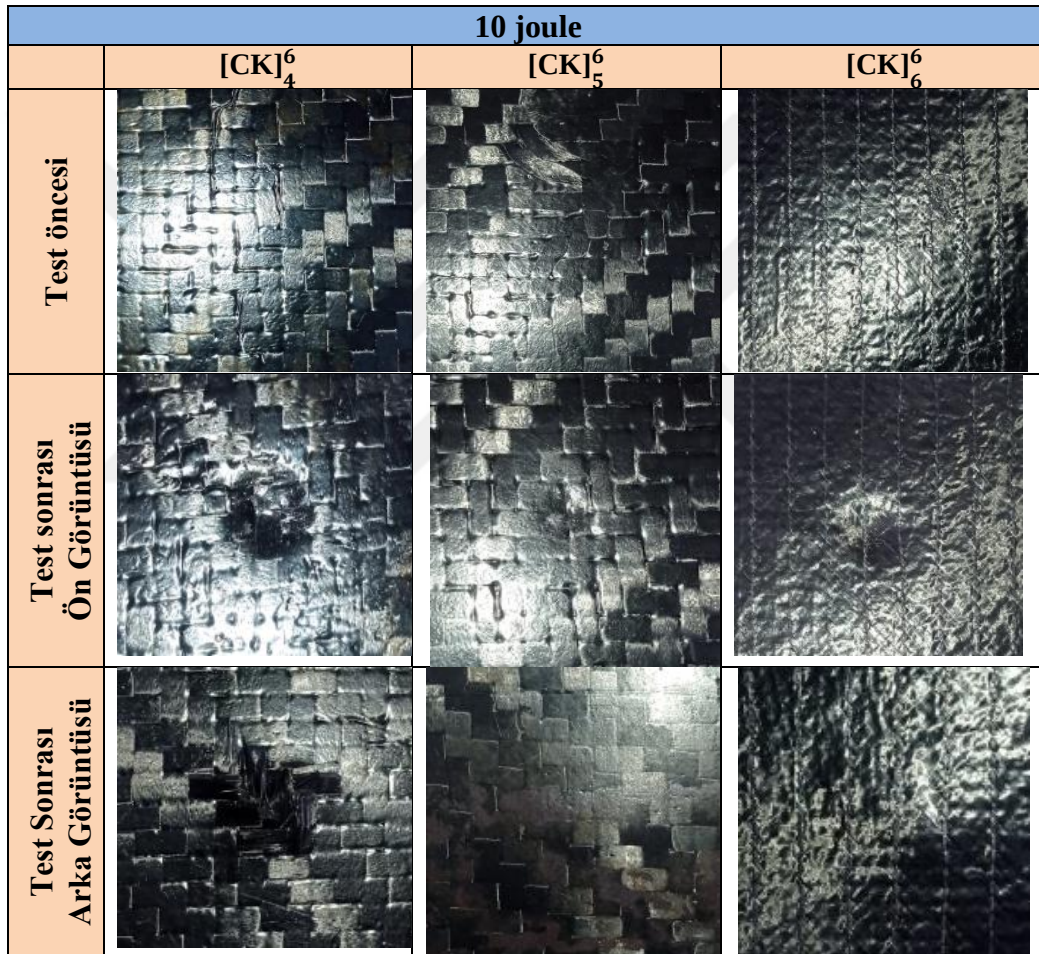
Şekil 4.6 [CK]₁⁴, [CK]₂⁴, [CK]₃⁴ Kompozit plakaların 15 joule kuvvet - deformasyon grafiği.

[CK]₃⁴ malzemesi, yaklaşık 6000 N ile en yüksek maksimum kuvvet değerine ulaşmış ve deformasyon kapasitesi yaklaşık 4 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, [CK]₃⁴ malzemesinin yüksek dayanım sergilediğini ve daha gevrek bir yapı karakteristiği ile darbe sırasında yük taşımada oldukça etkili olduğunu ve test ucunun geri sektiğini göstermektedir. [CK]₂⁴ malzemesi, yaklaşık 2000 N maksimum kuvvet değeri ile [CK]₃⁴'ya kıyasla daha düşük bir dayanım sergilerken, deformasyon kapasitesinin 15 mm'ye kadar ulaşması, bu malzemenin daha dengeli bir enerji dağılımı sağladığını ve deformasyona daha esnek bir tepki verdiğini ortaya koymaktadır. Vurucu uç numuneyi delerek geçmiştir. [CK]₁⁴ malzemesi ise yaklaşık 1500 N maksimum kuvvet değerine ulaşmış ve deformasyon kapasitesi açısından [CK]₂⁴'ya benzer bir performans göstermiştir. Ancak, kuvvet değerinin düşük olması, [CK]₂⁴ malzemesinin darbe dayanımının daha zayıf ve taşıma performansının düşük olduğunu işaret etmektedir.

4 tabakalı kompozit numuneler 5 ve 15 joule darbe enerjisinde genel olarak değerlendirildiğinde, [CK]₃⁴ malzemesi yüksek dayanım gerektiren uygulamalar için uygun bir alternatifken, [CK]₂⁴ malzemesi dengeli dayanım ve esneklik özellikleriyle öne çıkmaktadır. [CK]₁⁴ malzemesi ise esneklik gerektiren ancak yüksek dayanımın öncelikli olmadığı uygulamalar için daha uygun bir seçenek olabilir. Bu sonuçlar, malzeme mekanik özelliklerinin uygulamaya göre optimize edilebileceğini göstermektedir.

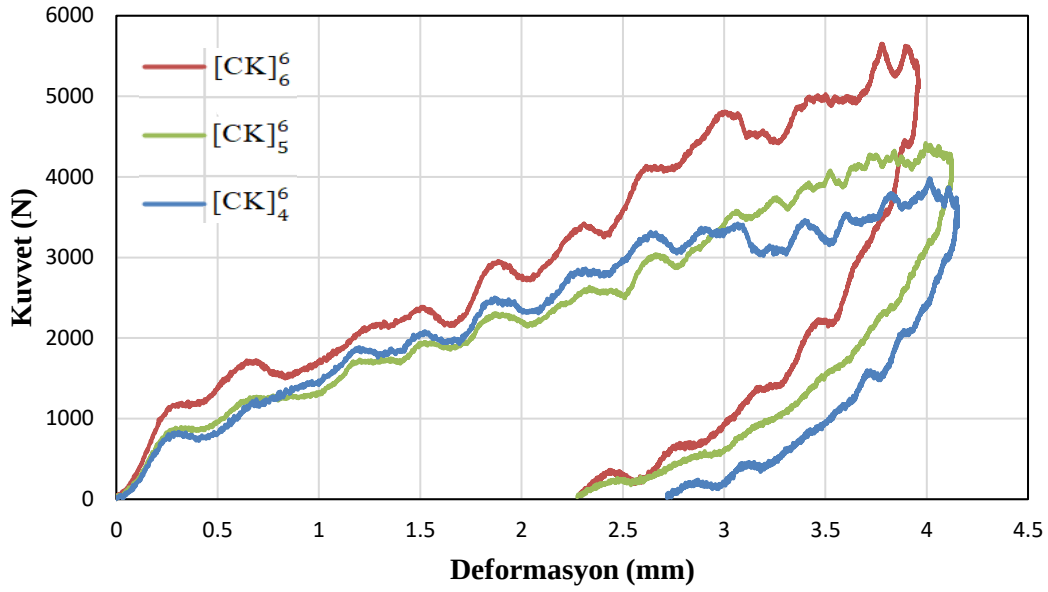
4.3.3 Altı Tabakalı Kompozit Numunelerin 10 Joule Enerji Altında Deformasyon Davranışları

Darbe testi yapılacak plakanın boyutları 100x100x3 mm'dir. Kompozit plaka numunelerinin darbe testinden önce ve sonraki sonuçları Resim 4.7' de gösterilmektedir. Instron/Ceast 9350 hızlı darbe test cihazı kullanıldı. Bu cihazda toplamda 2 MHz'e kadar kuvvet uygulanabilir. Çalışmada; kompozit plakanın $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$, ve $[CK]_6^6$ enerji sönümleme kapasitesi ve deformasyon davranışları bu test koşullarında incelenmiştir.



Resim 4.7 $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$ ve $[CK]_6^6$ Kompozit numunelerin 10 Joule darbe enerjisi altında görüntüsü.

Kompozit plakaların enerji-deformasyona karşı gösterdiği davranışlar incelenmiştir: Numunelerimiz $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$ ve $[CK]_6^6$ test olarak belirlenen 10 Joule enerji ile darbe testine tabi tutuldu. 10 Joule kuvvet uygulandığında, numuneler farklı deformasyon değerleri göstermiş ve vurucu uç Şekil 4.7'deki gibi geri sekme davranışı sergilemiştir.



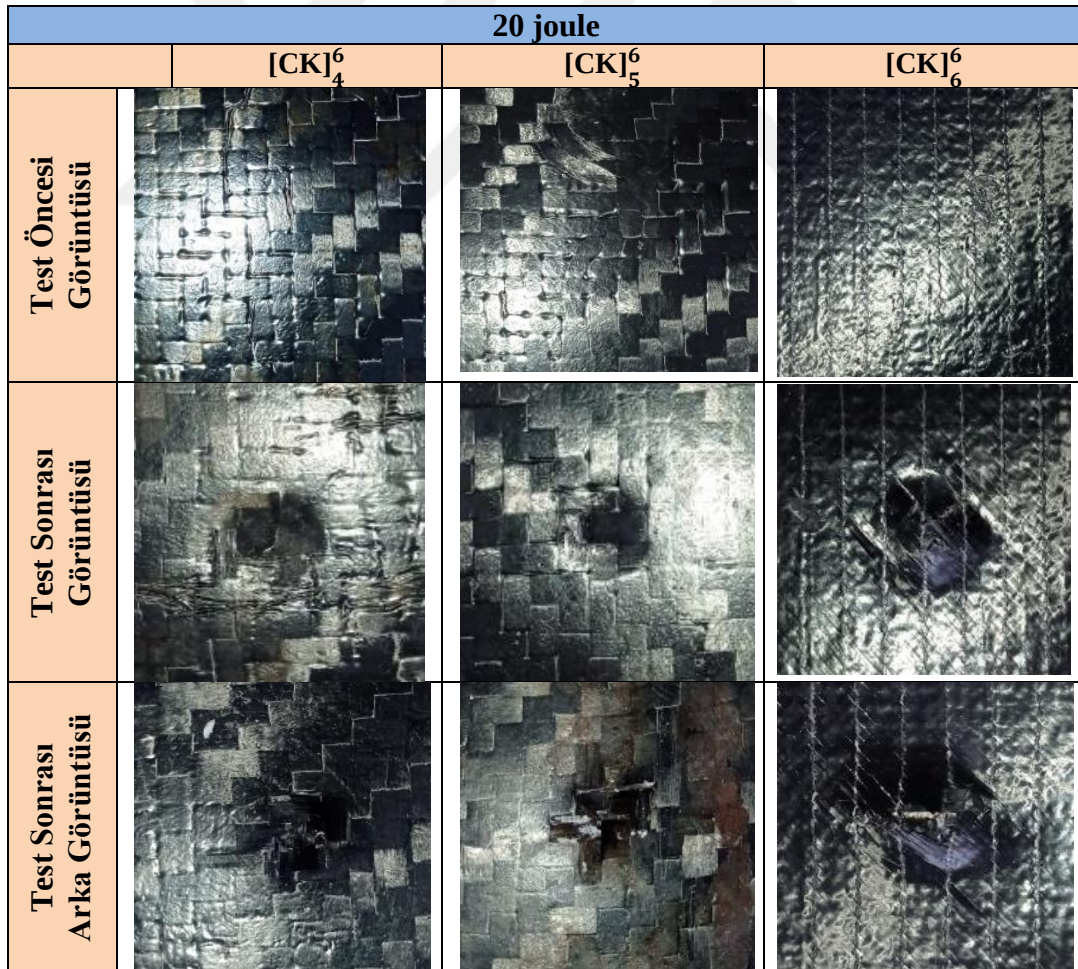
Şekil 4.7 [CK]₄⁶, [CK]₅⁶ ve [CK]₆⁶ Kompozit plakaların 10 joule kuvvet - deformasyon grafiği.

Grafikte; iki farklı elyaf yönlendirme kombinasyonuna sahip üç farklı malzemenin ([CK]₄⁶, [CK]₅⁶, [CK]₆⁶) 10 J darbe enerjisi altında test edilen karbon elyaf takviyeli kompozitlerin kuvvet - deformasyon davranışlarını göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre; [CK]₆⁶ malzemesi yaklaşık 5500 N ile en yüksek maksimum kuvvet değerine ulaşmıştır. Bu durum, malzemenin diğerlerine kıyasla daha yüksek darbe dayanımına sahip olduğunu göstermektedir. Deformasyon kapasitesi yaklaşık 4 mm olup, vurucu ucun sekme davranışı göstermesi malzeme kombinasyonunun rijitliği yüksek ve darbe enerjisini etkili bir şekilde absorbe eden bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır. [CK]₅⁶ malzemesi ise yaklaşık 4500 N'lik bir maksimum kuvvet değeri ile daha düşük bir dayanım sergilemiştir. Bununla birlikte, deformasyon kapasitesinin 4 mm civarında olduğu görülmektedir, bu da [CK]₅⁶'nın deformasyon açısından [CK]₆⁶ ile benzer bir performans sunduğunu ve vurucu ucun sekme davranışı göstermesi daha düşük bir rijitlik sergilediğini; ancak yine de dayanıklı bir performans gösterdiğini işaret etmektedir. [CK]₄⁶ malzemesi ise yaklaşık 3500 N ile en düşük maksimum kuvvet değerine ulaşmış ve darbe dayanımının en düşük numune olduğunu ortaya koymuştur; ancak deformasyon kapasitesi diğer malzemelere benzer şekilde yaklaşık 4 mm civarındadır. Vurucu uç hafif saplanma davranışı göstermiştir. Genel olarak, [CK]₄⁶ malzemesi en düşük kuvvet kapasitesine sahiptir. Bu kombinasyonun, [CK]₆⁶ ve [CK]₅⁶ kombinasyonuna kıyasla daha

düşük enerji emme kapasitesi ve rijitlik sunduğu görülmektedir. Genel olarak, elyaf yönlendirme açılarının malzemenin darbe dayanımı ve deformasyon tepkisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve uygulama ihtiyaçlarına uygun şekilde optimize edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

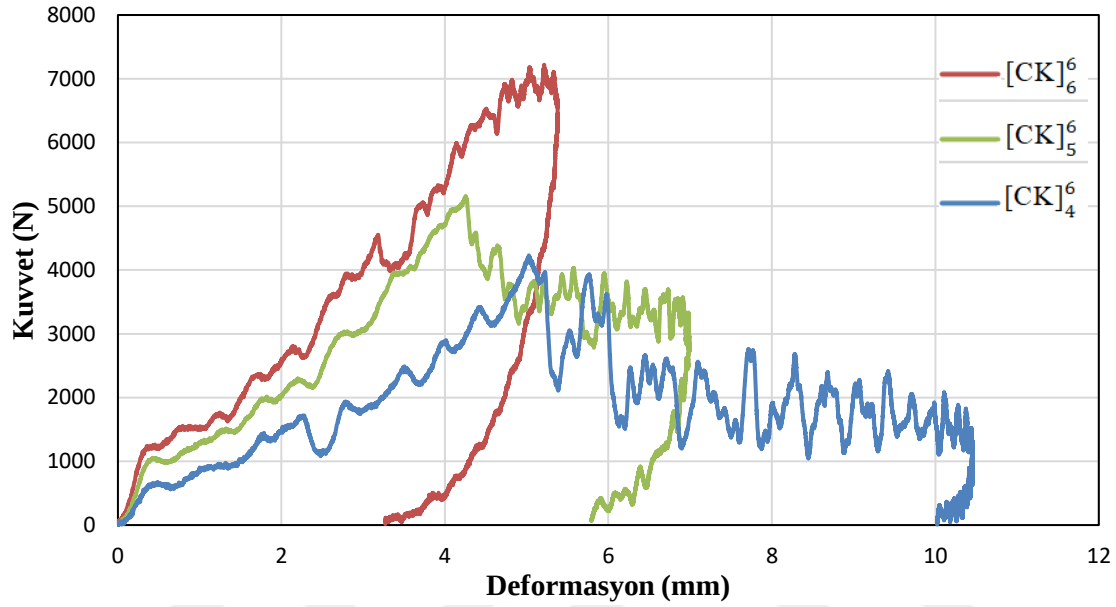
4.3.4 Altı Tabakalı Kompozit Numunelerin 20 Joule Enerji Altında Deformasyon Davranışları

Darbe testi yapılacak plakanın boyutları 100x100x3 mm' dir. Kompozit plaka numunelerinin darbe testinden önce ve sonraki sonuçları Resim 4.8' de gösterilmektedir. Instron/Ceast 9350 hızlı darbe test cihazı kullanıldı. 2 MHz'e kadar kuvvet uygulanır. Kompozit plakaların $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$ ve $[CK]_6^6$ enerji sönümleme kapasitesi ve deformasyon davranışları bu test koşullarında incelenmiştir.



Resim 4.8 $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$ ve $[CK]_6^6$ Kompozit numunelerin 20 Joule darbe enerjisi altında görüntüsü.

Kompozit plakaların enerji-deformasyona karşı gösterdiği davranışlar incelenmiştir: Numunelerimiz $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$ ve $[CK]_6^6$ olarak belirlenen 20 Joule enerjiyle darbe testine tabi tutuldu. 20 Joule kuvvet uygulandığında test sonuçları Şekil 4.8’ de ki gibi farklı saplanma değerleri göstermiştir.



Şekil 4.8 $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$ ve $[CK]_6^6$ Kompozit plakaların 20 joule kuvvet - deformasyon grafiği

Grafikte, farklı elyaf yönlendirme kombinasyonlarına göre karbon elyaf takviyeli kompozit üç farklı malzemenin ($[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$, $[CK]_6^6$) 20 joule enerji altında, darbe testindeki kuvvet-deformasyon davranışları karşılaştırılmıştır. $[CK]_6^6$ malzemesi, yaklaşık 7200 N ile en yüksek maksimum kuvvet değerine ulaşmış ve deformasyon kapasitesi yaklaşık 4,5 mm seviyesinde sınırlı kalmıştır. Bu durum, vurucu ucun diğerlerine göre daha belirgin saplanma davranışı göstermesine ve malzemenin yüksek rijitlik sunduğunu ve darbe enerjisini etkili bir şekilde absorbe ettiğini göstermektedir. $[CK]_5^6$ malzemesi ise yaklaşık 5500 N ile orta seviyede bir maksimum kuvvet değerine ulaşmış ve deformasyon sürecinde ani dalgalanmalar sergilemiş ve yaklaşık 6,5 mm deforme olmuştur. Bu davranış, vurucu ucun saplanma davranışı göstermesine, malzemenin kırılma sırasında daha sünek bir karakter sergileyerek enerjiyi kademeli olarak absorbe ettiğini göstermektedir. Bu sonuç; malzeme içinde meydana gelen delaminasyon veya elyaf kırılması gibi hasar mekanizmalarını işaret etmektedir. Diğer yandan, $[CK]_4^6$ malzemesi

yaklaşık 4000 N ile en düşük maksimum kuvvet değerine sahip olmasına rağmen, deformasyon kapasitesi yaklaşık 10 mm ile en yüksek seviyededir. Bu, vurucu ucun diğerlerine göre daha az saplanma davranışı göstermesine, malzemenin esnek bir yapıya sahip olduğunu ve darbe altında daha fazla deformasyon gösterdiğini ortaya koymaktadır. Genel olarak, $[CK]_6^6$ malzemesi yüksek yük taşıma kapasitesine sahipken, $[CK]_4^6$ malzemesi yüksek deformasyon gerektiren uygulamalar için daha uygun görünmektedir. $[CK]_5^6$ ise bu iki özellik arasında bir denge sunmaktadır. Bu değerlendirme, malzemelerin mekanik performanslarının farklı uygulama alanları için avantaj sağlayabileceğini göstermektedir.

Özet olarak; dört ve altı tabakalı kompozitlerin sırasıyla $[CK]_1^4$, $[CK]_2^4$, $[CK]_3^4$, $[CK]_4^6$, $[CK]_5^6$ ve $[CK]_6^6$ üç nokta eğme testleri kuvvet ve uzama, çekme testleri gerilim ve uzama, darbe testleri dört tabakalı numunelere 5 – 15 J, altı tabakalı numunelerde ise 10 -20 J enerjilerde ki kuvvet ve deformasyon olarak Çizelge 4.1’ de test verilerinin tamamı sayısal olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Mekanik test verileri sayısal sonuçları.

Yapılan Mekanik Testler	Birim	Enerji (Joule)	$[CK]_1^4$	$[CK]_2^4$	$[CK]_3^4$	$[CK]_4^6$	$[CK]_5^6$	$[CK]_6^6$
Üç Nokta Eğme Test Verileri	Kuvvet (N)		20	45	120	190	240	280
	Uzama (mm)		15	30	27	13	11	7
Çekme Test Verileri	Gerilim (MPa)		15	42	24	150	290	340
	Uzama (mm)		2,8	3	3,4	12	9	9
Dört Tabakalı Darbe Test Verileri	Kuvvet (N)		1900	2000	3500			
	Deformasyon (mm)	5	5,5	5	3,5			
	Kuvvet (N)		1500	2000	6000			
	Deformasyon (mm)	15	23	15	4			
	Kuvvet (N)					3500	4500	5500
	Deformasyon (mm)	10				4	4	4
Altı Tabakalı Darbe Test Verileri	Kuvvet (N)					4000	5500	7200
	Deformasyon (mm)	20				10	6,5	4,5

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada, farklı karbon elyaf yönlendirme açılarında ve enerji seviyelerinde kompozit plakaların mekanik özellikleri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen üç nokta eğme, çekme ve darbe testleri sonucunda, numunelerin kuvvet-deformasyon ve gerilme-uzama ilişkileri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Üç nokta eğme testi sonuçları değerlendirildiğinde; dört tabakalı tek yönlendirme kombinasyonlarında malzemelerin gösterdiği davranışlar: 0° elyaf yönlendirme açısına sahip $[CK]_3^4$ numunesi, yaklaşık 120 N kuvvet altında 27 mm deformasyon göstererek en yüksek dayanımı sergilemiştir. 45° elyaf yönlendirmesine sahip $[CK]_2^4$ numunesi, yaklaşık 45 N kuvvet ile 30 mm deformasyona uğrayarak daha düşük bir dayanım göstermiş, ancak deformasyon kapasitesinin yüksek olması esnekliğini ortaya koymuştur. 90° elyaf yönlendirme açısına sahip $[CK]_1^4$ malzemesi ise yaklaşık 20 N kuvvet altında 18 mm deformasyonda kırılarak en düşük dayanımı sergilemiştir. Altı tabakalı iki yönlendirme kombinasyonlarında malzemelerin gösterdiği davranışlar: 45° ve 0° elyaf yönlendirmesine sahip $[CK]_6^6$ numunesi, yaklaşık 280 N kuvvet altında 7 mm deformasyona uğrayarak en yüksek dayanımı göstermiştir. 90° ve 0° elyaf yönlendirmesine sahip $[CK]_5^6$ numunesi 240 N kuvvet altında 11 mm deformasyona, 90° ve 45° elyaf yönlendirmeli $[CK]_4^6$ numunesi ise 190 N kuvvet altında 13 mm deformasyona ulaşmıştır. Neticede dört tabakalı numunelerden $[CK]_3^4$, altı tabakalı numunelerden $[CK]_6^6$ daha yüksek dayanım göstermiştir. Süneklik olarak; dört tabakalı numunelerden $[CK]_2^4$, altı tabakalı numunelerden $[CK]_4^6$ öne çıkmıştır.

Çekme testi sonuçları değerlendirildiğinde; dört tabakalı tek yönlendirme kombinasyonlarında malzemelerin gösterdiği davranışlar; 0° elyaf yönlendirme açısına sahip $[CK]_3^4$ malzemesi, yaklaşık 42 MPa gerilme altında 3 mm uzama ile en yüksek dayanımı sergilemiştir. 45° elyaf yönlendirme açısına sahip $[CK]_2^4$, yaklaşık 24 MPa gerilme altında 3,4 mm uzama ile orta seviyede bir dayanım göstermiştir. 90° elyaf yönlendirme açısına sahip $[CK]_1^4$ malzemesi ise yaklaşık 15 MPa gerilme altında 2,8 mm uzama ile en düşük dayanımı göstermiştir. Altı Tabakalı iki farklı yönlendirme

kombinasyonlarında malzemelerin gösterdiği davranışlar; 45° ve 0° elyaf yönlendirme açısına sahip [CK]₆ malzemesi, yaklaşık 340 MPa gerilme altında 9 mm uzama göstererek en yüksek dayanımı sergilemiştir. 90° ve 0° elyaf yönlendirmeli [CK]₅, 290 MPa gerilme altında 9 mm uzama ile orta seviyede dayanım göstermiştir. 90° ve 45° elyaf yönlendirmeli [CK]₄ ise yaklaşık 150 MPa gerilme altında 12 mm uzama ile en düşük dayanımı sergilemiştir. Neticede dört tabakalı numunelerden [CK]₃⁴, altı tabakalı numunelerden [CK]₆ daha yüksek dayanım göstermiştir. Süneklik olarak; dört tabakalı numunelerden [CK]₂⁴, altı tabakalı numunelerden [CK]₄⁶ öne çıkmıştır.

Darbe testi sonuçları değerlendirildiğinde; dört tabakalı yönlendirme testlerinde, [CK]₃⁴ yönlendirme en yüksek kuvvet kapasitesini göstermiştir; 5 J darbe enerjisinde 3500 N, 15 J darbe enerjisinde ise 6000 N kuvvet kapasitesine ulaşılmıştır. [CK]₂⁴ yönlendirme, 5 J'de 2000 N, 15 J'de 2000 N kapasite sergilerken, [CK]₁⁴ yönlendirme en düşük performansı göstererek 5 J'de 1900 N, 15 J'de 1500 N kapasiteye ulaşmıştır. Altı tabakalı iki farklı yönlendirme kombinasyonlarında 10 J ve 20 J darbe enerjisi uygulanmış; [CK]₆ kombinasyonu, 10 J darbe enerjisinde 5500 N ve 20 J darbe enerjisinde 7200 N ile en yüksek kuvvet kapasitesini sergilerken, [CK]₅⁶ kombinasyonu 10 J darbe enerjisinde 4500 N ve 20 J darbe enerjisinde 5500 N, [CK]₄⁶ kombinasyonu ise, 10 J darbe enerjisinde 3500 N ve 20 J darbe enerjisinde 4000 N kuvvet kapasitesi ile daha düşük performans göstermiştir. Artan darbe enerjisiyle birlikte deformasyon miktarının arttığı ve hasar mekanizmalarının (*Çatlak oluşumu, delaminasyon, elyaf kırılması*) daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Genel olarak, elyaf yönlendirme açısının darbe dayanımı ve deformasyon davranışı üzerinde kritik bir rol oynadığı ve 0° ile 45°-0° yönlendirmelerinin darbe enerjisini daha etkin absorbe ederek yüksek rijitlik sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, farklı uygulama ihtiyaçlarına göre kompozit tasarımının optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Bu çalışmada, karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, farklı elyaf yönlendirme açıları ve tabaka sayılarında gerçekleştirilmiş üç nokta eğme, çekme ve düşük hız darbe testleri ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, elyaf yönlendirme açısının ve tabaka sayısının malzemelerin mekanik dayanımı ve

deformasyon davranışı üzerinde önemli etkiler oluşturduğunu göstermiştir.

Sonuçlar, karbon elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf yönlendirme açısının ve tabaka sayısının, malzeme performansını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. 0° yönlendirmesine sahip malzemeler yüksek dayanım gerektiren uygulamalar için uygun bulunurken, 45° ve 90° yönlendirmeler daha sünek ve deformasyon toleransı yüksek uygulamalarda kullanılabilir. Tabaka sayısının artması ise genel dayanımı artırmakla birlikte malzemenin kırılma mekanizmasında farklılıklar yaratmaktadır. Çalışmamızda değerlendirdiğimiz hibrit kompozit, otomotiv endüstrisinde tasarımcıların tampon, panjur, far çerçevesi ve trim parçaları için tasarım kriterleri ve elde edilen özellikler birlikte göz önünde bulundurularak alternatif malzeme olarak seçilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Alhijazi M, Safaei B, Zeeshan Q, Asmael M, Eyvazian A, Qin Z, 2020, Recent Developments in Luffa Natural Fiber Composites, *Sustainability*, 12(18), 7683.
- ASTM D790-17, 2017, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.
- ASTM D3039/D3039M-17, 2017, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- ASTM D3763-23, 2023, Standard Test Method for High Speed Puncture Properties of Plastics Using Load and Displacement Sensors.
- Babu K S, 2015, An Evaluation of Jute-Epoxy-Hybrid Composite Materials for Automotive Frontal Crash Safety Applications, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 315-320, 2319-1163, eSAT Publishing House.
- Chawla K K, 2012, Ceramic Matrix Composites, *Composite Materials: Science and Engineering*, 249-292.
- Chen Q, Shi Q, Gorb S N, Li Z A, 2014, Multi Scale Study on the Structural and Mechanical Properties of the Luffa Sponge from Luffa Cylindrica plant, *J Biomech*, 47, 1332–1339.
- Da Silva R V, Voltz H, Filho A I, Xavier M M, Carvalho M C D S, 2021, Hybrid Composites with Glass Fiber and Natural Fibers of Sisal, Coir and Luffa Sponge, *Journal of Composite Materials*, 55(5), 717-728.
- Dinç Z S, 2024, Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Yüzey Modifikasyonu ile Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi, *Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Doktora Tezi*, 148s, Bursa.
- Doğan S, 2020, Balistik Uygulamalarda Kullanılan Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışına Değişik Formlardaki Vurucu Uçların Etkisi, *Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi*, 40s, İzmir.
- Dönmez B, 2019, Doğal Atık Takviyeli Biyokompozit Üretimi ve Karakterizasyonu, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Yüksek Lisans Tezi*, 70s, Konya.

- Ekici B, Kentli A, Küçük H, 2012, Improving Sound Absorption Property of Polyurethane Foams by Adding Tea-Leaf Fibers, Arch. Acoust., 37, 515–520.
- Esendemir Ü, Şimşek R, Saraç M F, 2020, Hibrit Kompozit Yapılarda Nanokil İlavesinin Darbe Davranışına Etkisi, Journal of the Institute of Science and Technology, 10(4), 2831-2839.
- Fuqua M A, Huo S, Ulven C A, 2012, Natural Fiber Reinforced Composites, International Journal of Polymer Science, 52(3), 259-320.
- Graziano A, Titton D O A, Petel O, 2021, High-Strain-Rate Mechanical Performance of Particle and Fiber Reinforced Polymer Composites Measured with Split Hopkinson Bar, A Review, Polymer Composites, 42(10), 4932-4948.
- Gupta A, Beom S K, 2020, Soft Biological and Composite Nanomaterials, Nanomaterials, 10.3390, Nano10081488.
- Jeyapragash R, Srinivasan V, Sathiyamurthy S J M T P, 2020, Mechanical properties of Natural Fiber / Particulate Reinforced Epoxy Composites–A Review of the Literature, Materials Today: Proceedings, 22, 1223-1227.
- Kılıçarslan Y S, 2020, Dolgu Malzemesi Türü ve Oranlarının Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Aşınma Davranışına Etkisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 72s, Trabzon.
- Kudachi B, Keerthi P B, 2016, Mechanical Characterization of Hybrid Epoxy Reinforced With Carbon & Jute Fiber by Varying Fiber Orientation, 19-29, Int J Eng Technol.
- Namalan A, 2022, Alüminyum Matrisli Seramik Parçacık Takviyeli Kompozit-Hibrit Malzemelere Nano Grafen Katkısının Mikroyapı-Sertlik ve Aşınma Davranışına Etkisinin Araştırılması, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 83s, Konya.
- Nayak S Y, Sultan M T H, Shenoy S B, Kini C R, Samant R, Shah A U M, Amuthakkannan P, 2022, Potential of Natural fibers in Composites for Ballistic Applications, A Review, Journal of Natural Fibers, 19(5), 1648-1658.

- Okta C, 2021, Polimer Matris Esaslı Kompozit Üretiminde Kullanılan Farklı Karbon Elyaf Yapıların Mekanik Dayanımına Etkisinin İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 123s Denizli.
- Ölmez C, Sever Z, Güneş S, 2023, Engineering Applications of Composite Materials: Classification, Mechanical Calculations, Manufacturing Methods, and Applications, Composite Materials with Different Engineering Approaches- I, Özgür Yayıncılık, 13-38, Ostim Teknik Üniversitesi.
- Raja T, Devarajan Y, Logesh K, Muniraju C, Pandey V K, Dhanraj G, 2024, Testing and Evaluation of Hybrid Polymer Composites Reinforced with Moringa Oleifera and Boehmeria Nivea Fibers, Embedded with Copper Oxide Particulates, for Thermal, Structural and Biological Properties, Journal of Testing and Evaluation, 52(4), 2401-2414.
- Rajneesh K, Shikha K, 2015, Magneto-Thermoelastic Planewave at the Interface of Pre-Stressed Water-Aluminum-Epoxy Composite Using Greenand Lindsay's Model, Meccanica, 50, 3087–3102.
- Ravichandran S, 2023, Thermal Characterization of Honeycomb and Foam Core Sandwich Structures: Experiment and Modelling, Concordia University, Doctoral dissertation, 73p, Montreal, Canada.
- Rizzo F, Pinto F, Meo M, 2020, Investigation of Silica-Based Shear Thickening Fluid in Enhancing Composite Impact Resistance, Applied Composite Materials, Springer Scienceand Business Media LLC,27, 209–229.
- Sarita C, Manoj K S, Vikas K, Praveen S, Manish K J, 2023, Advantages and Applications of Sisal Fiber Reinforced Hybrid Polymer Composites in Automobiles:A Literature Review, Materials Today: Proceedings, 2214-7853, India.
- Sayer M, 2009, Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 118s, Denizli.
- Sinnott E W, Bloch R, 2020, Development of the Fibrous Net in the Fruit of Variou Sraces of Luffacylindrica, Bot Gaz 1943, 105, 90–99.

- Sugözü B, 2024, Tabakalı Kompozit Malzemelerde Rijitlik ve Dayanım Optimizasyonu, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 89s, Afyonkarahisar.
- Şen T, 2020, Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Otomotiv Sektöründe Kullanımı, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 83s, Isparta.
- Şimşir E, 2020, Taşıtlarda Kullanılan Polimer Matrisli Kompozit Yan Darbe Kirişlerinin Tasarımı ve Analizleri, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Doktora Tezi, 149s, Afyonkarahisar.
- Taşgın Y, Kandemir S, 2023, Doğal Elyaf Takviyeli (Jüt-Keten-Kenevir) Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Metalografik Olarak İncelenmesi, International Journal of Pure and Applied Sciences, 9(2), 240-249.
- Yoldaş M F, 2023, Deniz Araçlarında Kullanılan Cam Elyaf (GFRP) ve Karbon Elyaf (CFRP) Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mekanik Karakterizasyonlarının Deneysel İncelenmesi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 120s, İstanbul.
- Yozgat U, 2019, Bazalt Elyaf Takviyeli Filaman Sarım Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Davranışlarının Düşük İç basınç Altında İncelenmesi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 72s, Konya.
- Yuan D, 2020, Epoxy Functional Materials, Case Western Reserve University, Department of Macromolecular Science and Engineering, the Degree of Doctor, 132s, Cleveland.
- Verma R, Shukla M, Shukla D K, 2024, A Treatise on Mechanical Properties of Natural and Synthetic Fibre Reinforced Hybrid Polymer Composites, MaterialsToday, Proceedings.
- Venu H, Hossain I, Soudagar M E M, Kiong T S, Razali N M, Al Obaid S, Salmen S H, 2024, Investigations on Thermal Properties of Kevlar K49 Type Fiber Reinforced Sugarcane Ash Blended Polyester Composite, Thermal Science and Engineering Progress, 55, 102880.

Zhao L S, Zhou W H, Su L J, Garg A, Yuen K V, 2019, Selection of Physical and Chemical Properties of Natural Fibers for Predicting Soil Reinforcement, Journal of Materials in Civil Engineering, 31.10, 04019212.

İnternet Kaynakları

1- <https://kalkinmaguncesi.izka.org.tr/index.php/2021/06/17/otomotiv-sektorunde-kompozit-malzeme-kullanimi/>, 05.10.2024

2- <https://insapedia.com/kompozit-nedir-kompozit-malzemeler-ve-ozellikleri/>, 07.11.2024

