



**NANOPARTİKÜL KATKILI PREPREG ÜRETİMİ VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Nazlı Hazal KIZILKAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Nazlı Hazal KIZILKAYA

16/04/2025

NANOPARTİKÜL KATKILI PREPREG ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Nazlı Hazal KIZILKAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2025

ÖZET

Havacılık uygulamaları için yüksek performanslı kompozit malzemelerin çoğu önceden hazırlanmış prepregler veya kürlenmemiş ancak reçine ile emdirilmiş karbon elyaf katmanlar şeklinde kullanılmaktadır. Karbon elyaf takviyeli prepreg malzemelerin mekanik özelliklerini artırmak amacıyla günümüzde birçok yenilikçi çalışma yapılmaktadır. Literatür incelendiğinde yapılan çalışmalarda prepreg malzemelerin matris tabakasının güçlendirilmesi amacıyla nanopartikül katkısının etkilerinin araştırıldığı görülmüştür. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında prepreg sarım makinesi kullanılarak epoksi reçine içerisine ağırlıkça %0,5 oranında Grafen (GNP) ve Çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ilave edilen nanopartikül katkılı karbon elyaf takviyeli prepreg ve onun kompozit malzemeleri 2 farklı serim yönünde üretilmiş ve nanopartikül katkısının mekanik özellikler yönünden değişimi, ASTM D3039 standart boyutlarında çekme ve ASTM D790 standartlarında üç nokta eğme testlerinin sonuçlarıyla ortaya konmuştur. Ayrıca üretilen nanopartikül katkılı karbon elyaf takviyeli prepreg kompozit malzemelerin kırılma yüzeylerinden SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) cihazıyla görüntüler alınarak; katkılı reçinenin elyaf içerisinde dağılıma veya topaklanma durumları incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda en yüksek çekme dayanımı %0,5 GNP katkılı UD serim yönlü numunede görülmüş, gerilme değerini katkısız numuneye göre %19,81 oranında artırmıştır. Üç nokta eğme deneyinden elde edilen verilere göre, en yüksek eğilme gerilim değerleri UD serim yönlü numunelerde %0,5 GNP'de ve 0°/90° serim yönlü numunelerde ise %0,5 MWCNT numunelerde olduğu görülmüş ve katkısız numuneye göre eğilme mukavemeti artışı sırasıyla %55,13 ve %15,28 oranında olmuştur. Yakma testi sonrası ağırlık analizinden elde edilen verilere göre grafen takviyesinin daha dengeli elyaf/reçine oranıyla elyafın daha iyi yerleşmesini sağladığı, çok duvarlı karbon nanotüp takviyesinin ise epoksi reçinenin viskozitesini artırarak reçine oranını artırdığı görülmüştür. SEM görüntüleri incelendiğinde GNP ve MWCNT katkılı numunelerin kopma davranışını doğrulayan yüzey morfolojisinin geliştiği görülmüştür.

Bilim Kodu : 91417
Anahtar Kelimeler : Kompozit malzeme, prepreg, karbon elyaf, epoksi, nanopartikül, mekanik özellikler
Sayfa Adedi : 89
Danışman : Prof. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ

NANOPARTICLE DOPED PREPREG PRODUCTION AND INVESTIGATION OF ITS MECHANICAL PROPERTIES

(M. Sc. Thesis)

Nazlı Hazal KIZILKAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2025

ABSTRACT

Most high-performance composite materials for aerospace applications are used as pre-impregnated prepregs or uncured carbon fiber layers impregnated with resin. Many innovative studies are being conducted today to enhance the mechanical properties of carbon fiber reinforced prepreg materials. A review of the literature shows that the effects of nanoparticle additives on strengthening the matrix layer of prepreg materials have been explored. In the conducted study, nanoparticle-doped carbon fiber-reinforced prepreg with 0,5% by weight of graphene (GNP) and multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) added into epoxy resin was produced using a prepreg winding machine. These prepregs were produced in two different lay-up directions, and the change in mechanical properties due to the nanoparticle additives was evaluated through the results of tensile testing (ASTM D3039 standard) and three-point bending tests (ASTM D790 standard). Additionally, fracture surfaces of the nanoparticle-enhanced carbon fiber prepreg composites were examined using Scanning Electron Microscopy (SEM) to analyze the distribution or agglomeration of the additives within the fibers. The experimental results showed that the highest tensile strength was observed in the UD lay-up direction sample with 0,5% GNP, which increased the tensile strength by 19,81% compared to the unreinforced sample. According to the three-point bending test results, the highest bending strength values were found in the UD lay-up direction sample with 0,5% GNP and the 0°/90° lay-up direction sample with 0,5% MWCNT, showing a bending strength increase of 55,13% and 15,28% respectively, compared to the unreinforced sample. Based on the weight analysis results obtained after the burn-off test, it has been observed that graphene reinforcement provides a more balanced fiber/resin ratio and improves fiber placement, while multi-walled carbon nanotube (MWCNT) reinforcement increases the viscosity of the epoxy resin, leading to a higher resin content. SEM images revealed the development of fracture surface morphology that confirmed the failure behavior of the samples with GNP and MWCNT additives.

Science Code : 91417
Key Words : Composite material, prepreg, carbon fiber, epoxy, nanoparticles, mechanical properties
Page Number : 89
Supervisor : Prof. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca bana güvenen, inanan, bilgi ve tecrübesiyle desteklerini esirgemeyen kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ'ye saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Bilimi, teknik bilgisi ve yol göstericiliğiyle çalışmalarına katkı sağlayan kıymetli hocam Prof. Dr. Abdulmecit GÜLDAŞ'a özel saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamda bilimsel araştırma desteği sunan, ferdi olmaktan gurur duyduğum TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. ailesine ve saygı değer yöneticilerime teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, Prof. Dr. Nuray OKTAR ve Prof. Dr. Nursel DİLSİZ'e tezimin deneysel olarak geliştirilmesindeki katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Değerli hocalarımızın sonsuz katkıları ile çalışmam başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanılacak malzemeler için üretim altyapısını sunan CES İleri Kompozit ve Savunma Teknolojileri' ne sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca karakterizasyon çalışmalarının yapıldığı Gazi Üniversitesi Metalurji Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı hocalarıma teşekkür ederim.

Son olarak, çalışma yıllarım boyunca ve bu tezin tamamlanması sırasında en zor anlarımda bana duygusal destek ve sürekli teşvik sağlayan değerli anneme ve aileme derin şükranlarımı sunarım.

Tezimi şehitlerimize ve insanlığa ithaf ediyorum. Teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	9
3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	11
3.1.1. Polimer matrisli kompozitler.....	11
3.1.2. Termoset matrisler.....	12
3.1.3. Termoplastik matrisler	17
3.2. Kürleme Prosesi.....	18
3.3. Kürleme Sistemi	19
3.3.1. Oda sıcaklığında kürleme.....	19
3.3.2. Isı ile kürleme.....	19
3.3.3. Foto kürleme	20
3.4. Kompozit Elyaf Malzemeleri	20
3.4.1. Cam elyaf	20
3.4.2. Aramid (Kevlar) elyaf	21
3.4.3. Karbon elyaf.....	22

	Sayfa
3.4.4. Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen elyaflar (UHMWPE).....	23
3.5. Kompozit Malzemelerde Arayüzey	24
3.5.1. Karbon elyaf ıslatılabilirlik	26
3.6. Prepreg	28
3.6.1. Karbon elyaf takviyeli prepreg.....	30
3.6.2. Prepreg malzemenin avantajları	30
3.6.3. Prepreg üretim yöntemleri.....	32
3.7. Nano-Mühendislik Kompozitler	34
3.8. Nanopartiküller	35
3.8.1. Grafen (GNP)	35
3.8.2. Karbon nanotüp (CNT)	38
3.9. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	41
3.9.1. Elle yatırma yöntemi	41
3.9.2. Filament sarma yöntemi	42
3.9.3. Vakum torbalama yöntemi	43
3.9.4. Vakum infüzyon yöntemi.....	44
3.9.5. Reçine transfer kalıplama yöntemi.....	45
3.9.6. Otoklav	46
4. MATERYAL METOT.....	49
4.1. Kullanılan Malzemeler	49
4.1.1. Karbon elyaf.....	49
4.1.2. Epoksi reçine sistemi.....	49
4.1.3. Grafen nanopartikül (GNP).....	50
4.1.4. Karbon nanotüp (CNT)	50
4.2. Nanopartikül Katkılı Prepreg Üretimi	51
4.2.1. Tambur tipi sarım makinesi.....	51

	Sayfa
4.2.2. Epoksi reçine sisteminin hazırlanması	54
4.2.3. Numunelerin üretimi	56
4.3. Deneysel Numunelerin Hazırlanışı	64
4.4. Çekme Testi	64
4.5. Üç Nokta Eğme Testi	66
4.6. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Analizi	67
4.7. Ağırlık Analizi	68
5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	71
5.1. Çekme Testi Sonuçları	71
5.2. Eğilme Testi Sonuçları	74
5.3. SEM Analizi Sonuçları	75
5.4. Ağırlık Analizi Sonuçları	77
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	79
6.1. Sonuçlar	79
6.2. Öneriler	80
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Epoksi reçinenin tipik özellikleri (23°C)	15
Çizelge 3.2. Epoksi ve polyester malzemenin özellikleri.....	16
Çizelge 3.3. Bazı termosetlerin karşılaştırılması.....	17
Çizelge 3.4. Bazı termoplastik reçinelerin özellikleri	18
Çizelge 3.5. Polimer matrisleri ve özellikleri.....	18
Çizelge 3.6. Cam, Karbon ve Aramid elyafların mekanik özelliklerinin kıyaslanması	23
Çizelge 3.7. Tek yönlü ve örgü prepreglerin karşılaştırılması	29
Çizelge 3.8. Epoksi, Fenolik, Bismaleimid reçinelerin özellikleri.....	29
Çizelge 3.9. Grafenin çeşitli özellikleri.....	38
Çizelge 3.10. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüplerin özellikleri.....	40
Çizelge 3.11. Grafen ve KNT'lerin mekanik, termal ve elektriksel özellikleri	41
Çizelge 4.1. Karbon elyaf özellikleri.....	49
Çizelge 4.2. MGS L160/H160 epoksi reçine sistemi özellikleri.....	50
Çizelge 4.3. Grafen nanopartikülün özellikleri	50
Çizelge 4.4. Çok duvarlı karbon nanotüpün özellikleri.....	51
Çizelge 4.5. Nanopartikül oranları	56
Çizelge 4.6. Çekme testi numune ölçüleri.....	65
Çizelge 4.7. Üç nokta eğme testi numune ölçüleri.....	66
Çizelge 5.1. Çekme deneyi sonuçları	71
Çizelge 5.2. Ağırlık ölçüm sonuçları.....	77
Çizelge 5.3. Yakma (burn-off) testi ile belirlenen oranlar	77

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Kompozit malzeme faz çeşitleri.....	9
Şekil 3.2. Kompozit malzemeler ve çeşitli malzemelerin çekme mukavemeti yönünden karşılaştırılması	10
Şekil 3.3. Epoksit grubu	13
Şekil 3.4. Epoksi reçinenin pazar talebine göre dağılımı	14
Şekil 3.5. Epoksi reçinenin genel formülü ve yapısı.....	14
Şekil 3.6. Yaygın kullanılan reçine sistemleri.....	15
Şekil 3.7. Cam elyaf rulo.....	21
Şekil 3.8. Aramid elyaf rulo	22
Şekil 3.9. Karbon elyaf örnekleri	23
Şekil 3.10. UHMWPE elyaf	24
Şekil 3.11. Elyaf/matris arayüzeyinin ve ara fazın şematik gösterimi	24
Şekil 3.12. Kompozit içindeki ara fazın şematik gösterimi	25
Şekil 3.13. Karbon elyaf yüzey işlemleri	26
Şekil 3.14. Prepreg çeşitleri.....	28
Şekil 3.15. Prepreg kumaşların dokuma stilleri	29
Şekil 3.16. Karbon elyaf kompozit içeriğinin artırılması	30
Şekil 3.17. Prepreg teknolojisinin kompozit üretim yöntemlerindeki yeri	32
Şekil 3.18. Sıcak eriyik emdirme işlemi	33
Şekil 3.19. Çözücü daldırma işlemi	33
Şekil 3.20. Nanopartikül boyutları	35
Şekil 3.21. 2D Grafen görüntüsü.....	36
Şekil 3.22. Nanopartiküller	37
Şekil 3.23. Grafen SEM görüntüsü	37
Şekil 3.24. Grafenin haddeleme yöntemi ile tek duvarlı karbon nanotüp üretimi	39

Şekil	Sayfa
Şekil 3.25. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüp yapısı.....	40
Şekil 3.26. Çok duvarlı karbon nanotüp SEM görüntüsü	40
Şekil 3.27. Elle yatırma yöntemi.....	41
Şekil 3.28. Filament sarma yöntemi.....	42
Şekil 3.29. Vakum torbalama yöntemi.....	43
Şekil 3.30. Vakum infüzyon prosesi	44
Şekil 3.31. Reçine transfer kalıplama yöntemi	45
Şekil 3.32. Otoklav (vakum torbalı) kalıplama prosesi.....	47
Şekil 4.1. Prepreg sarım makinesinin bileşenleri	53
Şekil 4.2. Epoksi reçine sisteminin hazırlanmasının şematik gösterimi	55
Şekil 4.3. Nanopartikül katkılı prepreg üretim şeması.....	56
Şekil 5.1. %0 Katkısız prepreg gerilim-birim uzama diyagramı.....	71
Şekil 5.2. %0,5 GNP katkılı prepreg gerilim-birim uzama diyagramı.....	72
Şekil 5.3. %0,5 MWCNT katkılı prepreg gerilim-birim uzama diyagramı	72
Şekil 5.4. %0,5 GNP katkılı 0°/90° prepreg gerilim-birim uzama diyagramı	73
Şekil 5.5. %0,5 MWCNT katkılı 0°/90° prepreg gerilim-birim uzama diyagramı	73
Şekil 5.6. Üç nokta eğme testi sonuçları	75

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Çift mandrelli sıkıştırma sistemleri.....	53
Resim 4.2. Manuel kontrol sistemleri	53
Resim 4.3. Ayırıcı film sarım mandrelleri	54
Resim 4.4. Kullanılan ultrasonik banyo	55
Resim 4.5. %0,5 Grafen (GNP) ve Çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) katkılı epoksi reçine karışımları	55
Resim 4.6. Kullanılan Hexion MGS marka epoksi ve sertleştirici sisteminin görünümü	57
Resim 4.7. Sarım öncesi makinenin hazırlanması.....	57
Resim 4.8. Reçine ve sertleştiricinin kazan içerisinde karışımı	58
Resim 4.9. Emprenye sonrası karbon elyaf kumaşın mandrellerden geçirilmesi	58
Resim 4.10. Ayırıcı filmlerle sarım işlemi	59
Resim 4.11. Islak karbon elyaf kumaşın sarım mandreline ulaşması	59
Resim 4.12. Rulo prepreg görüntüsü.....	60
Resim 4.13. Prepreg numune serim için kesim işlemleri	60
Resim 4.14. Kesilen UD numunelerin görüntüsü.....	61
Resim 4.15. Serilen UD ve 0°/90° numuneler	61
Resim 4.16. %0;%0,5 GNP ve %0,5 MWCNT içeren prepregler	63
Resim 4.17. Hazırlanmış deney numunelerinin görüntüleri.....	64
Resim 4.18. Çekme deneyi cihazı ve kırılma yüzeyi	66
Resim 4.19. Üç nokta eğme deneyi cihazı	67
Resim 4.20. SEM cihazı.....	68
Resim 4.21. Kül fırınında yakma işlemi	69
Resim 5.1. Au-Pd kaplama cihazı	75
Resim 5.2. %0,5 GNP numunesine ait kırılma bölgesi SEM görüntüsü.....	76
Resim 5.3. %0,5 MWCNT numunesine ait kırılma bölgesi SEM görüntüsü	76

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A	Alan (mm ²)
b	Kiriş genişliği (mm)
d	Kirişin yüksekliği (mm)
E	Elastisite Modülü (GPa)
ε	Çekme Gerinimi
F	Kuvvet (N)
G_{IC}	Kırılma Tokluğu Enerjisi
L	İki destek arası mesafe (mm)
P	Sehim Noktası Kuvveti (N)
S	Elektrik iletkenliği (Siemens)
T_g	Camsı geçiş sıcaklığı (°C)
ρ	Yoğunluk
σ	Çekme Gerilmesi (MPa)

Kısaltmalar

Açıklamalar

ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
CFRP	Karbon elyaf takviyeli polimer
CNT	Karbon nanotüp
COOH	Karboksil grup
DWCNT	Çift duvarlı karbon nanotüp
fRGO	Amin işlevli grafen oksit
FTIR	Fourier dönüşümlü kızılötesi Spektroskopisi
GNP	Grafen nanopartikül
GO	Grafen oksit
GOH	Grafen oksit hummers yöntemi

Kısaltmalar**Açıklamalar****GOL**

Grafen oksit laachachi yöntemi

ILSS

İnterlaminer kayma dayanımı

MWCNT

Çok duvarlı karbon nanotüp

rGO

İndirgenmiş grafen oksit

SEM

Taramalı elektron mikroskobu

SiC

Silisyum karbür

SWCNT

Tek duvarlı karbon nanotüp

TEM

Geçirimli elektron mikroskobu

TMWCNT

İnce karbon nanotüp

UD

Tek yönlü

XPS

X-ışını fotoelektron spektroskopisi

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojilerinde ihtiyaca yönelik yapılan çalışmalar ile bulunan ileri ve yenilikçi malzemelerin geliştirilme süreci devam etmektedir. Artan talep ve istenen özelliklerin sağlanması için başta uzay ve havacılık sektörü olmak üzere otomotiv, denizcilik, müzik ve spor uygulamalarında kompozit malzemeler öne çıkmaktadır.

Kompozit malzeme, iki veya daha fazla malzemenin makroskobik düzeyde belirli bir düzen içinde bir araya getirilerek farklı ve çekici özelliklere sahip yeni bir malzeme oluşturulması anlamına gelmektedir. Tüm malzemeler arasında kompozit malzemeler, yaygın olarak kullanılan çelik ve alüminyumun yerini alma potansiyeline ve çoğu zaman daha iyi performansa sahiptir. Çelik bileşenlerin kompozit bileşenlerle değiştirilmesi bileşen ağırlığında %60 ile 80, alüminyum parçaların değiştirilmesi ise %20 ile 50 ağırlık tasarrufu sağlayabilmektedir. Günümüzde kompozitlerin birçok mühendislik uygulaması için tercih edilen malzemeler olduğu görülmektedir [1].

Kompozit bir malzeme aynı anda hafifliğin, yüksek dayanımın, kolay üretim veya kolay işlenebilirliğin sağlanması istenmektedir. Bu noktada kompozit malzemeler arasında en yaygın olarak karbon elyaf takviyeli kompozitler karşımıza çıkmaktadır. Karbon elyaf takviyeli gelişmiş kompozit malzemeler havacılıkta yüksek performans amacıyla yaygınlaşmıştır. Havacılık uygulamaları için yüksek performanslı kompozit malzemelerin çoğu önceden hazırlanmış prepregler veya kürlenmemiş ancak reçine ile emdirilmiş karbon elyaf katmanlar kullanılır. Dayanımları, sertlikleri ve hem kimyasallara hem de aşırı sıcaklıklara karşı dirençleriyle bilinirler. Bu avantajlarının yanında yüksek maliyet, üretimde kalite standardizasyonu, mekanik özelliklerin üretilen her kompozit malzeme her zaman ideal olmaması gibi dezavantajları da mevcuttur. Bu gibi dezavantajların minimize edilebilmesi için karbon elyaf takviyeli prepregler için mekanik özellik iyileştirme çözümleri geliştirilmiştir.

Karbon elyaf takviyeli prepreg malzemelerin mekanik özelliklerini artırmak amacıyla günümüzde birçok yenilikçi çalışma yapılmaktadır. Literatür incelendiğinde yapılan çalışmalarda prepreg malzemelerin matris tabakasının güçlendirilmesi amacıyla nanopartikül katkısının etkileri araştırılmıştır.

Bu tez kapsamında prepreg sarım makinesi kullanılarak epoksi reçine içerisine ağırlıkça %0,5 oranında Grafen (GNP) ve çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ilave edilen nanopartikül katkılı karbon elyaf takviyeli prepreg ve onun kompozit malzemeleri 2 farklı serim yönünde üretilmiş ve nanopartikül katkısının mekanik özellikler yönünden değişimi, ASTM D3039 standart boyutlarında çekme ve ASTM D790 standartlarında üç nokta eğme testlerinin sonuçlarıyla ortaya konmuştur. ASTM D3171 standardına uygun olarak kül fırınında yakma (burn-off) testine tabi tutularak elyaf/reçine ağırlık ve hacim oranları belirlenmiştir. Ayrıca üretilen nanopartikül katkılı karbon elyaf takviyeli prepreg kompozit malzemelerin kırılma yüzeylerinden SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) cihazıyla görüntüler alınarak katkılı reçinenin elyaf içerisinde dağılma veya topaklanma durumları incelenmiş ve yorumlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde yapılan çalışmalar araştırıldığında karbon elyaf takviyeli prepreg kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin optimizasyonu için teorik ve deneysel olarak nanopartikül katkısı ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu bağlamda literatürde gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Zhang vd. (2013), yaptıkları çalışmada karbon elyaf takviyeli epoksi kompozite ağırlıkça %1 oranında çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) katkısının kompozitin çekme özellikleri, interlaminer kesme mukavemeti (ILSS) ve mikroyapısına olan etkisini araştırmışlardır. Numuneler prepreg üretim metodu ile üretilmiştir. Yapılan çekme ve üç nokta eğme testlerinin sonucunda karbon nanotüp katkısının çekme dayanımını ve kayma gerilmesini iyileştirdiği, elyaf-matris arayüzeyinde iyileşmelerin olduğu ortaya konmuştur [2].

Herceg vd. (2016), yaptıkları çalışmada hacimce %5,9;13,6 oranlarında çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT) karbon elyaf takviyeli termoset kompozitlerin hem elektriksel hem de mekanik özelliklerindeki değişime olan etkisini incelemiştir. Numuneler prepreg üretim metodu ile üretilerek laminat sürecine alınmıştır. Gerçekleştirilen mekanik ve elektrik iletkenliği testlerinin sonucunda plakalar arası kırılma tokluğunun %152, iletkenliğin ise %24 oranında arttığı ortaya konmuştur. Ayrıca SEM görüntüleri doğrultusunda nanopartikülün matrise en iyi şekilde dağılabilmesinin prepreg üretim metodundan kaynaklandığı bu sayede kompozitin mikroyapısının geliştirilebildiği sonucuna varılmıştır [3].

Santos vd. (2019), yaptıkları çalışmada karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlere fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) katkısının reçineye olan etkisini araştırmışlardır. Numuneler nanopartikülün reçine içerisinde başarılı şekilde emprenye edilebilmesi için prepreg üretim metodu ile üretilmiştir. Yapılan mekanik testler sonucunda, çok duvarlı karbon nanotüp katkı oranı arttıkça çekme dayanımının sistematik olarak azaldığı öte yandan en düşük karbon nanotüp katkı oranında kırılma tokluğunun %44 oranında iyileşme gösterdiği ortaya konmuştur [4].

Godara vd. (2009), yaptıkları çalışmada tambur sarım tekniği ile üretilen karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlere üç farklı türdeki karbon nanotüp katkısının kırılma tokluğuna olan etkisini araştırmışlardır. %0,5 oranında çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT), ince karbon nanotüp (TMWCNT) ve çift duvarlı CNT (DWCNT) amin grubuyla işlevselleştirilmiş karbon nanotüp kullanılmıştır. Karbon nanotüplerin eklenmesi, TMWCNT (ince karbon nanotüp) ve DWCNT (çift duvarlı karbon nanotüp) sistemlerinde termal genleşme katsayısında belirgin bir azalma göstermiştir. MWCNT-epoksi sistemi, bir uyumlaştırıcı ile modifiye edildiğinde önemli bir etki gözlenmiştir. Bu modifikasyon, karbon elyaf-epoksi sistemine kıyasla ILSS (İnterlaminer Kayma Dayanımı) değerlerinin eski haline dönmesini sağlamış ve interlaminer kırılma tokluğu enerjisi (G_{IC}) %75'lik bir artışa yol açmıştır [5].

Wen vd. (2023), yaptıkları çalışmada karbon elyaf takviyeli kompozitlerde nanopartikül katkısının arayüzey bağlanma mukavemetine olan etkisini araştırmışlardır. Çalışmada %0,5 oranında çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ve grafen oksit (GO) ile %0,25 oranlarında karışımları kullanılmıştır. Numuneler sarım metoduyla üretilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, sadece ağırlıkça %0,5 çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) kullanıldığında, çatlakların yayılma sırasında MWCNT'ler tarafından engellendiğini ve çatlak sapmasına neden olduğunu göstermiştir. %0,5 grafen oksit ilavesinin etkisi çok duvarlı karbon nanotüpe göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. %0,25 oranlarında karışımlarında ise çok duvarlı karbon nanotüplerin boru şeklindeki yapısının grafen oksitin istiflenmesini engelleyerek daha iyi dağılım sağlanmasını mümkün kılarak sinerjik bir güçlendirme etkisiyle daha iyi sonuç verdiği ortaya çıkmıştır [6].

Acar vd. (2020), yaptıkları çalışmada karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde grafen oksit türünün değişime olan katkısını araştırmışlardır. Modifiye edilmiş epoksi sistemleri, modifiye Hummers yöntemi (GOH) ve Laachachi yöntemi (GOL) ile hazırlanan iki farklı grafen oksit nanopartikülü eklenerek hazırlanmıştır. Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitler prepreg üretim tekniği kullanılarak üretilmiştir. Gerçekleştirilen mekanik testler sonucunda GOH ilavesinin çekme ve eğilme mukavemeti değerlerini sırasıyla %41 ve %33 oranında iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Epoksi/karbon elyafın interlaminer kesme mukavemeti (ILSS) değerleri GOH ilavesiyle %58'e kadar önemli ölçüde artmıştır [7].

Uz (2021) yaptığı doktora çalışmasında; epoksi reçineye yüzeylerinin karboksil grup (-COOH) ile oksitlenerek işlevselleştirilen tek duvarlı karbon nanotüpün ağırlıkça %0,05; %0,1 ve %0,2 oranında ilave edilerek fonksiyonelleşmiş bir karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit üretimi yapılmış, mekanik ve termomekanik özellikler araştırılmıştır. Numuneler laboratuvar ölçekli prepreg üretim tekniği ile üretilmiştir. Yapılan mekanik ve termomekanik testler sonucunda (Çekme, FTIR ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) %0,05 oranında eklenen fonksiyonelleşmiş karbon nanotüp ilavesinin optimum özellikleri sağladığı ortaya konmuştur [8].

Siddiqui vd. (2011), yaptıkları çalışmada karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerde epoksi reçineye ağırlıkça %0; %0,5; %0,7 ve %1 oranlarında karbon nanotüp ilavesinin kütleme davranışlarının üzerine olan etkisini araştırmışlardır. Numuneler prepreg üretim tekniği ile üretilmiştir. Reolojik testler sonucunda ağırlıkça %0,5 ve %1 oranında CNT içeren prepreglerin kürlenme derecesi, CNT içermeyen veya daha düşük CNT içerenlere göre daha düşük olduğu ortaya çıkmıştır [9].

Rafiee vd. (2009) tarafından yapılan bir çalışmada ağırlıkça %0,1 oranında grafen, tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüp katkılı epoksi nanokompozitlerin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimi araştırmışlardır. Mekanik testlerin sonucunda grafen katkılı nanokompozitlerin Young modülü açısından tek duvarlı karbon nanotüpe göre %3 daha iyi sonuç verdiği, mod I kırılma tokluğu açısından da çok duvarlı karbon nanotüplere göre %20 daha iyi sonuç verdiği ortaya konmuştur. Yapılan bu çalışma ile grafenin mekanik özelliklerin iyileştirilmesi açısından karbon nanotüplere göre üstünlüğü açığa çıkmıştır [10].

Zafeiropoulou vd. (2020) yaptıkları çalışmada ağırlıkça karbon elyaf epoksi kompozite %0,5 oranında özgül yüzey alanları farklı olan C300 ve C500 tipi grafen nanopartiküllerin takviyesinin kompozitin kırılma özelliklerindeki değişime olan etkisini araştırmışlardır. Numuneler prepreg üretim tekniği ile üretilmiştir. Kompozitlerin sırasıyla G_{IC} ve G_{IIC} interlaminer kırılma tokluklarını belirlemek için Mod I ve II interlaminer kırılma testleri gerçekleştirilmiştir. C500 GNP'lerin sertleştirme etkisi en güçlüsü olurken ve modifiye edilmemiş kompozitlere kıyasla G_{IC} 'de %25 ve G_{IIC} 'de %33 artış olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca elektron taramalı mikroskobu (SEM) görüntüleri ile C300 tip grafenin reçine içerisinde homojen dağılamaması sebebiyle kırılma özelliklerini etkilemediği görülmüştür [11].

Bakış vd. (2021), yaptıkları çalışmada tek yönlü karbon elyaf epoksi kompozite ağırlıkça %0,5'e kadar plazma ile işlenmiş çok duvarlı karbon nanotüp ilavesinin kırılma tokluğuna olan etkisini araştırmışlardır. Karbon elyaf epoksi kompozitler laboratuvar ölçekli prepreg tekniği kullanılarak üretilmiştir. X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ve geçirimli elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak yapılan deneylerin sonuçlarına göre düşük oranda karbon nanotüp ilavesinin bile saf epoksiye nazaran kırılma tokluğunda iyileşme gösterdiği görülmüştür. Karbon nanotüpün plazma ile işlenmesinin aglomerasyonu (primer" partiküllerin birbirine bağlanması ya da yapıştırılması yoluyla boyutun büyütülmesi işlemini) engellediği ortaya konulmuştur [12].

Ackermann vd. (2023), yaptıkları çalışmada tek yönlü karbon elyaf epoksi kompozite ağırlıkça %1,5 oranında indirgenmiş grafen oksit (rGO) ve amin işlevli grafen oksit ilavesinin (frGO) Young modülü, camsı geçiş sıcaklığı, depolama modülü, özgül ısı kapasitesi, oda sıcaklığında termal iletkenlik ve düzlem içi elektrik iletkenliğine olan etkisini araştırmışlardır. Numuneler prepreg tekniği kullanılarak üretilmiştir. Saf karbon elyaf takviyeli kompozit ile karşılaştırıldığında, çekme mukavemetinin %13 azaldığı, kesme mukavemeti ve enine elektrik iletkenliği rGO için %12'ye ve frGO için %52'ye kadar arttığı sonucu ortaya çıkmıştır. Ayrıca katmanlar arası kaliteye bakıldığında saf karbon elyaf takviyeli kompozite göre daha yüksek boşluklu yapılar oluştuğu da gözlemlenmiştir [13].

Shishevan vd. (2015), yaptıkları bir çalışmada karbon elyaf takviyeli epoksi kompozite ağırlıkça %0,1 ve %0,5 oranlarında karbon nanotüp ve grafen ilavesinin kompozitlerin elyaf-matris arayüzey davranışına ve kompozit tokluğuna olan etkisini araştırmışlardır. Numunelerin üretiminde vakum torbalama yöntemi kullanılmıştır. Yapılan çekme deneyleri sonucunda %0,5 karbon nanotüp ilavesinin elastisite modülünü %85,9 oranında arttırırken çekme mukavemetini de %32,50 oranında arttırdığı ortaya konmuştur. Epoksi reçineye %0,5 grafen ilavesinin ise kompozit malzemenin çekme mukavemetini %26,58 oranında arttırdığı tespit edilmiştir [14].

Korkmaz vd. (2016), yaptıkları çalışmada karbon elyaf epoksi kompozit plakalara katkısız ve ağırlıkça %0,3 oranında çok duvarlı karbon nanotüp ilavesinin mekanik ve termal karakterizasyona olan etkisini araştırmışlardır. Numuneler elle yatırma metoduyla üretilmiştir. Üretilen numunelere ASTM D3171 standartında yakma deneyi uygulanmıştır. Yakma deneyinin sonucunda ilave edilen karbon nanotüp oranı arttıkça elyaf hacim oranının

azaldığı ve boşluk hacim oranının buna nazaran arttığı görülmüştür. Mekanik karakterizasyon testleri sonucunda hem elyafa dik yönde hem de elyaf yönünde gerçekleştirilen çekme test sonuçları; karbon nano tüp ile matris modifikasyonun kompozit performans özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Termal analizler sonucunda Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin termal kararlılıklarının iyileştiği elde edilmiştir [15].

Berkay vd. (2020), yaptıkları çalışmada karbon elyaf takviyeli epoksi prepreg kompozitlerin elektriksel özelliklerinin reçine içerisine ağırlıkça %0,5; %1; %2; %4; %7; %10 ve %15 oranlarında karbon nanotüp ve grafen oksit ilavesinin iyileşmesine olan etkisini araştırmışlardır. Numuneler prepreg tekniği kullanılarak üretilmiştir. Kompozitlerin elektrik iletkenliğindeki değişim elyaf yönü, enine yön ve kalınlık boyunca yön şeklinde incelenmiştir. Sonuçlar, saf kompozitle karşılaştırıldığında liflerin enine ve kalınlık yönlerindeki iletkenlik değerlerinde sırasıyla 5,8 (ağırlıkça %15 için), 217 (ağırlıkça %0,5 için) ve 34 (ağırlıkça %0,5 için) kata kadar artış olduğunu ortaya koymuştur. Ek olarak, kısa kiriş kesme testleri yapılarak kompozitlerin interlaminer kesme mukavemeti (ILSS) belirlenerek mekanik özellik araştırması gerçekleştirilmiştir. Karbon nanotüp ilavesiyle ILSS değerinde (ağırlıkça %0,5 için) yaklaşık %87 artış elde edildiği ortaya konmuştur [16].

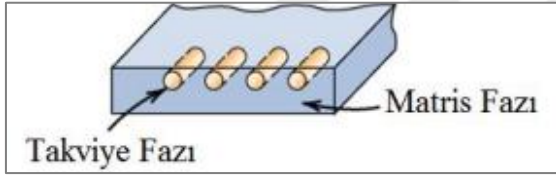
Literatürde karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli prepreg malzemeler ve onun kompozitlerinin mekanik özelliklerini artırmak amacıyla yapılan çok sayıda çalışmada çeşitli nanopartikül türlerinin ağırlıkça değişen oranlarının kompozit malzemeye olan etkisi araştırılmıştır. Gerçekleştirilen tez çalışmasında, karbon elyaf takviyeli prepreg kompozit malzeme üretimi, prepreg sarım makinesi kullanılarak literatürde kullanılan karbon elyaf iplikler yerine karbon elyaf kumaşların nanopartikül katkılı reçine ile emprenye edilmesiyle yapılmıştır. Bu yöntem ile karbon elyaf/reçine ıslatılabilme oranının artırılması sağlanarak, ara yüzey bağ kuvvetinin artması ve üretilen kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin iyileşmesi hedeflenmiştir.



3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler; iki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemeyle toplamak amacıyla, makro-düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılırlar [17].

Kompozit malzemeler Şekil 3.1’de verildiği gibi ana bileşen olarak matris ve takviye elemanının yanı sıra ara yüzey fazından da oluşan çok fazlı malzemelerdir. Malzemeye destekleme yapan takviye elemanı, takviyenin yapıldığı malzeme ise matristir. Matrisler polimer, metal, seramik ve karbon matrisli kompozitler ile ana bileşendir. Takviye elemanı ise fiber, partikül veya tabakalı kompozitlerdir. Takviye elemanının temel fonksiyonu, gelen yükü taşımak ve matrisin rijitlik ve dayanımını arttırmaktır. Matrisin fonksiyonu ise elyaflara yük ve gerilim transferi sağlayabilmek için elyaf-matrisi bir arada tutarak dış ve çevresel etkenlere karşı korumaktır [17].



Şekil 3.1. Kompozit malzeme faz çeşitleri [18]

Kompozit malzemeler sayesinde bir malzeme ile oluşturulamayan üstün özellikler birkaç malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Kompozit malzemeler birçok avantaj ve dezavantaja sahiptir. En önemli özellikleri Şekil 3.2’de gösterildiği gibi diğer malzemelere göre yüksek dayanıma sahip olmalarıdır.

Avantajları olarak;

- Yüksek dayanım
- Yüksek rijitlik
- Yüksek yorulma dayanımı
- Mükemmel aşınma direnci
- Yüksek sıcaklık kapasitesi
- İyi korozyon direnci

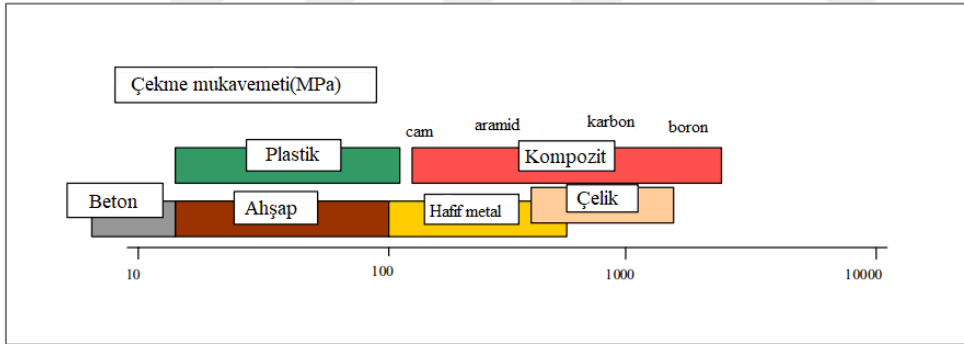
- Hafiflik
- Termal iletkenlik
- Estetik görünüm,

sıralanabilir.

Dezavantajları olarak ise;

- Üretim güçlüğü ve standardizasyonunun sağlanamaması
- Pahalı maliyetler
- İşlenmede güçlük
- Geri dönüşümde zorluk olarak sıralanabilir [17].

Kompozitler matris malzemesine göre incelendiğinde polimer, metal ve seramikler olmak üzere üç farklı gruba ayrılırlar. Bu tez çalışmasında sadece polimer esaslı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri incelenmiştir.



Şekil 3.2. Kompozit malzemeler ve çeşitli malzemelerin çekme mukavemeti yönünden karşılaştırılması [19]

Polimer esaslı kompozit malzemelerde fiberler takviye fazı olarak görev yapmaktadır. Termoset veya termoplastik reçineler ise polimer esaslı kompozit malzemelerde matris görevi yapmaktadır. Kompozit malzemenin içerisindeki fiberler ve reçine bir ara yüzey bağlanması ile birbirlerine bağlanırlar. Kullanılacak kompozit malzemenin istenen mekanik özellikleri, çevre şartlarına dayanıklılık, görünüm, maliyet ve bunun gibi özellikler ile çok çeşitli olabilmekte ve hemen hemen her şartı karşılayabilecek uygun bir takviye matris çifti oluşturulabilmektedir [20]. Polimer esaslı kompozit malzemeler düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet değerleri sayesinde günümüz sanayisinde tercih edilmektedir. Sanayi alanındaki

kullanımında maddi kazanç sağlamasının yanında; titreşim, yorulma ve ısı dayanımı gibi özellikleri de bu malzemelerin tercih edilmesine sebep olmuştur [21].

3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler kendisini oluşturan iki ana bileşen; matris ve takviye elemanına göre sınıflandırılırlar.

3.1.1. Polimer matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozitler mekanik, termal veya diğer özellikleri geliştirmek için bir polimer reçine matrisinin fiberler veya parçacıklarla güçlendirildiği bir kompozit malzeme türüdür. Polimer matrisli kompozitler diğer malzemelere oranla daha düşük maliyetin yanında yüksek mukavemet sağlamaları ve kolayca işlenebilmeleri nedeniyle yaygın kullanım alanına sahip malzemelerdir.

Polimer matrisli kompozitlerde matris malzemesi genellikle termoset veya termoplastik bir reçinedir. Epoksi, polyester ve vinil ester gibi termoset reçineler, sert bir yapı oluşturmak için geri dönüşü olmayan kurlenme reaksiyonlarına girer. Polietilen, polipropilen ve polikarbonat gibi termoplastik reçineler ısıtıldığında yumuşar ve şekillendirilebilir. Takviye olarak ise karbon, cam, boron, aramid, kevlar gibi sürekli lifler kullanılır. Takviye malzemesi olarak kullanılan liflerin miktarı arttıkça da kompozitin mukavemeti artmaktadır.

Polimer matrisli kompozitler yüksek mukavemet gösterirler ancak sadece düşük çalışma sıcaklıklarında kullanılabilirler [22]. Polimer matrisli kompozitlerin en önemli özelliklerinin özgül mukavemetinin yüksek olmasının yanında; yüksek çekme ve basma dayanımı, yüksek elastisite modülü ve yüksek tokluk gibi özelliklere de sahip olmaktadır [23].

Polimer matrisli kompozitler en hafif kompozit malzemelerden biridir. Bu malzemeler, askeri savaş uçakları, küçük ve büyük sivil nakliye uçakları ve helikopterler için mevcut gelişmelerde büyük ölçekte kullanılmıştır. Belirtilen makinelerin güncel geliştirmelerinde bu bileşiklerin yaygın kullanımı, bu tür kompozit malzemelerin potansiyelini kullanmanın parlak bir örneğidir [22].

3.1.2. Termoset matrisler

Termoset reçineler kompozit malzeme üretiminde kullanılan en yaygın matris malzemesidir. Bu plastikler normalde sıvı haldedirler. Kimyasal tepkimelerle ve ısıtılmayla sertleşirler. Böylece sağlam bir yapı ortaya koyarlar. Termoset polimerler için, termoplastiklerin aksine polimerizasyon süreci geri dönüşümsüz bir işlemdir. Sertleştikten sonra yüksek sıcaklıkta bile yumuşama göstermezler. Bu durumdan dolayı çoğu termoset matrisleri sertleşmesin diye dondurularak depolanır. Termoset reçineler kimyasal etkilere karşı çözünmez ve değişik hava koşullarında bile uzun ömürlü olabilirler [17].

Termosetler, termoplastiklere göre yüksek dayanım, yüksek modüllü, yüksek rijitliğe sahiptir. Termosetler tekrar işlenemez, kür süresi ve raf ömrü uzundur [24]. Termoset malzemelerin termoplastik malzemeler ile kıyaslandığında ortaya çıkan avantajları aşağıda verilmiştir.

- Sertliği ve rijitliği yüksek,
- Viskozitesi daha düşük,
- Kimyasal çözücülere karşı dirençli,
- Daha iyi mekanik özellik sağlar,
- Yüksek kullanım sıcaklığına sahiptir,
- Mükemmel estetik görünüşü vardır,
- Yüksek ölçü kararlılığı gösterir [20]

Termoset malzemelerin dezavantajları olarak ise;

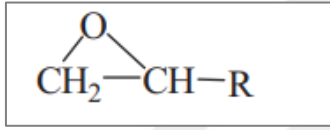
- Geri dönüşüm zorluğu,
- Nispeten düşük rijitlik,
- İnsan sağlığına zararlı etkileri olarak sıralanabilir.

En yaygın kullanılan termoset malzemeler epoksi, polyester ve fenolik reçinelerdir.

Epoksi reçine

Epoksi reçineler, üç boyutlu (3D) bir polimer ağı oluşturmak için moleküller arası ve içi çapraz bağlanabilen özel bir organik makromolekül sınıfıdır ve bu nedenle en çok yönlü termoset polimer türüdür. "Epoksi" terimi ilk kez 1934 yılında rapor edilmiş olsa da ilk epoksi reçine (bisfenol A bazlı) 1943 yılında geliştirilmiş ve ticari kullanım için Ciba Ltd. tarafından lisanslanmıştır. O zamandan beri, bir dizi kürlenme maddesi ile kürlenebilen (çapraz bağlanan) bir dizi epoksi reçine geliştirilmiştir [25].

Epoksi reçineler düşük molekül ağırlıklı, birden fazla epoksit grubu içeren polimerler olarak tanımlanırlar [Şekil 3.3]. Yapısında, tepkimeye girebilecek iki veya daha fazla epoksi grubu içeren reçine grubuna epoksi reçineleri adı verilir. Üç atomlu halkalı yapı olan eter grubu ve yaygın olarak epoksi grubu olarak da anılan kimyasal yapıya "oksiran" adı verilmektedir [26].

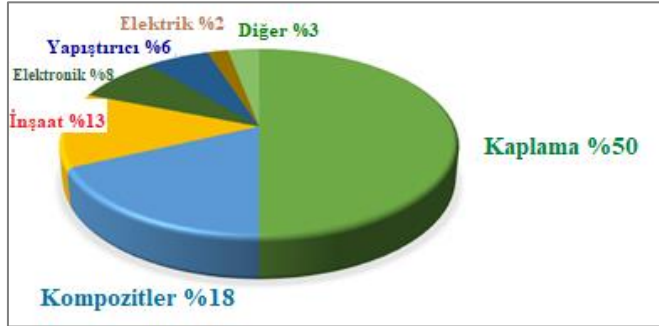


Şekil 3.3. Epoksit grubu

Epoksi reçineler kompozit malzeme üretiminde en çok tercih edilen reçinelerdendir. Epoksi reçineler yüksek dayanım, yüksek sertlik, iyi ısı ve kimyasal dirençleri nedeniyle havacılık yapılarında, yüksek performans istenen bölgelerde tercih edilirler.

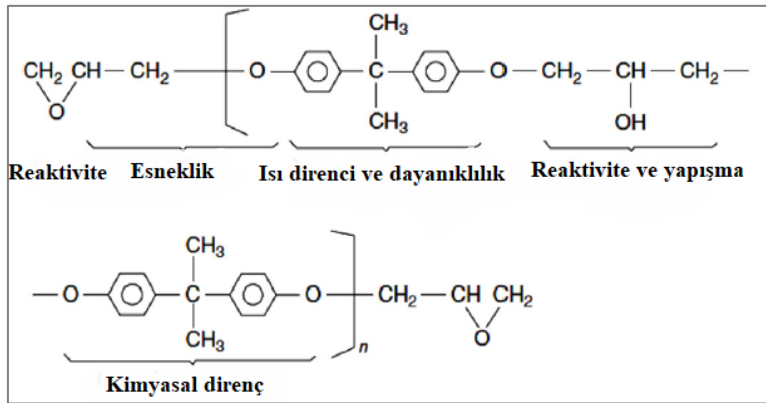
Epoksi reçine, maliyet etkinliği, yüksek ağırlık-mukavemet oranı, geniş bir sıcaklık aralığında dayanıklılığı, korozyona karşı direnci ve minimum büzülme ile mükemmel termal stabilitesi nedeniyle yaygın olarak kullanılan ve değerli bir termoset polimer olarak öne çıkmaktadır [27]. Yapıştırıcı, kaplama, laminasyon, kapsülleme, elektronik/elektrik yalıtımı ve kompozit uygulamalar gibi birçok alanda yüksek performanslı bir malzeme olarak kullanılan epoksi reçineler, mükemmel mekanik özellikleri, düşük maliyeti, kolay işlenmesi, birçok alt tabakaya yapışması, düşük çekme oranı, yüksek elektrik yalıtımı, iyi fizikokimyasal, dielektrik ve yaşlanma özellikleri ile iyi kimyasal dayanım gibi özellikleri sayesinde, geniş bir uygulama alanına sahip termoset matrisler olarak kullanılmaktadır. Çapraz bağlı ağ yapılarından dolayı düşük nem emme, yüksek modül ve yüksek sıcaklık

performansları özelliklerine sahip olan epoksi reçineler, istenmeyen bir kırılma özelliği göstermektedirler [28].



Şekil 3.4. Epoksi reçinenin pazar talebine göre dağılımı [25]

Epoksi reçineler çeşitli fiberleri bir arada tutmak için kullanılırken; karbon nanotüp, grafen gibi takviye elemanlarıyla matris fazı olarak da kullanılabilir. Viskozitesi diğer reçinelere göre yüksek olmasından dolayı takviye malzeme üzerine homojen yayılabilmesi önemlidir. Çok çeşitli yüzeylere iyi yapışma özelliğine sahiptir, büzülmesi düşüktür ve kimyevi maddelerden az etkilenir. Ayrıca nem, ısı ve çarpmalara karşı mukavimdir. Bütün bunların yanında çok esnek bir malzemedir [29]. Şekil 3.5'te epoksi reçinenin genel formülü ve yapısı verilmiştir.

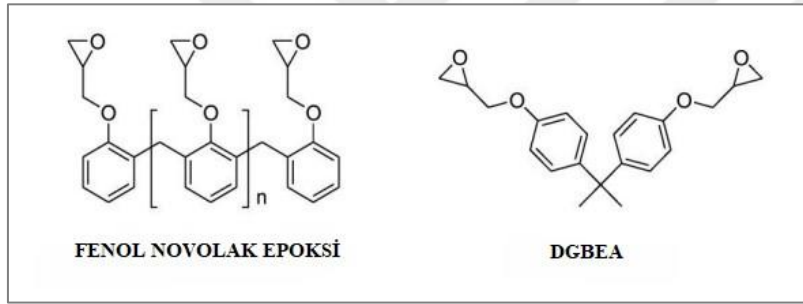


Şekil 3.5. Epoksi reçinenin genel formülü ve yapısı [30]

Epoksi reçineler sertleştirici ile karıştırıldıklarında düzgün bir şekilde sertleşmek için gereken kimyasal reaksiyona girebilirler. Sertleştirici olmadan uygulanırsa, reçine süresiz olarak neredeyse sıvı halde kalır ve dayanıklı bir sisteme dönüşemez. Yüksek mekanik özellik sağlayabilmesi için post kür işlemi uygulanmakta ve bu sayede yüksek sıcaklıklara dayanıklı hale gelmektedir.

Bununla birlikte, yüksek çapraz bağlı epoksi matrisler, plastik deformasyon kısıtlı olduğu için genellikle istenmeyen şekilde kırılğan davranır. Ayrıca, lokal stres konsantrasyonları reçine yüzeyinde çatlak oluşumunu başlatabilmektedir [31]. Epoksinin yüksek çapraz bağlanma yoğunluğundan kaynaklanan kırılğanlık, iyileştirme gerektiren önemli bir sınırlama olmaya devam etmektedir [27]. Çizelge 3.1’de epoksi reçinenin tipik özellikleri verilmiştir.

Havacılık ve savunma sanayi uygulamaları için kullanılan temel epoksi reçineleri bisfenol A'nın (DGEBA) iki işlevli diglisidilesteri ve novolak epoksi (PN-Epoksi) epoksi reçineleridir. Bu reçine sistemleri, genellikle farklı sertleştiriciler, hızlandırıcılar ve FR katkıları kullanılarak katkılanılmaktadır [29]. Şekil 3.6’da yaygın kullanılan Fenol novolak ve DGEBA epoksi reçineleri gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Yaygın kullanılan reçine sistemleri [29]

Çizelge 3.1. Epoksi reçinenin tipik özellikleri (23°C) [32]

Yoğunluk (g/cm ³)	1,2-1,3
Çekme dayanımı (MPa)	55-130
Çekme modülü (GPa)	2,75-4,10
Poisson oranı	0,2-0,33
Termal genleşme katsayısı (10 ⁻⁶ m/m°C)	50-80
Kürleşme büzüşmesi (%)	1-5

Polyester

Polyesterler mükemmel korozyon direncine sahiptir. Epoksi reçineye göre daha düşük çalışma sıcaklığına sahip olup, maliyeti daha düşüktür.

Polyesterler doymuş ve doymamış polyester reçineler olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Doymuş olan termoplastik özellikler gösterirken doymamış olana katalizör eklenerek termoset özellikler göstermektedir. Termoset reçineler genellikle kompozit malzeme üretiminde tercih edildiği için polyester reçinelerde doymamış olanı tercih edilmektedir. Doymuş reçineler ise enjeksiyon kalıplama işleminde ve fiberin üretiminde tercih edilmektedir [24].

Polyester reçine, dikarboksilik asitlerin ve polihidrik alkollerin kondensasyon polimerizasyonu ile elde edilmektedir. Buna ek olarak, doymamış polyesterler bir dikarboksilik asidin bileşeni olan maleik anhidrit veya fumarik asite sahiptir [32]. Kolay şekil alabilme, düşük maliyet, çevresel etkenlere karşı dayanıklı olma gibi avantajlarının yanında reçine üretimi sırasında yayılan ve insan sağlığına zararlı etkisi olan stiren gazı, kısa raf ömrü gibi de dezavantajlara sahiptir.

Epoksi ve polyester malzemelerin özellikleri aşağıdaki Çizelge 3.2’de kıyaslanmıştır.

Çizelge 3.2. Epoksi ve polyester malzemenin özellikleri [20]

Özellikleri	Epoksiler	Polyesterler
Yapışma	Mükemmel	İyi
Kayma dayanımı	Mükemmel	İyi
Termal kararlılık	Mükemmel özellikler yüksek sıcaklıkta kürlenir	Orta
Su absorpsiyon dayanımı	İyi	Orta
Kimyasal direnç	İyi	Orta
Sertlik	Orta	Orta
Sürünme dayanımı	İyi	Orta
Yorulma dayanımı	Mükemmel	Orta
Alev alma direnci	Duman problem olabilir	Duman ve alev alma problem olabilir

Fenolik

Fenolikler, fenol (karbolik asit) ve formaldehitin bir asit veya baz tarafından katalizlenen reaksiyonu ile oluşur. Farklı özellikler elde etmek için fenol yerine üre, resorsinol veya melamin kullanılabilir [1]. Fenolik reçinelerin kürlenme reaksiyonu sırasında su oluşması nedeniyle epoksiler gibi diğer termoset reçinelerden farklı bir kürlenme sürecine sahiptir.

Kürleme süreci için ısı verilmesi gerekir [32]. Fenolikler uçak iç mekanları, eşya dolapları ve mutfak duvarlarının yanı sıra düşük maliyetli, alev dayanıklı ve düşük dumanlı ürünler gerektiren diğer ticari pazarlarda kullanılırlar. Fenolik ürünler, alev dayanıklı parçalar dışında, çeşitli diğer uygulamalarda da yeteneklerini kanıtlamıştır:

- Yüksek sıcaklık direnci gereklidir.
- Elektriksel özellikler gereklidir.
- Aşınma direnci önemlidir.
- İyi kimyasal direnç ve boyutsal kararlılık esastır [1].

Yüksek sıcaklıklara karşı dirençli olan fenolikler sürekli ısı verildiğinde 300 °C'ye kadar, kısa süreli ısı verildiğinde 1000 °C'ye kadar dayanabilmektedir [24].

Fenolikler normalde çok kırılıgandır ve kürlenme sırasında büyük büzülme gösterirler. Öncelikli olarak düşük yanıcılıkları ve düşük duman üretimleri nedeniyle uçak iç yapısal parçalarıdır [33]. Yüksek sıcaklığa karşı dayanıklı olmalarının yanı sıra, iyi elektriksel ve aşınma direncine sahiptirler, ancak mekanik yönden zayıflardır. Çizelge 3.3'te epoksi, polyester ve fenolik matrislerin karşılaştırmaları verilmiştir.

Çizelge 3.3. Bazı termosetlerin karşılaştırılması [33]

Epoksi	Sürekli fiberli kompozitlerde kullanılan yüksek performanslı matristir. 120 °C – 135 °C'ye kadar kullanılır.
Polyester	Genellikle ticari uygulamalarda kullanılmaktadır. Yeterince ucuzdur ve işlenmeleri kolaydır. Sürekli ve Süreksiz fiberli kompozitlerde kullanılır.
Fenolik	Yanma direnci yüksek olan yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan reçinelerdir. Genellikle hava araçlarının iç aksamalarında kullanılır. Üretimleri zordur.

3.1.3. Termoplastik matrisler

Termoplastikler genel olarak, termoset malzemelerden daha sünek ve daha serttir ve dolgu maddeleri ve takviyeler olmadan çok çeşitli yapısal olmayan uygulamalar için kullanılır. Termoplastikler ısıtılarak eritilebilir ve soğutularak katılaştırılabilir, bu da onları tekrar tekrar şekillendirebilir hale getirir. Termoplastik moleküller çapraz bağ yapmazlar ve bu nedenle esnek ve yeniden şekillendirilebilirler. Düşük sertlik ve mukavemet değerleri, yapısal uygulamalar için dolgu ve takviye kullanılmasını gerektirir. Termoplastikler,

termosetlere kıyasla özellikle yüksek sıcaklıklarda genellikle zayıf sürünme direnci sergilerler. Termosetlere göre çözücülere karşı daha hassastırlar. Termoplastik reçineler birbirine kaynaklanabilir, bu da parçaların onarımını ve birleştirilmesini termosetlere göre daha basit hale getirir. Termoplastik reçinelerin daha yüksek viskozitesi, el yatırması ve bant sarma işlemleri gibi bazı üretim süreçlerini daha zor hale getirmektedir. Bunun bir sonucu olarak, termoplastik kompozit parçaların imalatı, bu sorunların üstesinden gelmek için araştırmacıların büyük ilgisini çekmiştir [1].

Polietilen (PE), poliariletereterketon (PEEK), polipropilen (PP), naylon, poliamid (PA), politetrafloroetilen (PTFE), polivinil klorür (PVC) gibi termoplastikler yaygın olarak kullanılmaktadır. Çizelge 3.4'te yaygın kullanılan termoplastik reçinelerin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.4. Bazı termoplastik reçinelerin özellikleri [1]

Malzeme	Yoğunluk(g/cm ³)	Çekme Modülü(GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Naylon	1,1	1,3-3,5	55-90
Polietilen	0,9-1	0,7-1,4	20-35
PEEK	1,3-1,35	3,5-4,4	100
PA	1,12	1,9	72,6
PTFE	2,1-2,3	-	10-35

Çizelge 3.5. Polimer matrisleri ve özellikleri [34]

Matris Türü	Polimer Fazı	Ortaya Çıkan Özellikler
Termoset	Epoksi reçineler, fenolikler, bismaleimidler ve diğerleri	Üstün mukavemet, modül, kırılma tokluk, yapışkanlık özellikleri
Termoplastik	Polieter ketonlar, poliamidler; poliüretanlar, vb.	İyi güç ve darbe değerleri direnç, sertlik, kırılma tokluğu

3.2. Kürlenme Prosesi

Epoksi reçineler doğrusal yapıları oligomerik yapıları olduğu için fiziksel ve mekanik özellikleri zayıftır. Bu özelliklerini iyileştirmek için yapıları ve molekül ağırlıkları özel maddelerle değişikliğe uğratılmalıdır. Bu maddelere kürlenme ajanları yani sertleştiriciler denir [26]. Epoksi kürlenme ajanları epoksi reçine kürlenme reaksiyonunu teşvik eder veya

kontrol eder. Epoksi reçinenin kürlenmesi bir kürlenme maddesi eklenerek gerçekleştirilir. Kürlenme işlemi sırasında epoksi reçinede geri dönüşü olmayan değişiklikler meydana gelir. Epoksi reçinelerin kürlenme kinetiği ve Tg değeri, kürlenme ajanlarının moleküler yapısına bağlıdır. Kürlenme maddeleri kimyasal bileşimlerine göre;

- Amin tipi kürlenme maddeleri,
- Alkali kürlenme maddeleri, anhidritler ve
- Katalitik kürlenme maddeleri olarak ayrılabilir [35].

3.3. Kürlenme Sistemi

Epoksi reçine kürlenme sistemleri, epoksi reçinelerdeki epoksit gruplarının, yüksek oranda çapraz bağlı, üç boyutlu bir ağ oluşturmak için bir kürlenme maddesi ile kimyasal reaksiyonlarını içerir [35].

3.3.1. Oda sıcaklığında kürlenme

Oda sıcaklığında gerçekleşen epoksi reçine kürlenmesinde alifatik poliaminler, alisiklik poliaminler, düşük molekül ağırlıklı poliamid ve modifiye aromatik aminler gibi oda sıcaklığında kürlenme maddeleri kullanılır. Oda sıcaklığında kürlenme daha düşük bir Tg, daha yüksek esneklik, daha yüksek darbe direnci ve daha yüksek elektrik ve termal şok direnci sağlar [36].

3.3.2. Isı ile kürlenme

Genel olarak, yüksek sıcaklıklarda kürlenmiş epoksi reçinelerde kürlenme ajanı olarak aromatik poliaminler, asit anhidritler, rezinler, amino reçineler, disiyandiamid veya hidrazitler kullanılır. Yüksek sıcaklıkta kürlenme sistemi genellikle düşük sıcaklıkta bir ön kürlenme aşamasına ve yüksek sıcaklıkta bir son kürlenme aşamasına ayrılır. Yüksek sıcaklıklarda kürlenmiş epoksi reçineler daha yüksek Tg değerine, daha yüksek gerilme mukavemetine, daha yüksek ısı direncine ve daha yüksek kimyasal dirence sahiptir [37].

3.3.3. Foto kütleme

Epoksi reçineler, bir foto başlatıcı varlığında kızılötesi, ultraviyole ışık veya elektron ışını ışınlanması kullanılarak kürlenebilir. Foto-kütleme, kütleme süresini saatlerden dakikalara önemli ölçüde azaltır. Ayrıca, diğer kütleme işlemlerine kıyasla daha tutarlı ve kontrollü bir süreç sağlar [38].

3.4. Kompozit Elyaf Malzemeleri

Kompozit malzemeler için elyaf yükün büyük bir kısmını taşıyarak mekanik özelliklerde iyileşmeyi sağlarlar. Elyaf takviyenin formu, üretim yöntemi ve kompozit malzeme özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir. Elyaf malzemeleri genellikle polimer veya seramiktirler. Cam, karbon ve aramid ile UHMWPE adıyla bilinen ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilenler de termoplastik elyaflar arasında en yüksek darbe dayanımına sahip elyaf malzemesi olarak öne çıkmaktadır.

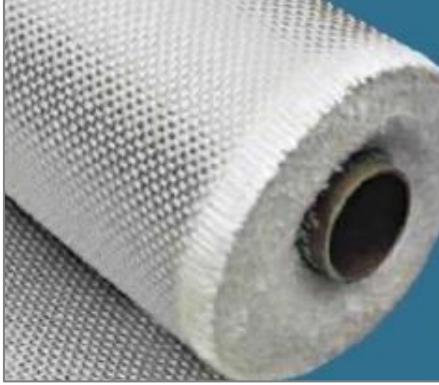
Kompozit malzemelerde elyaflar ; malzemeye sertlik ve dayanım özellikleri kazandırırken kullanılan elyafın türüne göre de elektriksel iletkenlik veya yalıtkanlık kazandırır.

3.4.1. Cam elyaf

Düşük maliyetleri, yüksek gerilme mukavemetleri, yüksek darbe dirençleri ve iyi kimyasal dirençleri nedeniyle cam elyaflar ticari kompozit uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [33]. Esas olarak SiO₂ (silikon dioksit, silika) olan camda diğer elementlerin oksitleri de bulunur. Cam elyaflar genel olarak 3 veya 20 µm arasında değişen çaplardadır. Şekil 3.7’de cam elyaf rulonun görüntüsü verilmiştir.

Başlangıçta cam liflerinin üretiminde A-camı veya açık adıyla “alkali cam” kullanılmıştır. Bunu çok az alkali içeren ve çok üstün elektriksel ve mekanik özelliklere sahip bir borsilikat camı olan “elektrik dayanımlı cam”, kısa adı ile E camının kullanılmaya başlanması izlemiştir. En yaygın olarak kullanılan cam elyaf türü E-camıdır [20]. Alümina-kireç-borosilikat gibi, ana malzemelerden üretilen “E”camından cam elyaf yüksek elektriksel yalıtım özellikleri, neme karşı direnç ve yüksek mekanik özellikleri sayesinde, polimer matris kompozitleri içinde en çok kullanılan takviye malzemesi durumundadır [39].

Cam elyaflar ucuzluk, yüksek mukavemet gibi üstün özelliklere sahipken aynı zamanda düşük elastiklik modülü ve düşük yorulma dayanımı gibi zayıf yönleri de sahiptir.



Şekil 3.7. Cam elyaf rulo

3.4.2. Aramid (Kevlar) elyaf

Aramid elyaf karbon, hidrojen azot ve oksijenden oluşmaktadır. Aramid elyaf polimer olmakta ve kompozit malzemeye yüksek sertlik ve dayanım sağlamaktadır. Elyafın içerisinde yoğunluğu en düşük ve dayanım/ağırlık oranı en yüksek olan malzemedir. Ayrıca darbe dayanımı, yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, kimyasal dayanımı yüksek fakat elektrik iletkenliği ve nem absorbe özellikleri iyi değildir [24]. Şekil 3.8’de aramid elyaf rulonun görüntüsü verilmiştir.

Geçen yirmi yıl boyunca, yüksek teknoloji ürünleri olarak bilinen aramid elyaf önemli bir mesafe katetmiş olup uzay, denizcilik, spor ürünleri, eğlence, otomotiv ve silah endüstrisi gibi klasik kompozit pazarlarına hitap etmiştir. Yüksek düzeyde yönlendirilmiş olan bu polimer, düşük yoğunluk ile yüksek modül ve yüksek düzeyde yapışma özelliği ile yüksek mukavemet/ağırlık oranını üründe bir araya getirmektedir [39].

Aramid elyafların önemli özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Yüksek dayanıklılık,
- Yüksek darbe dayanımı,
- Yüksek aşınma dayanımı,
- Yüksek yorulma dayanımı,
- Yüksek kimyasal dayanımı,

- Kevlar elyafly kompozitler cam elyafly kompozitlere göre % 35 daha hafif olması,
- E-Cam türü elyaflara yakın basınç dayanıklılığına sahip olması,
- Düşük yoğunluk.

Aramid elyafların dezavantajları aşağıda verilmiştir.

- Bazı tür aramid elyafı ultraviole ışınlara maruz kaldığında bozulma göstermektedir. Sürekli karanlıkta saklanmaları gerekmektedir.
- Elyaflar çok iyi birleşmeyebilirler. Bu durumda reincede mikroskobik çatlaklar oluşabilir. Bu çatlaklar malzeme yorulduğunda su emişine yol açmaktadır [40].



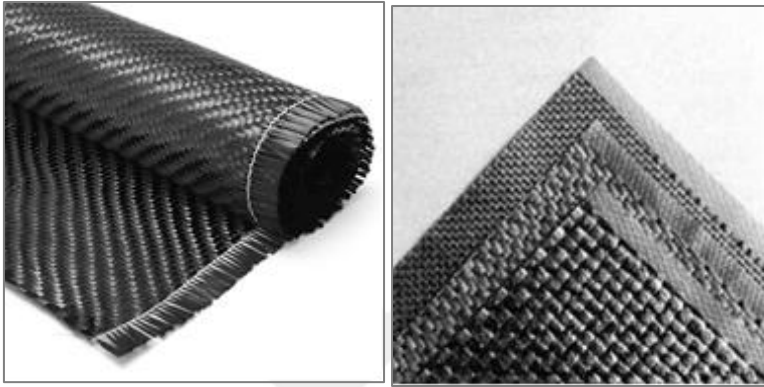
şekil 3.8. Aramid elyaf rulo

3.4.3. Karbon elyaf

Özellikle uzay ve uçak sanayiinde üstün mekanik özellikli ve hafifliğin amaçlanması nedeniyle yüksek teknoloji ürünü olarak karbon elyaf ortaya çıkmıştır.

Karbon elyafının tüm diğer elyaflara göre en önemli avantajı yüksek modülüs özelliğidir. Karbon elyafı bilinen tüm malzemelerle eşit ağırlıklı olarak karşılaştırıldığında en sert malzemedir [40]. Epoksi matrisler ile kompozit yapıya katıldıklarında, karbon elyaflar olağanüstü sertlik ve dayanıklılık performansı sergilerler. Karbon elyaflarda sürekli bir gelişim söz konusu olduğu için karbon elyaf eşitleri sürekli değişmektedir. Karbon elyaf, üretimi maliyetli bir malzeme olduğu için uçak sanayi, spor gereçleri, tıbbi malzemeler gibi üstün özellik gerektiren yerlerde kullanılmaktadır. Bazı stn karbon elyaf zellikleri;

- Elastisite modülü yüksektir.
- Sıcaklık dayanımı yüksektir.
- Düşük yoğunluktadır.
- Korozyona karşı dayanıklıdır.
- Sertlik bakımından oldukça iyidir.
- Mukavemeti ve yorulma dayanımı gayet iyidir [41]



Şekil 3.9. Karbon elyaf örnekleri

Çizelge 3.6. Cam, Karbon ve Aramid elyafların mekanik özelliklerinin kıyaslanması [39]

Özellikler	Cam Elyaf	Karbon Elyaf	Aramid Elyaf
Özgül ağırlık(g/cm ³)	2,48	1,75	1,4
Gerilme dayanımı (MPa)	3000-5000	2500-3000	2750-3000
Gerilme modülü (MPa)	72-82	200-700	82-124

3.4.4. Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen elyaflar (UHMWPE)

UHMWPE, yoğunluğu 0.930–0.935 g/cm³ arasında değişen ve molekül ağırlığı milyonlar (2-6 milyon) seviyesinde olan bir polietilen grubudur. Yüksek molekül ağırlıklarının anlamı polimer zincirlerinin kristal yapı içinde çok sıkı bir biçimde yerleştiği veya paketlenmiştir, polimer çok serttir ve termoplastik malzemeler arasında en yüksek darbe direncine sahiptir. Şekil 3.10'da UHMWPE elyaf rulonun görüntüsü verilmiştir. Uzun zincirler moleküller arası etkileşimi kuvvetlendirerek yükün polimer iskeletine daha etkin bir şekilde transferine olanak verir. Bu hal, herhangi bir yüksek darbe dirençli termoplastiğe kıyasla daha dayanıklı ve sert bir yapı oluşmasını sağlar. UHMWPE kokusuz, tatsız ve zehirli etkisi olmayan bir

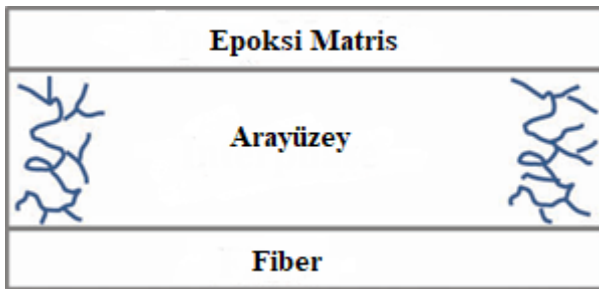
polimerdir. Oksitleyici asitler dışındaki tüm korozif kimyasal maddelere karşı son derece dirençlidir [42].



Şekil 3.10. UHMWPE elyaf

3.5. Kompozit Malzemelerde Arayüzey

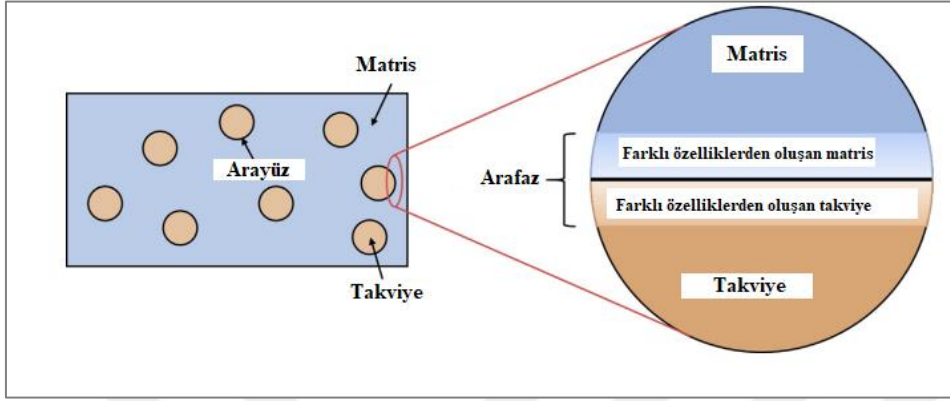
Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli özelliklerden biri de elyaf/matris arayüzeyinin özellikleridir [43]. Kompozit bir malzemede daima, matris ve elyaf fazların fiziksel, kimyasal veya mekanik olarak etkileştiği, gerilimi matristen takviye faza transfer eden, arayüz veya arafaz denilen bir yüzey bölgesi bulunur. Bir kompozitte arayüz bölge, kompozitin son özelliklerini belirleyen elamanı olduğundan son derece önemlidir. Kompozitin verimli olabilmesi için fazların bir araya gelip yüzey arasında bağlanmaları gerekir. Matris-elyaf etkileşimi (infiltrasyon, yük transferi, vs.) arayüz boyunca yapılır [44]. Şekil 3.11’de elyaf/matris arayüzeyin şematik olarak görünümü verilmiştir.



Şekil 3.11. Elyaf/matris arayüzeyinin ve ara fazın şematik gösterimi

Şekil 3.12’de gösterildiği gibi elyaf takviyeli kompozit malzemede arayüz, elyaf ve polimer matrisi arasındaki ortak sınırdır; bu sayede yük, gerilme uyumluluğuna bağlı olarak matristen elyaflara aktarılabilir. Arayüz başarısız olursa, matrisin deformasyonu veya

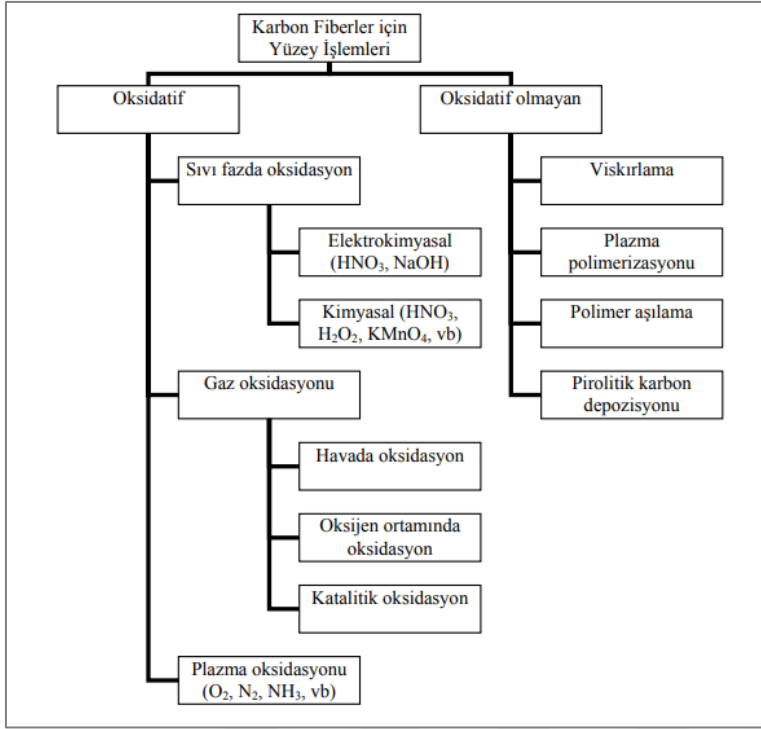
gerilmesi elyafinkiyle uyumlu değildir, bu da yükün zayıf bileşenden (matris) güçlü bileşene (elyaf) aktarılamamasına neden olur. Bu nedenle, arayüzdeki gerilme uyumluluğu, kompozitin bütünlüğü için çok önemlidir [45].



Şekil 3.12. Kompozit içindeki ara fazın şematik gösterimi [45]

Güçlü bir arayüze sahip kompozit malzemelerin mukavemeti yüksek, sünekliliği düşüktür. Zayıf bir arayüz yapılarına sahip malzemelerin ise mukavemeti düşük kırılma direnci yüksektir. Yine arayüz özelliklerine bağlı olarak kompozit malzemenin korozyon direnci ve su içerisindeki davranışları da değişiklik gösterir [43].

Kompozit malzemelerde düşük elyaf/matris ara yüzey tutunma dayanımını artırmak için, elyaf yüzey işlemleri ya da matris modifikasyonu yöntemleriyle ara yüzey özelliklerinin geliştirilmesi gerekir. Kompozit imalat proseslerindeki zorluklar ve ara bölgenin etkin kontrolündeki eksiklik, çoğu polimerik kompozitin potansiyeli altında kullanımına yol açmaktadır. Bu nedenle, elyaf yüzey yapısının modifikasyonu üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Şekil 3.13'te verildiği gibi; kuru ve ıslak oksidasyon yöntemleri, plazma işlemi, elektrodpozisyon, dolgulama ve kaplama şeklinde sıralanabilir [46].



Şekil 3.13. Karbon elyaf yüzey işlemleri [47]

3.5.1. Karbon elyaf ıslatılabilirlik

Kompozit malzemelerin mekanik özelliği; esas itibariyle takviye elemanı olan elyaf ile matrisin yüksek çekme dayanımı ve modülü ve kimyasal kararlılıkla birlikte oluşan ara yüzey bağının kararlılığına bağlıdır. Elyaf/matris arayüzünde güçlü bir yapışma elde etmek için, elyafların matris tarafından uygun şekilde ıslatılması gerekir. Bu nedenle ıslanabilirlik, elyaflar ve matrisler arasındaki ara yüzeylerde yapışma derecesinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynar [48].

Karbon elyafın ıslatılabilirliği, elyafın bir matris malzemesi ile temas ettiğinde yüzeyinde sıvı film oluşabilme yeteneğini ifade eder. Islatılabilirlik, kompozit malzemelerde karbon elyafın matrisle etkili bir bağ kurmasını sağlamak için önemlidir. Yüksek ıslatılabilirlik, karbon elyafın matrisle daha iyi bir yapışma sağlamasına ve bunun sonucunda daha güçlü, dayanıklı ve mekanik olarak stabil kompozitler üretilmesine yardımcı olur.

Ara yüzeyde bağ oluşması, takviye elemanı ve matris arasında uyumluluğu sağlamak ise en zor olan parametredir. Kompozitin ilk fabrikasyonu sırasında uyumluluk için, matrisin bütün elyaf yüzeylerine kolaylıkla yayılması gerekir. Bu durumda da elyaflar iyi ıslanır ve

boşluksuz bir kompozit üretilebilir. Bu nedenle, ıslatılabilirliği iyileştirmek ve dolayısıyla arayüzey bağına gerçekleştirmek için matris içine katılmadan önce sıkça elyaflar yüzey işlemlerine tabi tutulur [17].

Karbon elyafların ıslatılabilirliğini ve kompozitlerin arayüzey yapışmasını iyileştirmek için; plazma, elektrokimyasal oksidasyon, ıslak kimyasal ve ısı işlem dahil olmak üzere karbon elyaflara yüzey işlemi için çeşitli teknikler uygulanmıştır. Karbon elyaflar üzerindeki bu işlemler, nihai kompozitlerin arayüzey ıslatma ve yapışma kuvvetini bir dereceye kadar iyileştirmiştir, ancak yüksek maliyet, yüksek enerji tüketimi ve tek elyaf mukavemetinde önemli kayıplar gibi dezavantajları vardır. Karbon elyafların mekanik özelliklerinden ödün vermeden arayüzey ıslatılabilirliğini ve yapışmayı artırmak için bazı uygun ve ucuz yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir [49]. Islanabilirliğin iyileştirilmesi, elyaf ile matris arasındaki bağı güçlenmesini sağlar. Bu da yük transferini artırarak kompozitin genel dayanıklılık, sertlik ve mukavemet özelliklerini iyileştirir.

Islatılabilirliği Etkileyen Faktörler aşağıda verilmiştir.

- Karbon Elyafın Yüzey Enerjisi: Yüksek yüzey enerjisine sahip elyaflar daha iyi ıslatılabilir. Karbon elyafın yüzey enerjisini artırmak için yüzey işleme yöntemleri uygulanabilir, bu da reçinenin elyaf yüzeyine daha iyi yayılmasına ve bağlanmasına yardımcı olur.
- Matris Malzemesinin Viskozitesi: Reçinenin viskozitesi düşükse, karbon elyafı daha iyi ıslatabilir. Bu nedenle, düşük viskoziteli reçineler karbon elyafın lifleri arasında daha kolay yayılır.
- Yüzey Modifikasyonları: Karbon elyafın yüzeyi çeşitli yöntemlerle (plazma işlemi, oksidasyon veya kimyasal kaplamalar gibi) modifiye edilerek daha ıslatılabilir hale getirilebilir. Bu yöntemler, elyafın yüzeyinde hidrofilik gruplar oluşturarak matrisle daha güçlü bir bağlanma sağlar.
- İşleme Koşulları: Karbon elyaf ve matrisin birleştirilmesi sırasında uygulanan sıcaklık, basınç ve kütleme süresi gibi parametreler de ıslatılabilirliği etkiler. Örneğin, yüksek sıcaklık ve basınç, reçinenin elyaf yüzeyine daha iyi nüfuz etmesine yardımcı olabilir.

Bu tez kapsamında prepreg üretim makinesi ile üretilecek olan nanopartikül katkılı karbon elyafın ıslatılabilirliği;

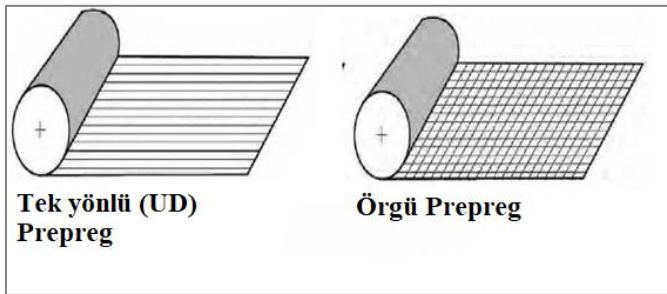
- Mandrelin sarım hızına,
- Elyaf kumaşın gerginliğine,
- Epoksi reçinenin viskozitesine,
- Sarım sırasındaki ortam sıcaklığına,
- Sarım sonrası kürlenme koşullarına bağlıdır.

3.6. Prepreg

Karbon elyaf takviyeli termoset esaslı gelişmiş kompozit malzemeler havacılıkta yüksek performans amacıyla yaygınlaşmıştır. Havacılık uygulamaları için yüksek performanslı kompozit malzemelerin çoğu önceden hazırlanmış prepregler veya kürlenmemiş ancak reçine ile emdirilmiş karbon elyaf katmanlar kullanılır. Prepreg kelime olarak (pre-impregnated) yani ön emdirilmiş kelimesinin kısa halidir. Bir matris ve elyaf takviyesinde oluşan malzeme sistemleridir. Takviye elemanı ile istenilen miktarda emdirilmesi ile elde edilen kompozit malzemeye prepreg denir [50].

Prepregler tutarlı özelliklerinin yanı sıra tutarlı elyaf/reçine karışımı ve tam ıslatma sağlar. Reçine ve sertleştiricinin tartılması ve karıştırılması ihtiyacını ortadan kaldırırlar. Termoset prepreglerin raf ömrü sınırlıdır ve depolama için soğutma gerekir. Isı, termoset prepreglerin kürlenmesine neden olduğundan soğutma, prepreg malzemelerdeki kürlenme derecesini en aza indirir [1].

Prepregler iki farklı çeşitte imal edilirler. Elyaf üzerine dağılacak yük dağılımı, dayanım gereksinimi ve kullanım amacına göre Şekil 3.14’te gösterilmiştir.



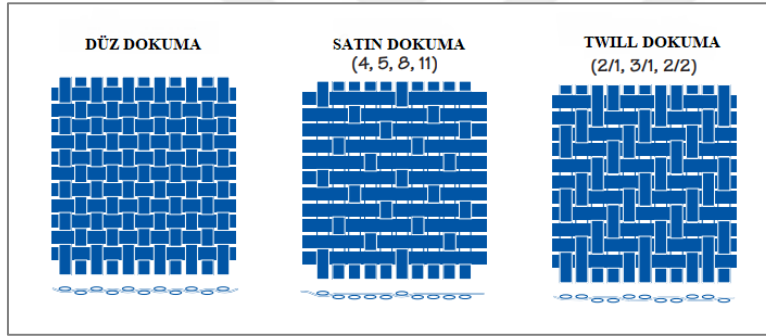
Şekil 3.14. Prepreg çeşitleri [51]

Tek yönlü ve örgü prepreglerin karşılaştırılması aşağıdaki Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Tek yönlü ve örgü prepreglerin karşılaştırılması

Prepreg Çeşidi	Tek Yönlü (Unidirectional)	Örgü (Woven)
Avantaj	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek mukavemetli kompozit imalatının sağlanması Tüm açı dağılımlarının uygulanabilmesi 	<ul style="list-style-type: none"> Çalışma kolaylığı İşçilik süresi kısa
Dezavantaj	<ul style="list-style-type: none"> İşçilik süresi uzun 	<ul style="list-style-type: none"> 0/+90 ve 0/-0 açıları için uygulanabilmesi

Prepreg üretiminde kullanılan elyaflar iki veya daha fazla ipliğin dokunmasından oluşur. Üç ana çeşit dokuma stili mevcuttur. Şekil 3.15'te dokuma stilleri verilmiştir. Bunlar düz dokuma, satin dokuma ve twill dokumadır. Fazla yük kumaşlara geldiğinden dokuma stillerinde kıvrım çok önemlidir. Kıvrımlar az olduğunda mekanik açıdan daha sağlam malzemeler elde edilmektedir [24].



Şekil 3.15. Prepreg kumaşların dokuma stilleri [52]

Prepreg üretiminde üç ana matris olarak epoksi, fenolik ve bismaleimid tercih edilmektedir. Bu üç ana matris için özellikler aşağıdaki Çizelge 3.8'deki gibi belirtilebilir.

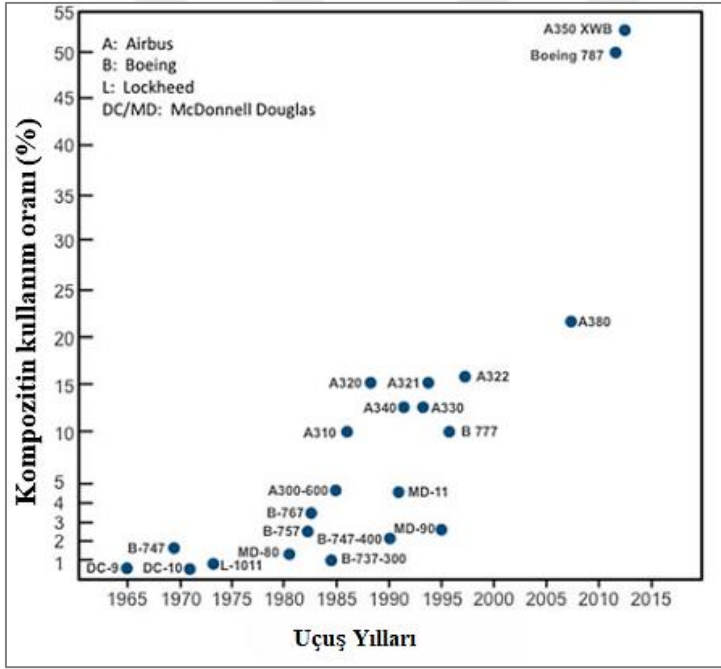
Çizelge 3.8. Epoksi, Fenolik, Bismaleimid reçinelerin özellikleri

Tür	Avantajlar	Uygulama Alanları
Epoksi	<ul style="list-style-type: none"> Mükemmel mekanik performans İyi çevre direnci ve yüksek tokluk Kolay işleme 	<ul style="list-style-type: none"> Havacılık, Deniz Sanayii, Otomotiv, Spor, Ulaşım
Fenolik	<ul style="list-style-type: none"> Mükemmel yangın dayanımı İyi sıcaklık dayanımı Ekonomik işleme 	<ul style="list-style-type: none"> Havacılık (İç komponentler), Denizcilik ve Raylı sistemler
Bismaleimid	<ul style="list-style-type: none"> Mükemmel yüksek sıcaklık dayanımı İyi mekanik özellikler Kimyasal maddelere karşı iyi direnç 	<ul style="list-style-type: none"> Uçak motorları ve yüksek sıcaklık komponentleri

3.6.1. Karbon elyaf takviyeli prepreg

Karbon elyaf prepregler özellikle havacılık ve savunma sanayii alanında etkin şekilde kullanılmaktadır. Dayanımları, sertlikleri ve hem kimyasallara hem de aşırı sıcaklıklara karşı dirençleriyle bilinirler. Bu özellikler karbon elyafın son derece hafif olması ve prepreg teknolojisi ile birleştiğinde hem askeri hem de endüstriyel uygulamalara fayda sağlamaktadır.

Örneğin Şekil 3.16'da gösterildiği gibi Boeing 787 ve Airbus A350'nin kuyruk konisi, orta kanat kutusu, dikey ve yatay kuyruklar ve basınç perdeleri gibi farklı parçalarının toplam ağırlığının %50'si karbon elyaf prepregden oluşmaktadır.



Şekil 3.16. Karbon elyaf kompozit içeriğinin artırılması [53]

3.6.2. Prepreg malzemenin avantajları

Prepregler, Şekil 3.17'de görüldüğü gibi performans ve üretim hacmi açısından karşılaştırıldığında yüksek katma değerli bir kompozit malzeme olarak öne çıkmaktadır. Prepregler, gelişmiş malzeme özellikleri gerektiren birçok sektörde önemli bir etki yaratır. Örneğin, havacılık ve uzay endüstrisi, prepreglerin üstün özellikleri sayesinde uçak döşemeleri, iç mekanlar, kargo gömlekleri gibi çok çeşitli uçak bileşenleri için özel olarak geliştirilmiş parçalar üzerinde çalışmaktadır [8].

Kompozit tasarımı veya imalatı için en hafif ağırlıkta en iyi mekanik özellikleri, basit ve optimize edilmiş bir elyaf / reçine oranı ile üretilebilen prepregler sağlar. Prepregler, kat kesiminden kalıptan çıkarmaya kadar çok daha temiz ve kolay bir işlem sağlar. Prepreglerin temiz ve kolay kat kesimi, daha sonra kalıp yüzeylerine kolayca yerleştirilen doğru kat şekilleri ile sonuçlanır.

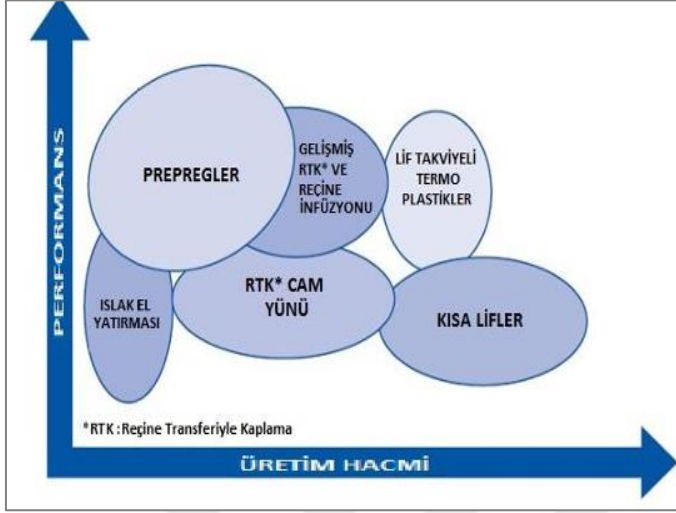
Proses sağlamlığı ve tutarlılığı, tekrarlanabilir yüksek kaliteli parçaların etkili bir şekilde üretilmesinde bir araya gelir. Prepregler, yapışkanlık, kürlenmiş kat kalınlığı ve en karmaşık laminatları bile kolaylaştıran bir debulking (hacim azaltma, küçültme) özelliği gibi özelliklerle optimize edildiği için proses varyasyonunu azaltır. Serme işlemi tamamlandıktan sonra, vakum torbalama ve kürlenme işlemi infüzyon işlemine göre çok daha az karmaşıktır.

Prepreglerle yapılan kompozit parça üretimlerinde kalınlık, ağırlık ve yüzey kalitesi gibi son ürün özellikleri diğer yöntemlere kıyasla standardize edilebilir ve tekrarlanabilir, yüksek ürün kalitesi sağlanarak düşük fire oranlarına ulaşılabilir. Ayarlanmış reçine oranı reçine zengin bölge, kuru bölge, hava boşlukları (pinhole) gibi problemleri ortadan kaldırdığı için sürecin verimliliğini artırır. Kuru kumaşların kalıba serilmesine kıyasla prepreg serimi oldukça basittir. Önceden emdirilmiş reçine, kumaş liflerinin bir arada kalmalarını sağladığından ve hiçbir ilave işleme gerek olmadan kalıba ve kendi üzerine yapışabildiğinden kesimi ve serimi oldukça kolaydır. Diğer yöntemlerdeki reçine hazırlama sürecini ortadan kaldırdığından çalışma alanı temizliği ve işçi sağlığı açısından en ideal yöntemdir [50].

Geleneksel kompozit üretimi sırasında çoğunlukla gözlenen üretim hataları arasında eksik dolgu, kuru noktalar, homojen olmayan reçine dağılımı, boşluk oluşumu, düzensiz kürlenme ve düşük kürlenme derecesi yer alır. En ciddi sorun ise boşlukların oluşumu, genellikle kaynaklarını serme sırasında hapsedilen havadan, reçine karışımındaki uçucu maddelerden alır. Prepregler basınç ve sıcaklık altında kürlendiğinden, katmanlar arasındaki yapışma çok güçlüdür ve boşluk içeriği minimize edilmiştir [8].

Ayrıca prepregler çevresel korozyona karşı yüksek direnç sunar. Metal yerine prepreg kompozitlerin kullanımı, daha yüksek mukavemet/ağırlık oranı ile daha iyi yorulma mukavemeti özellikleri tasarım potansiyeli ile sağlanmıştır. Prepreg kompozit malzemelerle

standardize edilebilen kompozit üretimine yaklaşılabilmiş bu sayede ağırlık, kalınlık gibi özellikler tekrarlanabilir hale gelmiştir.



Şekil 3.17. Prepreg teknolojisinin kompozit üretim yöntemlerindeki yeri [52]

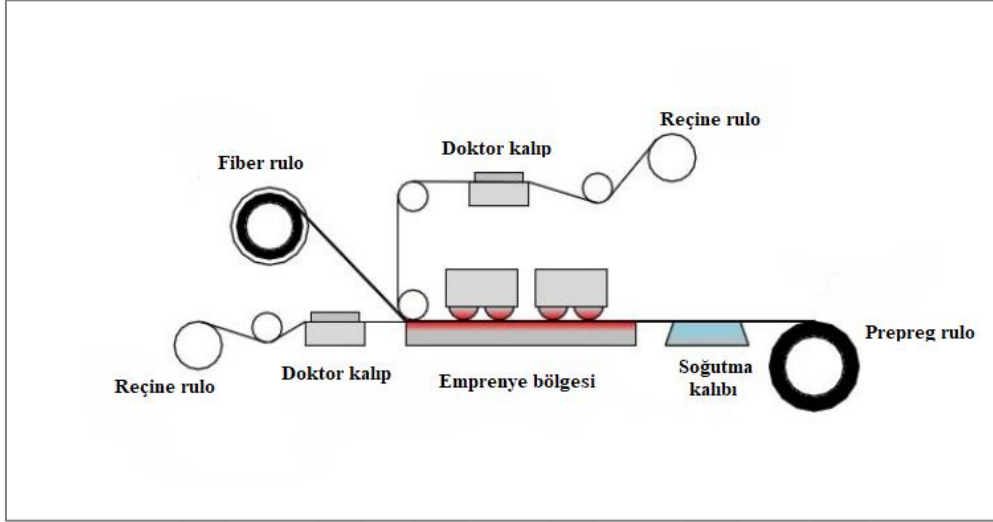
3.6.3. Prepreg üretim yöntemleri

Prepreg üretiminde iki yöntem öne çıkmaktadır. Bunlar sıcak eriyik (hot-melt) ve çözücü daldırma (solvent dip) olarak adlandırılır (Bkz. Şekil 3.18 ve 3.19). İki yöntem de benzer prensiplere dayanır, amaç elyaflara düzgün emdirme için reçinenin viskozitesini azaltmaktır.

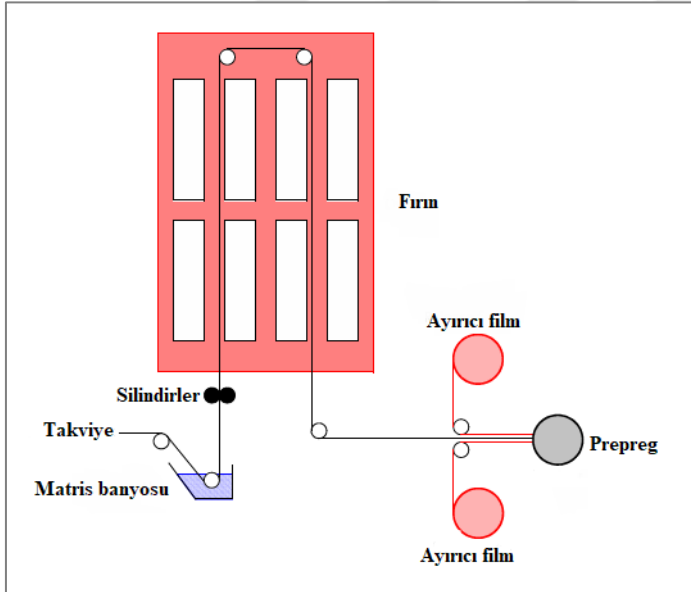
Sıcak eriyik emdirme işleminde sıvı reçinenin kalınlığı önce bıçaklar yardımıyla kontrol edilen bir destek filmine yayılır. Daha sonra, iki reçine filmi tabakası arasında bir elyaf takviyesi sıkıştırılır ve filmlere basınç uygulamak için ısıtılmış sıkıştırma silindirleri kullanılır ve sıvılaştırılmış reçineyi kumaşa zorlar. Son olarak, sıcak prepreği haddelenmeden önce soğutmak için bir soğutma plakası veya başka bir soğutma mekanizması kullanılır [54].

Çözücü daldırma üretim prosesinde elyaf takviyesinin içinden geçirildiği bir reçine banyosu kullanır. İşlem, reçine sistemini çözmek için bir çözücünün kullanılmasını içerir. Bu işlemin prensibi, lif takviyelerinin reçine çözeltisine kontrollü bir lif gerilimi ve hızında daldırılmasına dayanır. Daha sonra, emprenye edilmiş lifler, bir çekirdeğe yuvarlanmadan önce çözücüyü buharlaştırmak için ısıtılmış bir fırından geçer. Son olarak, bu B-kademe

noktasında termoset prepregin laminasyon işlemi iyi bir yapışma ile kolayca gerçekleştirilebilir [8].



Şekil 3.18. Sıcak eriyik emdirme işlemi [55]



Şekil 3.19. Çözücü daldırma işlemi [19]

Sıcak eriyik emdirme yöntemi çözücü daldırma işleminde daha yüksek maliyetlidir. Ayrıca üretilen kompozit malzemenin mukavemeti, çözücünün prepreg içerisinde kalması sebebiyle azalmaktadır. Buna rağmen üretim ve kurulum kolaylığı nedeniyle ötürü yaygın bir yöntemdir.

3.7. Nano-Mühendislik Kompozitler

Düşük yoğunluk ve yüksek mukavemetli kompozit malzemelere olan ihtiyacın artmasıyla birlikte kompozit malzemeler üzerinde birçok gelişme çalışması ortaya çıkmıştır. Özellikle prepreg malzemelerin avantajlarını kullanan karbon elyaf takviyeli polimerler (CFRP) bu talebi karşılamakta ve mekanik özellikleri/ağırlık oranları nedeniyle en çok araştırılan yapılar olmaktadır.

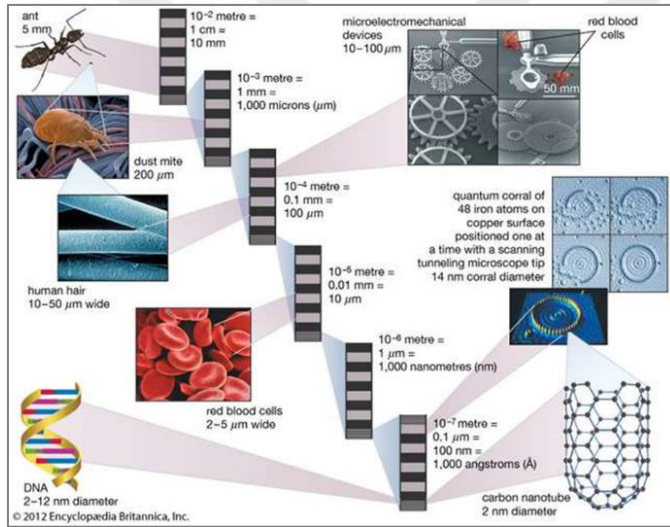
Nanomühendislik kompozitler, nanometre ölçeğinde yapıların, malzemelerin veya bileşenlerin özelliklerini ve performansını iyileştirmek için nanoteknoloji kullanılarak geliştirilmiş kompozit malzemelerdir. Bu tür kompozitlerde, nano ölçekteki bileşenler (örneğin, karbon nanotüpler, grafen, nanokil veya nanoelyaflar) matris malzemesine eklenerek kompozit malzemenin dayanıklılık, mukavemet, sertlik, esneklik ve iletkenlik gibi özellikleri iyileştirilebilir.

Nano-mühendislik kompozitler farklı boyut ölçeklerine sahip en az iki bileşenden oluşur. Bileşenler genellikle geleneksel kompozit yapılarda olduğu gibi sürekli elyaflardan ve ek işlevsel özellikler sağlayan nanopartikül maddelerinden oluşur [8]. Nanokompozitler üstün mekanik özellikleriyle geleneksel kompozit malzemelerden ayrışırlar. Nanopartiküller, kompozit yapının matris bileşenine homojen bir şekilde dâhil edilir ve sürekli elyaflarla daha güçlü bağlanma gibi birçok işlevsel özellik katar [8]. Karbon nanotüpler, çok duvarlı karbon nanotüpler, grafenler ve polimer kil nanokompozitleri günümüz endüstrisinde mekanik özellikleri geliştirme konusunda kullanılan malzeme türleri arasında yer alır [22]. Karbon nanotüplerin az miktarlarda bile polimer matrisin içerisine dağıtılabilmesi kompozit malzemenin hem mekanik hem de termal özelliklerinde iyileştirmeler sağlamıştır. Öte yandan matris içerisine grafen ilavesinin de kompozit malzemenin çekme dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Bir diğer yaygın nanokompozit türü olan grafen oksitin matrise ilavesi sonucunda yapısal kompozit malzemenin sertliğinde gelişme olduğu görülmüştür [22]. Bu yüzden en önemli aşama da nanopartiküllerin matris içerisine dağılmasını sağlayacak üretim yöntemi geliştirmektir.

Bu tez kapsamında, nanopartikül katkılı karbon elyaf takviyeli polimer kompozitler, prepreg teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. Nanopartiküller ve üretim metodu hakkında ilerleyen bölümlerde bilgi verilecektir.

3.8. Nanopartiküller

Nanopartiküller, nano ölçek aralığında (tipik olarak 1 ila 100 nanometre) boyutlara sahip yapay olarak üretilmiş parçacıklardır. Şekil 3.20’de nanopartikül boyutları gösterilmiştir. Bu parçacıklar metaller, metal oksitler, polimerler ve dendrimerler dahil olmak üzere çok çeşitli malzemelerden yapılabilir. Nanopartiküller, küçük boyutlarından ve yüksek yüzey alanı/hacim oranından kaynaklanan benzersiz özelliklerinden dolayı elektronik, enerji, ilaç ve kataliz gibi bir dizi uygulamada kullanılır. Nanopartiküller, kimyasal sentez, fiziksel buhar biriktirme ve şablon destekli yöntemlerle malzeme sentezi dahil olmak üzere çeşitli yöntemler kullanılarak üretilir.

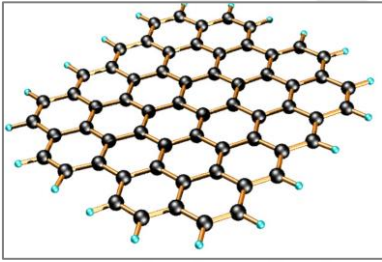


Şekil 3.20. Nanopartikül boyutları

3.8.1. Grafen (GNP)

Malzeme biliminde 2004 yılı önemli bir dönüm noktası olmuştur. Rus kökenli araştırmacılar Andre Geim ve Konstantin Novoselov İngiltere'nin Manchester Üniversitesi'nde gerçekleştirdikleri çalışmalarla grafeni tek tabakalı olarak izole etmeyi başarmışlardır. Grafen keşfedildikten sonra hem temel araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda önemli bir yer edinmiştir. Grafenin iki-boyutlu (2D) yapısı ve sergilediği çok yönlü üstün özellikler araştırmacıları oldukça cezbetmiştir [56]. 2D grafen görüntüsü Şekil 3.21'de gösterilmiştir.

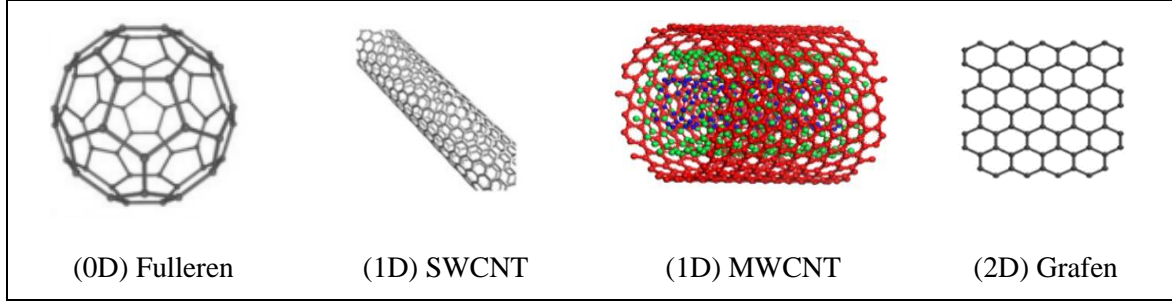
Grafen, altıgen bir kafes içinde düzenlenmiş sp^2 -bağlı karbon atomlarından oluşan bir atom kalınlığında düzlemsel bir tabakadır. "Evrendeki en ince ve en güçlü malzeme" olduğuna inanılır ve olağanüstü fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olduğu tahmin edilir [57]. Grafen, grafit, karbon nanotüp ve fullerenin yapı taşıdır. Grafen yarı-metalik veya sıfır-bant aralıklı bir iletken malzeme olarak da tanımlanmaktadır [56]. Grafenin içsel özellikleri, sentez yöntemlerinden güçlü bir şekilde etkilenen yapısal mükemmelliğine bağlıdır. Grafen, grafitin mikromekanik ekfoliyasyonu, SiC veya metaller üzerinde epitaksiyel büyüme, metal substratlar üzerinde kimyasal buhar biriktirme, grafit oksidin ekfoliyasyonu ile üretilen GO'nun termal veya kimyasal indirgenmesi ve grafit interkalasyon bileşiklerinin ekfoliyasyonu gibi birçok yöntemle hazırlanabilir. Bu yöntemler arasında, mikromekanik bölünme şu anda yüksek kaliteli grafen üretmek için en etkili ve güvenilir yöntemdir [57].



Şekil 3.21. 2D Grafen görüntüsü [58]

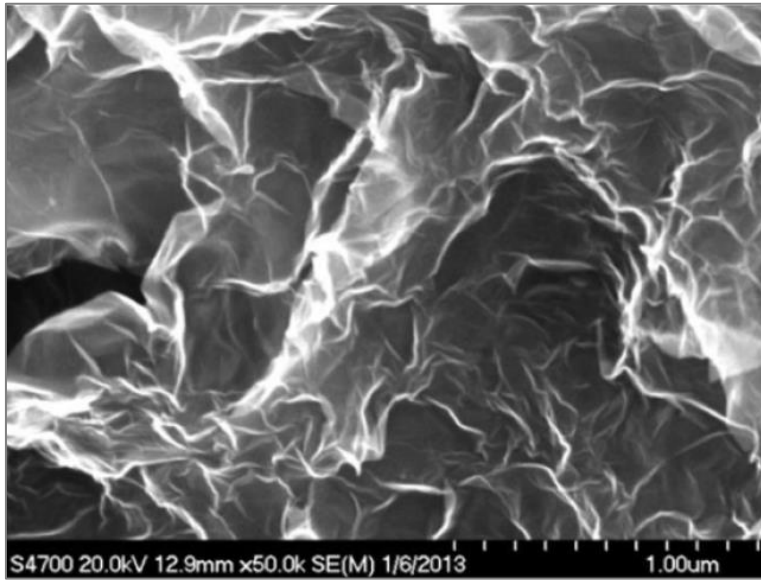
Fulleren (0D), karbon nanotüp (1D), grafen (2D), grafit (3D) ve elmas (3D) doğada çok çeşitli allotropları bulunan karbonun farklı formlarını ifade etmektedir. Karbonun çok sayıda bilinen allotropunun olması, karbon atomlarının sp , sp^2 ve sp^3 bağlanma şekillerinden her üçünü de yapabilmesinin bir sonucudur. Bu allotroplardan fulleren, karbon nanotüp, grafen ve grafit farklı karbon atomlarının sp^2 hibritleşmesiyle meydana gelirken, elmas sp^3 hibritleşmesinin bir sonucudur. Grafenin; fulleren, karbon nanotüp ve grafitin yapı taşı olduğu söylenebilir. Tek bir grafen tabakanın silindirik sarılmasıyla oluşturulan form tek duvarlı (cidarlı) karbon nanotüp (SWCNT) olarak tanımlanmaktadır. Eş merkezli iki veya daha fazla grafen tabakası silindirik olarak sarıldığında çok duvarlı (cidarlı) karbon nanotüpler (MWCNT) elde edilir. Fulleren karbon atomlarından (20, 40, 60 veya 70 adet) meydana gelen kapalı bir kafes yapısıdır. Küre, elipsoit veya silindir şeklinde bulunabilir. Grafen oksit ise grafitin farklı metotlarla oksidasyonu ile üretilen, hidrofilik özelliğe sahip, yapısında karboksil, hidroksil ve hidronilin yanı sıra epoksi grupları bulunduran bir grafen türevidir. Bahsedilen bu karbonik malzemelerin tümü karakteristik yüksek ısı iletkenlik,

elektrik iletkenliği ve mekanik mukavemet değerlerine sahiptir [59]. Şekil 3.22’de nanopartiküllerin 0D, 1D ve 2D görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.22. Nanopartiküller

Grafenin bant aralığı sıfır olduğundan bir elektron kolaylıkla ve hızlı bir şekilde hareket edebilmektedir ve oda sıcaklığında olduğuça yüksek elektron mobilitesine sahiptir. Bu yüzden, grafen yüksek elektriksel iletkenlik özelliği göstermektedir. Grafenin elektriksel iletkenliği -64 mScm^{-1} olarak hesaplanmıştır ve bu değer tek duvarlı karbon nanotüpün (SWCNT) iletkenlik değerinin yaklaşık olarak 60 katıdır [60]. Elektriksel iletkenliğinin yanında termal iletkenliği de olduğuça iyidir. Elektriği bakır kadar verimli iletir ve ısı iletkenliği de olduğuça yüksektir. Grafen teorik olarak $2630 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ yüzey alanına sahiptir ve karbon nanotüpün (CNT) ($1315 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$) yüzey alanından iki kat daha büyüktür [56].



Şekil 3.23. Grafen SEM görüntüsü [61]

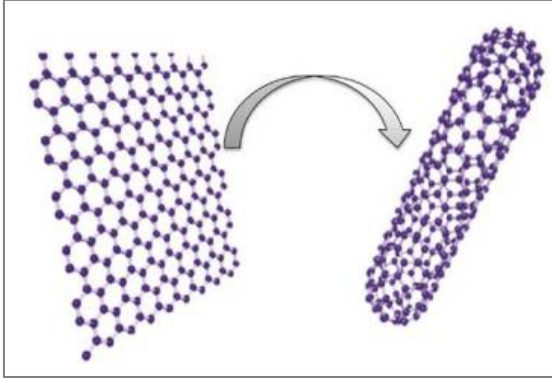
Çizelge 3.9. Grafenin çeşitli özellikleri [62,63]

Özellik	Değerler
Çekme Dayanımı	130 GPa
Young Modülü	1,1 TPa
Elastik Modülü	0,25 TPa
Termal İletkenlik	5000 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Optiksel Geçirgenlik	%97,7
Spesifik Yüzey alanı	2630 m ² g ⁻¹
Elektron Mobilitesi	200000 cm ² V ⁻¹ s ⁻¹

3.8.2. Karbon nanotüp (CNT)

Karbon nanotüp (CNT), olağanüstü fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle bilim ve mühendisliğin birçok alanında büyük ilgi uyandırmıştır. Geliştirilmiş özelliklere sahip yüksek potansiyelli kompozitlerin üretilmesi için, mikro ve nano ölçekli partiküller polimerler için dolgu malzemesi olarak düşünülmüştür. Karbon nanotüp, elmas, grafit ve fulleren gibi diğer karbon malzemelere kıyasla 1000'den daha büyük en-boy oranına sahip olabilen tek boyutlu bir karbon malzemedir. CNT'lerin kimyasal bağları tamamen sp² karbon-karbon bağlarından oluştuğu için dünyanın en güçlü ve en sert malzemesi olarak tanımlanmaktadır [8]. Kompozitlere dahil edilen daha iyi fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip gelişmiş bir dolgu maddesi olarak kullanım potansiyeli, CNT'yi geniş bir uygulama yelpazesinde kullanım için ideal bir aday haline getirmektedir [64].

Karbon nanotüplerin yapısı, Şekil 3.24'te gösterildiği gibi altı karbon atomundan oluşan örülü yapıya sahip grafen düzleminin silindirik olacak şekilde yuvarlatılmasıyla oluşur. Karbon elementi; grafit, fulleren ve elmasta bulunmaktadır. Grafit bağlarının boyları elmas bağlarının boylarından daha kısa olduğu için daha güçlüdür. Grafit (C-C sp²), elmas (C-C sp³) dür. Bu da karbon nanotüplerin çok iyi mekanik özelliklere sahip olmasını gösterir [24].



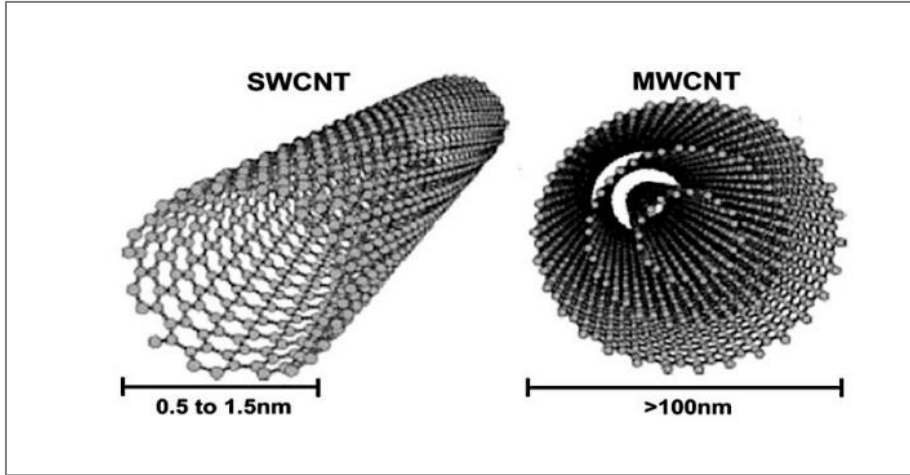
Şekil 3.24. Grafenin haddeleme yöntemi ile tek duvarlı karbon nanotüp üretimi [64]

Tek duvarlı karbon nanotüpler

Karbon nanotüpler sahip oldukları grafen duvar sayısına göre tek duvarlı ve çok duvarlı olmak üzere ikiye ayrılır. Tek duvarlı karbon nanotüpler, 1-2 nm çapında silindirlere dönüşen ve tekli moleküllerden meydana gelir ve SWCNT'ler grafen levhaların ya da büyük fullerenlerin silindirik izomerleri olarak tanımlanabilir. Genel olarak deney yoluyla görülen SWCNT'lerin çapı 0,6 – 2,0 nm'dir. SWCNT'ler genel olarak, Van der Waals bağ kuvvetinin nanotüpleri bir arada tutmasıyla birlikte oluşmaktadır [50]. Öte yandan çok duvarlı karbon nanotüpler, bitişik katmanlar arasında Van der Waals kuvvetleri bulunan içi boş bir çekirdek etrafında düzenlenmiş grafen katmanlarının eşmerkezli kabukları olan iki veya daha fazla tüpten oluşur [8]. Üretimi SWCNT'lere göre daha ucuz ve kolaydır.

Çok duvarlı karbon nanotüpler

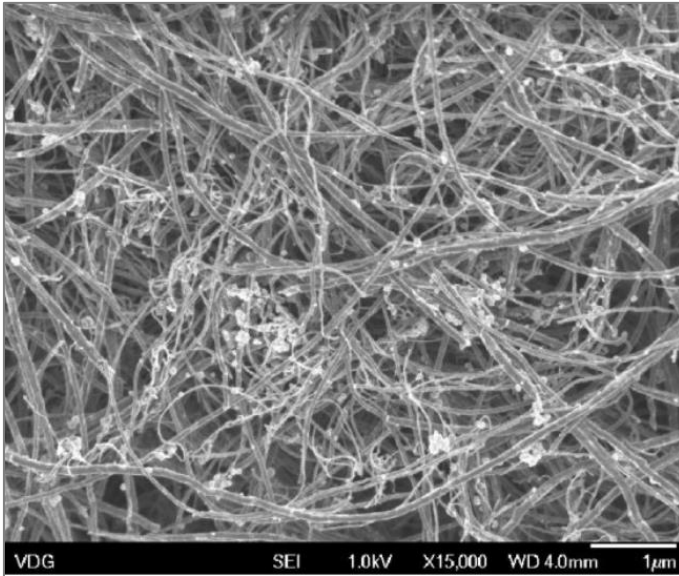
Çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler) konsantrik olarak iç içe geçmiş SWCNT'lerdir ve SWCNT'lerin sergilediğine kıyasla sıkıştırılmada daha yüksek sertlik sunar [30]. Üstün özellikleri nedeniyle, karbon nanotüpler havacılık, uzay, yapısal, otomobil, havacılık vb. gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Çizelge 3.10'da tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüplerin özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.25. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüp yapısı [65]

Çizelge 3.10. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüplerin özellikleri [8]

Özellik	TDKNT	ÇDKNT
Çekme dayanımı (GPa)	13-53	11-63
Elastisite modülü (GPa)	~1260	270-950
Yoğunluk (g/cm ³)	0.8	1.8
Elektriksel iletkenlik (S/cm)	10 ² -10 ⁶	10 ³ -10 ⁵
Isıl kararlılık (havada °C)	>600	>600



Şekil 3.26. Çok duvarlı karbon nanotüp SEM görüntüsü

Çizelge 3.11. Grafen ve KNT'lerin mekanik, termal ve elektriksel özellikleri [30]

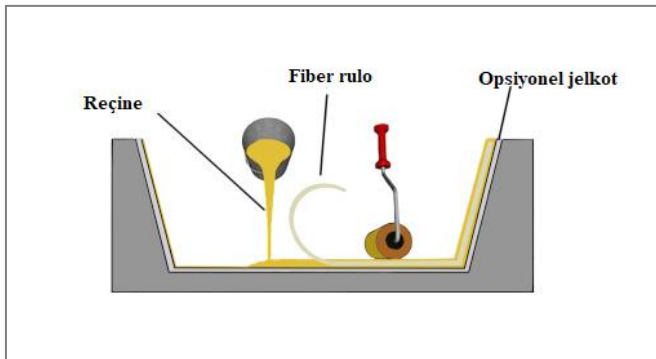
Özellik	Grafen	Karbon nanotüp
Çekme Dayanım (GPa)	130	11-63
Young's Modülü (TPa)	1,1	0,27-0,95
Elektriksel İletkenlik (S/cm)	6000	1800
Termal İletkenlik (W/m K)	5000	3000
Özgül Yüzey Alanı (m ² /g)	2630	-

3.9. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin üretiminde birçok farklı metot bulunmaktadır. Reçinenin özelliğine göre kullanılan üretim yöntemi değişiklik göstermektedir.

3.9.1. Elle yatırma yöntemi

Elle yatırma yöntemi düşük üretim adetlerinde yaygın kullanımı olan, ilk zamanlardan beri endüstride sürekli gelişime açık olan ve üzerinde çalışılan üretim yöntemlerinden olmuştur. Şekil 3.27'de görüldüğü gibi bu yöntem bir kalıba elle yerleştirilen elyaflara / kumaşlara bir rulo veya fırça ile reçine emdirilmesi sonucunda kalıbın şeklinin verilmesi işlemidir [66]. Kalıp üzerine serilen ve reçinesi emdirilen kumaş kürlenme işlemi için bırakılır. Kürlenme işleminden sonra parça kalıp üzerinden ayrılır. Bazı reçineler için ikinci bir kürlenme işlemi gereklidir. İlk kür sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta belli bir süre kürlenerek çapraz bağ sayısının artması sağlanır [20].



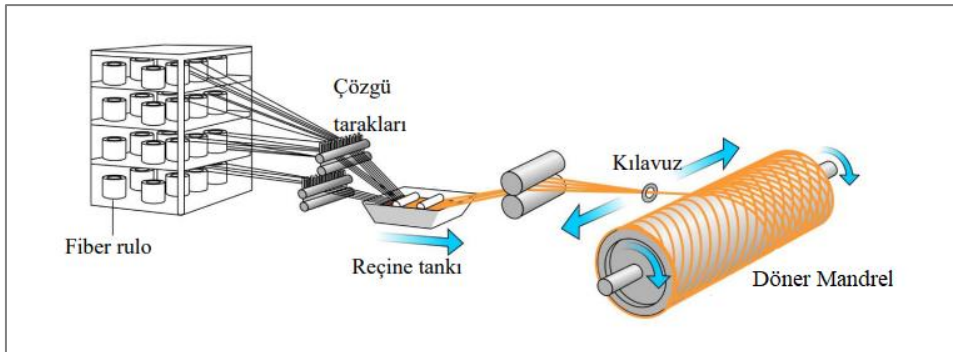
Şekil 3.27. Elle yatırma yöntemi [67]

El yatırma yönteminde tüm termoset reçineler kullanılabilir. Takviye malzemesi olarak ise ağır aramid kumaşların bu yöntemle ıslatılması zor olmasından dolayı onun haricindeki aramid elyaflar ile karbon ve cam elyaflar kullanılabilir [23].

3.9.2. Filament sarma yöntemi

Filament sarma yönteminde, Şekil 3.28’te görüldüğü gibi filamentli bir iplik önce bir reçine ile ıslatılır ve daha sonra önceden belirlenmiş bir yol boyunca dönen bir mandrelin etrafına düzgün ve düzenli bir şekilde sarılır. Alternatif olarak önceden emdirilmiş bantlar da kullanılabilir. Sarma aşamasından sonra kompozit, bir fırında veya otoklavda belirli bir sıcaklıkta ısıtılarak veya IR radyasyonuna maruz bırakılarak kürlenir ve mandrel çıkarılır. Bu yöntem ile basit bir borudan uçak gövdesine kadar çeşitli ürünler üretilirken, tipik malzemeler arasında polyester, vinil ester veya epoksi reçineye bağlanmış cam, karbon veya aramid elyaflar bulunur.

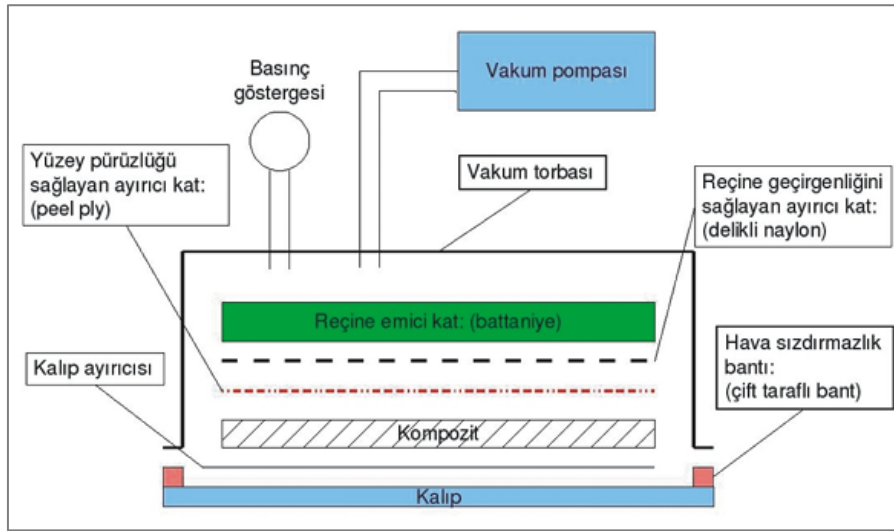
Filament sarımının kompozit üretimi için diğer yöntemlere göre başlıca avantajı, otomasyon ve robotik prosedürleri benimseme olasılığıdır. En büyük dezavantajı, negatif eğimli (içbükey) yüzeylere sarılamaması da dahil olmak üzere mevcut aletlerin geometrik sınırlamasıdır. Ayrıca filament sarımında işleme davranışı büyük ölçüde reçine özelliklerine bağlıdır. Nihai elyaf içeriği, sarım sırasında elyafın reçineye göre radyal hareketinin bir fonksiyonudur. Bu hareket, liflere etki eden kuvvetlerin, yani uygulanan gerilimin ve lif ile reçine arasındaki sürtünmenin (matris viskozitesinin bir fonksiyonu) bir sonucudur [68].



Şekil 3.28. Filament sarma yöntemi [69]

3.9.3. Vakum torbalama yöntemi

Şekil 3.29’da görüldüğü gibi vakum torbalama üretim tekniği esas itibarı ile lifli kompozit kumaş malzemesinin bir kalıp içine elle yatırılması ve reçinenin elle kalıp içine dağıtılması sürecinden sonra devreye alınan bir uygulamadır. Bu yöntem ile klasik elle yatırma yöntemi ile kompozit malzeme üretimi metodunun dezavantajlarını ortadan kaldırarak daha sağlam ve daha hafif kompozit malzemelerin üretimini mümkün kılmaktadır.



Şekil 3.29. Vakum torbalama yöntemi [70]

Vakum torbalama yönteminin avantajları aşağıda verilmiştir.

- Düşük boşluk
- Düşük çatlak oluşumu
- Elyaf-reçine oranının yüksek olması ve kırılmanın azalması
- Homojen reçine dağılımı ile mukavemetin artması [70].

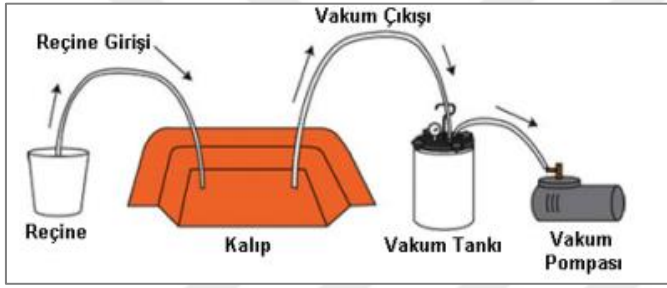
Vakum torbalama yönteminin dezavantajları aşağıda verilmiştir.

- Tek kullanımlık torbalama malzemeleri maliyeti arttırır.
- Tecrübeli iş gücü gerektirir [20].

3.9.4. Vakum infüzyon yöntemi

Vakum İnfüzyon Prosesi (VIP), yüksek kaliteli kompozit parçalar üretmek için uygun maliyetli bir prosestir. Bu yöntemin avantajları arasında daha yüksek kalite, daha iyi tutarlılık, iyi iç yüzey, daha hızlı döngü süresi ve daha düşük maliyet bulunmaktadır.

Vakum infüzyon işleminin avantajı, çok yüksek elyaf içeriğine sahip (ağırlıkça %70'e kadar elyaf) bir laminat oluşturmak ve böylece minimum ağırlıkta çok yüksek mukavemetli ve sert bir parça oluşturmaktır. Vakum infüzyon aynı zamanda çok sayıda elyaf ve çekirdek malzeme içeren karmaşık laminatlar için de verimli bir üretim sürecidir [71].



Şekil 3.30. Vakum infüzyon prosesi [66]

Bu yöntemde malzemeler kuru olarak kalıba konur ve reçine verilmeden önce vakum uygulanır. Tam vakum sağlanmasının akabinde, reçine dikkatlice yerleştirilen infüzyon hortumuyla elyaf tabakalara emdirilir. Elyaf tamamen ıslandıktan sonra infüzyon hattı kapatılır. Fazla reçinenin taşma kabına gönderilmesi ve kalan laminalar arasında sıkışan havanın alınması için bir miktar daha vakumlamaya devam edilir. Boşlukta oluşan havanın tümünü çıkarmak ve elyaf ve çekirdek malzemelerini birleştirmek için yüksek vakum pompası (-0,85 bar) kullanılır [50].

Vakum infüzyon yönteminin avantajları aşağıda verilmiştir.

- Daha yüksek elyaf-reçine oranı (ağırlıkça %70'e kadar elyaf)
- Daha yüksek mukavemet ve sertlik
- Kapalı kalıp olmasından dolayı daha temiz proses
- Karmaşık parçaların kolaylıkla üretilebilmesi

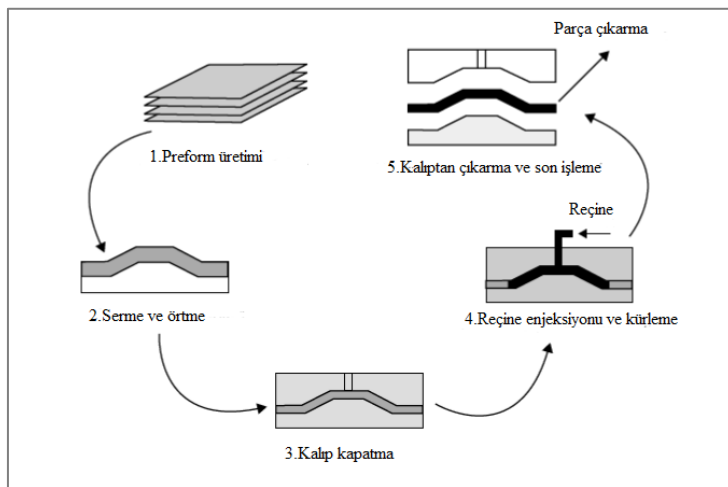
Vakum infüzyon yönteminin dezavantajları aşağıda verilmiştir.

- Vakum sızıntısı durumunda parçanın hurdaya çıkabilmesi
- Yüzey kalitesinin iyi olmaması
- Yüksek kalıp maliyeti [71]

3.9.5. Reçine transfer kalıplama yöntemi

Reçine transfer kalıplama yöntemi, özellikle karmaşık şekilli, kesintisiz, elyafla güçlendirilmiş, yapısal kompozit malzeme üretiminde kullanılan ileri bir üretim tekniğidir. Karmaşık yapıda, üstün mekanik performanslı, hafif parçaların üretimi için uygundur. Bu üretim yönteminde, ürün kalitesinde oluşabilecek değişkenlik, diğer kompozit yöntemlerine göre daha iyi kontrol edilebilir [72].

Reçine transfer kalıplama kapalı bir kalıplama yöntemidir. Takviye malzeme doğrudan veya bazen önceden bir ön-şekillendirme yapıldıktan sonra (preform) kalıba konur. Üst kalıp alttakinin üstüne kapatılır ve aradaki boşluğa reçine enjekte edilir. Kalıp ısıtılarak kürlenme yapılır. İşlemlerin tamamı ortam sıcaklığı ve basıncında gerçekleştirilir. Kullanılan reçineler genellikle epoksiler, poliesterler ve fenoliklerdir; yüksek proses sıcaklıklarında bismaleimidler gibi reçineler de kullanılabilir [73]. Ağır yüklü birincil uçak yapısalı, yüksek kaliteli ve düşük maliyetli üretim sağlayan bu teknik kullanılarak imal edilmektedir [22].



Şekil 3.31. Reçine transfer kalıplama yöntemi [74]

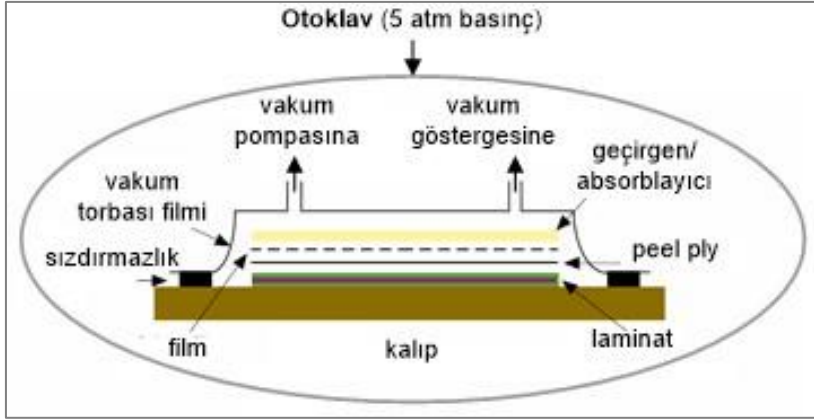
3.9.6. Otoklav

Otoklav yöntemi kompozit malzeme üretimi sürecinde önemli bir rol oynamaktadır. Otoklavlar genellikle kompozit malzemelerin üretiminde kürlenme işlemi sırasında ısı ve basınç uygulamak için kullanılır. Kürlenme işlemi, malzemeleri birbirine bağlayan ve istenen mekanik özellikleri yaratan kimyasal reaksiyonları başlatmak için kompozit malzemelerin yüksek sıcaklıklara ve basınçlara maruz bırakılmasını içerir. Şekil 3.32’te otoklav prosesinin temelleri gösterilmiştir.

Otoklav yönteminin ana basamakları şu şekildedir:

- **Prepreg hazırlama:** Elyaf ve reçine istenen özelliklere göre dikkatlice düzenlenir ve serilir. Bu serme işlemi, nihai kompozit malzemenin gerekli mukavemet, sertlik ve diğer özelliklere sahip olmasını sağlar.
- **Vakum Torbalama:** Yerleştirme tamamlandıktan sonra, malzemeler bir vakum torbasının içine yerleştirilir ve daha sonra kenarlarından kapatılır. Vakum torbası havayı uzaklaştırır ve kompozit malzeme katmanlarını birbirine sıkıştırarak katmanlar arasında iyi bir temas sağlar ve boşlukları veya hava ceplerini azaltır.
- **Kürleme:** Vakum torbalı katman otoklavın içine yerleştirilir ve burada kontrollü sıcaklık ve basınçlara maruz bırakılır. Otoklav kompozit malzemelere ısı ve basınç uygulayarak sertleşmelerini ve etkili bir şekilde birbirlerine bağlanmalarını sağlar. Spesifik sıcaklık ve basınç koşulları, kullanılan malzemelere ve nihai ürünün istenen özelliklerine bağlı olarak değişir.
- **Soğutma ve Çıkarma:** Kürlenme işlemi tamamlandıktan sonra otoklav kademeli olarak soğutulur ve vakum torbası çıkarılır. Kompozit malzeme daha sonra kalite açısından incelenir ve istenen şekil veya boyuta göre kesilir.

Genel olarak, otoklavlar yüksek kaliteli kompozit malzemelerin üretiminde temel araçlardır ve üreticilerin kürlenme işlemi üzerinde hassas kontrol elde etmelerine ve üstün güç, dayanıklılık ve performans özelliklerine sahip kompozit parçalar üretmelerine olanak tanır.



Şekil 3.32. Otoklav (vakum torbalı) kalıplama prosesi [73]

Otoklav yönteminin avantajları aşağıda verilmiştir.

- Yüksek elyaf hacim oranına sahip yapısal kompozit bileşenlerin imalatını sağlar.
- Herhangi bir elyaf yöneliminin üretimine izin verir.
- Prototip parçalar yapmak için uygundur.
- Takım tasarımı otoklav işleme için basittir [1].



4. MATERYAL METOT

Bu çalışmada özellikle havacılık ve uzay sanayisinde ihtiyaca göre üretilebilen, mekanik özellikleri artırılmış, endüstriyel ürün olarak pazarda yer alabilecek nanopartikül katkılı karbon elyaf takviyeli prepreg kompozit malzemenin üretimi amaçlanmıştır. Kompozit ürünlerin üretiminde matris ve takviye elemanlarına en uygun olacak şekilde, prepreg üretim metodu kullanılmıştır.

4.1. Kullanılan Malzemeler

4.1.1. Karbon elyaf

Bu çalışmada kullanılan tek yönlü (UD), sürekli karbon elyaf malzemenin özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Karbon elyaf özellikleri

	Sürekli Karbon Elyaf, UD Twill
Dokuma	Tek Yönlü
Çözüğü	12k
Yoğunluk (g/cm ³)	1,76
Çekme mukavemeti (MPa)	3950
Elastisite Modülü (GPa)	238
Uzama (%)	1,6
Marka	PROFABRIC

4.1.2. Epoksi reçine sistemi

Matris görevi görmesi için epoksi reçine tercih edilmiştir. Çizelge 4.2’de özellikleri verilmiştir. Reçine sisteminde kullanılan nanopartikül miktarına ve standartlara bağlı olarak %25 ile %30 arasında amin bazlı sertleştirici malzeme eklenmiştir.

Çizelge 4.2. MGS L160/H160 epoksi reçine sistemi özellikleri

	MGS L160/H160
Ağırlıkça oran (%)	100:25
Yoğunluk (g/cm ³)	1,13-1,17
Viskozite (MPa.s)	700-900 (25°C'de)
Çalışma sıcaklığı (°C)	-60/+50
Çalışma süresi (dk)	30-45
Proses sıcaklığı (°C)	+10/+50
Kürleme sıcaklığı (°C)	23 °C 24s + 80 °C 15s
Çekme mukavemeti (MPa)	70-80
Elastisite modülü (GPa)	110-140
Sağlayıcı	AKERMAN GRUP

4.1.3. Grafen nanopartikül (GNP)

Epoksi reçine sistemi içerisine homojen olarak dağıtılmış grafen nanopartiküller kompozit malzemede gelişmiş mekanik özelliklerin sağlanmasında önemli bir ağ görevi görmektedir. Çizelge 4.3'te özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.3. Grafen nanopartikülün özellikleri

	Grafen Nanopartikül
Safılık (%)	>99,9+
Parçacık şekli	Nano toz
Parçacık boyut (nm)	3
Parçacık çapı (nm)	1,5
Yüzey alanı (m ² /g)	8000
İletkenlik (S/m)	1500-1950
Marka	NANOGRAFİ NANO TEKNOLOJİ A.Ş.

4.1.4. Karbon nanotüp (CNT)

Epoksi reçine sistemi içerisine homojen dağıtılmış karbon nanotüpler kompozit malzemede gelişmiş mekanik özelliklerin sağlanmasında önemli bir ağ görevi görmektedir. Çizelge 4.4'te özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.4. Çok duvarlı karbon nanotüpün özellikleri

	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
Safılık (%)	>96
Parçacık dış çapı (nm)	8-18
İç çap (nm)	5-10
Yoğunluk (g/cm ³)	0,25
Yüzey alanı (m ² /g)	220
Kül içeriği (% ağı)	1,5
Elektriksel İletkenlik (S/cm)	98
Marka	NANOGRAFİ NANO TEKNOLOJİ A.Ş.

4.2. Nanopartikül Katkılı Prepreg Üretimi

4.2.1. Tambur tipi sarım makinesi

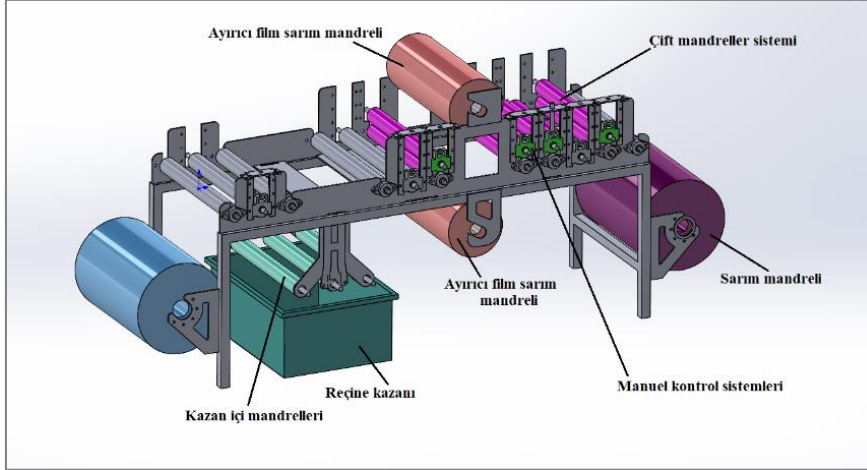
Tez kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmada, karbon elyaf takviyeli prepreg üretiminde tambur tipi sarım üretim metodunun nanopartiküller yardımıyla zenginleştirilerek elyaf/matris oranının kontrol edilebilmesi ile elyaf kumaşın ıslatılabilirlik oranının artması ve bu sayede prepreg malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Nanopartikül katkılı karbon elyaf prepreglerin özdeş ve tekrarlanabilir bir üretim prosesi ile üretilerek kompozit malzemenin veriminin artırılması hedeflenmiştir.

Prepreg sarım makinesi; esas olarak ön emdirilmiş dokumalar diye adlandırılan prepreg, termoset ve/veya termoplastik esaslı matris malzemelerinin kontrollü oranlarda ve homojen bir şekilde elyaf esaslı takviye malzemelerine emdirilmesine dayanan bir ileri üretim sürecidir. Bu işlem karbon elyaf kumaşların belirli bir gerilim ve sarım hızı altında mandreller üzerine sarılmasını içerir. Mandrellerin ana işlevi prepreg tabakalarının düzgün bir şekilde yerleştirilerek sıkıştırılmasını ve nanopartikül katkılı reçinenin karbon elyafa emdirilmesini sağlamaktır. Mandreller iş mili etrafında döndürülürken, dönen mandrelin eksenine ile yatay olarak aynı hizada geçerek kumaşları istenen desen veya açığa yerleştirir. Karbon elyaf kumaşlar mandrele ulaşmadan önce, bir kazanda nanopartikül katkılı reçine ile emprenye edilirler. Sarım mandrelinde elyaf istenen kalınlıkta sarıldıktan sonra elyaf-reçine kürlenme aşamasına ulaşılır. Reçine sistemine ve kürlenme özelliklerine bağlı olarak katmanlar halinde yerleştirilen prepregler kür fırınına yerleştirilir. Bu yöntemin en büyük

avantajı elyaf/matris oranının kontrol edilebilir olmasıyla ara yüzey bağ kuvvetini artırması ve bunun da üretilen kompozit malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmesidir.

Bu tez kapsamında tambur tipi elyaf sarma yöntemi; nanopartiküllerle zenginleştirilerek epoksi reçine sistemi ve literatürden farklı olarak karbon elyaf iplik yerine karbon elyaf kumaşlar içinde dağıtılmış çözelti emdirme yöntemi kullanılarak modifiye edilmiştir. Prepreg makinesinin temelleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Makine gövdesi tamamı 6061 Alüminyum sac malzemedan imal edilmiş olup nikelaj kaplama yöntemiyle korozyona karşı önlem alınmıştır. Mandreller 76 mm çapındadır. Prepreg sistemi, elyaf besleme mekanizması ve elle manuel kontrolün sağlandığı mandrellerin dönüş hızı ile kontrol edilmiştir.

Gerilmiş karbon elyaf kumaşlar, Resim 4.1’de görüldüğü üzere oda sıcaklığında tutulan reçine emdirme kazanı içerisinden geçirildikten sonra çift mandrelli sıkıştırma sistemlerinden geçirilmiştir. Bu sıkıştırma sistemleri rulman sistemleri ile elle manuel olarak kontrol edilebilecek şekilde tasarlanmıştır. Resim 4.2’te gösterildiği gibi mandrellerin aşağı yukarı hareketini kontrol edebilen rulman sistemleri ile nanopartikül katkılı reçinenin karbon elyaf kumaş üzerine homojen dağılımın yanı sıra elyaf/matris oranı kontrol edilerek karbon elyafın tam ıslatılması sağlanacaktır. Nanopartikül katkılı reçine ile emprenye edilen karbon elyaf kumaşlar sıralı mandrellerden geçirilerek sarım mandreline ulaşması sağlanmıştır. Prepreg karbon elyaf kumaşlar, Resim 4.3’te görüldüğü gibi kolay ve kullanışlı rulolar halinde muhafaza edilmesi için 48 mm çapındaki alt ve üst mandrellerden ayırıcı film tabakasıyla kaplanarak sarım mandreline sarılacaktır. Geleneksel yöntemlerden farklı olarak mandrel üzerinde toplanan karbon elyaflar, dondurucuda muhafaza edilmelerinin ardından ıslak halde serilerek katmanlar halinde kür fırınına ve kurlenme noktasına ulaşmıştır.



Şekil 4.1. Prepreg sarım makinesinin bileşenleri



Resim 4.1. Çift mandrelli sıkıştırma sistemleri



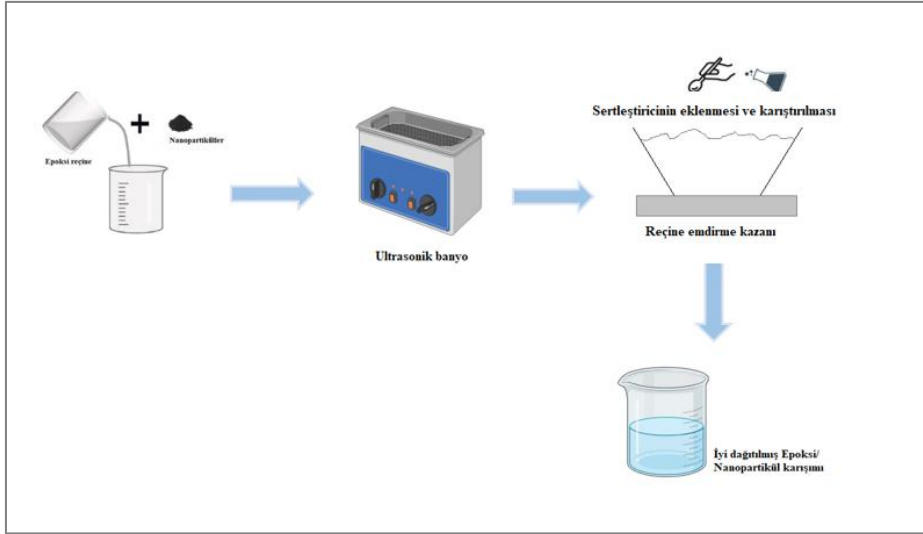
Resim 4.2. Manuel kontrol sistemleri



Resim 4.3. Ayırıcı film sarım mandrelleri

4.2.2. Epoksi reçine sisteminin hazırlanması

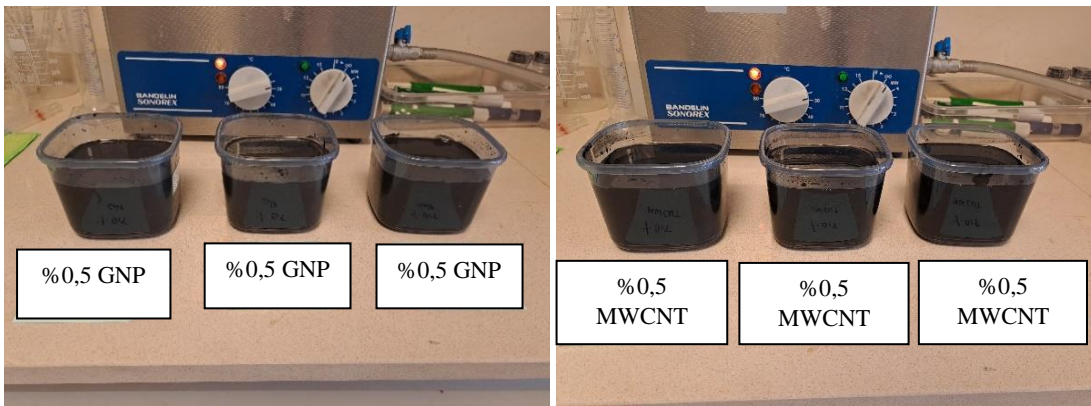
Epoksi reçine sistemi; reçine, nanopartikül ve sertleştiricinin homojen bir şekilde dağıtılabilmesi için Resim 4.4'te gösterilen ultrasonik banyo kullanılarak hazırlanmıştır. Nanopartiküller epoksi reçine içerisine ağırlıkça %0,5 oranında eklenerek karışım sıcaklığı 25 °C ile 30 °C dereceyi geçmeyecek şekilde buz banyosu etrafında sıcaklık kontrol edilerek 15 dakika boyunca karıştırılmıştır. Resim 4.5'te hazırlanan nanopartikül-epoksi reçine karışımlarının görüntüsü verilmiştir. Reçine kürleşme prosesinin başlamaması için sertleştirici 100:25 (4/1) oranında prepreg numuneler hazırlanırken reçine emdirme kazanı içerisine ilave edilerek reçine sistemi tamamlanmıştır. Reçine sisteminin hazırlanışı aşağıdaki Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Epoksi reçine sisteminin hazırlanmasının şematik gösterimi



Resim 4.4. Kullanılan ultrasonik banyo

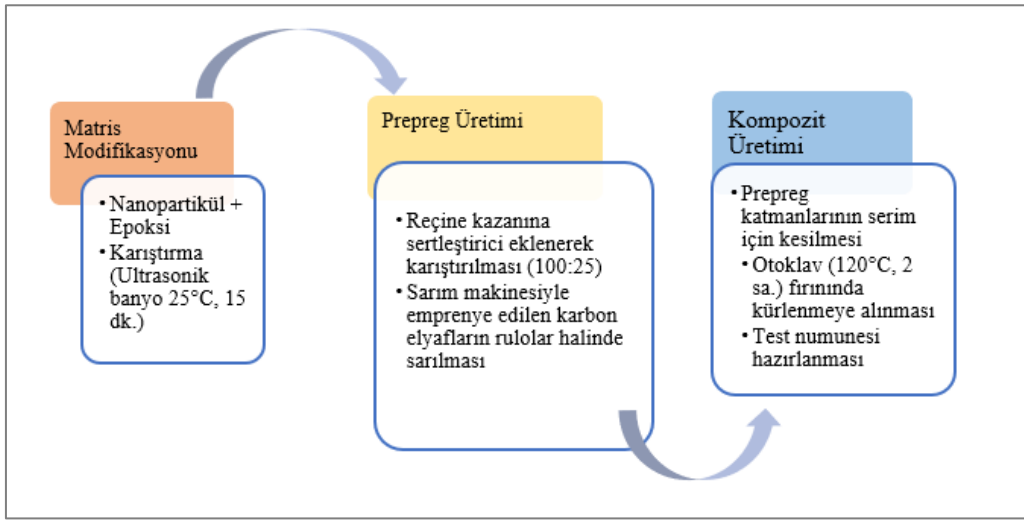


Resim 4.5. %0,5 Grafen (GNP) ve Çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) katkıli epoksi reçine karışımları

Epoksi reçine-nanopartikül karışımlarının hazırlanmasının ardından üç farklı matris elde edilmiştir. Çizelge 4.5'te ayrıntıları verilmiştir.

Çizelge 4.5. Nanopartikül oranları

Matris	GNP	MWCNT
Epoksi/sertleştirici (100:25) (4/1)	%0	%0
Epoksi/sertleştirici-%0,5 GNP	%0,5	%0
Epoksi/sertleştirici-%0,5 MWCNT	%0	%0,5



Şekil 4.3. Nanopartikül katkıli prepreg üretim şeması

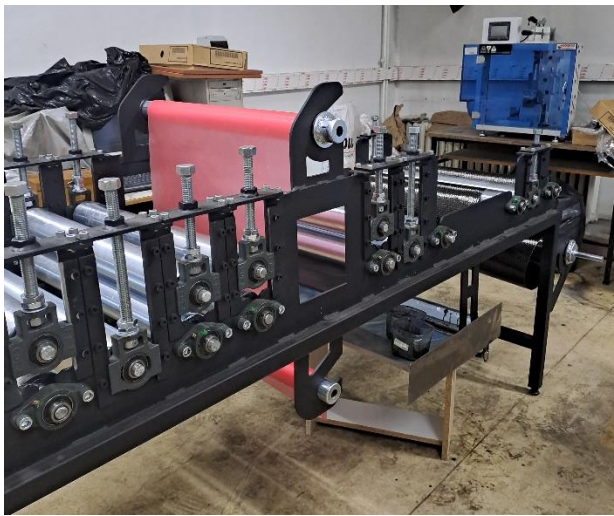
4.2.3. Numunelerin üretimi

Prepreg sarım makinesi kullanılarak nanopartikül katkıli karbon elyaf takviyeli prepreg ve onun kompozit malzemeleri üretilmiştir. Reçine sistemi materyal kısmında belirtildiği gibi hazırlanmıştır. Reçine sistemi, reçinenin sıcaklık ve viskozitesinin kontrol edilmesini sağlayarak üretim sürecinin güvenilirliğini ve kalitesini artırmıştır. Resim 4.6'ta kullanılan epoksi ve sertleştiricinin görüntüsü verilmiştir.



Resim 4.6. Kullanılan Hexion MGS marka epoksi ve sertleştirici sisteminin görünümü

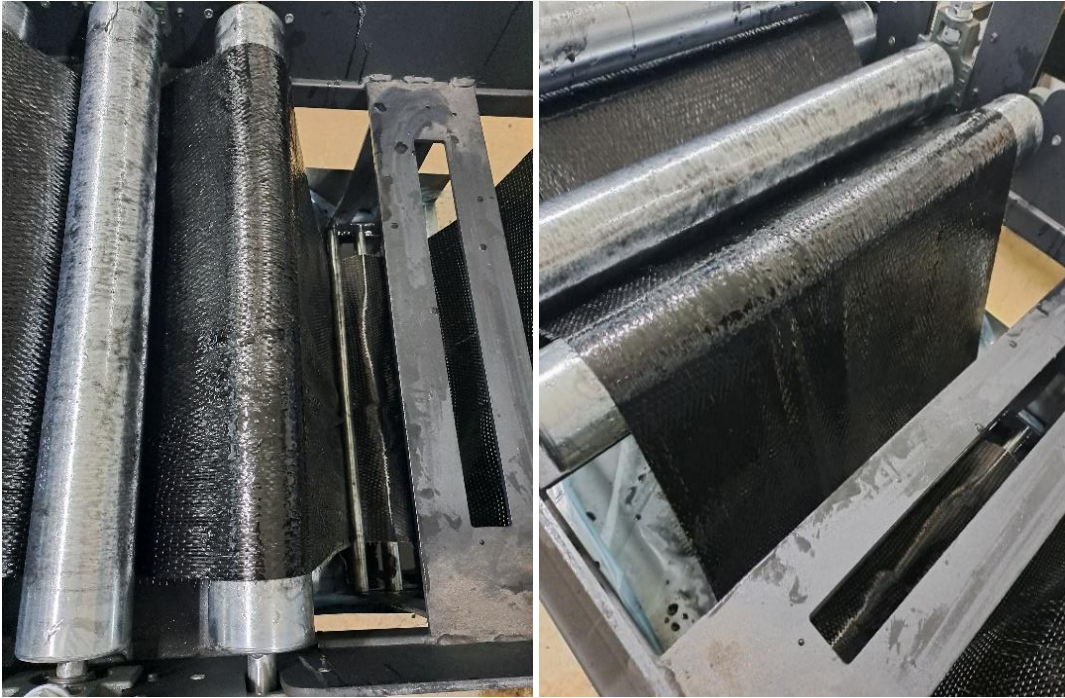
Reçine emdirme kazanı 1,5 lt hacimde olup, ağırlıkça sırasıyla %0 ve 0,5 oranlarında grafen ve çok duvarlı karbon nanotüp içermektedir. Kürleşme prosesinin başlamaması için kazan içerisine 100:25 oranında sertleştirici ilave edilip karıştırıldıktan sonra her bir nanopartikül katkılı epoksi reçine içerisinden geçirilen karbon elyaf kumaşlar manuel kontrol edilerek mandreller üzerinden sarılmıştır. Karbon elyaf kumaşın daha iyi ıslatılması ve reçinenin viskozitesinin sınırlar dahilinde tutulması amacıyla oda sıcaklığında üretim yapılmıştır. Ayırıcı film sarım mandrelleri ile alt ve üst tabaka halinde ayırıcı filmlerden geçirilen ıslak karbon elyaf kumaşlar sarım mandrelinde sarılarak rulo halinde -18°C 'de dondurucuda bekletilmesinin ardından laminat serim aşamasına geçilmiştir. Üretilen prepreglerin boyutları 550 mm x 4000 mm'dir. Aşağıdaki resimlerde numune üretim prosesi gösterilmiştir.



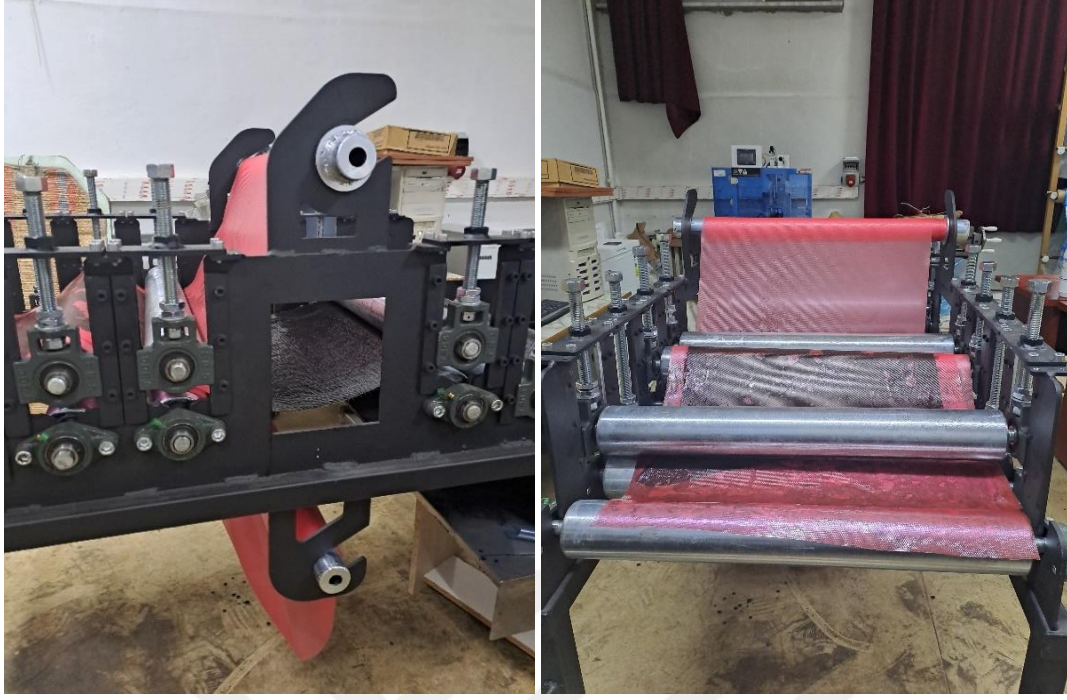
Resim 4.7. Sarım öncesi makinenin hazırlanması



Resim 4.8. Reçine ve sertleştiricinin kazan içerisinde karışımı



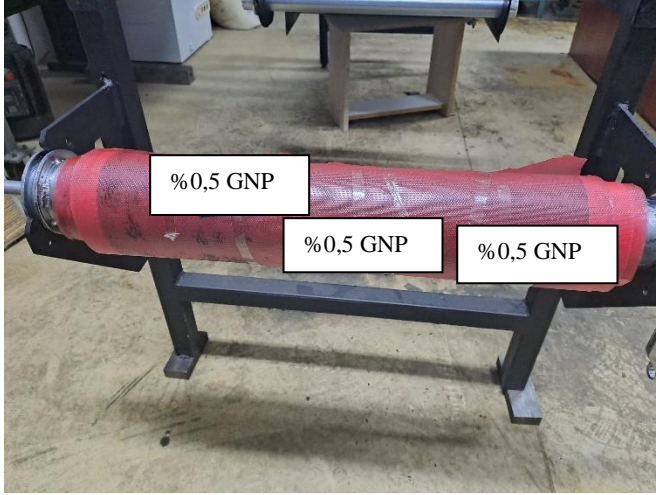
Resim 4.9. Emprenye sonrası karbon elyaf kumaşın mandrellerden geçirilmesi



Resim 4.10. Ayırıcı filmlerle sarım işlemi



Resim 4.11. Islak karbon elyaf kumaşın sarım mandreline ulaşması



Resim 4.12. Rulo prepreg görüntüsü

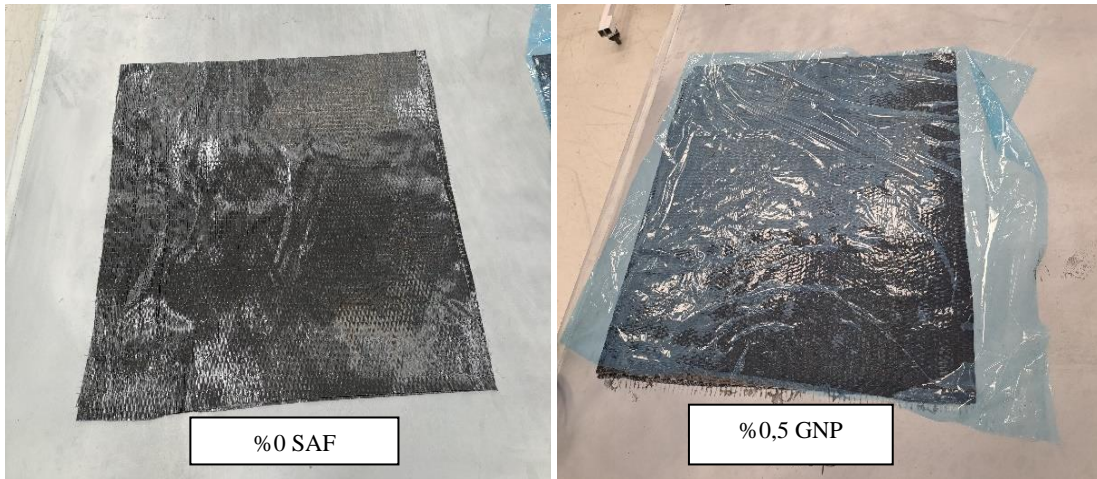
Laminat üretimi için prepeg numuneler 4 kat serim ve kalınlık 2mm olacak şekilde UD ve 0°/90° yönleri için kesilmiştir. Aşağıdaki resimlerde kesim ve serim aşamaları gösterilmiştir. Serim, laminat ve numune kesim işlemleri CES İleri Kompozit ve Savunma Teknolojileri firmasında gerçekleştirilmiştir.



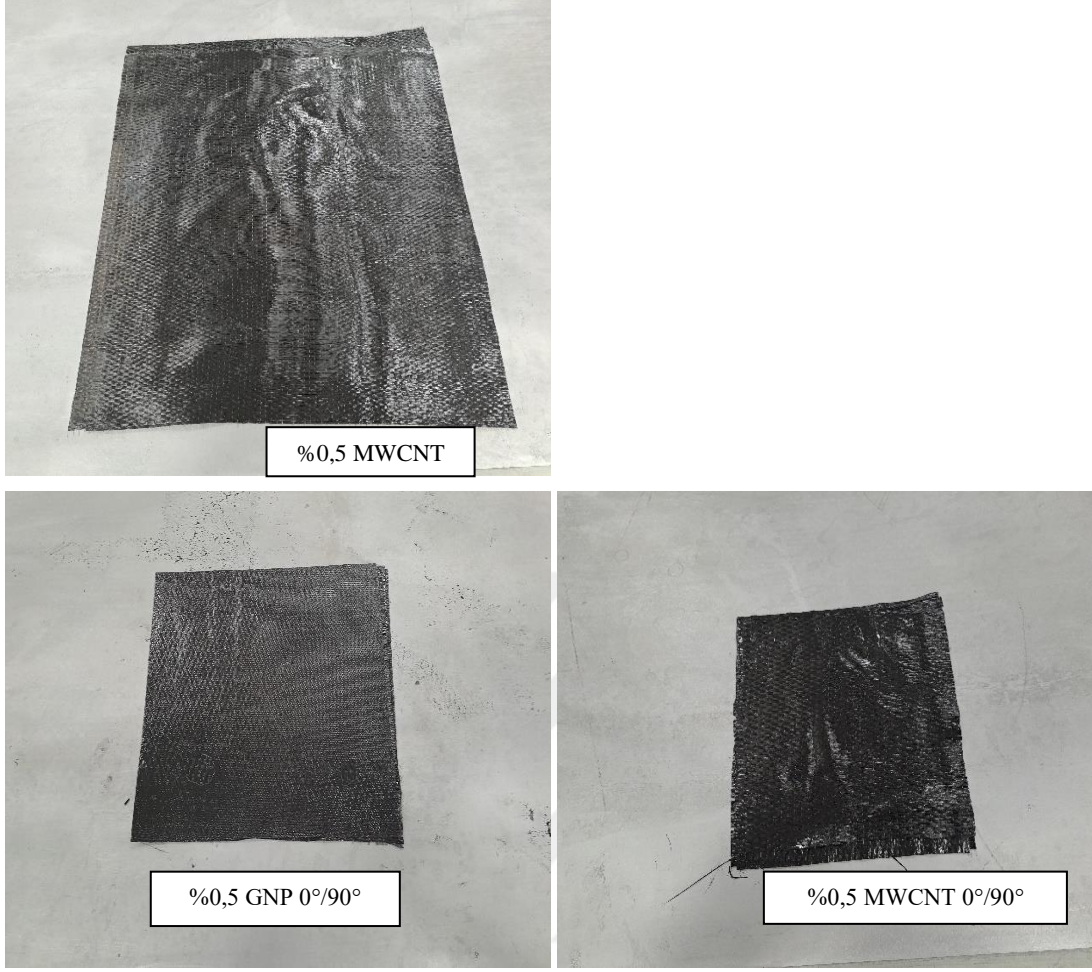
Resim 4.13. Prepeg numune serim için kesim işlemleri



Resim 4.14. Kesilen UD numunelerin görüntüsü



Resim 4.15. Serilen UD ve 0°/90° numuneler

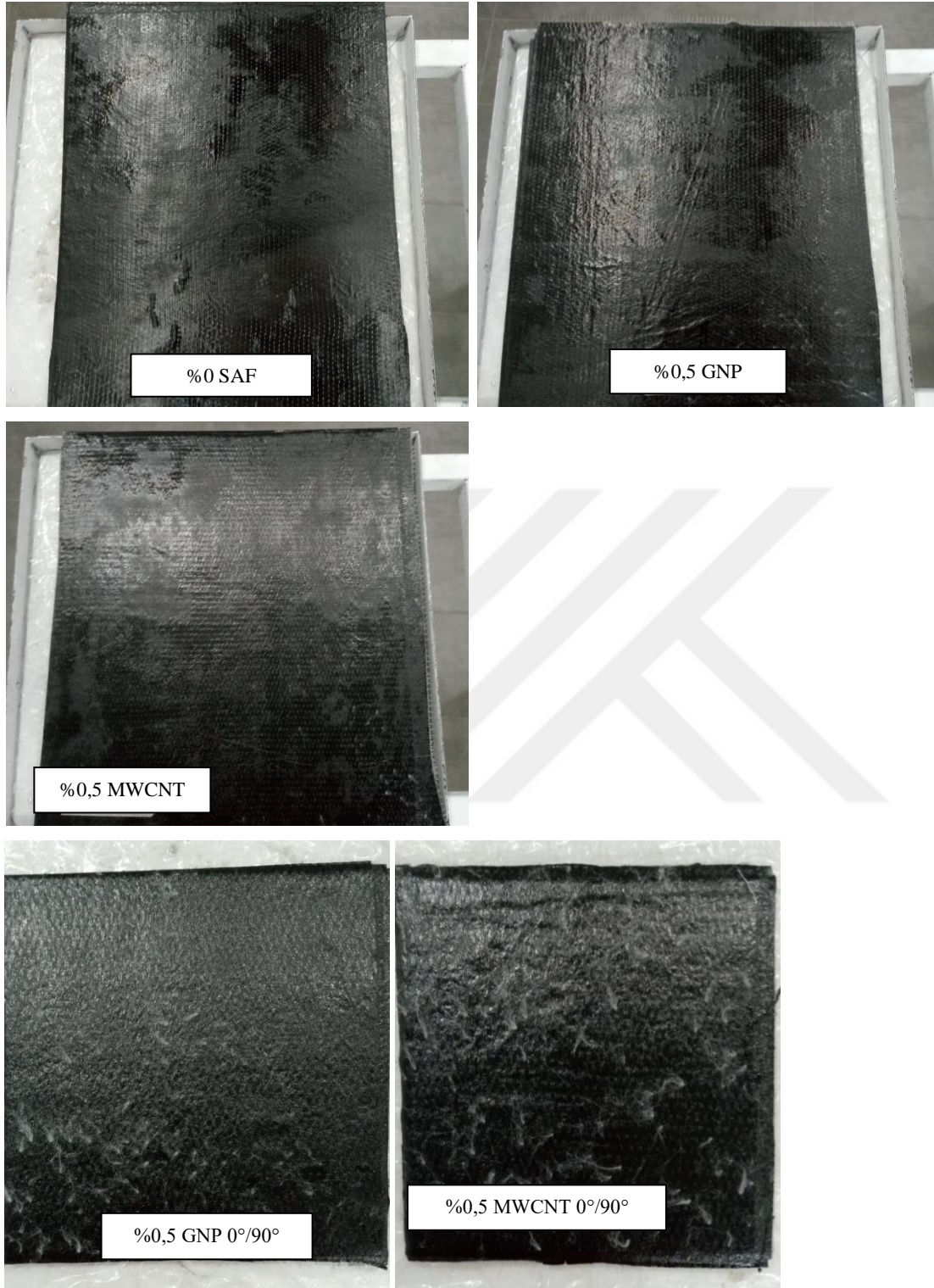


Resim 4.15. (devam) Serilen UD ve 0°/90° numuneler

Serim için 2 mm kalınlığında olacak şekilde kesilen prepreg numuneler 4 kat serim işleminin ardından otoklavda 120 °C sıcaklıkta 2 saat kürlenmeye alınmıştır. Aşağıda tanımlanan şekilde otoklavda parametreler uygulanmıştır.

- 120 °C'ye dakikada 1 derece ile ramp up
- 120 °C 90 dakika bekleme
- 120 °C'den oda sıcaklığına (25 °C) 1 derece ile ramp down

Kürlenmiş prepreg numunelerin görüntüleri aşağıdaki resimlerde gösterilmiştir.

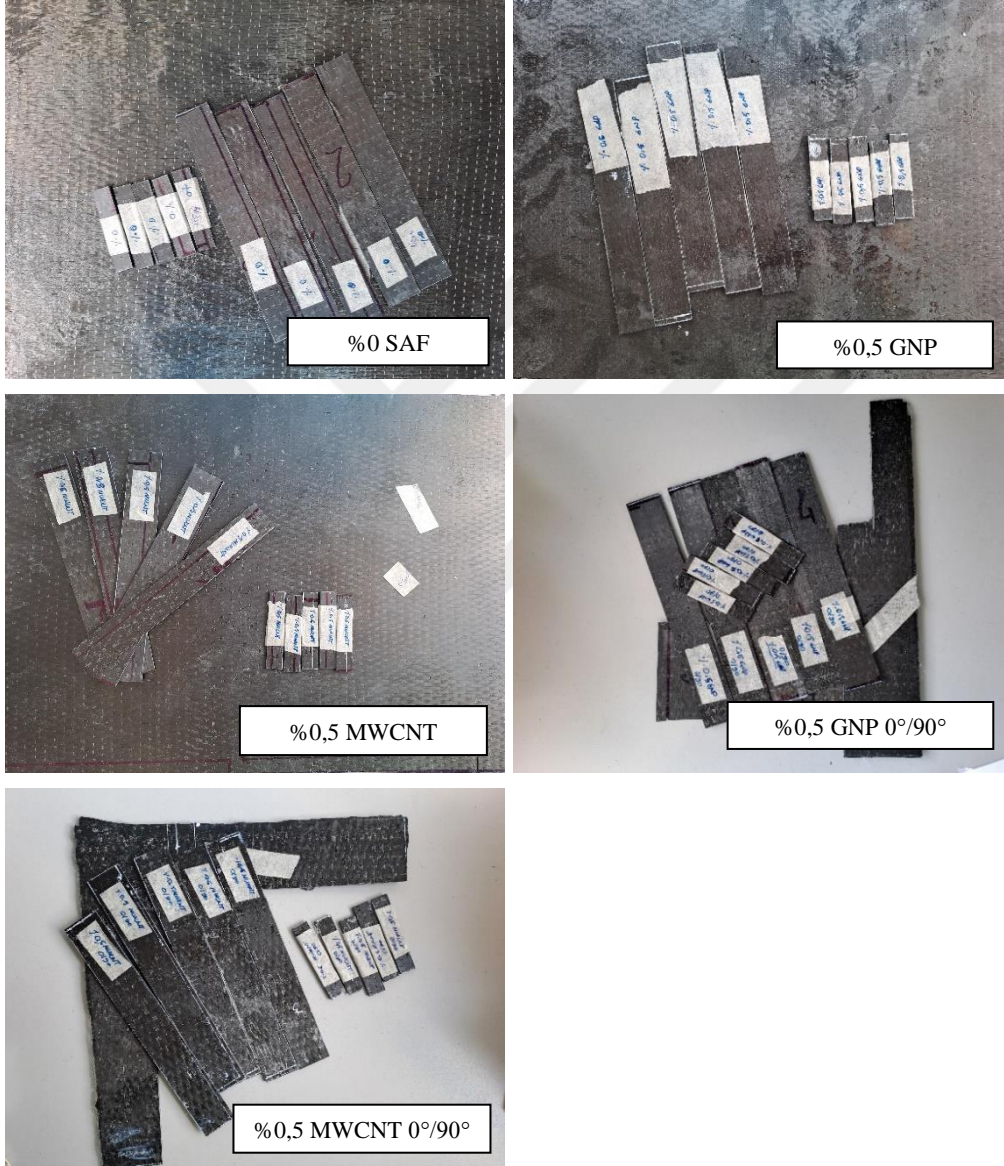


Resim 4.16. %0; %0,5 GNP ve %0,5 MWCNT içeren prepregler

Kürlenmiş numunelerde gözlemlenen polimerleşmenin sağlamlığı yönünden reçine eksikliği ya da fazlalığı görülen bölgeler için üretici firmanın görüşü doğrultusunda 90 °C sıcaklıkta 2 saat etüv fırında post kür işlemine tabi tutulmuştur.

4.3. Deney Numunelerinin Hazırlanışı

Kürlenmiş prepreg kompozit numuneler mekanik karakterizasyon testleri için ASTM standartları boyutunda su jeti ile kesilerek hazırlanmıştır. Kesilen numunelerin görüntüleri Resim 4.17’de gösterilmiştir.



Resim 4.17. Hazırlanmış deney numunelerinin görüntüleri

4.4. Çekme Testi

Üretilen nanopartikül katkılı prepreg kompozit malzemenin gerilmeye karşı mekanik özelliklerini belirlemek için numunelere ASTM D3039 standartında Çekme Testi

yapılmıştır. Testte kullanılan numuneler standartta belirtilen ölçülere uygun olarak hazırlanmıştır. Numunelerin ölçüleri Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Çekme testi numune ölçüleri

Karışım Oranları	Genişlik (mm)	Toplam uzunluk (mm)
Numune-1 %0 (Saf)	25	175
Numune-2 %0,5 GNP UD	25	175
Numune-3 %0,5 MWCNT UD	25	175
Numune-4 %0,5 GNP 0°/90°	25	175
Numune-5 %0,5 MWCNT 0°/90°	25	175

Numunelere standart gereği 2 mm/dak hızda İnstron marka 3369 seri test cihazı ile yaklaşık 2,2 kN gerilim uygulanmıştır. Çekme mukavemeti ve elastisite modülü değerleri Eş.1 ve 2’deki gibi hesaplanmıştır.

$$\sigma = F/A \quad (4.1)$$

σ : Çekme gerilmesi (MPa)

F : Kuvvet (N)

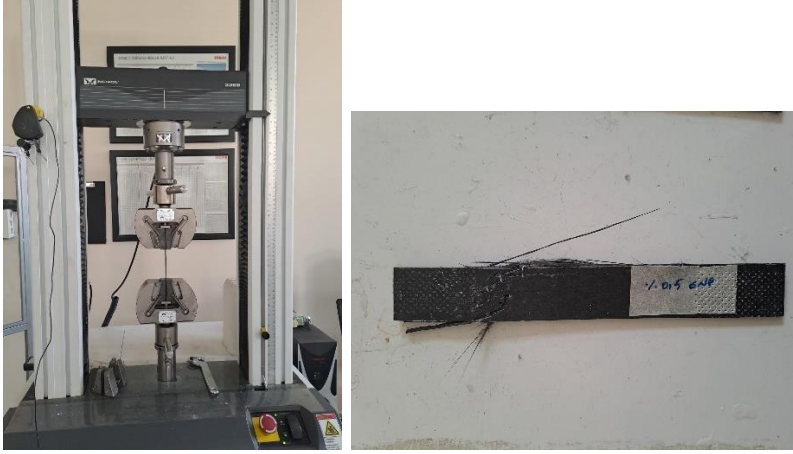
A : Alan (mm²)

$$E = \sigma/\varepsilon \quad (4.2)$$

E : Elastisite Modülü (GPa)

σ : Çekme gerilmesi (MPa)

ε : Çekme gerinimi (mm/mm)



Resim 4.18. Çekme deneyi cihazı ve kırılma yüzeyi

4.5. Üç Nokta Eğme Testi

Üretilen nanopartikül katkılı kompozit malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini belirlemek için numunelere ASTM D790 standartında Üç Nokta Eğme Testi yapılmıştır. Testte kullanılan numuneler standarda uygun olarak hazırlanmıştır. Numunelerin ölçüleri aşağıdaki Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Üç nokta eğme testi numune ölçüleri

Karışım Oranları	Genişlik (mm)	Toplam uzunluk (mm)
Numune-1 %0 (Saf)	12,7	60
Numune-2 %0,5 GNP UD	12,7	60
Numune-3 %0,5 MWCNT UD	12,7	60
Numune-4 %0,5 GNP 0°/90°	12,7	60
Numune-5 %0,5 MWCNT 0°/90°	12,7	60

Numunelere standart gereği 2 mm/dak hızda Instron marka 3369 seri test cihazı ile kuvvet uygulanmıştır. Destek açıklığı 32 mm olarak belirlenmiştir. Bu test yöntemi ile kiriş yüklemesi altında kompozit numunelerin eğilme gerilmeleri Eş.3’te gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (4.3)$$

σ = Orta noktada kiriş yüzeyindeki gerilme (N/mm²)

P = Yük sehım eğrisinin herhangi bir noktasındaki kuvvet (N)

L = İki destek arası mesafe (mm)

b = Kiriş genişliği (mm)

d = Kirişin yüksekliği (mm)



Resim 4.19. Üç nokta eğme deneyi cihazı

4.6. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Analizi

Numunelerin mikro ve nano ölçekli morfolojisini analiz etmek, karbon elyaf-epoksi ara yüzey etkileşimlerinin incelenmesi, nanopartiküllerin matris içerisindeki dağılımının belirlenmesi için SEM Analizi yapılmıştır. Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan JEOL JSM-6060LV marka SEM cihazı kullanılmıştır. Kullanılan SEM cihazı Resim 4.20'de gösterilmiştir.



Resim 4.20. SEM cihazı

4.7. Ağırlık Analizi

Yüzdesel elyaf/matris ağırlık ve hacim oranlarını belirlemek için ASTM D3171 standardına uygun olarak kül fırınında 550 °C'de 1,5 saat süre boyunca yakma (burn-off) testi yapılmıştır. Kullanılan kül fırını Resim 4.21'de gösterilmiştir. Yakma işleminin ardından üzerlerinden epoksi reçine uçurulan karbon elyaflar hassas terazi ile tartılarak standartta tanımlanan aşağıdaki eşitlikler kullanılarak parametreler hesaplanmıştır.

$$W_R = (M_f/M_i) * 100 \quad (4.4)$$

W_R = Elyaf ağırlık oranı (%)

M_f = Yanma sonrası ağırlık (g)

M_i = Yanma öncesi ağırlık (g)

$$V_r = (M_f/M_i) * 100 * \rho_c / \rho_r \quad (4.5)$$

V_r = Reçine hacim oranı (%)

ρ_c = Kompozitin yoğunluğu (g/cm³)

ρ_r = Elyafın yoğunluğu (g/cm³)

$$W_m = (M_i - M_f) / M_i * 100 \quad (4.6)$$

W_m = Reçine ağırlık oranı (%)

$$V_m = (M_i - M_f) / M_i * 100 * \rho_c / \rho_m \quad (4.7)$$

V_m = Reçine hacim oranı (%)

ρ_m = Reçinenin yoğunluğu (g/cm^3)

$$V_v = 100 - (V_r + V_m) \quad (4.8)$$

V_v = Boşluk hacim oranı (%)



Resim 4.21. Kül fırınında yakma işlemi



5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Nanopartikül katkılı karbon elyaf takviyeli 0° UD (Tek Yönlü) ve $0^\circ/90^\circ$ prepreg serim kombinasyonlarında üretilen numuneler için mekanik karakterizasyon özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çekme ve üç nokta eğilme testleri yapılmıştır.

5.1. Çekme Testi Sonuçları

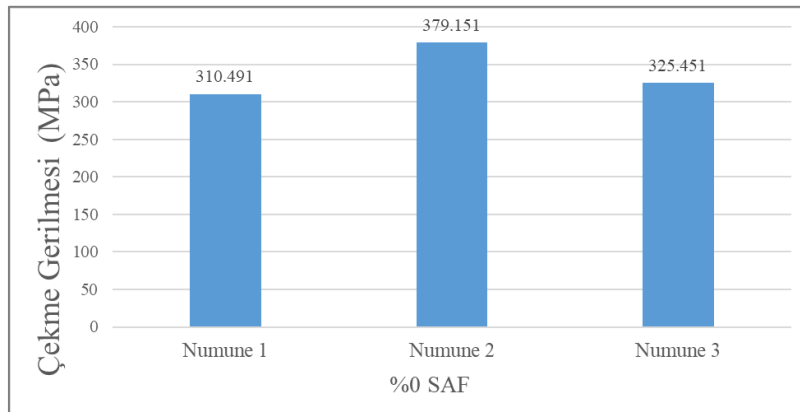
Hazırlanan numunelere 6 tekrar test uygulandıktan sonra ortalama çekme deneyi sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Çekme deneyi sonuçları

Numune	Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Birim Uzama (%)
Numune -1 %0 (Saf)	338,364	37,17	9,103
Numune-2 %0,5 GNP UD	423,332	45,14	9,452
Numune-3 %0,5 MWCNT UD	369,711	38,39	9,629
Numune-4 %0,5 GNP $0^\circ/90^\circ$	342,111	38,10	8,978
Numune-5 %0,5MWCNT $0^\circ/90^\circ$	325,053	35,60	9,129

Numunelere ait çekme deneyi grafikleri aşağıda şekillerde verilmiştir.

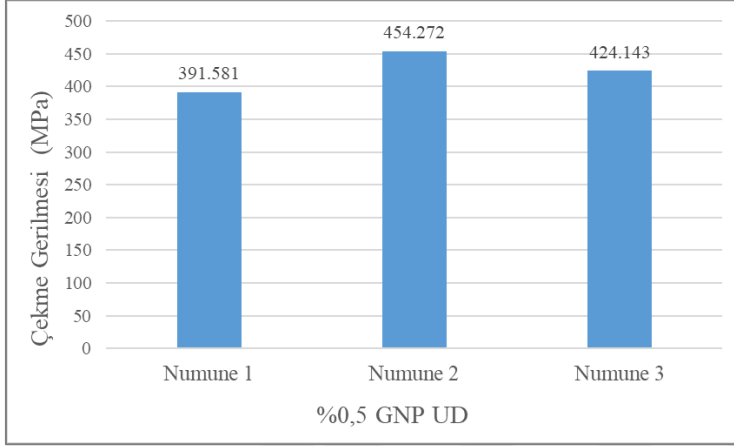
Katkısız karbon elyaf takviyeli prepreg numuneye ait 3 farklı Gerilim-Uzama grafiği Şekil 5.1’deki gibidir.



Şekil 5.1. %0 Katkısız prepreg gerilim-birim uzama diyagramı

Şekil 5.1’de görüldüğü üzere katkısız prepreg numune için en yüksek gerilim değeri 379,151 MPa olmuştur.

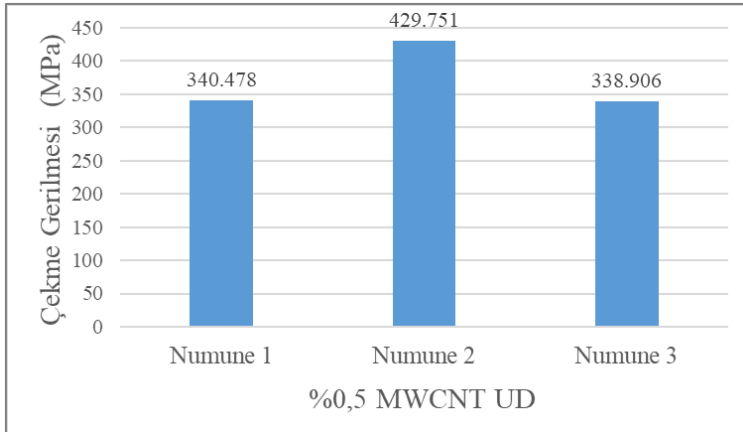
%0,5 Grafen katkılı prepreg numuneye ait 3 farklı Gerilim-Uzama grafiği Şekil 5.2’deki gibidir.



Şekil 5.2. %0,5 GNP katkılı prepreg gerilim-birim uzama diyagramı

Şekil 5.2’de görüldüğü üzere %0,5 Grafen katkılı prepreg numune için en yüksek gerilim değeri 454,272 MPa olmuştur. Katkısız prepreg numuneye göre grafen katkısı çekme gerilimini % 19,81 oranında artırmıştır.

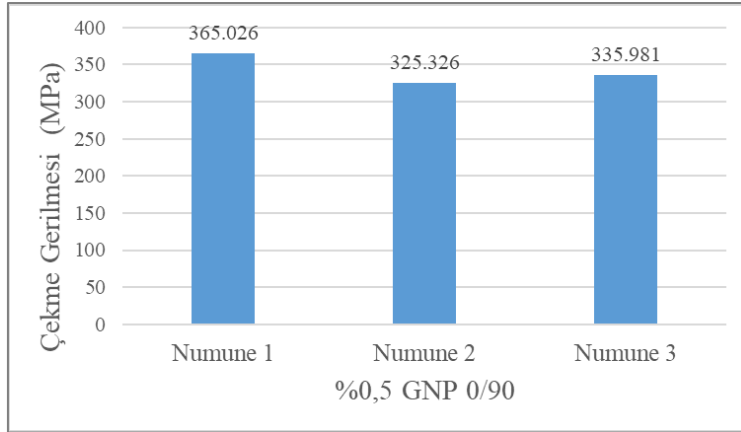
%0,5 Çok duvarlı karbon nanotüp katkılı prepreg numuneye ait 3 farklı Gerilim-Uzama grafiği Şekil 5.3’teki gibidir.



Şekil 5.3. %0,5 MWCNT katkılı prepreg gerilim-birim uzama diyagramı

Şekil 5.3' de görüldüğü üzere %0,5 çok duvarlı karbon nanotüp katkılı prepreg numune için en yüksek gerilim değeri 429,751 MPa olmuştur. Katkısız prepreg numuneye göre karbon nanotüp katkısı çekme gerilimini % 13,34 oranında artırmıştır.

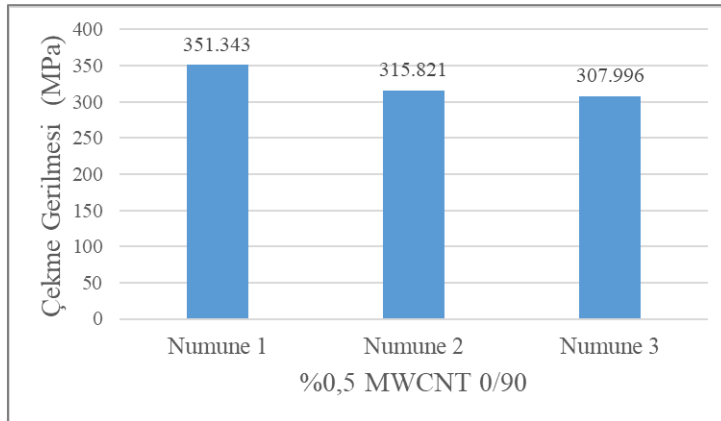
%0,5 Grafen katkılı 0°/90° prepreg numuneye ait 3 farklı Gerilim-Uzama grafiği Şekil 5.4'teki gibidir.



Şekil 5.4. %0,5 GNP katkılı 0°/90° prepreg gerilim-birim uzama diyagramı

Şekil 5.4'te görüldüğü üzere %0,5 grafen katkılı ve serim yönü 0°/90° olan prepreg numune için en yüksek gerilim değeri 365,026 MPa olmuştur. Katkısız prepreg numuneye göre çekme geriliminde % 3,86 oranında azalma meydana gelmiştir.

%0,5 Çok duvarlı karbon nanotüp katkılı 0°/90° prepreg numuneye ait 3 farklı Gerilim-Uzama grafiği Şekil 5.5'teki gibidir.



Şekil 5.5. %0,5 MWCNT katkılı 0°/90° prepreg gerilim-birim uzama diyagramı

Şekil 5.5'te görüldüğü üzere %0,5 çok duvarlı karbon nanotüp katkılı ve serim yönü $0^\circ/90^\circ$ olan prepreg numune için en yüksek gerilim değeri 351,343 MPa olmuştur. Katkısız prepreg numuneye göre çekme geriliminde % 7,33 oranında azalma meydana gelmiştir.

Çekme testi sonuçlarına göre grafen katkısı katkısız prepreg numuneye göre çekme mukavemetinde %19,81 oranında artış sağlamıştır. Çok duvarlı karbon nanotüp katkısında ise grafene nazaran katkısız prepreg numuneye göre %13,34 oranında artış olduğu ortaya çıkmıştır. Grafene göre nispeten mukavemet değerinde karşılaşılan bu düşüş epoksi reçine içerisinde karbon nanotüpün prepreg makinesi ile sarım esnasında mandrellerden eşit sıkıştırmanın sağlanamaması sonucu homojen dağıtılamaması [3] ve çökelmelerin meydana gelmesi ile ilişkilendirilebilir.

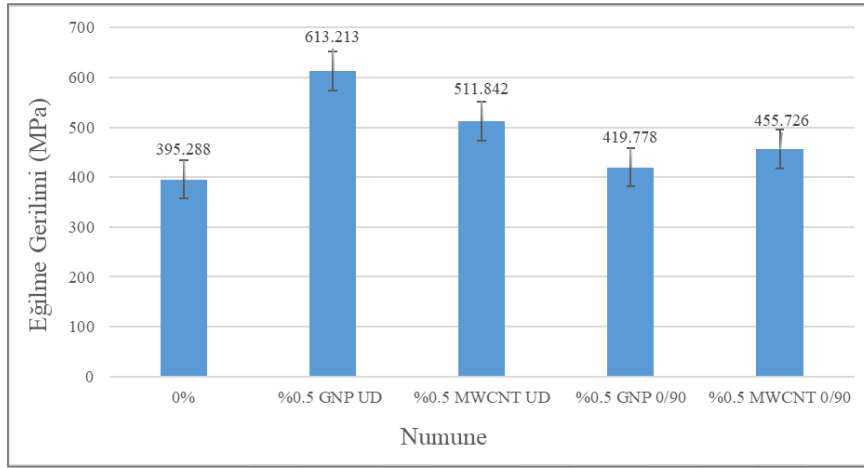
$0^\circ/90^\circ$ serim yönüyle üretilen prepreg numunelerde katkısız UD numuneye göre çekme mukavemetinde her iki nanopartikül katkısında da azalma meydana geldiği görülmüştür. Bu azalma serim esnasında, reçinenin homojen dağılamaması, zayıf yapışma bölgeleri oluşması, karbon elyafların kırışması veya kayması ve kütleme şartları ile ilişkilendirilebilir.

Çizelge 5.1'de de görüldüğü gibi elastisite modülü katkısız prepreg numunede ortalama 37,17 GPa olduğu görülmüştür. %0,5 Grafen ve çok duvarlı karbon nanotüp katkısı ile elastisite modülü sırasıyla 45,14 GPa ve 38,39 GPa değerine yükselmiştir. Katkısız prepreg numuneye göre grafen nanopartikülü %21,44'lük artış sağlamıştır.

5.2. Eğilme Testi Sonuçları

Hazırlanan numunelere ait ortalama eğilme gerilimi sonuçları Şekil 5.6'daki grafikte verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, en yüksek eğilme gerilimi ağırlıkça %0,5 GNP (Grafen) katkılı prepreg numunede olduğu görülmüştür. Katkısız numuneye göre, grafen nanopartikül katkısı eğilme gerilimini %55,13 oranında artırmıştır. Ağırlıkça %0,5 MWCNT (Çok duvarlı karbon nanotüp) katkılı prepreg numunede ise eğilme gerilimi katkısız numuneye göre %29,48 oranında artış sağlanmıştır. $0^\circ/90^\circ$ serim yönlü numunelerde en yüksek eğilme gerilimi %0,5 MWCNT katkılı numunede olmuştur. Katkısız numuneye göre eğilme gerilimini %15,28 oranında artırmıştır.

Genel olarak sonuçlar incelendiğinde, her iki nanopartikül katkısının da eğilme geriliminde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Partiküllerin epoksi reçine içerisinde homojen dağılımının sağlanması olumlu etkinin sebeplerinden biridir. Ağırlıkça aynı oranlarda ilave edilen grafen ve çok duvarlı karbon nanotüp partikülleri birbirlerine göre farklı oranlarda artışlar doğurmuştur. Karbon nanotüpün epoksi matrisin viskozitesinin artırması sonucu çökelmelerin meydana gelmesi eğilme gerilimi üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir.



Şekil 5.6. Üç nokta eğme testi sonuçları

5.3. SEM Analizi Sonuçları

Çekme testi sonrası numunelerin kırılma bölgelerinden görüntüler alınarak yüzey morfolojileri SEM analizi ile incelenmiştir. Numunelerin yüzeylerinin iletkenliğinin sağlanması için Au-Pd kaplama yapılmıştır. Kullanılan kaplama cihazı Resim 5.1’de gösterilmiştir.



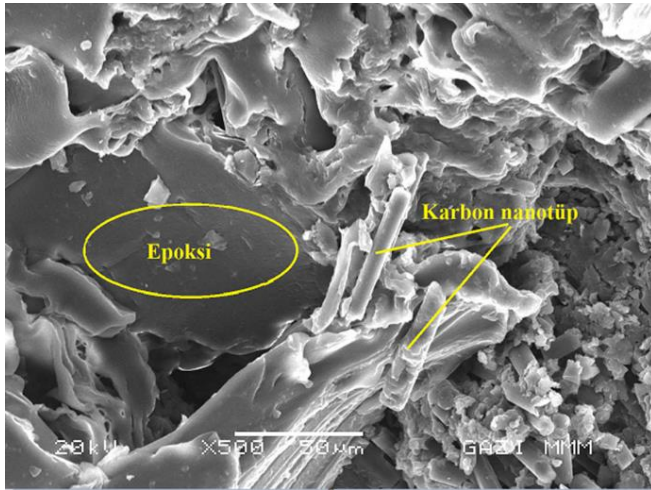
Resim 5.1. Au-Pd kaplama cihazı

Ağırlıkça %0,5 GNP (Grafen) ve %0,5 MWCNT (Çok duvarlı karbon nanotüp) içeren karbon elyaf takviyeli prepreg kompozit malzemelerin çeşitli büyütmelelerdeki SEM görüntüleri Resim 5.2 ve Resim 5.3'te verilmiştir.



Resim 5.2. %0,5 GNP numunesine ait kırılma bölgesi SEM görüntüsü

Resim 5.2'deki pürüzlü ve heterojen yüzey, grafen katkılı numunenin karmaşık bir kırılma mekanizmasına sahip olduğunu göstermektedir. Karbon elyaflar tam bir kopma ile epoksi matristen ayrılmıştır. Grafen nanopartiküllerin bazı bölgelerde homojen dağılmaması yığılma bölgelerini oluşturarak lokal zayıflıklara ve kopma bölgelerinin gelişmesine neden olduğu görülmektedir. GNP'lerin zayıf dağılım durumu ve matris içinde aglomeratların oluşumu ile birlikte etkili en-boy oranı azalmış ve dolayısıyla kompozitin kırılma özellikleri olumsuz etkilenmiştir [11].



Resim 5.3. %0,5 MWCNT numunesine ait kırılma bölgesi SEM görüntüsü

Resim 5.3'te çok duvarlı karbon nanotüp katkılı numunenin çekme testi sonrası epoksi matrisin katmanlı yapı halindeki görünümü, yarı sünek bir kırılma mekanizmasının oluştuğunu göstermektedir. Çok duvarlı karbon nanotüplerin ise aglomere olarak kopuş gerçekleştirdiği görülmektedir. Van der Waals kuvveti etkileşimleri, karbon nanotüplerin geniş yüzey alanı ve epoksi gibi matrislerle tipik olarak yüksek uyumsuzluk ile birleştiğinde kümülatif olarak aglomerasyona yol açar [5]. Bu aglomere bölgeleri karbon nanotüp-epoksi matris arasındaki ara yüzey bağının zayıflayarak kopmaya neden olmasını sağlamaktadır. MWCNT aglomerasyonu çatlak sapmasına neden olan bir ağ yapısı oluşturmaktadır [6].

5.4. Ağırlık Analizi Sonuçları

%0,5 GNP (Grafen) katkılı Numune-1 ve %0,5 MWCNT (Çok duvarlı karbon nanotüp) katkılı Numune-2'nin ağırlıkları ölçülmüştür. Numune-1'in ağırlığı 1,8216 gram ölçülürken, Numune-2'nin ağırlığı 1,7466 gram olarak ölçülmüştür.

Hassas terazide yapılan ağırlık ölçümleri numuneler için ortalama olarak Çizelge 5.2'te verilmiştir.

Çizelge 5.2. Ağırlık ölçüm sonuçları

	%0.5 GNP	%0.5 MWCNT
Ortalama Ağırlık Yanma Öncesi (g)	1,8216	1,7466
Ortalama Ağırlık Yanma Sonrası (g)	1,0017	0,9414

Çizelge 5.3. Yakma (burn-off) testi ile belirlenen oranlar

Numune	Elyaf Ağırlık Oranı (%)	Reçine Ağırlık Oranı (%)	Elyaf Hacim Oranı (%)	Reçine Hacim Oranı (%)	Boşluk Hacim (%)
%0.5 GNP	54,990	45,009	37,344	46,779	15,877
%0.5 MWCNT	53,899	46,101	34,931	45,725	19,343

Yakma testi sonrası standartta belirtilen eşitliklerden hesaplanan oranlar Çizelge 5.3'te verilmiştir. Elyaf/reçine ağırlık oranları incelendiğinde her iki nanopartikül katkılı kompozit malzemenin değerlerinin yakın olduğu görülmektedir. Elyaf/reçine hacim oranları incelendiğinde çok duvarlı karbon nanotübün epoksi reçinenin viskozitesini artırdığı,

grafenin daha dengeli etkileşimde olup karbon elyafın daha iyi yerleştiği sonucu elde edilmektedir. %0,5 GNP (Grafen) katkılı kompozit numune daha düşük boşluk hacim oranına sahip olduğundan dolayı daha iyi mekanik özelliklere ulaşmıştır.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Nanopartikül katkılı karbon elyaf takviyeli prepreg malzemelerin kullanımında etkili sonuçların alınabilmesi için nanopartiküllerin matris tabakası içerisinde homojen dağılımı ile birlikte elyaf/matris oranının kontrol edilebilir olması ve bu sayede karbon elyafın tam ıslatılabilir durumunun sağlanması gerekmektedir.

Karbon elyaf kumaşlar üzerinde homojen dağılımın kontrol edilebilir olması sağlanarak nanopartikül katkılı karbon elyaf takviyeli prepreg malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirmek için yapılan bu çalışmada epoksi reçinesine ağırlıkça belirli oranlarda Grafen ve Çok duvarlı karbon nanotüp ilave edilerek karbon elyaf takviyeli prepreg ve onun kompozitleri üretilmiştir. Nanopartiküllerin epoksi reçine içerisinde homojen dağılımını ve karbon elyafın tam ıslatılmasını sağlamak amacıyla tasarlanarak imal edilen prepreg sarım makinesi ile üretim yapılmıştır. Ağırlıkça %0 ve %0,5 katkı oranlarında iki farklı serim yönünde 5 adet numune türü üretilmiştir.

Numunelerin mekanik karakterizasyonu için çekme ve üç nokta eğme testi ile kırılma bölgelerinin yüzey morfolojisinin incelenmesi için SEM analizi yapılmıştır. Yakma (burn-off) testi ile elyaf/reçine ağırlık ve hacim oranları belirlenmiştir.

Serim yönü UD olan numunelerin çekme testinden elde edilen verilere göre en iyi çekme gerilimi %0,5 GNP (Grafen) katkılı numunede 423,332 MPa değerinde olduğu görülmüştür. Bu numunede katkısız reçineye göre çekme gerilmesi %19,81 oranında artmıştır. Elastisite modülü değerleri incelendiğinde en yüksek değer 45,14 GPa ile %0,5 GNP (Grafen) katkılı numunede elde edilirken bu değer katkısız elastisite modülünden %21,44 daha fazla çıkmıştır. Çok duvarlı karbon nanotüp katkısında ise grafene nazaran katkısız prepreg numuneye göre çekme gerilmesi %13,34 oranında artarak literatüre karşın [5] artış gerçekleşmiştir.

Serim yönü 0°/90° olan numuneler incelendiğinde 342,11 MPa değeri ile en yüksek çekme gerilmesi %0,5 GNP (Grafen) katkılı numunede elde edildiği görülmüştür. Elastisite değerleri incelendiğinde en yüksek değer 38,10 GPa ile %0,5 GNP (Grafen) katkılı

numunede elde edilirken bu değer katkısız elastisite modülü değerini %2,5 oranında geliştirmiştir.

Çekme deneyi sonrası kırılma bölgelerinden alınan kesitlerden SEM görüntüleri ile incelendiğinde GNP (Grafen) ve MWCNT (Çok duvarlı karbon nanotüp) katkılı numunelerin kopma davranışını doğrulayan yüzey morfolojisinin geliştiği görülmüştür. Nanopartiküllerin epoksi matris içerisinde homojen dağıtılamaması sonucu oluşan aglomerasyonlardan dolayı kopma bölgeleri gelişmiştir. GNP (Grafen) katkılı numunede tam kopma meydana gelirken, MWCNT (Çok duvarlı karbon nanotüp) katkılı numunede yarı sünek bir kopma davranışı ortaya çıkmıştır.

Üç nokta eğme testinden elde edilen verilere göre en yüksek eğilme gerilim değerleri UD serim yönlü numunelerde %0,5 GNP (Grafen)'de ve 0°/90° serim yönlü numunelerde ise %0,5 MWCNT (Çok duvarlı karbon nanotüp) numunelerde olduğu görülmüştür. Katkısız numuneye göre eğilme gerilimi artışı sırasıyla %55,13 ve %15,28 oranında olmuştur.

Çok duvarlı karbon nanotüp katkısı hem çekme hem de eğilme gerilimi davranışında katkısız numuneye göre gelişim göstermiştir. Ancak grafene nazaran topaklanmaya daha eğilimli olan yapısından dolayı en yüksek değerleri sağlayamamıştır [2].

Yakma (burn-off) testi sonrası elde edilen verilere göre %0,5 çok duvarlı karbon nanotüp katkısı epoksi reçinenin viskozitesini artırarak kompozit malzemedeki reçine oranını artırmıştır. %0,5 grafen katkısı ise karbon nanotüpe göre daha dengeli elyaf/reçine oranına sahip olup, elyafın daha iyi yerleşmesini sağlamıştır. Boşluk hacim oranının %0,5 grafen katkılı kompozit malzemedeki daha düşük olması mekanik özelliklerinin artmasını sağlamıştır. Literatürde yer alan tambur tipi sarım ve elle yatırma metodunda elde edilen değerlere yakın elyaf/reçine ağırlık ve hacim oranı elde edilmiştir [5,15].

6.2. Öneriler

Deneyisel alışmalar sonucunda %0,5 GNP (Grafen) ve MWCNT (Çok duvarlı karbon nanotüp) katkılı karbon elyaf takviyeli prepreg ve onun kompozit malzemelerinin prepreg sarım makinesiyle üretilerek mekanik karakterizasyon özelliklerinin iyileştirildiği görülmektedir.

- SEM analizi görüntülerinde de görüldüğü gibi nanopartiküllerin reçine içerisindeki homojen dağılımlarının sağlanamamasıyla gelişen aglomerasyonların (parçacık birleşmelerinin) önüne geçilerek çalışma genişletilebilir.
- Nanopartiküllerin reçine içerisine katkı oranları iyileştirilebilir veya yüzey modifikasyon uygulamaları ile reçine/partikül ara yüzey bağ oluşumları artırılabilir.
- Prepreg sarım parametreleri (elyaf kumaşın türü, elyaf kumaşın gerginliği, çift mandrellerden sıkıştırma oranı) optimize edilerek üretim süreci iyileştirilebilir.
- Çalışma sıcaklığı aralığı nihai kompozit malzemenin genel mukavemeti üzerinde etkilidir. Daha ileriki çalışmalar için makineye entegre bir ısıtma sistemi eklenerek çalışmalar yapılabilir.
- Prepreg sarım makinesi ile termoplastik esaslı prepreg ve onun kompozit malzemeleri üretimi nanopartiküller yardımıyla zenginleştirilerek çalışma genişletilebilir.



KAYNAKLAR

1. Mazumdar, S.K. (2002). *Composites Manufacturing Materials, Product, and Process Engineering*. Florida: CRC Press.
2. Zhang,J.,Ju, S., Jiang, D., Peng, H.(2013), Reducing dispersity of mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites by introducing multi-walled carbon nanotubes, *Composites: Part B*, 371-376.
3. Herceg, T.M., Abidin,M.S.Z., Greenhalgh, E., Shaffer, M., Bismarck, A.(2016), Thermosetting hierarchical composites with high carbon nanotube loadings: En route to high performance, *Composites Science and Technology*, 127, 134-141.
4. Santos, R.M., Vale, D., Rocha, J., Martins, C., Mould, S.T., Rocha, N.(2019,February), Multiscale carbon fibre–reinforced polymer (CFRP) composites containing carbon nanotubes with tailored interfaces, *Fatigue Fract Eng Mater Struct.*, (42), 1521-1533.
5. Godara, A., Mezzo, L., Luizi, F., Warriar, A., Lomov, S.V., vanVuure, A.W., Gorbatikh, L., Moldenaers, P., Verpoest, I.(2009), Influence of carbon nanotube reinforcement on the processing and the mechanical behaviour of carbon fiber/epoxy composites, *Carbon*, (47), 2914-2923.
6. Wen, L., Shen, H., Chen, Z. (2023), Interlaminar Properties of Prepregs Reinforced with Multiwalled Carbon Nanotubes/Graphene Oxide, *Materials*, (16), 5285.
7. Acar, V., Erden, S., Sarıkanat, M., Seki, Y., Akbulut, H., Seydibeyoğlu, M.Ö.(2020,May), Graphene oxide modified carbon fiber prepregs: A mechanical comparison of the effects of oxidation methods, *eXPRESS Polymer Letters*, 14(12), 1106-1115.
8. Uz, Y.C.(2021), *Development And Characterization of Innovative Fiber Reinforced Prepregs And Their Composites Containing Functional Fillers*. Doktora Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir.
9. Siddiqui, N.A., Khan, S.U., Ma ,P.C, Li,C.Y, Kim, J.K.(2011), Manufacturing and characterization of carbon fibre/epoxy composite prepregs containing carbon nanotubes, *Composites: Part A*, 42,1412-1420.
10. Rafiee, M.A, Rafiee, J., Wang, Z., Song, H., Yu Z-Z., Koratkar, N.(2009), Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content, *American Chemical Society*, 3(12), 3884-3890.
11. Zafeiropoulou, K., Kostagiannakopoulou, C., Sotiriadis ,G., Kostopoulos, V. (2020), A Preliminary Study of the Influence of Graphene Nanoplatelet Specific Surface Area on the Interlaminar Fracture Properties of Carbon Fiber/Epoxy Composites, *Polymers*,12, 3060.
12. Bakis, G., Wendel, J.F., Zeiler,R., Aksit, A., Häublein, M., Demleitner, M., Benra,J., Forero, S., Schütz,W., Altstädt,V.(2021),Mechanical Properties of the Carbon Nanotube Modified Epoxy–Carbon Fiber Unidirectional Prepreg Laminates, *Polymers*, 13, 770.

13. Ackermann, A.C., Demleitner, M., Guhathakurta, J., Carosella, S., Ruckdäschel, H., Simon, S., Fox, L., Middendorf, P. (2023), Mechanical, thermal, and electrical properties of amine- and non functionalized reduced graphene oxide/epoxy carbon fiber-reinforced polymers, *Polymer Composites*, 44, 4937-4954.
14. Shishevan, F.A., Acar, V., Akbulut, H., Seydibeyoğlu, M.Ö. (2015), *Reçinesine Grafen ve Karbon Nanotüp Eklenmesinin Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri ve Darbe Davranışları Üzerindeki Etkileri*, Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu, İzmir.
15. Korkmaz, N., Çakmak, E., Dayık, M. (2016), Doküman Karbon Elyaf Takviyeli Karbon Nano Tüp-Epoksi Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Termal Karakterizasyonu, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(2), 338-353.
16. Berkay, G., Erden, S. (2020), Investigation on the Synergetic Effects of Carbon Nanotube and Graphene Oxide on Carbon Fiber Reinforced Epoxy Prepreg Composites, *Tekstil Ve Konfeksiyon*, 30(2), 144-154.
17. Şahin, Yusuf. (2006). *Kompozit Malzemelere Giriş* (İkinci Baskı). Ankara: Seçkin Yayınevi, 28-34.
18. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). *Fundamentals of materials science and engineering*, Wiley, 164-185.
19. Umeco. (2012). *Introduction to Advanced Composites and Prepreg Technology*, 2-14.
20. Bayraktar, Ömer. (2016). *Öngerilimli Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Üretimi İçin Sistem Tasarımı, İmalatı ve Kompozit Malzeme Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
21. Yaman, N., Öktem, T., Seventekin, N. (2007), Karbon Liflerinin Özellikleri Ve Kullanım Olanakları, *Tekstil Ve Konfeksiyon*, 17(2), 90-95.
22. Parveez, B., Kittur, M.I., Badruddin, I.A., Kamangar, S. & Umarfarooq, M.A. (2022), Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review, *Polymers*, 14(22).
23. Karol, H. Barış. (2017). *Farklı Takviye Malzemeleri İlave Edilmiş Karbon Fiber Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışlarının Analiz Edilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
24. Gök, Zeliha. (2022). *Prepreg Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Cevabına Karbon Nanotüp Takviyesinin Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
25. Kandola, B., Magnoni, F., Ebdon, J.R. (2022), Flame retardants for epoxy resins: Application-related challenges and solutions, *J Vinyl Addit Technol*, 17-49.
26. Yıldız, F. (2019). *Silikon Modifiye Epoksi Reçinelerin Sentezi, Karakterizasyonu ve Uygulamaları*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.

27. Akter, M., Ozdemir, H., Bilisik, K.(2024),Epoxy/Graphene Nanoplatelet (GNP) Nanocomposites: An Experimental Study on Tensile, Compressive, and Thermal Properties, *Polymers*,16(11), 1483.
28. Doğan, H., Altın, Y., Bedeloğlu, A. (2021), Investigation of Properties Graphene Reinforced Epoxy Nanocomposites, *Journal of Polytechnic*, 24(4), 1719-1727.
29. Rakotomalala, M., S. Wagner, and Döring, M. (2010) . Recent developments in halogen free flame retardants for epoxy resins for electrical and electronic applications. *Materials*, 3(8),4300-4327.
30. Singh, N.P., Gupta, V.K., Singh, A.P. (2019), Graphene and carbon nanotube reinforced epoxy nanocomposites: A review, *Polymer*, 180, 121724.
31. Wetzel, B., Rosso, P., Hauptert, F., Friedrich, K. (2006), Epoxy nanocomposites – fracture and toughening mechanisms, *Engineering Fracture Mechanics*, 73, 2375–2398.
32. Bal, H. (2009). *Thermal and Mechanical Properties Of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastics*. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
33. Campbell, F.C. (2010). *Structural Composite Materials*. Ohio:ASM International, 64-75.
34. Kausar, A., Ahmad, I. (2023), Leading-Edge Polymer/ Carbonaceous Nano Reinforcement Nanocomposites- Opportunities for Space Sector, *Advances In Materials Science*, 23(4),78.
35. Jin, F.-L., Li, X., Park, S.-J. (2015), Synthesis and application of epoxy resins: A review, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 29, 1-11.
36. Ahmad, Z., Ansell, M. P., Smedley, D. (2010), Effect of nano- and micro-particle additions on moisture absorption in thixotropic room temperature cure epoxy-based adhesives for bonded-in timber connections. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 6(30), 448-455.
37. Jin, F.-L., Park, S.-J. (2012), Thermal properties of epoxy resin/filler hybrid composites. *Polymer Degradation and Stability*, 11(97), 2148-2153.
38. Morselli, D., Bondioli, F., Sangermano, M.,Messori, M. (2012), Photo-cured epoxy networks reinforced with TiO₂ in-situ generated by means of non-hydrolytic sol–gel process. *Polymer*, 2(53), 283-290.
39. Cam Elyaf Sanayii A.Ş. (2004), *CTP Teknolojisi*, 15-47.
40. Arıcasoy, O. (2006), *Kompozit Sektör Raporu*, İstanbul Ticaret Odası, 5-11.
41. Uçak, Y. M.(2019). *Tabakalı Karbon Elyaf Kompozit Malzemelerde Nano Boyutta SiC, NiO, Kil ve Karbon Tüp Partikül Katkılarının Mekanik Özelliklere Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

42. İnternet: Plastik Ambalaj. URL: <https://www.plastik-ambalaj.com/tr/plastik-ambalaj-makale/1085-ultra-yuekse-molekuel-agrkl-polietilenuhmwpe>, Son Erişim Tarihi: 110624
43. Gür, M., Turan, K.(2004), Fiber-Matriks Arayüzeyinde Gerilme Analizi, *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, Cilt: 3 Sayı: 1, 25 - 32.
44. İnternet: URL: https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/3_7.html, Son Erişim Tarihi: 250924.
45. Huang, S., Fu, Q., Yan, L., Kasal, B. (2021), Characterization of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials -A critical review, *Journal of Materials Research and Technology*,13,1441-1484.
46. Erden, S.(2009). *Karbon Fiberlerden İmal Edilen Kompozit Yapılarda, Fiber Yüzey İşlemlerinin Fiber, Ara Bölge Ve Kompozit Yapı Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,İzmir.
47. Erden S. and Yıldız H., 2008, Karbon fiber hidrofilitésinin plazma oksidasyonu ile artırılması, *12th International Materials Symposium*, 693-70.
48. Hou, Y.,Sun, T. (2013), Wettability Modification of Polyacrylonitrile (PAN)-Based High Modulus Carbon Fibers with Epoxy Resin by Low Temperature Plasma, *The Journal of Adhesion*, 89, 192-204.
49. Xu, Z., Chen, L., Huang, Y., Li, J., Wu, X., Li, X., J, Y. (2008), Wettability of carbon fibers modified by acrylic acid and interface properties of carbon fiber/epoxy, *European Polymer Journal*, 44, 494-503.
50. Kumdere, M.(2020). *Tabakalı Prepreg Kompozitlerde Karbon Nanotüp Takviyesi ile Mekanik Özelliklerinin Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
51. İnternet: Turkchem. Prepreg.URL: <https://www.turkchem.net/prepreg.html>. Son Erişim Tarihi: 08.07.2024.
52. İnternet: Hexcel Prepreg Technology. URL: <https://www.hexcel.com/>. Son Erişim Tarihi: 16.05.2024.
53. Siochi, E.J., Harrison, J.S. (2015), Structural nanocomposites for aerospace applications, *Mrs Bullein*, 40, 829-835.
54. Hayes, B.S., Seferis, J.C. (1997), The effect of fabric tension and the number of impregnation rollers on woven fabric prepreg quality and cured laminates, *Composites Part A*, 791-799.
55. Palardy-Sim, M. (2016), *Evaluation and Impact of the Degree of Impregnation of Uncured Out-of-Autoclave Prepreg*, McGill University.
56. Çoğal, S. (2022), İki-Boyutlu Nanomalzemeler: Özellikleri, Sentez Yöntemleri ve Uygulama Alanları Üzerine Genel Bir Bakış, *Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi*, 48 (2), 63-71.

57. Cheng,H-M.,Du,J.(2012). The Fabrication, Properties, and Uses of Graphene/Polymer Composites, *Macromolecular Chemistry and Physics*, 213, 1060-1077.
58. İnternet: 2D Graphene? URL: <https://3dprinting.com/>. Son Erişim Tarihi: 20.05.2024
59. Şükür, E. F. (2019), *Korozif Ortamın Grafen Katkılı Bazalt/Epoksi Nanokompozitlerin Mekanik Ve Aşınma Özelliklerine Etkisi*, Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
60. Brownson, D.A.C., Banks, C.E. (2014), *The Handbook of Graphene, Electrochemistry*, London: Springer.
61. Bedeloğlu, A., Taş, M. (2016), Grafen ve Grafen Üretim Yöntemleri, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 544-554.
62. Mao S, Pu H, Chen J (2012), Graphene Oxide and Its Reduction: Modeling and Experimental Progress, *RSC Adv*, 2, 2643-2662.
63. Reina A, Thiele S, Jia X, Bhaviripudi S, Dresselhaus MS, Schaefer JA, Kong J (2009), Growth of Large-Area Single- and Bi-Layer Graphene by Controlled Carbon Precipitation on Polycrystalline Ni Surfaces, *Nano Res*, 2, 509–516.
64. Kausar, A., Rafique, I., Anwar, Z., Muhammad, B. (2015), Perspectives of Epoxy/Graphene Oxide Composite: Significant Features and Technical Applications, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 55:7, 704-722.
65. Ma, P. C., Siddiqui, N. A., Marom, G., & Kim, J. K. (2010), Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(10), 1345-1367.
66. Durgun, İ. (2014), *El Yatırma Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi*, 7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Çankaya Üniversitesi, Ankara.
67. Rajii, M., Abdellaoui, H., Essabir, H., Kakou, C-A., Bouhfid, R., Qaiss, A. (2019), Prediction of the cyclic durability of woven-hybrid composites, *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, 27-62.
68. Kenny, J.M., Nicolais, L. (1989), Science and Technology of Polymer Composites, *Comprehensive Polymer Science and Supplements*, 471-525.
69. İnternet: Filament Winding Teknolojisi. URL: www.onatus.com/project/kompozit-teknolojisi/. Son Erişim Tarihi: 10.06.2024.
70. Turgut, T., Kayran, A., Alemdaroğlu, N., Ceylan, M., (2007), Vakum Torbalama Yöntemi İle Kompozit Malzemedden Yapı Üretimi Örnek Bir Havacılık Uygulaması, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 48 (566).
71. İnternet: Vacuum Infusion Process. URL: <https://www.performancecomposites.com/about-composites.html/>. Son Erişim Tarihi: 10.06.2024.

72. Erdal, M., İpek ,H., Şaş, H.S. (2009), İleri Kompozit Malzemelerin Reçine Transfer Kalıplama Yöntemiyle Üretiminde Kalıp İçi Reçine Akışının Modellenmesi, *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 11(1), 22-33.
73. İnternet: Beşergil, B. URL: https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_96.html/. Son Erişim Tarihi: 11.06.2024.
74. Sozer, E.M., Simacek, P., Advani, S.G. (2012), Resin Transfer Molding (RTM) in Polymer Matrix Composites, *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, 245-309.





Gazili olmak ayrıcalıktır