



**BOR ELYAF TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT MALZEMELERİN
TERMAL, MEKANİK, RADAR GEÇİRGENLİK ÖZELLİKLERİNE NANO
BOR İLAVESİNİN ETKİLERİ**

Ayhan ŞAHİN

**YÜKSEK LİSANS
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmada 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.

Ayhan ŞAHİN

20/01/2023

BOR ELYAF TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT MALZEMELERİN TERMAL,
MEKANİK, RADAR GEÇİRGENLİK ÖZELLİKLERİNE NANO BOR İLAVESİNİN

ETKİLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ayhan ŞAHİN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Bu tez çalışmasında, tek yönlü bor fiber takviyeli prepreglerin epoksi reçine kullanılarak serim yöntemi ile laminat hale getirilmiştir. İki farklı, dokuz katlı tabakalı kompozit malzeme üretilmiş, birinci tabakalı kompozit malzeme’de sadece epoksi reçine kullanılırken diğerinde epoksiye % 0.074 oranında nano bor katılmış ve otoklavda 178°C sıcaklık aralığında, 24 saat kürlenmiş, tabakalı kompozit malzeme haline getirilmiştir. Oluşturulan tabakalı kompozit malzemeler Dinamik Mekanik Analiz (DMA), Diferansiyel Tarama Kalorimetre (DSC), Katmanlar Arası Kayma Testi (ILSS) ve Radar Geçirgenlik testleri (İletim Hattı tekniği) için numuler hazırlanmış ve bahsedilen testlere maruz bırakılarak iki farklı reçine kullanılan malzemeler için deneyler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda nano bor katkılı laminatın termal mekanik değerlerinin olumsuz yönde etkilemediği ve radar geçirgenlik değerlerinde ise nano bor ilavenin geçirgenliği arttırdığı gözlenmiştir.

Bilim Kodu: 93103

Bilim Kodu: 93103

Anahtar: Kelimeler: bor prepreg, kompozit, nanobor, dma, dsc, ıls, radar geçirgenlik testi

Sayfa Adedi: 67

Danışman: Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ

THE EFFECTS OF NANO BORON ADDITION ON THERMAL, MECHANICAL AND
RADAR TRANSMITTANCE PROPERTIES OF BORON FIBER REINFORCED
POLYMER COMPOSITE

(M. Sc. Thesis)

Ayhan ŞAHİN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

In this thesis study, unidirectional boron fiber reinforced prepregs were laminated by laying method using epoxy resin. Two different nine-storey composite material made of epoxy resin in the composite material when used only the first, in which the epoxy % 0.074 percent in the autoclave and nano boron joined 178°C temperature range, made into composite material was cured for 24 hours. Generated composite materials, dynamic mechanical analysis (DMA), differential scanning calorimetry (DSC) between the layers of the shear test (ILSS) and radar permeability tests (transmission line technique) was prepared and exposed to the resin materials used for the Tests mentioned numuler for two different experiments and the results were compared. As a result of the experiments, it was observed that the thermal mechanical values of the nano boron-doped laminate did not affect negatively, and the addition of nano boron increased the permeability in radar transmittance values.

Science Code : 93103

Key Words : Boron prepreg, composite, nano boron, dma, dsc, ilss, radar
transmittance test

Page Number : 67

Supervisor : Assoc.Prof.Dr. Hanifi ÇİNİCİ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca mesleki bilgi birikimi ile yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, danışman hocam Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ'ye ve malzeme üretimde testler ile ilgili bilgi ve tecrübeleri ile bilgi dağarcığımı aydınlatan, malzeme üretimi ve test aşamasında yoğun mesai harcayan Gazi Üniversitesi doktora öğrencilerinden Erdem MERMER'e sonsuz teşekkür eder, saygı ve şükranlarımı sunarım. Bu zamana kadar bana desteğini esirgemeyen fedakârlıktan kaçmayarak, hep yanımda olan sevgili eşime ve evlatlarıma teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	5
2.1. Tarihçe.....	5
2.2.1. Metal matrisli kompozitler.....	7
2.2.2. Seramik matrisli kompozitler.....	8
2.2.3. Polimer matrisli kompozitler.....	9
3. KOMPOZİT MALZEMELERDE KULLANILAN FİBERLER.....	19
3.1. Cam Fiberler.....	20
3.2. Karbon Fiberler	21
3.3. Seramik Fiberler.....	22
3.4. Aramid Fiberler.....	22
3.5. Bor Fiberler	23
3.6. Sürekli Fiber Yönleri.....	25
4. TABAKALI KOMPOZİT MALZEME'DE UYGULANAN TESTLER	27
4.1. Çekme Testleri	27
4.2. Basma Testleri.....	28
4.3. Dinamik mekanik Analiz (DMA)	29

	Sayfa
4.4. Diferansiyel Tarama Kalorimetri (DSC).....	31
4.5. Katmanlararası kayma mukavemeti testi (ILSS)	32
4.6. Radar geçirgenlik testi.....	33
5. MALZEME VE METOT	35
5.1. Kullanılan Malzemeler.....	35
5.2. Kompozit Malzemelerin Üretimi	35
5.2.1. Reçinenin hazırlanması	35
5.2.2. Serimin yapılması	36
5.2.3. Otoklav.....	37
5.3. Kompozit Numunelerin Hazırlanması	38
5.4. DMA, DSC, ILSS, Radar Geçirgenlik Testlerinde Kullanılan Cihazlar.....	39
6. DENEYSEL SONUÇLAR	43
6.1. DMA Sonuçları	43
6.2. DSC Sonuçları.....	47
6.3. ILSS Sonuçları	50
6.4. Radar geçirgenlik testi.....	53
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	67

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Polimer Kullanım Alanları	10
Çizelge 2.2. Termoset ve Temoplastiklerin Karşılaştırılması.....	11
Çizelge 2.3. Epoksi ve Polyester Mekanik Özellikleri.	12
Çizelge 2.4. Polyester Malzemenin Özellikleri.	12
Çizelge 2.5. Epoksi Malzemenin Özellikleri.	14
Çizelge 2.6. Termoplastik Malzemelerin Özellikleri.....	17
Çizelge 3.1. Cam Fiberlerin Kimyasal Bileşimleri (% Ağırlık).	20
Çizelge 3.2. Cam Fiberlerin Özellikleri.	21
Çizelge 3.3. Ticari karbon fiberlerin tipik özellikleri.	22
Çizelge 3.4. Kevlar çeşitlerinin özellikleri.	23
Çizelge 3.5. Bor Fiber Çaplara Bağlı Mekanik Özellikler.....	24
Çizelge 5.1. Üretimde kullanılan malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri.	35

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Malzeme Tarihçesi.....	5
Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.	6
Şekil 2.3. Takviye tipine göre kompozit malzemeler.	8
Şekil 2.4. Epoksi Zaman-Sıcaklık-Geçişi (Faz Diyagramı).....	15
Şekil 3.1. Bor Fiber Üretim Şeması, Reaksiyonları ve X500 Görünüm.....	24
Şekil 3.2. Fiber açısı, gerilme ve mukavemet değeri.	25
Şekil 3.3. Çekme deneyinde değişik fiber yönlerindeki durumlar.....	26
Şekil 4.1. Çekme testi numune 3 boyut gösterimi ve Fiber Takviyeli Polimer Kompozit malzemelerde numune örnekleri; (a) ASTM D 3039 (0°); (b) ASTM D 3039 (90°); (c) ISO 527 (0°); (d) CRAG methods 300 (0°) and 301 (90°).	28
Şekil 4.2. Basma test aparatının şematik gösterimi.	29
Şekil 4.3. DMA Cihazı kesiti (DM800).....	30
Şekil 4.4. Uygulanan sinüzoidal gerilim-gerinim ile ilişkisi, sonuçta ortaya çıkan faz gerilemesi ve deformasyon ile gösterilmiştir.	31
Şekil 4.5. Katmanlararası kesme testi yöntemleri: (a) Kısa kiriş kesme üç noktalı bükme, (b) V çentikli kesme, (c) Çift çentikli kesme, (d) Sandviç çekirdek kesme testi ve I-kiriş dört noktalı bükme.	32
Şekil 6.1. Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme dinamik modül DMA sonuçları.	44
Şekil 6.2. Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme gerinim-gerilim DMA sonuçları.	44
Şekil 6.3. Nb katkılı tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme dinamik modül DMA sonuçları.	45
Şekil 6.4. Nb katkılı tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme gerinim-gerilim DMA sonuçları.	45
Şekil 6.5. Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme ile Nb katkılı Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzemelerin dinamik modül DMA sonuçları.	46

Şekil	Sayfa
Şekil 6.6. Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme ile Nb katkılı tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzemelerin gerinim-gerilim DMA sonuçları.	47
Şekil 6.7. Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme DSC sonuçları	48
Şekil 6.8. Nb katkılı tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme DSC sonuçları.	49
Şekil 6.9. Nb katkılı tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme ile katkısız takviyeli bor fiber takviyeli polimer malzemelerin DSC sonuçları.	50
Şekil 6.10. Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme ILSS sonuçları.....	51
Şekil 6.11. Nb katkılı tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme ILSS sonuçları.	52
Şekil 6.12. Yansıma, Frekans-Bant Aralıkları	54
Şekil 6.13. 8.2-12.4 GHz (X-Band) Frekans Aralığı Radar Geçirgenlik Testi.....	55

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. DMA Cihazı (DM800)	30
Resim 5.1. HexFlow® RTM6 Epoxy reçine	36
Resim 5.2. Üretimde kullanılan reçineler; a) Nb katkılı epoksi reçine b) Katkısız epoksi reçine	36
Resim 5.3. a) Nb katkılı reçine serilmiş hali b) Katkısız reçine serilmiş hali.....	37
Resim 5.4. Katkısız ve Nb katkılı halde serim yöntemi yapılmış, Otoklav’a hazır halde kompozitler.....	37
Resim 5.5. Son ürün tabakalı kompozit malzemeler; a) Nb katkılı tabakalı kompozit malzeme b) Katkısız tabakalı kompozit malzeme.	38
Resim 5.6. Nanobor katkılı ve katkısız tabakalı kompozit malzeme test numuneleri	39
Resim 5.7. DMA için hazırlanmış tabakalı kompozit malzeme ölçülü test numuneleri; a) Nb katkılı tabakalı kompozit malzeme test numunesi b) Katkısız tabakalı kompozit malzeme test numunesi.	39
Resim 5.8. DMA Q800	40
Resim 5.9. DSC Q20.....	40
Resim 5.10. ILSS için kullanılan INSTRON 5985 cihazı	41
Resim 5.11. Radar geçirgenlik testi için kullanılan IFR Microwaver Spectrum Analyzers cihazı	41
Resim 6.12. Radar Geçirgenlik Testi Kurulumu.	55

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
AlN₃	Alüminyum Nitrat
Al₂O₃	Alüminyum Oksit
BN	Boron Nitrat
C	Karbon
Fe₂O₃	Demir Oksit
Mpa	Megapaskal (Metric)
Gpa	Gigapaskal
µm	Mikron
SiO₂	Silikon Dioksit
TiO₂	Titanyum Dioksit
MgO₂	Magnezyum Dioksit
SiC	Silisyum Karbür
TiC	Titanyum Karbür
WC	Tungsten Karbür
TiN	Titanyum Nitrat
Si₂N₄	Silisyum Nitrür
V	Poission Oranı
Tg	Camsı Geçiş Sıcaklığı
CaO	Kalsiyum Oksit
MgO	Magnezyum Oksit
Na₂O	Sodyum Oksit
K₂O	Potasyum Oksit
B₂O₃	Borik Oksit
E	Çekme Modülü
~	Yaklaşık
HCl	Amonyak

Simgeler**Açıklamalar****dB**

Desibel

GHz

Gigahertz

Kısaltmalar**Açıklamalar****ASTM**

American Society for Testing and Materials

CFRP

Carbon Fiber Reinforced Polymers

CVD

Buhar biriktirme yöntemi

DMA

Dinamik Mekanik Analiz

DSC

Diferansiyel Tarama Kalorimetre

ILSS

Katmanlar arası kesme mukavemeti

ISO

International Organization for standart

LARC-TPU

Polyurethane

M.Ö

Milattan Önce

M.S

Milattan Sonra

MMC

Metal Matrisli Kompozit

Nb

Nanobor

PM

Toz Metalurjisi

PMCS

Polimer Matrisli Kompozit

PBI

Polibenzimidazol

PPQ

Polyphenylquinoxaline

PET

Polietilen tereftalat

PC

Polikarbon

PAI

Poliamid-imid

PEEK

Polieter Karbon

PSUL

Polisülfan

PPS

Polifenilen Sülfüt

PEI

Polietemirid

PES

Polisülfan

Prepreg

Önceden emprenye edilmiş

RCS

Radar Cross Section

SEM

Taramalı Elektron Mikroskobu

TEM

Geçirimli Elektron Mikroskobu

Kısaltmalar**Açıklamalar****TMA**

Termo Mekanik Analiz

TA

Termal Analiz

UTS

Çekme Dayanımı

1. GİRİŞ

Polimer matrisli kompozit malzemeler ağırlıklı olarak havacılık ve uzay sanayide kullanılmaktadır. Polimer üretimi kolay ve ucuzdur mekanik, fiziksel ve kimyasal değerleri artırmak veya istenilen hale getirmek mümkündür [1]. İki farklı polimer tipi vardır. termoplastik ve termosetlerdir [2-3]. Polimer malzemelerde kauçuk oluşumu (Jelleşmiş) ve camsı durumları epoksi gibi amorf polimerlerin karakteristiğidir. Bazı polimerler nispeten düşük sıcaklıklarda ve yüksek sıcaklıklarda camsı hale gelir ve sonradan genelde yeniden kauçuklaşır. Normal polimerizasyon sistemi olarak camsı durumda kalır ve tasarlanması oldukça zordur. Camsı geçiş sıcaklığı oldukça önemlidir [4]. Havacılık ve uzay sanayiinde yaygın kullanılan epoksiler en temel termoset matris malzemelerinden biridir. İstenilen özelliklere (vizkozite kontrolü, esneklik, ultraviyole koruma, kürlenme için vb.) göre farklı tipte epoksi reçineleri farklı katkı maddeleriyle katkılanarak üretilirler. Epoksi reçineler polyesterler göre daha pahalıdır ancak daha iyi nem direncine, kürlenme sırasında daha düşük çekmelere ($\sim$ % 3) daha yüksek kullanım sıcaklıklarına ve cam fiberlerle iyi yapışma özelliklerine sahiptir. Kompozitlerin geliştirilmesinde ve çeşitli durumlar için matris malzeme olarak oldukça yoğun kullanılır. Mükemmel özelliklere sahiptir; iyi yapışma, yüksek mukavemet, iyi korozyon direnci, düşük büzülme (Polyester reçine ile karıştırıldığı takdirde), çok yönlü üretim yöntemi. Bunlara ek olarak epoksi üretimde stiren gibi zehirli gazlar açığa çıkarmaz. Kürlenmemiş epoksi çeşitli gazları salar fakat bu stiren gibi zehirli gazlar değildir. Çalışma Aralığı 140 °C' ye kadar olabilir. Bu polyesterden daha iyidir ama polimid' den düşüktür [5].

Fiberler mekanik olarak elastikiyet modülüne etkisi fazla olup, rijitliği (sertlik) matris tarafı etkiler. Matrisin görevi fiberleri bir arada tutup, gelen yükleri fiberlere iletmektir. Fiberlerin ana matrise yerleştirilmesinde ve seçim aşamasında arayüz bağlanma, oryantasyon, hacimsel yoğunluk, fiber çap (Esneklik) önemli etkenlerdir. Fiberlerin birçok çeşidi vardır. Bunlar; cam, elyaf, seramik, karbon, bor fiberlerdir. Bor fiberler kompozitler de kullanılan ilk yüksek performanslı fiberlerdendir. Buhar biriktirme (CVD) yöntemi ile ısıtılmış çekirdek (Tel, altlık) üzerine bor kaplanarak üretilir. Fiberler arasında en yüksek fiber çapına sahiptir (0.1 ile 0.2 mm ve 125 ile 140 μ m). Elastikiyet modülü yaklaşık 410 Gpa çekme direnci yaklaşık 3450 Mpa' dır. Büyük çaplı kombinasyonundan dolayı yüksek sertliğe neden olur ki bu da fiber bükülmesini büyük çapta kısıtlar. Diğer

yandan bor fiber takviyeli kompozitlerde fiber çapının buyk olması yüksek elastikiyet modülüne katkıda bulunur ve mükemmel basma gerilmesi sağlar [6].

Tabakalı kompozit’de mekanik özellikleri etkileyen önemli faktörlerden bir tanesinde fiber yönleridir. Fiberler arası açı 0 ° ise mukavemet değeri en yüksek seviyede elde edilir. Bunun nedeni fiberlerin çekmeye karşı direnç göstermesi ve yükü taşımasıdır. Fiberler arası açı arttıkça (30°,45°,60°) gerilme değeri ve kompozitin mukavemeti düşer. Çünkü fiberler arası açı arttıkça fibere etkiyen çekme gerinimi azalacaktır. Fiberler arası açı 90° olduğunda yani fiberler ile gerilmenin yönü dik olduğunda minimum mukavemet değeri elde edilir. Burada ekme kuvveti etkisiyle matris ve takviye arasındaki ara yüzey bağı açılmaya, ayrılmaya ve kopmaya zorlanacaktır [3].

Fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerde karakterizasyon için genel olarak uygulanan testler; Basma, ekme, Kesme, Dinamik mekanik analiz (DMA), Diferansiyal tarama kalorimetre (DSC),Katmanlar arası kesme mukavemeti testi (ILSS),Radar geçirgenlik testi, SEM, TEM’dir. Bunlar arasında termal analiz yaparak mekanik özellikleri ile ilgili yorum yapabilecek testler DMA ve DSC’dır. Dinamik mekanik analiz, numunelerin kinetik özellikleri ölçmek için kullanılan bir karakterizasyon tekniğidir, zamanın bir fonksiyonu olarak numuneye uygulanan gerilme veya gerinimdeki değişiklik nedeniyle oluşan gerilme veya gerinme açısından devam eder. Dinamik mekanik analiz, numuneye sabit gerilme veya gerinme uygulanarak zamanın bir fonksiyonu olarak gerilme veya gerinimdeki değişim açısından viskoelastik özelliklerin değerlendirilmesiyle tanımlanır. Mekanik zellikleri zamanın bir fonksiyonu olarak ölçmek için kullanılabilir [7]. Dinamik mekanik analiz esasen bir gerilme veya gerinme modülasyonlu termo mekanik analiz (TMA) dir. Polimerlerin ve liflerin mekanik özelliklerini belirlemek ve cam geçiş sıcaklığını ve diğer ikinci dereceden geçişleri (α , β , vb.) lmek için yaygın olarak kullanılır[8]. DSC’de ise kalorimetri, kalori ve ölçüm kombinasyonundan elde edilir. Termal analiz, malzemeye giden ve gelen ısı akışını ölçerek tahmin edilen bir malzemedeki enerji değişikliklerini incelemek için kullanılır. Kalorimetri, tipik bir ilgi süreciyle bağlantılı entalpinin doğrudan tahminini yapmak için kullanılan temel bir tekniktir. Başka bir deyişle, cihaz, zaman ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak numune malzeme geçişlerine bağlı sıcaklık ve ısı akışını düzenleyen bir termal analiz cihazıdır. Bir sıcaklık değişimi sırasında DSC, numune ile referans arasındaki sıcaklık farkına dayanarak numune tarafından yayılan veya emilen bir ısı miktarını ölçer [7].

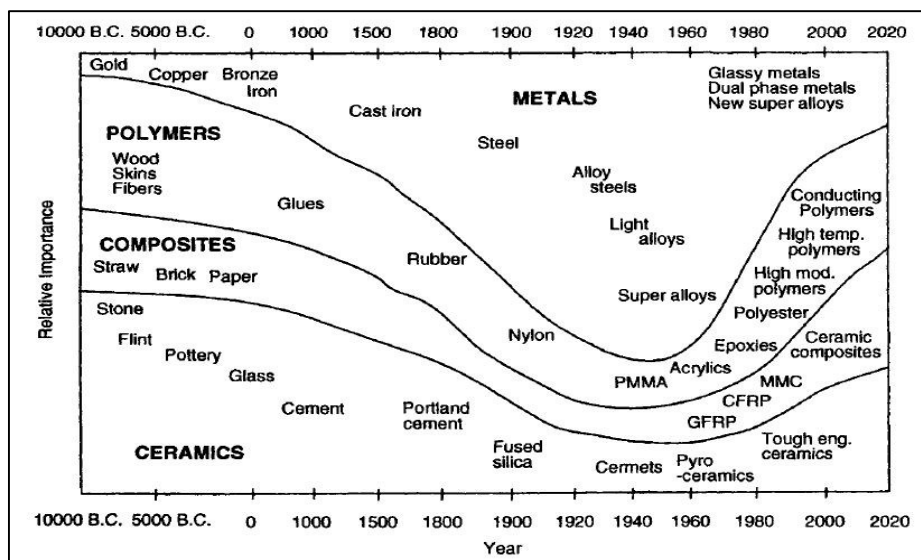
Katmanlararası kesme mukavemeti, birçok uygulamada önemli bir rol oynayan matris için önemli özelliktir, çünkü katmanlararası kesme genellikle kompozitleri içeren farklı bileşenler arasındaki yük transfer mekanizmasındaki durum hakkında bilgi verir [9]. Radar geçirgenlik testi ile iki prop arasında temas yöntemi ile gönderilen ve alınan dalga miktarı arasındaki fark incelenerek radar absorbe hakkında bilgi sahibi olunur [10].

Bu çalışmada Havacılık-Uzay sektöründe oldukça yaygın kullanılan fiber takviyeli polimer prepreglerden üretilen tabakalı kompozit yapılarda ana matris olan polimer malzemeye tek yönlü fiber ile birlikte partikül nano bor katılarak hibrid takviye kullanılarak termal ve mekanik analiz yöntemleri ile karakterizasyon yapılarak kompozit sektöründe yeni bir bakış açısı kazandırılmak istenmiştir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. Tarihçe

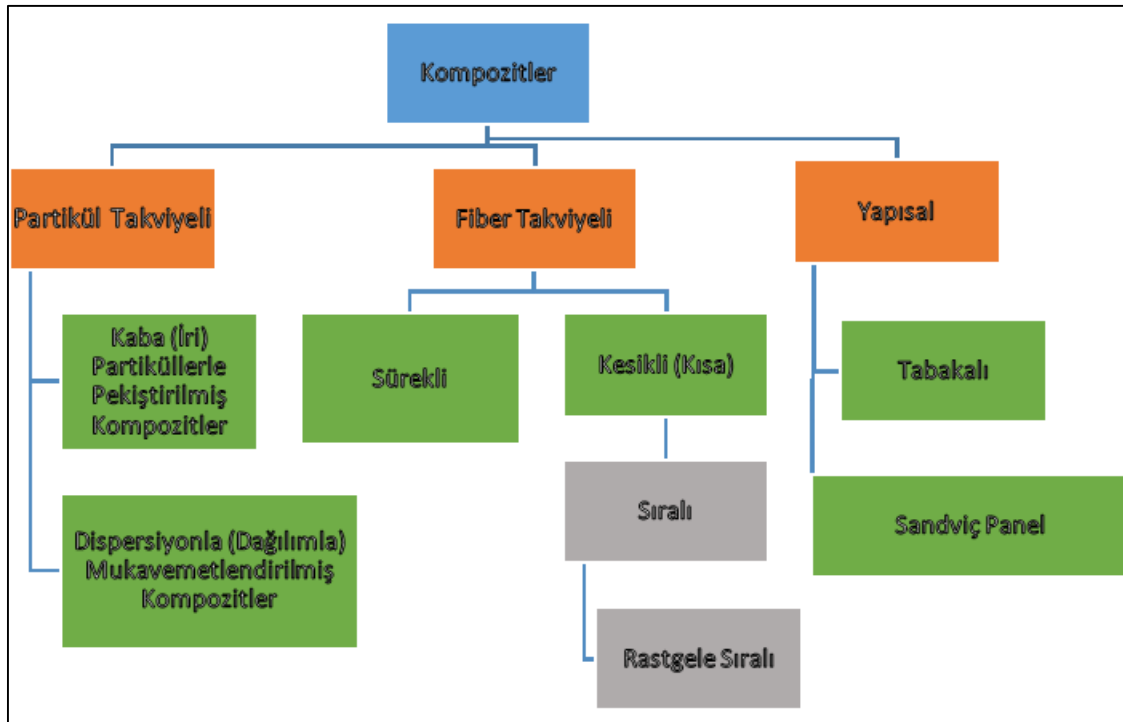
Malzeme tarihine bakıldığında kompozitlerin tarih kadar eski olduğu görülür. İlk takviyeli polimerik bazlı malzemeler takviyeli bitüm veya zift Babil’de M.Ö. 4000-2000 arasında kullanılmıştır. M.Ö. 3400’lü yıllarında ilk defa Irak’ta kontrplak yapmak üzere ahşap şeritler birbirinin üzerine farklı açılarda yapıştırılmıştır. M.Ö. 2181-2055 senesinde Mısırlılar, papirüs ve diğer malzemelerin kombinasyonunu kullanarak ölmüş insanların yüzlerinden alçı ile alınmış maskeler yapmaya başlamışlardır. M.Ö. 1500’lü yıllarda yaşayan insanlar evlerinin daha dayanıklı olması için çamurun içine saman karıştırmıştır (kerpiç). M.S.1200’lü yıllarda ise Moğollar, o günlerde eşsiz ve etkili olan kemik, bambu, ahşap, sığır tendonları, boynuz ve ipek gibi malzemeleri kullanarak kompozit yaylar yapmaya çalışmışlardır. 1900’lerde polyester, fenolik ve vinil gibi çeşitli plastik türleri ortaya çıkmıştır. 1903 yılında ise Owens Corning tarafından cam elyaflar üretilip ilk kez sanayileşmesi sağlanmıştır. 1936’da doymamış polyester reçineler üretilmiş, 1961’de ise ilk karbon fiber ticari olarak temin edilebilir hale gelmiştir. Şekil 2.1’de malzeme tarihçesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Malzeme Tarihçesi

2.2. Kompozit Malzeme

Kompozit kelime olarak, iki veya daha fazla parçadan oluşan bir malzeme anlamına gelmektedir. Kompozit malzemeler özet olarak ‘makro ölçüde birbirinden farklı iki veya daha fazla bileşenin yüzey boyunca bir araya gelmesiyle oluşan malzemeler’ şeklinde tanımlanabilir. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler çoğunlukla özelliklerini korumaktadırlar [11]. Takviye ve matris fazlar bir kompozit malzemenin kurucu unsurlarıdır. Takviye fazı yerinde tutmak ve yükü ikincil fazla paylaşmak üzere dağıtmaktır. Eldeki malzemeyi daha sert hale getirmek için yapılması gerekenler farklı olabilir. Örneğin takviye lif veya seramik, matris ise bir polimer veya ona benzer bir materyal olabilmektedir. Şekil 2.2’de kompozit malzemelerin sınıflandırılmasını göstermektedir [12].



Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.

Kompozit malzemeler temel olarak geleneksel malzemelerin bir veya birkaçını iyileştirmek amacı ile yapılmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

- Güç
- Korozyon Direnci

- Sertlik
- Aşınma Direnci
- Sıcaklığa bağlı davranış
- Uygulanabilirlik
- Isı Yalıtımı
- Yorulma Ömrü
- Isı İletkenlik
- Akustik Yalıtım
- Ağırlık

Kompozitler matris türüne göre üç gruba ayrılabilir:

- Metal Matrisli Kompozitler
- Seramik Matrisli Kompozitler
- Polimer Matrisli Kompozitler

Seramik matrisli kompozitler; seramik matrisin içerisine yerleştirilmiş seramik elyaflardan oluşmaktadır [13].

2.2.1. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler, en az iki bileşenden oluşan ve bileşenlerinden en az biri bir metal diğer bileşeni, seramik veya herhangi başka bir malzeme olabilen kompozit malzemelerdir. Bu malzemeler yüksek sıcaklıklarda çalışmak üzere üretilmektedir. Metal matrisli kompozitlerin yapısında, üç bileşen olduğu zaman, bu malzemeler hibrit kompozit malzeme olarak adlandırılmaktadırlar [14]. Matris, takviye içine gömülü olan tek parça bir kristal malzemedir. Matrisin yapısı sürekli olduğundan, malzemenin herhangi bir kısmına erişilebilir durumdadır. Metal matrisli kompozitlerin özellikleri, takviyenin hacimsel fraksiyonu, bileşen elemanları ve bileşenlerin nihai ürününü elde etmek için geçtiği süreç tarafından belirlenmektedir [15].

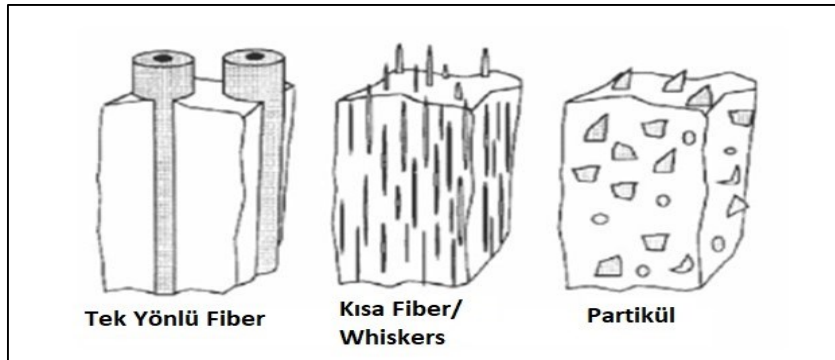
Metal matris kompozitlerin bazı özellikleri şunlardır:

- Yüksek mukavemet
- Yüksek elastikiyet modülü

- Düşük yoğunluk
- Yüksek sıcaklık kararlılığı
- Sıcaklık değişimine ve şoklara karşı düşük hassasiyet
- Karmaşık ve pahalı üretim tekniği
- Yüksek iletkenlik (elektriksel ve termal)
- Yüksek süneklik ve katılaşma
- Düşük yorulma direnci

Metal matrisli kompozitler Şekil 2.3’de gösterildiği gibi yapılarında kullanılan takviye tipine göre, aşağıdaki gruplar halinde sınıflandırılmaktadır:

1. Sürekli takviyeli kompozitler(sürekli lifler ve filamentler)
2. Süreksiz takviyeli kompozitler (whiskerlar, kısa lifler ve parçacıklar) [16].



Şekil 2.3. Takviye tipine göre kompozit malzemeler.

2.2.2. Seramik matrisli kompozitler

Genel olarak seramikler önemli özelliklere sahiptir. Bunlar; yüksek mukavemet, sertlik, kimyasal direnç, düşük yoğunluk gibi. Fakat bunların yanında önemli bir dezavantajı vardır, tokluk [17].

Mühendislik Seramikleri;

- Oksit Seramikler: Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , MgO_2 , Fe_2O_3
- Karbür Seramikler: SiC , TiC , BuC , WC
- Nitrür Seramikler: BN , TiN , AlN , Si_3N_4

2.2.3. Polimer matrisli kompozitler

Polimerler yapısal olarak metal ve seramiklerden daha karışık bir yapıya sahiptir. Üretime kolay ve ucuzdur. Bundan dolayı oldukça yaygın kullanılır (Çizelge). Diğer yandan polimerler düşük mukavemet ve modüllere sahiptir ayrıca yüksek sıcaklıklarda deforme olur. İlk etapta oluşan kovalent bağ ile bağlanmalarından dolayı ultraviyole ışınlarla ve bazı çözücülere karşı hassas olup zamanla özelliklerini kaybedebilir. Zayıf elektrik ve ısı iletkenliğe sahiptir. Metallere göre kimyasal direnci daha iyidir. Polimer yapısal olarak zincir benzeri karbon atomları kovalent bağ ile büyürler. Bu prosese yani bir çok monomerin bir araya gelmesine polimerizasyon denir. İki önemli polimerizasyon tipi vardır;

- Yoğuşum polimerizasyonu: iki farklı monomerin moleküller arası yoğunlaşma işlemidir ve büyük bir polimer molekülü zinciri oluşturur. Bu işlemde, her iki monomer molekülünün bağlanması, bir yan ürün olarak HCl, amonyak, su, vb. gibi basit bir molekülle sonuçlanacaktır.
- Eklemeli polimerizasyon: Bu proses herhangi yan ürün oluşmadan monomerlerin birleşmesini içerir. Genelde katalizör kullanılır. Etilen moleküllerin yatayda birleşme polimer kütlesi oluşur [1].

Organik polimerler iki tipe ayrılır takviyeli termoplastik ve termosetlerdir. Termoset polimerler için örneğin doymamış polyester ve vinly esterlerdir. Kimyasal bağlar çapraz bağlandığı için tekrar sıvı formuna dönüş olmaz. Diğer yaygın termosetler epoxy ve fenolik reçinelerdir [2].

Çizelge 2.1. Polimer Kullanım Alanları

Matris	Alt Katagöri	Örnekler	Uygulama
Polimer	Termoset	Epoksi	Temel olarak Uçak-Uzay uygulamalarında
		Doymamış Poliester, Vinil Ester	Genel olarak otomotiv, denizcilik, kimya ve elektriksel uygulamalarda
		Fenolik	Katı kalıp bileşenlerinde
		Poliimidler	Yüksek sıcaklık (250 °C – 400 °C)Havacılık-Uzay uygulamalarında
	Termoplastik	Alifatik Poliamidler, Poliesterler (PET),Polikarbonatlar, Poliasetallar	Sürekli fiberlerle takviye edilerek enjeksiyon kalıplama ile üretilen parçalarda
		Aromatik Poliamid, Polieter Eter Keton (PEEK),Polisulfon, Polifenilen Sülfid (PPS),Polieter İmid (PEI)	Sürekli fiber ile birlikte orta yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur.

Termoset polimerler;

Epoksiler; Esas olarak havacılık ve hava araçlarında kullanılır.

Polyester, Vinily ester; Yaygın olarak otomobil, denizcilik, kimyasal ve elektrik uygulamalarında kullanılır.

Fenolikler; Dökme kalıplama bileşiklerinde kullanılır.

Polimid, Polibenzimidazol (PBI), polyphenylquinoxaline (PPQ); Yüksek sıcaklık uzay uygulamalarında kullanılır. (250 °C – 400 °C)

Termoplastik Polimerler;

Naylon (Naylon 6, Naylon 6.6), Termoplastik polyester (PET, PPT), Polykarbon (PC), Poliesetal; Enjeksiyon kalıplarında kullanılan sürekli olmayan (Wiskers vb.) fiberlerde kullanılır (Bknz. Çizelge)

Poliamid-imid (PAI), Polieter eter keton (PEEK), Polisülfon (PSUL), Polifenilen sülfüt (PPS) Polietemirid (PEI), Sürekli fiberlerin ortalama yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılır [3].

Çizelge 2.2. Termoset ve Termoplastiklerin Karşılaştırılması.

Termosetler	Termoplastik
Temel Özellikler	
Kürleme yapıldığında kimyasal değişime maruz kalır	Kürleme gerekli değildir.
Düşük gerilme kırılması	Yüksek gerilme kırılması
Düşük kırılma enerjisi	Yüksek kırılma enerjisi
Proses geriye döndürülemez	Proses geriye döndürülebilir
Düşük viskozite	Yüksek viskozite
Nem emme	Düşük nem emme
Solventlere karşı yüksek direnç	Bazı durumlarda solventlere karşı direnç sınırlıdır.
Avantajları	
Nispeten düşük sıcaklıklarda üretim	Kısa zamanda üretim mümkün
İyi fiber ıslatma (Arayüz ıslatma)	Geri dönüşüm
Karmaşık şekiller üretilebilir	Sonradan şekillendirebilir, işlenebilir
Sıvı reçine üretimi yapılabilir	Hızlı üretim
Aşınmaya karşı dirençlidir	Soğutma olmaksızın sınırsız raf ömrü
	Yüksek bozulma direnci
Dezavantajları	
Uzun proses zamanı	Solventlere karşı düşük direnç
Uzun (1- 2 saat) kürlenme	Yüksek sıcaklıklar (300-400 °C) ve basınç gerektirir.
Sınırlı depolama ömrü	Aşınma eğilimli olabilir
	Düşük kaplanabilirlik

Termoset Reçineler

Termoset malzeme kürlenme esnasında 3 boyutlu moleküler zincir oluşur yani çapraz bağlar oluşur. Bu çapraz bağlanmadan dolayı malzeme esnek değildir ve yeniden eritemez, şekillendirilemez. Yüksek sayıdaki çapraz bağlanmadan dolayı oldukça rijit ve termal dengeli malzeme oluşabilir. Kauçuk ve diğer elastomerlerde kütle açısından oldukça düşük çapraz bağlar vardır bundan dolayı oldukça esnektirler. Termosetler sıcaklık verilerek bir dereceye kadar yumuşayabilir. Bu özellik kullanılarak eğri borular üretilebilir. Termosetler termal ve boyutsal kararlılık, daha iyi sertlik yüksek elektrik ve solvent direnci sağlar [18].

Matriks olarak yoğunlaştırılma yöntemiyle meydana gelmiş polyester ve epoksi kullanılır [5]. Epoksi ve polyster mekanik özellikleri farklıdır (Bknz. Çizelge)

Çizelge 2.3. Epoksi ve Polyester Mekanik Özellikleri.

Malzeme	Yoğunluk(g/cm ³)	Çekme Modülü(Gpa)	Çekme Mukavemeti(Mpa)
Epoksi	1.2-1.4	2.5-5.0	50-110
Polyester	1.1-1.4	1.6-4.1	35-95

Polyester

Doymamış bir polyester reçine birçok C=C çift bağları içerir Glikol (propilen, dietilen) ve doymamış dibazik asit (maleik ya da fumarik) arasındaki yoğunlaşma reaksiyonu sonucu belirli karbon atomları arasında çiftli bağlar olan lineer poliester oluşur. Doymamış terimi molekülde hâlâ reaktif bölgeler olduğu anlamına gelmektedir. Doymamış polimerler suya, çeşitli kimyasallara, havaya, yaşlanmaya karşı makul dayanıma sahiptir ve en önemlisi çok ucuzdurlar.

Polyester isimlendirmesi ile ilgili bir karmaşa söz konusudur Aynı terim iki farklı polimer malzeme için yaygın olarak kullanılmaktadır. Doymamış polyester genel olarak polimer kompozitlerde matris malzemesi olarak kullanılan termoset bir reçine iken, tam adı polietilen terephthalate olan termoplastik polimerlere de polyester denilmektedir [4].Polyster malzemelerin özellikleri Çizelge 2.'de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Polyester Malzemenin Özellikleri.

Yoğunluk , ρ (g/cm ³)	Dayanım, σ (Mpa)	Modül,E (Gpa)	Poission Oranı, ν	CTE, α (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Kürlenme Çekme Payı(%)	Kullanım Sıcaklığı (°C)
1.1-1.4	30-100	2-4	0.2-0.33	50-100	5-12	80

Polyester reçineler

Polysterin başlıca ticari varyasyonları olan Fitalik asit veya Glikol malzemelerin kısmen bileşenleri değiştirme ve modifikasyon esasına dayanır. Örneğin, izoftalik asitle normal (ve daha düşük maliyetli) ortohtalik asit (izoftalik polyesterler) veya glikolün bir kısmı yerine difenilol propan kullanılmasıyla monomerler (DPP reçineleri) olan iyileştirilmiş

mukavemet ve dayanıklılığa sahip reçineler oluşur. Bir başka yaygın varyasyon adipik asit kullanımıdır, bu esnekliği artırır ve kürlenmiş matristeki kırılma uzamasını artırır [4].

Polyester reçine kürleme

Kürlenme sırasında kademeli büyüme yapan epoksi reçinenin aksine, Polyester reçineler zincir büyüme mekanizması olan doymamış serbest radikal ile kürlenir. Küçük miktarda aktif bir başlatıcı kullanılarak reaksiyon başlatılır ve uzun monomer çift bağlar oluşur. Polyester polimerizasyonun hızı belki başlatıcı miktarı ile geniş bir aralıkta kontrol edilebilir. Polimerizasyon ekzotermiktir ki buda kalın kısımlarda termal hasara sebep olabilir [4].

Polyester reçinelerin avantaj ve dezavantajları

Polyesterin başlıca avantajları;

- 1) Başlangıç düşük viskozitesidir ki bu da ıslanmayı kolaylaştırır.
- 2) Düşük maliyetli (tüm hammaddeler kolayca kullanılabilir ve nispeten başlangıç malzemelerinin kolay uzun süreli depolanması ile ucuzdur).
- 3) Kürleme koşulları küçük operatör deneyimi ile kolayca değiştirilebilir.
- 4) Belirli uygulamalar için bir dizi modifikasyon ile kolay üretim
- 5) Mükemmel çevresel dayanıklılık.

Başlıca dezavantajlar şunlardır:

- 1) Yüksek ekzoterm ve kürleme sırasında yüksek büzülme (her iki faktör de dâhili stres nedeniyle zayıf bir fiber/matris bağ mukavemetine yol açar ve böylece epoksi reçinelerden daha zayıf mekanik özellikler).
- 2) Sertleştirici katkı maddelerinden dolayı yeterli kesme mukavemeti kırılma eğilimindedir.
- 3) Çok seyreltik alkalilere karşı zayıf kimyasal direnç gösterir [4].

Epoksi reçineler

En temel termoset matris malzemelerinden biridir. İstenilen özelliklere (vizkozite kontrolü, esneklik, ultraviyole koruma, kürlenme için vb göre farklı tipte epoksi reçineleri farklı katkı maddeleriyle katkılandırılarak üretilirler. Epoksi reçineler polyesterler göre daha pahalıdır ancak daha iyi nem direncine, kürlenme sırasında daha düşük çekmelere ($\sim \% 3$) daha yüksek kullanım sıcaklıklarına ve cam fiberlerle iyi yapışma özelliklerine sahiptir. Epoksi malzemenin bazı özellikleri Çizelge 2.'de verilmiştir.

Çizelge 2.5. Epoksi Malzemenin Özellikleri.

Yoğunluk , ρ (g/cm ³)	Dayanım, σ (Mpa)	Modül, E (Gpa)	Poission Oranı, ν	CTE, α (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Kürlenme Çekme Payı(%)	Kullanım Sıcaklığı (°C)
1.2-1.3	50-125	2.5-4	0.2-0.33	50-100	1-5	150

Kompozitlerin geliştirilmesinde ve çeşitli durumlar için matris malzeme olarak oldukça yoğun kullanılır. Mükemmel özelliklere sahiptir; iyi yapışma, yüksek mukavemet, iyi korozyon direnci, düşük büzülme (Polsyester reçine ile karıştırıldığı takdirde), çok yönlü üretim yöntemi. Bunlara ek olarak epoksi üretimde stiren gibi zehirli gazlar açığa çıkarmaz. Kürlenmemiş epoksi çeşitli gazları salar fakat bu stiren gibi zehirli gazlar değildir. Çalışma Aralığı 140 °C' ye kadar olabilir. Bu polyesterden daha iyidir ama polimid' den düşüktür [5].

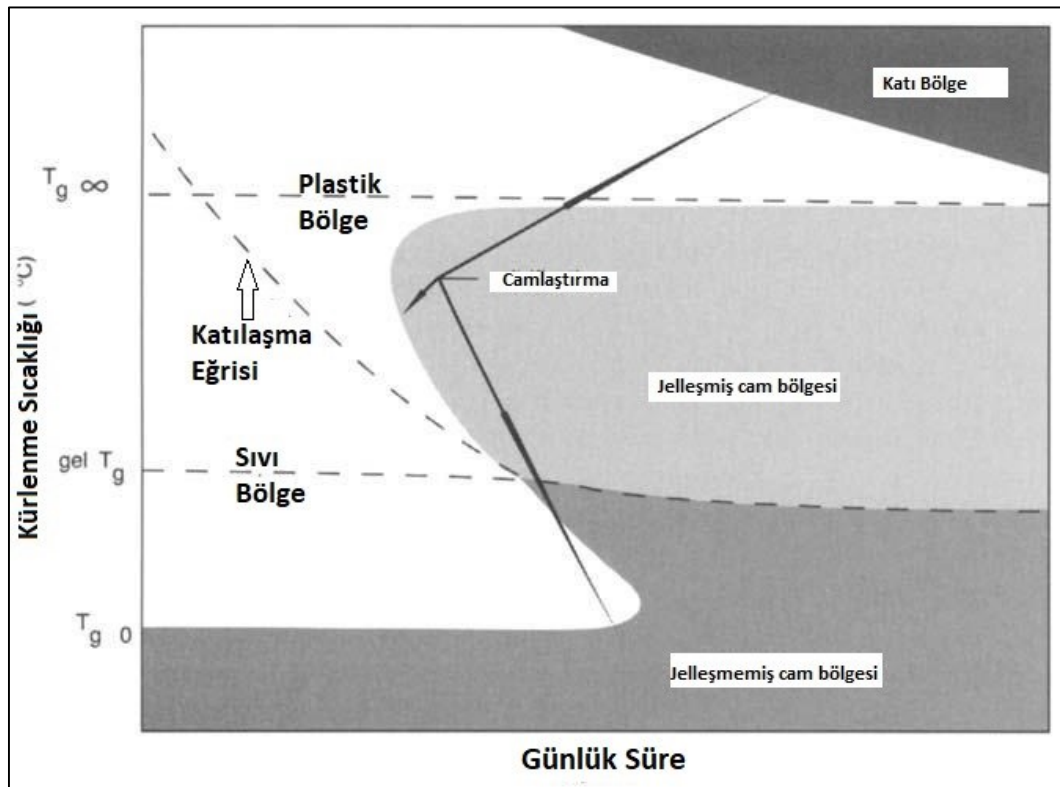
Epoksi reçine kürlenmesi

Epoksit grubu, yaygın olmayan bağlanmaya açısına sahiptir, bu da onu çeşitli maddelerle kimyasal olarak reaktif hale getirir. Yüksek çapraz bağlı bir yapıya sahip olduğu için yapıyı kolayca açabilir. Çapraz bağlama elde edilen hidroksi grupları aracılığıyla meydana gelebilir. Epoksi reçineler, uygun katalizörler kullanılarak kendi kendine polimerize edilebilirken, Uygulamaların çoğu, genellikle sertleştiriciler olarak adlandırılan kürlenme ajanlarını kullanılarak yapılır. Kürlenme ajanlarının başlıca sınıfları, soğuk kürlenme sağlayan alifatik aminleri içerir. Isıyla kürlenme sistemleri veren sistemler ve aromatik aminler ve polianhidritlerdir. Aromatik aminler, ileri düzeydeki kürlenme ajanlarının büyük

bir kısmını oluşturur. Yüksek cam geçiş sıcaklıklarından dolayı kompozitlerde özellikle havacılık kompozitlerinde matris malzeme olarak kullanılır [4].

Epoksi reçine matris malzemenin özellikleri

Kauçuk oluşumu (Jelleşmiş) ve camsı durumları epoksi gibi amorf polimerlerin karakteristiğidir. Bazı polimerler nispeten düşük sıcaklıklarda ve yüksek sıcaklıklarda camsı hale gelir ve sonradan genelde yeniden kauçuklaşır. Normal polimerizasyon sistemi olarak camsı durumda kalır ve tasarlanması oldukça zordur. Camsı geçiş sıcaklığı oldukça önemlidir.(Bknz. Şekil 2.4) [4].



Şekil 2.4. Epoksi Zaman-Sıcaklık-Geçişi (Faz Diyagramı).

Epoksi reçine avantaj ve dezavantajları

Avantajları;

- Belirli uygulamalar optimum özellikleri formüle etme yeteneği
- Kırılma tokluğunu kontrol edilebilmesi

- Düşük uçucular nedeni ile güvenilir olması
- Düşük büzülme
- Yüksek mukavemetli bağlardan dolayı fiberlere iyi yapışma özelliği
- Yüksek kimyasal direnç, geometrik ve termal kararlılık.

Dezavantajları;

- Polyesterler ile karşılaştırıldığında nispeten yüksek maliyet
- Nem hassasiyeti
- Nispeten yavaş kürlenme ve düşük viskoziteden dolayı polyesterlere göre düşük elverişlilik
- Bazı organik malzemelere (Özellikler organik asitler) düşük direnç
- Epoksinin yüksek formalizasyonuna rağmen yüksek sıcaklıklarda sınırlı direnç.

Termoplastik Polimerler

Termoplastik malzemeler, genel olarak, termosetten daha sünek ve tok malzemedir. Termoplastikler moleküller çapraz bağlanmazlar bundan dolayı ısıtılarak eritilebilir ve soğutma ile katılaşır, bu da onları yeniden şekillendirebilir bir malzeme olmasını sağlar. Termoplastikler amorf veya yarı kristal olabilir.

Amorf termoplastiklerde moleküller rastgele düzenlenir; yarı kristal, kristal bölgede ise plastikler, moleküller düzenli bir şekilde düzenlenmiştir. Yapısal uygulamalar için daha düşük sertlik ve mukavemet değerlerinden dolayı dolgu maddelerinin ve takviyelerin kullanılmasını gerektirir. Termoplastikler genellikle yüksek sıcaklıklarda sürünme direnci termosetlere kıyasla zayıftır, çözücülere termosetlerden daha duyarlıdırlar. Termoplastik reçinelerin daha yüksek viskozitesi bazı üretim süreçlerine yol açar, örneğin, manuel istifleme ve bant sarma işlemleri daha karmaşıktır [18]. Farklı termoplastik malzemeler ve bu malzemeleerin özellikleri Çizelge 2.'da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Termoplastik Malzemelerin Özellikleri.

Termoplastik Malzeme Özellikleri										
Özellikler	Polyamid 6,6	PET	PP	PEEK	PPS	PSUL	PEI	PAI	K-III	LARC-TPI
Yoğunluk (g/cm ³)	1.14	1.35	0.9	1.32	1.36	1.24	1.27	1.4	1.31	1.37
Çekme Modülü (Gpa)	1.6-3.8	2.8-4.1	1.1-1.6	3.24	3.3	2.48	3	3.03	3.76	3.45
Çekme Mukavemeti (Mpa)	95	48-72	31-41	-	83	-	-	186	102	138
% Uzama	15-80	30-300	100-600	50	4	75	60	12	14	5
Kırılma Erki (Kj m ⁻²)	-	-	-	6.6	-	3.4	3.7	3.9	1.9	-
CTE (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	144	117	146-180	47	49	56	56	36	-	35
T _g (°C)	57	69	-10	143	85	185	185	280	250	265
Maksimum Kullanım Sıcaklığı (°C)	110	120	150	250	240	160	160	225	225	300

3. KOMPOZİT MALZEMELERDE KULLANILAN FİBERLER

Takviyelerin mutlaka uzun fiber şeklinde olması gerekmez. Parçacıklar, pullar, kıl şeklinde, kısa fiber, sürekli fiber veya sayfalar halinde ve bunlardan bir tanesi olabilir. Kompozitlerde kullanılan takviyelerin çoğunun fiberli bir forma sahiptir. Çünkü malzemeler fiberli formu diğer formlardan daha güçlü ve serttir. Özellikle, bu kategoride, yoğunluk düşük, mukavemet yüksek istenilmektedir. Bu durumda en büyük avantaj, elbette, düşük maliyetidir. Bitkiler aslında en büyük fiber malzeme kaynağıdır. Örneğin selülozik, pamuk, keten, jüt, kenevir, sisal ve Rami şeklinde lifler tekstil endüstrisinde kullanılırken, kâğıtta ahşap ve saman kullanılmıştır. Saç, yün ve ipek gibi diğer doğal lifler proteinin farklı formlarından oluşur. Özellikle çeşitli örümcekler tarafından üretilen ipek lifleri yüksek kırılma çalışmaları nedeniyle çok ilgi çekicidir. Takviyeler; cam elyafı, çeşitli formlarında en yaygın olanıdır. Polimer matrisler içinde takviye; 1960'larda piyasaya sürülen Aramid lifi ki cam elyaftan daha sert ve daha hafiftir. Kevlar, Du Pont'un aramid elyafın ticari adıdır. Jel-bükülmüş aramid elyafı ile karşılaştırılabilir bir sertliğe sahip olan polietilen elyaf, 1980'lerde ticarileştirildi. Yüksek performansı birleştiren diğer yüksek performanslı elyaflar yüksek sertlikte mukavemet bor, silisyum karbür, karbon ve alüminadır. Bu malzemelerin hepsi yirminci yüzyılın ikinci bölümünde geliştirildi. Özellikle, bazı seramik elyaflar, yirminci yüzyılın son çeyreğinde, bazı çok yeni işleme teknikleri yani sol-jel işleme ve kontrol ile geliştirilmiştir. [1]

Fiber seçiminde dikkat edilecek hususlar; Fiber hacim oranı, fiber uzunluğu, fiber oryantasyonu çok önemlidir çünkü fiberler kompozitin aşağıdaki özelliklerine katkı sağlar;

- Yoğunluk
- Çekme mukavemeti ve modülü
- Basınç dayanımı ve modülü
- Yorulma mukavemeti ve yorulma hata mekanizmaları
- Elektriksel ve termal iletkenlikler [3]

Fiberler mekanik olarak elastikiyet modülüne etkisi fazla olup, rijitliği (sertlik) matris tarafı etkiler. Matrisin görevi fiberleri bir arada tutup, gelen yükleri fiberlere iletmeektir.

Fiberlerin ana matrise yerleştirilmesinde ve seçim aşamasında arayüz bağlanma, oryantasyon, hacimsel yoğunluk, fiber çap (Esneklik) önemli etkenlerdir.

3.1. Cam Fiberler

Cam fiber temelde silika (Si_2O) oksijen ile birlikte erimesi ve proses aşamasında yerçekiminden faydalanılarak üretilir. Genelde yüksek rijitlik nedeni ile polimer esaslı kompozit malzemelerde kullanılır[4].

Cam elyaflar başlıca avantajları düşük maliyet, yüksek çekme mukavemeti, yüksek kimyasal direnç, mükemmel yalıtım özellikleridir. Dezavantajları ise nispeten düşük elastik modül, diğer fiberler arasında yüksek yoğunluk, nispeten düşük yorulma direnci, yüksek sertlik (yüksek kırılma) [3].

Genel cam elyafları silika bazlıdır ($\sim\%50\text{-}60 \text{ SiO}_2$) ve bir dizi başka oksit içerir (kalsiyum, bor, sodyum, alüminyum ve demir). Yaygın olarak kullanılan bazı cam elyafların bileşimler Çizelge 1’de mevcuttur.

E tanımı elektrik anlamına gelir, çünkü E camı iyi bir elektrik izolatörüdür ve yüksek mukavemet ve makul bir elastik modülüne sahiptir. C korozyon anlamına gelir ve C camı kimyasal korozyona karşı diğer camlardan daha iyi bir direnç gösterir. S camının diğer camlardan daha yüksek sıcaklıklara dayanmasını sağlayan silika içeriği vardır. Üretilen sürekli cam fiberin çoğunun E olduğu bilinmelidir [1]. Cam elyafların bazı özellikleri Çizelge 7 ve 8’ de mevcuttur.

Çizelge 3.1. Cam Fiberlerin Kimyasal Bileşimleri (% Ağırlık).

İçerik	E Glass	C Glass	S Glass
SiO_2	55.2	65	65
Al_2O_3	8	4	25
CaO	18.7	14	-
MgO	4.6	3	10
Na_2O	0.3	8.5	0.3
K_2O	0.2	-	-
B_2O_3	7.3	5	-

Çizelge 3.2. Cam Fiberlerin Özellikleri.

Özellikler	E-Glass	S-Glass
Özgül Ağırlık	2.6	2.5
Elastikiyet Katsayısı (Gpa)	72	87
Çekme Mukavemeti (Mpa)	340	4310
%Uzama	4.8	5
Termal Genleşme Katsayısı ($\mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$)	5	5.6

3.2. Karbon Fiberler

Karbon fiberlerin çekme modülü minimum 207 Gpa maksimum 1035 Gpa arasında değişir. Genelde düşük modüllü, çok düşük yoğunluk, daha düşük maliyet, yüksek çekme ve basma gerilmesine sahiptir. Avantajları arasında düşük yoğunluk oranı ile birlikte son derece yüksek çekme gerilmesi ve çekme modülüne, çok düşük linear termal iletkenlik katsayısı, yüksek yorulma mukavemeti ve yüksek ısı iletkenliğe (Bakırdan fazladır) sahiptir.

Dezavantajları ise düşük darbe direnci ve kısa devreye neden olacak yüksek elektriksel iletkenliği ve yüksek maliyettir [3].

Ticari olarak 3 tipi vardır. Yüksek modül (HM, Type I), Yüksek dayanım (HM, Type II), ortalama modüldür (HM, Type III) [4]. Çizelge ‘de karbon fiber çeşitlerine göre özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.3. Ticari karbon fiberlerin tipik özellikleri.

Özellikler	HM Type I	HS Type II	IM Type III
Özgül Ağırlık	1.9	1.8	1.8
Çekme Katsayısı (Gpa)	276-380	228-241	296
Çekme Mukavemeti (Mpa)	2415-2555	3105-4555	4800
%Uzama	0.6-0.7	1.3-1.8	2
Termal Genleşme Katsayısı ($\times 10^{-6} \text{ mm}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	-0.7	-0.5	N/A
Termal İletim ($\text{Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	64-70	8.1-9.3	N/A
Elektrik Direnci ($\mu\Omega \text{ m}$)	9-10	15-18	N/A

3.3. Seramik Fiberler

Yüksek mukavemetli ve elastik modülü ile yüksek sıcaklık yeteneği ve çevresel şartlara karşı dayanıklılıktan dolayı takviye olarak seramik fiberleri yüksek sıcaklık yapısal malzemelerde istenilen malzeme haline getirmiştir.

Seramik fiberlerin üretmenin üç yolu vardır: kimyasal buhar biriktirme, polimer piroliz ve sol-jel teknikleri. Son ikisi oldukça yeni organometalik polimerlerden seramik elde etme teknikleridir. Sol-jel tekniği, çeşitli alümina bazlı ürünler üretmek için de kullanılır ve ticari olarak oksit fiberler olarak adlandırılır. Seramik fiber alanında bir başka atılım piroliz kavramı; kontrollü koşullar altında, silikon ve karbon veya azot içeren polimerler yüksek sıcaklıkta seramik fiberlere dönüştürülebilir. Bu yöntem seramik fiber üretiminde piroliz yolu içeren polimerler ile kullanılmıştır ki bunlar silikon, karbon, azot ve bor, son ürünler ise SiC , Si_3N_4 , B_4C ve BN fiber köpük veya kaplama şeklinde, önemli seramik fiberlerdir [1].

3.4. Aramid Fiberler

Aramid fiber ilk Dupont şirketi tarafından ticari adı Kevlar olarak piyasaya sürülmüştür. Oldukça yaygın olarak kullanılan organik fiberler arasında yer almaktadır. Polimer bir

malzeme olan Aramid, yoğunlaştırma/çekme prosesi ile üretilir. Oldukça anizotropik bir yapıya sahiptir ki bunun sebebi oldukça güçlü kovalent bağ kurmasıdır.

Aramid fiber eksenel yönde oldukça yüksek çekme dayanımı, rijitlik ve tokluğu sahiptir. Fakat nispeten enine yönde düşük çekme dayanımı ve rijitliğe sahiptir [6].

Çizelge 3.4. Kevlar çeşitlerinin özellikleri.

Fiber	Fiber Çap(μm)	Özgül Ağırlık	Sertlik (Gpa)	Özgül Sertlik	% Uzama	Çekme (Gpa)	Özgül Çekme	Termal Genleşme Katsayısı ($\times 10^{-6}$ m/m/°C)	Maksimum İşletme Sıcaklığı (°C)	Ticari isim
Aramid										Du Pont
Balistik	12	1.43	80	2.1	3.6	2.9	9.7	16.9	250	Kevlar 29
Yapısal	12	1.45	120	3.1	2.8	2.9	9.7	17.1		Kevlar 49
Yüksek Modül	12	1.47	185	4.7	1.5	2.3	7.7	17.3		Kevlar 149

Çizelge ' da görüldüğü gibi özellikler mevcuttur bunun beraber piyasada kullanım yerleri ve maliyetleri aşağıda belirtilmiştir.

- Kevlar 149: Yüksek performans, havacılık sınıfında kullanılmasıyla beraber bütün Kevlar tipleri arasından en yüksek modüle sahip tiptir.
- Kevlar 49: Yüksek performans, havacılık sınıfında kullanılmasıyla beraber bütün Kevlar tipleri arasından en yüksek dayanıma sahip tiptir.
- Kevlar 129: Nispeten daha ucuz olmakla birlikte Kevlar 149 ve 49' a göre düşük dayanım ve rijitliğe sahiptir. Fakat yüzde uzama oranı yüksektir.
- Kevlar 29: Nispeten daha ucuz olmakla birlikte Kevlar 129' a göre düşük dayanım ve rijitliğe sahiptir. Fakat yüzde uzama oranı yüksektir.

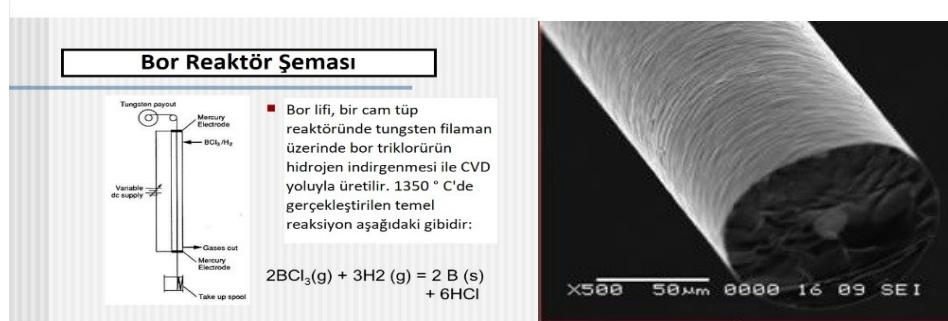
3.5. Bor Fiberler

Bor fiberler kompozitler de kullanılan ilk yüksek performanslı fiberlerdendir. CVD yöntemi ile ısıtılmış çekirdek (Tel, altlık) üzerine bor kaplanarak üretilir. Fiberler arasında en yüksek fiber çapına sahiptir (0.1 ile 0.2 mm ve 125 ile 140 μm). Elastikiyet modülü

yaklaşık 410 Gpa çekme direnci yaklaşık 3450 Mpa' dır. Büyük çaplı kombinasyonundan dolayı yüksek sertliğe neden olur ki bu da fiber bükülmesini büyük çapta kısıtlar. Diğer yandan bor fiber takviyeli kompozitlerde fiber çapının büyük olması yüksek elastikiyet modülüne katkıda bulunur ve mükemmel basma gerilmesi sağlar [6].

Bor, elmas kadar serttir ki bu da bor fiber takviyeli PMCS ' ler de işlemeyi zorlaştırır. Karbon fiber işlenmesi kolay olduğu için daha ucuz ve yaygın olsa da uzay ve havacılıkta büyük oranda bor fiber, karbon fiberin yerini almaya başlamıştır.

Bor fiber üretimde doğada bulunan Bor halojenler (Bor'un flor, klor brom iyot gibi halojenlerle yaptığı bileşiklerdir Bor oksitin derişik sülfirikasit ve florit, klorit, bromit, iyodit gibi halojenlerle ısıtılmasıyla elde edilir.) kullanılır. CVD ile ısıtılmış Tungsten tel ya da Karbon fiber üzerine Bor klorürün Hidrojen ile tepkimeye girmesi sonucu kaplama yapılarak üretilir. (Bkz.Şekil 3.1.). Çizelge 'de görüldüğü üzere çaplara bağlı olarak çekme modülünde farklılık göstermemesine rağmen özgül modülde farklılık göstermektedir [19].



Şekil 3.1. Bor Fiber Üretim Şeması, Reaksiyonları ve X500 Görünüm.

Çizelge 3.5. Bor Fiber Çaplara Bağlı Mekanik Özellikler.

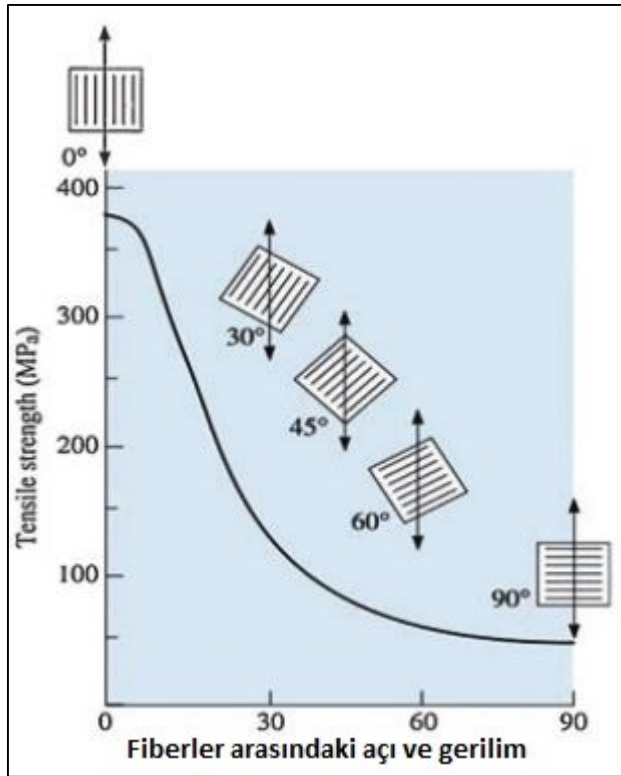
Üretim ve Özellikleri	Tungsten tele, Boron sıcak CVD ile kaplama			
Fiber Çapı (µm) Test Sonuçları	140 Ortalama	100 Ortalama	100 Çok iyi Numune	55 Öngörülen
Çekme Mukavemeti (Gpa)	3.5	3.5	4.8	3.5
Çekme Modülü (Gpa)	400	400	400	400
Yoğunluk (g/cm ³)	2.5	2.6	2.6	3.1
Özgül Mukavemet (km)	141.4	135.9	186.5	114
Özgül Modül (10 ³ km)	16.2	15.5	15.5	13

3.6. Sürekli Fiber Yönleri

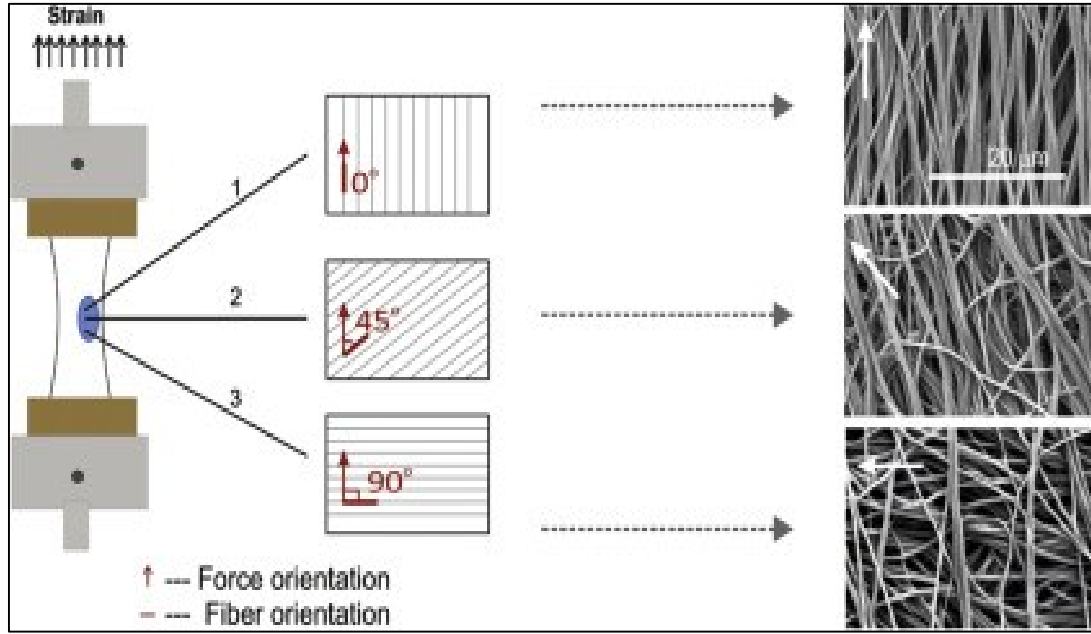
Şekil 3.2’ de görüldüğü gibi gerilme yönüyle fiberler paralel olduğunda ve fiberler arası açı 0° ise mukavemet değeri en yüksek seviyede elde edilir. Bunun nedeni fiberlerin çekmeye karşı direnç göstermesi ve yükü taşımasıdır.

Fiberler arası açı arttıkça ($30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$) gerilme değeri ve kompozitin mukavemeti düşer. Çünkü fiberler arası açı arttıkça fibere etkiyen çekme gerinimi azalacaktır.

Fiberler arası açı 90° olduğunda yani fiberler ile gerilmenin yönü dik olduğunda minimum mukavemet değeri elde edilir. Burada çekme kuvveti etkisiyle matris ve takviye arasındaki arayüzey bağı açılmaya, ayrılmaya ve kopmaya zorlanacaktır. Şekil 3.3’ de ise açılara göre dayanı durumu mikroskop resimleri ile gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Fiber açısı, gerilme ve mukavemet değeri.



Şekil 3.3. Çekme deneyinde değişik fiber yönlerindeki durumlar.

4. TABAKALI KOMPOZİT MALZEME'DE UYGULANAN TESTLER

Bir malzemenin uygulanan kuvvetlere karşı gösterdiği tepki mekanik davranış olarak tanımlanır. Bu davranış değişik tür zorlamalar altında oluşan gerilme ve şekil değiştirmeleri ölçerek ve gözleyerek saptanır. Cisimler artan dış zorlamalar altında önce şekil değiştirir, sonra dayanımını yitirerek kırılır. Düşük gerilmeler altında şekil değiştirmeler elastik yani tersinirdir. Gerilme elastik sınırı aşarsa kalıcı yani plastik şekil değiştirme oluşur. Elastik şekil değiştirmeye karşı direnç veya rijitlik malzemenin elastisite modülü ile belirlenir. Malzemelerin iç yapısında, kalıcı değişimi veya kırılma oluşturan herhangi bir gerilme sınırı mukavemet olarak tanımlanır [20].

Tüm mekanik testler aslında uygun standartlarda malzemede yer değiştirme veya gerinimi ölçmek için kullanılan yöntemlerdir. Mekanik testlerde önerilen prosedürü takip etmek önemlidir. Test sonrası uzunluk standartlarda belirtilmiş olabilir ancak numune her zaman prosedürde belirtilenden önemli ölçüde kısa olmalıdır. Kompozitler metallerde karşılaşılmayan önemli zorluklar ortaya çıkabilir [21].

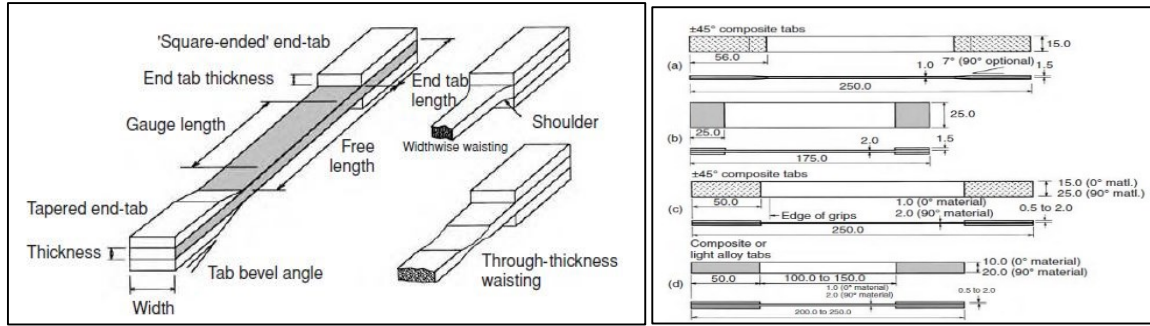
Mekanik testler ile özellikleri öğrenilecek malzeme; Çekme, basma, eğme ve kesme gibi özellikler birçok malzemede temel özelliklerdir [3].

Fiberleri karakterize etmek için tek bir teknik seçmek olsaydı, termal analiz (TA) tercih edilen teknik olacaktır. Kritik konular, kontrol fiber performansı ve parametreleri, TA örtüşmesi ile uygun şekilde ölçülür. Fiber performansı, toplam fiber işlem geçmişi tarafından kontrol edilir ve bu tarih tarafından elyafa aktarılan nano—mikro temel yapısal elemanlar - kristal morfolojisi, kristallik, moleküler yönelim ve faz bağlantısı, TA teknikleriyle elde edilebilen parametrelerdir [22].

4.1. Çekme Testleri

Basitçe söylemek gerekirse, bir çekme testinin amacı, bir malzemenin nihai çekme gerilmesini (UTS) ve çekme modülünü (E) belirlemektir ve ek enstrümantasyon ile Poisson oranı da ölçülebilir. Bununla birlikte, kontrollü koşullar altında bir malzemenin yakından gözlemlenen bir testi, yük altında nasıl davrandığı hakkında çok daha fazla bilgi

sağlamalıdır. Örneğin, bir kompozit parçalanabilir veya delamine olabilir ve malzemenin artan yüke maruz kaldıkça incelenmesi, hasarın nasıl başladığı ve geliştiği hakkında bir fikir verebilir. Son olarak, başarısızlığın doğası görülür; herhangi bir uyarı olmadan kırılabilir veya belirgin sesli veya görünür işaretlerden önce gelebilir. Tüm bu bilgiler yararlıdır; Malzemeden ciddi bir kullanım yapılması gerekiyorsa, UTS'nin bilgisi ve başarısızlığın meydana gelme şekli hayati önem taşır [20]. Çekme testi için numune standartları Şekil 4.1'de gösterildiği gibi fiber yönü 0° olan ASTM D3039, ISO 527 ve CRAG methods 300 301 polimer kompozit malzemeler için uygulanan, fiber yönü 90° olanlar için ASTM D 30393, CRAG methods 301 uygulanan standartlardır. [21]



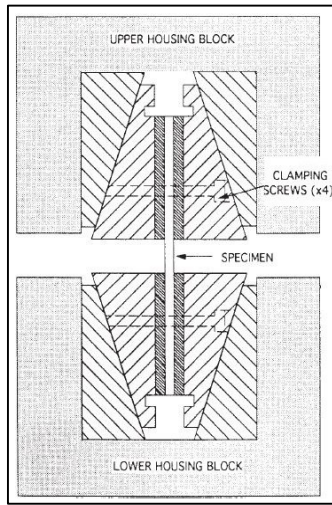
Şekil 4.1. Çekme testi numune 3 boyut gösterimi ve Fiber Takviyeli Polimer Kompozit malzemelerde numune örnekleri; (a) ASTM D 3039 (0°); (b) ASTM D 30393 (90°); (c) ISO 527 (0°); (d) CRAG methods 300 (0°) and 301 (90°).

4.2. Basma Testleri

Oldukça hafif yapılar ve altyapılar sıkıştırma elamanları içerir ki bunlar doğrudan basma, eğilme ve basma yükünün bir kombinasyonu olan sıkıştırmadır. Hafif yapılar için olağan tasarım süreci, yükleri sıkıştırma ve gerginlik net olarak tanımaya çalışır. Örneğin, çerçeve veya sandviç konstrüksiyonların eğilme yüklemesi, desteklerin veya kaplamaların esasen net sıkıştırma ve gerdirme yüklemesine dönüştürülür. Kompozit malzemeler, yüksek ortotropileri nedeniyle bu tür tasarımlar için özellikle uyarlanabilir.

Sıkıştırma elemanlarının eksenel sertliği sadece kesit alanı tarafından kontrol edilebilir. Bu nedenle, ağırlık ile orantılıdır. Eksenel olarak sıkıştırılmış desteklerin veya panellerin bükülme sertliği özellikle önemlidir, çünkü çalışma içi burkulmadan normalde kaçınılmalıdır. Bunu engellemek için Şekil 4.2. Basma test aparatının şematik gösterimi.. Bu sertlik, örneğin çubuklar yerine tüplerin kullanılması, düz plakalar yerine sandviçler,

oluk açma veya sertliklerin yerleştirilmesi gibi geometrik yollarla değiştirilebilir. Belirli bir geometrinin bir elemanındaki gerilmeler ancak yük altındaki etkin kesiti arttırarak azaltılabilir. İdeal hafif yapı malzemesi için hem gerginlik hem de sıkıştırmada yüksek özgül sertlik ve mukavemetin arzu edilen özellikler olduğunu izler. Fiber takviyeli plastik matris kompozitler özellikle yüksek gerilme mukavemetleri için değerlidir. Bununla birlikte, bazı kompozitlerin, örneğin aramid liflerle takviye edilenlerin nispeten düşük basınç dayanımı, potansiyel uygulamalarını azaltır [21].



Şekil 4.2. Basma test aparatının şematik gösterimi.

4.3. Dinamik mekanik Analiz (DMA)

Dinamik mekanik analiz, dinamik modül ölçmek için kullanılan bir karakterizasyon tekniğidir. Numunelerin kinetik özellikleri, zamanın bir fonksiyonu olarak numuneye uygulanan gerilme veya gerilimdeki değişiklik nedeniyle oluşan Dinamik mekanik analiz, numuneye sabit gerilme veya gerilme uygulanarak zamanın bir fonksiyonu olarak gerilme veya gerilimdeki değişim açısından viskoelastik özelliklerin değerlendirilmesiyle tanımlanır. Mekanik özellikleri zamanın bir fonksiyonu olarak ölçmek için kullanılabilir [7].

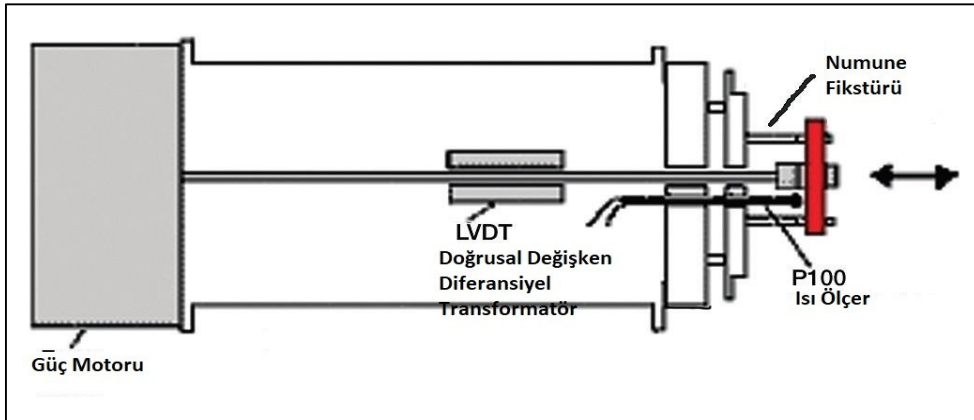
Dinamik mekanik analiz (DMA) esasen bir gerilme veya gerilme modülasyonlu termo mekanik analiz (TMA) dir. Polimerlerin ve liflerin mekanik özelliklerini belirlemek ve cam geçiş sıcaklığını ve diğer ikinci dereceden geçişleri (α , β , vb.) Ölçmek için yaygın olarak kullanılır [8].

DMA, malzemenin uygulanan salınım kuvvetine tepkisini analiz etmek için Resim 4.1’de ki gibi cihazlar kullanılır [23]. Bu cihaz ve yöntem ile faz farkından kaynaklanan viskozite (akışın doğası) ve numune geri kazanımından elde edilen modül (sertlik) hesaplanabilir. Bu özellikler, DMA kullanılarak tahmin edilen sönümlenme (ısı olarak enerji kaybetme kabiliyeti) ve (deformasyondan kurtulma kabiliyeti) nedeniyle çok önemlidir [7].



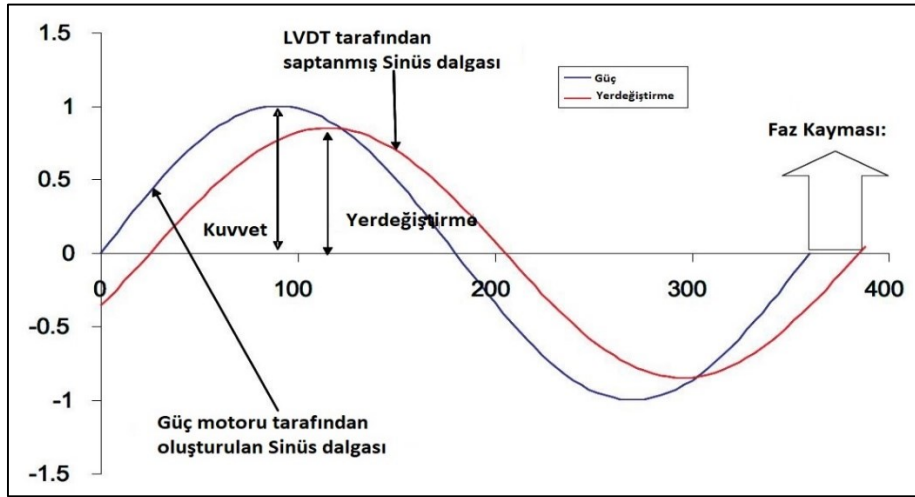
Resim 4.1. DMA Cihazı (DM800)

DMA, bilinen bir geometri örneğine sinüzoidal bir deformasyon uygulayarak çalışır. Numune kontrollü bir gerilme veya kontrollü bir gerinme ile tabi tutulabilir. Bilinen bir gerilme için, numune daha sonra belirli bir miktarda deforme olacaktır. DMA'da bu sinüzoidal olarak yapılır. Ne kadar deforme olduğu sertliği ile ilgilidir. Sinüzoidal dalgayı oluşturmak için bir kuvvet motoru kullanılır ve bu, numuneye bir tahrik mili vasıtasıyla iletilir. Şekil 4.3’ de gösterildiği gibi bir bağlantı her zaman bu tahrik milinin uygunluğu ve herhangi bir dengeleyici yatağın yerinde tutar [23].



Şekil 4.3. DMA Cihazı kesiti (DM800)

DMA sertlik ve sönümlemeyi ölçer, bunlar modül ve tan deltası olarak rapor edilir. Sinüzoidal bir kuvvet uyguladığımız için, modülü faz içi bileşen, depolama modülü ve faz dışı bileşen, kayıp modülü olarak ifade edebiliriz, (bkz.Şekil 4.4) Depolama modülü, E' veya G' , numunenin elastik davranışının ölçüsüdür. Kaybın depolama modülüne oranı tan deltasıdır ve genellikle sönümleme olarak adlandırılır. Bu ölçüm bir malzemenin enerji dağılımının bir ölçüsüdür [23].



Şekil 4.4. Uygulanan sinüzoidal gerilim-gerinim ile ilişkisi, sonuçta ortaya çıkan faz gerilemesi ve deformasyon ile gösterilmiştir.

4.4. Diferansiyel Tarama Kalorimetri (DSC)

Kalorimetri, kalori ve ölçüm kombinasyonundan elde edilir. Termal analiz, malzemeye giden ve gelen ısı akışını ölçerek tahmin edilen bir malzemedeki enerji değişikliklerini incelemek için kullanılır. Kalorimetri, tipik bir ilgi süreciyle bağlantılı entalpinin doğrudan tahminini yapmak için kullanılan temel bir tekniktir.

Başka bir deyişle, cihaz, zaman ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak numune malzeme geçişlerine bağlı sıcaklık ve ısı akışını düzenleyen bir termal analiz cihazıdır. Bir sıcaklık değişimi sırasında DSC, numune ile referans arasındaki sıcaklık farkına dayanarak numune tarafından yayılan veya emilen bir ısı miktarını ölçer. DSC genel olarak iki ana sınıfa ayrılabilir: ısı akışı DSC'LERİ ve güç kompanzasyonlu DSC' ler (PC-DSC'LER) [7].

Isı akışı DSC, bir numune ve referans malzeme kullanılarak oluşturulan numune ünitesinin sıcaklığının belirli bir programda değiştirildiği ve numune ile referans malzeme arasındaki

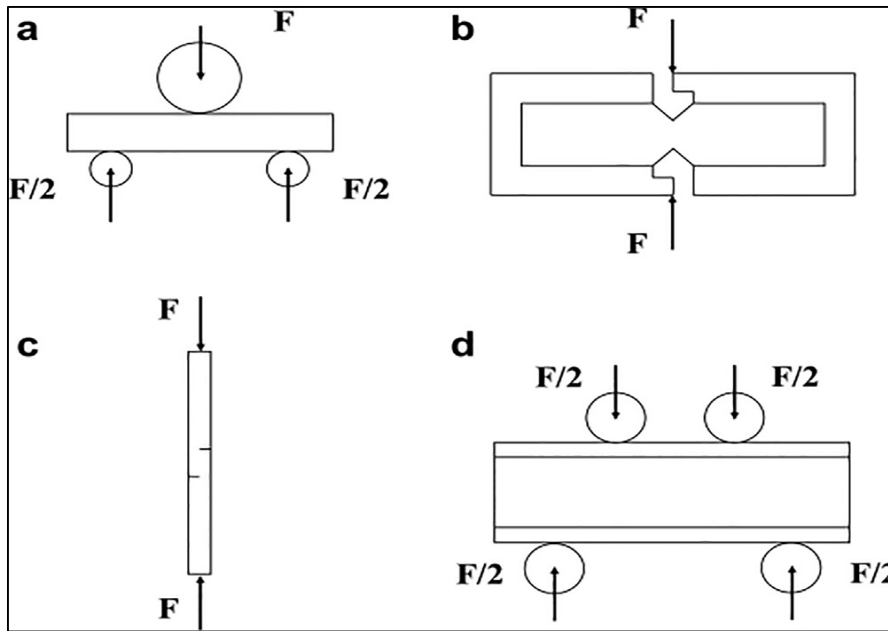
sıcaklık farkının sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçüldüğü bir tekniktir. Bu tip dsc'de, hem numune hem de referans, tek bir ısıtma kaynağı kullanılarak aynı oranda ısıtılır. Tavalar arasındaki sıcaklık farkı kaydedilir ve bir güç farkına dönüştürülür. Bu güç farkı ısı akışındaki farkı verir [7].

4.5. Katmanlararası kayma mukavemeti testi (ILSS)

Katmanlararası kesme mukavemeti, birçok uygulamada önemli bir rol oynayan matris baskın bir özelliktir, çünkü katmanlararası kesme genellikle kompozitleri içeren farklı bileşenler arasındaki yük transfer mekanizmasıdır. Birkaç yöntem kompozit katmanlararası kesme mukavemeti testi için kullanılabilir, en yaygın şunlardır:

- Genellikle Iosipescu olarak adlandırılan V-çentikli kiriş testi, standart ASTM D5379;
- Çift çentik kesme, standart ASTM D3846;
- Sandviç konstrüksiyonların çekirdek kesme özellikleri için test yöntemi kiriş bükme, standart ASTM C 393.

Bu test yöntemleri ayrıca Şekil 4.5' de gösterilmiştir [9].



Şekil 4.5. Katmanlararası kesme testi yöntemleri: (a) Kısa kiriş kesme üç noktalı bükme, (b) V çentikli kesme, (c) Çift çentikli kesme, (d) Sandviç çekirdek kesme testi ve I-kiriş dört noktalı bükme.

Lamine sürekli fiber kompozitlerin çoğu, laminasyonlar arasında ve fiber / matris arayüzleri boyunca zayıf düzlemleri içerir. Gerilme yönü elyafarla kesişmedikçe, kesme işleminde kompozit mukavemete bu zayıflıklar hâkim olacaktır. Katlar arasındaki arayüzlerdeki kayma gerilmeleri, komşu katların anizotropileri nedeniyle döşeme tasarımı ile nadiren önlenabilir. Borular ve Pagano (1970) tarafından gösterildiği gibi, bu ara tabakalar arası kesme gerilmeleri genellikle kenarlarda yüksektir ve genellikle kenarlardan kompozite yayılan ve laminatın gerilme mukavemetini önemli ölçüde azaltan delaminasyonlara neden olur. Delaminasyon, lamine kompozitlerde başarısızlığın önemli bir nedenidir ve tasarımcının endişelerinden biri kesme gerilmelerinin streten güvenli bir şekilde dağılmasını sağlamaktır [24].

4.6. Radar geçirgenlik testi

Radar kesiti (RCS), bir nesnenin radarla ne kadar algılanabilir olduğunun bir ölçüsüdür. Daha büyük bir RCS, bir nesnenin daha kolay tespit edildiğini gösterir. Radara maruz kalan bir nesnenin radar kesiti, radara geri yansıyan dalganın yoğunluğunu tanımlayan hayali bir alandır [10].

Bir nesne, kaynağa sınırlı miktarda radar enerjisi yansıtır. Bunu etkileyen faktörler şunlardır:

- Hedefin yapıldığı malzeme;
- Hedefin, hedefi aydınlatan radar sinyalinin dalga boyuna göre boyutu;
- Hedefin mutlak büyüklüğü;
- Olay açısı (radar ışınının hedefin şekline ve radar kaynağına yönlendirilmesine bağlı olarak hedefin belirli bir bölümüne çarptığı açı);
- Yansıyan açı (yansıyan ışının hedefe vurduğu kısımdan ayrıldığı açı; olay açısına bağlıdır);
- Hedefin yönüne göre iletilen ve alınan radyasyonun polarizasyonu.

Hedeflerin tespitinde önemli olmakla birlikte, vericinin gücü ve mesafe RCS hesaplamasını etkileyen faktörler değildir, çünkü RCS hedefin yansıtıcılığının bir özelliğidir [25].

5. MALZEME VE METOT

5.1. Kullanılan Malzemeler

Bu tez çalışmasında 2 farklı kompozit malzeme üretilmiştir. Üretim sonrasında bu kompozitlerin testlere tabii tutularak karşılaştırma yapıp değerlendirilmiştir. Üretim sırasında kullanılan malzemeler ile ilgili fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Üretimde kullanılan malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri.

Özellikler (Oda Sıcaklığında)				
Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Basma Mukavemeti (Mpa)	Kesme Dayanımı (Mpa)
Bor Fiber Prepreg (Specialty Materials 5505 Boron Epoxy Prepreg Tape)	2	1590	2930	110
Nano Bor	2,84	261	2583	180
Kürlenmiş Reçine(RTM6)	1,14	90	320	115

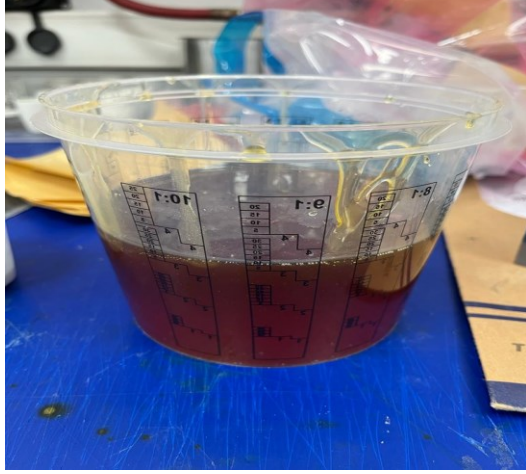
Çalışmada kullanılan birinci kompozit için, bor fiber prepreg malzemesi (Borone/Epoxy Unidirectional Preprated Tape 5505) kullanılmış, reçine olarak HexFlow RTM6 epoxy kullanılmıştır. ikinci kompozit malzeme için bu malzemelere ilaveten nano bor eklenerek el yatırma yöntemi ve otoklav kürleme yaparak üretilmiştir.

5.2. Kompozit Malzemelerin Üretimi

5.2.1. Reçinenin hazırlanması

Kompozit malzemenin elde etmesi için ilk olarak ihtiyaç duyulan, soğutucudan çıkartılan reçine oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir (Bknz. Resim 5.1). Daha sonra aynı reçineler oda sıcaklığında kuru bir ortamda Nb katkılı ve katkısız olarak 2 farklı türde hazırlanmıştır (Resim 5.1). Katkılı reçinede deneeme yöntemi tastiklenen miktar olan 4 gr epoksi

reçineye 0.030 gr nanobor eklenmiş ve topaklamayı engeleyecek şekilde homojen olarak karıştırılmıştır (Bknz. Resim 5.2).



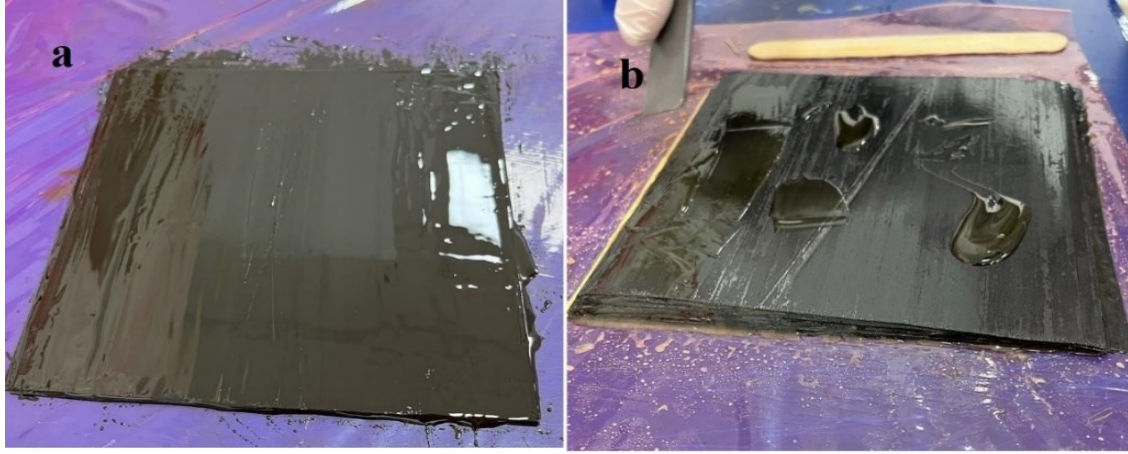
Resim 5.1. HexFlow® RTM6 Epoxy reçine



Resim 5.2. Üretimde kullanılan reçineler; a) Nb katkılı epoksi reçine b) Katkısız epoksi reçine

5.2.2. Serimin yapılması

Kompozit malzemenin elde etmesi için reçine hazırlandıktan sonra ihtiyaç duyulan Bor fiber prepreg aynı odada 9 kat olacak şekilde ve test numuneleri dikkate alınarak hazırlanmıştır. Daha sonra aynı bor fiber prepreg, Nb katkılı reçine ve katkısız reçine (Resim 5.3) olarak 2 adet üretilmiş ve otoklav'a hazır hale getirilmiştir. (Resim 5.4)



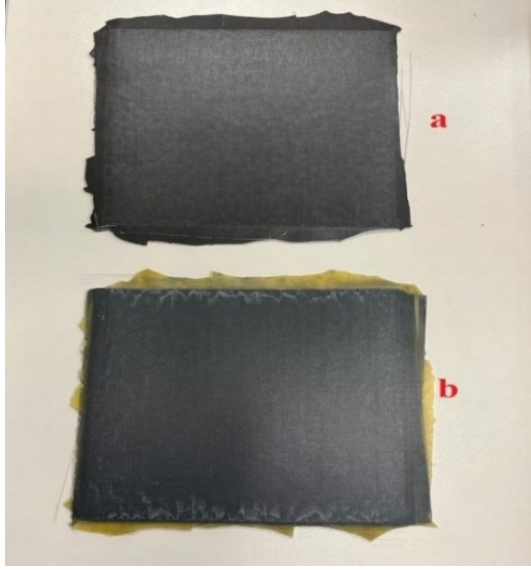
Resim 5.3. a) Nb katkılı reçine serilmiş hali b) Katkısız reçine serilmiş hali



Resim 5.4. Katkısız ve Nb katkılı halde serim yöntemi yapılmış, Otoklav'a hazır halde kompozitler.

5.2.3. Otoklav

Hazırlanan kompozit malzemeler 80°C ön sıcaklıkta 1 saat bekletildikten sonra 178°C sıcaklıkta 3,4-5,9 bar vakum altında 125-135 dakika kürlenmesi için bekletilmiş, sonrasında havalandırma torbasında 50°C'de 130 dakika bekletilmiştir. (Resim 5.5).



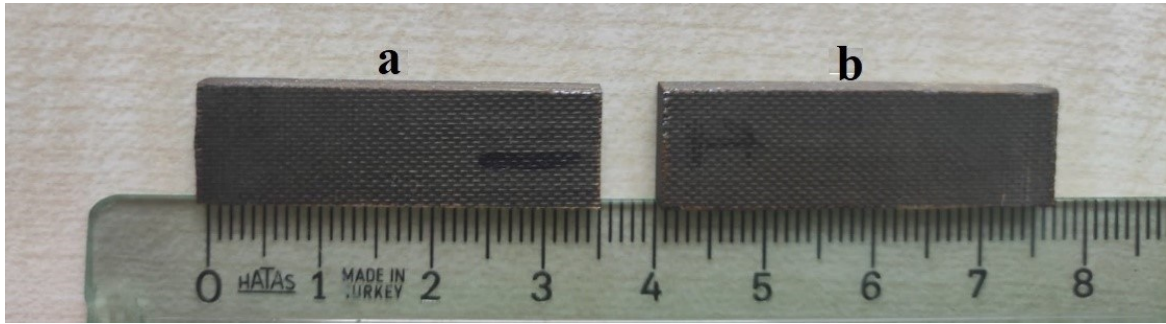
Resim 5.5. Son ürün tabakalı kompozit malzemeler; a) Nb katkılı tabakalı kompozit malzeme b) Katkısız tabakalı kompozit malzeme.

5.3. Kompozit Numunelerin Hazırlanması

Üretimi gerçekleştirilen kompozit malzemeler fırından çıkartıldıktan sonra Resim 5.7’de görüldüğü gibi DMA için 35x10.55x3.35 mm, DSC için 0.79 g, ILSS için ~ 20x10.6x3.5 mm ölçülerinde Martin T75 kesme tezgâhında 30 mm çapında elmas uçlu testere ile kesilmiştir. Resim 5.6’da görüldüğü gibi hazırlanan numuneler temiz ziploc poşetlerde muhafaza edilmiştir.



Resim 5.6. Nanobor katkılı ve katkısız tabakalı kompozit malzeme test numuneleri



Resim 5.7. DMA için hazırlanmış tabakalı kompozit malzeme ölçülü test numuneleri; a) Nb katkılı tabakalı kompozit malzeme test numunesi b) Katkısız tabakalı kompozit malzeme test numunesi.

5.4. DMA, DSC, ILSS, Radar Geçirgenlik Testlerinde Kullanılan Cihazlar

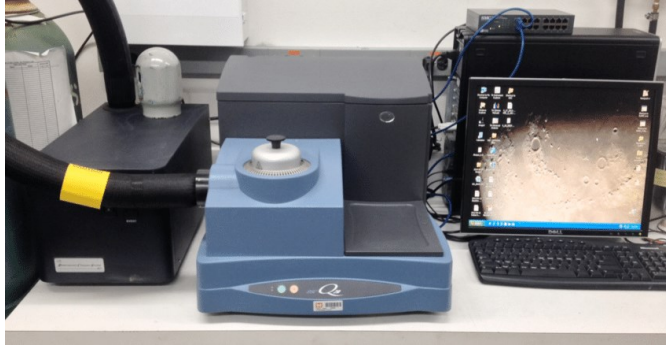
Çalışmada Dinamik Mekanik Analiz testi için, DMA Q800 (Resim 5.8) test cihazı, sıcaklık rampası (Temperature Ramp) methodu kullanılmıştır. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri testi için, DSC Q20 (Resim 5.9) test cihazı EN 6064 methodu kullanılmıştır. Katmanlararası kayma mukavemeti testi (ILSS) için INSTRON 5985 (Resim 5.10)

makinesinde EN 2563 methodu kullanılmıştır. Radar geçirgenlik testi için IFR Microwaver Spectrum Analyzers

Resim 5.11) frekans aralıkları 8.2-12.4 GHz ile 12.4-18 GHz, iletim hattı tekniği yöntemi kullanılmıştır [26].



Resim 5.8. DMA Q800



Resim 5.9. DSC Q20



Resim 5.10. ILSS için kullanılan INSTRON 5985 cihazı



Resim 5.11. Radar geçirgenlik testi için kullanılan IFR Microwaver Spectrum Analyzers cihazı

6. DENEYSEL SONUÇLAR

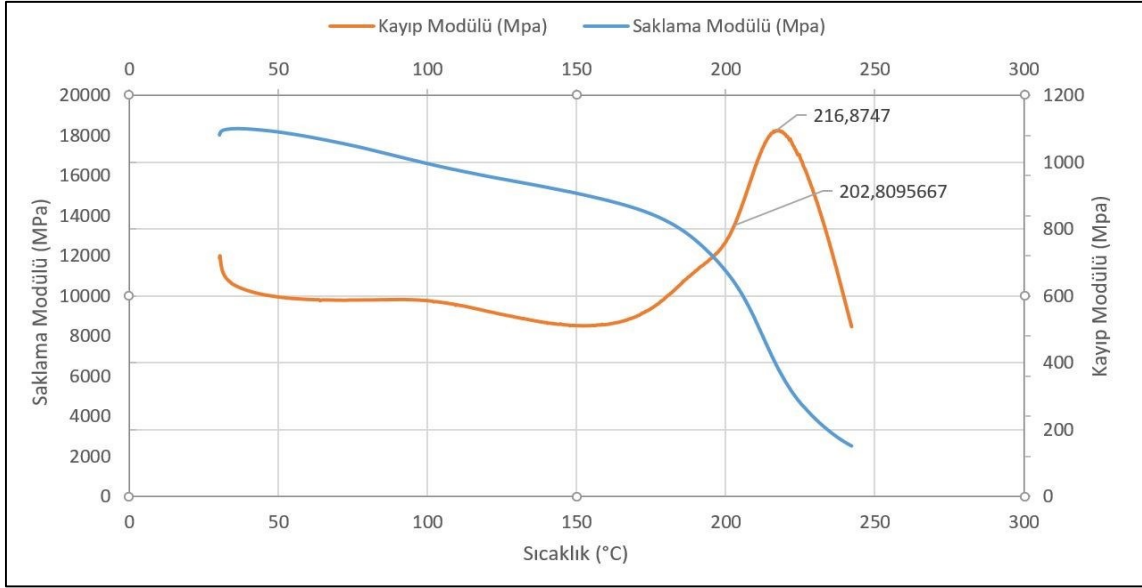
Sürekli bor fiber takviyeli epoksi polimer tabakalı kompozit malzeme ile Nb katkılı sürekli bor fiber takviyeli epoksi polimer tabakalı kompozit malzeme numunelerin deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen DMA, DSC, ILSS, Radar geçirgenlik testi sonuçları karşılaştırılmış/incelenmiştir. Ayrıca radar geçirgenlik testinde karbon fiber takviyeli polimer kompozit malzeme ve yapısal çelik malzeme ile ilgili test sonuçları karşılaştırılmıştır.

6.1. DMA Sonuçları

Bir malzemede elastik deformasyon, uygulanan yük ile doğru orantılı gecikmesizin olur fakat Polimer malzemeler deformasyon doğrusal değildir ve bu malzemeler viskoelastik davranış gösterir. Polimer malzemeler camsı geçiş sıcaklığının üstünde plastik davranış gösterir.

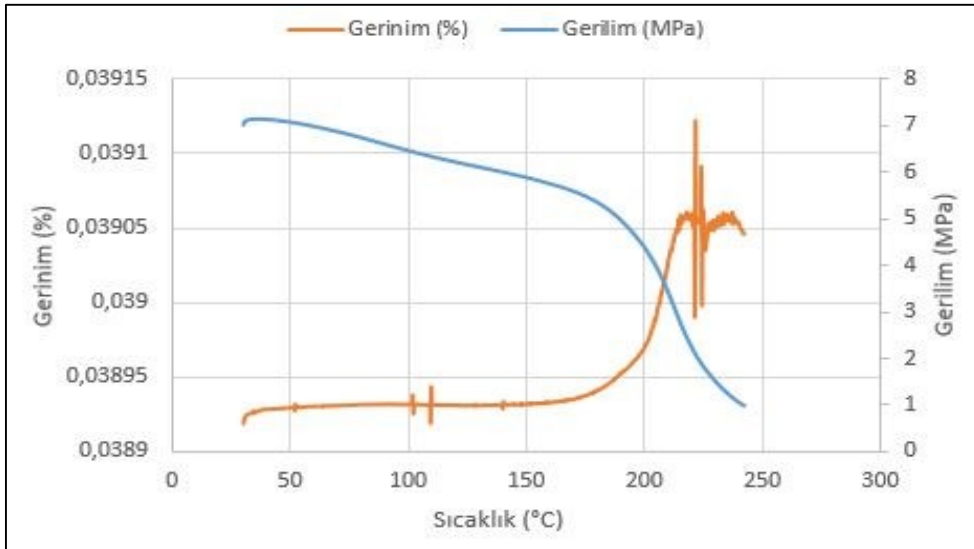
Dinamik Mekanik Analiz (DMA), malzemeleri özellikle tanımlamak için kullanılan bir tekniktir. Bir numuneye yer değiştirme uygular ve dökme malzemenin kontrollü bir sıcaklık ortamında mekanik cevabını ölçer. Yani, numuneye sinusoidal fonksiyona benzer, zamana ve frekansa bağlı olan mekanik bir kuvvet uygular ve numunenin tepkisini ölçer. Aynı zamanda numunenin sıcaklığı da değiştirilerek numunenin enerji depolama ve kayıp modüllerinin sayısal olarak değişimi de izlenebilir.

Serim yöntemi ile üretilen kompozit malzemelerin özellikleri, yapılan işlem koşullarına özelliklerde eklenen malzemelerin türüne, miktarına göre farklı sonuçlar elde etmek mümkündür. DMA’da, üretilen iki farklı türden tabakalı kompozit malzemeden her birinden 3’er adet üretilerek teste maruz bırakılmıştır. Elde edilen test sonuçlarında ki data başlıklar; Zaman (min),Sıcaklık (°C),Storage Modulus (MPa), Loss Modulus (MPa), Gerilim (MPa),Tan Delta, Frekans (Hz), İtici güç (N), Genlik (µm), Gerinim (%), Yerdeğişim (µm),Statik Güç (N),Konum (mm),Uzunluk (mm),Güç (N), Sertlik (N/m), GCA baskı (kPgauge) mevcuttur. Şekil 6.1,Şekil 6.2, Şekil 6.3,Şekil 6.4 ,Şekil 6.5 ‘da mevcut başlıklardan DMA testinin doğası gereği sıcaklık sabit alınıp saklama modül, kayıp modül, gerilim, gerinim değerleri kullanılarak grafikler ortaya çıkmıştır.



Şekil 6.1. Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme dinamik modül DMA sonuçları.

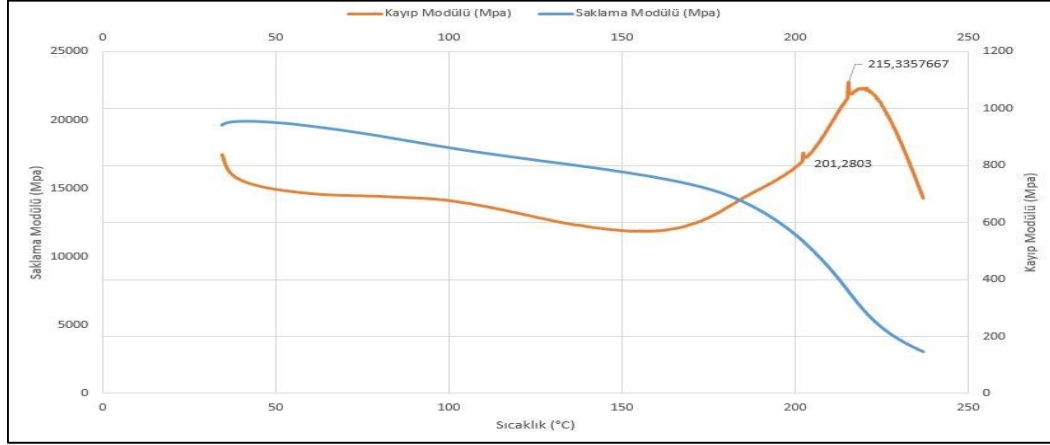
Tabakalı bor fiber takviyeli (katkısız) üç farklı numunenin ortak grafiğine bakıldığında camı geçiş sıcaklığı Tg başlangıç yaklaşık 202 °C, Tg kayıp başlangıç yaklaşık 216 °C olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.2. Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme gerinim-gerilim DMA sonuçları.

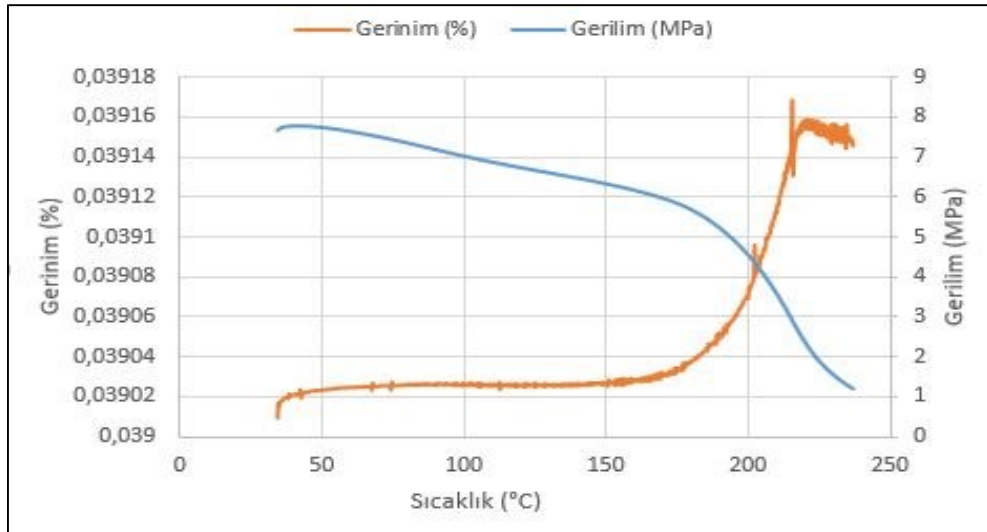
Tabakalı bor fiber takviyeli (katkısız) üç farklı numunenin ortak grafiğine bakıldığında sıcaklık arttıkça doğal olarak gerilim düşmektedir. Camı geçiş sıcaklığı Tg başlangıç olan 202 °C'de gerilimde ani düşüş gözlemlenmiş, gerinim ise Tg başlangıç sıcaklığında

gerilimin aksine ani yükselme gözlemlenmiştir. Gerinim Tg kayıp başlangıç sıcaklığı olan 216 °C ‘de alt akma gözlemlenmiştir.



Şekil 6.3. Nb katkılı tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme dinamik modül DMA sonuçları.

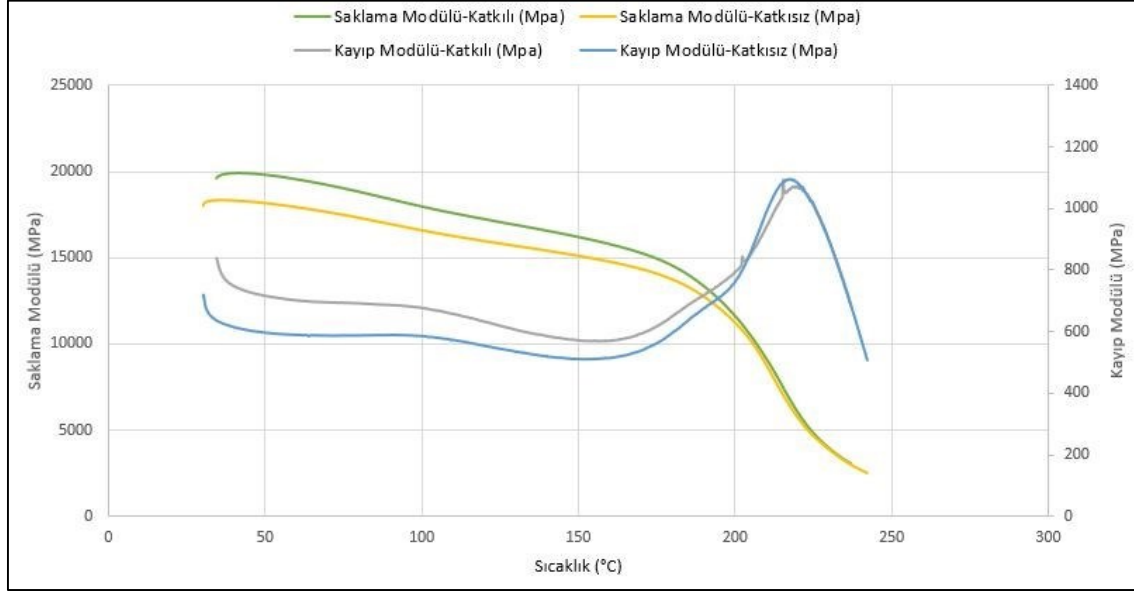
Nb katkılı üç farklı numunenin ortalama grafiğine bakıldığında Tg başlangıç yaklaşık 201 °C, Tg kayıp başlangıç yaklaşık 215 °C’ olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.4. Nb katkılı tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme gerinim-gerilim DMA sonuçları.

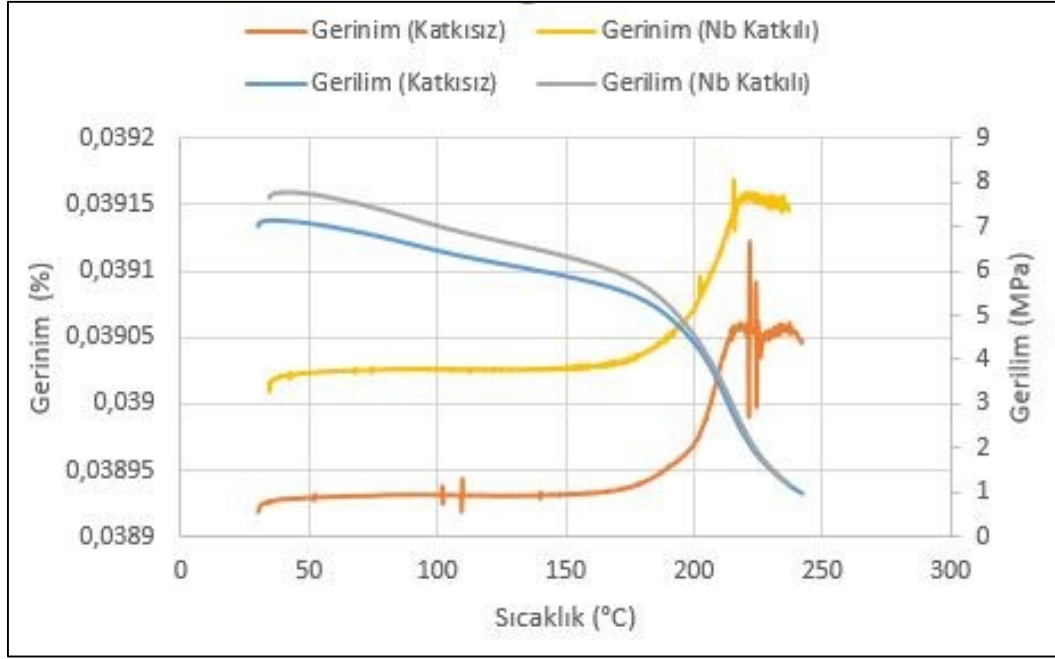
Nb katkılı üç farklı numunenin ortalama grafiğine bakıldığında gerilim Tg başlangıç sıcaklığı olan 201 °C’de ani düşme gözlemlenmiş, gerinim aksine aniden artmıştır. Tg kayıp başlangıç yaklaşık 215 °C’de alt akma oluşmuştur.

Nb katkılı malzeme ile katkısız tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzemelerin karşılaştırılması Şekil 6.5, Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.5. Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme ile Nb katkılı Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzemelerin dinamik modül DMA sonuçları.

Polimer dışı bir malzemede elastik deformasyon, uygulanan yük ile doğru orantılı olarak gecikmeksizin olur fakat polimer malzemelerde deformasyon doğrusal değildir ve bu malzemeler viskoelastik davranış gösterirler [27]. Polimer malzemeler camsı geçiş sıcaklığının üstünde plastik davranış gösterirler. Sonuçlarda Nb katkılı ve katkısız tabakalı bor fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerde camsı geçiş sıcaklıkları görülmektedir. Karşılaştırma grafiklerine bakıldığında Nb katkılı ve katkısız kompozit malzemelerde camsı geçiş sıcaklığı (T_g) başlangıç ve camsı geçiş sıcaklığı kayıp başlangıç değerleri arasında 1-2 °C arasında fark olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.6. Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme ile Nb katkılı tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzemelerin gerinim-gerilim DMA sonuçları.

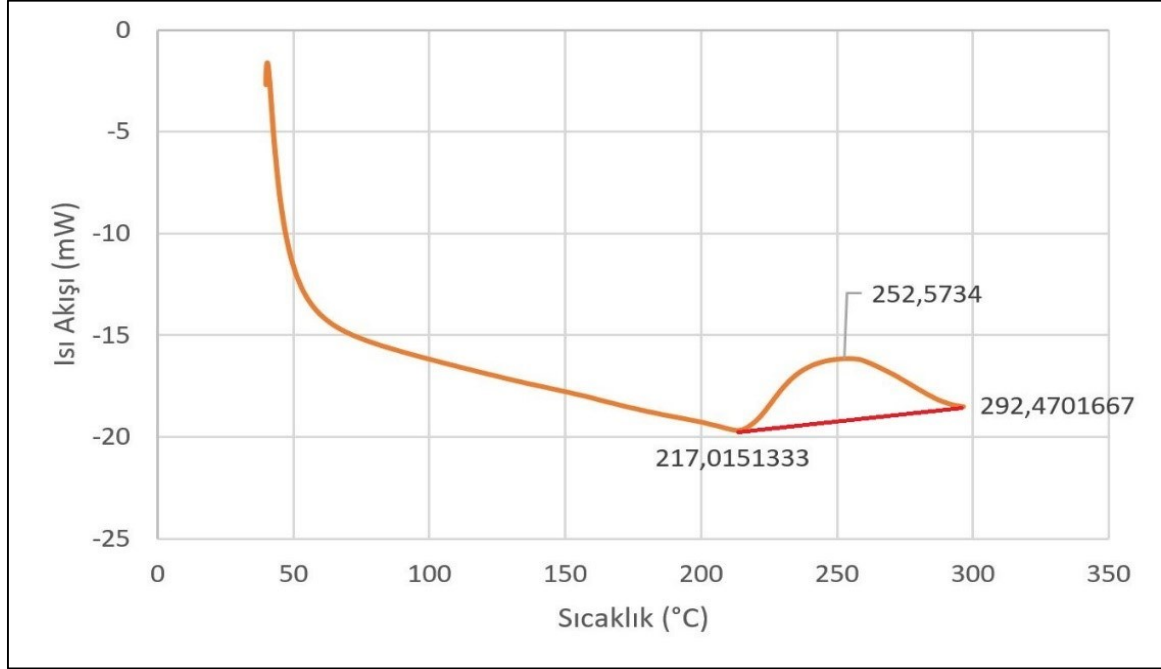
Fakat Şekil 6.6Şekil 6.2’da görüldüğü gibi katkısız gerinim eğimin alt akmada ani artış ve aralıkların fazla olduğu katkısızda ise gerinim eğiminin alt akmada yakın ani artmalar olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca Nb katkısı gerinim değerini yaklaşık 3 Mpa artırmış. Gerilim eğrilerinin ise yakın olduğu gözlemlenmiştir.

6.2. DSC Sonuçları

Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi veya DSC, bir malzemenin ısı kapasitesinin (C_p) sıcaklığa göre nasıl değiştirildiğine bakan bir termal analiz tekniğidir. Bilinen kütlenin bir örneği ısıtılır veya soğutulur ve ısı kapasitesindeki değişiklikler ısı akışındaki değişiklikler olarak izlenir. Bu, eriyikler, cam geçişleri, faz değişimleri ve kürlenme gibi geçişlerin algılanmasını sağlar.

Serim yöntemi ile üretilen kompozit malzemelerin özellikleri, yapılan işlem koşullarına özelliklerle eklenen malzemelerin türüne, miktarına göre farklı sonuçlar elde etmek mümkündür. DSC’de, üretilen iki farklı türden tabakalı kompozit malzemeden her birinden 3’er adet üretilerek teste maruz bırakılmıştır. . Elde edilen test sonuçlarında ki data başlıkları; zaman (dakika),Sıcaklık(°C), Isı akışı (mW),Örnek akış (mL/min)

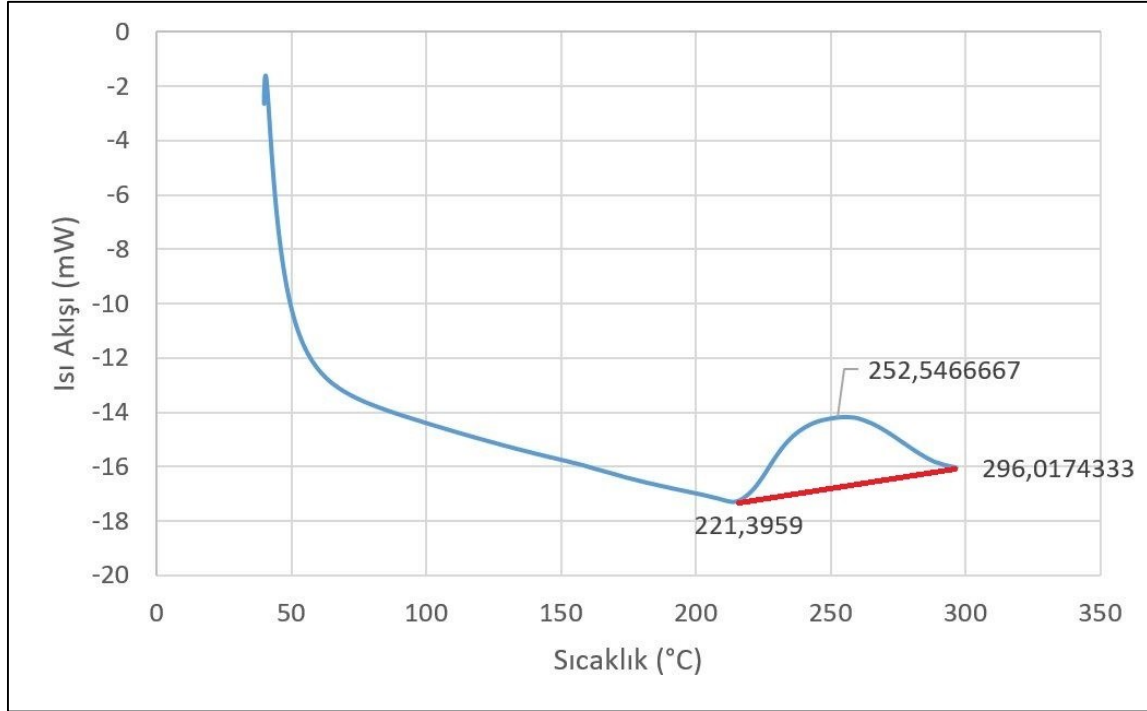
mevcuttur. Şekil 6.7, Şekil 6.8’de mevcut başlıklardan DSC testinin doğası gereği sıcaklık sabit alınıp ısı akışı ve zaman değerleri kullanılarak grafikler ortaya çıkmıştır.



Şekil 6.7. Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme DSC sonuçları.

Grafikte Camsı geçisi sıcaklığı sonu sıcaklığı (217,015133°C), Kompleks zirve sıcaklığı (256,4781333 °C) ve Kompleks sonu sıcaklığı (292,4701667 °C) arasındaki bölgenin alanı, öz ısı değerini vermektedir. Camsı geçiş sonu sıcaklığı ile Kompleks sonu sıcaklığı çizgisi eğimi ise, kürlenme oranını vermektedir [28].

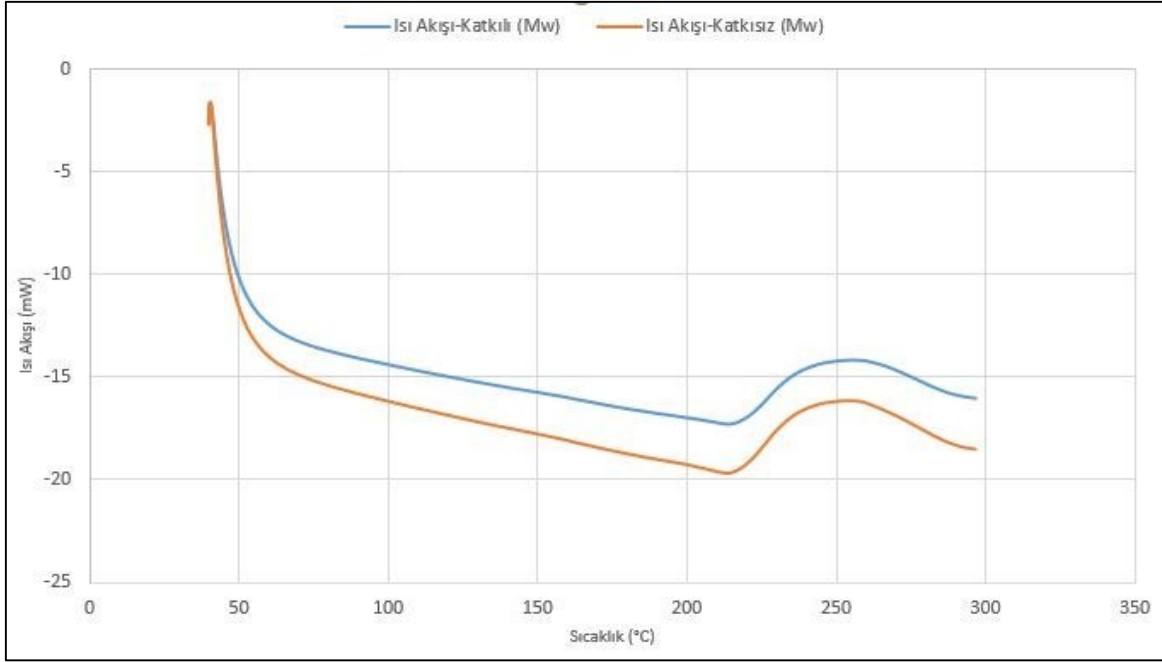
Tabakalı bor fiber takviyeli (katkısız) üç farklı numunenin ortalama grafiğine bakıldığında, öz ısı değeri alan miktarı olan 9.667 J/g'dir. Kürlenme oranı, kürlenme eğim derecesi olan %88.82 olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 6.8. Nb katkılı tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme DSC sonuçları.

Nanobor Tabakalı bor fiber takviyeli (katkılı) üç farklı numunenin ortak grafiğine bakıldığında, Grafikte Camsı geçisi sıcaklığı sonu sıcaklığı (221,3959°C), Kompleks zirve sıcaklığı (252,5466 °C) ve Kompleks sonu sıcaklığı (296,0174 °C)dir. Öz ısı değeri 9.241 J/g , kürlenme değeri ise %89.13 olarak gözlemlenmiştir.

Nanabor takviyeli malzeme ile katkısız malzemelerin DSC karşılaştırılması Şekil 6.9'de verilmiştir.



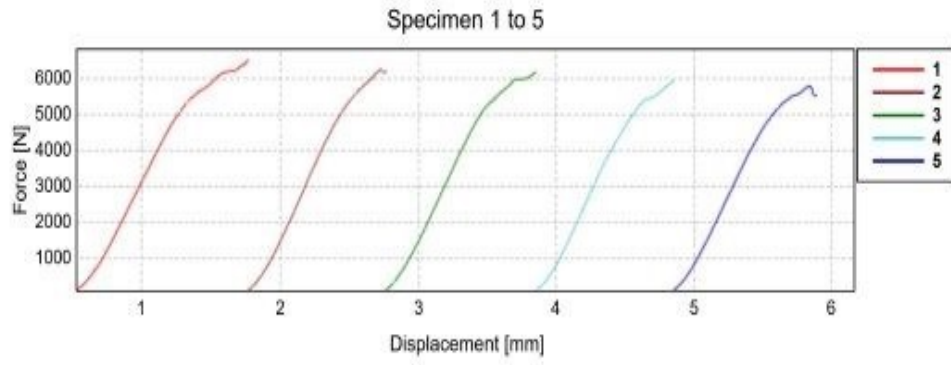
Şekil 6.9. Nb katkılı tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme ile katkısız takviyeli bor fiber takviyeli polimer malzemelerin DSC sonuçları.

Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi veya DSC, bir malzemenin ısı kapasitesinin (C_p) sıcaklığa göre nasıl değiştiğini gösteren termal bir analiz tekniğidir. Bu teknikte bilinen kütlenin bir örneği ısıtılarak veya soğutularak ısı kapasitesindeki değişiklikler ısı akışındaki değişiklikler olarak izlenir. Böylece; eriyikler, cam geçişleri, faz değişimleri ve kürlenme gibi geçişlerin algılanmasını sağlar[29]. Sonuçlarda katkılı ve katkısız tabakalı bor fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerde Isı akışı-Sıcaklık grafiği bakıldığında öz ısı ve kürlenme oranlarının yakın olduğu gözlemlenmiştir.

6.3. ILSS Sonuçları

Serim yöntemi ile üretilen kompozit malzemelerde yapışkanlık durumu arayüz temas durumu incelemek için yapılan ILSS’de, üretilen iki farklı türden tabakalı kompozit malzemeden her birinden 5’er adet kesilerek teste maruz bırakılmıştır. Epoksi katkısız test sonuçları Bknz.Şekil 6.10 Epoksi Nb katkılı test sonuçları Bknz. Şekil 6.11

Test Method	EN 2563
Test Type	Interlaminar Shear Strength
Test Speed	1±0,1 mm/min (EN2563)
Equipment	INSTRON 5985
Load No	
SOIR No	
Test Date	13.04.2022
Tested by	
Temperature	22 °C
Humidity	48 %



	Width [mm]	Thickness [mm]	Maximum Load [N]	ILSS [MPa]	FAILURE MODE
1	10.610	3.560	6504.490	129.15	
2	10.640	3.540	6257.579	124.60	
3	10.640	3.520	6160.695	123.37	
4	10.580	3.610	5912.244	116.10	
5	10.610	3.570	5781.286	114.47	

Şekil 6.10. Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme ILSS sonuçları.



Şekil 6.11. Nb katkılı tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme ILSS sonuçları.

İnterlaminar kesme mukavemetinin (ILSF) veya (ILSS) hesaplanması için bitişik denklem kullanılır.

F_m = Newton cinsinden maksimum sıkıştırma kuvveti

B = Ölçülen numune genişliği

d = Ölçülen numune kalınlığı

$$ILSS = 0,75 \times \frac{F_m}{B \times d}$$

Şekil 6.11’de 1. Numuneden alınan değerlere göre aşağıdaki örnek hesaplama yapılmıştır.

$$ILSS = 0,75 \times \frac{5876,038}{10,570 \times 3,560} = 117,12$$

Şekil 6.10'den alınan değerlere göre 5 adet bor fiber takviyeli polimer kompozit malzeme için ILSS değeri ortalaması 121.538 Mpa'dır. Şekil 6.11'den alınan değerlere göre 5 adet Nb katkılı bor fiber takviyeli polimer kompozit malzeme için ILSS değeri ortalaması 121.964 Mpa'dır. Nb katkısı ILSS mukavemetini çok azda olsa artırdığı görülmüştür.

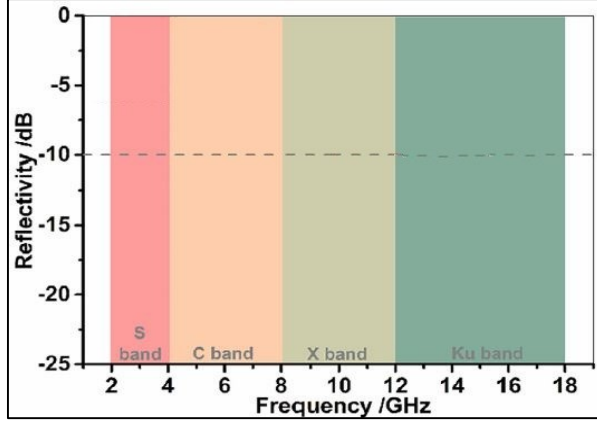
6.4. Radar Geçirgenlik Testi

Radara yakalanmayan uçaklar, düşman tarafından tespit edilmeden yüksek hızlarda ve irtifalarda silahlı ve sürekli uçuşlar için yüksek manevra kabiliyetini koruyabilme yeteneğine sahip. Taktik planlamada en önemli faktörlerden biridir. Silahlı kuvvetlerin, özellikle uçakların kaynaklarının elektromanyetik spektrumda çalışan düşman sensörlerinden, özellikle radarlardan gizlenmesi son derece önemlidir. Bu sadece misyonun başarısını etkilemekle kalmaz, aynı zamanda düşman bölgelerdeki hayatta kalma kabiliyetini de artırır. Radara yakalanmayan bir uçak, radar, lazer, kızılötesi (IR), görsel, yakın kızıl ötesi (NIR) veya akustik sensörler gibi çeşitli algılama cihazlarına daha az gözlemlenebilir (veya ideal olarak görünmez) olacaktır. Bunların arasında radarlar, mikrodalgaların ve radyo dalgalarının geniş frekans bantları üzerinde çalıştıkları ve küçük varyanttan yüksek varyant radarına kadar farklı biçimlerde bulunmaları nedeniyle başlıca tehditlerden biridir. Her türlü hava koşulunda günün her saati çalışırlar ve yer, hava, deniz ve uzaydaki çeşitli platformlardan konuşlandırılabilirler [30].

Hedef parametreleri (azimut / yükseklik, aralık, hedef, vektör vb.) Hakkında kesin bilgi sağlarlar.), böylece hedefin etkin katılımını sağlar. Radarların çalışma frekansı 3 MHz ila 300 GHz arasında değişmektedir. Uzun menzilli gözetim, askeri, uçaklar ve havacılık uygulamaları için başlıca bantlar arasında L bandı (1-2 GHz), S bandı (2-4 GHz), C bandı (4-8 GHz), X bandı (8-12 GHz), Ku bandı (12-18 GHz), K bandı (18-24 GHz), Ka bandı (25-28) bantları. Havacılık ve deniz radarlarının çoğunluğu 1-18 GHz frekans bantlarında çalışır [31].Bknz. Şekil 6.12

Polimer matriks kompozit'lerin radar emici yapılar (RAS) olarak kullanılması, radar emme özelliklerine ek olarak yapısal performans gerektirir. Pmc'lerin gelişimi, o dönemlerde

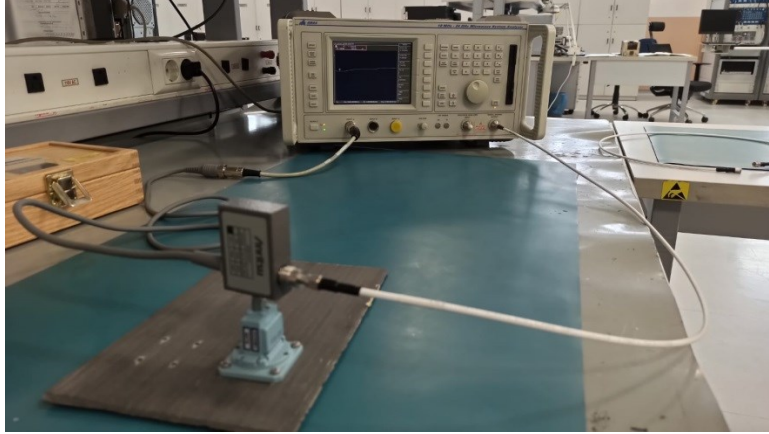
koroziona daha yatkın olan var olan metallerden daha yüksek mukavemet / ağırlık oranına sahip malzemelerin talebi nedeniyle ikinci Dünya Savaşı'ndan itibaren başlamıştır. Pmc'ler bu gereksinimlerin her ikisini de karşılar. [32-35]. Şekil 6.12'de bant aralıkları karşı gelen tanımlama görülmektedir [36].



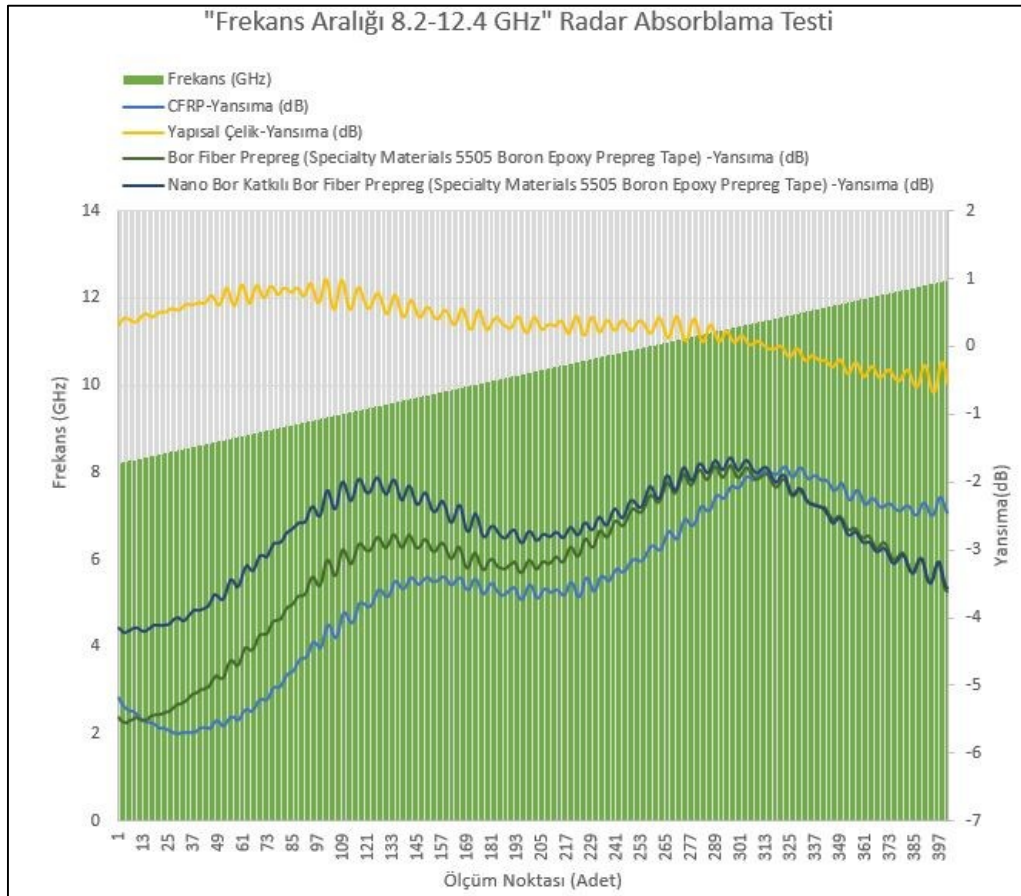
Şekil 6.12. Yansıma, Frekans-Bant Aralıkları

Tabakalı malzemelerin, ayarlanabilir kompozit özellikleri vardır. Ek olarak, radara yakalanmamak için gerekli elektromanyetik özellikler gibi işlevler, diğer malzemelere kıyasla kompozitlere kolaylıkla dâhil edilebilir. Polimer matrisi termoset, termoplastik veya her ikisinin bir karışımı olabilir. Yaygın olarak kullanılan termoset reçineler epoksiler, siyanat esterleri, bismaleimid (BMI) reçineleri vb. ve termoplastik reçineler, poli (eter keton), Poli (fenilen sülfid) (PPS), poli (eter imitler) ve reaktif monomer bazlı reçineler vb. içerir [37]. Takviyeler arasında karbon kumaşlar, cam kumaşlar, Kevlar kumaşlar vb. Bulunur. Radar engelleyici yapılar için, yüksek iletkenliği nedeniyle karbon kumaş kullanımı sınırlıdır. Doğası gereği; gelen radar dalgalarını tamamen alıcıya geri yansıtabilecek ve tehditkâr tam radar görünürlüğü sağlayacaktır. Dolgu maddeleri yarı iletken olabilir (tozlar, pullar, tüpler, lifler vb. Şeklinde karbon bazlı inklüzyonlar.), oksitler, titanatlar vb. gibi yüksek geçirgenlik (dielektrik) malzemeler, yüksek geçirgenlik (ferro veya ferri-manyetik) malzemeler, manyeto-dielektrikler (hem manyetik hem de dielektrik kombinasyonu) vb. Frekans seçici yüzeyler (FSS), [38]. metamalzeme ve devre analog (CA) emiciler gibi [39-42]. Çok katmanlı ızgara cihazları çok ince tabakalar şeklinde gelir. [43].

Bu çalışmada 2 farklı türde üretilen tabakalı kompozit malzemeler, CFRP ve yapısal çelik üzerinde temas yöntemi ile yüzeyden proplar yardımıyla 8.2-12.4 GHz (X-Band) ile 12.4-18 GHz (Ku-Band) aralıklarında frekans gönderilmiş, kayıp radar tespit edilmeye çalışılmıştır. (Resim 6.1)

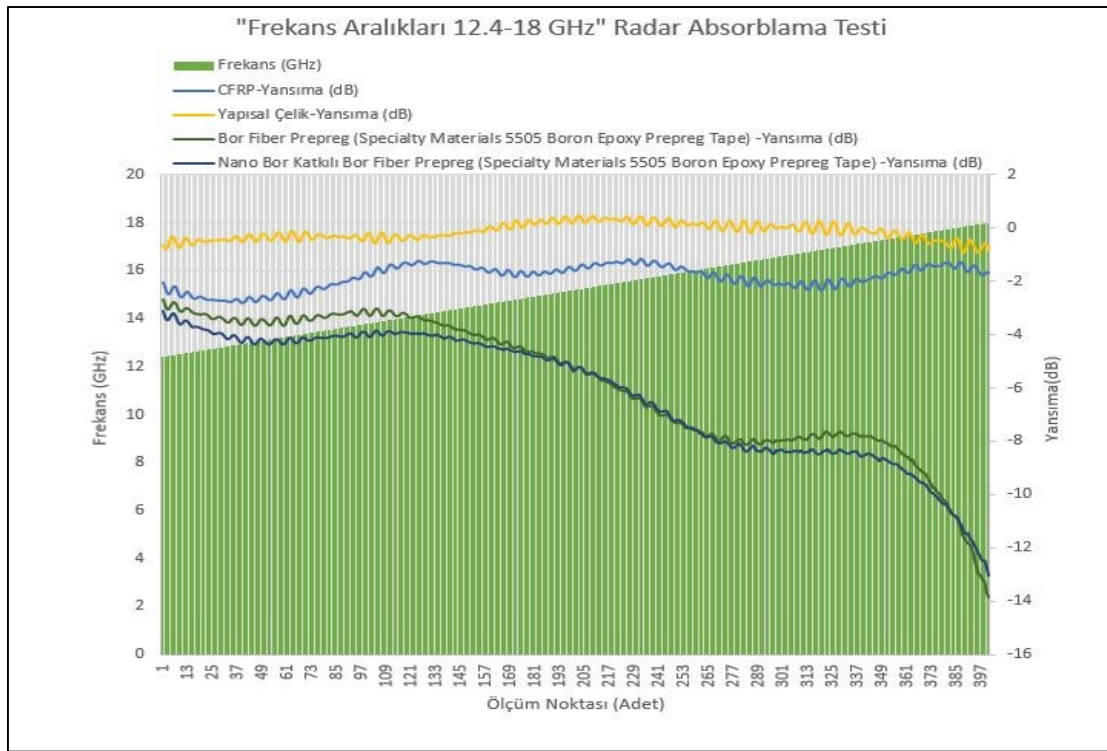


Resim 6.1. Radar Geçirgenlik Testi Kurulumu.



Şekil 6.13. 8.2-12.4 GHz (X-Band) Frekans Aralığı Radar Geçirgenlik Testi.

X-Band frekans Aralığında 4 farklı malzemedeki yansımalar Şekil 6.13’de görüldüğü gibidir. Çıkan sonuçlarda yapısal çeliğin frekans yükselmesi ile yansıma değerinde değişme olmadığı ve yansıma değerinin yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. CFRP, Bor fiber prepreg, Nanobor katkılı bor fiber prepreg malzemelerde ise frekans değeri arttıkça yansıma değerinin düştüğü, bor fiber prepreg ile nonobor katkılı bor fiber prepreg arasında ise yansıma değerlerinin yakın olduğu CRFP’ye göre yansımanın daha düşük olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla radar geçirgenliğim bor fiber prepreglerde daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 6.14. 12.4-18 GHz (Ku-Band) Frekans Aralığı Radar Geçirgenlik Testi.

Ku-Band frekans Aralığında 4 farklı malzemedeki yansımalar.

Şekil 6.14’de görüldüğü gibidir. Çıkan sonuçlarda yapısal çeliğin ve CFRP’nin frekans yükselmesi ile yansıma değerinde değişme olmadığı ve yansıma değerinin yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Bor fiber prepreg, Nanobor katkılı bor fiber prepreg malzemelerde ise frekans değeri arttıkça yansıma değerinin düştüğü, bor fiber prepreg ile nonobor katkılı bor

fiber prepreg arasında ise yansıma değerlerinin yakın gözlenmiştir. Dolasıyla radar geçirgenliğim bor fiber prepreglerde daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, tek yönlü bor fiber takviyeli polimer prepreglerden el yatırma yöntemi ile üretilen prepreg arası reçine olarak RTM6 epoksi ve RTM6 epoksiye partikül nanobor katılarak iki farklı tür tabakalı kompozit malzeme üretilmiş bu farklı malzemeler DMA, DSC, ILSS ve Radar geçirgenlik testleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmalar sonucunda elde edilen neticeler aşağıda verilmiştir;

- Tek yönlü bor fiber takviyeli prepreglerden üretilen reçine olarak RTM6 epoksi kullanılan tabakalı kompozit malzemede üç farklı test numunesinde yapılan, DMA ve DSC testleri sonucunda üç test numunesinin matris malzemenin polimer olmasından dolayı viskoelastik davranış sergilediği ve üçü arasında DMA testlerinde camsı geçiş sıcaklığı başlangıç değerlerinin 201.34°C, 203.11°C ve 199.58°C olduğu, DSC testlerinde kompleks zirve değeri 251.33°C, 251.04 °C, ve 250.66°C gözlemlenmiştir. Burada camsı geçiş sıcaklık başlangıç değerleri ve kompleks zirve sıcaklıklarının yakın olması üretimin stabil olduğu ve numunelerin uygun olduğunu ortaya çıkarmıştır.
- Nb katkılı kompozit malzemede üç farklı test numunesinde yapılan DMA testleri sonucunda camsı geçiş sıcaklığı başlangıç değeri 200.06°C, 199.31°C ve 202.76°C olduğu DSC Testlerinde kompleks zirve değeri 250.38°C, 254.54 °C, ve 250.07°C gözlenmiştir. Burada değerlerin yakın olması numune üretimini doğrulamaktadır.
- Tek yönlü bor fiber takviyeli prepreglerden üretilen reçine olarak RTM6 epoksi kullanılan tabakalı kompozit malzemede DMA sonuçları Tg başlangıç 202,809°C, Tg kayıp başlangıç 216,874°C'dir. DSC sonuçları camsı geçişi sıcaklığı sonu 217,015°C, kompleks zirve sıcaklığı 256,478°C ve kompleks sonu sıcaklığı 292,470°C'dir. Öz ısı değeri 9,667 J/g , kürlenme oranı %88.82'dir.
- Nb katkılı tek yönlü bor fiber takviyeli prepreglerden üretilen reçine olarak RTM6 epoksi kullanılan tabakalı kompozit malzemede DMA sonuçları Tg başlangıç 201,280°C, Tg kayıp başlangıç 215,335°C'dir. DSC sonuçları camsı geçişi sıcaklığı sonu 221,395°C, kompleks zirve sıcaklığı 252,546°C ve kompleks sonu sıcaklığı 296,017°C'dir. Öz ısı değeri 9,241 J/g , kürlenme oranı %89.13'dir.
- Tabakalı bor fiber takviyeli (katkısız) üç farklı numunenin ortak grafiğine bakıldığında sıcaklık arttıkça doğal olarak gerilim düşmektedir. Camsı geçiş sıcaklığı Tg başlangıç olan 202 °C'de gerilimde ani düşüş gözlemlenmiş (Plastik deformasyon bölgesi) ,

gerinim ise Tg başlangıç sıcaklığında gerilimin aksine ani yükselme gözlemlenmiştir. Gerinim Tg kayıp başlangıç sıcaklığı olan 216 °C 'de alt akma gözlemlenmiştir.

- Nb katkılı üç farklı numunenin ortalama grafiğine bakıldığında gerilim Tg başlangıç sıcaklığı olan 201 °C'de ani düşme gözlenmiş, gerinim aksine aniden artmıştır. Tg kayıp başlangıç yaklaşık 215 °C'de alt akma oluşmuştur.
- ILSS mukavemet değeri bor fiber takviyeli polimer kompozit malzemede ortalama değer 121.538 Mpa iken Nb katkılı bor fiber takviyeli polimer kompozit malzemede 121.964 Mpa'dır. Nb katkısı ILSS mukavemet değerini azda olsa artırdığı arayüz yapışkanlığı artırdığı gözlemlenmiştir.
- X-band frekans aralığında yapılan Radar geçirgenlik testi ile 8.2 GHz'de yapısal çelikte -0.308 dB, CFRP'de -5.192 dB, Bor fiber prepreg'de -5.482 dB, Nanobor katkılı Bor fiber prepreg'de -4.162 dB olarak gözlemlenmiştir. 12.4 GHz 'de yapısal çelikte -0.538 dB, CFRP'de -2.46 dB, Bor fiber prepreg'de -3.621 dB, Nanobor katkılı Bor fiber prepreg'de -3.57 dB olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak Nanobor katkısı X-Band' da yansıma değerinde değişikliğe sebep olmamıştır.
- Ku-band frekans aralığında yapılan Radar geçirgenlik testi ile 12.4 GHz'de yapısal çelikte -0.623 dB, CFRP'de -2.047 dB, Bor fiber prepreg'de -2.686 dB, Nanobor katkılı Bor fiber prepreg'de -3.109 dB olarak gözlemlenmiştir. 18 GHz 'de yapısal çelikte -0.828 dB, CFRP'de -1.682 dB, Bor fiber prepreg'de -13.857 dB, Nanobor katkılı Bor fiber prepreg'de -13.013 dB olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak %0.07 oranında Nanobor katkısı Ku-Band' da yansıma değerinde değişikliğe yaklaşık 0.7 dB değişikliğe sebep olmuştur. Fakat Ku-Band frekans aralığında Bor fiber prepreglerin radar geçirgenlik değerlerinin yapısal çelik ve CFRP'den yüksek olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışmada epoksi içerisine nano bor ilave edilmesinin malzemelerin Tg başlangıç sıcaklığında Nb katkısının 1°C düşürdüğü, Tg kayıp başlangıç sıcaklığında ise Nb katkısının 1°C düşürdüğü gözlenmiştir. Gerinim-Gerilim eğrisinde ise Nb katkısının gerilimde 3 Mpa artırdığı gözlenmiştir. ILSS mukavemetinde Nb katkısının 0.426 Mpa artırdığı gözlenmiştir. DSC testinde ise Nb katkısı kürlenme oranını 0.31 oranında artırdığı, özısı değerini 0.426 J/g düşürdüğü gözlemlenmiştir. Nb katkısının mekanik değerlerinin olumsuz yönde etkilemediği ve radar geçirgenlik testinde de Ku-Band seviyesinde 1.5 dB artırdığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca Ku-Band frekans aralığında Bor fiber prepreglerin radar

geçirgenlik değerlerinin yapısal çelik ve CFRP'den yüksek olduğu sonucu ortaya çıkarmıştır ki ileriki seviyelerde havacılık sektöründe önemli bir malzeme olma olasılığının yüksek olduğu anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Chawla, K.K. (2011). *Composite Materials Science and Engineering*. (Third Edition). USA:Springer, 7-51.
2. Peters, S.T. (1998). *Handbook of Composites*.(Second Edition).USA: Chapman@Hall, 34.
3. Mallick, P.K. (2007).*Fiber Reinforced Composites Materials Materials, Manufacturing, and Design*. (Third Edition). USA: CRC Press, 51-76.
4. Baker, A., Dutton, S., Kelly, D. (1987).*Composite Materials for Aircraft Structures*. (Second Edition). USA: AIAA Education Series, 55-67.
5. Hoa, S.V. (2009). *Principles of the Manufacturing of Composite Materials*. USA: DEStech Publications, 45-97.
6. Tuttle, M. E. (2013).*Structural Analysis of Polymeric Composite Materials*.(Second Edition). USA: CRC Press, 16-21.
7. Singh, M.K., Singh, A. (2022). *Characterization of Polymers and Fibers*. USA: WoodHead Pupliching (WP), 623.
8. Jaffe, M., Menczel, J.D. (2020).*Thermal Analysis of Textiles and Fibers*. USA:WoodHead Pupliching (WP), 1,95.
9. Knott, E.F. (1993). *Radar Cross Section Measurements*. (First Edition). USA:Van Nostrand Reinhold (VNR), 1-3.
10. Kaya, A.İ. (July 2016). *Kompozit Malzemeler ve Özellikleri*. ResearchGate, 312332966
11. Jones, R.M. (1999). *Mechanics of Composite Materials*. (Second Edition). USA: Taylor & Francis, 1-3.
12. Akbarpour, M. R., Mirabad, H.M., Alipour, S. (2020). Enhanced Tensile Properties and Electrical Conductivity of Cu-CNT Nanocomposites Processed via the Combination of Flake Powder Metallurgy and High Pressure Torsion Methods. materials science and engineering. *Materials Science and Engineering: A*, 5 (773),138-888.
13. Guttikonda. D, A., Pandey, K. M., Maity, S. R. (2018).*Fabrication of metal matrix composites by powder metallurgy: A review*, International Conference on Electrical, Electronics, Materials and Applied Science. Telangana.
14. Jabbari, M. A., Taleghani., Ruiz Navas, E. M., Torralba, J. M. (2014). Microstructural and mechanical characterisation of 7075 aluminium alloy consolidated from a premixed powder by cold compaction and hot extrusion. *Materials & Design*, (55),675-723.
15. Clyne, T.W., Withers, P.J. (2010). *An introduction to metal matrix composites*. (First Edition).UK: Cambridge university press, 2.

16. Chawla, K.K. (1998). *Composite Materials Science and Engineering*. (Second Edition). USA: Springer, 212.
17. Sanjay K.M., (2002). *Composites Manufacturing Materials, Product and Process Engineering* (First Edition), USA: CRC Press, 7-14.
18. Frederick, T. Wallenberger, Paul C. Nordine (1992). Strong, Small Diameter, Boron Fibers by LCVD, *Materials Letters*, 14, (4) 198-202.
19. Elibol, Ç. (2022). *Malzemelerin Mekanik Özellikleri*. (First Edition). Türkiye:Efe Akademi Yayınları, 1-5.
20. Hodgkinson, J.M, (2000). *Mechanical testing of advanced fibre composites*. England: CRC Press, 41.
21. Mostofa, A., Shankar, K., Morozov, E.V. (2015). Independent analytical technique for analysis of the flexural behaviour of the composite sandwich panels incorporated with shear keys concept. *Springer, Materials and Structures*, 7 (48), 2455-2474.
22. Bashir, M.A., (2021) .Use of Dynamic Mechanical Analysis (DMA) for Characterizing Interfacial Interactions in Filled Polymers. *Solids*, 2, 108–120.
23. Harris, B. (1999). *Engineering Composite Materials*. USA:Institute of Metals, 85.
24. Knott, E.F., Shaeffer, J.F., Tuley, M.T. (2004). *Radar Cross Section*. (Second Edition). USA: Scitech Pupliching, 1-3.
25. Akinay, Y. (2018). *Radar Soğurucu Kompozit Malzeme*, Doktora Tezi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metallurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı. Karabük, 31.
26. El Archi, Y., Lahellec, N., Lejeunes, S., Jouan, A., Tranquart, B. (2022). Multiscale simulation and experimental analysis of damping in CFRP structures containing rubber. *Composite Structures*, 3 (289), 2-3.
27. Menczel, J.D., Kohl, S.W. (2020). Thermal Analysis of Textiles and Fibers., M.Jaffe and J.D. Menchel (Eds.). Differential Scanning Calorimetry (DSC) in Fiber Research. Second Edition. United Kingdom. The Textile Institute Book Series, 17-69.
28. Drzezdzon, J., Jacewicz, D., Sielick, A., Chmurzynski, L. (2019). Characterization of polymers based on differential scanning calorimetry based techniques. Elsevier 10 (110),1-5.
29. Kumar, N., Vadera, S. R. (2017). In Aerospace Materials and Material Technologies: *Aerospace Materials*. Springer 3 (1),519-583.
30. Bruder, J., Carlo, J., Gurney, J., Gorman, J. (2003). *IEEE standard for letter designations for radar-frequency bands*. IEEE Aerospace & Electronic Systems Society, 1-3.
31. Mallick, P. K. (2007). *Fiber Reinforced Composite Materials, Manufacturing and Design*. (Third Edition); USA: CRC Press, 1-5.

32. Khatavlakar, N., Kandasubramanian, B. (2016). Composite materials for supersonic aircraft radomes with ameliorated radio frequency transmission-a review. *Royal Society of Chemistry*, 2 (8),6709-6892.
33. Inamdar, A., Cherukattu, J., Anand, A., Kandasubramanian, B. (2017). Thermoplastic-Toughened High-Temperature Cyanate Esters and Their Application in Advanced Composites. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 13 (57), 4479-4504.
34. Jayalakshmi, C.G., Inamdar, A., Anand, A., Kandasubramanian, B. (2018). Polymer matrix composites as broadband radar absorbing structures for stealth aircrafts. *Journal of Applied Polymer Science*, 6 (136) ,4-11.
35. Wanga, C., Leib,H., Huange, Y., Lib, H., Chenb, M., Fanga. D. (2015). Effect of delamination on the electromagnetic wave absorbing performance of radar absorbing structures. *Composites Science and Technology*, 116.
36. Mangalgiri, P. D. (1999). Composite materials for aerospace applications. *Bulletin of Materials Science*, 2(22), 657-664.
37. Vinoy, K.J., Jha, R.M. (1996). Radar absorbing materials- from theory to design and characterization. USA: Kluwer Academic Publishers, 1-5.
38. Jiang, G., Gilbert, M., Hitt, D.J., Wilcox, G.D., Balasubramanian, K. (2001). Preparation of Nickel Coated Mica as a Conductive Filler. 33(5),745-746.
39. Kandasubramanian, K. (2–4 July 2012). *Reinforcement of poly ether sulphones (PES) with exfoliated graphene oxide for aerospace applications*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Cranfield University, Bedfordshire, UK.
40. Lonkar, C.M., Kharat, D.K., Kumar, H.H., Prasad,S., Balasubramanian, K. (2013). Effect of La on Piezoelectric Properties of $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3\text{--Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ Ferroelectric Ceramics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 5 (24) 411-417.
41. Joshi, A., Bajaj, A., Singh, R., Alegaonkar, P.S., Balasubramanian, K., Datar, S. (2013). Graphene nanoribbon–PVA composite as EMI shielding material in the X band. *Nanotechnology*, 9 (24),1-3.
42. Saville, P. (2005). Review of Radar Absorbing Materials. Canada:Defence Research and Development Atlantic Dartmouth, 2-3.



Gazili olmak ayrıcalıktır