



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SELÜLOZ NANOFİBER VE KARBON NANOTÜP TAKVİYESİNİN
JÜT/CAM ELYAF HİBRİT KOMPOZİTLERİN DÜZLEM İÇİ VE
DÜZLEM DIŞI MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ**

Adem KARA

**Haziran-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SELÜLOZ NANOFİBER VE KARBON NANOTÜP TAKVİYESİNİN
JÜT/CAM ELYAF HİBRİT KOMPOZİTLERİN DÜZLEM İÇİ VE
DÜZLEM DIŞI MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ**

Adem KARA

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI**

Diğer Jüri Yeleri

Prof. Dr. Erol KILIÇKAP

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

**Haziran-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Adem KARA tarafından hazırlanan “Selüloz Nanofiber Ve Karbon Nanotüp Takviyesinin Jüt/Cam Elyaf Hibrit Kompozitlerin Düzlem İçi Ve Düzlem Dışı Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi” adlı tez çalışması 13/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Erol KILIÇKAP

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI

.....

Üye

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Adem KARA
Tarih: 13.06.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SELÜLOZ NANOFİBER VE KARBON NANOTÜP TAKVİYESİNİN JÜT/CAM ELYAF HİBRİT KOMPOZİTLERİN DÜZLEM İÇİ VE DÜZLEM DIŞI MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Adem KARA

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI

2025, 78 Sayfa

Teknolojinin gelişimiyle birlikte birçok sektörde kompozit malzeme kullanımının arttığı bilinmektedir. Bu kapsamda günümüzde kompozit malzeme üretiminde doğal fiber kullanımı da artmaktadır. Doğal fiber kullanımının yaygınlaşmasının ana sebeplerine bakıldığında, doğayı korumak için doğada çözünürlüğü yüksek hammadde kullanımının her geçen gün önem kazanması ve sentetik hammadde maliyetlerinin çok yüksek seviyelere ulaşarak üretim maliyetlerini olumsuz etkilemesi olarak sıralayabiliriz. Bu kapsamda kompozit malzemede doğal fiber kullanımının mekanik özellikleri hakkında çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında sentetik fiber olan cam elyaf ile doğal fiber olan jüt malzemesi kullanılarak el yatırma yöntemi ile elde edilen kompozit malzemenin mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla cam elyaf ve jüt malzemesinin farklı dizilimleri ile sekiz adet farklı hibrit kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin eğilme, çekme, kısa kırık kesme testi (SBS) ve burkulma testleri yapılarak kompozit malzemede doğal fiber kullanımında dizilimin önemi araştırılmıştır.

Yapılan bu çalışma ile en iyi mekanik özellik gösteren dizilim belirlendikten sonra, belirlenen bu dizilim içerisine %0,05, %0,10 ve %0,2 oranlarında selüloz nanofiber ve karbon nanotüp tozları eklenerek tekrar üretilen kompozit malzemelere yine aynı testler uygulanarak doğal fiber kompozit üretiminde nanopartikül tozu kullanımının mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır.

Deney sonuçlarına göre referans numuneye nanopartikül eklenmesiyle, SBS testinde yaklaşık %30, eğilme testinde yaklaşık %26, çekme testinde yaklaşık %8 ve burkulma testinde ise yaklaşık %30 civarında gelişim görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çekme gerilmesi, polimer matrisli kompozit, doğal fiber, eğilme gerilmesi, kısa kırık tabakalar arası kayma testi (SBS), jüt, cam fiber, selüloz nanofiber ve karbon nanotüp.

ABSTRACT

MASTER THESIS

EFFECT OF CELLULOSE NANOFIBER AND CARBON NANOTUBE REINFORCEMENT ON THE IN-PLANE AND OUT-OF-PLANE MECHANICAL PROPERTIES OF JUTE/GLASS FIBER HYBRID COMPOSITES

Adem KARA

Batman University Graduate Education Institute

Department of Mechanical Engineering

Advisor: Assist. Prof. Dr. Serkan BATI

2025, 78 Pages

With the advancement of technology, the use of composite materials has increased in many sectors. In this context, the use of natural fibers in composite material production is also on the rise today. The main reasons behind the growing popularity of natural fiber usage include the increasing importance of using raw materials with high biodegradability to protect the environment and the high costs of synthetic raw materials, which negatively impact production expenses. Accordingly, various studies have been conducted on the mechanical properties of composite materials incorporating natural fibers.

In this thesis study, the mechanical properties of a composite material produced by the hand lay-up method using glass fiber (a synthetic fiber) and jute (a natural fiber) were investigated. For this purpose, eight different hybrid composite materials were produced using various configurations of glass fiber and jute. The bending, tensile, short beam shear (SBS), and buckling tests were performed to examine the importance of fiber arrangement in the use of natural fibers in composites.

After identifying the configuration that exhibited the best mechanical properties, cellulose nanofiber and carbon nanotube powders were added at rates of 0.05%, 0.10%, and 0.20% to this configuration. The composite materials were reproduced, and the same tests were carried out again to investigate the effect of nanoparticle powder inclusion on the mechanical properties of natural fiber composites.

According to the experimental results, with the addition of nanoparticles to the reference specimen, improvements of approximately 30% in the SBS test, 26% in the bending test, 8% in the tensile test, and 30% in the buckling test were observed.

Keywords: Tensile stress, polymer matrix composite, natural fiber, bending stress, short beam interlaminar shear test (SBS), jute, glass fiber, cellulose nanofiber and carbon nanotube.

ÖN SÖZ

Kompozit malzemeler ve doğal fiber takviyeli kompozit malzemeler hakkında genel bilgiler verilen bu tez çalışmasında asıl üzerinde durulacak konu doğal fiber takviyeli kompozit malzemelerde dizilimin ve katkı tozlarının (selüloz nanofiber ve karbon nanotüp) kompozit malzeme mukavemetine olan etkilerini incelemektir. Bu kapsamda cam fiber ve jüt kumaşından üretilmiş olan farklı dizilimdeki ve farklı oranlarda nanopartikül karışımlı kompozit malzemeler çekme, eğilme, SBS ve burkulma testlerine tabi tutularak farklı dizilimli ve toz karışımlı kompozit malzemelerin mukavemetleri hakkında literatüre katkı sunması hedeflenmiştir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI'ya katkıları için teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Adem KARA

BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ÇİZELGELER/TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Kompozit Malzemeler.....	3
1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	4
1.2.1. Matris malzemesine göre kompozitlerin sınıflandırılması	4
1.2.1.1. Metal matrisli kompozitler.....	4
1.2.1.2. Seramik matrisli kompozitler.....	5
1.2.1.3. Polimer matrisli kompozitler	6
1.2.1.3.1 Termoset malzemeler	6
1.2.1.3.2. Termoplastik malzemeler.....	9
1.2.1.3.2. Elastomerler malzemeler.....	10
1.3. Kompozit Malzemelerin Avantajları	10
1.4. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları	11
1.5. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	12
1.5.1. Termoset reçineli kompozit üretim yöntemleri.....	12
1.5.1.1. Elle yatırma yöntemi (Hand Lay-Up)	12
1.5.1.2. Hazır kalıplama yöntemi	14
1.5.1.3. Püskürtme yöntemi (Spray-Up)	15
1.5.1.4. Reçine transfer kalıplama yöntemi (RTM)	16
1.5.1.5. Profil çekme yöntemi/pultrüzyon (Pultrusion)	17
1.5.1.6. Elyaf sarma yöntemi (Filament Winding)	18
1.5.1.7. Vakum torbalı kalıplama yöntemi (Vacuum Bagging).....	19
1.5.2. Termoplastik reçineli kompozit üretim yöntemleri	20
1.5.2.1. Enjeksiyon kalıplama yöntemi	20
1.5.2.2. Ekstrüzyon kalıplama yöntemi.....	21
1.5.2.3. Termoform şekillendirme yöntemi	22
1.5.2.4. Otoklav yöntemi.....	22
1.6. Kompozit Malzemelerde Kullanılan Takviye Elemanları	23

1.6.1. Sentetik lifler	23
1.6.1.1. Cam lifler	24
1.6.1.2. Karbon lifler	25
1.6.1.3. Aramid lifler	26
1.6.2. Doğal lifler	27
1.6.2.1. Bitkisel lifler	27
1.6.2.1.1. Jüt lifler	28
1.7. Doğal Fiber Takviyeli Kompozitler	30
1.7.1. Doğal fiber takviyeli kompozitlerin özellikleri	31
1.7.2. Doğal fiber ve doğal fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri	32
1.7.3. Doğal fiber ve doğal fiber kompozitlerin fiziksel özellikleri	32
1.7.4. Doğal fiber ve doğal fiber kompozitlerin termal özellikleri	33
1.8. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Karışım Tozları	33
1.8.1. Selüloz nanofiber (CNF)	33
1.8.2. Karbon nanotüp (CNT)	34
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	35
3. MATERYAL VE YÖNTEM	40
3.1. Hibrit Kompozitlerin İstiflenmesi ve Üretimi	40
3.2. Mekanik Test Aşamaları	48
3.2.1. Çekme testi	49
3.2.2. Eğilme deneyi	49
3.2.3. Kısa kiriş tabakalar arası kayma testi (SBS)	50
3.2.4. Burkulma deneyi	51
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	53
4.1. Birinci Kısım Test Sonuçları	53
4.1.1. Yoğunluk ve fiber oranları	53
4.1.2. Çekme testi sonuçları	55
4.1.3. Eğilme testi sonuçları	59
4.1.4. SBS testi sonuçları	61
4.1.5. Burkulma testi sonuçları	63
4.2. İkinci Kısım Test Sonuçları	65
4.2.1. Yoğunluk ve fiber oranları	65
4.2.2. Çekme testi sonuçları	66
4.2.3. Eğilme testi sonuçları	67
4.2.4. SBS testi sonuçları	68
4.2.5. Burkulma testi sonuçları	69
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	72
5.1 Sonuçlar	72
5.2 Öneriler	73
KAYNAKLAR	74

ÇİZELGELER/TABLolar LİSTESİ

Tablo	Sayfa
Tablo 1. 1. Termoplastik ve termoset matrislerin mekanik özellikleri	6
Tablo 1. 2. Cam fiberlerin özellikleri.....	25
Tablo 1. 3. Jüt fiberlerin kimyasal bileşimi.....	28
Tablo 1. 4. Jüt fiberinin mekanik özellikleri	30
Tablo 1. 5. E-cam ile doğal fiberlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.....	32
Tablo 3. 1. ARC 152 epoksi reçine üretici firma katalog bilgileri.....	42
Tablo 3. 2. Üretilen hibrit kompozitlerin dizilim tablosu	46
Tablo 4. 1. Üretilen kompozit plakaların yoğunluk ve fiber oranları	54
Tablo 4. 2. Tüm dizilimlerin ortalama çekme gerilmesi ve % uzama değerleri	56
Tablo 4. 3. Birinci dizilim kompozit plaka eğilme mukavemeti değerleri	60
Tablo 4. 4. Modifiye edilen plakaların yoğunluk ve fiber oranları	65
Tablo 4. 5. Modifiye edilmiş kompozitlerin çekme test sonuçları.....	66
Tablo 4. 6. Nanopartikül takviyeli kompozit plakaların eğilme mukavemeti.....	68

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1. 1. El yatırma prosesi	13
Şekil 1. 2. Dişi ve erkek kalıplar	14
Şekil 1. 3. Hazır kalıplama (SMC tooling sitesi).....	15
Şekil 1. 4. Spreyle püskürtme yöntemi ile üretim işlemi.....	16
Şekil 1. 5. Reçine transfer kalıplama yöntemi.....	16
Şekil 1. 6. Profil çekme yöntemi düzeneği	18
Şekil 1. 7. Elyaf sarma yöntemi.....	19
Şekil 1. 8. Vakum torbalama yöntemi	20
Şekil 1. 9. Enjeksiyon kalıplama yöntemi	21
Şekil 1. 10. Ekstrüzyon kalıplama yöntemi	21
Şekil 1. 11. Termoform şekillendirme yöntemi.....	22
Şekil 1. 12. Otoklav yöntemi	23
Şekil 1. 13. Sentetik liflerin sınıflandırılması.....	23
Şekil 1. 14. Karbon elyaf kumaş.....	26
Şekil 1. 15. Doğal malzemelerin sınıflandırılması	27
Şekil 1. 16. Jüt bitkisi (a), Jüt fiberlerin bitkiden çıkarılması (b), Jüt fiber demeti (c) ve jüt fiberinin yapısı (d)	29
Şekil 3. 1. Jüt doğal fiber kumaşa ait görüntüler	40
Şekil 3. 2. Cam fiber kumaşlara ait görüntüler	41
Şekil 3. 3. ARC 152 Epoksi reçinenin hazırlanması	42
Şekil 3. 4. Selüloz nanofiber ve karbon nanotüp tozlarının hassas terazi ölçümü	43
Şekil 3. 5. ARC 152 epoksi reçinesiyle CNF ve CNT tozlarının karıştırılması	44
Şekil 3. 6. El yatırma tekniği ile toz karışımı olmayan ve toz karışumlu kompozit plakaların üretilmesi	45
Şekil 3. 7. El yatırma tekniği ile dizilimin tamamlanması	45

Şekil 3. 8. Kompozit ve doğal fiber takviyeli kompozit üretimi	47
Şekil 3. 9. CNF ve CNT tozları eklenerek üretilen yedinci dizilim kompozit plakalar .	48
Şekil 3. 10. Kompozit tabakaların kesme işleminin yapıldığı CNC router cihazı.....	48
Şekil 3. 11. Dördüncü dizilime ait çekme testi görseli	49
Şekil 3. 12. Eğilme testi görüntüsü.....	50
Şekil 3. 13. SBS şematik ve test görüntüsü	51
Şekil 3. 14. Burkulma testi görüntüsü	52
Şekil 4. 1. Hibrit kompozitlerin çekme testi sonuçları	56
Şekil 4. 2. Hibrit kompozitlerin eğilme test sonuçları	59
Şekil 4. 3. Tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS) sonuçları	61
Şekil 4. 4. Altı cam ve altı jüt tabakasından oluşan hibrit kompozitlerin burkulma davranışları.....	63
Şekil 4. 5. Sekiz cam ve dört jüt tabakasından oluşan hibrit kompozitlerin burkulma davranışları.....	64
Şekil 4. 6. $[C_3JCJ]_s$ dizilimli nanopartikül modifiyeli kompozitlerin çekme mukavemeti grafiği.....	66
Şekil 4. 7. Nanopartikül takviyeli hibrit kompozitlerin eğilme gerilmeleri	67
Şekil 4. 8. Nanopartikül modifiyesinin tabakalar arası kayma mukavemetine etkisi.....	69
Şekil 4. 9. Nanopartikül takviyeli kompozitlerin kritik burkulma yükleri	70

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

σ_c	: Çekme gerilmesi (MPa)
F	: Uygulanan yük (N)
A	: Numunenin kesit alanı (mm ²)
$\% \epsilon$	: % Uzama
L	: Numunenin son boyu (mm)
l_0	: Numunenin ilk boyu (mm)
σ_e	: Eğilme gerilmesi (MPa)
L	: Destek aralık açıklığı (mm)
B	: Numune genişliği (mm)
H	: Numune kalınlığı (mm)
$ILSS$	: Tabakalar arası kayma mukavemeti (MPa)
P_m	: Elde edilen en yüksek kuvvet (N)
T	: Numune kalınlığı (mm)
W	: Numune genişliğidir (mm)
P_{kr}	: Kritik kuvvet
E	: Elastik modülü
I	: Atalet momenti
L	: Numune uzunluğu
R	: Numune yarıçapı
EI	: Eğrilme rijitliği

Kısaltmalar

CNF	: Selüloz Nanofiber
CNT	: Karbon Nanotüp
J	: Jüt
C	: Cam

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, mühendislikte ve malzeme bilimi alanlarında yenilikçi çözümler sunmakta olup, iki veya daha fazla farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan yapılar olarak tanımlanırlar. Kompozit malzemeler, bileşenlerindeki malzemelerin özelliklerini birleştirerek, yüksek mekanik özellikler, yüksek dielektrik direnç, hafiflik, yüksek korozyon direnci, ısıl dayanımı gibi üstün performans özellikleri sergiler. Genel olarak matris fazı ve takviye fazı olmak üzere iki temel bileşenden oluşan kompozit malzemelerin, matris fazı polimer, metal veya seramik gibi sürekli bir yapıya sahipken, takviye fazı ise fiberler, parçacıklar veya tabakalar gibi bir yapıya sahiptir.

Matris fazı, takviye fazını çevreleyerek yapıyı bir arada tutar ve yük aktarımına olanak tanır. Bu faz yüklemeler esnasında oluşan gerilmeyi etkin bir şekilde takviye fazına aktarır ve bütün bir yapının birlikte çalışmasını mümkün kılar.

Takviye fazı ise mekanik performansı doğrudan etkileyen ve genellikle lif, partikül ya da tabaka formundaki sert ve dayanıklı malzemelerden oluşur. Bu faz elastiklik modülü, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, aşınma ve darbe direnci gibi özelliklerini doğrudan etkiler. Takviye elemanından beklenen mekanik, elektriksel ya da kimyasal açıdan nispeten zayıf özelliklere sahip olan matris fazının performansını artırarak, belirli uygulamalarda gerekli olan özellikleri karşılayabilmesini sağlamaktır.

Kompozit malzemeler, genellikle havacılık, uzay teknolojisi, otomotiv, denizcilik, inşaat, kimya sanayi, tarım ve gıda sanayi, elektrik-elektronik sektörleri ve yenilenebilir enerji gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, yüksek mukavemet, tasarım ve üretim esnekliği, yanmazlık, ultraviyole ışınlarına dayanım, yüksek yoğunluk ve korozyon direnci gibi avantajları sayesinde geleneksel malzemelere kıyasla daha üstün performans sunar. Örneğin, karbon fiber takviyeli polimerler malzemeler, havacılık sektöründe uçakların gövdeleri ve kanatlarında kullanılmasıyla yapısal dayanım korunup, yakıt verimliliği artırmaktadır. Bunun yanında, hibrit kompozitlerin, farklı fiber türlerinin avantajlarını bir araya toplayıp daha geniş bir performans yelpazesi sunarak, enerji Emilimi ile dayanıklılık arasındaki dengeyi sağlamaktadır. Bu sebeple, kompozit malzemeler modern mühendislik uygulamalarında vazgeçilmez bir yere sahiptirler.

Kompozit endüstrisinde özellikle karbon, aramid ve cam gibi sentetik lifler üstün mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı takviye malzemesi olarak öne çıkmaktadırlar. Ancak bu malzemeler sentetik olmalarından dolayı doğada bozunmaları uzun yıllar sürebilmektedir. Bu bağlamda doğada biyolojik olarak parçalanabilen, bolca bulunan, düşük yoğunluklu, ekonomik, toksik olmayan ve ekipman takımlarına aşındırıcı olmamalarından dolayı doğal fiberler artan kirlilik sorunlarına çözüm olarak polimer endüstrisinde öne çıkmaktadırlar.

Jüt, kenaf ve sisal gibi doğal lifler, sentetik liflere bir alternatif sunabilmekte ve rekabetçi mekanik özelliklerle performans gösterebilmektedirler. Bu fiberler, yapısal uygulamalar için uygun olan önemli bir sertliğe ve özgül mukavemete sahiptir. Ancak doğal fiberler, sentetik fiberlere kıyasla daha düşük mekanik özelliklere ve hidrofilite (suyu çekme) gibi bazı dezavantajlara sahiptirler. Bu nedenle bu malzemelerin doğrudan tek takviye olarak kompozitler içerisinde kullanılmasının yerine sentetik fiberlerle birlikte hibritlenerek kullanılması daha doğru bir yaklaşım olduğu araştırmacılar tarafından söylenmektedir.

Hibritleme işlemi kompozitlerin özelliklerini belirli gereksinimlere uygun hale getirmek ve özellikler arasında bir denge sağlamak için yapılır. Hibritleşmenin amacı, bileşenlerinin avantajlarını koruyacak ancak dezavantajlarını korumayacak yeni bir malzeme oluşturmaktır. Bu nedenle, hibrit yapılar mühendislerin ikili sistemlerde elde edilemeyen belirli uygulamalar için özel özelliklere sahip yeni malzemeler tasarlamalarına olanak tanır (Onal & Adanur, 2002). Doğal liflerden oluşan hibrit laminat malzemeler, özelliklerindeki gelişmeler nedeniyle inşaat malzemeleri, lokomotiflerde bölme duvarları, otomotiv parçaları, paketleme malzemeleri ve spor malzemeleri üretimi gibi birçok uygulamada artan bir talep görmektedir (Sathyaseelan vd., 2020). Ancak hibritleme işlemi tek başına yeterli olmayıp ayrıca bunların doğru bir şekilde dizilmesi ve doğru oranlarda üretilmesi endüstride kullanılabilirliğini de artırmaktadır. Hibrit kompozitlerin özelliklerini kontrol eden parametreler arasında lif içeriği, lif uzunluğu, oryantasyonu, lif-matris ara yüzü, katman sayısı, bileşen liflerin katmanlama düzeni, katman kalınlığı ve bireysel liflerin kırılma gerinimi yer alır (Shahzad & Nasir, 2017).

Jüt ve kenaf, yıllık bitkilerden elde edilen ve polimer kompozit uygulamalarında takviye malzemesi olarak kullanılma potansiyeline sahip kabuk grubundan doğal liflerdir. Altın lif olarak da adlandırılan jüt fiber *Corchorus* cinsine ait bitkilerden elde edilir ve yaklaşık 100 tür içerir. Asya'dan gelen beyaz *Corchorus capsularis* (beyaz jüt) ve

Afrika'dan gelen *Corchorus olitorius* (Tossa jüt) olmak üzere iki otsu yıllık bitkiden elde edilir. Pamuktan sonra dünyada en çok yetiştirilen doğal lif konumundadır ve ekildikten sonra 4-6 ay içerisinde 2.5-3 metre uzunluğa erişebilmektedir (Sanjay & Yogesha, 2017). Bangladeş, Hindistan, Endonezya, Çin, Tayland ve Brezilya jüt bitkisinin büyümesi için en uygun koşulları sağlar (Faruk vd., 2012; Bavan & Kumar, 2010). Genellikle çuval, çuval bezi, halı, ip, halat ve sicim yapımında kullanılan jüt lifi biyobozunur, çevre dostu, geri dönüştürülebilir ve iyi bir ısı ve elektrik yalıtkanıdır (Sanjay & Yogesha, 2017). Jüt lifi, pamuk ve çoğu gıda ürününün yetiştirilemediği nehir düzlüklerine, çöküntülere ve tuzlu alkali topraklara ekilebilir ve jütün büyümesi sırasında hiçbir pestisit veya gübreye ihtiyaç duyulmaz; bu nedenle jüt bir tür 'saf yeşil' tarımsal üründür (Bavan & Kumar, 2010). Jüt lifi, otomotiv, tüketici ürünleri, ambalaj endüstrileri, düşük maliyetli konutlar ve diğer inşaat yapılarında kullanılır (Guimarães vd., 2009; Sanjay vd., 2016).

Bu çalışmada jüt (doğal) ve cam (sentetik) fiber takviyeli epoksi kompozitlerin farklı dizilimlerde birleştirilerek farklı mekanik gereksinimlere nasıl tepki verdiklerini ve en uyumlu dizilimin ortaya çıkarılmasını amaçlamaktadır. Bu bağlamda 8 farklı hibrit kompozit plaka üretilecek ve özellikle düzlem dışı kuvvetlere karşı dayanımları test edilecektir. Düzlem dışı dayanımların tespiti için kompozitlere eğme ve tabakalar arası kayma mukavemeti testleri uygulanacak olup ayrıca düzlem içi mukavemetin belirlenebilmesi için çekme testinin yanı sıra kritik yükler altında stabilite kaybını belirlemek için burkulma testi de uygulanacaktır. Bu incelemeler sonucunda belirlenen en iyi dizilime sahip olan hibrit kompozit farklı oranlardaki tozlar ile modifiye edileceklerdir. Modifiye işlemi için %0,05, %0,10 ve %0,20 oranlarında selüloz nanofiber (CNF) ve karbon nanotüp (CNT) tozları kullanılacak olup bu tozlarının mekanik özelliklere etkileri gözlemlenecektir.

1.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme, en az bir matris ve bir takviye malzemesinin bir araya gelmesiyle meydana gelen malzemelere denir. Kompozitin oluşumundaki bileşenler (matrisler ve takviye elemanları), çeşitli imalat yöntemleri ve takviye elemanlarının farklı dizilimleri imal edilip kompozit malzemede ihtiyaç duyulan gerekli mukavemetin sağlanması için beraber hareket ederler.

Kompozitlerin ana yapı malzemesi olan matrisler kompozit malzemesine istenilen şeklin verilmesini sağlayarak, takviye malzemelerini sabitlemek ve kompozit malzemeye uygulanan kuvvetleri takviye malzemelerine yayarak mukavemeti sağlamaktadır.

Kompozit malzemede kullanılan takviye elemanları kompozit malzemeye uygulanan mukavemetin büyük kısmını üzerine alarak malzemeden istenilen özelliklerin sağlanmasına olanak verirler. Bu nedenle kompozit malzemelerden beklenen yapısal özellikler neticesinde takviye elemanları farklı dizilim ve farklı açılarda bir araya getirilir.

1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler başlıca matris fazı ve takviye fazından oluşmaktadır. Bu iki faz kendi içerisinde sınıflandırılır. Matris fazına göre kompozit malzemeler, metal, polimer ve seramik matrisli kompozitlerdir. Takviye fazına göre kompozit malzemeler ise, tabakalı, parçacık takviyeli ve elyaf takviyeli olarak sınıflandırılırlar.

1.2.1. Matris malzemesine göre kompozitlerin sınıflandırılması

1.2.1.1. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler 1960'lı yılların başlarında gelişen teknoloji ile daha fazla mukavemete sahip ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemelere ihtiyaç duyulması sebebiyle geliştirilmiştir. Matris malzemesi olarak yeterli mukavemet özelliklerinden dolayı alüminyum (Al), demir (Fe), bakır (Cu), magnezyum (Mg), kobalt (Co), nikel (Ni), titanyum (Ti), molibden (Mo) ve çinko (Zn) gibi metaller ile bu metallerin alaşımlarını matris malzemesi olarak kullanan kompozitlerdir. Metal matrisli kompozitler takviye elemanı olarak silikon karbür ve karbon kullanılmaktadır. Bunlar ise metal malzemelerle kolay bağ kurabilen titanyum diborür (TiB_2), alüminyum oksit (Al_2O_3), molibden (Mo), silisyum karbür (SiC), alüminyum nitrür (AlN), grafen, titanyum nitrür (TiN), bor (B), silisyum nitrür (Si_3N_4) ve wolfram (W) gibi malzemelerden seçilirler.

Metal matrisli kompozitler yerlerine tercih edildikleri metaller ve diğer malzemelere kıyasla önemli avantajlara sahiptirler. Bunlar; düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek darbe dayanımı, yüksek rijitlik, yüksek sıcaklık ve sıcaklık

değişikliklerine dayanım, aşınma direnci, yüksek mukavemet, daha düşük ısı genleşme katsayısı gibi avantajlardır.

Metal matrisli kompozitlerin sınırlayıcı özellikleri ise, sürekli olarak fiber takviyesinin gerektiği durumlarda üretim süreci zor ve karmaşıktır. Metal matrisli kompozitlerin metal malzemelere göre sünekliği düşüktür. Metal matrisli kompozitlerin üretimi metallere göre yüksek maliyetli olabilmektedir. Kompozit malzeme üretimi yeni gelişen bir dal olduğu için üreticilerin bilgi birikimi metallere göre düşüktür (Kalemtaş, 2014).

1.2.1.2. Seramik matrisli kompozitler

Seramik malzemeler, metal ya da metal olmayan elementlerin birleşimi ile meydana getirilen inorganik malzemelere denir. Seramiklerin yüksek sıcaklıkta çalışabilmesi, elastiklik modülünün yüksek olması ve düşük yoğunluk gibi özellikleri matris malzemeleri olarak tercih edilmelerini sağlamaktadır. Fakat seramiklerin bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır. Gevrek yapıda olmaları, bazı özelliklerinin değişken olması, gerilme dayanımının düşük olması, mekanik ve şok dayanımlarının düşük olması seramiklerin başlıca dezavantajlarıdır. Takviye malzemeleri sayesinde seramikler güçlendirilerek daha yaygın şekilde kullanımları sağlanmıştır. Seramik matrisli kompozitlerde sürekli ve süreksiz fiber olmak üzere iki çeşit takviye elemanı kullanılır. Sürekli fiber takviyeli seramiklerin tokluk değerleri daha yüksek olduğu için daha fazla tercih edilirler. En sık kullanılmakta olan seramik matrisli kompozit grupları şunlardır; nitrürler, karbürler, oksitler ve cam seramikler.

Seramik matrisli kompozitlerde karbon/karbon kompozit yapılar yüksek sıcaklıklara dayanımı ve yüksek yorulma dayanımı sayesinde ön plana çıkmaktadır. Karbon/karbon kompozitler yüksek sıcaklıklara dayanımı ve özgül ağırlıklarının düşük olması nedeniyle uzay mekikleri ve roket motorlarında tercih edilmektedirler. Ayrıca karbon elementi biyolojik ve kimyasal açılarından inert olması ve de insan vücudu içerisinde steril kalabilmesi nedeniyle tıbbın birçok alanında kullanılmaktadır.

Beton kompozitlerde seramik matrisli kompozitlerin bir çeşididir. Günümüzde betona ilave edilen sanayi atıklarının yanı sıra cam, ahşap ve polimer malzemelerin de takviyesiyle oluşturulan beton kompozitler son yıllarda inşaat sektörüne damgasını

vurmaktadır. Seramik matrisli kompozitlerin farklı kullanım alanlarına örnek olarak; motor yalıtım parçaları, otomotiv fren diskleri ve egzoz valfları, korozyon dayanımının yüksek olması gereken endüstriyel uygulamalar ile zırh parçaları sayılabilir (Sönmez, M., 2009).

1.2.1.3. Polimer matrisli kompozitler

Matris maddesi olarak reçinelerin kullanıldığı ve takviye malzemesi olarak elyafın kullanıldığı kompozitler, polimer matrisli kompozit olarak tanımlanır. Düşük üretim maliyeti ve kolay üretim yöntemleri sayesinde en çok kullanım alanına sahip kompozitlerdir. Polimer matrisli malzemeler termosetler malzemeler, termoplastikler malzemeler ve elastomerler malzemeler olarak üç guruba ayrılmaktadır. Matris elemanı olarak kullanılan reçineler termoset malzemeleri içerisinde yer almaktadır (Asi, 2018).

Tablo 1. 1. Termoplastik ve termoset matrislerin mekanik özellikleri (Sönmez, S., 2023)

Matris Tipi	Matris malzemesi	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme modülü (GPa)
Termoplastik	PP	0,89-0,92	32	0,9	35	1
	LDPE	0,89-0,92	29	0,2	0,09	0,1
	HDPE	0,94-0,97	25	0,6-1,5	32,5	
	Nylon	1,14	50-90	1,3-4,2	20-150	1,3-3,7
Termoset	Epoksi	1,10-1,40	73	5	60	-
	Polyester	0,90-1,27	20,40	3,3-3,9	45	3,3
Biyobozunur	PLA	0,90-1,27	25-66	2,3	48-110	0,3-3,6
	Nişasta		4,48-8,14	0,16-0,29		

1.2.1.3.1 Termoset malzemeler

Termosetler reçinelerde uzun molekül zincirleri çapraz bağlar ile birbirlerine bağlı olup, tekrar ısıya maruz kaldığında birbirleri üzerinden kayma yeteneklerine sahip değildirler. Bu nedenle termoplastların aksine termosetler sadece bir kere ısıtılarak şekillendirilebilir. Tekrar ısıya maruz kalmaları halinde şekilleri bozulur ve yeniden şekil verilemez. Termoset reçineler üretim safhasında basınç veya ısıya maruz bırakılarak şekillendirilir. Termoset reçinelerin genel olarak kullanıldığı sektörler ise denizcilik, otomotiv, inşaat ve mobilya sektörleridir (Asi, 2018).

Termoset reçinelerin farklı eřitleri vardır. Bunlar şoyle sıralanabilir; epoksi reçineleri, polyester reçineleri, fenolik reçineleri, silikonlar, poliimidler, poliüretanlar, siyanet esterlerdir.

Termoset reçinelerin her çeşitinin farklı özellikleri olup, farklı kullanım alanları vardır. Aşağıda bu özellikler hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

Epoksi;

Epoksiler, reçine ve sertleştirici olmak üzere iki kimyasal ürünün karışımı ile elde edilen kimyasal yapıştırıcılardır. Reçine ve sertleştiricinin karışım oranı, reçine ve sertleştiricinin kimyasal özelliklerine göre ve elde edilecek kompozit yapının özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Epoksiler kimyasal, ısı ve mekanik faktörlere karşı yüksek mukavemete sahiptir. Elyaf gibi lifli katkı maddeleri ile güçlü bir bağ oluşturarak yüksek mukavemetli kompozitlerin yapımına imkân verirler. Fakat avantajlarının yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. Bunlar; üretim maliyetlerinin yüksek olması, UV ışınlarına maruz kalınca moleküler bağları zayıflayarak mukavemetlerinin azalması, üretim sırasında insan vücudu ile temas etmesi ve tozunun solunumu sağlık problemlerine neden olmasıdır.

Epoksilerin yukarıda verilen bilgilerin yanında, iyi bir bağlayıcı özelliğe sahip olması, kullanıldığı kompozit malzemelerde hafiflik, sertlik, tamir edilebilme, termik direncinin iyi olması, su ve kimyasallara karşı dayanıklı olmaları ve yüksek mukavemet gibi özellikleri sayesinde havacılık, inşaat, denizcilik, elektronik sistemler ve otomotiv gibi birçok sektörde kullanılmaktadır (Asi, 2018).

Polyester;

Polyesterler üretimi planlanan kompozitten istenilen özelliklere göre (yüksek gerilim mukavemeti, yüksek ısı ve mekanik şoklara karşı direnç, elastikiyet ve yanmaya karşı direnç... vb.) özel olarak formüle edilip üretilirler. Polyesterlerin üretimleri epoksilerde olduğu gibi istenilen şekillerde kalıplanarak yüksek sıcaklıklarda veya oda sıcaklığında işlenerek üretilirler. Polyesterler polimer üretim zinciri oluşumu safhasında modifiye edilebilmeleri ve üretimlerinin çok yönlü olması sebebiyle birçok sektör ve alanda kullanılmaktadır.

Polyesterlerin üretim maliyeti epoksilere göre daha uygundur. Ancak epoksilere kıyasla bazı dezavantajları vardır. Bunlar; üretim sırasında çatlama eğilimleri, zayıf yapışma mukavemeti, termal şoklara karşı daha hassas olması, nemli ortamda elektriksel

özelliğinde değişim gibi özellikleriyle epoksilere göre dezavantajlarıdır. Polyesterlerin çok fazla kullanım alanı vardır. Bunlardan en yaygın olanları şöyle sayılabilir; inşaat sektörü, denizcilik ürünlerinde kullanımı (gemi iskeleti), büyük tankların yapımı, otomotiv, tüketim malları ve boru yapımı gibi alanlarda kullanılmaktadır (Sönmez, M., 2009).

Fenolik reçineler;

Boyutsal kararlılık ve kimyasal direnç bakımından oldukça yüksek seviyede olan fenolik reçineler gevrek ve sert yapıya sahiptir. Diğer ismi bakalit olan bu reçinenin kalıplanabilme yeteneği çok iyidir. Fenolik kompozitler ışık ve oksijene maruz kaldığında renklerinde değişimler meydana gelmektedir. Bu özelliğiyle polimerlere nazaran daha dezavantajlı kalmaktadırlar. Fenolik reçineler boyutsal kararlılıkları, korozyona dayanımı, yüksek sıcaklıklara dayanımı, yüksek seviyede ses yalıtımı, dumanının zehirsiz olması ve çok iyi alev dayanımı özelliklerine sahip olup bu kapsamda fren balatalarında, araçların debriyaj sistemi balatalarında, havacılık endüstrisinde ve yalıtım maddesi olarak çok fazla kullanım alanına sahiptir (Sönmez, M., 2009).

Melamin ve üre formaldehitler;

Melaminler malzemesi, fenolik reçinelere kıyasla daha mukavemetli yapıda olmalarına rağmen, sulu ortamda dayanımı daha düşüktür. Ayrıca kimyasallara (asit ve benzeri güçlü kimyasallar) karşı da mukavemeti düşüktür. Fakat melamin formaldehitler deformasyona, soğuk hava şartlarına, sıcak suya, ısı ve elektriksel yalıtıma karşı yüksek özelliklere sahiptir. Fenolik reçinelere nazaran üretimi daha pahalıdır. Mutfak ve dekoratif eşyalarda, tezgâh üstlerinde, buzdolabı ve fırın tarzı eşyaların yüzeylerinde kullanılmaktadır (Sönmez, M., 2009).

Silikon;

Silikonlar, yapısal olarak organik ve inorganik karışımı sentetik polimerlerdir. Bu özelliği ile diğer polimerlerden farklıdırlar. Kullanılacağı yere göre elastomerimsi yapıda, akışkan, jelimsi veya rijit olacak şekilde üretilebilirler. Silikonlar yapısal özellik olarak; yüksek ve düşük sıcaklıklara, korozyona, su ve hava şartlarına karşı dayanıklıdır. Kuvvetli alkaliler ve buhardan etkilenebilirler (Sönmez, M., 2009).

Poliüretan;

Poliüretan ekzotermik bir reaksiyon sonucu oluşan, çok sayıda özelliğe sahip olan bir polimer çeşididir. Poliüretanlar, otomotiv endüstrisi, tekstil endüstrisi, soğutma sistemleri, ayakkabı sanayisi (suni deriler ve ayakkabı tabanları), kuvvetli yapıştırıcı, ses ve ısı yalıtım elemanları olmak üzere birçok alanda kullanımı vardır.

Siyanat ester;

Siyanat ester malzemesi; radyasyon ve aleve karşı dirençli olup, cam, metal ve karbon bileşenli malzemelere çok iyi yapışma özelliğine sahiptir. Bu nedenle havacılık ve elektronik sanayinde farklı kullanım alanları mevcuttur (Asi, 2018).

1.2.1.3.2. Termoplastik malzemeler

Termoplastikler malzemeler ısıya maruz kaldıklarında yumuşak forma getirilip, şekil verilebilen tekrar soğutulduklarında ise katılaştıran malzemelerdir. Katı forma geçen termoplastikler tekrar ısıya maruz kaldıklarında yumuşayıp şekillendirilebilen malzemelerdir. Termosetler ısındıklarında yapısında bozulmalar olurken termoplastikler ısıtılıp, soğutulduğunda sadece fiziksel değişime uğrarlar. Bu sebeple geri dönüştürülebilen malzemelerdir.

Termoplastikler metallerin ve termosetlerin çoğu formundan daha hafif ve daha uygun maliyete sahip oldukları için birçok sektör ve alanda (otomotiv, havacılık... vb.) tercih sebebidir. Termoplastik malzemeler, termoset kompozit malzemelerle yakın mekanik özelliklere sahip olmasının yanı sıra yüksek kimyasal dirence sahiptir ve üretim maliyetleri termosetlere kıyasla daha uygundur.

Termoplastik matris malzemelerinin içerisinde polipropilen (PP); yüksek kimyasal direnç, uygun üretim maliyeti, yüksek darbe ve yorulma mukavemeti gibi özellikleri nedeniyle en çok tercih edilen çeşididir. Polipropilen matrisinin blok-kopolimer, rastgele kopolimer ve homopolimer şeklinde üç temel çeşidi tercih edilmektedir.

Termoplastik matris malzemelerinin iki farklı dezavantajı bulunmaktadır. Bunlar, üretim safhasında basınç ve ısı işlemlerinin yapılabilmesi için yüksek kalitede donanımlara ihtiyaç duyulması ve elyaf malzemesinin termoset kompozitlere kıyasla ısılanması daha zordur.

Termoplastik malzemeler süreksiz ve sürekli fiber takviyeli kompozitler olmak üzere ikiye ayrılır. Süreksiz fiber takviyeli termoplastik kompozit malzemeler üflemleri döküm ve enjeksiyonla döküm teknikleri ile üretilir. Sürekli fiber takviyeli kompozit malzemelerin üretim teknikleri ise, termo şekillendirme, basınçlı döküm, şerit sarma, otoklav ve diyafram şekillendirme yöntemleridir (Taş vd., 2023).

1.2.1.3.2. Elastomerler malzemeler

Elastomerler malzemeler, çapraz bağlara sahip lastiğimsi özellikte polimerlerdir. Çekme kuvveti uygulandığında uzayan ve çekme kuvvetinin sona ermesiyle eski şekline geri dönen polimer matrislerdir. Elastomerler malzemeler belli oranlarda uzayıp orijinal şekline döndüğünde herhangi bir deformasyona uğramazlar. Bunun sebebi ise yapılarındaki düşük yoğunluğa sahip çapraz bağlarıdır. Elastomerler malzemelere sıklıkla lastiksi polimerler denilmektedir. Ancak lastiksi polimerler çekme kuvveti altında deforme olurken, elastomer polimerler çapraz bağları sayesinde yapısını korumaktadırlar. Bu yüzden lastik kelimesi yapılarında çapraz bağlar bulunmayan lastiksi malzemeler için kullanılmalıdır. Genelde kauçuk adıyla bilinirler. Bilinen en yaygın kullanılan tipleri sentetik kauçuk ve doğal kauçuk tipleridir (Köroğlu, 2013).

1.3. Kompozit Malzemelerin Avantajları

- Kompozit malzemeler, üretilirken kolay şekillendirilebilirler. Bu nedenle üretim maliyetleri düşüktür.
- Kompozit malzemeler, kullanılacakları alanlara uygun yüksek mukavemette üretilebilirler. Buda üretimde kolaylık ve daha uygun maliyette ürün elde etmeye olanak sağlar.
- Kompozit malzemeler, dış etkilere karşı (su, hava, nem, kimyevi ürünler) dayanıklı olup korozyona maruz kalmazlar.
- Kompozit malzemeler, diğer ürünlere kıyasla yüksek mukavemetlerinin yanında çok daha hafif malzemelerdir. Bu özelliği sayesinde birçok sektörde (havacılık, uzay, otomotiv, denizcilik) kullanıldıkları sistemlerin verimliliğini artırdıkları için tercih edilirler.

- Kompozit malzemeler, elektriksel özellik olarak iyi bir iletken veya iyi bir yalıtkan yapıda üretilebilirler.
- Kompozit malzemeler, üretim sırasında istenilen renklerde kalıcı şekilde üretilebilir. Böylece üretimden sonra tekrar renklendirme işlemine gerek duyulmaz.
- Kompozit malzemeler, titreşimli çalışma şartlarında titreşimleri sönümleme özelliği sayesinde daha az deformasyona uğrayarak kırılma veya çatlamalara karşı daha dayanıklıdır.
- Kompozit malzemeler, yüksek ısılara dayanıklı şekilde üretilebildikleri için iyi bir yalıtım malzemesidir.

1.4. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

- Kompozit malzemeler, üretildikleri kaliteli hammaddelerin pahalı olması maliyetleri nedeniyle yüksek maliyetli ürünlerdir.
- Kompozit malzemeler, üzerlerine uygulanan kesme ve delme gibi işlemlerde içerisindeki takviye elemanlarında hasar oluşabilmektedir.
- Kompozit malzemeler, üzerlerinde oluşan deformasyonlar tamir edilmesi zor ve tamir gören kısımların mukavemetleri düşüktür.
- Kompozit malzemeler, yapıları gereği oluşan bir deformasyonun tespit edilmesi zor malzemelerdir.
- Kompozit malzemeler, benzer kompozit malzemeler farklı doğrultuda uygulanan yüklere karşı farklı gerilim mukavemeti göstermektedir.
- Kompozit malzemeler, birlikte çalıştıkları metaller gibi sıcakta şekil değiştirmedikleri için metallerle sabitlendikleri yüzeylerde hasarlar oluşabilir.

Yukarıda kompozit malzemeler hakkında bahsedilen avantaj ve dezavantajlar değerlendirildiğinde, avantajlarının fazla olması sebebiyle birçok sektörde ve farklı projelerde kullanılmaktadır.

1.5. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Polimer matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri matris yapılarına göre iki başlık altında açıklanır. Bunlar; termoset ve termoplastik reçineli kompozit üretim yöntemleridir.

Termoset reçineli kompozit üretim yöntemleri;

- Elle yatırma yöntemi (Hand Lay-Up)
- Hazır kalıplama yöntemi
- Püskürtme yöntemi (Spray-Up)
- Reçine transfer kalıplama yöntemi (RTM)
- Profil çekme yöntemi/pultrüzyon (Pultrusion)
- Elyaf sarma yöntemi (Filament Winding)
- Vakum Torbalı Kalıplama Yöntemi (Vacuum Bagging)

Termoplastik reçineli kompozit üretim yöntemleri;

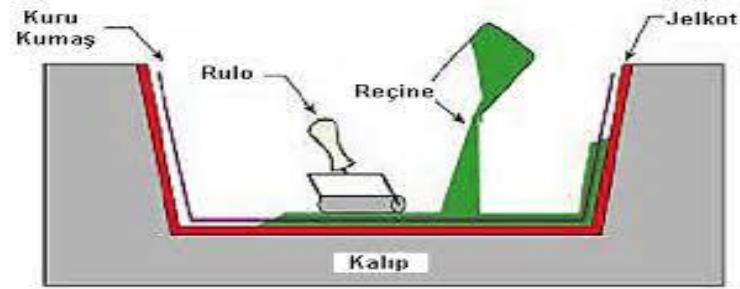
- Enjeksiyon kalıplama yöntemi
- Ekstrüzyon kalıplama yöntemi
- Termoform şekillendirme yöntemi
- Otoklav yöntemi

1.5.1. Termoset reçineli kompozit üretim yöntemleri

1.5.1.1. Elle yatırma yöntemi (Hand Lay-Up)

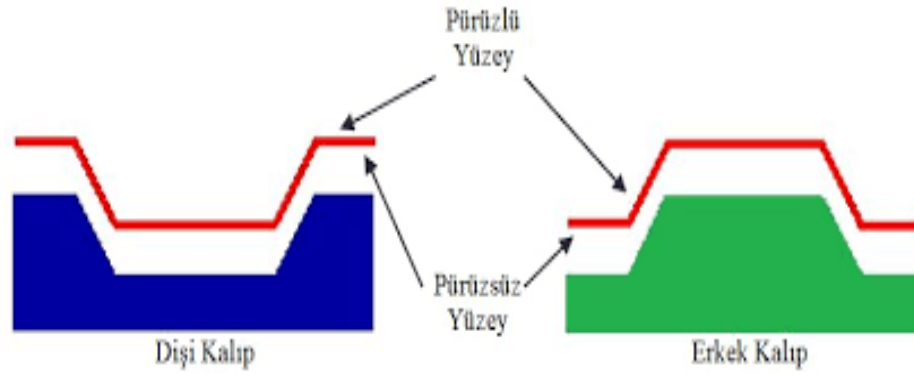
El yatırma yöntemi ile kompozit malzeme üretimi, düşük üretim maliyeti ve üretimin kolay olması sebebiyle en yaygın kullanılan yöntemlerdendir. Bu yöntemde bir kalıbın üzerine polimer malzemenin elle yerleştirilip farklı rulo veya fırçalar ile polimer malzemelere reçine emdirilmesi ile polimer malzemenin kalıbın şeklini alarak kompozit malzeme elde etme yöntemidir. Üretilcek kompozit malzemelerin şekli kalıp yüzeyi sayesinde elde edilmektedir. Bu nedenle kalıbın yüzeyi üretilcek malzemenin şekline göre düz veya birçok kenardan oluşabilir. İlk aşamada kalıp ile kompozit malzemenin

birbirine yapışmaması için kalıp yüzeyine ayırıcı madde (vaks, madeni yağ, silikon vb.) sürülür. Daha sonra serilen ayırıcı madde üzerine kompozit malzemenin dış kaplama boyası olan jelkot sürülür. Sonrasında polimer malzemeler tabaka halinde yerleştirilirken katmanlar arasına reçine sürülür. Polimer malzeme ile reçinenin homojen birleşimi (reçinenin polimer malzemeye emdirilmesi) için özel rulolar ile reçine polimer üzerine yayılarak preslenir. Bu sayede hava boşluklarının oluşması önlenmiş olur. Polimer dizilim katmanları ve polimer malzemenin dizilim açıları elde edilecek kompozit malzemenin özelliklerine göre önceden belirlenmektedir. Böylece istenilen kompozit dizilimi bitene kadar reçine ve polimer malzeme uygulaması devam eder. Ayrıca polimer malzemenin özelliğine göre reçine her polimer katmana uygulanacağı gibi, tüm polimer dizilimine toplu şekilde de uygulanabilmektedir. Dizilim sonrasında reçinenin kullanım standartlarında belirlenen sıcaklık ve basınç altında kuruma işlemi gerçekleştirilir. Kuruma işlemi sonrasında kalıptan çıkarılan kompozit malzemenin kullanıma hazır hale getirilmesi için gerekli kesim, çapakların alınması ve boyanması işlemleri uygulanmaktadır (Durgun, 2014).



Şekil 1. 1. El yatırma prosesi

Elde edilecek kompozit malzeme özelliklerine göre kalıp seçimi yapılır. Genelde dişi kalıp kullanılır. Kompozit malzemenin kalıba gelen kısmı pürüzsüz olacağı için, kompozit malzemede hangi yüzey pürüzsüz isteniyorsa ona göre kalıp seçimi yapılmaktadır.



Şekil 1. 2. Dişi ve erkek kalıplar (Durgun, 2014)

El yatırma yönteminin avantajları; kolay öğrenilip uygulanabilir olması, imalat için özel koşullar istememesi (özellikle oda sıcaklığında kuruyan reçineler) nedeniyle üretim maliyetinin düşük olması, uygulama için gerekli olan malzemelerin (rulo, fırça vb.) fiyatlarının uygun olması, boyutsal kısıtlamanın olmaması, üretim sırasında maksimum mukavemet istenilen bölgelerin güçlendirilebilme olanağının olması, tasarım esnekliği sağlaması, spreyleme yöntemine göre uzun lif kullanabilme ve yüksek oranda fiber yoğunluğu kullanımı, kalıpların tasarımlarının daha kolay olması, kalıp malzemesi olarak çok çeşit ürünün (Plastik, cam, çelik, tahta vb.) kullanılabilmesi gibi avantajları vardır.

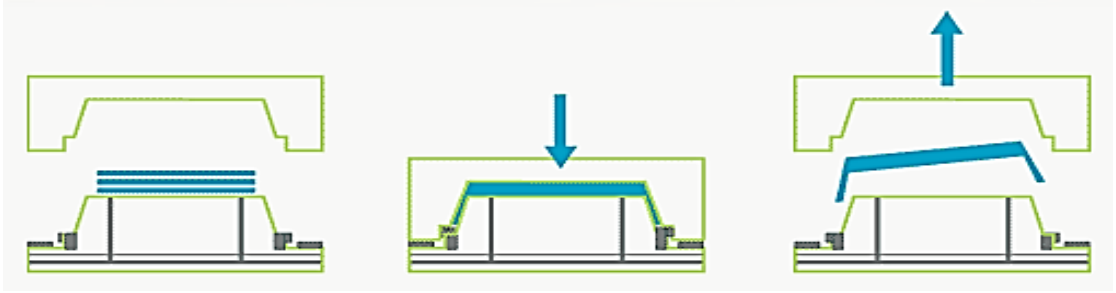
El yatırma yönteminin dezavantajları; kullanılması gereken reçinelerin viskozitesi ve yoğunluğunun düşük olması, ürün kalitesinin üretimi yapan kişinin el becerisine bağlı olması, kullanılan reçinelerin ağır moleküllü reçinelere göre insan sağlığına daha zararlı olması, fiberlerin hacimsel yoğunluğunun artırılmasının zor olması, üretilen kompozitlerin yüzey kalitelerinin düşük olması, ürünlerin kalınlık seviyelerinin her noktada aynı olmaması, reçinenin miktarı düşürülmek istendiğinde fiberlerde yeterince emilim olmayabilir ve hava kabarcıkları oluşabilir, polimer malzemelerin dağılımları düzgün olmadığı içi ürün kaliteleri düşüktür ve ürünlerin tek yüzü pürüzsüzdür.

1.5.1.2. Hazır kalıplama yöntemi

Bu yöntemde, kompozit malzeme üretimi için gerekli olan reçine, elyaf, katkı ve dolgu malzemeleri kalıplara dökülerek sıcak presleme ile ürüne dönüştürülmektedir.

Bu yöntemin avantajları, kompozit malzemelere metal parça monte edilebilir, karışık geometrik şekillere sahip kompozitlerin üretilmesi, kompozit malzemelerin iki yüzüne de şekil verilebilir ve ürün kalitesi iyidir (hata oranları düşük).

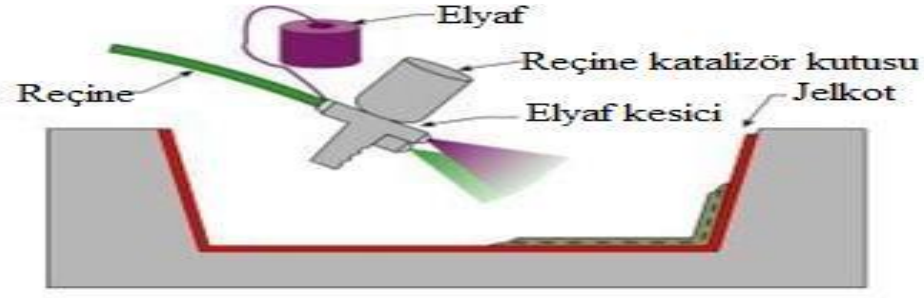
Bu yöntemin dezavantajları, kalıp maliyetlerinin diğer üretim yöntemlerine göre yüksek olması ve üretilcek malzemenin büyüklüğünün artması ile ihtiyaç duyulacak olan yüksek tonajlı presler nedeniyle üretim maliyetlerinin çok daha artmasıdır (Şahin, 2019).



Şekil 1. 3. Hazır kalıplama (SMC tooling sitesi) (Şahin, 2019)

1.5.1.3. Püskürtme yöntemi (Spray-Up)

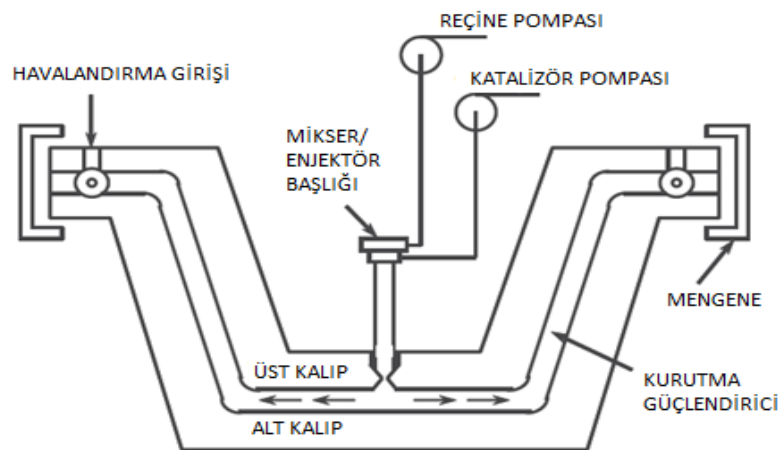
Bu yöntemde el yatırma yönteminde kullanılan kalıplara hava püskürtme sistemiyle kompozit malzemenin püskürtülmesiyle ürün elde edilmektedir. Reçine, lifler, sertleştirici ve katkı maddelerinin bir hava püskürtme sistemine dahil edilmesi ile elde edilen kompozit madde karışımının kalıplara püskürtülmesi prensibi ile kompozit malzeme üretilmektedir. Diğer yöntemlere göre geniş yüzeyler için kompozit üretmek daha kolay olmaktadır. Fakat bu yöntemde de el yatırma yönteminde olduğu gibi ürün kalitesi işlemleri yapacak kişinin el becerisine bağlıdır. Yine el yatırma yönteminde olduğu gibi kompozitin tek yüzeyi pürüzsüzdür. Ayrıca elde edilen kompozit karışımının homojen olması zor olacağından ürün kalitesi düşüktür (Şen, 2022).



Şekil 1. 4. Spreyle püskürtme yöntemi ile üretim işlemi (Şen, 2022)

1.5.1.4. Reçine transfer kalıplama yöntemi (RTM)

Bu yöntem birbirlerine mengener ile sabitlenmiş iki kalıp arasında, bir enjektör vasıtasıyla kompozit malzeme karışımının (reçine, fiber, sertleştirici ve katkı maddeleri) enjekte edilmesiyle kompozit ürün elde etme prensibi ile çalışmaktadır. İki kalıp arasında püskürtülen karışım kalıplar arasında sıkışarak kalıpların şeklini almaktadır. Kalıplar üretilcek ürünün özelliğine bağlı olarak oda sıcaklığında tutulup veya belli miktarda ısıtılarak kompozit malzeme karışımının kuruması sağlanır. Ayrıca kompozit malzemenin kuruduktan sonra kalıplardan kolayca çıkarılabilmesi için karışım kalıplara püskürtülmeden önce kalıplara jelkot sürülür. Bu yöntem daha çok geometrik yapıları karışık olan kompozit malzeme üretiminde kullanılmaktadır (Asi, 2018).



Şekil 1.5

Şekil 1. 5. Reçine transfer kalıplama yöntemi (Asi, 2018)

1.5.1.5. Profil çekme yöntemi/pultrüzyon (Pultrusion)

Profil çekme yöntemi farklı şekillerdeki profillerin ve kompozit malzemelerin üretimi için kullanılan bir yöntemdir. Rijit çubuklar ve lamaların üretilmesi için kullanılmaya başlanan profil çekme yöntemi ürünlerin kısa sürede ve uygun maliyetli üretimine olanak sağladığı için en hızlı gelişen üretim yöntemlerinden olmuştur.

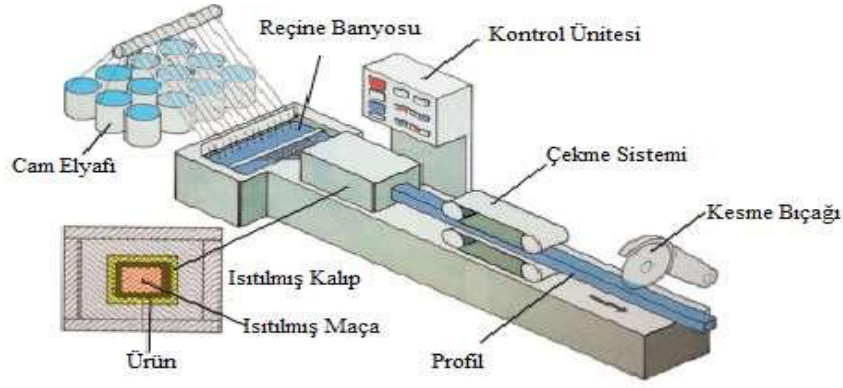
Bu yöntemde takviye elemanı olarak karbon, aramid, E-cam ve S-cam lifleri, keçe veya bunların kombinasyonları kullanılmakta olup, işlenecek elyaflar iki farklı yöntemle işlenerek ürün elde edilir. Birinci yöntemde elyaflar önce reçine banyosuna sokulur ve sonra sıcak kalıplarda şekil verme işlemi uygulanır, ikinci yöntemde ise elyaflar sıcak kalıba sokulduktan sonra reçine enjekte edilerek şekil verme işlemi uygulanır.

Sıcaklığı 120-150 °C'e olan şekillendirme kalıplarından geçen reçineli takviye elemanları istenilen şekillerde sertleştirilmiş kompozit halini alır. Ardından istenilen ölçüde kesilmesi için kesilme hattında kesilme işlemi uygulanır.

Bu yöntemin avantajları; ürünlerin üretim maliyeti uygundur, ürünlerin boyuna mukavemeti yüksektir, ürünler kısa zamanda üretilmektedir, işçilikleri kolay ve işçilik maliyetleri düşüktür, büyük ölçekte ve uzun malzemeler seri şekilde üretilbilir, ürün kalitesi yüksektir ve bu yöntemin yatırım maliyeti diğer yöntemlere göre ekonomiktir.

Bu yöntemin dezavantajları; ürünlerin enine mukavemeti düşüktür, bu nedenle ürünleri daha kalın üretilmesi gerekmektedir, reçineler şekillendirme kalıplarına yapıştıkları için ürün kalitesi bundan negatif etkilenmektedir, üretim sırasında bir aksaklık olursa reçineler kalıp içerisinde uzun süre beklediği için müdahale etmek zordur.

Kimyasal dayanımı ve hafifliği nedeniyle otomotiv, havacılık, elektrik, korozyon ve inşaat gibi birçok sektörde kullanılmaktadır (Işık, 2008).



Şekil 1. 6. Profil çekme yöntemi düzeneği (Bulut, 2014)

1.5.1.6. Elyaf sarma yöntemi (Filament Winding)

Bu yöntemin çalışma prensibi, bobinlere sarılmış olan fiberlerin üretilecek kompozit malzemenin özelliğine göre bir kalıp etrafına farklı açılarda tekrar sarılması olarak açıklanabilir. Uygun maliyetli ve kısa sürelerde ürün elde edilebilen bu üretim yöntemi birçok sektörde (havacılık sanayi, uzay sanayi, basınçlı kap üretimi, basınçlı boru üretimi, su depoları vb.) kullanılmaktadır.

Fiberler istenilen kompozit malzeme özelliklerine göre sarılırken, ıslak sarma ve kuru sarma şeklinde iki farklı yöntemle reçine banyosuna daldırılırlar; (Pehlivan, 2017).

Islak fiber sarma; bu yöntemde fiberler istenilen kompozit şekle göre sarılmadan önce veya sarım sırasında reçine banyosuna tabi tutulurlar.

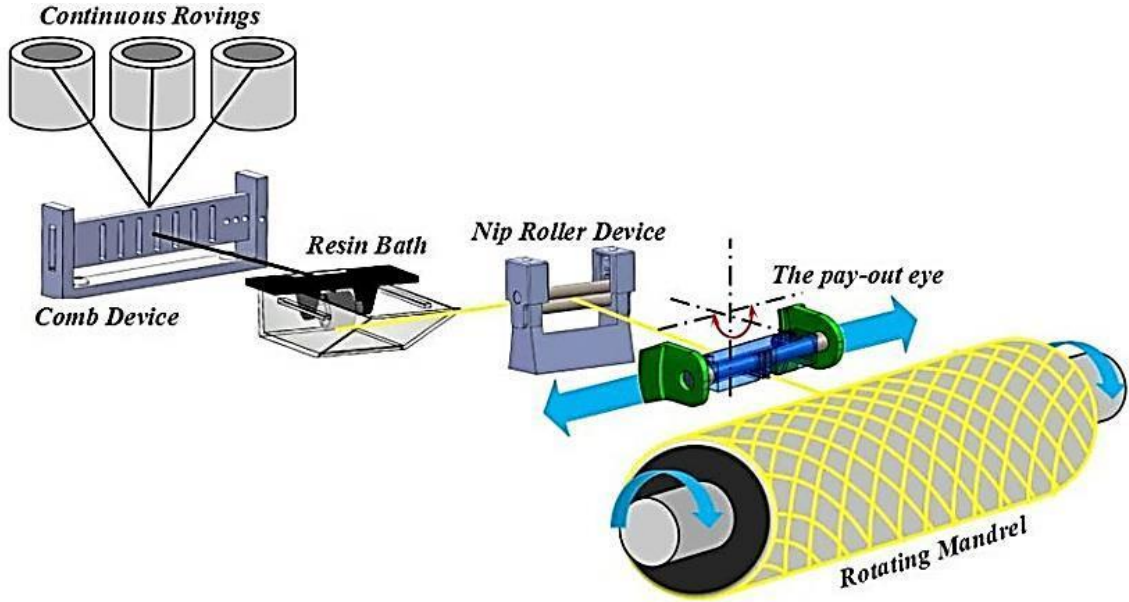
Kuru fiber sarma; bu yöntemde ise fiberler istenilen kompozit yapıya göre sarıldıktan sonra kalıp olarak reçine banyosuna daldırılırlar. Kuru fiber sarma yöntemi ile üretilen kompozit malzemeler ıslak elyaf sarma yöntemine göre daha az mukavemete sahiptirler. Avantajı ise, ıslak sarma yöntemine göre daha az reçine harcanmasıdır (Pehlivan, 2017).

Elyaf sarma yönteminde fiber sarma işlemi üretilecek kompozit yapıdan beklenen özelliklere göre üç farklı şekilde sarılmaktadır. Bunlar polar sarma, helisel sarma ve çevresel sarma yöntemleridir (Özbay, 2015).

Polar sarma yönteminde, sabit bir kalıp boylamasına eksenini etrafında dönerken fiberleri yaklaşık 0° açı ile sarmasıyla kompozit malzeme üretilmesi sağlanır.

Helisel sarma yönteminde, sabit bir hızla dönen kalıba boyuna ekseninde 5°'den 80°'ye kadar olacak açılarda fiber sarılmasıyla kompozit ürün elde edilmektedir.

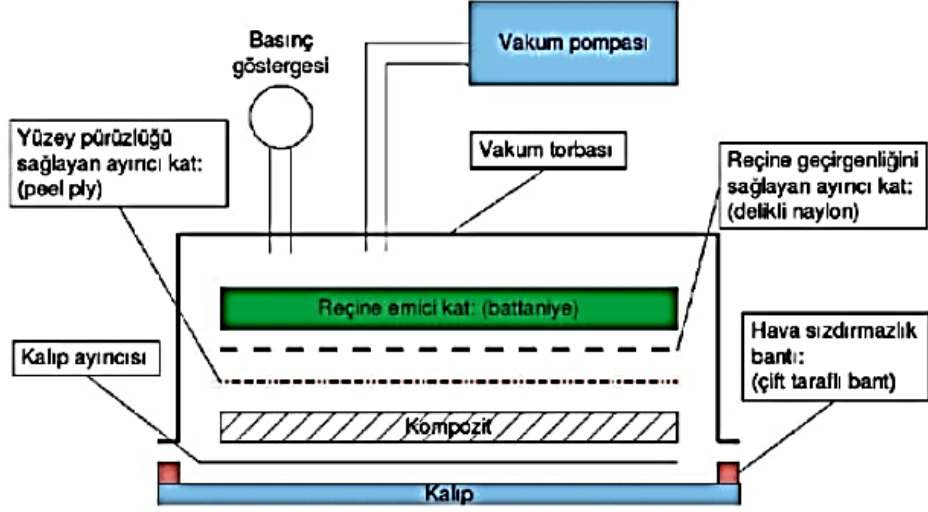
Çevresel sarma yöntemi, helisel sarma yöntemine benzeyen bu yöntemde sabit bir hızla dönen kalıba boyuna ekseninde 90° açı ile fiber sarılarak kompozit ürün elde edilir.



Şekil 1. 7. Elyaf sarma yöntemi (Şahin, 2019)

1.5.1.7. Vakum torbalı kalıplama yöntemi (Vacuum Bagging)

Vakum torbalı kalıplama yöntemi, bir kalıp içerisine yerleştirilen takviye elemanlarına el yatırma yönteminde olduğu gibi reçine sürülür. Ardından kalıp üzerine bir vakum torbası yerleştirilerek kabın içerisindeki havaya vakum pompası ile vakum uygulanır. Vakum uygulanan kap içerisindeki reçine takviye elemanlarına homojen şekilde yayılarak kompozit malzemenin oluşması sağlanır. Reçinenin takviye elemanlarına iyi şekilde nüfuz etmesini sağlayan bu yöntemde mekanik mukavemetleri yüksek kompozit malzemeler elde etmek mümkündür (Asi, 2018).

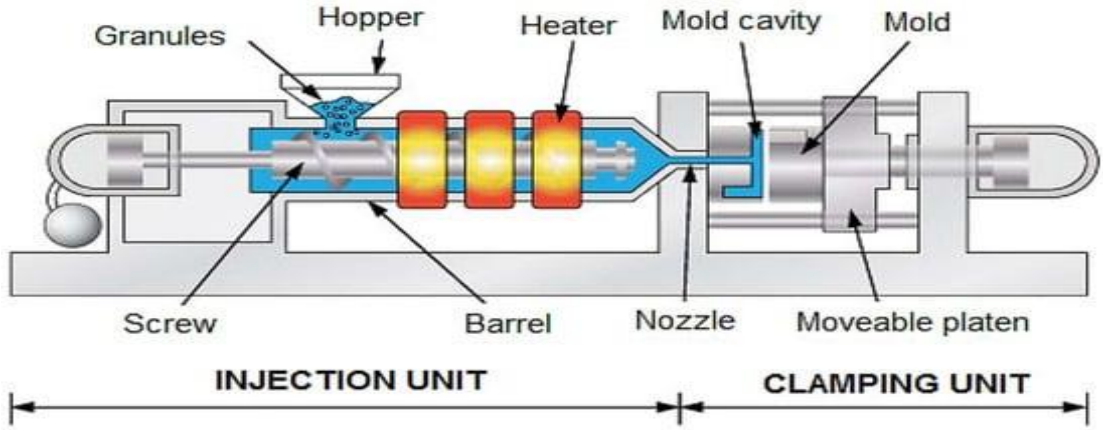


Şekil 1. 8. Vakum torbalama yöntemi (Şen, 2022)

1.5.2. Termoplastik reçineli kompozit üretim yöntemleri

1.5.2.1. Enjeksiyon kalıplama yöntemi

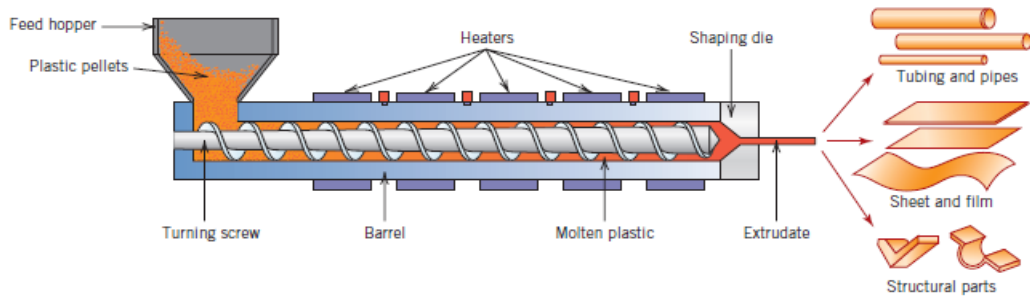
Enjeksiyon kalıplama yöntemi, plastik şekillendirmede yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Plastiğin ısıtılarak yüksek basınçla kalıplara enjekte edilerek soğutulması ile plastiğin kalıpların şeklini alması sağlanır. Ardından kalıplardan çıkarılan ürün fazla plastik artıklarından arındırılıp, ek ekipmanların montajı ve boyama gibi safhalardan geçirilerek kullanıma hazır hale getirilir. Tıbbi ekipman üretimi, oyuncak üretimi, havacılık ve otomotiv endüstrisi olmak üzere farklı alanlarda kullanılmaktadır. Yüksek hassasiyetli ürün elde edilebilmesi, üretim hızının yüksek olması ve seri üretim yapılabilmesi gibi özellikleri bu yöntemi popüler hale getirmiştir (Czepiel vd., 2023).



Şekil 1. 9. Enjeksiyon kalıplama yöntemi (Czepiel vd., 2023)

1.5.2.2. Ekstrüzyon kalıplama yöntemi

Ekstrüzyon kalıplama yöntemi, ilk olarak oluşturulacak ürünün hammadde bileşenlerinden oluşan karışım besleme ünitesine alınıp ön ısıtma işlemine tabi tutulur. Daha sonra karışım ekstrüder vidasına aktarılmaktadır. Ekstrüder vidanın dönmesi ile hammadde karışımı sıkıştırma bölgesine aktarılır. Sıkıştırma bölgesinde hammadde karışımı tekrar ısıtılarak erimesi sağlanır. Eriyen karışımdan çıkan gazlar tahliye sistemi ile sıkıştırma bölgesinden tahliye edilir. Sıkıştırma bölümünde eriyen hammadde karışımı sonrasında ölçme bölümüne alınır. Homojen hale gelmiş olan sıcak karışıma tekrar ısıtma işlemi uygulanır ve ölçme bölümünden kalıplama kısmına sevki sağlanır. Kalıplama kısmında ise erimiş haldeki karışıma, basınç ile istenilen ürünün şekli verilir ve şekillendirilen ürün koparma bölümüne iletilir. Koparma bölümünde ürünün istenilen şekilde kesimi yapılarak ürün dışarı alınır (Şahin, 2019).



Şekil 1. 10. Ekstrüzyon kalıplama yöntemi (Şahin, 2019)

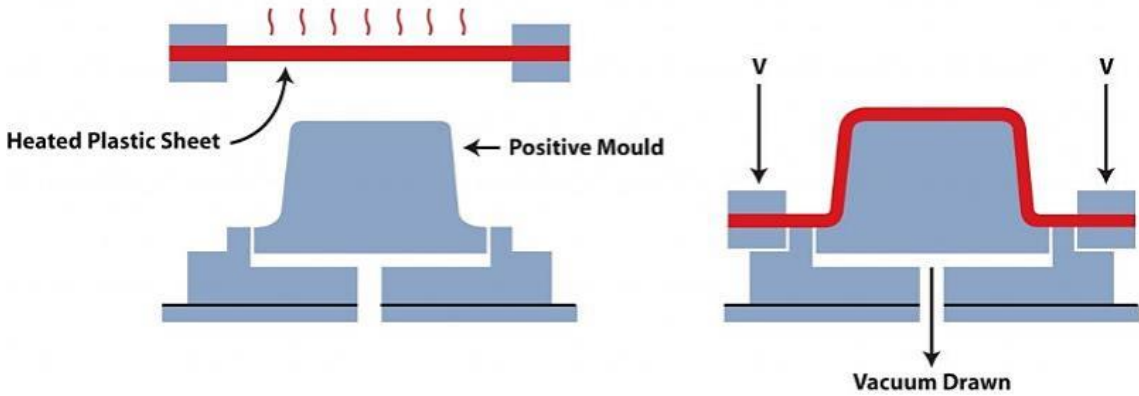
1.5.2.3. Termoform şekillendirme yöntemi

Termoform şekillendirme yöntemi, şekil alabilme sıcaklığına kadar ısıtılan plastik levhanın şeklini alacağı bir kalıpla sıkıştırılarak şekil verilmesi prensibine dayanır.

İşlenecek levhaya ısıtma işlemi genel olarak üç farklı şekilde uygulanmaktadır;

- Bir şerit ısıtıcı ile levhadan kalıpla şekil verilen kısmın kesilmesi,
- Levhanın genel bir bölgesini ısıtmak için sıcak hava tabancası kullanılması,
- Sıcak hava fırınları ile şekil verilecek levhanın tüm yüzeyine ön ısıtma işlemi uygulanması,

Düşük sıcaklık ve düşük basınçta yapılan basit bir üretilimdir. Bu nedenle kalıplarının kolay üretilebilmesi ve üretim yönteminin kolay uygulanabilir olması genel avantajlarıdır (Kürümoğlu, 2024).



Şekil 1. 11. Termoform şekillendirme yöntemi (Şahin, 2019)

1.5.2.4. Otoklav yöntemi

İçerisinde yüksek ısı, emiş ve basıncın olduğu otoklav kabinlerinde uygulanan bu yöntemde, vakum torbası içerisindeki kompozit malzeme karışımı ve kalıbın otoklav kabini içerisinde yüksek ısı ve basınca maruz bırakılması ile yapılan şekillendirme işlemidir. Bu yöntemle yüksek hassasiyete sahip kaliteli kompozit malzemeler üretilebilmektedir. Ancak Üretilen ürünlerin üretim maliyetleri yüksektir.



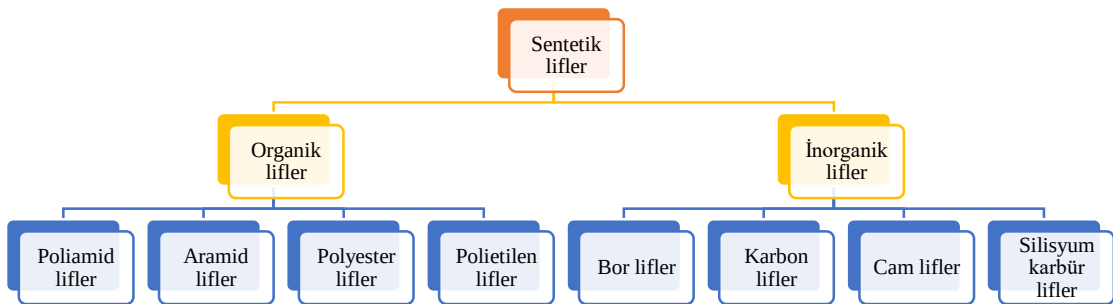
Şekil 1. 12. Otoklav yöntemi

1.6. Kompozit Malzemelerde Kullanılan Takviye Elemanları

Kompozit malzemelerde sentetik ve doğal olmak üzere iki tür takviye elemanı kullanılmaktadır.

1.6.1. Sentetik lifler

En yaygın kullanılan sentetik lifler; cam lifler, karbon lifler ve aramid/kevlar lifler aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 1. 13. Sentetik liflerin sınıflandırılması (Şahin, 2019)

1.6.1.1. Cam lifler

Silis-kum'dan (SiO_2) meydana gelen cam lifleri için diğer bileşen maddeler ise kalsiyum (Ca), sodyum (Na), baryum (Ba), magnezyum (Mg), demir (Fe) ve alüminyum (Al) gibi elementlerin oksitlerinden oluşur. Cam lifinin üretilebilmesi için cam lifini oluşturan hammaddeler fırınlarda 1200°C ila 1500°C sıcaklıklara kadar ısıtılarak ergimeleri sağlanır. Ardından fırınlarda ergimiş haldeki hammadde soğutma potalarına alınır. Soğuma işlemiyle birlikte cam lifleri özel bir sarma sistemi sayesinde 20 m/s ila 70 m/s hızlarda çekilerek 5 mikron ila 20 mikron kalınlıklarda cam lifi elde edilmektedir. Cam lifleri sarılıp demet halini almadan önce kimyasal bir madde ile kaplanır, bu maddeye bağlayıcı adı verilir. Bağlayıcılar ile kaplama işlemi cam liflerinin dayanımını ve deformasyon mukavemetini artıran önemli bir işlemdir. Polimer kompozit üretiminde en çok kullanılan takviye elemanlarından biridir (Şahin, 2019).

Yüksek gerilme kuvveti, düşük maliyeti, iyi ısı ve elektrik yalıtım özelliği ve yüksek kimyasal dayanımı gibi özellikleri sayesinde polimer takviyeli kompozitlerde en çok kullanılan takviye elemanlarından biridir.

Cam fiberlerinin dört türü mevcuttur;

- A tipi cam: Alkali oranı yüksek olan bu camların elektriksel yalıtımları çok düşüktür. Ancak kimyasal dirençleri yüksektir.
- C tipi cam: Kimyasal dirençleri yüksek olan bu camlar özellikle kimyasal madde taşıyan boru ve tanklarda çok kullanılırlar.
- E tipi cam: Alkali oranı düşük olan bu camlar, yüksek elektrik direnci, yüksek mukavemet özelliği, düşük maliyeti ve suya karşı dayanıklı olmaları sebebiyle polimer matrisli kompozitlerde en çok kullanılan cam fiber türüdür.
- S tipi cam: Gerilme mukavemeti oldukça yüksek olan cam fiber tipidir. Çekme mukavemeti E cama oranla %33 daha yüksektir. Yüksek sıcaklığa karşı yorulma dirençleri yüksektir. Genel olarak uzay ve havacılık sektöründe tercih edilirler. Bu cam türünün mukavemet değerleri oldukça yüksektir. Yüksek sıcaklıklarda yorulma direnci oldukça iyidir. Üretim maliyetleri yüksektir (Gedik, 2023).

Tablo 1. 2. Cam fiberlerin özellikleri (Şen, 2022).

ÖZELLİKLER	CAM TÜRLERİ						
	E-cam	A-cam	M-cam	S-cam	C-cam	D-cam	R-cam
Özgül ağırlık [g/cm ³]	2.54	2.45	2.89	2.49	2.45	2.16	2.58
Çekme dayanımı [MPa]	3600	3100	3500	4500	3400	2450	4400
Kopma uzama oranı [%]	4.8	-	-	5.4	4.8	-	-
Çekme E-modülü [GPa]	76	72	111.3	86	70	53	85
Kırılma İndisi	1.548	1.512	1.635	1.523	-	1.47	
Isıl genleşme katsayısı [cm/cmK°]	1.6x10-6	-	-	1.7x10-6	2.2x10-6	3.1x10-6	-
Lif çapı [mm]	3-20x10-3	-	-	3-13x10-3	-	-	-
Yumuşama noktası [°C]	850	700	-	-	690	770	990
Dielektrik sabiti [1MHz]	6.33	-	-	5.34	-	5.8	-

1.6.1.2. Karbon lifler

İçinde ağırlıkça en az %92 oranda karbon barındıran liflerdir. Farklı mühendislik malzemelerine kıyasla düşük yoğunluğa ve yüksek mukavemete sahiptirler. Karbon lifler kesikli veya kesiksiz olacağı gibi yapıları ise amorf, kristalin ve yarı kristalin olabilmektedir. Yüksek mukavemetli karbon lifleri (HT); yüksek mukavemet özelliği, yüksek modüllü karbon lifleri de (HM); yüksek elastikiyet modülü özellikleri göstermektedirler. Karbon life göre yoğunlukları daha düşük olan kevlar (PE), gibi polimerik liflerin ise erime sıcaklıkları daha düşüktür. Kevlar ve cam (SiO₂) liflerine göre karbon liflerin kopma uzamaları daha düşüktür. Yüksek modüllü karbon liflerin kopma uzamaları da yüksek mukavemetli karbon liflerden daha düşüktür.

Kullanılan hammaddelere ve yapılan işlem sıcaklıklarına bağlı olarak karbon liflerin yoğunluğu 1.6- 2.2 g/cm³ değerleri arasında değişiklik gösterebilmektedir. Karbon liflerin üretiminde kullanılmakta olan hammadde yoğunluğu ise 1.14-1.19 g/cm³ değerleri arasında değişebilmektedir. Elde edilen lifin modülündeki artış, grafitizasyon sıcaklığındaki artış ile artmaktadır. Karbon liflerden yapılan kompozitler 1020 çelik konstrüksiyonlardan 5 kata kadar daha dayanıklı olup, 1/5 ağırlığındadır. Aynı şekilde

karbon lifler 6061 alüminyum konstrüksiyonlara göre 7 kat daha dayanıklı, 2 kat daha fazla sert ve 1,5 kat daha fazla hafiftir. Yorulma davranışları bilinen tüm metallere göre daha iyi olan karbon liflerin, katran esaslı olanları ise elektriksel iletkenlik olarak bakırdan 3 kat daha fazla iletkenliğe sahiptir (Şen, 2022).



Şekil 1. 14. Karbon elyaf kumaş

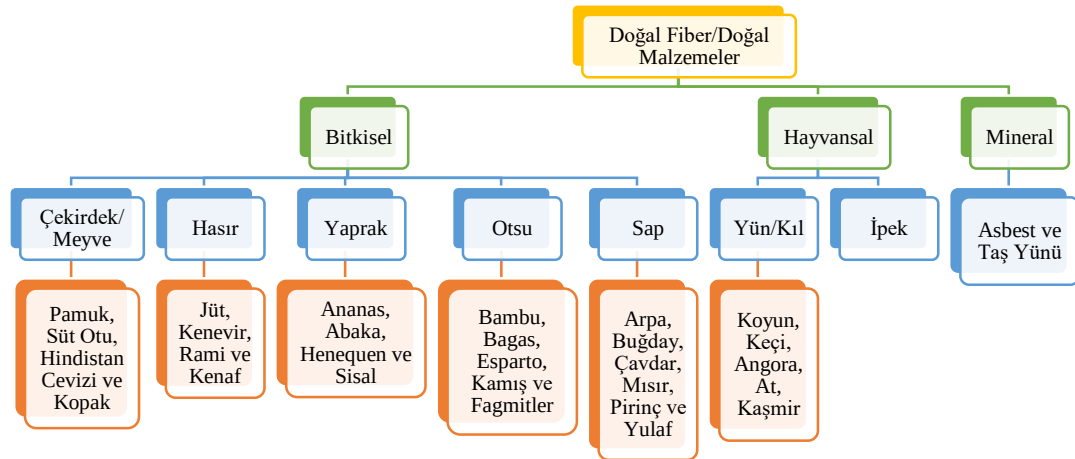
1.6.1.3. Aramid lifler

Aromatik polyamid'in kısaltılmış adına aramid denilmektedir. Aramidlerin moleküler yapısı, altı karbon atomunun birbirlerine hidrojen atomu ile bağlanmasından oluşmaktadır. Aramid elyaflar yüksek çekme mukavemeti, düşük ağırlık ve düşük maliyetli olma özelliklerine sahiptir. Ayrıca darbe dirençleri yüksek ve gevrekliği ise grafitlerin gevrekliğinin yarısı kadardır. Bu sayede kolay şekillendirilirler. Doğal kimyasallara dirençli olsa da asit ve alkalilerden etkilenmektedir (Asi, 2018).

Kevlar günümüzde havacılık, otomotiv, zırh ve koruyucu giysi, basınçlı boru ve halat yapımı gibi birçok sektörde kullanılmaktadır.

1.6.2. Doğal lifler

Doğal fiberler bitkisel, hayvansal ve mineral lifler olarak üç başlık altında toplanmaktadır. Doğal fiber takviyeli kompozit yapımında en çok kullanım alanına bitkisel lifler sahiptir.



Şekil 1. 15. Doğal malzemelerin sınıflandırılması (Keleş, 2022)

1.6.2.1. Bitkisel lifler

Bitkisel liflerin sınıflandırılması; sak (bast veya sap da denilir) lifleri (kenevir, keten, jüt, kenaf rami,), meyve lifleri (hindistan cevizi), tohum lifleri (kapok, pamuk) ve yaprak lifleri (ananas, sisal, heneguen, abaka) şeklindedir. Sak lifleri bu sınıflandırmadaki en iyi liflerdir. Uzun elementer elyaf demetlerinden oluşan bu liflerin, bitki çeşidine göre elementer elyaf uzunlukları değişiklik göstermektedir. Elementer elyaf uzunlukları, 5µm ile 15µm arası kalınlıktaki hücre duvarlarına ve 15µm ile 35µm arasında çapa sahiptirler. 12 ile 48 liften oluşmakta olan bu elementer elyaf demetleri teknik elyaf olarak adlandırılırlar. Pektin ve hemiselüloz matrisleri içerisinde bir araya toplanmaktadırlar (Sağır, 2016).

Polimer matrisli kompozitlerde kullanılmakta olan kenevir, keten, kenaf, rami, heneguen, jüt ve sisal gibi çevre dostu olan bitkisel lifler cam elyaflara alternatif oluştururlar. Güvenlik ve sağlık açısından doğal lifler üretim sırasında en az endişe

uyandırmaktadır. Ayrıca düşük maliyet ve düşük yoğunluklarıyla beraber sentetik lifler ile karşılaştırılabilir mekaniksel özellikler sunarlar. Fakat sentetik lifler üretilirken standart olarak istenilen özelliklere sahip üretilebilirken, doğal lifler ise iklim şartları, toprak yapısı, üretim yeri gibi faktörler nedeniyle her zaman aynı standart özelliklerde yetiştirilemezler. Bu da doğal elyaf takviyeli kompozitlere ait dezavantajlardan biridir (Sağır, 2016).

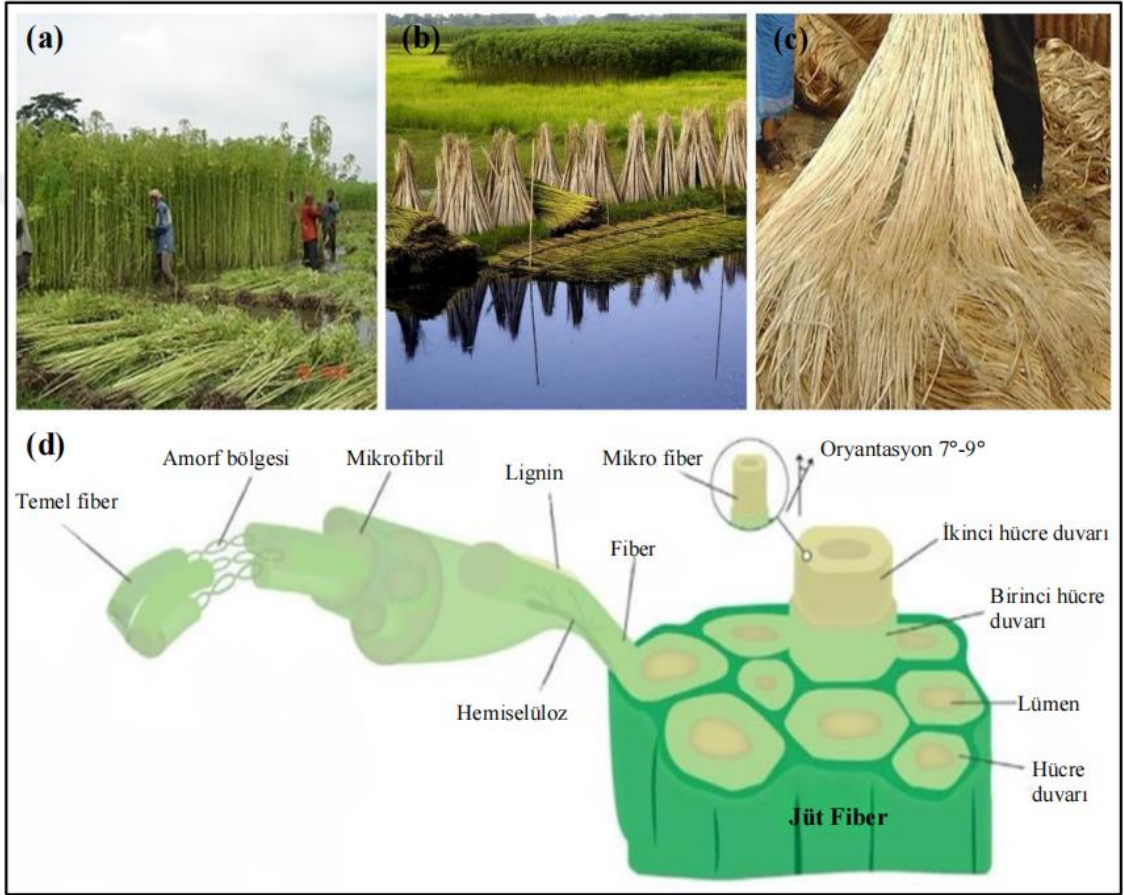
1.6.2.1.1. Jüt lifler

Jüt *Corchorus* familyasına ait yaklaşık 100 kadar çeşidi olan bir bitkidir. *Corchorus Capsularis* adı verilen çeşidi daha hafif özelliğe sahiptir ve *Corchorus Olitorius* çeşidi ise daha yumuşak ve güçlü olarak bilinmektedir. Bu iki jüt çeşidi beyaz jüt olarak bilinir ve ticari amaçla yetiştirilmektedirler. İşlendikten sonrada doğal parlaklığını koruyan jüt liflerine altın elyafta denilmektedir. Jüt bitkisi 2m ila 4m' ye kadar uzayabilmektedirler.

Tablo 1. 3. Jüt fiberlerin kimyasal bileşimi (Sönmez, S., 2023)

Jüt Fiberin Kimyasal Bileşeni (ağ. %)					
Selüloz	Hemiselüloz	Lingin	Pektin	Waks	Nem
61,2	13,2	13,7	-	0,5	-
61-71	13,6-20,4	12-13	0,2	0,5	12,6
61-71,5	12-13	13,6-20,4	0,2	0,5	12,6
71	14	13	-	-	-
58-63	21-24	12-14	-	-	-

Dünyada pamuktan sonra en fazla üretimi olan bitkidir. Anavatanı Hindistan olan jüt, tropikal iklimde yetişmektedir. Dünya genelinde üretiminin %80'i Hindistan, Bangladeş ve Pakistan'da gerçekleşir. Bu bölgelerdeki uygun işçi maliyetleri üretim miktarını etkileyen bir faktördür. Jüt bitkisinin bu bölgelerin dışında Malezya ve Çin'de de yetiştirilmesine başlanılmıştır. *Corchorus Olitorius* çeşidi Akdeniz ülkelerinde de yetiştirilmeye başlanılmıştır. Amerika'nın iki eyaleti olan Teksas ve Güney Carolina'da yetiştirilmeye başlanmıştır.



Şekil 1. 16. Jüt bitkisi (a), Jüt fiberlerin bitkiden çıkarılması (b), Jüt fiber demeti (c) ve jüt fiberinin yapısı (d) (Sönmez, S., 2023)

Yaklaşık olarak üç ayda yetişkin hale gelen bitkinin toplanması da zordur. Çiçek açması ile yetişkin olduğu anlaşılır ve toplanmasına başlanılır. Toplanmış olan jüt bitkisi balyalar şeklinde havuzlara atılarak üzeri hayvan gübreleri ve orman bitkileri ile örtülüp beklenilmektedir. Jüt kabukları havasız ve kirli su içerisinde çürütülür. Elyaf demetleri çürütme işleminden sonra elle soyulup ayrılır. Ardından lifler kurumaları için serilmektedir. Bu işlemle elde edilen lif boyları 18-25 cm arasındadır. Elde edilen ürünlerin ilk renkleri açık sarı olmasına rağmen bir süre sonra açık kahverengiye dönüşecektir. Elde edilen elyaf kenevirden daha parlak olacaktır. Sonrasında fabrikalarda makinelerle lifler taraklanıp temizlenir ve ip şeklinde bobinlere sarılır. Esnekliği az olan jüt lifinin de selülozik diğer lifler gibi nem emicilikleri fazladır. Kenevir ve ketene göre mukavemeti düşüktür. Dünya genelinde üretilen jütlerin büyük kısmı ip, örtü kumaşı, sicim ve çuval yapımı için kullanılırlar (Sağır, 2016).

Tablo 1. 4. Jüt fiberinin mekanik özellikleri (Sönmez, S., 2023)

Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Kopma uzaması (%)	Yoğunluk (g/cm ³)
393-773	26,5	1,5-1,8	1,3
400-800	1030	1,5-1,8	1,46
393-773	13-26,5	1,16-1,5	1,3-1,45
393	19-26,5	1,16-1,8	1,5

1.7. Doğal Fiber Takviyeli Kompozitler

Doğal liflerin üretimi bitkilerin, hayvanların veya minerallerin doğal ürünlerinden yapılır. Doğada temin edilmesi kolay olan, düşük maliyetli, hafif, yenilenebilir, doğada ayrışabilme gibi avantajları olan ve sürdürülebilir malzemelerdir. Doğal lifler, yapısal ana bileşeni selülozun olduğu bitkilerden veya protein bazlı olan hayvanlardan elde edilirler. Doğal lifli polimer kompozitler, keten, kenevir, sisal, bambu, hindistan cevizi lifi veya jüt gibi doğal lifleri polietilen, polipropilen veya epoksi reçineleri gibi bir polimer matris ile birleşiminden meydana gelen malzemelerdir. Mineraller doğal lif sınıfında yer alırlar. Fakat insan sağlığı yönünden kanserojen olmaları sebebiyle kullanımlarından kaçınılır. Bu nedenle birçok ülkede kullanımları yasaklanmıştır. Asbest kayalardan elde edilen başlıca mineral liflerdendir. Diğer bitkisel ve hayvansal doğal lifler ise pamuk, jüt, keten, odun, yün, ipek, pirinç kabuğu veya kenevirlerdir.

Son zamanlarda, düşük maliyet, düşük yoğunluk, yüksek özgül yapıları, biyolojik yönden iyi parçalanabilirlikleri, ayrılma kolaylığı, yüksek enerji geri kazanımı, CO₂ nötrlüğü ve geri dönüşüm gibi önemli avantajları nedeniyle doğal takviyeli kompozit çalışmaları büyük oranda artmıştır. Otomotiv endüstrisi doğal takviyeli kompozitlerin hafiflik ve çevre dostu özelliklerinden dolayı doğal takviyeli kompozitleri kullanan öncü sektördür. Otomotiv sektöründe keten, jüt, kenevir, sisal, kenaf ve baobab lifi gibi doğal lifler araçlardaki kapı paneli, kol dayanağı, koltukların arkasında bulunan paneller veya tavan döşemesi üretiminde kullanılmaktadır. Ağaç ev bitkilerin işlenmesi sırasında oluşan talaşlar ise inşaat ve yapı endüstrisinde sunta üretiminde kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisi dışında doğal takviyeli kompozitler tekstil, inşaat, eczacılık ve tıbbi, biyoenerji, paketleme ve biyoyakıt üretimi gibi diğer endüstri alanlarında da kullanılmaktadır (Jomboh vd., 2024).

Doğal liflerin belirtilen avantajları dışında birtakım önemli sorunları da vardır. Bu sorunlar neticesinde doğal liflerin ikinci bir lif ile hibridizasyonu yapılmıştır. Amaç, yüksek nem direnci ve termal kararlılığı yüksek gelişmiş özellikler elde edilmesini sağlamaktır. Bilim insanları hava şartlarına dayanıklı, emilim, mukavemeti yüksek, çekme, süneklik, eğilme ve kırılmaya dayanıklı kompozitler üretmeyi hedeflemişlerdir.

Doğal fiber takviyeli liflerin dezavantajlarının minimuma indirilmesi için alkali ve silan işlemleri de kullanılmaktadır. Alkali ve silan işlemleri doğal liflerin düşük termal kararlılıkları, su emilimleri, doğal elyaflardaki düşük olan mekanik özellikler, elyaf ve matrisin arayüzey yapışmasının artması gibi özelliklerin artmasını sağlayarak doğal fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileşmesi sağlanmıştır. Yalman vd. (2024), yaptıkları araştırmada Jüt ve kenevir liflerine alkali işlemi uygulamış ve yaptıkları testler neticesinde alkali işleminin doğal liflerde su emilimini düşürdüğü ve mekanik özelliklerinde ise artma sağladığı kanaatine varılmıştır. Mohammed vd. (2023), yaptıkları araştırmada silan işleminin doğal lifler üzerinde güçlü kovalent bağ oluşumunu sağlayarak doğal fiber takviyeli kompozitlerin mukavemet özelliklerinin marjinal şekilde artırdığını bildirmektedirler.

Doğal liflerin sorunları olan yüksek oranda su emilimi, düşük termal kararlılık ve düşük mekanik özellikler gibi sorunların üstesinden gelmek için kullanılan son gelişmeler şunlardır; liflere uygulanan kimyasal işlemler (alkali ve silan işlemleri), liflere uygulanan fiziksel işlemler (korona ve plazma işlemleri), nanoteknolojilerin kullanılması (nano fibrile edilen selüloz ve nano dolgu maddesi kullanımı), termal işlemler, geliştirilmiş lif dispersiyon tekniği (elektrospinning ve yüksek kesme karıştırma), polimer matriste değişiklik (katkı maddeleri ve yüksek performanslı polimerler) ve sentetik liflere hibrit takviyelerdir (Jomboh vd., 2024).

1.7.1. Doğal fiber takviyeli kompozitlerin özellikleri

Doğal lifli polimer kompozitlerin karakteristik özellikleri olarak, düşük maliyetli olmaları, hafiflik, çevre dostu, büyük özgül mukavemet, biyolojik olarak parçalanabilirlik ve özgül sertlik gibi özellikler sıralanabilir. Bu özellikleri sayesinde çok farklı alanlarda kullanımları mevcuttur. Doğal liflerin karakteristik özelliklerinin yanında, liflere uygulanan bazı kimyasal iyileştirici yöntemler ile lif ve matris etkileşimi de doğal fiber katkılı kompozitlerin mukavemetinin iyileştirilmesinde etkilidir.

Doğal elyaf kompozitlerin polimerik matrislere nazaran daha zayıf arayüz yapışması göstermesi, nem tutma seviyelerinin daha yüksek olması ve farklı üretim yöntemleri nedeniyle değişken mekanik özellik gösterebilirler.

1.7.2. Doğal fiber ve doğal fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri

Doğal elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik mukavemeti, kompozit içerisindeki doğal takviye malzemesinin kalitesine, dizilim sayıları, mikrofibriler açısı, dizilim açılarına, matris ve takviye elemanının kaliteli birleşimi gibi faktörlere bağlıdır. Takviye elemanındaki kalite farklılıkları doğal elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinde tutarsızlığa sebep olmaktadır. Ayrıca takviye elemanlarını fiziksel ve kimyasal etkilerden koruyan matrislerin kalitesi ve üretim yöntemlerinden kaynaklanan farklı uygulama yöntemleri de doğal elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinde tutarsızlığa sebep olmaktadır.

Tablo 1. 5. E-cam ile doğal fiberlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Sönmez, S., 2023)

Fiber	Yoğunluk (g/cm ³)	Çap (mm)	Çekme dayanımı (MPa)	Young modülü (GPa)	Şekil değiştirme (%)
E-glass	2,22	15-25	2000-3500	70-73	2,5-3,7
Jüt	1,3-1,49	25-250	393-900	13-26,5	1,16-1,5
Keten	1,5	40-600	345-1500	27-39	2,7-3,2
Kenevir	1,47	25-250	550-900	38-70	1,6-4
Kenaf	1,5-1,6	2,6-4	250-930	40-53	1,6
Rami	1,5-1,6	0,049	400-938	61,4-128	1,2-3,8
Sisal	1,45	50-200	468-700	9,4-22	3-7
Ananas	1,4	7-10	500-1100	11,8-30	3,7-4,3
Abaka	1,5	10-30	430-813	31,1-33,6	2,9

1.7.3. Doğal fiber ve doğal fiber kompozitlerin fiziksel özellikleri

Doğal lifli polimer kompozitler, yüksek özgül mukavemet, hafiflik, sertlik, yüksek darbe direnci, termal yalıtım, düşük yoğunluk, biyolojik parçalanabilirlik, aşındırıcı olmama özelliği ve sentetik lifli kompozitlere göre düşük maliyetli olmaları gibi çeşitli avantajlı fiziksel özelliklere sahiptir. Bu özellikleri sayesinde birçok sektörde

tercih edilirler. Doğal takviye elemanlarının sürdürülebilir olması, çevre dostu ve uygun maliyetli oluşu sentetik takviye elemanlarına göre tercih edilmelerine neden olmaktadır (Jomboh vd., 2024).

1.7.4. Doğal fiber ve doğal fiber kompozitlerin termal özellikleri

Kompozitlerin termal özellikleri, ısı karşısındaki davranışları olarak özetlenebilir. Doğal lif polimer kompozitlerinin termal özelliklerini etkileyen faktörler fiberin çeşidi ve kalitesi, matrisin tipi, katkı ve takviye maddeleri, fiber içeriği ve yönelimi, fiberlerin işlenmesi, üretim ve işleme şekli olarak sıralanabilir. Bu faktörler neticesinde kompozitin termal özellik performansı belirlenir. Kompozitlerden beklenen termal özellikler ise, termal iletkenliği, termal genleşmesi, termal kararlılığı, yanmaya ve ısıya karşı direnci olarak açıklanabilir.

Doğal fiber kompozitler, kullanılan fiber türüne, matris türüne ve matris-fiber birleşimine göre yanmaya karşı dirençleri değişiklik göstermektedir. Kenevir ve jüt gibi doğal lifler yanmaya karşı dirençliken, diğer doğal fiberlerin yanmaya karşı dirençlerini artırmak için ek katkı maddelerine ve farklı işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

1.8. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Karışım Tozları

1.8.1. Selüloz nanofiber (CNF)

Selüloz, dünyada her yıl çeşitli bitkilerden en fazla üretimi yapılan hammaddedir. Selüloz ucuz olması, biyolojik olarak parçalanabilen, yenilenebilir, hafif ve termal kararlılık gibi birçok iyi özelliğe sahiptir. Selüloz son zamanlarda gıda, ilaç üretimi, tekstil, kaplamalar, sensörler, esnek elektronikler ve esnek ekranlar gibi birçok alanda büyük ilgi görmektedir. Bitkisel selüloz lifleri, yüksek kristalin mikrofibril yapıya sahip olan selüloz nanofiberden (CNF) yapılır. Yüksek kristalin özelliğe sahip selüloz nanofiber, büyük mekanik mukavemete ve sertliğe sahiptir. Bu nedenle kompozit malzemelerde mekanik mukavemeti artırmak için kullanılmaktadır. Selüloz nanofiberin genişliği yaklaşık 5~20 nm ve uzunluğu ise birkaç mikrondur. Selüloz nanofiber homojenizasyon, asit hidrolizi, öğütme, mikro akışkanlaştırma ve oksidasyon ile izole

edilebilmektedir. Selüloz nanofiber su içerisinde çözünmez fakat suda iyi şekilde dağılabilmektedir. Bu özelliği sayesinde belli oranda vizkoziteye sahip bir karışım elde edilebilmektedir. Selüloz nanofiber anizotropik fiziksel özelliğe sahiptir. Yüksek oranda kristalin selüloz nanofiberin elastik modülü uzama yönünde yaklaşık 150 GPa ve eni yönünde 18-50 GPa olmaktadır (Kafy vd., 2017).

1.8.2. Karbon nanotüp (CNT)

Karbon nanotüpler, 1 nm kadar küçük çaplara sahip olan silindirlere sarılı grafen tabakalardır. Bu moleküler ölçekli tellerin sahip olduğu önemli mekanik ve elektriksel özellikleri son yıllarda yapılan çalışmalarla ortaya çıkarılmıştır. Nanotüpler, minyatürleştirilmiş elektromekanik, mekanik, elektronik, kimyasal, taramalı prob cihazları ve makroskobik kompozit malzemeler için kullanımında faydalı olduğu gösterilmiştir (Dai, 2002).

1991 yılındaki keşifleriyle beraber, karbon nanotüpler benzersiz kimyasal ve fiziksel özellikleri sayesinde bilim ve mühendisliğin birçok alanında kendine önemli bir yer yaratmıştır. Nanotüpler üstün mekanik, elektronik ve termal özellikler göstermektedir. Bu özellikleri sayesinde nanotüpler çeşitli uygulamaların yanı sıra temel bilim içinde ideal bir test kaynağı olmaktadır. Kompozit malzemelerin termal iletkenliğini artırmak için kullanılabileceği gösterilmiştir. Ayrıca bu özellikleri sayesinde kompozit malzemelerin özellikle mekanik özelliklerinde iyileşme sağlanması için önemli katkı maddeleri olarak değerlendirilmektedir. Yapılan çalışmalarda karbon nanotüpler için ölçülen en yüksek mukavemet 63 GPa'ı bulurken, en zayıf karbon nanotüp türlerinin bile birkaç GPa mukavemete sahip oldukları belirlenmiştir (Coleman vd., 2006).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Selver vd. (2018), d oğal (keten, Jüt) ve sentetik (cam) liflerden vakum infüzyon yöntemi üretilen keten/cam ve jüt/cam, doğal ve hibrit termoset kompozit malzemelerin eğilme, çekme ve termomekanik test sonuçları incelenmiştir. Sonuçlar neticesinde, doğal (keten, Jüt) liflerden üretilen kompozit malzemelerin, cam elyaftan üretilen kompozitlere kıyasla hacim kesrine normalize edildiğinde daha yüksek özgül mukavemet değerlerine sahip olduğunu, fakat normalizasyon olmadan cam kompozitlerden daha düşük eğilme ve çekme mukavemetine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca üretilen hibrit kompozitlerde takviye elemanlarının istifleme dizilimlerinin değiştirilmesi çekme mukavemeti ve modülünü önemli ölçüde etkilemediği gözlemlenmişken, dış katmanları cam elyaftan olan hibrit kompozitlerin eğilme mukavemetlerinde dikkate değer iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Termomekanik analiz sonuçlarında ise doğal lif ve bazı hibrit kompozitleri cam takviyeli kompozitlerden daha iyi enerjiyi dağıtabildikleri ve daha yüksek sönümlene özelliklerine sahip olduklarını göstermiştir.

Onal ve Adanur (2002), yaptıkları çalışma ile hibrit kompozitler kazara oluşabilecek düşük enerjiye sahip etkilere karşı hassasiyet gösterebilir. Örneğin, çalışma sırasında aletlerin düşmesi, nakliye hasarları ve dolu tanelerinin etkileri gibi istenmeyen bu eylemler sonucunda kompozit malzemelerin gerilme mukavemetleri ve lokal gerilme mukavemetleri önemli ölçüde azalabileceği değerlendirilmiştir. Bu sebeple kompozit malzemelerde düşük hız hasarının nasıl azaltılabileceğinin yolları aranmıştır. Bu kapsamda kompozit malzemelerin takviye elemanlarının istifleme sıralarının, hibrit düzenin ve kat açılarının düşük hız hasarına etkileri incelenmiştir. Yapılan test sonuçlarında karbon fiber yapılara cam fiber eklenmesi kompozit yapıda gerilme mukavemetlerine ve düşük hız hasarlarına karşı iyileştirme sağladığı, cam fiber yapılara ise karbon fiber eklenmesi ile eğilme gerilmesinde iyileşme sağlandığı belirlenmiştir. Sonuç olarak; hibrit düzenin, takviye özelliğinin ve kat açısının etkileşim gerilme mukavemetleri ve düşük hız hasarlarında iyileştirme sağlayacağı belirtilmiştir.

İlhan ve Feyzullahoğlu (2019), yaptıkları çalışmada cam elyaf takviyeli kompozit malzemelere farklı takviye ve dolgu malzemeleri eklenerek hibrit malzemelerin özelliklerinin iyileştirilebilmesi araştırılmıştır. Takviye elemanları olarak jüt, kenaf, sisal, rami, kenevir, muz, hindistan cevizi ve pamuk elyafları incelenmiştir. Dolgu malzemesi

olarak ise nanokil, fme silika, çinko oksit, uçucu kül ve imento, mikro fibril selüloz, cam partikül, alüminyum oksit, titanyum oksit, silisyum karbür, yumurta kabuğu, kalsiyum karbonat, alev geciktiriciler, pirinç ve buğday kabuğu, grafit, hematit, talk, kaolin kili, grafen, poli tetra floro etilen üzerinde araştırma yapılmıştır. Yapılan araştırma neticesinde; tabakalı takviye malzemelerinin istifleme sıralarının, elyaf oryantasyonunun ve elyaf çeşidinin malzeme özelliklerinin belirlenmesinde etkili olduğu görülmüştür. Cam elyafı ve doğal elyafların farklı üretim yöntemleri kullanılarak başarılı şekilde hibrit malzeme üretildiği görülmüştür. Cam elyafı ve doğal elyafları bir araya getirerek oluşturulan kompozit malzemelerde üretim maliyetlerinin drldu ve yüksek özellikli malzemeler retilbildii görülmüştür. Dolgu malzemelerinin üretilecek kompozit malzeme özelliklerinde etkili olduğu ve kimyasal bileimlere göre optimum oranda uygun dolgu malzemelerinin kullanımıyla en iyi performansların elde edilebileceği görülmektedir. Homojen dağılım gösteren dolgu malzemelerinin kullanıldığı kompozit malzemelerde uygun ara yüzey özellikleri elde edildiği görülmüştür.

Amico vd. (2010), yaptıkları çalışmada cam ve sisal liflerden elde edilen hibrit kompozitlerde istifleme sırasının kompozit malzemenin mekanik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda hibrit kompozitler gerilme yüklerinden istifleme sıralamasına göre farklı şekilde etkilenmişlerdir. Bu yüzden istenen özellikleri elde etmek için istifleme sırasının optimize edilmesinin önemi ortaya çıkmaktadır. Hibrit kompozitlerde cam liflerinin en üst ve en alt katmanlarda sıralanması eğilme gerilmesi için önemli derecede iyileşme sağladığı ve orta katmanlardaki bazı cam fiber dizilimlerinin de eğilme gerilmesinin yükselmesinde önemli olduğu değerlendirilmiştir. Darbe mukavemeti içinde hibrit kompozitlerin mukavemetinde yükselme olduğu değerlendirilmiştir.

Sathyaseelan vd. (2020), farklı istifleme sıralamasına sahip be kat areka ve be kat kenaf fiberlerden oluşan (toplamda on katmanlı kompozit malzeme) hibrit kompozitlerin eğilme, çekme, sertlik, basınç ve darbe testleri yapılarak, farklı istifleme sıralamasının kompozit malzeme özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda kompozitin dış kenarlarına (st ve alt katmanlarına) kenaf liflerinin yerletirildii ve i katmanlara da areka liflerinin istiflendii kompozit malzemelerin en iyi eğilme, çekme ve sertlik özelliklerini gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, dış kenarlarına (st ve alt katmanlarına) areka lifleri istiflenen ve i katmanlarına kenaf liflerinin istiflendii

kompozit malzemelerin ise basınç mukavemetleri ve darbe enerjisini sönümleme özelliklerinin daha iyi olduğu belirtilmiştir. Hibrit kompozitlerde istifleme sırasının kompozit malzeme özelliklerine önemli etkilerinin olduğu değerlendirilmiştir.

Khan vd. (2021), yaptıkları çalışmada jüt ve kenaf liflerinden farklı istifleme sıralamasıyla ürettikleri doğal fiber kompozitlerin mekanik özellikleri (eğilme ve çekme) üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Jüt/kenaf/jüt (J/K/J) ve kenaf/jüt/kenaf (K/J/K) olmak üzere iki farklı istif sıralaması ile üretim yapılmıştır. Üretim el yatırma tekniği kullanılarak yapılmıştır. Tüm üretilen kompozitlerde ağırlık epoksi oranı %70 ve toplam elyaf yüklemesi ise %30 olarak sabit tutulmuştur. Üretilen iki farklı dizilime sahip kompozit malzemelere eğilme ve çekme testleri yapılmış olup, sonrasında SEM analizleri yapılmıştır. Yapılan eğilme ve çekme testlerinde K/J/K dizilimli kompozitin J/K/J dizilimli kompozite kıyasla daha yüksek eğilme ve çekme mukavemetine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yapılan Sem analizinde K/J/K dizilimli kompozitin J/K/J dizilimli kompozite kıyasla daha iyi ara yüzey bağlanmasına sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Şen (2022), yapılan çalışma ile öncelikle cam, jüt ve karbon lifleri el yatırma tekniği ile prepreg malzeme haline getirildikten sonra 250 mm x 250 mm ölçüsüyle ve 0°, 30°, 45° ve 60° açılarla kesilip, önceden belirlenen 6 katmanlı simetrik, asimetrik ve rastgele dizilimler olarak istiflenmiştir. Yapılan bu 6 katman şeklindeki prepreg malzemeler 40 bar basınçta 20 dakika süreyle 120°C sıcaklığa kadar ısıtılıp 45 dakika bu sıcaklıkta bekletildikten sonra soğuması için oda sıcaklığına bırakılarak kompozit malzemeler haline getirilmiştir. Üretilen bu kompozit malzemeler belirlenen ölçülerde su jeti yöntemiyle kesilip elde edilen numunelerin çekme, eğme, yorulma, Charpy darbe testleri, SEM görüntülemeleri ve FTIR analizleri yapılmıştır. Yapılan mekanik testlerde farklı katman ve oryantasyon açılarıyla dizilen hibrit kompozitlerin farklı mukavemet özellikleri gösterdiği görülmüştür. Bu sebeple, prepreg liflerin uygun oryantasyon açıları ve dizilimleriyle üretilen kompozit malzemelerin mekanik dayanımlarında iyileşme olacağı görülmüştür.

Sağır (2016), yapılan çalışmayla yaygın olarak kullanılmakta olan keten ve jüt doğal elyaflarından üretilen farklı dizilimdeki kompozit malzemelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu nedenle öncelikle keten ve jüt kumaşlarına alkali işlemi uygulanmıştır. Alkali işlemi uygulanan keten ve jüt kumaşlarından 4 kat keten ve 4 kat jüt olacak şekilde iki farklı dizilim oluşturulmuştur. Oluşturulan bu dizilimlerin dış katmanlarına yüzey düzgünlüğü sağlanması için birer kat cam fiber eklenmiştir.

Oluşturulan bu iki farklı dizilim vakum destekli reçine infüzyon yöntemi kullanılarak kompozit malzemeye dönüştürülmüştür. Elde edilen kompozit malzemeler uygun ölçülerde kesilerek çekme ve darbe testleri yapılmıştır. Yapılan çekme testinde farklı dizilime sahip aynı tür kumaştan oluşan kompozit plakaların çekme mukavemetinde benzer sonuçların elde edilmiştir. Numunelere uygulanan darbe testi sonucunda jüt yüzüne darbe uygulamasının keten yüzüne göre daha iyi sonuçlar verdiği, alt yüzeyin keten olması jüt olmasına kıyasla daha az hasara uğradığı ve test numunesinin üst yüzeyinin jüt olması keten yüzeye göre daha fazla enerji absorbe ettiği belirtilmiştir. Böylece aynı tip ve sayıda fiberin farklı dizilimleriyle elde edilen kompozit malzemelerin farklı çekme ve darbe davranışları gösterdiği görülmüştür.

Ramesh vd. (2013), yaptıkları çalışmada sisal ve jüt doğal liflerinin cam elyaf ile hibritleşerek oluşturulan kompozit malzemelerin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla sisal-cam elyaf ve jüt-cam elyaf şeklinde iki farklı hibrit dizilimden elle yatırma tekniği kullanılarak kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen kompozit plakalar çekme ve eğilme testleri için uygun ölçülerde testere ile kesilmiştir. Elde edilen numunelere çekme ve eğilme testleri uygulanmıştır. Yapılan testlerin sonucunda sisal-cam elyaf numunelerinin çekme özelliklerinin jüt-cam elyaf numunelerinin çekme özelliklerinden daha iyi mukavemet gösterdiği, ancak jüt-cam elyaf numunelerinin eğme özelliklerinin ise sisal-cam elyaf numunelerinin eğme özelliklerinden daha iyi değerler verdiği belirtilmiştir.

Mohanavel vd. (2022), yaptıkları çalışmada doğal takviyeli fiberlerin istifleme dizilimlerinin değiştirilmesinin kompozit malzemenin mekanik özelliklerine etkisini incelemişleridir. Bu kapsamda mekanik testlerini yapmak için el yatırma tekniği kullanılarak farklı dizilimlere sahip beş katmanlı dört adet kompozit malzeme üretmişlerdir. Üretilen kompozit plakalardan alınan numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için numunelerin çekme testi, eğilme testi, darbe testi ve morfolojik analizleri yapılmıştır. Yapılan testlerin sonucunda, dış yüzey ve orta katmandaki fiberlerin mukavemetlerinin çekme, eğilme ve darbe mukavemetlerinde etkili olduğu, madar fiber oranının fazla olduğu hibrit kompozitlerin gerilim ve tokluk özelliklerinin diğer kompozitlere kıyasla nispeten fazla olduğu, jüt oranının fazla olduğu hibrit kompozitlerin yüke dayanıklılık, mukavemet ve enerji emme özelliklerinin diğer kompozitlere kıyasla nispeten daha iyi olduğu, dış katmandaki liflerin mukavemetlerinin eğilmeye mukavemetinde etkili olduğu sonuçlarına varılmıştır. Bu kapsamda

hibridizasyonun mukavemet ve biyolojik parçalanabilirlik sağlamak için etkili bir teknik olduğu iddia edilmiştir. Ayrıca doğal liflerin hibrit kompozitleri güçlendirmede etkili olduğu ve cam elyaf ile iyi karışabildikleri tespit edilmiştir. Böylece liflerin içeriği, mukavemetleri ve istif sıralamaları hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerini kontrol edeceği sonucuna varmışlardır.

Çavdar (2024), yaptığı çalışma ile Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) polimerin belirli özelliklerini geliştirebilmek için %0.125, %0.25, %0.50 ve %1.0 oranlarında selüloz nano elyaf takviyeli ABS polimerler üretilerek yoğunluk, parlaklık ve su absorpsiyon gibi fiziksel özellikleri, diferansiyel termal termogravimetrik, diferansiyel taramalı kalorimetre, termogravimetrik analiz ve fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi gibi termal ve çekme, eğme, sertlik ve darbe testleriyle mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan araştırma sonucunda farklı oranlarla selüloz nano elyaf takviye edilerek üretilen ABS polimerlerinin özelliklerinde zayıflamaların ve iyileşmelerin olduğu gözlemlenmiştir.

Korkmaz vd. (2016), yaptıkları çalışma ile takviye elemanı olarak karbon elyafı kullanılan bir kompozit malzemenin mekanik özellikleri belirlenip, aynı kompozit malzemenin karbon nanotüp katkı maddesi kullanılarak tekrar üretilip, karbon nanotüplerin kompozit malzemedeki mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışma ile karbon nanotüp katkı maddesinin kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirdiği belirtilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Hibrit Kompozitlerin İstiflenmesi ve Üretimi

Bu tez çalışmasında biri doğal, diğeri sentetik iki farklı fiberin farklı dizilimleri ile doğal fiber takviyeli kompozitler üretilmiştir. Doğal fiber olarak jüt kumaşı seçilmiş olup, sentetik fiber olarak da cam fiber seçilmiştir. Bu iki fiberin matris malzemesi olarak ise ARC 152 epoksi reçine kullanılmıştır.

İlk olarak seçilen cam fiber ve jüt kumaşının farklı dizilimde kompozit malzeme üretimine hazır olması için 300 mm × 300 mm ebatlarında kesimi yapılmıştır. Kesimi yapılan jüt kumaşa ait görsel Şekil 3.1’de ve cam fibere ait görsel Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3. 1. Jüt doğal fiber kumaşa ait görüntüler



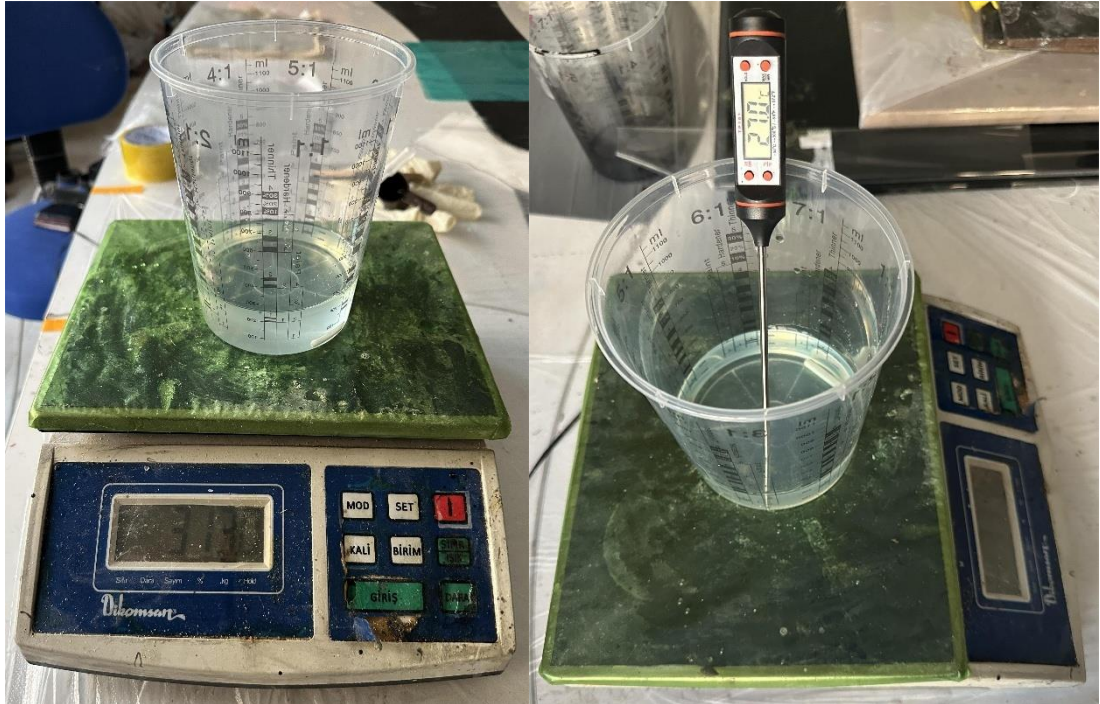
Şekil 3. 2. Cam fiber kumaşlara ait görüntüler

Yukarıda görselleri verilen cam fiber ve jüt kumaşlarının kompozit malzeme üretiminde kullanılacak reçine miktarının belirlenmesi için öncelikle alansal ağırlıkları hesaplanmıştır. Cam fiber ve jüt fiberlerinin öncelikle 0,0001g hassasiyetine sahip RADWAG marka AS220/C/2 model bir hassas terazide ağırlıkları ölçülmüştür ve bu değer alanlarına bölünerek birim alana düşen ağırlıkları hesaplanmıştır. Cam fiberin 106 g/m^2 ve jüt kumaşın 236 g/m^2 alansal ağırlığa sahip oldukları tespit edilmiştir. Tablo 3.1.'de kullanılacak olan reçinenin üretici firma katalog bilgileri verilmiştir.

Tablo 3. 1. ARC 152 epoksi reçine üretici firma katalog bilgileri

Renk	Film Kalınlığı	Karışım Oranı	Uygulama	Kaplama	İlk Kuruma	Pot Life	Ambalaj Hacmi
Şeffaf	Kuru: 200 Mikron	4/1	Spatula Fırça Rulo	5 m ² /lt Ortalama	15 °C	15 °C	1,25 Kg 5 Kg 25 Kg
					Extra Slow: 18 Saat	Extra Slow: 6 Saat	
					Slow Hardener: 12 Saat	Slow Hardener: 4 Saat	
					Standart Hard: 8 Saat	Standart Hardener: 2 Saat	
					Fast Hardener: 5 Saat	Fast Hardener: 1 Saat	
					35 °C	35 °C	Varl İbc (Takım)
					Extra Slow: 12 Saat	Extra Slow: 2 Saat	
					Slow Hardener: 6 Saat	Slow Hardener: 1 Saat	
					Standart Hard: 3 Saat	Standart Hardener: 40 Dk.	
					Fast Hardener: 1 Saat	Fast Hardener: 20 Dk.	

ARC 152 epoksi reçine kullanılan fiber malzemelerin yoğunlukları hesaplandıktan sonra bir adet kompozit plakanın üretimine yetecek şekilde hazırlanmıştır. Reçine hazırlanırken her 4 birim reçine içerisine 1 birim sertleştirici gelecek şekilde karışım elde edilmiştir. Hazırlanan reçine karışımına ait görsel. Şekil 3.3'te verilmiştir.

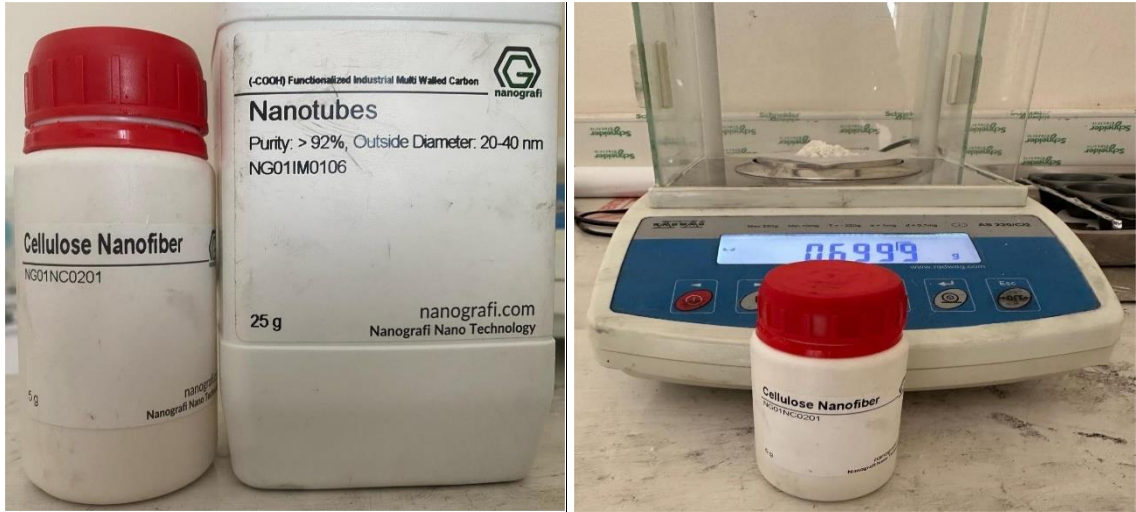


Şekil 3. 3. ARC 152 Epoksi reçinenin hazırlanması

Nanopartikül takviyeli epoksi kompozitlerin hazırlanması için kullanılan en yaygın yöntem, polimeri ve nanopartikülleri uygun bir çözücü içerisinde karıştırdıktan sonra çözücüü buharlaştırarak kompozit bir film elde etmektir (Coleman vd., 2006). Bu yöntemle nanotüp tozunun çözücü içerisinde çalkalanıp iyice dağılması sağlandıktan sonra, çözücü ve nanotüp karışımının polimer içerisinde dağılması kolaylaşmaktadır.

Bu nedenle, CNF ve CNT tozlarının polimer içerisinde daha homojen dağılabilmesi için öncesinde bir çözücü ile karışımı sağlanmıştır. Bu çalışmada çözücü olarak aseton kullanılmıştır. Önceden miktarları belirlenen (%0,05, %0,1 ve %0,2) CNF ve CNT tozlarının miktarları göz önüne alınarak bir miktar aseton içerisine atılıp Creworks Digital Ultrasonic Cleaner (Model:30A, Volt:AC220-240V 50Hz) marka ultrasonik banyo cihazı ile iyi şekilde dağılmaları sağlanmıştır.

Elde edilen bu karışım daha sonra kompozit malzeme yoğunluğu doğrultusunda miktarı belirlenmiş ARC 152 epoksi reçine içerisine eklenerek Wise Stir MSH-20A cihazı ile hem karıştırılıp hem de bir miktar ısıtılarak CNF ve CNT tozlarının epoksi içerisinde iyi şekilde dağılabilmesi ve epoksi içerisindeki asetonun tamamen buharlaşması sağlanmıştır. Ultrasonik banyo ve manyetik karıştırıcı cihazları ile reçineye toz karışımı yapılması Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 4. Selüloz nanofiber ve karbon nanotüp tozlarının hassas terazi ölçümü



Şekil 3. 5. ARC 152 epoksi reçinesiyle CNF ve CNT tozlarının karıştırılması

Kompozit malzeme üretim yöntemi olarak el yatırma tekniği seçilmiştir. Düz bir cam zemin üzerine şeffaf bir jiletin serilerek kullanılacak cam fiber ve jüt kumaşının belirlenen dizilim sırasına göre serilmesi ve bu serme işlemi yapılırken fiber malzemeler arasına belirlenen miktarda epoksi konulup bu epoksilerin özel rulolar kullanılarak fiberlere homojen şekilde yayılıp, emdirilme tekniği ile elde edilmiştir. Ardından istenilen dizilimin elde edilmesi için cam fiber ve jüt kumaşı aralarına yeterli reçine konulup üretim yapılmıştır.



Şekil 3. 6. El yatırma tekniği ile toz karışımı olmayan ve toz karışımlı kompozit plakaların üretilmesi

Dizilim bitmesiyle son katmana epoksinin emdirilmesi işlemi bittikten sonra zeminde yapıldığı gibi son katman üzerine de şeffaf bir vakum torbası konularak epoksinin tüm katmanlara yayılması için yine özel bir rulo kullanılmıştır.



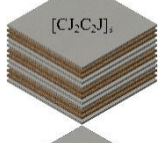
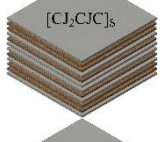
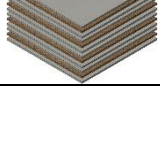
Şekil 3. 7. El yatırma tekniği ile dizilimin tamamlanması

Son kat dizilimin yapıp, son kat rulosu ile epoksinin tüm katmanlardaki fiberlere iyice emilimi sağlandıktan sonra dizilimin üzerine dizilimin altındaki gibi bir cam plaka konulmuştur. Arıca dizilimdeki tüm fiberlerde epoksinin emilimine ve kompozitin düz bir plaka halinde üretilmesine yardımcı olması için son katman üzerine konulan cam plaka üzerine iki adet 15kg ağırlığında düz demir plaka konulmuştur.

Son katman üzerine ağırlıkların konulması ile üretilen kompozit malzemedeki reçinenin kuruması için 24 saat beklenmiştir.

El yatırma yöntemi ile üretilmiş olan 8 adet hibrit kompozit malzemenin fiber dizilim şeması Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3. 2. Üretilen hibrit kompozitlerin dizilim tablosu

Numune no	Fiber sayısı	Dizilim	Görsel
1	12C	$[C_{12}]$	
2	12J	$[J_{12}]$	
3	6C-6J	$[CJCJCJ]_s$	
4	6C-6J	$[CJ_2C_2J]_s$	
5	6C-6J	$[CJ_2CJC]_s$	
6	6C-6J	$[CJCJ_2C]_s$	
7	8C-4J	$[C_3JCJ]_s$	
8	8C-4J	$[CJC_3J]_s$	
9	8C-4J	$[C_2JCJC]_s$	
10	8C-4J	$[CJC_2JC]_s$	

Tablo 3.2’de, verilen kompozit ve hibrit kompozitlerin üretim tablosunda cam fiber C, jüt kumaşı ise J ile sembolize edilmiştir. Birinci ve ikinci dizilimler sırasıyla sadece cam ve sadece jütten kumaşından oluşan birer plaka olup bu iki kompozit malzemenin üretim nedeni cam fiber ve jüt takviyeli sade kompozitlerin dayanımlarının hesaplanmasıdır. Üretilen sade (1 ve 2) ve hibrit (3-10) kompozitlerin toplu olarak görünümü Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3. 8. Kompozit ve doğal fiber takviyeli kompozit üretimi

Mukavemet testler sonucunda optimum dizilim olarak belirlenen yedinci dizilime %0,05, %0,10 ve %0,20 oranlarında CNF ve CNT tozları eklenerek üretilen kompozit plakaların toplu olarak görseli ise Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3. 9. CNF ve CNT tozları eklenerek üretilen yedinci dizilim kompozit plakalar

3.2. Mekanik Test Aşamaları

Üretimi yapılan kompozit plakaların testlerinin yapılabilmesi için AREL marka CNC Router cihazı ile istenilen ölçülerde numune kesim işlemi yapılmıştır. Bu kapsamda kompozit ve doğal fiber takviyeli kompozit tabaklardan çekme, eğilme, kısa kiriş tabakalar arası kayma ve burkulma testleri için ayrı ölçülerde parçalar kesilmiştir. Kesim işlemine ait fotoğraf Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3. 10. Kompozit tabakaların kesme işleminin yapıldığı CNC router cihazı

3.2.1. Çekme testi

Çekme testi 250 kN kapasiteli yük hücresinde Shimadzu marka test cihazında 1 mm/dk hızda yapılmıştır. Çekme deneyi için kesilecek parçalar ASTM D3039 standartları gereği 25 mm × 250 mm boyutunda kesilmiştir. Deney sırasında test cihazına bağlanacak kompozit parçaların cihazın tutucu çenelerinde deformasyona maruz kalmaması ve daha sağlıklı bir ölçümün yapılabilmesi için cihazın bağlantı çeneleri ile kompozit malzemeler arsına sabitleme pabuçları konulmuştur. Sabitleme pabuçları olarak 25 mm × 50 mm ölçülerinde beyaz MDF duralit kullanılmıştır. Beyaz MDF duralit pabuçlar, test edilecek kompozit parçalara Soma Fix hızlı yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Kesilen numunenin test aşamasındaki fotoğrafı Şekil 3.11’de verilmiştir.

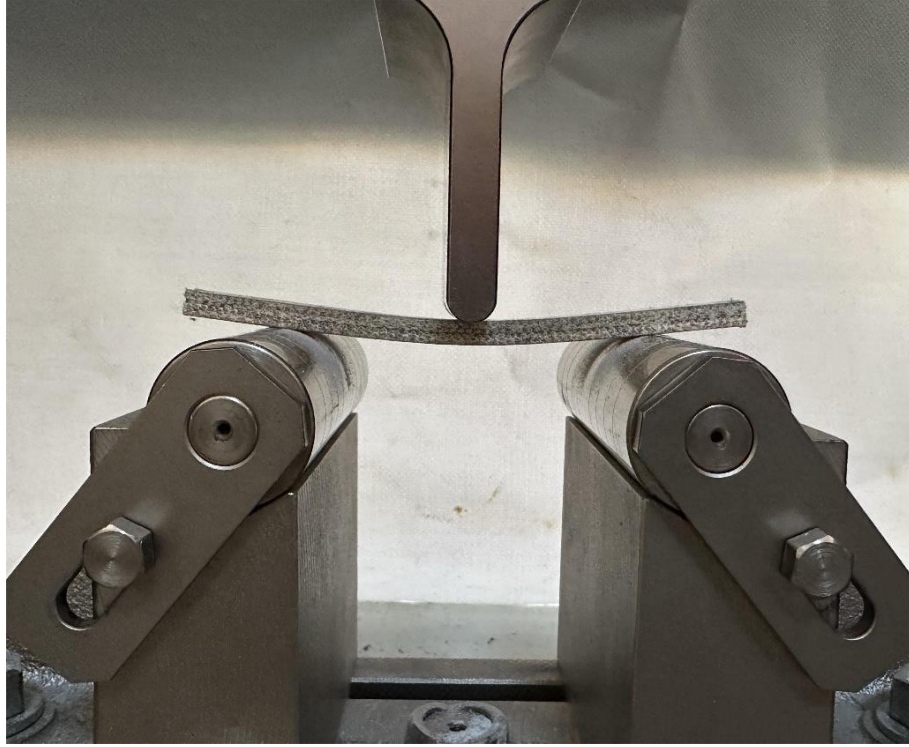


Şekil 3. 11. Dördüncü dizilime ait çekme testi görseli

Şekil 3.11’de görseli verilen test cihazındaki çekme kuvveti ve uzama verileri cihaza bağlı bir bilgisayara aktarılmıştır. Bilgisayarın kaydetmiş olduğu veriler ile çekme gerilmeleri ve uzama miktarları hesaplanmıştır.

3.2.2. Eğilme deneyi

Eğilme deneyi yine Shimadzu marka test cihazında hassas ölçüm alınabilmesi için 5 kN yük hücresinde 1 mm/dk hızda yapılmıştır. Eğilme deneyi için kesilecek parçalar ASTM D3039 standartları gereği 12.5 mm × 125 mm boyutunda kesilmiştir. Eğilme deneyi görüntüsü Şekil 3.12’de verilmiştir.

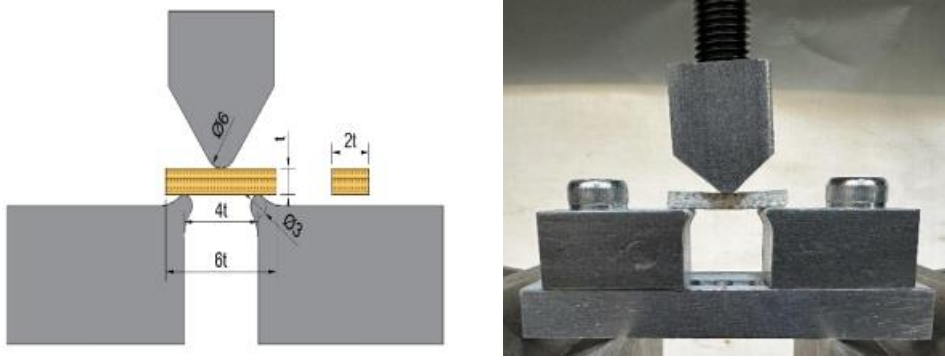


Şekil 3. 12. Eğilme testi görüntüsü

Şekil 3.12’de görseli verilmiş olan Shimadzu Marka test cihazındaki eğilme kuvvetine ve uzamaya ait veriler cihaza bağlı bir bilgisayara aktarılmıştır. Bilgisayarın kaydetmiş olduğu bu veriler ile eğilme gerilmeleri hesaplanmıştır.

3.2.3. Kısa kiriş tabakalar arası kayma testi (SBS)

Kısa kiriş tabakalar arası kayma testi, tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS) değerini hesaplamak için yapılan bir test olup Shimadzu marka test cihazında hassas ölçüm alınabilmesi için 5 kN yük hücresinde 1 mm/dk hız ile yapılmıştır. SBS için plakalar ASTM D2344 standardına göre kesilmiş olup, kompozit malzeme kalınlığı ölçülerek uzunluk; 6 katı, genişlik; 2 katı ve destekler arası mesafe; 4 katı olacak şekilde ölçülendirilmiştir. SBS testine ait şematik görüntü ve test fotoğrafı Şekil 3.13’de verilmiştir.



Şekil 3. 13. SBS şematik ve test görüntüsü (Batı, 2022).

Şekil 3.13’de görseli verilmiş olan SBS testine ait veriler cihaza bağlı bir bilgisayara aktarılmıştır. Bilgisayarın kaydetmiş olduğu bu veriler ile aşağıda verilen 3.1’teki formül ile kompozit numunelerin tabakalar arası kayma mukavemetleri hesaplanmıştır (Batı, 2022).

$$ILSS = 0,75 \frac{P_m}{tW} \quad (3.1)$$

Burada;

$ILSS$: Tabakalar arası kayma mukavemeti (MPa),

P_m : Elde edilen en yüksek kuvvet (N),

t : Numune kalınlığı (mm) ve

W : Numune genişliğidir (mm)

3.2.4. Burkulma deneyi

Burkulma deneyi belli ölçülerde kesilen numunelerin sabit alt çene ve hareketli üst çeneye sahip burkulma test cihazında numunelerin kuvvet uygulanarak sıkıştırılması ile oluşan deformasyonların belirlenmesi yöntemiyle yapılan bir testtir. Burkulma deneyi Shimadzu marka universal test cihazında yapılmıştır 250 kN yük hücresi ile 1 mm/dak hız ile yapılmıştır. Burkulma deneyi için kullanılacak parçalar 25 mm × 250 mm boyutunda kesilmiştir. Burkulma deneyi test görüntüsü Şekil 3.14’de verilmiştir.



Şekil 3. 14. Burkulma testi görüntüsü

Şekil 3.14’de görseli verilmiş olan Shimadzu Marka test cihazındaki burkulma testine ait veriler cihaza bağlı bir bilgisayara aktarılmıştır. Bilgisayarın kaydetmiş olduğu bu veriler ile kuvvet şekil değiştirme grafikleri çizilerek kompozit numunelerin kritik burkulma yükleri belirlenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmada en uygun dizilimin belirlenebilmesi amacıyla öncelikle farklı istifleme sıralarına ve farklı sayıda cam ve jüt fiber katmanına sahip hibrit kompozitler üretilmiş ve bu kompozitler üzerine bir dizi mekanik test uygulanmıştır. Çalışmanın birinci kısmında bu dizilimi belirlemek için yapılan testlerin sonucuna yer verilmiştir. İkinci bölümde ise en uygun dizilime sahip olan kompozitin matrisi selüloz nanofiber ve karbon nanotüp ile modifiye edilmiştir. Aynı testler bu numunelere de uygulanmış ve modifikasyonun mekanik performansa etkisi değerlendirilmiştir.

4.1. Birinci Kısım Test Sonuçları

Bu bölümde yapılan çekme, eğilme, burkulma, tabakalar arası kayma mukavemeti ve burkulma testlerinin sonuçları tablo ve grafikler halinde verilerek açıklanmıştır. Ayrıca elde edilmiş olan sonuçlar literatürdeki çalışmalar ile kıyaslanmıştır.

4.1.1. Yoğunluk ve fiber oranları

Üretilen kompozit plakaların yoğunluk oranlarının belirlenmesi için RADWAG AS220/C/2 model hassas terazi ile kompozit plaka numuneleri tartılıp ağırlıkları belirlenmiştir. Belirlenen ağırlıklar numunelerin hacmine bölünüp yoğunlukları belirlenmiştir. Yapılan hesaplama sonrası kompozitlerin sahip oldukları yoğunluklar, ağırlıkça fiber ve epoksi oranları Tablo 4.1’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 4. 1. Üretilen kompozit plakaların yoğunluk ve fiber oranları

Numune	Yoğunluk (g/cm ³)	Cam fiber oranı (ağ. %)	Jüt fiber oranı (ağ. %)	Epoksi oranı (ağ. %)
1	1.58	57.39	0.00	42.61
2	1.11	0.00	55.71	44.29
3	1.17	9.40	22.57	68.02
4	1.18	9.43	22.64	67.93
5	1.18	9.31	22.34	68.35
6	1.18	9.34	22.42	68.24
7	1.21	15.30	18.36	66.34
8	1.20	15.97	19.17	64.86
9	1.21	15.42	18.51	66.07
10	1.21	15.99	19.19	64.81

Sonuçlar incelendiğinde 1 numaralı numune olan cam fiber takviyeli kompozitin yoğunluğunun 1.58 g/cm³ olduğu ve 2 numaralı numune olan jüt fiber takviyeli kompozitin ise yoğunluğunun 1.11 g/cm³ olduğu görülmektedir. Raghavendra vd. (2013), yaptıkları çalışmada ürettikleri Jüt-Cam hibrit kompozitlerde cam fiber takviyeli kompozitin yoğunluğunun 1.435 g/cm³ ve jüt fiber takviyeli kompozitin ise yoğunluğunun 1.183 g/cm³ olduğu belirtmişlerdir. Mostafa ve Hunain (2019), yaptıkları çalışmada üretilen cam/jüt elyaf hibrit kompozitlerde cam fiber takviyeli kompozitin yoğunluğunun 1.58 g/cm³ ve jüt fiber takviyeli kompozitin ise yoğunluğunun 1.2 g/cm³ olduğu belirtmişlerdir. Ölçülen yoğunluk değerlerinin literatürdeki diğer çalışmalarda belirlenen yoğunluk değerlerine oldukça yakın olduğu gözlenmiştir. Kompozitlerin yoğunluk değerleri matris türüne, üretim yöntemi ve üretim hatalarına bağlı olarak farklılıklar gösterebilir. Tablo 4.1’de belirtilen diğer hibrit kompozitlerin ölçülen yoğunluklarına bakıldığında hibrit kompoziti oluşturan kompozitlerin (cam ve jüt) değerlerine yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca aynı sayıda ve türde takviye fiber sayısına sahip kompozitlerinde yoğunluk değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Bu yakın değerlerin beklenen bir durum olduğu bilinmelidir. Üretilen katkısız altı jüt ve altı cam fiberden oluşan hibrit kompozitlerin fiber oranı %31,65 ile %32,07 arasında değişirken, epoksi oranı ise %67,93 ile %68,35 arasında değişiklik göstermiştir. Üretilen katkısız 4 jüt ve 8 cam fiberden oluşan hibrit kompozitlerin fiber oranları %33,66 ile %35,19 arasında değişiklik gösterirken, epoksi oranı ise %64,81 ile %66,34 arasında değişiklik göstermiştir. El yatırma yöntemi ile üretilmiş olan kompozit

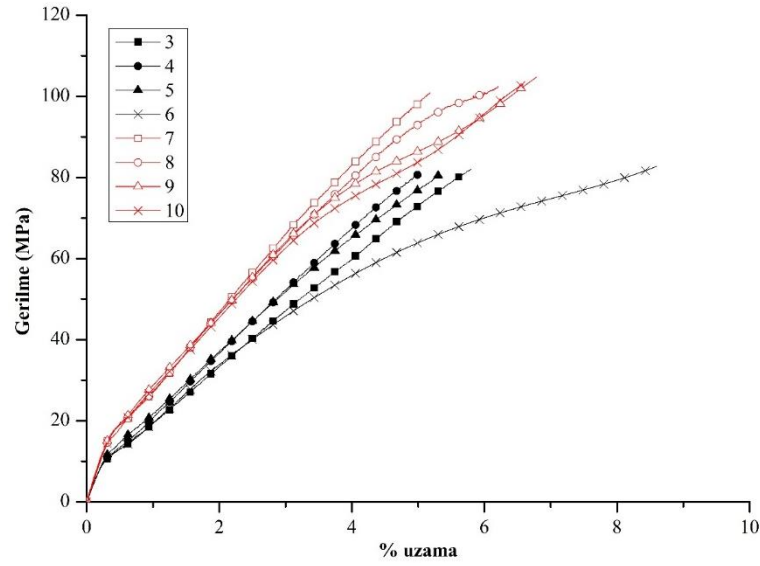
ve hibrit kompozitlerin numunelerinde boşlukların olabileceği ve bununda kompozit yoğunluklarında, fiber oranlarında ve epoksi oranlarında değişikliklere sebep olduğu değerlendirilmektedir. Yapılan üretimler sonucu cam fiber takviyeli kompozite oranla daha düşük yoğunlukta hibrit numuneler üretildiği görülmektedir.

4.1.2. Çekme testi sonuçları

Çekme testi mühendislik malzemelerinin mekanik davranışlarını değerlendirmede kritik öneme sahip temel test yöntemlerinden biridir. Çekme testi, plastik ve elastik malzemedeki deformasyonu değerlendirebilmek için kullanılmaktadır (Pramanik vd., 2024). Bu test sayesinde, bir malzemenin çekme gerilmelerine karşı gösterdiği direnç ile kopma anındaki uzama miktarı gibi önemli mekanik parametreler elde edilir. Bu test, doğal fiber takviyeli kompozitlerde en fazla uygulanan testler arasındadır (Faruk vd., 2012).

Doğal fiberlerin kompozit malzemelerdeki mukavemetini inceleyen bu çalışmada doğal fiber olarak kullanılan jüt fiberleri ile cam fiberden farklı dizimlerle elde edilen numunelerin çekme mukavemetleri incelenmiştir. Kullanılan fiberlerin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için öncelikle sadece jüt fiberden ve sadece cam fiberden oluşan iki ayrı kompozit malzeme elde edilerek, bu kompozit malzemelerden alınan numuneler çekme testine tabi tutulmuştur. Sonrasında diğer jüt ve cam fiber karışımı hibrit dizilimler üretilerek elde edilen numuneler test edilip fiber dizilimlerinin doğal fiber takviyeli kompozit malzemedeki çekme mukavemetine etkisi incelenmiştir.

Öncelikle hibrit kompozitler değerlendirilmeden önce tamamen jüt ve tamamen camdan oluşan kompozitler test edilmiş ve sırasıyla $50,77 \pm 1,02$ MPa ve $416,76 \pm 3,46$ MPa çekme mukavemeti değerleri elde edilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere sadece doğal jüt fiber ile takviye edilmiş olan kompozitlerin çekme mukavemetleri sentetik cam fibere oranla bir hayli düşük olmuştur. Hibrit kompozitlerin ise çekme test sonuçları Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4. 1. Hibrit kompozitlerin çekme testi sonuçları

Bu kısımda hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri değerlendirilirken 6 jüt ve 6 cam katmanına sahip olan 3, 4, 5 ve 6 numaralı numuneler kendi içerisinde, 8 cam ve 4 jüt katmanına sahip olan 7, 8, 9 ve 10 numaralı numunelerde kendi içerisinde değerlendirilecektir. Tüm numunelere ait gerilme ve % uzama değerleri ayrıca Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4. 2. Tüm dizilimlerin ortalama çekme gerilmesi ve % uzama değerleri

Numune	Gerilme (MPa)	%uzama
3	81.93 ± 2.73	5.81 ± 0.01
4	80.64 ± 2.25	4.99 ± 0.36
5	80.46 ± 1.73	5.30 ± 0.08
6	82.72 ± 3.06	8.59 ± 0.43
7	100.86 ± 2.46	5.18 ± 0.34
8	102.40 ± 0.97	6.21 ± 0.75
9	104.75 ± 0.23	6.79 ± 0.46
10	102.93 ± 3.54	6.58 ± 0.20

Üçüncü dizilim [CJCJCJ]_s ilk cam-jüt hibrit karışımı olarak üretilen kompozittir. Tablo 4.2’deki değerler incelendiğinde bu dizilimden elde edilen dört adet numunenin çekme testi sonuçları; ortalama gerilme $81,93 \pm 2,73$ MPa ve ortalama birim şekil değiştirme $\%5,81 \pm 0,01$ olarak ölçülmüştür.

Dördüncü dizilim [CJ₂C₂J]_s olarak üretilen cam-jüt fiber hibrit kompozit plakadan elde edilen test sonuçları; ortalama gerilme $80,64 \pm 2,25$ MPa ve ortalama birim şekil

değiştirme ise $4,99 \pm 0,036$ olarak ölçülmüştür. Üçüncü dizilimle benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Beşinci dizilimde $[CJ_2CJC]_s$ üretilen kompozit plakadan kesilen dört adet numunenin çekme testi sonuçları; ortalama gerilme $80,46 \pm 1,73$ MPa ortalama birim şekil değiştirmesi ise $5,30 \pm 0,08$ olarak ölçülmüştür. Üçüncü ve dördüncü dizilimde olduğu gibi altı jüt ve altı cam örgü fiberden oluşan beşinci dizilimini test sonuçlarının üçüncü ve dördüncü dizilimdeki çekme mukavemeti değerlerine çok yakın olduğu görülmüştür.

Altıncı dizilimde $[CJCJ_2C]_s$ kompozit plaka numunelerinden elde edilen 2ortalama gerilme $82,72 \pm 3,06$ MPa ortalama birim şekil değiştirmesi $8,59 \pm 0,43$ olarak ölçülmüştür.

Altı cam ve altı jüt fiber katmanına sahip olan bu seride gerilmelerin $80,46$ MPa ile $82,72$ MPa arasında değiştiği görülmektedir. Bu durumun temel sebebi düzlem içi doğrultuda yapılan çekme testinde tüm numunelerde cam ve jüt katmanlarının sayısının eşit olmasıdır. Bu eşit dağılım her numunenin benzer düzeyde yük taşıma kapasitesine sahip olmasını sağlamış ve bu sebepten dolayı elde edilen gerilmelerde çok benzer olsa da bazı küçük farklar olmuştur.

7, 8, 9 ve 10 numaralı kompozitlerde yine 12 fiber katmanı kullanılmıştır ancak jüt-cam fiber sayılarında değişiklik yapılmıştır. Yedi numaralı kompozit sekiz cam ve dört jüt fiber olarak $[C_3JCJ]_s$ dizilimiyle üretilmiştir. Yedinci dizilimden elde edilen dört adet numunenin test sonuçları; ortalama gerilme $100,86 \pm 2,46$ MPa ve ortalama birim şekil değiştirme $5,18 \pm 0,34$ olarak ölçülmüştür. Yedinci dizilimdeki toplam fiber katman sayısı 12 olsa da cam fiber katman sayısının diğer hibrit dizilimlerden (3, 4, 5 ve 6. dizilimler) farklı olarak 6 yerine 8 katmana çıkması ve jüt fiber katman sayısının 6 katmandan 4 katmana düşmesi çekme mukavemetinde iyileşmeye sebep olmuştur.

Sekizinci dizilimle üretilen sekiz cam ve 4 jüt fiber katmanlı ve $[CJC_3J]_s$ dizilime sahip kompozit plaka numunelerinin çekme test sonuçları; ortalama gerilme $102,40 \pm 0,97$ MPa ve ortalama birim şekil değiştirme $6,21 \pm 0,75$ olarak ölçülmüştür. Yedinci dizilime kıyasla jüt fiberlerin orta kısımdaki yoğunluğunun azalması ile çekme mukavemetinde iyileşme görülmüştür.

Yedi ve sekizinci kompozitlerle aynı fiber katman sayısına sahip olan dokuzuncu kompozite $[C_2JCJC]_s$ ait çekme test sonuçları; ortalama gerilme $104,75 \pm 0,23$ MPa, ve ortalama birim şekil değiştirme $6,79 \pm 0,46$ olarak ölçülmüştür.

Son numune olan onuncu numune de yine sekiz cam ve dört jüt fiberden ve $[CJC_2JC]_s$ dizilimiyle üretilmiştir. Onuncu dizilimle üretilen kompozit plakaya ait dört adet numunenin ortalama çekme test sonuçları; ortalama gerilme $102,93 \pm 3,54$ MPa, ortalama birim şekil değiştirme $\%6,58 \pm 0,20$ olarak ölçülmüştür.

Genel olarak elde edilen test sonuçlarına göre kompozit numunelerin çekme mukavemetinde kompozit plakadaki katman oranları ve dizilimleri etkili olmaktadır. Altı cam ve altı jüt katmanından oluşan kompozitlerde çekme mukavemeti 80,46 ile 82,72 MPa arasında değişirken, sekiz cam ve dört jüt katmanından oluşan hibrit kompozitlerde bu değer 100,86 ile 104,75 MPa arasında olmuştur. Aynı katman sayılarına sahip olmalarına rağmen mekanik özelliklerdeki bu ufak değişimlerin olması normaldir. Bu farkların temel sebebi üretim kaynaklı olabileceği gibi doğal fiberlerin mekanik davranışlarının sentetik fiberler kadar tutarlı ve öngörülebilir olmamasından kaynaklanıyor olabilir. Nitekim literatürde Hindistan cevizi lifi, jüt, keten ve kenevir gibi doğal liflerin lif uzunluğu boyunca yapısal düzensizlik, değişken çap ve değişken kesit alanı gibi karakteristik özellikler sergilediği bildirilmektedir (Madueke vd., 2023). Bu durum doğal fiberlerin kullanımını sınırlayabileceği gibi mekanik özellikleri üzerinde de tutarsızlıklara sebebiyet verebilmektedir.

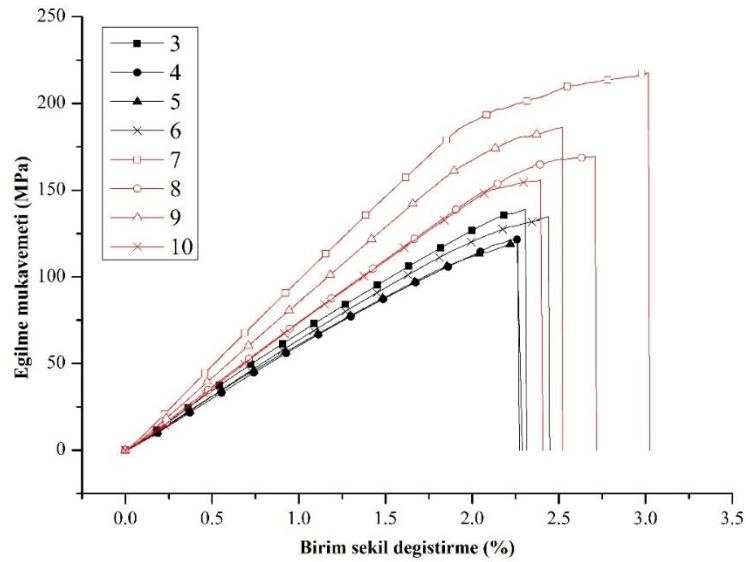
Fiber doğrultusunda yani düzlem içi doğrultuda yapılan çekme testi doğrudan fiber katmanlarıyla alakalı olduğu için aynı sayıda jüt ve cam fiber içeren kompozitlerde benzer mukavemet değerleri elde edilmiştir. Düzlem içi testlerde mekanik özellikleri belirleyen şey matris değil takviye fazıdır. Takviye fazının aynı sayıda sentetik ve doğal fiberden oluşuyor olması çekme mukavemetlerinin benzer olabileceğini göstermektedir. Bu durumun literatürde yer alan (Selver vd., 2018) ve (Sağır, 2016) çalışmaları ile örtüşmekte olup zaten beklenen bir durum olduğunu söylemek gereklidir.

Farklı dizilimlere sahip kompozitler benzer çekme mukavemet değerleri sergilemiş olsalar da %uzama oranlarında belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu durum deformasyon davranışları üzerinde dizilimin önemli olduğunu göstermektedir. Liflerin dizilim sırası fiberler arası yapışma (adherans) kalitesini doğrudan etkileyebilmekte ve bu da yük transfer mekanizmasını ve doğal olarak malzemenin uzama kapasitesini değiştirebilmektedir. Ara yüzeyin zayıf olması yük transferini sekteye uğratarak bazı katmanların taşıyıcı sisteme tam olarak dahil olamamasına sebebiyet verebilmektedir. Bu durum her ne kadar yük taşıma kapasitesi üzerinde çok bir etkiye sahip olmasa da dizilimin deformasyon karakteristiği üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

4.1.3. Eğilme testi sonuçları

Eğilme testi, özellikle yapı ve otomotiv sektöründe kullanılan kompozit ve polimer malzemelerin çalışma sırasında eğilme yüklerine maruz kalan bileşenler için ideal bir test metodudur. Bu test ile bir malzemenin eğilme dayanımı, rijitliği ve deformasyon kapasitesi ölçülerek hem elastik hem plastik davranışları tespit edilebilir. Bu test esnasında numune hem çekme hem de basma gerilmesine maruz kalır. Üç noktalı ve dört noktalı eğilme testleri en sık kullanılan yöntemlerdir. Genellikle üç noktalı bükme testi uygulanır ve malzemelerin eğilme stresini veya kırılma tokluğunu değerlendirebilmek için kullanılır (Pramanik vd., 2024).

Çekme testinde olduğu gibi eğilme testinde de 12 katmanlı sade jüt ve sade cam fiber kompozitlerin eğilme gerilmelerinin tespiti için 1 ve 2 diye adlandırılan bu numunelere eğilme testleri uygulanmış olup, eğilme gerilmeleri cam ve jüt için sırasıyla $550,21 \pm 7,39$ ve $77,13 \pm 2,96$ MPa şeklinde olmuştur. Hibrit kompozitlerin eğilme mukavemetleri Şekil 4.2'deki grafikte ve Tablo 4.3'te toplu bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4. 2. Hibrit kompozitlerin eğilme test sonuçları

Tablo 4. 3. Birinci dizilim kompozit plaka eğilme mukavemeti değerleri

Numune	Eğilme gerilmesi (MPa)	Birim şekil değiştirme (%)
3	139.02 ± 7.51	2.31 ± 0.10
4	122.44 ± 4.40	2.26 ± 0.12
5	120.20 ± 3.78	2.26 ± 0.10
6	136.24 ± 1.83	2.44 ± 0.09
7	217.62 ± 4.97	3.02 ± 0.13
8	169.32 ± 3.15	2.71 ± 0.21
9	186.14 ± 8.57	2.52 ± 0.06
10	155.99 ± 3.76	2.39 ± 0.15

Grafiği incelediğimizde dizilimin ve katman sayısının etkisi net bir şekilde görülebilmektedir. Altı cam ve altı jüt fiberden meydana gelen 3, 4, 5 ve 6 numaralı numunelerde eğilme mukavemetleri 120 MPa ile 139 MPa arasında değişmekte olup en yüksek değer 139 ± 7.51 MPa ile üç numaralı dizilimde gerçekleşmiştir. [CJCJC]_s dizilimine sahip olan bu kompozite en yakın mekanik özelliği [CJC₂C]_s dizilimine sahip olan altı numaralı numune 136 ± 1.83 MPa ile göstermiştir. Her iki kompozitte de birinci ve üçüncü katman cam fiberden meydana gelirken, birinci ve dördüncü katmanı cam fiberden meydana gelen [CJ₂C₂J]_s ve [CJ₂CJC]_s dizilimlerine sahip olan dört ve beş numaralı numunelerin eğilme mukavemetleri ise sırasıyla 122.44 ± 4.40 ve 120.2 ± 3.78 MPa ile birbirine çok yakın seyretmiştir. Buradan merkeze çok yakın olan beş ve altıncı katmanların eğilme mukavemeti üzerinde sınırlı bir etkisinin olduğunu görüyoruz. Zira eğilme sırasında en büyük gerilmeler numunelerin dış yüzeyinde oluşurken; iç katmanlar bu testte daha az belirleyici rol olmaktadır.

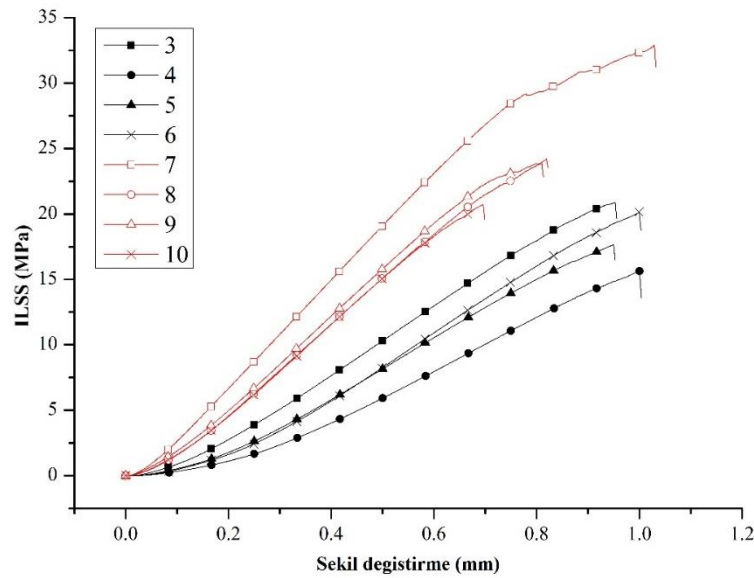
Sekiz cam ve dört jüt tabakasından meydana gelen 7, 8, 9 ve 10 numaralı kompozitlerde ise eğilme mukavemetleri 155.99 ± 3.76 MPa ile 217.62 ± 4.97 MPa arasında değişmektedir. Bu artış, cam fiber oranına bağlı olarak kompozitin rijitlik ve yük taşıma kapasitesinin artmasından kaynaklanmaktadır.

Dört cam katmanının dış kısımda bulunduğu [C₃CJ]_s dizilimine sahip olan yedi numaralı kompozit 217.62 ± 4.97 MPa ile en yüksek eğilme direncine sahiptir. Daha sonrasında en dış katmanda iki cam fibere sahip olan [C₂CJC]_s dizilimine sahip olan dokuz numaralı kompozitin eğilme mukavemeti ise 186.14 ± 8.57 MPa ile en yüksek ikinci eğilme mukavemeti değeri göstermiştir. [CJC₃J]_s ve [CJC₂JC]_s dizilimlerine sahip olan 8 ve 10 numaralı kompozit plakaların ise eğilme mukavemetleri sırasıyla 169.32 ± 3.15 ve 155.99 ± 3.76 MPa olmuştur.

Bu bulgular, eğilme yükü altında en büyük gerilmenin numunenin dış katmanlarında meydana geldiğini ve bu bölgelerde daha yüksek mekanik özelliklere sahip olan cam fiberlerin yer almasının kompozitin eğilme dayanımını belirgin şekilde artırdığını göstermektedir. Bu durum, dış katmanda daha dirençli fiberlerin olduğu literatürdeki diğer çalışmalarla da örtüşmektedir (Santulli, 2016; Sanjay & Yogesha, 2017; Selver vd., 2018; Khan vd., 2021; Li vd., 2017).

4.1.4. SBS testi sonuçları

SBS testi esasında tabakalar arasında bulunan matris malzemesinin fiberlerle etkileşiminin mukavemetini belirleyen bir test olup tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS) olarak tanımlanmaktadır. Şekil 4.3’de hibrit kompozitlere ait ILSS değerleri görülmektedir. Farklı dizilimden oluşan kompozit plakalardan belli ölçülerde (kompozit malzeme kalınlığı ölçülerek uzunluk; 6 katı, genişlik; 2 katı ve destekler arası mesafe; 4 katı) kesilen dörder adet numuneye uygulanarak ortalama tabakalar arası kayma mukavemetleri belirlenmiştir. Şekil 4.3’de doğal fiber katkılı hibrit kompozit plaka numunelerinin SBS test sonuçları verilmiştir.



Şekil 4. 3. Tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS) sonuçları

Şekil 4.3’deki veriler incelendiğinde doğrudan matris malzemesiyle alakalı olan bu testte beklenti fiber diziliminden bağımsız olarak benzer sonuçlar elde edilmesidir.

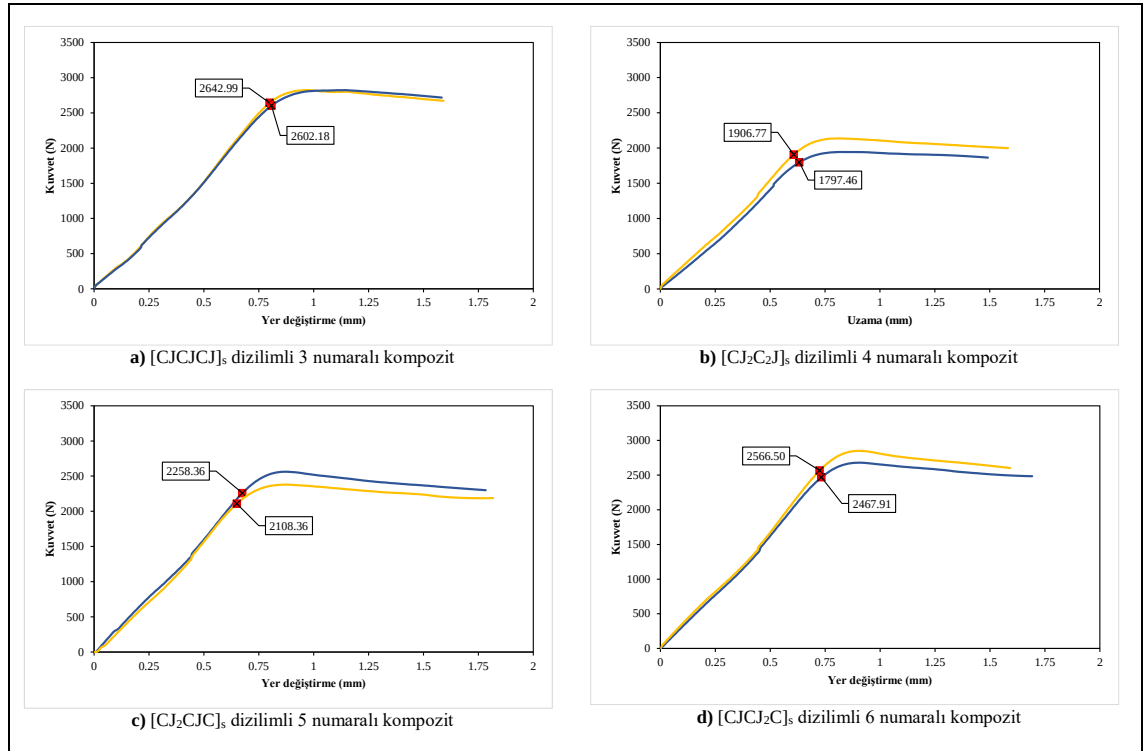
Ancak sonuçlara bakıldığında 6 katman cam ve 6 katman jüt fiberden oluşan ve en dış katmanlarda bir cam bir jüt bulunan 3 ve 6 numaralı numunelerin matris ile daha uyumlu bir yapışma özelliği gösterdiğini görebiliriz. 8 cam 4 jüt katmanı bulunan 7, 8, 9 ve 10 numaralı numunelerde de 7 numaralı numuneyi göz ardı edersek daha dengeli bir dizilime sahip olan 9 numaralı numunede daha iyi bir ILSS değerine ulaşılmıştır. En iyi gerilme değeri $32,89 \pm 0,44$ MPa ile 7 numaralı $[C_3JCJ]_s$ dizilime sahip numunede gerçekleşmiştir, en düşük gerilme ise $15,65 \pm 0,58$ MPa ile 4 numaralı numunede olmuştur. 3, 6, 8, 9 ve 10 numaralı numunelerin tabakalar arası kayma gerilmeleri 20,17 ile 24,23 MPa arasında değişmiştir.

Kumar vd. (2025) yaptıkları çalışmada kenaf ve karbon fiber takviyeli hibrit kompozitleri incelemişler ve merkezde karbon fiber katmanların olduğu kompozitlerde düzgün yüzeyleri ve yüksek rijitlikleri sayesinde etkili yük transferi sağladıklarını ve delaminasyon önlediklerini belirtmişlerdir. Ancak bizim çalışmamızda merkezde cam fiber katmanların olduğu 5, 6, 9 ve 10 numaralı numunelerde belirgin bir iyileşme görülmemiştir. Aksine, cam ve jüt fiber katmanlarının sıralı olarak (bir cam bir jüt şeklinde) yerleştirildiği hibrit kompozitlerde daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Bu farklılık, cam ve jüt gibi yapısal ve yüzey özellikleri bakımından oldukça farklı iki fiber türünün matrise olan bağlanma davranışlarının dizilimden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Fan ve diğ. (2019), yaptıkları çalışmada karbon ve cam fiberin bismaleimid matris malzemesine bağlanma davranışlarının farklı olduğunu gözlemlemişlerdir. Turla vd. (2014) ise karbon ve cam elyafla üretilen hibrit kompozitlerin tabakalar arası kayma mukavemetlerinin sade cam ve sade karbon fiber takviyeli kompozitlerden daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Benzer şekilde Selmy vd. (2012), hibrit kompozitlerin sade örgülü cam ve sade tek yönlü cam kompozitlere oranla daha iyi kayma direnci gösterdiklerini ve ayrıca hibrit kompozitlerde diziliminde önemli bir etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir. Bu nedenle, tabakalar arası kayma mukavemetinin hem kullanılan fiber türüne hem de bu fiberlerin katmanlar içindeki konumlarına ve sıralanma şekillerine de bağlı olarak değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir.

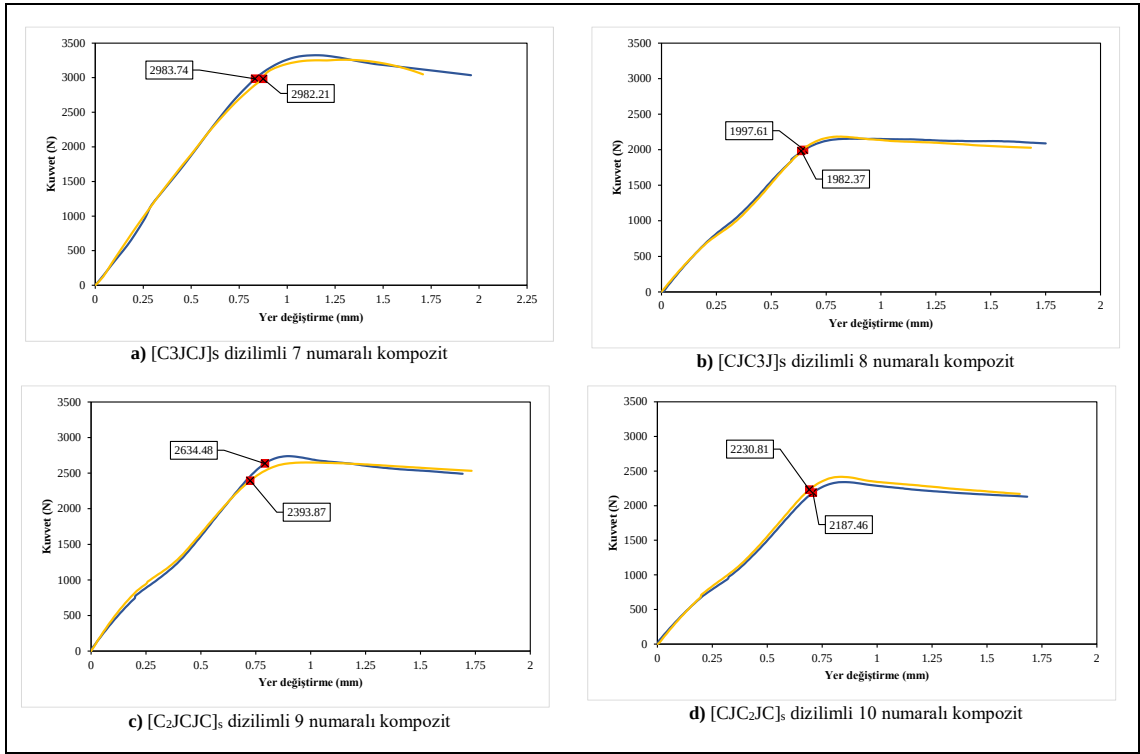
4.1.5. Burkulma testi sonuçları

Burkulma, hafif ancak dayanıklı yapıların geliştirildiği uygulamalarda kritik öneme sahip bir mekanik zayıflık türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Burkulma genellikle ince ve uzun yapıların aksel yükler altında ani bir şekil değişimiyle yapısal bütünlüğünün bozulması olarak tanımlanabilir. Bu sebeplerden dolayı kritik burkulma kuvvetinin belirlenmesi yapısal sistemler için zorunludur. Doğal liflerin sentetik liflerle birlikte güvenli bir şekilde kullanılabilmesi, sürdürülebilir, biyobozunur ve hafif yapıların geliştirilebilmesi için hayati bir testtir.

Bu bağlamda üretilen hibrit kompozitlere dikey pozisyonda iki ucu mafsallı burkulma testi uygulanmış ve kritik burkulma yükleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4. 4. Altı cam ve altı jüt tabakasından oluşan hibrit kompozitlerin burkulma davranışları



Şekil 4. 5. Sekiz cam ve dört jüt tabakasından oluşan hibrit kompozitlerin burkulma davranışları

Şekil 4.4'te kritik burkulma yüklerini incelediğimizde [CJCJCJ]_s dizilimine sahip olan üç numaralı hibrit kompozitin kritik burkulma yükünün en yüksek olduğu görülmektedir. Daha sonrasında en yüksek kritik burkulma yükünün [CJCJ₂C]_s dizilimine sahip olan altı numaralı kompozitten elde edildiği görülmektedir. Her iki kompozitinde birinci ve üçüncü tabakalarının cam fiber katmanından oluşması kritik yükün artmasına sebep olmuştur.

Şekil 4.5'teki sekiz cam ve dört jüt tabakasından oluşan hibrit kompozitlerin kritik burkulma kuvvetleri incelendiğinde en büyük burkulma kuvvetinin [C₃JCJ]_s dizilimine sahip olan yedi numaralı kompozitten elde edildiği görülmektedir. Daha sonrasında ise en dış katmanında iki cam fiber katmanı olan ve [C₂JCJC]_s dizilimine sahip olan dokuz numaralı kompozitte kritik burkulma yükü diğer dizilimlerden yüksek olmuştur. Bu kompozitler benzer bir şekilde en yüksek eğilme direncine de sahiptirler.

Tüm testler birlikte değerlendirildiğinde her ne kadar çekme testinde belirgin bir farklılık bulunmasa da eğilme, SBS ve burkulma testleri sonucunda [C₃JCJ]_s dizilimine sahip yedi numaralı numune en iyi direnci gösteren hibrit kompozit olarak öne çıkmıştır.

Bu yüzden ikinci kısım testlerde bu kompozitin matrisi olan epoksi reçine CNF ve CNT nanopartikülleriyle modifiye edilmiştir.

4. 2. İkinci Kısım Test Sonuçları

İlk kısımda test sonuçları incelendiğinde çekme gerilmesinde çok bir değişim olmasa da eğilme, tabakalar arası kayma ve burkulma testleri ile 7 numaralı numune en uygun dizilim olarak belirlenmiş olup, ikinci kısımda bu numunenin matrisinin farklı oranlarda CNF ve CNT ile modifiye edilmesi sonucu mekanik performanstaki değişimler bu kısımda verilmiştir.

4.2.1. Yoğunluk ve fiber oranları

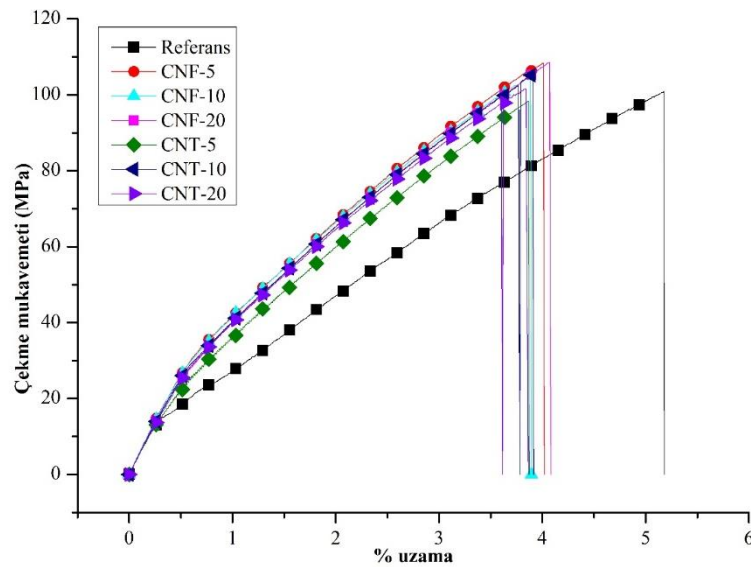
Tablo 4. 4. Modifiye edilen plakaların yoğunluk ve fiber oranları

Numune no	Yoğunluk (g/cm ³)	Cam fiber oranı (ağ. %)	Jüt fiber oranı (ağ. %)	Epoksi oranı (ağ. %)
Referans	1.21	15.30	18.36	66.34
CNF-5	1.24	16.25	19.49	64.26
CNF-10	1.20	15.96	19.15	64.89
CNF-20	1.22	16.23	19.47	64.30
CNT-5	1.20	15.22	18.26	66.52
CNT-10	1.24	15.40	18.48	66.12
CNT-20	1.21	16.00	19.20	64.79

Tablo 4.4'teki sonuçlar incelendiğinde referans numuneye oranla bazı değişimler olduğu ancak dramatik bir düşüş ya da artış olmadığı gözlemlenmiştir. Epoksi matrisin nanopartiküller ile takviye edilmesi yoğunluk değerlerini genel olarak çok az miktarda artırmıştır. En yüksek yoğunluk 1.24 g/cm³ olurken bu artışın temel sebebinin nanopartiküllerin polimer matrisle etkileşimi sonucu çapraz bağ yoğunluğunun artması nedeniyle olduğu düşünülmektedir.

4.2.2. Çekme testi sonuçları

Daha önceki kısımlarda da bahsettiğimiz üzere yapılan birinci kısım testlerde en iyi dizilim ve katman sayısının yedi numaralı yani $[C_3JCJ]_7$ dizilimine sahip numuneye ait olduğunu belirtmiştik. Bu doğrultuda ikinci kısımda bu dizilime sahip olan kompozitlere farklı oranlarda (%0,05, %0,10 ve %0,20) selüloz nanofiber ve karbon nanotüp takviyesi yapılmış ve çekme testi sonuçları Tablo 4.5 ve Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4. 6. $[C_3JCJ]_7$ dizilimli nanopartikül modifiyeli kompozitlerin çekme mukavemeti grafiği

Tablo 4. 5. Modifiye edilmiş kompozitlerin çekme test sonuçları

Numune	Gerilme (MPa)	%uzama
Referans	$100,93 \pm 2,46$	$5,18 \pm 0,49$
CNF-5	$108,34 \pm 1,48$	$4,27 \pm 0,07$
CNF-10	$104,99 \pm 1,23$	$4,14 \pm 0,15$
CNF-20	$108,46 \pm 1,99$	$4,34 \pm 0,37$
CNT-5	$98,29 \pm 4,29$	$4,13 \pm 0,22$
CNT-10	$102,45 \pm 3,24$	$4,02 \pm 0,15$
CNT-20	$97,62 \pm 2,93$	$3,84 \pm 0,25$

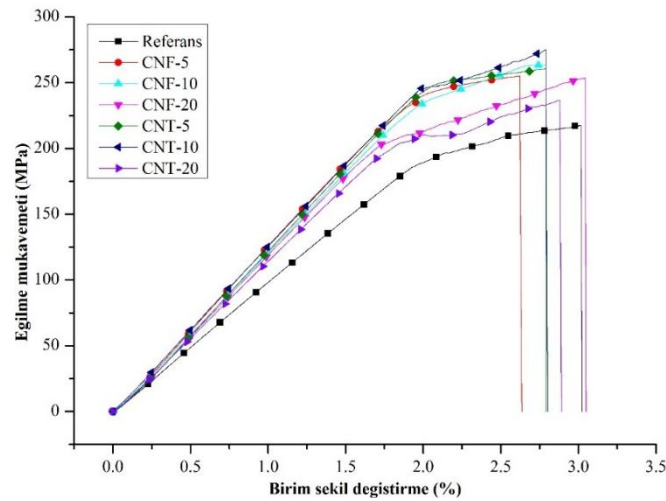
Şekil 4.6’da verilen çekme mukavemetleri incelendiğinde CNT karışımı ile elde edilen kompozit numunelerin, referans alınmış olan toz katkısız numunelerle yakın çekme mukavemet değerleri gösterdiği gözlemlenmiştir. Ancak CNF eklenerek elde

edilen kompozit numunelerin çekme mukavemetlerinde yaklaşık 7 MPa’lık bir iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. CNT toz karışımı ile elde edilen kompozit numunelerinden en yüksek çekme mukavemeti, %0,10 ve %0,20 karışım oranları arasında elde edildiği görülmektedir. Fakat CNF tozu eklenerek elde edilen kompozit numunelerin çekme mukavemeti test sonuçları incelendiğinde, en yüksek çekme mukavemetinin %0,20 CNF karışım oranı ile elde edildiği görülmüştür. Deformasyon özellikleri incelendiğinde ise her iki nanopartikül katkısının da malzemeyi gevreklettiği %5,18 civarında olan uzamayı %3,84’e kadar gerilettiği görülmektedir.

Referans numuneye kıyasla çekme mukavemetinde toz katkısının etkisinin sınırlı olduğu görülmektedir. Çekme testi düzlem içi bir deney olduğu için matris fazından çok takviye fazının domine ettiği bir test türüdür. Doğası gereği fiber takviyeli kompozitlerin düzlem içi mekanik özellikleri yüksek olurken partikül takviyesinin etkileri daha çok düzlem dışı yüklemelerde ortaya çıkabilmektedir. Bu durum literatürdeki çalışmalarla uyumludur (Bati & Celik, 2025; Li vd., 2017; Chen vd., 2014).

4.2.3. Eğilme testi sonuçları

En yüksek eğilme mukavemeti elde edilen $[C_3JCJ]_s$ dizilimli 7 numaralı hibrit kompozite %0,05, %0,10 ve %0,20 oranlarında selüloz nanofiber ve karbon nanotüp tozları eklenerek yedinci dizilimin eğilme mukavemetinde yükselme hedeflenmiştir. Bu kapsamda üretilen CNF ve CNT toz karışımlı kompozit numunelerin eğilme mukavemeti test sonuçları Şekil 4.7’ de gösterilmiştir.



Şekil 4. 7. Nanopartikül takviyeli hibrit kompozitlerin eğilme gerilmeleri

Tablo 4. 6. Nanopartikül takviyeli kompozit plakaların eğilme mukavemeti

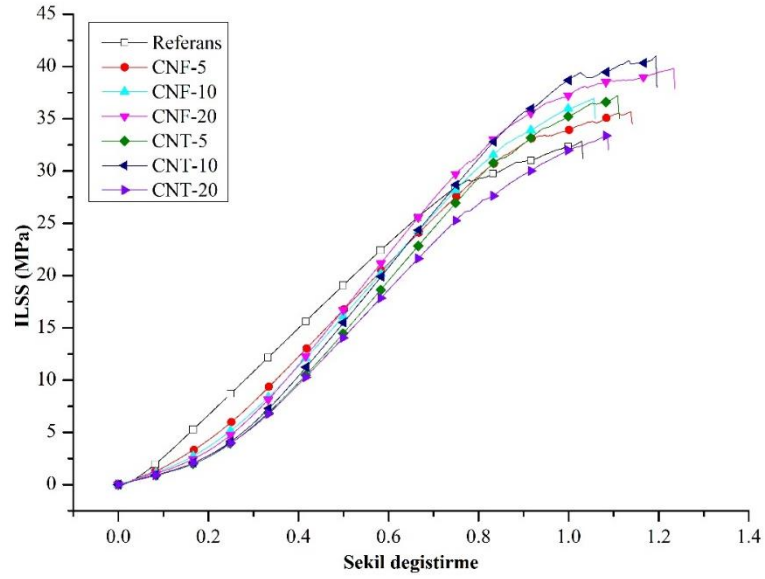
Numune	Eğilme gerilmesi (MPa)	Birim şekil değişirme (%)
Referans	217.62 ± 4.97	3.02 ± 0.13
CNF-5	255.10 ± 4.75	2.62 ± 0.14
CNF-10	263.27 ± 10.05	2.88 ± 0.05
CNF-20	253.39 ± 6.32	3.04 ± 0.13
CNT-5	260.78 ± 6.87	2.64 ± 0.07
CNT-10	274.95 ± 6.66	2.79 ± 0.18
CNT-20	236.73 ± 2.64	2.88 ± 0.17

Şekil 4.6’da modifiye matrisli kompozitlerin eğilme test sonuçlarını incelediğimizde referans numuneye kıyasla CNF ve CNT tozlarının eklenmesi genel olarak kompozit plakaların eğilme mukavemetine olumlu etki ettiği görülmüştür. En yüksek eğilme mukavemeti 274.95 ± 6.66 MPa ile %0,10 CNT takviyeli kompozitte gerçekleşirken referans numuneye oranla yaklaşık %26’lık bir gelişim gözlemlenmiştir. %0,20 CNT takviyeli kompozit her ne kadar referans numuneye oranla gelişim göstermiş olsa da %0,10 ile %0,20 arasında kompozitin CNT katkısının doyuma ulaştığı ve takviyenin artması durumunda mukavemetin daha da düşeceği beklenmektedir.

CNT katkısına benzer şekilde CNF katkısı da maksimum mukavemet değerlerine 263.27 ± 10.05 MPa ile %0,10 katkı oranında ulaşmıştır. Benzer şekilde %0,20 oranında mukavemetin nispeten düştüğü görülmektedir. Her iki nanopartikül katkısı da eğilme testi için mukavemet artırıcı rol oynamıştır. CNF ve CNT tozlarından üretilecek kompozit numunelerin optimum eğilme mukavemet değerleri %0,10 ve %0,20 oranları arasında olacağı değerlendirilmektedir.

4.2.4. SBS testi sonuçları

Nanopartikül takviyeli kompozit plakalardan alınan numunelerin test sonuçları Şekil 4.8’de verilmiştir.

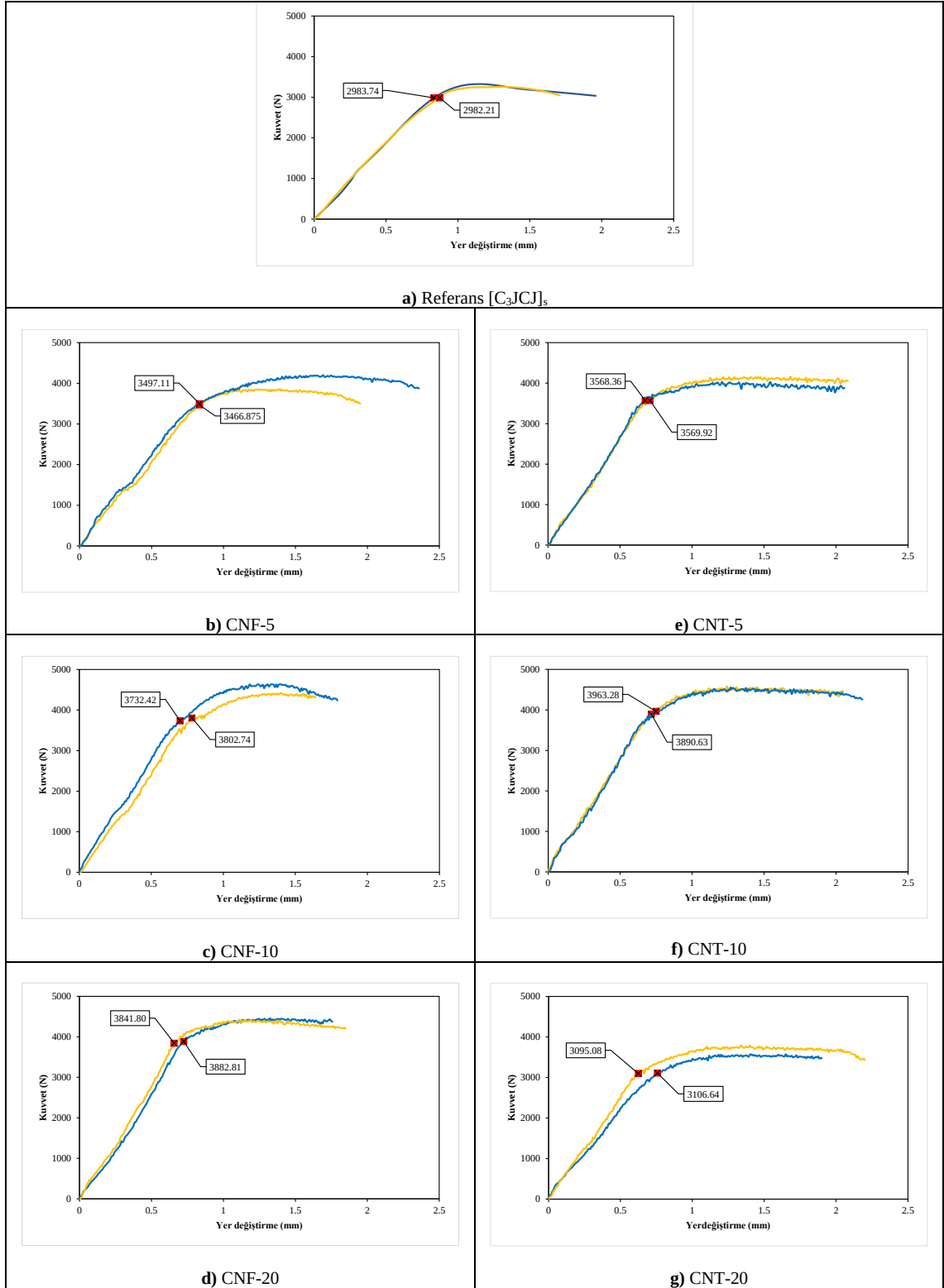


Şekil 4. 8. Nanopartikül modifiyesinin tabakalar arası kayma mukavemetine etkisi

Şekil 4.8’de ILSS gerilmesinin en yüksek olduğu kompozit $40,99 \pm 0,77$ MPa ile %0,10 CNT katkılı kompozit olmuştur. Referans numuneye göre gelişim %30,72 olurken bu kompoziti %0,20 oranında CNF katkılı kompozit $39,82 \pm 0,19$ MPa ile izlemiştir. CNF katkısının artışıyla beraber referans numuneye oranla gelişim %13,76 ile %26,98 oranında artış göstermiştir. En düşük gelişim %6,58 ile %0,20 CNT katkılı numunede gerçekleşmiştir. %0,20 CNT takviyeli kompozit her ne kadar referans numuneye oranla gelişim göstermiş olsa da %0,10 ile %0,20 arasında kompozitin CNT katkısının doyuma ulaştığı düşünülmektedir.

4.2.5. Burkulma testi sonuçları

En yüksek kritik yükün elde edildiği yedinci dizilime $[C_3JCJ]_s$ selüloz nanofiber ve karbon nanotüp tozları eklenerek üretilen kompozit plakaların kritik burkulma yükleri Şekil 4.9’ da verilmiştir.



Şekil 4. 9. Nanopartikül takviyeli kompozitlerin kritik burkulma yükleri

Şekil 4.9’da hibrit kompozitlerin kritik burkulma yüklerinin referans numuneye oranla değişimi görülmektedir. En büyük kritik yük %31,64 ile %0,10 CNT takviyeli ve %29,48 ile %0,20 CNF takviyeli kompozitten elde edilmiştir. Diğer testlere benzer

şekilde %0,20 CNT takviyeli kompozit %3,95 ile en düşük gelişimi göstermiştir. CNF takviyeli kompozitlerin gelişimi %16 ile %29 arasında değişmektedir. Daha önceki testlere benzer şekilde CNT takviyesi %0,20 oranında gelişim gösterse de bu gelişim sınırlı olmuş ve bu durum %0,10 ile %0,20 arasında bir yerde epoksi matrisin CNT takviyesi için doyuma ulaştığı düşünülmektedir.

Nanopartikül katkıları ile fiber matris arayüz adhezyon kuvvetleri güçlenmiş ve bu sayede hibrit kompozitlerin ILSS ve eğilme mukavemetlerinin yanı sıra burkulma kuvvetlerinde gelişim görülmüştür. Nanopartiküller epoksi matris içerisinde iyi bir dağılım göstermiş, fiber matris arayüzündeki adhezyonu güçlendirmiş, bu sayede delaminasyon ve tabaka kayması zorlaşarak testler esnasında kompozitlerin daha dirençli yapılar oluşturmalarına sebep olmuşlardır. Literatürde CNT ve CNF gibi yapıların çatlak ilerlemesini saptırarak ve köprüleme bağlantıları kurarak epoksi nanokompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirdiğine dair birçok çalışma mevcuttur (Zhang vd., 2023); (Yusuf vd., 2024; Fathi vd., 2024). Ayrıca literatürde, epoksi matrisli kompozitlerin düzlem dışı mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde öne çıkan başlıca mekanizmalar; MWCNT'lerin köprüleme etkisiyle ara yüzey bağlanmasının güçlenmesi ve gerilme transferinin artması (Mirsalehi vd., 2021), kırık yüzeyi analizlerine dayanan çatlak saptırma ve hapsolme mekanizmaları (Mirzapour vd., 2024), nanoparçacıkların düzgün dağılmasıyla serbest hacmin azalması ve zincir hareketliliğinin kısıtlanması (Uthaman vd., 2021), fiber çekip çıkarılmasına karşı direncin artmasıyla birlikte gerilme transferinin iyileşmesi ve mikroyapısal çatlak kontrolü (Mohanty & Srivastava, 2015) ile plastik makaslama, boşluk oluşumu ve fiber köprüleme gibi tokluk mekanizmaları (Carolan vd., 2017) olarak sıralanmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Yapılan çalışmada doğal ve sentetik fiberlerin birlikte kullanıldığı hibrit kompozitlerin tabaka sayısı ve diziliminin etkisini anlamak için bazı testler uygulanmış ve en iyi sonuçların alındığı dizilim ve tabaka sayısına sahip kompozite farklı oranlarda nanopartikül katkıları uygulanarak daha yüksek mukavemete sahip kompozitler elde edilmiştir.

Çekme testlerinde, kompozitlerin düzlem içi mukavemeti esas olarak fiber yönelimine bağlı olduğundan, dizilim farkları belirgin bir etki göstermemiştir, ancak birim şekil değiştirme oranlarında farklılıklar gözlemlenmiştir.

Cam ve jüt fiberlerin birlikte kullanıldığı hibrit kompozitlerde, tabaka dizilimi mekanik performans üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Özellikle $[C_3JCJ]_s$ dizilimi, eğilme ve burkulma testlerinde en yüksek dayanımı göstermiştir.

Jüt fiberlerin ortada, cam fiberlerin ise dış katmanlarda konumlandırılması hem eğilme hem de burkulma dayanımını artırmıştır.

$[C_3JCJ]_s$ dizilimine sahip referans kompozitin matrisi, selüloz nanofiber ve karbon nanotüp ile modifiye edilerek elde edilen numunelerde, özellikle eğilme ve tabakalar arası kayma dayanımlarında belirgin iyileşmeler sağlanmıştır.

Her iki nanoparçacık türü, düşük oranlarda takviye edildiğinde mekanik performansı olumlu yönde etkilerken, daha yüksek oranlarda doyuma ulaşıldığı ve bazı özelliklerde düşüşler başladığı gözlenmiştir.

Nanopartikül katkıları, lif-matris arayüzeyinin mekanik bütünlüğünü güçlendirerek özellikle dış düzleme yönelik yükler altında (eğilme, SBS, burkulma) malzemenin daha yüksek direnç göstermesini sağlamıştır.

5.2 Öneriler

CNF karışım oranı için en yüksek burkulma, eğilme ve tabakalar arası kayma mukavemetinin belirlenebilmesi için %0,20 üzeri CNF toz karışımı ile elde edilecek kompozit malzemelerin test edilmesi önerilmektedir.

Nanopartikül katkılarının uzun dönem dayanım ve çevresel koşullara (nem, sıcaklık, UV vb.) karşı performansını değerlendirmek amacıyla yaşlandırma testleri uygulanmalıdır.

CNF ve CNT katkılı kompozitlerde mikroyapısal değişimleri daha iyi anlayabilmek amacıyla FTIR, Raman, TGA ve DMA gibi ileri karakterizasyon tekniklerinin kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Amico, S. C., Angrizani, C. C., & Drummond, M. L. (2010). Influence of the stacking sequence on the mechanical properties of glass/sisal hybrid composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(2), 179-189.
- Asi, D. (2018). *Polimer matrisli kompozit malzemelerde ilave olarak kullanılan parçacıkların geometrisinin kompozit malzemelerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerine etkisinin araştırılması*. [Doktora tezi]. Uşak Üniversitesi.
- Batı, S. (2022). *Aramid fiber takviyeli kompozitlerde nanopartikül takviyesinin mekanik ve balistik özelliklere etkilerinin deneysel incelenmesi*. [Doktora tezi]. Batman Üniversitesi
- Bati, S., & Celik, Y. H. (2025). Matrix-Modified Aramid Fiber-Reinforced Composites With Enhanced Out-of-Plane Properties for Advanced Structural Applications. *Polymer Composites*.
- Bavan, D. S., & Kumar, G. M. (2010). Potential use of natural fiber composite materials in India. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(24), 3600-3613.
- Bulut, Mahmut. (2014). *Türkiye’de kompozit malzeme üretimi ve kompozit malzeme sektörünün genel değerlendirilmesi*. [Yüksek lisans tezi]. Gazi Üniversitesi.
- Carolan, D., Ivankovic, A., Kinloch, A. J., Sprenger, S., & Taylor, A. C. (2017). Toughened carbon fibre-reinforced polymer composites with nanoparticle-modified epoxy matrices. *Journal of Materials Science*, 52, 1767-1788.
- Chen, C., Li, Y., & Yu, T. (2014). Interlaminar toughening in flax fiber-reinforced composites interleaved with carbon nanotube buckypaper. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(20), 1859-1868.
- Coleman, J. N., Khan, U., Blau, W. J., & Gun’ko, Y. K. (2006). Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube–polymer composites. *Carbon*, 44(9), 1624-1652.
- Czepiel, M., Bańkosz, M., & Sobczak-Kupiec, A. (2023). Advanced injection molding methods. *Materials*, 16(17), 5802.
- Çavdar, S. (2024). *Selüloz nanoelyaf takviyeli abs polimer kompozitlerin mekanik ve ısı özelliklerinin incelenmesi*. [Yüksek lisans tezi]. Selçuk Üniversitesi
- Dai, H. (2002). Carbon nanotubes: Opportunities and challenges. *Surface science*, 500(1-3), 218-241.
- Durgun, İ. (2014). *El yatırma yöntemi ile kompozit parça üretimi*, [Konferans sunumu]7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Ankara, (ss 15-16).

- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H.-P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552-1596.
- Fathi, Z., Abdulkhani, A., Hamzeh, Y., Ashori, A., Shakeri, A., & Lipponen, J. (2024). Innovative upcycling cigarette filters into high-performance cellulose nanofiber-epoxy composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 281, 136561.
- Gedik, Selçuk. (2023). *Cam fiber takviyeli grafen destekli kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. [Yüksek lisans tezi]. Gebze Teknik Üniversitesi.
- Guimarães, J. L., Frollini, E., da Silva, C. G., Wypych, F., & Satyanarayana, K. G. (2009). Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. *Industrial Crops and Products*, 30(3), 407-415.
- Işık, A. (2008). *Kompozit malzemeden imal edilmiş bir takviye elemanının eğilme ve burulma yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelenmesi*. [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- İlhan, R., & Feyzulloğlu, E. (2019). Cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozit malzemelerde kullanılan doğal elyaflar ve dolgu maddeleri. *El-Cezeri*, 6(2), 355-381.
- Jomboh, K. J., Garkida, A. D., Alemaka, E. M., Yakubu, M. K., Alkali, V. C., Eze, W. U., & Lawal, N. (2024). Properties and applications of natural, synthetic and hybrid fiber reinforced polymer composite: A review. *AIMS Materials Science*, 11(4), 774-801.
- Kafy, A., Kim, H. C., Zhai, L., Kim, J. W., Hai, L. V., Kang, T. J., & Kim, J. (2017). Cellulose long fibers fabricated from cellulose nanofibers and its strong and tough characteristics. *Scientific reports*, 7(1), 17683.
- Kalemtaş, A. (2014). Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış. *Putech & Composites*, 22, 18-30.
- Keleş, Ö. (2022). *Doğal fiber takviyeli hibrit kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. [Yüksek lisans tezi]. Batman Üniversitesi.
- Khan, T., Sultan, M. T. H., Shah, A. U. M., Ariffin, A. H., & Jawaid, M. (2021). The Effects of Stacking Sequence on the Tensile and Flexural Properties of Kenaf/Jute Fibre Hybrid Composites. *Journal of Natural Fibers*, 18(3), 452-463.
- Korkmaz, N., Çakmak, E., & Dayık, M. (2016). Dokuma karbon elyaf takviyeli karbon nano tüp-epoksi kompozit malzemelerin mekanik ve termal karakterizasyonu. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(2).
- Köroğlu, A. (2013). *Yeni bir poliüretan elastomer materyalinin mekanik özelliklerinin ve çene yüz protezlerinde kullanılan silikon elastomere adezyonunun değerlendirilmesi*. [Doktora tezi]. Çukurova Üniversitesi.

- Kumar, V. M., Madhu, P., Sharath, B. N., Raharjo, R., & Gapsari, F. (2025). Enhancing Mechanical and Tribological Properties of Hybrid Kenaf–Carbon Fiber Vinyl Ester Composites for Advanced Applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-14.
- Kürümoğlu, H. K. (2024). *Termoform kalıplarının üretim süreçlerinde verimliliğe etki eden faktörler*. [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Üniversitesi.
- Li, Y., Zhang, H., Huang, Z., Bilotti, E., & Peijs, T. (2017). Graphite nanoplatelet modified epoxy resin for carbon fibre reinforced plastics with enhanced properties. *Journal of Nanomaterials*, 2017(1), 5194872.
- Madueke, C. I., Mbah, O. M., & Umunakwe, R. (2023). A review on the limitations of natural fibres and natural fibre composites with emphasis on tensile strength using coir as a case study. *Polymer Bulletin*, 80(4), 3489-3506.
- Mirsalehi, S. A., Youzbashi, A. A., & Sazgar, A. (2021). Enhancement of out-of-plane mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy resin composite by incorporating the multi-walled carbon nanotubes. *SN Applied Sciences*, 3(6), 630.
- Mirzapour, M., Cousin, P., Robert, M., & Benmokrane, B. (2024). Dispersion Characteristics, the Mechanical, Thermal Stability, and Durability Properties of Epoxy Nanocomposites Reinforced with Carbon Nanotubes, Graphene, or Graphene Oxide. *Polymers*, 16(13), 1836.
- Mohammed, M., Jawad, A. J. M., Mohammed, A. M., Oleiwi, J. K., Adam, T., Osman, A. F., Dahham, O. S., Betar, B. O., Gopinath, S. C., & Jaafar, M. (2023). Challenges and advancement in water absorption of natural fiber-reinforced polymer composites. *Polymer Testing*, 124, 108083.
- Mohanavel, V., Suresh Kumar, S., Vairamuthu, J., Ganeshan, P., & NagarajaGanesh, B. (2022). Influence of Stacking Sequence and Fiber Content on the Mechanical Properties of Natural and Synthetic Fibers Reinforced Penta-Layered Hybrid Composites. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 5258-5270.
- Mohanty, A., & Srivastava, V. K. (2015). Effect of alumina nanoparticles on the enhancement of impact and flexural properties of the short glass/carbon fiber reinforced epoxy based composites. *Fibers and Polymers*, 16, 188-195.
- Mostafa, N. H., & Hunain, M. B. (2019). Mechanical performance and vibration characteristics of glass/jute fibre-reinforced polyester hybrid composites. *Int. J. Mech. Mechatron. Eng.*, 19, 40-51.
- Onal, L., & Adanur, S. (2002). Effect of Stacking Sequence on the Mechanical Properties of Glass–Carbon Hybrid Composites before and after Impact. *Journal of Industrial Textiles*, 31(4), 255-271.
- Özbay, B. (2015). *Silindirik termoplastik kompozitlerin elyaf sarma yöntemi ile üretimi ve karakterizasyonu*. [Yüksek lisans tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi.

- Pehlivan, A. (2017). *Elyaf sarma ile üretilen kompozit yapıdaki basınçlı kapların değişik yüklemelerde modellenmesi*. [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Pramanik, T. J., Rafiquzzaman, M., Karmakar, A., Nayeem, M. H., Turjo, S. K. S., & Abid, M. R. (2024). Evaluation of mechanical properties of natural fiber based polymer composite. *BenchCouncil Transactions on Benchmarks, Standards and Evaluations*, 4(3), 100183.
- Raghavendra, G., Ojha, S., Acharya, S. K., & Pal, S. K. (2013). *Mechanical and Tribological Behavior of Alumina Nano Filler Reinforced Epoxy Hybrid Composites*, [Konferans sunumu]. Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2013, New York, NY, USA.
- Ramesh, M., Palanikumar, K., & Reddy, K. H. (2013). Comparative evaluation on properties of hybrid glass fiber-sisal/jute reinforced epoxy composites. *Procedia Engineering*, 51, 745-750.
- Sağır, H. O. (2016). *Jüt ve keten takviyeli karma kompozitlerin mekanik özellikleri*. [Yüksek lisans tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Sanjay, M. R., Arpitha, G. R., Naik, L. L., Gopalakrishna, K., & Yogesha, B. (2016). Applications of Natural Fibers and Its Composites: An Overview. *Natural Resources*, 07(03), 108-114.
- Sanjay, M. R., & Yogesha, B. (2017). Studies on Natural/Glass Fiber Reinforced Polymer Hybrid Composites: An Evolution. *Materials Today: Proceedings*, 4(2, Part A), 2739-2747.
- Santulli, C. (2016). Effect of Stacking Sequence on the Tensile and Flexural Properties of Glass Fibre Epoxy Composites Hybridized with Basalt, Flax or Jute Fibres. *Material Science and Engineering with Advanced Research*, 1(4), 19-25.
- Sathyaseelan, P., Sellamuthu, P., & Palanimuthu, L. (2020). Influence of stacking sequence on mechanical properties of areca-kenaf fiber-reinforced polymer hybrid composite. *Journal of Natural Fibers*, 19, 369-381.
- Selmy, A. I., Elsesi, A. R., Azab, N. A., & El-baky, M. A. A. (2012). Interlaminar shear behavior of unidirectional glass fiber (U)/random glass fiber (R)/epoxy hybrid and non-hybrid composite laminates. *Composites Part B: Engineering*, 43(4), 1714-1719.
- Selver, E., Ucar, N., & Gulmez, T. (2018). Effect of stacking sequence on tensile, flexural and thermomechanical properties of hybrid flax/glass and jute/glass thermoset composites. *Journal of Industrial Textiles*, 48(2), 494-520.
- Shahzad, A., & Nasir, S. U. (2017). Mechanical Properties of Natural Fiber/Synthetic Fiber Reinforced Polymer Hybrid Composites. *Green Biocomposites: Manufacturing and Properties*, 355-396.

- Sönmez, M. (2009). *Polimer matrisli kompozitlerin endüstri ürünleri tasarımında önemi ve geleceği: Türkiye’den dört örnek firma üzerine bir inceleme*. [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Sönmez, S. (2023). *Jüt fiber takviyeli grafen destekli kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. [Yüksek lisans tezi]. Gebze Teknik Üniversitesi.
- Şahin, A. Ş. (2019). *Farklı oranlarda jüt elyaf takviyeli poliolefin kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi*. [Yüksek lisans tezi]. Ege Üniversitesi.
- Şen, H. (2022). *Jüt takviyeli kompozit prepreglerin mekanik özelliklerinin araştırılması*. [Doktora tezi]. Trakya Üniversitesi.
- Taş, O., Hayırkuş, A., Onat, A. & Yazıcı, M. (2023). Termoplastik Matrisli Kompozit Malzemelerde Yorulma Davranışı. İçinde Yazıcı, M., Boztoprak, Y. & Pazarlıoğlu, S. S. (Ed.), *Farklı Mühendislik Yaklaşımlarıyla Kompozit Malzemeler III*. Özgür Yayınları.
- Turla, P., Kumar, S. S., Reddy, P. H., & Shekar, K. C. (2014). Interlaminar Shear Strength Of Carbon Fiber And Glass Fiber Reinforced Epoxy Matrix Hybrid Composite. *International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology*, 2, 1-4.
- Uthaman, A., Lal, H. M., Li, C., Xian, G., & Thomas, S. (2021). Mechanical and water uptake properties of epoxy nanocomposites with surfactant-modified functionalized multiwalled carbon nanotubes. *Nanomaterials*, 11(5), 1234.
- Yalman, M. K., Atar, İ., & Mengeloğlu, F. (2024). Epoksi esaslı kompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine sodyum hidroksit ile modifiye edilmiş farklı güçlendirici malzemelerin etkisi. *Turkish Journal of Forestry*, 25(3), 290-301.
- Yusuf, J., Sapuan, S. M., Rashid, U., Ilyas, R. A., & Hassan, M. R. (2024). Thermal, mechanical, and morphological properties of oil palm cellulose nanofibril reinforced green epoxy nanocomposites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 278, 134421.
- Zhang, J., Zhang, H., & Xu, J. (2023). Study on Mechanical Properties of Carbon Nanotube Reinforced Carbon Fiber/ Epoxy Resin Composites. *Journal of Physics: Conference Series*, 2468(1), 012122.